



Informe Anual: Contenido de Humedad de Suelo 2024

PSAB Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama

Región de Antofagasta

**GERENCIA DE MEDIO AMBIENTE
SQM SALAR SpA
Septiembre 2025**



Informe anual de contenido de humedad del suelo 2024

PSAB Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama

Área de Análisis de Gestión de la Información Ambiental		
Elaborado	Revisado	Aprueba
Evelin Quilarque	Anaysa Elgueta Ismael Aracena Martín Vatter	Ismael Aracena
Fecha: 27/07/2025	Fecha: 26/09/2025	Fecha: 29/09/2025



Tabla de contenidos

Resumen.....	1
1 Introducción	2
2 Objetivos	3
3 Materiales y métodos.....	4
3.1 Descripción del área de estudio.....	4
3.2 Ubicación de los puntos de muestreo	5
3.3 Parámetros utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales	6
3.4 Contenido de humedad gravimétrico del suelo	7
3.4.1 Análisis de laboratorio	7
3.4.2 Método utilizado por ETFA (ALS Life Sciences Chile)	8
3.4.3 Método utilizado por el Laboratorio Metalúrgico de SQM Salar SpA.....	8
3.5 Profundidad de la napa subterránea	10
3.6 Evaluación de la vitalidad de la vegetación	11
3.7 Relación entre las variables monitoreadas	13
3.8 Materiales implementados en monitoreo de contenido de humedad gravimétrico del suelo, profundidad de la napa subterránea y vitalidad de la vegetación	14
3.9 Fechas de muestreo, medición análisis y control de cada parámetro	14
3.10 Incertidumbres asociadas a la ejecución de las metodologías en terreno.....	15
3.10.1 Contenido de humedad gravimétrico del suelo.....	16
3.10.2 Profundidad de la napa subterránea.....	16
3.10.3 Estado vital de la vegetación	16
4 Resultados	17
4.1 Contenido de humedad de suelo	17
4.1.1 Laboratorio ALS Life Sciences Chile (ETFAs)	17
4.1.2 Laboratorio Metalúrgico SQM Salar.....	19
4.1.3 Relación de los valores reportados entre los laboratorios	20



4.2	Profundidad de la napa.....	22
4.3	Relación Contenido de humedad y napa freática	23
4.3.1	Laboratorio ALS Life Sciences Chile	23
4.3.2	Laboratorio Metalúrgico SQM Salar.....	24
4.4	Estado vital de la vegetación.....	25
4.4.1	Fenología de la vegetación.....	26
4.4.2	Porcentaje de copa viva.....	30
4.4.3	Vitalidad.....	36
5	Discusión.....	42
5.1	Variación de la profundidad de la napa en el tiempo	58
5.2	Comportamiento histórico de la napa subterránea y la humedad de suelo (2007-2024).....	69
5.3	Variación interanual de la vegetación	71
5.3.1	Antecedentes relevantes en la adquisición de datos en terreno	71
5.3.2	Análisis general de la vitalidad	71
5.3.3	Análisis por especie.....	72
5.4	Relación de la vitalidad de la vegetación y el contenido de humedad	94
5.4.1	Análisis satelital y dinámica espacial de la vegetación	98
6	Conclusiones	101
7	Bibliografía	102



Índice de Tablas

Tabla 1-1 Variables monitoreadas, frecuencia de medición y periodicidad de informes. PSA del Salar de Atacama (RCA N°226/2006).	2
Tabla 3-1. Coordenadas de los vértices del área de estudio, Borde Este del Salar de Atacama (UTM Datum WGS84 Huso 19S).....	4
Tabla 3-2. Ubicación de puntos de muestreo de humedad del suelo, nivel napa y estado vital de la vegetación. Corresponde a la Tabla 12 de la RCA 226/2006, numeral 10.3.1.1. Coordenadas (UTM Datum WGS84 Huso 19S)	5
Tabla 3-3. Componente, subcomponente, variable y parámetros considerados en el monitoreo biológico del Borde Este del Salar de Atacama, conforme a RCA N°226/2006.....	6
Tabla 3-4. Profundidad del estrato radicular por parcela de monitoreo.	7
Tabla 3-5. Fases fenológicas evaluadas durante el monitoreo.....	11
Tabla 3-6. Categorías del porcentaje de copa viva	12
Tabla 3-7. Categorías de vitalidad.....	12
Tabla 3-8. Materiales utilizados para medir contenido el de humedad de suelo, profundidad de la napa subterránea y vitalidad de la vegetación.....	14
Tabla 3-9. Fechas de muestreo y actividades realizadas por parámetro ambiental durante 2024	15
Tabla 4-1. Contenido de humedad gravimétrico del suelo medido por ALS (ETFA) en las parcelas de monitoreo para las cuatro campañas 2024. Los pozos están ordenados de oeste (L7-7) a este (L4-3).....	17
Tabla 4-2. Contenido de humedad gravimétrico del suelo medido por el Laboratorio Metalúrgico SQM Salar en las parcelas de monitoreo para las cuatro campañas del año 2024	19
Tabla 4-3. Profundidad de la napa de las parcelas de monitoreo en las cuatro campañas del año 2024.	22
Tabla 4-4. Principales especies de flora monitoreadas durante la campaña 2024.....	26
Tabla 4-5. Resumen de individuos por categoría de fenología.....	26
Tabla 4-6. Número y proporción de individuos por clase de copa viva	31
Tabla 4-7. Resumen de individuos por categoría de vitalidad.....	37
Tabla 5-1. Contenido de humedad del suelo (g/g) reportado por el laboratorio metalúrgico de SQM Salar. Mes de enero, período 2007–2024.....	44
Tabla 5-2. Contenido de humedad del suelo (g/g) reportado por el laboratorio metalúrgico de SQM Salar. Mes de abril, período 2007 – 2024	45
Tabla 5-3. Contenido de humedad del suelo (g/g) reportado por el laboratorio metalúrgico de SQM Salar. Mes de julio, período 2007 – 2024	46
Tabla 5-4. Contenido de humedad del suelo (g/g) reportado por el laboratorio metalúrgico de SQM Salar. Mes de octubre, período 2007 – 2024.....	47



Tabla 5-5. Contenido de humedad del suelo (g/g) reportado por el laboratorio metalúrgico de SQM Salar. Promedio anual, período 2007-2024	48
Tabla 5-6. Contenido de humedad del suelo (g/g). ETFA* SGS (2016-2017), Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA (2018-2022) y ALS Life Sciences Chile (2024). Enero	49
Tabla 5-7. Contenido de humedad del suelo (g/g). ETFA* SGS (2016-2017), Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA (2018-2022) y ALS Life Sciences Chile (2024). Abril	50
Tabla 5-8. Contenido de humedad del suelo (g/g). ETFA* SGS (2016-2017) Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA (2018-2022) y ALS Life Sciences Chile (2023). Julio	51
Tabla 5-9. Contenido de humedad del suelo (g/g). ETFA* SGS (2016-2017), Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA (2018-2022) y ALS Life Sciences Chile (2023). Octubre.....	52
Tabla 5-10. Contenido de humedad del suelo (g/g). ETFA SGS (2016-2017), Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA (2018-2022) y ALS Life Sciences Chile (2023). Promedio anual, período 2016 – 2024	53
Tabla 5-11. Profundidad de la napa (m) por pozo de monitoreo de enero durante el periodo 2007 a 2024	60
Tabla 5-12. Profundidad de la napa (m) por pozo de monitoreo de abril durante el periodo 2007 a 2024	61
Tabla 5-13. Profundidad de la napa (m) por pozo de monitoreo de julio durante el periodo 2007 a 2024	62
Tabla 5-14. Profundidad de la napa (m) por pozo de monitoreo de octubre durante el periodo 2007 a 2024.....	63
Tabla 5-15. Profundidad promedio anual (m) de la napa por pozo de monitoreo durante el período 2007 a 2024 64	
Tabla 5-16. Coeficientes de correlación (r) y valores de p entre CHS y profundidad de la napa freática para cada pozo monitoreado (2007–2024).	70
Tabla 5-17. Resumen de la variación del contenido de humedad gravimétrico del suelo (g/g) por categoría de vitalidad para el 2024.....	94
Tabla 5-18. Resumen de la variación del contenido de humedad gravimétrico del suelo (g/g) por categoría de vitalidad para el periodo 2007-2023.....	95
Tabla 5-19. Resumen de la variación de la profundidad de la napa por categoría de Vitalidad	96



Índice de Figuras

Figura 3.1 Ubicación de los pozos, parcelas de monitoreo de contenido gravimétrico de CHS y vegetación.....	6
Figura 3.2. Método para determinar el contenido de humedad del suelo.....	9
Figura 3.3. Esquema del proceso de medición en un pozo	10
Figura 3.4. Medición del estado vital de la vegetación (a=individuo monitoreado, b=copa viva).....	13
Figura 4.1.Variación promedio anual del contenido de humedad gravimétrico del suelo, según ALS Life Sciences Chile, para el año 2024	18
Figura 4.2.Variación promedio anual del contenido de humedad gravimétrico del suelo, según Laboratorio Metalúrgico de SQM Salar, para el año 2024	20
Figura 4.3. Comparación de los valores de contenido de humedad gravimétrico obtenido por el Laboratorio Metalúrgico SQM Salar y Laboratorio ALS Life Sciences Chile para el año 2024.	21
Figura 4.4. Promedio de la profundidad de la napa y su desviación estándar por parcela de monitoreo en las cuatro campañas del año 2024.	23
Figura 4.5. Relación entre el contenido de humedad gravimétrico del suelo medido por ALS Life Sciences Chile y la profundidad de la napa en cada campaña del año 2024	24
Figura 4.6. Relación entre el contenido de humedad gravimétrico del suelo medido por SQM Salar y la profundidad de la napa en cada campaña del año 2024.....	24
Figura 4.7. Fenología de los individuos monitoreados en las campañas 2024.....	27
Figura 4.8. Fenología de los individuos de <i>Atriplex atacamensis</i> monitoreados en las campañas 2024.....	28
Figura 4.9. Fenología de los individuos de <i>Distichlis spicata</i> monitoreados en las campañas 2024.....	29
Figura 4.10. Fenología de los individuos de <i>Nitrophila atacamensis</i> monitoreados en las campañas 2024.....	29
Figura 4.11. Fenología de los individuos de <i>Tessaria absinthioides</i> monitoreados en las campañas de 2024.....	30
Figura 4.12. Porcentaje de copa viva de los individuos monitoreados en 2024	32
Figura 4.13. Porcentaje de copa viva de los individuos de <i>Atriplex atacamensis</i> monitoreados en las campañas 2024	33
Figura 4.14. Porcentaje de copa viva de los individuos de <i>Distichlis spicata</i> monitoreados en las campañas de 2024	34
Figura 4.15. Porcentaje de copa viva de los individuos de <i>Nitrophila atacamensis</i> monitoreados en las campañas 2024	35
Figura 4.16. Porcentaje de copa viva de los individuos de <i>Tessaria absinthioides</i> monitoreados en las campañas de 2024	36
Figura 4.17. Vitalidad de los individuos monitoreados en las campañas de 2024.....	37
Figura 4.18. Vitalidad de los individuos de <i>Atriplex atacamensis</i> monitoreados en la campaña 2024	38
Figura 4.19. Vitalidad de los individuos de <i>Distichlis spicata</i> monitoreados en las campañas de 2024.....	39



Figura 4.20. Vitalidad de los individuos de <i>Nitrophila atacamensis</i> monitoreados en las campañas de 2024	40
Figura 4.21 Vitalidad de los individuos de <i>Tessaria absinthioides</i> monitoreados en las campañas de 2024	41
Figura 5.1. Variación del contenido de humedad gravimétrico del suelo, por parcela de monitoreo, desde el año 2007 a 2024.....	43
Figura 5.2. Detalle por parcela de monitoreo de la variación del promedio anual de contenido de humedad gravimétrico del suelo, medido desde el año 2007 a 2024	55
Figura 5.3. Detalle por parcela de monitoreo de la variación del promedio anual de contenido de humedad gravimétrico del suelo, medido desde el año 2007 a 2024	56
Figura 5.4. Detalle por parcela de monitoreo de la variación del promedio anual de contenido de humedad gravimétrico del suelo, medido desde el año 2007 a 2024	57
Figura 5.5. Variación promedio histórica de la profundidad de la napa (2007-2024), por parcela de monitoreo para los cuatro trimestres estudiados	59
Figura 5.6. Variación del promedio anual de profundidad de la napa del suelo, medido desde el año 2007 a 2024	66
Figura 5.7. Variación del promedio anual de profundidad de la napa del suelo, medido desde el año 2007 a 2024	67
Figura 5.8. Variación del promedio anual de profundidad de la napa del suelo, medido desde el año 2007 a 2024	68
Figura 5.9 Relación entre la concentración de CHS y la profundidad de la napa en distintos pozos de monitoreo durante las campañas 2007-2024	70
Figura 5.10. Variación del número de individuos por categoría de vitalidad, según trimestre de monitoreo desde el año 2007 a 2024	72
Figura 5.11. <i>Atriplex atacamensis</i> : Número de individuos por categoría de fenología, campañas 2007 a 2024	75
Figura 5.12. <i>Atriplex atacamensis</i> : Número de individuos por categoría de copa viva, campañas 2007 a 2024	76
Figura 5.13. <i>Atriplex atacamensis</i> : Número de individuos por clase de vitalidad, campañas 2007 a 2024	77
Figura 5.14. <i>Distichlis spicata</i> : Número de individuos por categoría de fenología, campañas 2007 a 2024	80
Figura 5.15. <i>Distichlis spicata</i> : Número de individuos por clase de copa viva, campañas 2007 a 2024	81
Figura 5.16. <i>Distichlis spicata</i> : Número de individuos por categoría de vitalidad, campañas 2007 a 2024	82
Figura 5.17. <i>Nitrophila atacamensis</i> : Número de individuos por categoría de fenología, campañas 2007 a 2024	85
Figura 5.18. <i>Nitrophila atacamensis</i> : Número de por categoría por clase de copa viva, campañas 2007 a 2024	86
Figura 5.19. <i>Nitrophila atacamensis</i> : Número de individuos por categoría de vitalidad, campañas 2007 a 2024	87
Figura 5.20. <i>Tessaria absinthioides</i> : Número de individuos por categoría de fenología, campañas 2007 a 2024	91
Figura 5.21. <i>Tessaria absinthioides</i> : Número de individuos por clase de copa viva, campañas 2007 a 2024	92
Figura 5.22. <i>Tessaria absinthioides</i> : Número de individuos por categoría de vitalidad, campañas 2007 a 2024	93



Figura 5.23. Variación del contenido de humedad gravimétrico del suelo por categoría de vitalidad 2024	94
Figura 5.24. Relación entre el contenido de humedad del suelo (CHS) y la proporción de individuos por categoría de vigor (periodo 2007-2024)	95
Figura 5.25. Variación de la profundidad de la napa por categoría de Vitalidad 2024	96
Figura 5.26. Relación entre la profundidad de la napa freática y la proporción de individuos por categoría de vigor (periodo 2007–2024).....	97



Anexos

Anexo 1. Estado vital de la vegetación

Anexo 2. Informe de toma de muestras y análisis CHS y documentos de certificación ETFA ALS Life Sciences Chile S.A.

Anexo 3. Registro de Precipitaciones mensuales del periodo comprendido entre 2007-2024

Anexo 4. Responsables y participantes del seguimiento ambiental

Anexo 5. Resultados del modelo estadístico

Anexo 6. Registro de la Napa subterránea

Anexo 7. Medio de verificación de ingreso a la Reserva Nacional Los Flamencos (RNLF)



Resumen

El presente informe expone los resultados del monitoreo ambiental realizado durante el año 2024 en el Borde Este del Salar de Atacama, en el marco del Plan de Seguimiento Ambiental Biótico de Vegetación y Flora del proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”, aprobado mediante la RCA N°226/2006, conforme al numeral 10.3.1. El objetivo del seguimiento es evaluar posibles efectos sobre la vegetación asociados a la extracción de agua subterránea, mediante el análisis de tres variables clave: contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS), profundidad de la napa freática y estado vital de la vegetación.

El monitoreo se realiza sobre 18 parcelas permanentes asociadas a pozos de observación hidrogeológica. La metodología se ha mantenido constante desde 2007, basada en el seguimiento de individuos vegetales previamente seleccionados, lo que ha permitido generar un seguimiento ambiental sólido y establecer tendencias multianuales.

Durante 2024, los valores de CHS mantuvieron un patrón espacial similar al observado en años anteriores, con mayores niveles de humedad en las parcelas ubicadas al oeste del salar, donde la napa freática se encuentra más próxima a la superficie. En términos de variación anual, se observó una tendencia significativa al alza en un 5,55 % de las muestras y una tendencia a la baja en otro 5,55 %. Por otro lado, respecto a la profundidad de la napa freática, un 61,11 % de los pozos mostró aumento respecto al año base, aunque sin superar los rangos históricos. Destaca el pozo L4-3 por su disminución acumulada de 2,56 metros en la profundidad de la napa desde el inicio del monitoreo.

Respecto a la vegetación, se observó una alta proporción de individuos en categorías de vitalidad baja (seco, muy débil y débil), especialmente durante los trimestres de otoño e invierno. Sin embargo, esta condición se interpreta como parte del ciclo natural de las especies monitoreadas, considerando que se trata de individuos fijos evaluados desde 2007. La especie *Tessaria absinthioides* es la más representativa en número de ejemplares, mostrando una marcada estacionalidad en su fenología. No obstante, se evidenció actividad vegetativa estacional en especies como *Atriplex atacamensis*, *Distichlis spicata* y *Nitrophila atacamensis*, lo que sugiere estrategias de adaptación diferenciadas al régimen hídrico local.

El análisis estadístico multivariado confirma una relación positiva y significativa entre el CHS y la vitalidad de la vegetación, lo que respalda la hipótesis de que una mayor disponibilidad hídrica favorece el estado fisiológico de las plantas. No obstante, la relación entre la profundidad de la napa y la vitalidad no resulta biológicamente coherente, lo que sugiere que esta correlación no implica causalidad directa.

A pesar de la estabilidad general del modelo de monitoreo, se identificaron elementos que podrían limitar su capacidad para captar dinámicas recientes. En particular, la permanencia de individuos reportados senescentes de manera consistente por varias campañas y la exclusión de nuevos ejemplares que hayan germinado o crecido recientemente en las parcelas reducen la representatividad ecológica del sistema. En consecuencia, se recomienda considerar ajustes metodológicos que fortalezcan la sensibilidad del monitoreo, como la incorporación de individuos activos recientes, el reemplazo de ejemplares irreconocibles y la incorporación de variables complementarias que mejoren la evaluación integral del sistema vegetal.



1 Introducción

El presente informe forma parte del Plan de Seguimiento Ambiental Biótico de Vegetación y Flora del proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”, aprobado mediante Resolución Exenta N°226/2006, específicamente en su numeral 10.3.1. Dicho plan tiene como propósito evaluar los posibles efectos ambientales derivados de la operación minera, con énfasis en las extracciones de agua subterránea desde los pozos Mullay-1, Allana-1 y Camar-2 (en operación desde 2008).

El monitoreo se focaliza en tres variables ambientales clave: el contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS), la profundidad de la napa freática y el estado vital de la vegetación. Estas variables se evalúan sistemáticamente en 18 parcelas permanentes ubicadas en el Borde Este del Salar de Atacama, área que representa la zona de influencia directa de los pozos de extracción.

Desde el año 2008, se han desarrollado campañas de monitoreo trimestrales que permiten caracterizar la dinámica espacio-temporal de dichas variables (Tabla 1-1), aportando una base robusta para el análisis de tendencias y variabilidad interanual. El presente documento corresponde al décimo séptimo Informe Anual Operacional, consolidando los resultados obtenidos durante las cuatro campañas realizadas en enero, abril, julio y octubre del año 2024.

La zona de estudio se encuentra en un ecosistema frágil y de alta relevancia ecológica, abarcando sectores de la Reserva Nacional Los Flamencos, como Soncor y Aguas de Quelana, los cuales albergan vegetación nativa adaptada a condiciones ambientales extremas. Por ello, el monitoreo adquiere un valor estratégico para la gestión sostenible del recurso hídrico y la conservación de la flora del salar.

Este informe tiene como objetivo entregar una evaluación técnica integral del comportamiento de las variables monitoreadas durante el año 2024, integrando análisis estadísticos comparativos con las tendencias históricas del período 2008–2023. Además, se profundiza en la comprensión de las interacciones entre el CHS, la napa freática y la vitalidad de la vegetación, incorporando modelos estadísticos multivariados que fortalecen la interpretación ecológica y permiten detectar patrones relevantes para la toma de decisiones ambientales.

Tabla 1-1 *Variables monitoreadas, frecuencia de medición y periodicidad de informes. PSA del Salar de Atacama (RCA N°226/2006).*

Componente	Subcomponente	Variable	Frecuencia de medición	Frecuencia de reportes	Entidad responsable
Biota terrestre	Suelo	Contenido de humedad del suelo	Trimestral	Anual	SQM / ETFA
Biota terrestre	Vegetación	Estado vital y sanitario	4 mediciones al año	Anual	SQM
Hídrico	Agua subterránea	Nivel freático	Diario/Mensual*	Anual	SQM / ETFA

(*) El nivel de la napa subterránea es medido con una frecuencia mensual en el contexto del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico. Para efectos del presente informe sólo se utiliza la información de los meses de enero, abril, julio y octubre. Fuente: RCA N°226/2006. El Programa de Cumplimiento (PdC) establece que para los pozos que son parte del Plan de Contingencias (PC) la frecuencia de medición es diaria.

(**) De acuerdo con la RCA N°226/2006, la frecuencia de medición de esta variable es semestral (dos veces al año), sin embargo, para ampliar la información los datos son tomados trimestralmente (cuatro veces al año).

Fuente: elaboración propia



2 Objetivos

La RCA N°226/2006, numeral 10.3.1 indica que *“La medición del contenido de humedad del suelo tiene por objeto detectar eventuales cambios en dicha variable relacionados con un potencial descenso del nivel freático ocasionado por la extracción de agua dulce de los pozos Mullay-1, Allana-1 y Camar-2¹, que pudieran alterar el desarrollo de la vegetación del Borde Este del Salar de Atacama”*.

En este contexto, el presente informe tiene como objetivo evaluar el comportamiento de la vegetación, el contenido de humedad gravimétrica del suelo y el nivel de la napa freática en el Borde Este del Salar de Atacama durante el año 2024, con el fin de identificar posibles efectos asociados a la operación de los pozos mencionados, en el marco del Plan de Seguimiento Ambiental Biótico de Vegetación y Flora.

¹ Pozo inoperativo desde el 2018 e infraestructura desmantelada en el 2021, de acuerdo con la acordado con la Comunidad Atacameña de Camar



3 Materiales y métodos

3.1 Descripción del área de estudio

El Salar de Atacama se localiza en el sector oriental de la Región de Antofagasta, constituyendo la mayor cuenca salina del país. Este sistema se inserta dentro de una cuenca endorreica caracterizada por condiciones climáticas extremas, y se sitúa a unos 55 km de San Pedro de Atacama y 316 km al noreste de la ciudad de Antofagasta.

La operación de SQM Salar SpA en este territorio contempla la explotación de salmuera desde el núcleo del salar y la extracción de agua subterránea desde el borde oriental, a través de pozos ubicados en la unidad aluvial, para la producción de sales potásicas y concentrados de litio.

El presente monitoreo se enmarca en el Plan de Seguimiento Ambiental Biótico de Vegetación y Flora, asociado a la Resolución de Calificación Ambiental N°226/2006. Este plan considera como área de estudio una franja vegetal continua localizada en el borde este del salar, donde se emplazan 18 parcelas permanentes de monitoreo. En estas se evalúan de forma sistemática tres variables ecológicas: el contenido de humedad del suelo (CHS), la profundidad de la napa freática y el estado vital de la vegetación.

Las coordenadas geográficas que delimitan el polígono de estudio se encuentran detalladas en la Tabla 3-1, mientras que su localización y contexto geográfico se visualizan en Figura 3.1. Esta última también muestra la distribución de los pozos de bombeo y la red de monitoreo implementada.

Cabe destacar que la zona monitoreada se superpone con áreas protegidas del Sistema Nacional de Áreas Silvestres del Estado (SNASPE), específicamente en los sectores denominados Soncor y Aguas de Quelana de la Reserva Nacional Los Flamencos (RNLF). Esta superposición refuerza la necesidad de un seguimiento ambiental riguroso, dada la sensibilidad ecológica del ecosistema.

Tabla 3-1. Coordenadas de los vértices del área de estudio, Borde Este del Salar de Atacama (UTM Datum WGS84 Huso 19S).

Vértice	Este	Norte
1	582.785	7.425.844
2	596.493	7.425.844
3	596.493	7.385.584
4	591.391	7.372.190
5	584.430	7.372.190
6	584.437	7.384.442
7	589.784	7.384.440
8	589.789	7.413.543
9	582.785	7.413.543

Fuente: Elaboración propia en base a RCA N°226/2006



3.2 Ubicación de los puntos de muestreo

El monitoreo de las variables ambientales se lleva a cabo en 18 parcelas permanentes, las cuales se mantienen fijas en el tiempo para garantizar la comparabilidad de los resultados. Cada parcela corresponde a una unidad de muestreo de forma circular con un radio de 5 metros, establecida en las proximidades de pozos de observación piezométrica que forman parte del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico, en cumplimiento de lo dispuesto en la RCA N°226/2006.

En estas parcelas se ejecutan tres mediciones principales: el contenido gravimétrico de humedad del suelo, la profundidad de la napa freática y el estado vital de la vegetación. Las coordenadas UTM (Datum WGS84, Huso 19S) de cada sitio de monitoreo se presentan en la Tabla 3-2. La ubicación geoespacial de los puntos ha sido organizada de norte a sur, lo que permite una mejor interpretación espacial en conjunto con la Figura 3.1.

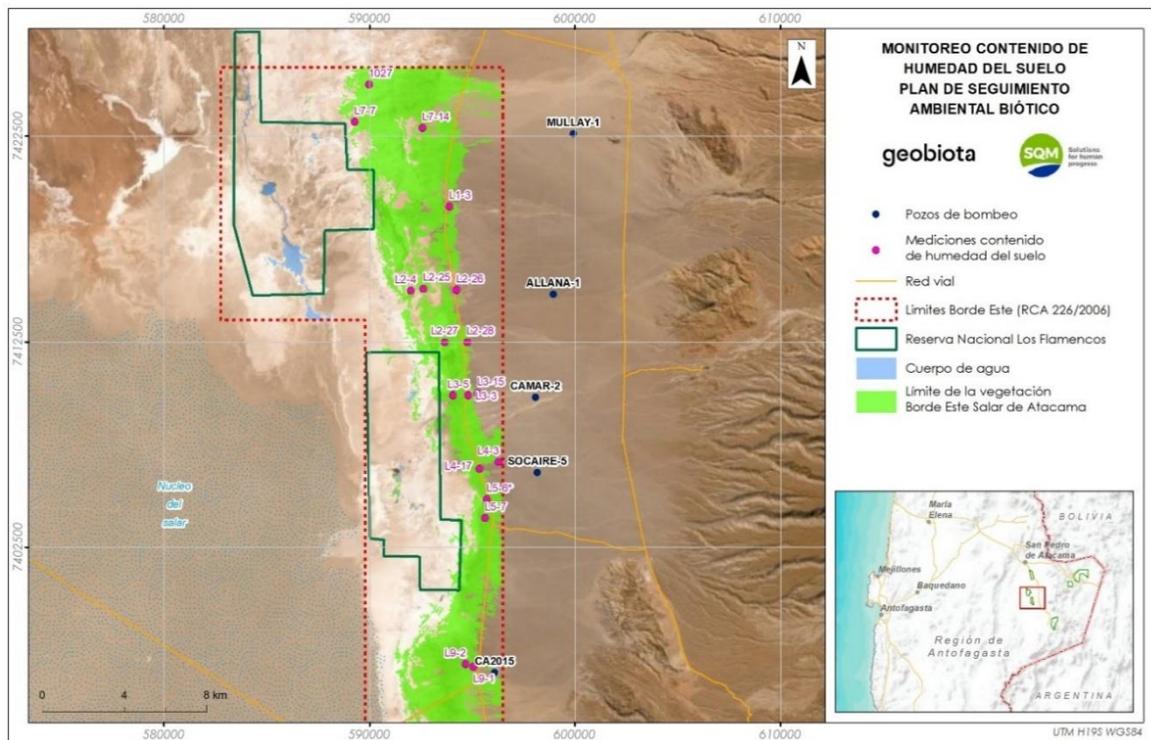
Tabla 3-2. Ubicación de puntos de muestreo de humedad del suelo, nivel napa y estado vital de la vegetación. Corresponde a la Tabla 12 de la RCA 226/2006, numeral 10.3.1.1. Coordenadas (UTM Datum WGS84 Huso 19S)

N°	Pozo	Este	Norte	Vegetación existente
1	1027	589.996	7.425.017	Pradera muy abierta Grama Salada
2	L7-7	589.303	7.423.190	Pradera rala de Grama Salada
3	L7-14	592.600	7.422.900	Matorral ralo de Brea-Cachiyuyo
4	L1-3	593.909	7.419.080	Matorral ralo de Cachiyuyo
5	L2-26	594.250	7.415.000	Matorral ralo de Brea-Cachiyuyo
6	L2-25	592.645	7.415.077	Matorral ralo de Brea-Cachiyuyo
7	L2-4	592.031	7.414.984	Matorral abierto de Brea-Cachiyuyo
8	L2-28	594.770	7.412.480	Matorral abierto de Brea-Cachiyuyo
9	L2-27	593.670	7.412.480	Matorral muy abierto de Brea-Cachiyuyo
10	L3-15	595.270	7.410.000	Matorral ralo de Brea-Cachiyuyo
11	L3-5	594.086	7.409.890	Matorral ralo de Brea-Cachiyuyo
12	L3-3	594.816	7.409.882	Matorral abierto de Brea-Cachiyuyo
13	L4-3	596.294	7.406.648	Matorral ralo de Rica rica-Pingo pingo
14	L4-17	595.380	7.406.312	Matorral ralo de Brea-Cachiyuyo
15	L5-6 ²	595.737	7.404.824	Matorral ralo de Brea-Cachiyuyo
16	L5-7	595.653	7.403.910	Matorral semidenso de Brea-Cachiyuyo
17	L9-2	594.684	7.396.800	Matorral muy abierto de Brea-Cachiyuyo
18	L9-1	595.067	7.396.685	Matorral muy abierto de Cachiyuyo

Fuente: RCA N°226 de 2006. Proyecto "Cambios mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama"

² El pozo L5-6 reemplaza al pozo L4-7, ya que este último se encontraba fuera de la formación vegetacional matorral ralo Brea – Cachiyuyo. La modificación fue informada en el primer informe de monitoreo.

Figura 3.1 Ubicación de los pozos, parcelas de monitoreo de contenido gravimétrico de CHS y vegetación



Fuente: Geobiota, Informe anual de suelo 2023

3.3 Parámetros utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales

De acuerdo con lo establecido en la RCA N°226/2006, el seguimiento ambiental contempla la medición de una serie de parámetros específicos asociados al componente Biota Terrestre, subcomponente Plantas. Las variables evaluadas corresponden al contenido de humedad gravimétrica del suelo (%), la profundidad de la napa freática (m) y el estado vital de la vegetación.

Este último se caracteriza mediante tres indicadores: vitalidad, porcentaje de copa viva y fenología. La Tabla 3-3 resume la relación entre componente, subcomponente, variable y los parámetros utilizados para su evaluación.

Tabla 3-3. Componente, subcomponente, variable y parámetros considerados en el monitoreo biológico del Borde Este del Salar de Atacama, conforme a RCA N°226/2006

Componente	Subcomponente	Variable	Parámetro
Biota Terrestre	Plantas	Vegetación	Contenido humedad del suelo (CHS) Profundidad de la napa Estado vital de la vegetación - Vitalidad



Componente	Subcomponente	Variable	Parámetro
			- Copa viva - Fenología

3.4 Contenido de humedad gravimétrico del suelo

Para la medición del contenido de humedad gravimétrico del suelo, se extrajeron tres muestras por parcela desde una calicata, a una profundidad definida por la presencia radicular de la vegetación. Esta profundidad fue establecida en la campaña de abril de 2007 y se mantiene como referencia para cada punto de monitoreo (ver Tabla 3-4).

Tabla 3-4. Profundidad del estrato radicular por parcela de monitoreo.

N°	Parcela de monitoreo	Profundidad del estrato (cm)	N°	Parcela de monitoreo	Profundidad del estrato (cm)
1	1027	17-35	10	L3-15	70-80
2	L7-7	25-35	11	L3-5	35-60
3	L7-14	25-45	12	L3-3	53-70
4	L1-3	57-67	13	L4-3	40-50
5	L2-26	40-50	14	L4-17	25-35
6	L2-25	25-30	15	L5-6	55-60
7	L2-4	40-50	16	L5-7	70-90
8	L2-28	30	17	L9-2	48-70
9	L2-27	10-45	18	L9-1	37-60

Fuente: Elaboración propia

3.4.1 Análisis de laboratorio

Las muestras de suelo fueron analizadas por dos laboratorios:

- ALS Life Sciences Chile, Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental (ETFA), autorizada por la Resolución Exenta N°178/2017 SMA, N°37/2019 SMA y N°63/2019 SMA. A excepción de los años 2016-2017, donde los análisis fueron realizados por SGS Chile Ltda, que contaba con acreditación ETFA en dicho periodo.
- Laboratorio Metalúrgico de SQM Salar SpA, el cual no cuenta con acreditación como ETFA, pero ha realizado históricamente las mediciones del monitoreo, razón por la cual se continúa utilizando de forma complementaria para asegurar la trazabilidad de los datos.

Esta doble medición busca mantener la continuidad en la serie de datos, considerando que hasta el año 2016 no era exigible la participación de entidades acreditadas por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), de acuerdo con lo establecido en la Resolución Exenta N°986/2016, posteriormente derogada por la Resolución Exenta N°573/2022 del Ministerio del Medio Ambiente.



3.4.2 Método utilizado por ETFA (ALS Life Sciences Chile)

La determinación del contenido de humedad gravimétrico se realizó mediante el método de ensayo MLAB-S-01, basado en la norma NCh 1515 Of.79, aprobada por el Instituto Nacional de Normalización (INN).

El procedimiento consiste en el secado de las muestras de suelo en una estufa a una temperatura de 110 ± 5 °C, hasta obtener un peso constante. La humedad se calcula mediante la siguiente fórmula:

Fórmula 1. Cálculo del contenido de humedad (ALS)

$$w = \frac{mh - ms}{ms - mr} \times 100$$

Donde:

- w : humedad (%)
- mh : masa del recipiente + muestra húmeda (g)
- ms : masa del recipiente + muestra seca (g)
- mr : masa del recipiente vacío (g)

3.4.3 Método utilizado por el Laboratorio Metalúrgico de SQM Salar SpA

Este método busca dar continuidad a las series de datos generadas antes del año 2016. Dicho laboratorio se ubica en el sector MOP de las operaciones de la empresa en el Salar de Atacama. El procedimiento comprende las siguientes etapas y se ilustra en la Figura 3.2:

1. Pesaje previo de las bolsas vacías con balanza de precisión (0,1 g).
2. Extracción en terreno de aproximadamente 500 g de suelo por muestra.
3. Pesaje del suelo húmedo (PH), descontando el peso de la bolsa.
4. Secado del suelo en estufa de circulación de aire durante 48 horas a 105 ± 5 °C.
5. Pesaje del suelo seco (PS), descontando el peso de la bandeja.
6. Cálculo del contenido de humedad mediante la siguiente fórmula:

Fórmula 2. Cálculo del contenido de humedad (SQM Salar)

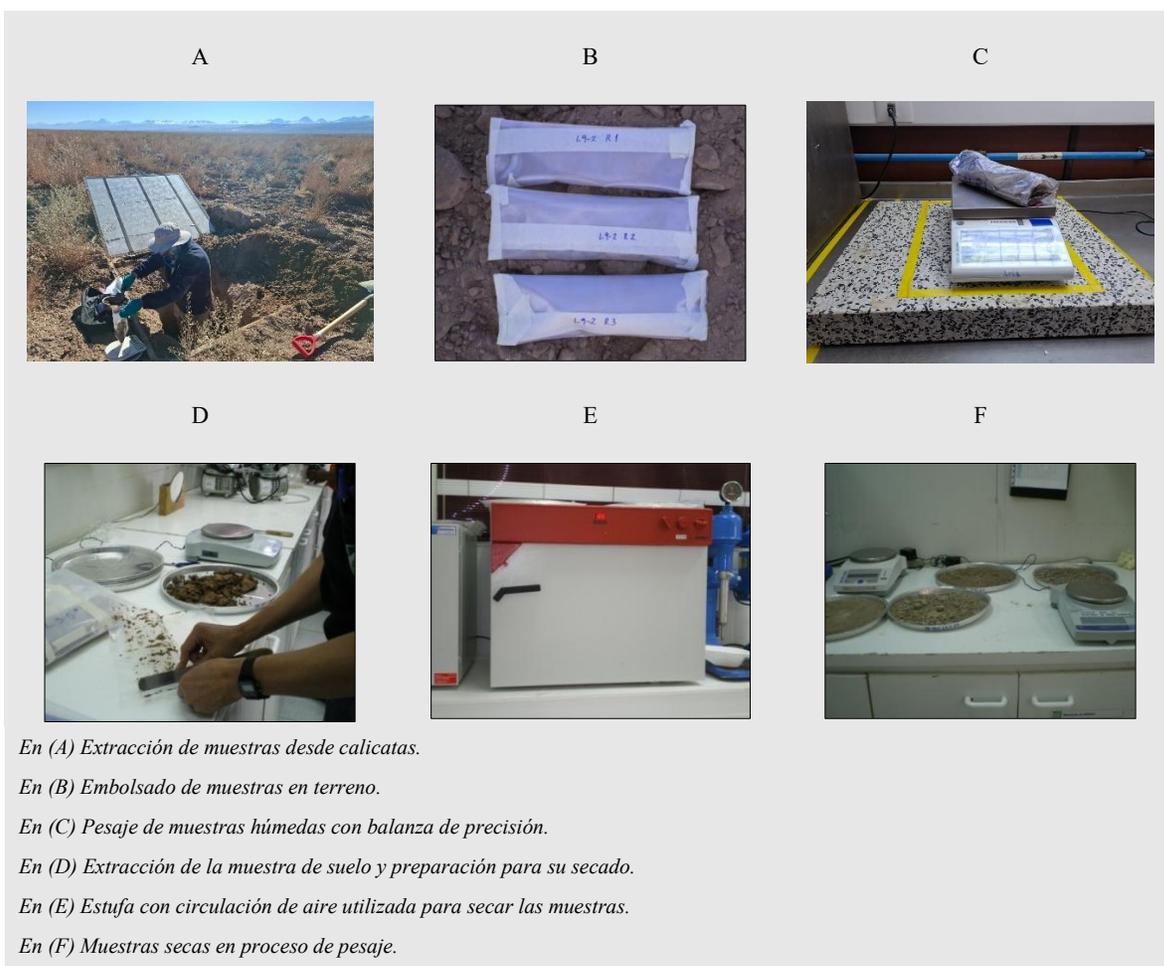
$$CHg = \frac{PH - PS}{PS}$$

Donde:

- *CHg*: Contenido de humedad gravimétrico (g/g)
- *PH*: Peso húmedo de la muestra menos el peso de la bolsa (g)
- *PS*: Peso seco de la muestra menos el peso de la bandeja (g)

El contenido de humedad se calcula individualmente para las tres muestras extraídas en cada calicata, y se reporta como el promedio de dichas mediciones.

Figura 3.2. Método para determinar el contenido de humedad del suelo



Fuente: Registro fotográfico SQM Salar Spa -actualizado de Informe CHS 2023, Geobiota

3.5 Profundidad de la napa subterránea

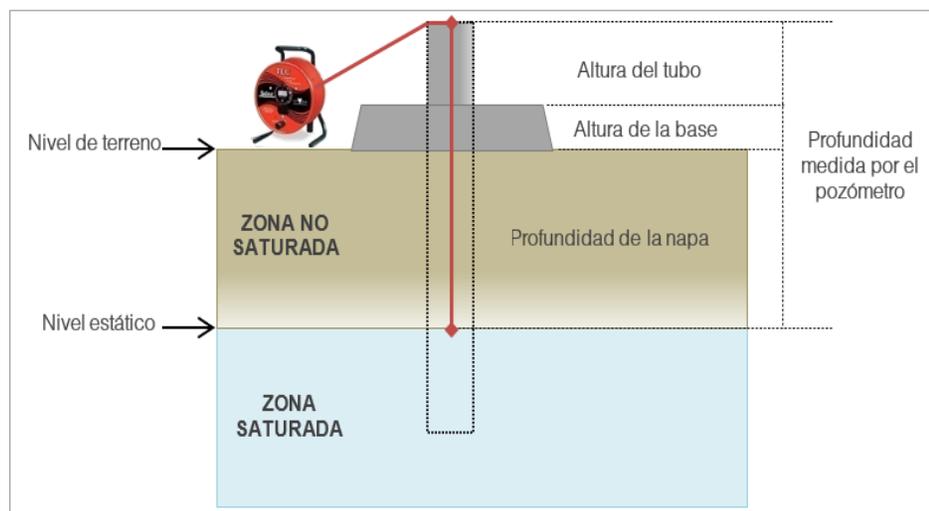
Cada una de las 18 parcelas permanentes de monitoreo se encuentra ubicada junto a un pozo de observación de nivel freático, los cuales integran la red de pozos del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico (PSAH), en el marco de lo dispuesto en la RCA N°226/2006.

La medición de la profundidad de la napa es realizada por SQM Salar y por la Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental (ETFA) SEGEA Ltda., aplicando el procedimiento PE04-GP-PT. A continuación, se resumen los principales pasos del proceso de medición:

- a. Encender el pozómetro y efectuar la medición de nivel de acuerdo con las instrucciones del protocolo IT-GP-PE04-01.
- b. Introducir la cinta graduada por el centro del pozo, procurando que no haga contacto con las paredes internas.
- c. Registrar la profundidad en la que se detecta el contacto con el nivel de agua subterránea. Esta lectura se realiza sobre la huincha del cable del pozómetro y corresponde a metros bajo el borde del tubo o brocal. En el caso de pozos con aguas someras (menos de 10 m), o donde se requiere una mayor precisión (0,5 mm), se recomienda utilizar un vástago como punto de referencia sobre la boca del pozo para estandarizar la lectura en el centro.
- d. Enrollar nuevamente la cinta del pozómetro, limpiar el cable y la sonda, y almacenar el equipo de manera adecuada.
- e. Finalmente, se descuenta de la lectura obtenida la altura del tubo y la base del pozo, a fin de obtener la profundidad real de la napa subterránea (Figura 3.3).

La figura ilustra la diferencia entre la profundidad registrada por el instrumento y la profundidad corregida, considerando las estructuras del pozo.

Figura 3.3. Esquema del proceso de medición en un pozo



Fuente: PSAH, 2023



Los datos reportados en esta sección corresponden a los resultados del monitoreo hidrogeológico realizado durante el año 2024, según lo informado en el Informe del PSAH 2024, en el contexto de cumplimiento de la RCA N°226/2006.

De acuerdo con los lineamientos establecidos por la Resolución Exenta N°223/2015 de la Superintendencia del Medio Ambiente, no se han definido límites normativos específicos para esta variable ambiental, por lo que su análisis se enmarca en una evaluación de tendencias y estado relativo.

3.6 Evaluación de la vitalidad de la vegetación

De acuerdo con los lineamientos establecidos en la RCA N°226/2006, la evaluación del estado vital y sanitario de la vegetación debe realizarse durante el periodo de mayor actividad fotosintética, el cual, en el ecosistema del Borde Este, se extiende aproximadamente entre noviembre y mayo. Para mantener una continuidad en el seguimiento conjunto de vegetación, nivel freático y contenido de humedad del suelo (CHS), el monitoreo se lleva a cabo de forma trimestral, en los meses de enero, abril, julio y octubre.

Este componente es evaluado en 18 parcelas permanentes de forma circular (5 metros de radio), establecidas desde abril de 2007. Cada una de estas parcelas cuenta con 10 individuos arbustivos seleccionados para seguimiento, los cuales fueron rotulados al inicio del monitoreo (Figura 3.4). En aquellos sitios con menor densidad de individuos, se marcó la totalidad de los ejemplares disponibles. Para el caso de la vegetación herbácea, se realiza un conteo y registro por especie de todos los individuos presentes.

La vitalidad de la vegetación arbustiva se determina a partir de tres indicadores complementarios:

a. Estado fenológico:

Se refiere al estadio de desarrollo observable en cada planta, el cual se clasifica en las siguientes fases (Tabla 3-5):

Tabla 3-5. Fases fenológicas evaluadas durante el monitoreo.

Categoría	Fase fenológica
1	Senescente o recesiva
2	Crecimiento vegetativo
3	Floración
4	Fructificación

Fuente: elaboración propia

b. Porcentaje de copa viva:

Este indicador representa la proporción de biomasa aérea con capacidad fotosintética (follaje verde), y se clasifica según los rangos porcentuales indicados en la Tabla 3-6:



Tabla 3-6. Categorías del porcentaje de copa viva

Categoría	Porcentaje (%)
0	0
1	< 5
2	5 – 25
3	25 – 50
4	50 – 75
5	75 – 100

Fuente: elaboración propia basado en RCA226/2006

c. Vitalidad general:

Corresponde a una evaluación cualitativa del estado del ejemplar, considerando la presencia de follaje verde, signos de patógenos y actividad reproductiva. Las categorías utilizadas se detallan en la Tabla 3-7:

Tabla 3-7. Categorías de vitalidad.

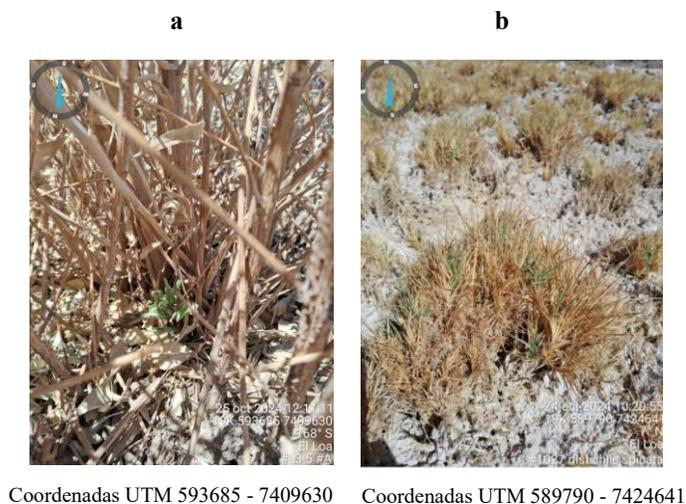
Categoría	Descripción
0	Ejemplar seco, sin follaje verde ni estructuras reproductivas
1	Muy débil, escaso follaje verde, sin frutos, presencia de patógenos severa
2	Débil, con algo de follaje verde, signos leves de deterioro, pocos frutos
3	Estado normal, follaje verde predominante, fructificación, sin patógenos
4	Vigor excepcional, abundante follaje y estructuras reproductivas

Fuente: elaboración propia basado en RCA226/2006

Altura del ejemplar:

Además de los parámetros anteriores, se registró la altura (en centímetros) de cada individuo arbustivo, desde la base hasta el punto más alto con follaje activo. En los casos donde no se evidenció copa viva, esta variable no fue registrada.

Figura 3.4. Medición del estado vital de la vegetación (a=individuo monitoreado, b=copa viva)



Fuente: registro de terreno 2024

En las situaciones donde no fue posible evaluar un ejemplar (por pérdida de biomasa aérea o desaparición debido a condiciones extremas), se asignó la categoría "No Aplica" a los tres parámetros mencionados. Esta condición se verificó mediante registro fotográfico en terreno y se detallan en el Anexo 1 - Estado vital de la vegetación.

Desde 2019, se incluyeron las categorías “Desaparecidos por aluvión” (por eventos en la Quebrada de Camar) y “Sin información – S/I”, esta última utilizada cuando no se contó con autorización para ingresar al área³.

Según lo establecido en la Res. Ex. N°223/2015 de la Superintendencia del Medio Ambiente, no existen umbrales específicos para esta variable ambiental, por lo que su monitoreo se realiza de forma descriptiva y continua.

3.7 Relación entre las variables monitoreadas

Con el objetivo de evaluar la relación entre el contenido de humedad del suelo (CHS), la profundidad de la napa freática y la vitalidad de la vegetación, se aplicó una prueba MANOVA, utilizando como variables dependientes las proporciones anuales de individuos en distintas categorías de vigor (seco, muy débil, débil, normal y vigoroso). Posteriormente, se ajustaron modelos lineales individuales por categoría para analizar el efecto específico de las covariables (CHS y profundidad de napa) sobre cada una.

El análisis se basó en datos históricos de monitoreo entre los años 2007 y 2024, calculados como promedios anuales por sitio para las variables ambientales, y proporciones anuales de vitalidad agregadas por especie. Los análisis fueron realizados utilizando el software R.

³ Debido a las restricciones de acceso se dieron desde abril del 2019, cuando la Resolución N°56/2019 aprueba el Protocolo de Ingreso a los sectores 4, 5 y 7 de la RNLF; y en el marco de la situación de emergencia sanitaria que enfrentaba el país, mediante Res. N°160 y 162 de 2020, CONAF dispuso el cierre de las áreas silvestres protegidas bajo su administración, incluyendo la RNLF, que se mantuvo cerrada durante el año 2020.



3.8 Materiales implementados en monitoreo de contenido de humedad gravimétrico del suelo, profundidad de la napa subterránea y vitalidad de la vegetación

Para la medición de las tres variables ambientales consideradas en este monitoreo (contenido de humedad gravimétrico del suelo, profundidad de la napa subterránea y vitalidad de la vegetación) se utilizaron distintos instrumentos y materiales de apoyo, que aseguran la precisión y estandarización del procedimiento en terreno y laboratorio. La Tabla 3-8 resume los principales elementos empleados para cada componente monitoreada.

Tabla 3-8. Materiales utilizados para medir contenido el de humedad de suelo, profundidad de la napa subterránea y vitalidad de la vegetación

Contenido de Humedad de Suelo	
Materiales	Pala
	Guantes
	Bolsas herméticas plásticas
	Balanza de precisión 0,1 g para el pesaje de las muestras
	Estufa de circulación de aire para el secado de las muestras
Profundidad de la napa subterránea	
Materiales	Pozómetro Solinst Model 101 Punta P2 de 30, 60 o 150 metros.
	Vástago para proyectar medición del punto de referencia al eje central del pozo
	Piseta con agua destilada
	Flexómetro
	Tablet y/o planilla de pozos a monitorear
Vitalidad de la vegetación	
Materiales	GPS
	Cámara fotográfica
	Flexómetro

Fuente: elaboración propia

3.9 Fechas de muestreo, medición análisis y control de cada parámetro

A continuación, se presenta un resumen consolidado de las fechas de muestreo, medición y/o control de cada uno de los parámetros evaluados durante el año 2024. Este monitoreo se realizó conforme a la planificación trimestral



establecida en el programa de seguimiento ambiental, incluyendo el contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS), la profundidad de la napa subterránea y el estado vital de la vegetación. La Tabla 3-9 detalla las fechas y actividades realizadas en cada campaña.

Tabla 3-9. Fechas de muestreo y actividades realizadas por parámetro ambiental durante 2024

Parámetro	Campaña	Fechas	Actividad
CHS	Enero	18 y 19	Monitoreo del contenido de humedad del suelo en los 18 puntos
	Abril	22 y 23	Monitoreo del contenido de humedad del suelo en los 18 puntos
	Julio	18 y 19	Monitoreo del contenido de humedad del suelo en los 18 puntos
	Octubre	24 y 25	Monitoreo del contenido de humedad del suelo en los 18 puntos
Vitalidad de la vegetación	Enero	18 y 19	Evaluación del estado vital de la vegetación en los 18 puntos
	Abril	22 y 23	Evaluación del estado vital de la vegetación en los 18 puntos
	Julio	18 y 19	Evaluación del estado vital de la vegetación en los 18 puntos
	Octubre	24 y 25	Evaluación del estado vital de la vegetación en los 18 puntos
Profundidad de la napa	Enero	18 y 19	Se utilizó el valor registrado el día del monitoreo o cercano a este de enero
	Abril	22 y 23	Se utilizó el valor registrado el día del monitoreo o cercano a este de abril
	Julio	18 y 19	Se utilizó el valor registrado el día del monitoreo o cercano a este de julio
	Octubre	24 y 25	Se utilizó el valor registrado el día del monitoreo o cercano a este de octubre

Fuente: elaboración propia

Desde diciembre de 2018, la frecuencia de medición de la profundidad de la napa subterránea es diaria, conforme al Programa de Cumplimiento presentado por SQM a la SMA. Para el presente informe (2024), se utilizaron los valores registrados el día del monitoreo de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2024, o la fecha más próxima disponible, según lo indicado en la ficha técnica de seguimiento (ver Anexo 6).

3.10 Incertidumbres asociadas a la ejecución de las metodologías en terreno

Respecto a las posibles incertidumbres asociadas a la implementación de las metodologías descritas en este informe, cabe señalar que una de las principales limitaciones radica en la ausencia de ciertos registros de campo en algunos periodos históricos, lo cual puede afectar la continuidad y comparabilidad de los análisis realizados.



3.10.1 Contenido de humedad gravimétrico del suelo

Las principales fuentes de incertidumbre en la obtención del contenido de humedad gravimétrico del suelo están relacionadas con las condiciones del sitio al momento del muestreo, incluyendo factores como el clima y el tiempo transcurrido entre la excavación de la calicata y la recolección de las muestras. Además, aspectos como el tipo de envase utilizado para el almacenamiento y la experiencia del personal encargado del muestreo también pueden influir en la calidad y representatividad de los resultados.

En cuanto al análisis de laboratorio, se identifican posibles variaciones derivadas del hecho de que las muestras son procesadas por dos entidades distintas. En el caso del Laboratorio Metalúrgico de SQM Salar, las incertidumbres están asociadas a la precisión de los equipos utilizados (balanza con precisión de 0,1 g y estufa de circulación de aire), así como a la experiencia del operador. Para las muestras analizadas por la ETFA Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA, las fuentes de incertidumbre pueden incluir el protocolo de muestreo, los procedimientos analíticos y la precisión de los equipos empleados.

3.10.2 Profundidad de la napa subterránea

Las incertidumbres en la medición de la profundidad de la napa freática están vinculadas principalmente a la precisión del pozómetro (± 5 mm), a la lectura visual realizada por el monitor (± 1 mm) y a la exactitud con la que se haya determinado la cota del punto de referencia (± 1 cm), la cual depende del equipo topográfico utilizado. Adicionalmente, factores como las condiciones climáticas, el tiempo transcurrido durante la medición y la distancia a la estación base también pueden influir, aunque en general, el margen de error se encuentra dentro del orden de los centímetros.

3.10.3 Estado vital de la vegetación

Las principales fuentes de incertidumbre en la evaluación del estado vital de la vegetación están asociadas a la experiencia y el criterio del personal que realiza el muestreo, dado que se trata de una evaluación basada en parámetros cualitativos.

Adicionalmente, existen incertidumbres vinculadas al marcaje de los individuos monitoreados, las cuales pueden verse afectadas por eventos climáticos extremos, como precipitaciones intensas o aluviones, que pueden provocar la pérdida de las marcas o incluso de los propios individuos.

Asimismo, dado que el monitoreo se realiza sobre individuos fijos, es esperable que el ciclo de vida natural de cada planta afecte progresivamente su condición, independiente de otros factores. La ausencia de un análisis del estado de la vegetación circundante implica que este envejecimiento natural no es compensado en el análisis, lo cual podría generar una tendencia aparente al deterioro del estado vital con el paso de los años.



4 Resultados

4.1 Contenido de humedad de suelo

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a las mediciones de humedad gravimétrica del suelo realizadas durante el año 2024. Las muestras de suelo fueron extraídas por el laboratorio ETFA ALS Life Sciences Chile. Sin embargo, el análisis de las muestras de suelo, específicamente humedad de suelo, fueron desarrolladas en paralelo por los laboratorios ALS Life Sciences Chile y el Laboratorio Metalúrgico de SQM, esto para dar continuidad y consistencia a los resultados históricos de la variable humedad de suelo.

Cabe destacar que el Plan de Seguimiento Biótico no contempla límites específicos para los parámetros de humedad del suelo evaluados. Por esta razón, los datos se exponen de manera descriptiva, tanto en formato gráfico como numérico, sin ser contrastados con umbrales de referencia. No obstante, el monitoreo continuo de esta variable a lo largo del tiempo permite identificar tendencias y variaciones relevantes, las cuales pueden ser correlacionadas con la evolución de otras variables ambientales incluidas en este informe.

4.1.1 Laboratorio ALS Life Sciences Chile (ETFa)

Durante el año 2024 se realizaron cuatro campañas de monitoreo del contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS) en 18 parcelas distribuidas de oeste a este del Salar, considerando como punto de referencia desde la zona marginal (Oeste) del Salar de Atacama hacia la zona Aluvial (este).

Los valores promedio y sus desviaciones estándar obtenidos por el laboratorio ALS Life Sciences Chile se presentan en la Tabla 4-1 y la Figura 4.1.

Tal como se observa en la Figura 4.1, las parcelas ubicadas hacia el oeste, en la zona marginal del Salar de Atacama, presentaron los valores más altos de humedad del suelo. Destacan las parcelas 1027 y L7-7, con promedios anuales de 0,397 g/g y 0,279 g/g respectivamente. En contraste, las parcelas del sector este mostraron los valores más bajos, ubicado en la zona aluvial del Salar de Atacama, como es el caso de L4-3, con un valor promedio de 0,010 g/g.

Además, se evidencia que las desviaciones estándar tienden a ser mayores en los sitios con valores altos de CHS (por ejemplo, 1027 y L2-4), lo que podría reflejar una mayor variabilidad temporal en la disponibilidad hídrica en esos sectores. Por el contrario, los sitios con valores bajos presentaron variaciones mínimas a lo largo del año (por ejemplo, L4-3 o L3-3), lo cual sugiere condiciones más estables pero secas, posiblemente asociadas a una menor conexión al agua subterránea en el sector.

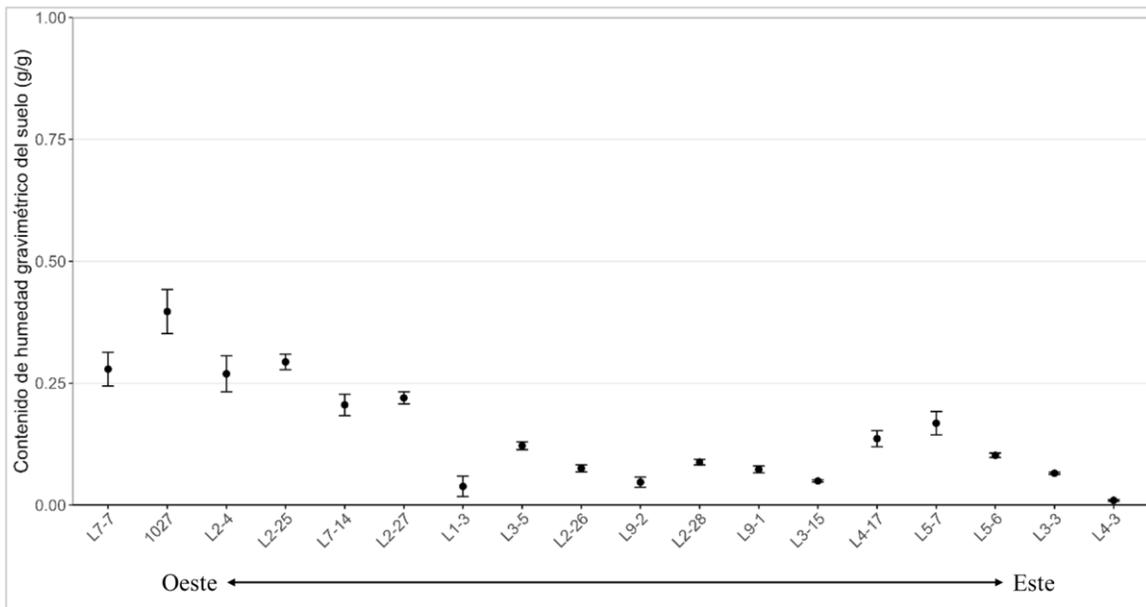
Tabla 4-1. Contenido de humedad gravimétrico del suelo medido por ALS (ETFa) en las parcelas de monitoreo para las cuatro campañas 2024. Los pozos están ordenados de oeste (L7-7) a este (L4-3)

Pozos (oeste a este)	Contenido de humedad gravimétrico (g/g) por campaña de monitoreo				Promedio (g/g)	Desv. Est.
	Enero	Abril	Julio	Octubre		
L7-7	0.316	0.236	0.309	0.254	0.279	0.034
1027	0.408	0.327	0.454	0.399	0.397	0.045
L2-4	0.295	0.293	0.282	0.206	0.269	0.037
L2-25	0.272	0.306	0.312	0.285	0.294	0.016



Pozos (oeste a este)	Contenido de humedad gravimétrico (g/g) por campaña de monitoreo				Promedio (g/g)	Desv. Est.
	Enero	Abril	Julio	Octubre		
L7-14	0.176	0.225	0.228	0.194	0.206	0.022
L2-27	0.208	0.212	0.219	0.241	0.220	0.013
L1-3	0.032	0.074	0.021	0.027	0.038	0.021
L3-5	0.125	0.113	0.116	0.133	0.122	0.008
L2-26	0.077	0.086	0.073	0.066	0.075	0.007
L9-2	0.044	0.056	0.031	0.057	0.047	0.010
L2-28	0.080	0.094	0.092	0.086	0.088	0.006
L9-1	0.068	0.066	0.083	0.076	0.073	0.007
L3-15	0.049	0.052	0.046	0.051	0.050	0.002
L4-17	0.117	0.154	0.151	0.122	0.136	0.017
L5-7	0.207	0.164	0.157	0.143	0.168	0.024
L5-6	0.100	0.105	0.107	0.096	0.102	0.005
L3-3	0.065	0.066	0.068	0.062	0.065	0.002
L4-3	0.011	0.011	0.007	0.010	0.010	0.002

Figura 4.1. Variación promedio anual del contenido de humedad gravimétrico del suelo, según ALS Life Sciences Chile, para el año 2024





4.1.2 Laboratorio Metalúrgico SQM Salar

La Tabla 4-2 y la Figura 4.2 presentan los resultados de las mediciones de contenido de humedad gravimétrico del suelo obtenidos durante las cuatro campañas de monitoreo correspondientes al año 2024, de acuerdo con los análisis realizados por el Laboratorio Metalúrgico de SQM Salar. Los puntos de monitoreo también se disponen de oeste a este.

El mayor contenido de humedad promedio anual se registró principalmente en las parcelas ubicadas en el sector oeste del área de estudio, como L7-7, 1027 y L2-4, donde se alcanzaron valores promedio de 0,549, 0,732 y 0,404 g/g, respectivamente. En contraste, los valores más bajos se registraron en parcelas ubicadas al este, como L4-3 y L3-3, con contenidos promedio de 0,010 y 0,072 g/g, respectivamente.

El valor máximo medido fue de 0,888 g/g en la parcela 1027 durante el mes de julio, mientras que el mínimo correspondió a la parcela L4-3, con 0,006 g/g en el mismo mes.

En términos de variabilidad estacional, se observa mayor desviación estándar en las parcelas del oeste, particularmente en 1027 (0,162) y L7-7 (0,124), lo cual indica una mayor sensibilidad de estas zonas a cambios estacionales en la humedad del suelo. Esto es consistente con el patrón hidrogeológico del área, donde hacia el oeste la napa freática se ubica a profundidades menores, lo que genera una mayor influencia de las condiciones climáticas sobre el contenido de humedad del suelo.

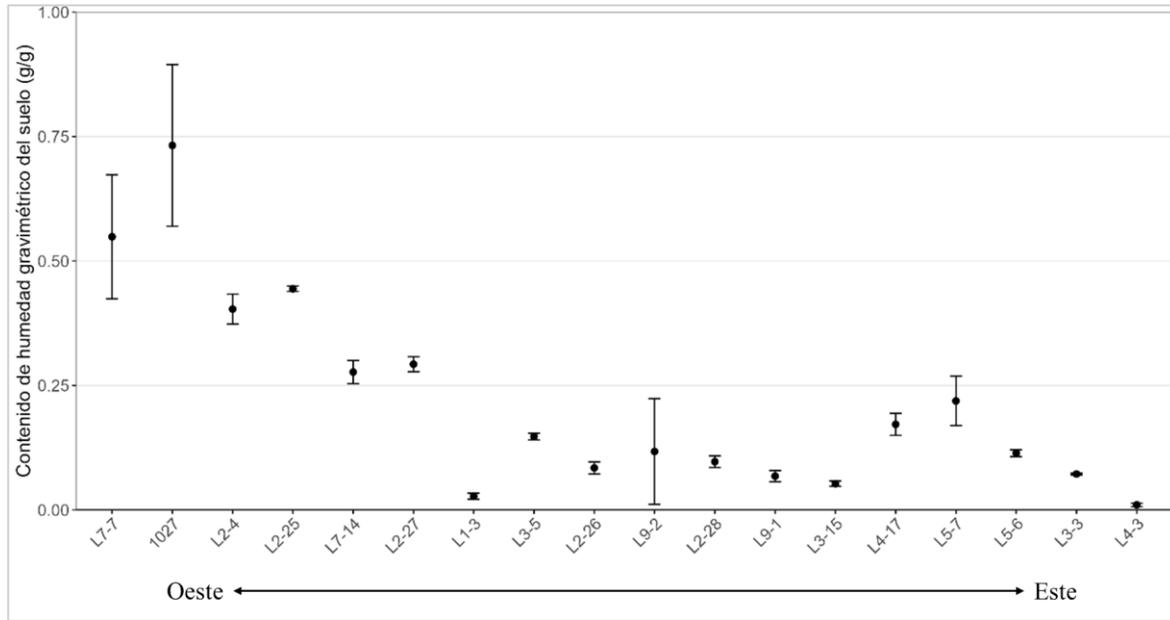
Tabla 4-2. Contenido de humedad gravimétrico del suelo medido por el Laboratorio Metalúrgico SQM Salar en las parcelas de monitoreo para las cuatro campañas del año 2024

Pozos (oeste a este)	Contenido de humedad gravimétrico (g/g) por campaña de monitoreo				Promedio (g/g)	Desv. Est.
	Enero	Abril	Julio	Octubre		
L7-7	0.764	0.485	0.467	0.479	0.549	0.124
1027	0.48	0.861	0.888	0.700	0.732	0.162
L2-4	0.431	0.432	0.391	0.360	0.404	0.030
L2-25	0.451	0.445	0.445	0.436	0.444	0.005
L7-14	0.242	0.307	0.278	0.281	0.277	0.023
L2-27	0.281	0.284	0.287	0.319	0.293	0.015
L1-3	0.034	0.033	0.019	0.025	0.028	0.006
L3-5	0.152	0.141	0.141	0.156	0.148	0.007
L2-26	0.087	0.102	0.08	0.069	0.085	0.012
L9-2	0.049	0.062	0.301	0.058	0.118	0.106
L2-28	0.088	0.106	0.111	0.083	0.097	0.012
L9-1	0.068	0.077	0.05	0.077	0.068	0.011
L3-15	0.055	0.06	0.051	0.045	0.053	0.005
L4-17	0.153	0.195	0.193	0.147	0.172	0.022
L5-7	0.304	0.203	0.188	0.181	0.219	0.050
L5-6	0.118	0.123	0.111	0.105	0.114	0.007
L3-3	0.069	0.074	0.073	0.073	0.072	0.002



Pozos (oeste a este)	Contenido de humedad gravimétrico (g/g) por campaña de monitoreo				Promedio (g/g)	Dev. Est.
	Enero	Abril	Julio	Octubre		
L4-3	0.013	0.014	0.006	0.008	0.010	0.003

Figura 4.2. Variación promedio anual del contenido de humedad gravimétrico del suelo, según Laboratorio Metalúrgico de SQM Salar, para el año 2024



Fuente: elaboración propia

4.1.3 Relación de los valores reportados entre los laboratorios

La Figura 4.3 muestra la comparación entre los valores de contenido de humedad gravimétrica del suelo reportados por el Laboratorio Metalúrgico SQM Salar y el laboratorio ETF A ALS Life Sciences Chile, correspondientes al año 2024. Al igual que en el año anterior (2023), se observa una alta consistencia entre ambos laboratorios en cuanto a la tendencia de los datos, aunque con diferencias en la magnitud de los valores reportados.

En el panel A, se muestra la relación entre ambos laboratorios, donde el eje X representa los valores entregados por ALS y el eje Y los valores entregados por SQM. La tendencia general indica que los valores obtenidos por ALS tienden a ser menores que los reportados por el laboratorio de SQM, especialmente en los puntos con mayor contenido de humedad.

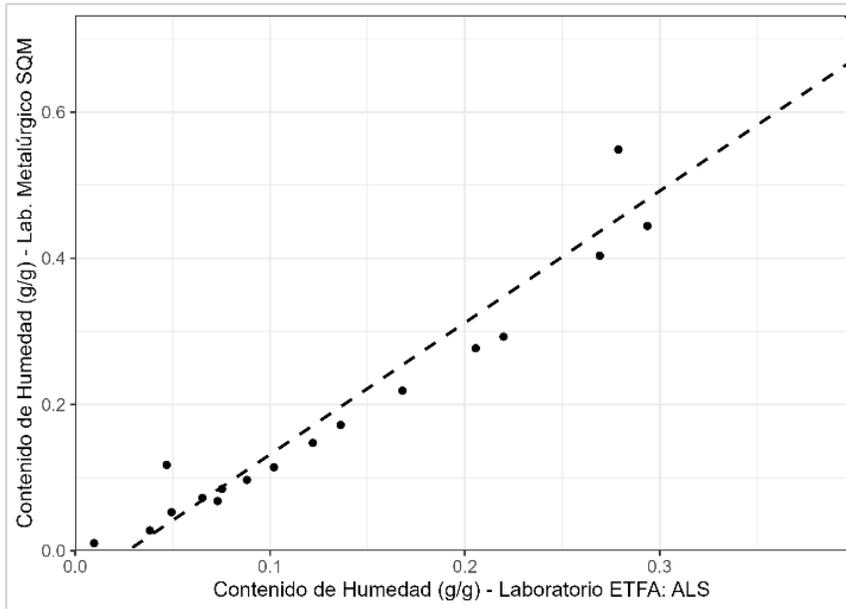
Esta relación fue confirmada mediante un análisis de correlación de Spearman, que arrojó un coeficiente rho = 0.95 (valor-p < 0.001), lo que indica una fuerte correlación positiva entre ambas series de datos, a pesar de las diferencias sistemáticas en magnitud.

El panel B complementa esta observación al mostrar los promedios anuales por sitio de muestreo. En él, se puede apreciar que los valores del laboratorio ALS (puntos negros) son consistentemente más bajos que los reportados

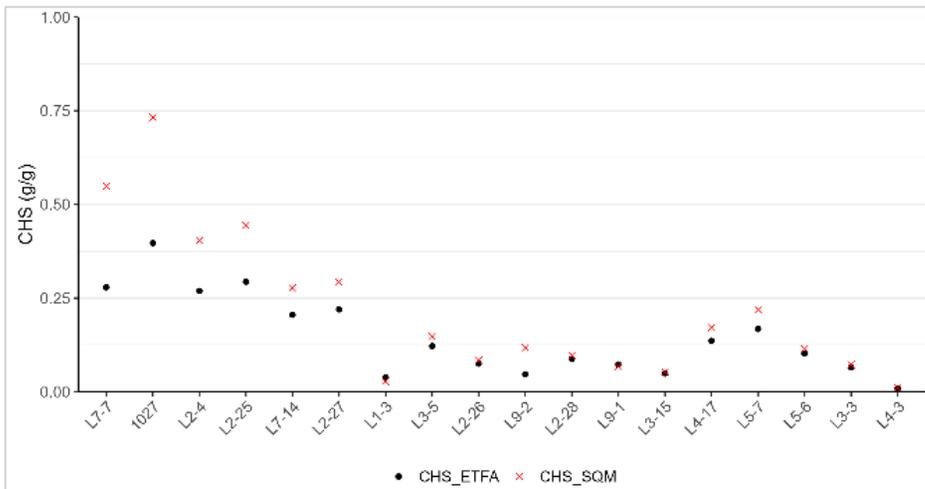


por el laboratorio de SQM (cruces rojas), especialmente en sitios con mayor contenido de humedad. Esta diferencia podría atribuirse, nuevamente, al tiempo transcurrido entre la colecta y el análisis en el caso de las muestras enviadas a ALS, lo que puede provocar pérdida de humedad en el proceso de transporte y almacenamiento, así como también las diferencias metodológicas en la estimación del CHS.

Figura 4.3. Comparación de los valores de contenido de humedad gravimétrico obtenido por el Laboratorio Metalúrgico SQM Salar y Laboratorio ALS Life Sciences Chile para el año 2024.



A



B

- A) Relación entre el contenido de humedad del suelo entre ambos laboratorios, en el eje X (horizontal) los datos entregados por la ETFA ALS Life Sciences Chile, en Y (vertical) datos proporcionados por el laboratorio de SQM.
- B) En puntos negros datos proporcionados por la ETFA ALS Life Sciences Chile, en X y color rojo datos proporcionados por el laboratorio de SQM.

Fuente: elaboración propia



4.2 Profundidad de la napa

La Tabla 4-3 y la Figura 4.4 presentan los valores de profundidad de la napa freática registrados en las cuatro campañas de monitoreo realizadas durante el año 2024, así como su promedio anual y desviación estándar por parcela.

Durante este periodo, los pozos con menor profundidad promedio fueron L7-7 (0,594 m), 1027 (0,586 m), y L2-25 (0,610 m), lo cual indica una napa superficial en dichas parcelas. En contraste, los pozos con mayor profundidad promedio fueron L4-3 (13,346 m), L1-3 (7,193 m) y L9-1 (5,826 m), lo que concuerda con el gradiente de profundidad esperable en dirección oeste-este.

En el caso del pozo L3-5, los valores nulos presentados en la tabla correspondiente a los trimestres reportados se deben a la obtención de niveles freáticos negativos. Esta situación podría estar relacionada con una modificación en la topografía del entorno del pozo, posiblemente ocurrida tras el aluvión de 2019, lo que habría alterado la cota de referencia utilizada para las mediciones. Como consecuencia, los registros podrían aparecer como negativos, incluso cuando la napa se encuentra más próxima a la superficie. En cuanto a la variabilidad estacional, la desviación estándar promedio de todos los pozos fue de 0,107 m, pero algunos puntos destacaron por una mayor variabilidad intra-anual respecto de los pozos del este. Estos casos podrían estar reflejando una mayor sensibilidad a condiciones hidroclimáticas. Por otro lado, pozos como L3-15, L2-25, L9-1 y L7-14 mostraron una mayor estabilidad, con desviaciones estándar menores a 0,03 m, lo que sugiere una napa más homogénea y menos afectada por eventos puntuales.

La información aquí presentada permite identificar no solo las condiciones actuales de profundidad de la napa freática, sino también su estabilidad a lo largo del año, lo cual es clave para evaluar la disponibilidad hídrica en las distintas zonas del área de influencia del monitoreo.

Tabla 4-3. Profundidad de la napa de las parcelas de monitoreo en las cuatro campañas del año 2024

Pozos (1) (oeste a este)	Profundidad napa (m) por campaña de monitoreo				Promedio (m)	Desv. Est.
	Enero	Abril	Julio	Octubre		
L7-7	0.000	0.000	0.606	1.771	0.594	0.723
1027	0.609	0.69	0.555	0.49	0.586	0.073
L2-4	0.974	0.979	0.907	0.906	0.942	0.035
L2-25	0.618	0.624	0.605	0.594	0.610	0.012
L7-14	1.547	1.6	1.852	1.49	1.622	0.138
L2-27	1.293	1.641	0.000	0.000	0.734	0.744
L1-3	7.198	7.214	7.193	7.168	7.193	0.017
L3-5 ⁽²⁾	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
L2-26	3.924	3.966	3.951	3.911	3.938	0.022
L9-2	4.245	4.296	4.263	4.218	4.256	0.028
L2-28	3.47	3.591	3.41	3.323	3.449	0.097

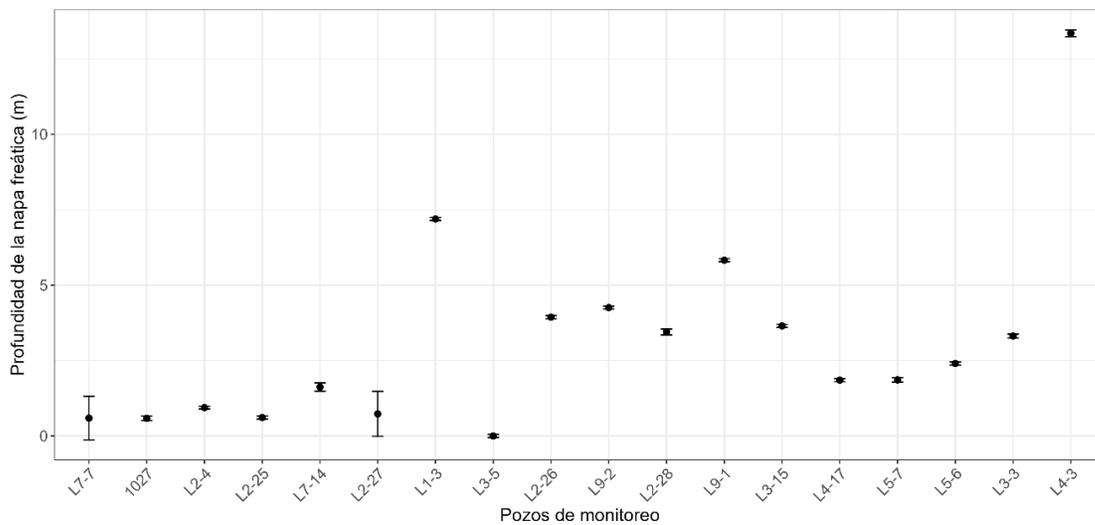


Pozos (1) (oeste a este)	Profundidad napa (m) por campaña de monitoreo				Promedio (m)	Desv. Est.
	Enero	Abril	Julio	Octubre		
L9-1	5.822	5.856	5.827	5.798	5.826	0.021
L3-15	3.659	3.684	3.637	3.609	3.647	0.028
L4-17	1.844	1.882	1.852	1.829	1.852	0.019
L5-7	1.934	1.934	1.794	1.771	1.858	0.076
L5-6	2.444	2.451	2.372	2.343	2.403	0.046
L3-3	3.39	3.366	3.257	3.24	3.313	0.066
L4-3	13.435	13.414	13.374	13.159	13.346	0.110

*Los valores cero corresponden a valores negativos (L3-5) y aquellos que no pudieron ser tomados en terreno

Fuente: elaboración propia

Figura 4.4. Promedio de la profundidad de la napa y su desviación estándar por parcela de monitoreo en las cuatro campañas del año 2024.



Fuente: elaboración propia

4.3 Relación Contenido de humedad y napa freática

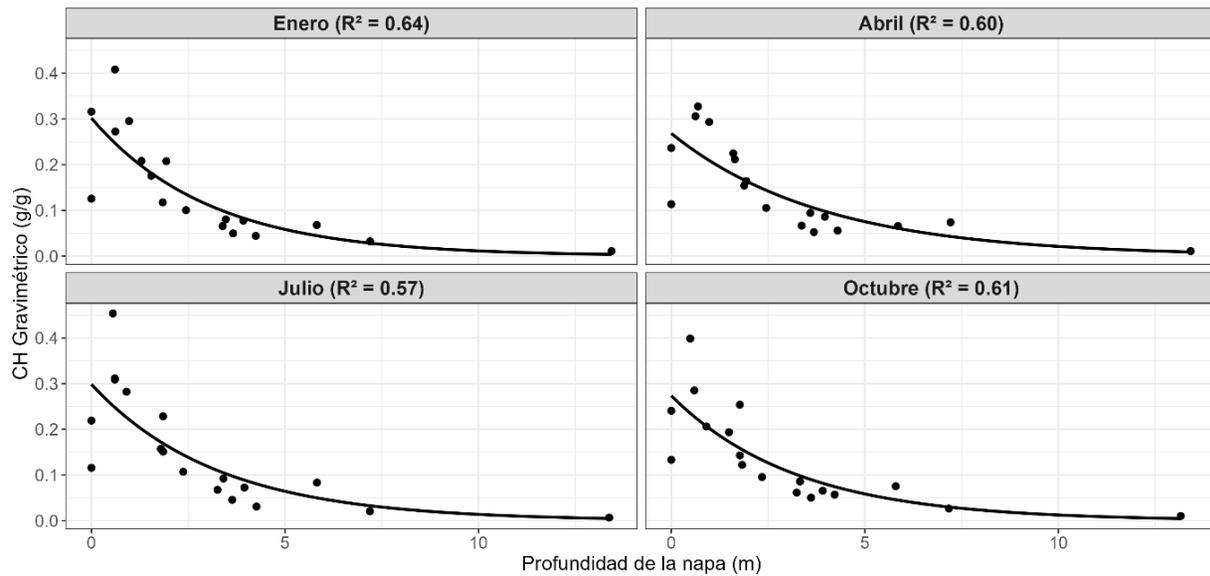
4.3.1 Laboratorio ALS Life Sciences Chile

En los cuatro monitoreos realizados durante el año 2024 por el Laboratorio ALS Life Sciences Chile, se observó una relación inversa entre el contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS) y la profundidad de la napa freática. La bondad de ajuste o índice de determinación de estas relaciones (R^2) oscilaron entre 0.57 y 0.64, siendo el valor más alto registrado en enero ($R^2 = 0.64$) y el más bajo en julio ($R^2 = 0.57$), lo cual indica una correlación moderada a fuerte en todas las campañas (Figura 4.5).



Estos resultados sugieren que, en general, el CHS aumenta cuando la napa se encuentra a menor profundidad. La relación observada sigue un patrón exponencial decreciente, lo que se alinea con el comportamiento esperado en zonas donde el contenido de humedad en el perfil del suelo está influenciado directamente por la cercanía del nivel freático.

Figura 4.5. Relación entre el contenido de humedad gravimétrico del suelo medido por ALS Life Sciences Chile y la profundidad de la napa en cada campaña del año 2024



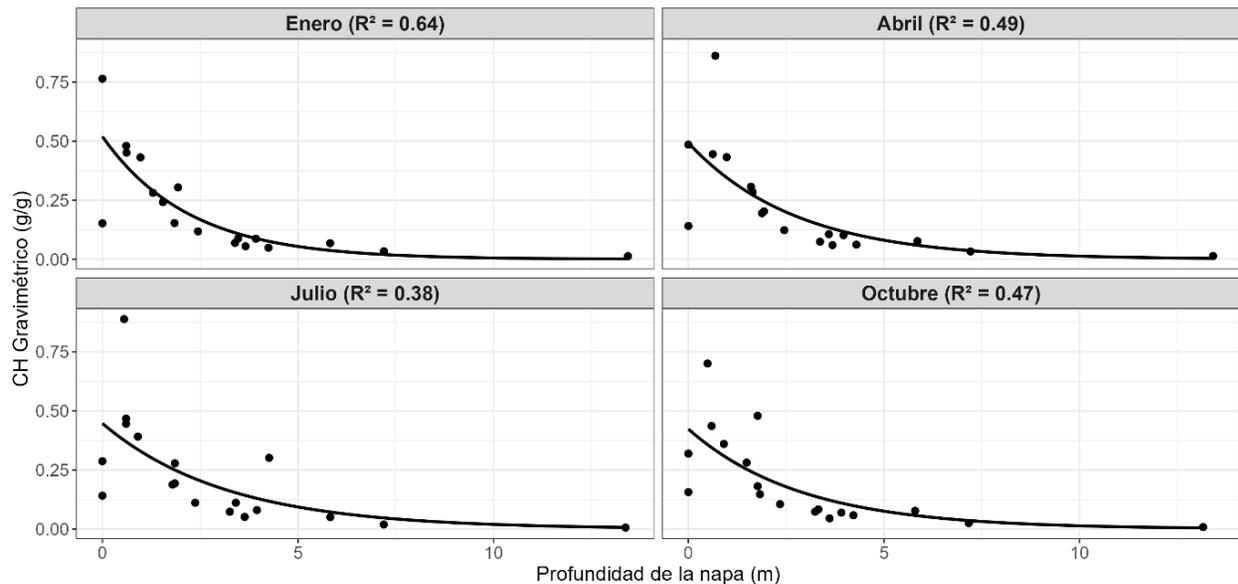
Fuente: elaboración propia

4.3.2 Laboratorio Metalúrgico SQM Salar

Por su parte, los datos proporcionados por el Laboratorio Metalúrgico de SQM Salar muestran también una relación exponencial inversa entre el CHS y la profundidad de la napa (Figura 4.6), aunque con una menor fuerza de asociación que en el caso del laboratorio ALS. Los valores de R^2 fluctúan entre 0.38 y 0.64, con el valor más alto observado en enero ($R^2 = 0.64$) y el más bajo en julio ($R^2 = 0.38$).

Si bien se mantiene la tendencia general de aumento del CHS en condiciones de napa más somera, la mayor dispersión de los datos en algunas campañas sugiere una mayor variabilidad en la respuesta del suelo o diferencias metodológicas entre laboratorios. No obstante, en todas las campañas se mantiene la forma exponencial de la curva de ajuste, respaldando la consistencia del patrón general identificado.

Figura 4.6. Relación entre el contenido de humedad gravimétrico del suelo medido por SQM Salar y la profundidad de la napa en cada campaña del año 2024



Fuente: elaboración propia

En conjunto, los resultados obtenidos por ambos laboratorios evidencian una relación inversa entre el contenido de humedad gravimétrica del suelo y la profundidad de la napa freática, con un ajuste consistente a modelos exponenciales decrecientes. Este patrón refuerza la influencia del nivel freático en la disponibilidad hídrica del suelo dentro del área de estudio. No obstante, los valores de R^2 obtenidos en los análisis de correlación indican una asociación de moderada a levemente fuerte, lo que permite plantear la hipótesis de que la humedad del suelo está relacionada con la napa subterránea, aunque no exclusivamente determinada por ella. En este sentido, es razonable considerar que otras variables también inciden en el comportamiento observado. Entre los factores complementarios que podrían influir se encuentran las propiedades texturales y estructurales del suelo, la cobertura vegetal, los niveles de evapotranspiración, la pendiente del terreno y las condiciones climáticas locales (como la cantidad y distribución de las precipitaciones, la temperatura ambiente y la radiación solar). Estos elementos pueden alterar los procesos de infiltración, retención y pérdida de agua en el perfil edáfico, modulando así la humedad del suelo en conjunto con la influencia de la napa.

4.4 Estado vital de la vegetación

Para el seguimiento del estado vital de la vegetación se han medido las siguientes variables: porcentaje de copa viva, vitalidad y estado fenológico, en las especies observadas en las parcelas de monitoreo (Tabla 4-4). Si bien la RCA N.º 226/2006 contempla la realización de dos monitoreos anuales, con el fin de aportar mayor información para los análisis, se ha optado por un monitoreo trimestral. Este se realiza en paralelo a las mediciones de humedad del suelo y profundidad de la napa freática.



Tabla 4-4. Principales especies de flora monitoreadas durante la campaña 2024.

Especies	Nº de individuos a prospectar
<i>Atriplex atacamensis</i>	10
<i>Tessaria absinthioides</i>	123
<i>Distichlis spicata</i> *	6
<i>Nitrophila atacamensis</i> *	2
Total aproximado	141

*Según la RCA N°226/2006, los individuos de habito herbáceo monitoreados no son fijos en el tiempo, por lo que, durante los monitoreos se debe evaluar la totalidad de ejemplares herbáceos presentes en cada parcela. No obstante, los individuos registrados históricamente de *D. spicata* varían entre 5 a 6 ejemplares y los de *N. atacamensis* entre 1 a 2 ejemplares.

Fuente: elaboración Propia

Cabe recordar cómo se ha estado mencionado en informes anteriores, que producto del aluvión ocurrido en febrero de 2019, 26 plantas ubicadas en las parcelas L3-15, L3-3 y L3-5 resultaron dañadas, perdiéndose sus placas de identificación. Por esta razón, en abril de 2020 se reetiquetaron 25 ejemplares, mientras que el individuo restante fue reetiquetado en noviembre del mismo año.

4.4.1 Fenología de la vegetación

El estado fenológico de los individuos monitoreados durante las campañas de 2024 se resume en la Tabla 4-5 y se representa gráficamente en la Figura 4.7. La categoría fenológica predominante en todos los meses fue la senescencia, destacando particularmente en el mes de julio, donde el 92,2 % de los ejemplares se registraron en dicha categoría. Esta proporción disminuyó levemente en octubre (63,8 %), manteniéndose como la fase más representativa.

La fase de crecimiento vegetativo fue más marcada en abril (36,2 %) y enero (37,6 %), coincidiendo con periodos en los que se observaron brotes y desarrollo foliar activo. En contraste, esta fase fue mínima en julio (7,8 %), lo que refuerza el patrón de receso fenológico invernal.

La floración fue detectada en enero y octubre, alcanzando un 7,1 % del total de individuos monitoreados en ambos meses, mientras que estuvo ausente en abril y julio. Por su parte, la fructificación fue registrada únicamente en abril, aunque con un valor marginal (0,7 %).

Tabla 4-5. Resumen de individuos por categoría de fenología

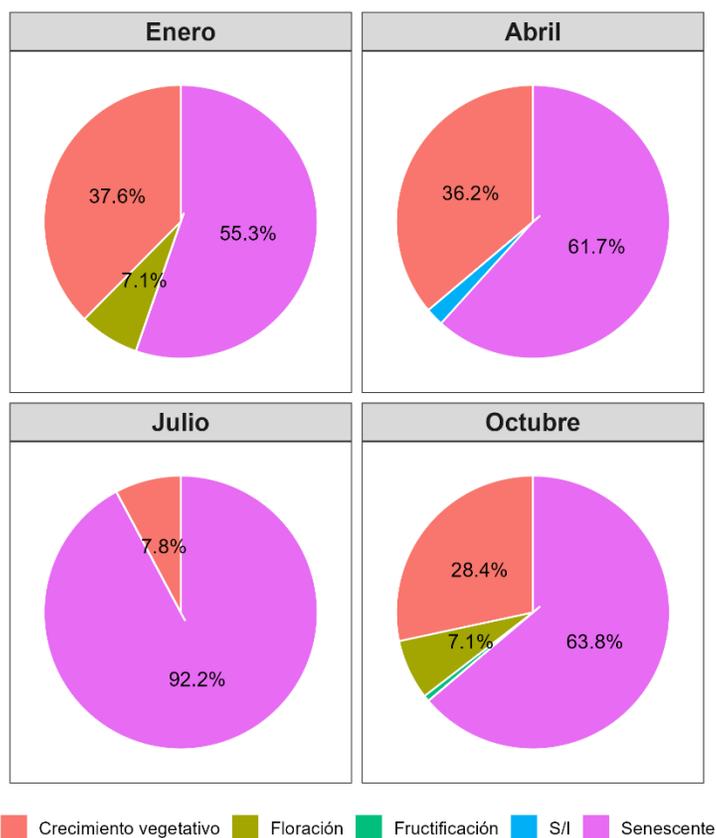
Categoría	Número de Individuos por clase de fenología				Proporción (%) del número de individuos por clase de fenología			
	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre
Senescente	78	87	130	90	55.32	61.70	92.20	63.83
Crecimiento vegetativo	53	51	11	40	37.59	36.17	7.80	28.37



Categoría	Número de Individuos por clase de fenología				Proporción (%) del número de individuos por clase de fenología			
	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre
Floración	10	0	0	10	7.09	0.00	0.00	7.09
Fructificación	0	0	0	1	0.00	0.00	0.00	0.71
Sin información ⁴	0	3	0	0	0.00	2.13	0.00	0.00
Total	141	141	141	141	100.00	100.00	100.00	100.00

Fuente: elaboración propia

Figura 4.7. Fenología de los individuos monitoreados en las campañas 2024



Fuente: elaboración propia

⁴ Los individuos Sin información corresponden a aquellos que no pudieron ser localizados en terreno debido a las condiciones del sitio, por lo que no cuentan con información para ser incluidos en el análisis



5.4.1.1. Fenología según especie

A continuación, se analiza la evolución de la fenología en forma diferenciada para los individuos de *Atriplex atacamensis*, *Distichlis spicata*, *Nitrophila atacamensis* y *Tessaria absinthioides*, monitoreados para los trimestres del 2024: enero (verano), abril (otoño), julio (invierno) y octubre (primavera).

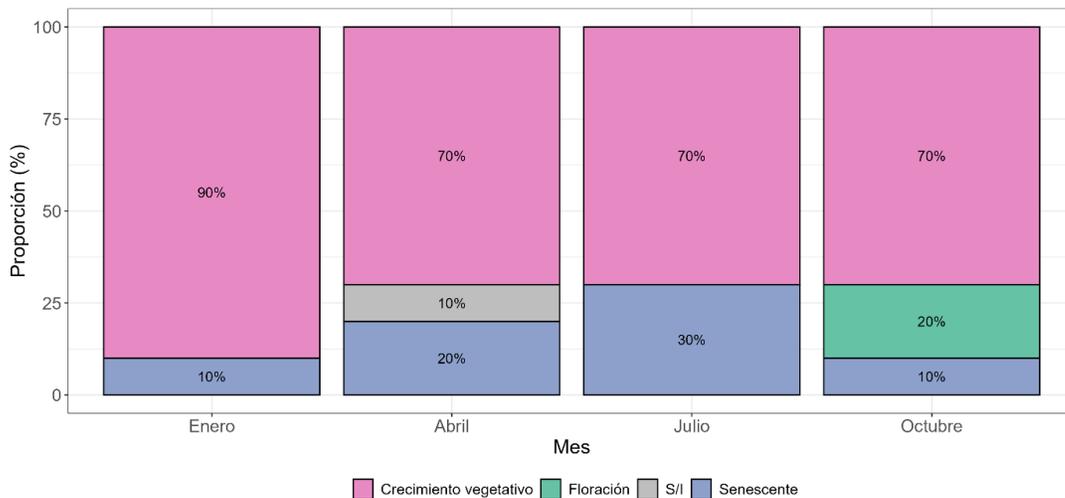
a. *Atriplex atacamensis*

En la Figura 4.8 se observa que, durante las campañas de monitoreo realizadas en 2024, los individuos de *Atriplex atacamensis* presentaron una marcada prevalencia del estado de crecimiento vegetativo, particularmente en enero (90 %) y en abril, julio y octubre (todos con 70 %).

El estado de senescencia estuvo presente en todos los meses, alcanzando su mayor proporción en julio (30 %), posiblemente como respuesta a las condiciones invernales. En enero y octubre se registró un 10 % de individuos senescentes, mientras que en abril esta proporción aumentó al 20 %.

En cuanto a la floración, esta solo se evidenció en octubre, con un 20 % de los individuos, lo que sugiere un pulso reproductivo hacia la primavera. En abril, un 10 % de los individuos no pudo ser observado, por lo que se clasificaron como “Sin información”.

Figura 4.8. Fenología de los individuos de *Atriplex atacamensis* monitoreados en las campañas 2024



Fuente: elaboración propia

b. *Distichlis spicata*

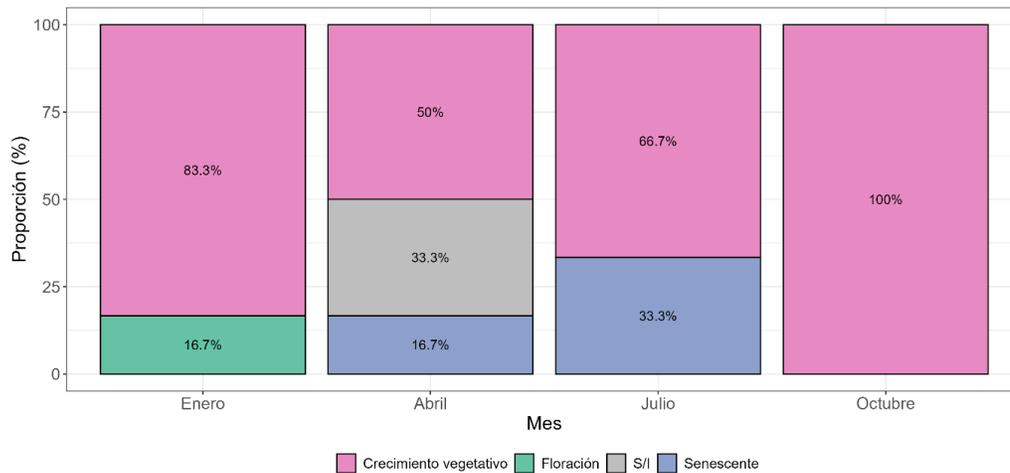
En la Figura 4.9 se observa que, durante las campañas de monitoreo realizadas en 2024, los individuos de *D. spicata* mostraron una alta prevalencia del estado de crecimiento vegetativo a lo largo del año, con valores que alcanzaron el 83,3 % en enero, 50 % en abril, 66,7 % en julio y un 100 % en octubre.

La floración se registró únicamente en enero, con un 16,7 % de los individuos, lo que indica un posible evento reproductivo de verano.



El estado de senescencia fue observado en abril (16,7 %) y julio (33,3 %), mientras que en abril un 33,3 % de los individuos fue clasificado como “sin información”.

Figura 4.9. Fenología de los individuos de *Distichlis spicata* monitoreados en las campañas 2024



Fuente: elaboración propia

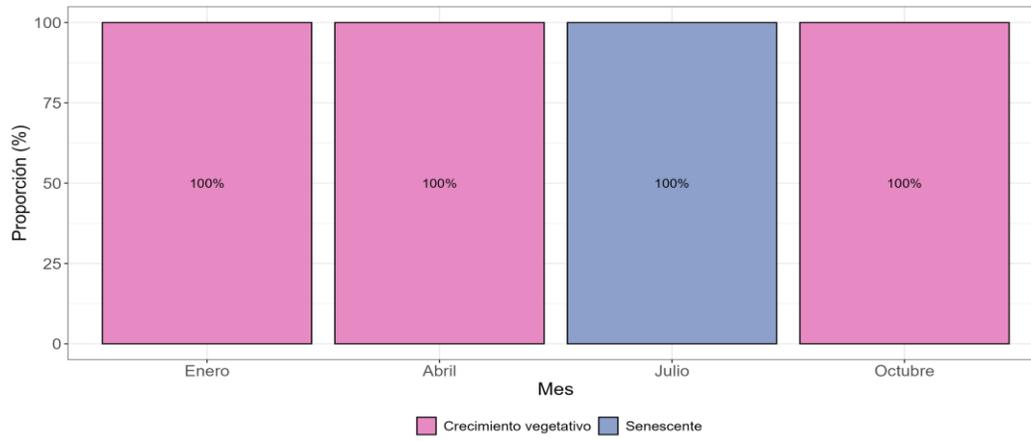
c. *Nitrophila atacamensis*

En la

Figura 4.10 se observa que, durante las campañas de monitoreo realizadas en 2024, los individuos de *N. atacamensis* presentaron un comportamiento fenológico homogéneo. En los meses de enero, abril y octubre, todos los individuos se encontraron en estado de crecimiento vegetativo (100 %), lo que sugiere una actividad vegetativa sostenida durante gran parte del año.

Durante el monitoreo de julio, todos los individuos se registraron en estado de senescencia (100 %), lo que indicaría una respuesta estacional asociada a las condiciones invernales.

Figura 4.10. Fenología de los individuos de *Nitrophila atacamensis* monitoreados en las campañas 2024



Fuente: elaboración propia

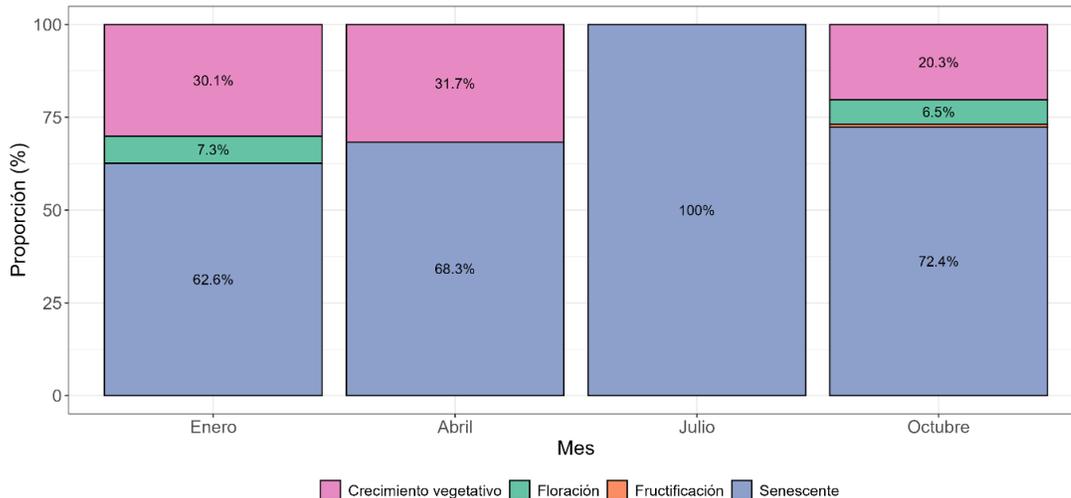
d. *Tessaria absinthioides*

En la Figura 4.11 se observa que los individuos de *T. absinthioides* presentaron una alta proporción de senescencia a lo largo de todas las campañas de monitoreo realizadas en 2024, con valores que oscilaron entre el 62,6 % (enero) y el 100 % (julio). Este patrón sugiere una fenología marcada por una baja actividad vegetativa durante gran parte del año.

El crecimiento vegetativo se mantuvo entre el 20,3 % y el 31,7 % en los meses de enero, abril y octubre, mientras que en julio no se registró actividad de este tipo. La floración fue escasa, evidenciándose únicamente en enero (7,3 %) y octubre (6,5 %), mientras que la fructificación se registró de forma puntual en octubre, con una proporción inferior al 1 %.

Estos resultados podrían indicar que *T. absinthioides* exhibe una fenología dominada por estados de senescencia, con eventos reproductivos esporádicos y una actividad vegetativa limitada, posiblemente en respuesta a condiciones ambientales restrictivas. No obstante, es importante señalar que el monitoreo se ha realizado sobre ejemplares fijos a lo largo del tiempo, y parte de los individuos catalogados como senescentes en todas las campañas corresponderían a plantas que ya habrían completado su ciclo vital.

Figura 4.11. Fenología de los individuos de *Tessaria absinthioides* monitoreados en las campañas de 2024



Fuente: elaboración propia

4.4.2 Porcentaje de copa viva

El porcentaje de copa viva representa la proporción de biomasa aérea vegetal con follaje fotosintéticamente activo, conforme a lo indicado en la RCA N°226/2006. Los resultados del monitoreo anual de 2024 muestran una clara estacionalidad en este indicador, con un predominio de individuos sin follaje activo durante gran parte del año (Tabla 5-6, Figura 4.12).

En los meses de invierno (julio), más del 90 % de los individuos evaluados se encontraban sin copa viva, reflejando un periodo de receso vegetativo generalizado. Esta condición también se mantuvo elevada en octubre (63,8 %) y enero (55,3 %), lo que indica una recuperación limitada incluso hacia fines de primavera y verano. Solo en abril se observó una mayor proporción de individuos con follaje verde, aunque el 61,7 % permanecía aún en la categoría 0 %.

Las clases con mayor proporción de copa viva (25–50 % y 5–25 %) fueron más frecuentes entre enero y abril, con una disminución marcada en los meses posteriores. Las categorías de mayor cobertura (>50 %) fueron escasamente representadas durante todo el año, con valores inferiores al 11 %.

Estos resultados sugieren una baja actividad fotosintética sostenida en los individuos monitoreados del área, con una respuesta moderada a las condiciones estacionales. La alta proporción de individuos sin follaje en todos los periodos también podría estar influida por la permanencia de ejemplares muertos o senescentes de *T. absinthioides* dentro de las unidades de monitoreo, aspecto que debe considerarse al interpretar las fluctuaciones en la cobertura foliar activa. En particular, cabe destacar que *T. absinthioides* representa el 87 % de los individuos monitoreados (123 de un total de 141), por lo que su comportamiento fenológico tiene un peso determinante en las tendencias generales observadas.

Tabla 4-6. Número y proporción de individuos por clase de copa viva

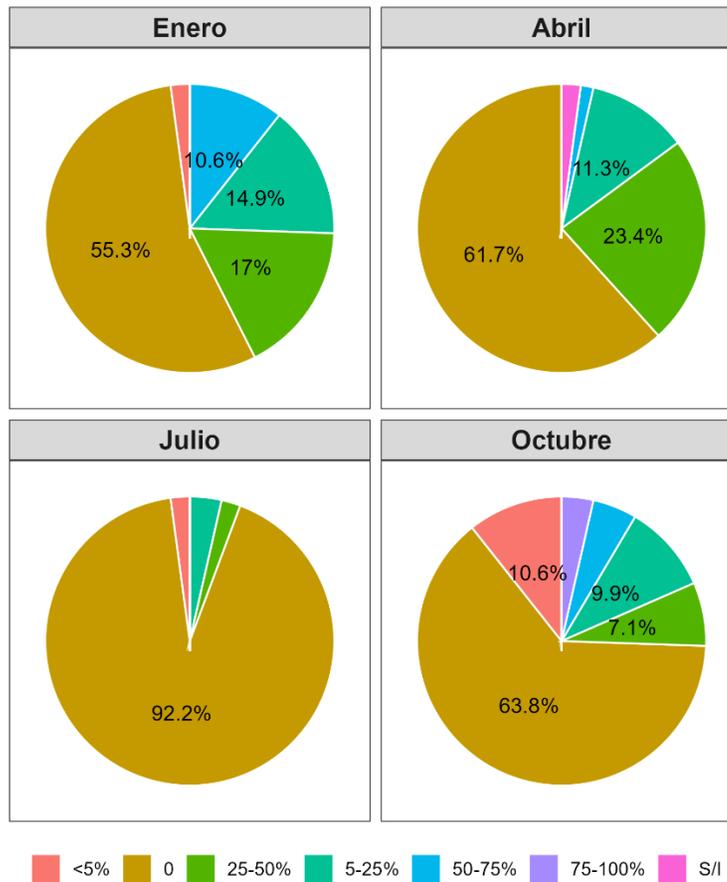
Clase de copa viva	Número de individuos por clase de copa viva	Proporción (%) del número de individuos por clase de copa viva
--------------------	---	--



	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre
0%	78	87	130	90	55.32	61.70	92.20	63.83
<5%	3	0	3	15	2.13	0.00	2.13	10.64
5-25%	21	16	5	14	14.89	11.35	3.55	9.93
25-50%	24	33	3	10	17.02	23.40	2.13	7.09
50-75%	15	2	0	7	10.64	1.42	0.00	4.96
75-100%	0	0	0	5	0.00	0.00	0.00	3.55
Sin información	0	3	0	0	0.00	2.13	0.00	0.00
Total	141	141	141	141	100.00	100.00	100.00	100.00

Fuente: elaboración propia

Figura 4.12. Porcentaje de copa viva de los individuos monitoreados en 2024



Fuente: elaboración propia

4.4.2.1 Porcentaje de copa viva según especie

En la siguiente sección, se muestra la evolución de la categoría de copa viva para las cuatro especies objeto de seguimiento *Atriplex atacamensis*, *Distichlis spicata*, *Nitrophila atacamensis* y *Tessaria absinthioides*, monitoreados para los trimestres del 2024: enero (verano), abril (otoño), julio (invierno) y octubre (primavera).

a. *Atriplex atacamensis*

La especie *A. atacamensis* presentó una alta proporción de individuos con copa viva durante las campañas de monitoreo 2024, evidenciando un patrón fenológico más activo que otras especies monitoreadas (Figura 4.13). En enero, el 90 % de los individuos presentaban follaje activo, concentrándose en las clases 5–25 % (30 %) y 25–50 % (60 %). En abril, aunque se observó una leve disminución, el 70 % de los individuos aún mostraba copa viva, distribuidos principalmente en las clases 5–25 % (30 %) y 25–50 % (40 %), mientras que un 10 % fue clasificado sin información (S/I) y un 20 % sin copa viva (0 %).

Durante el invierno (julio), se mantuvo un 90 % de individuos con alguna proporción de follaje, destacando una distribución más equilibrada entre las clases 5–25 %, 25–50 % y 50–75 % (todas con 30 %), además de un 10 % en

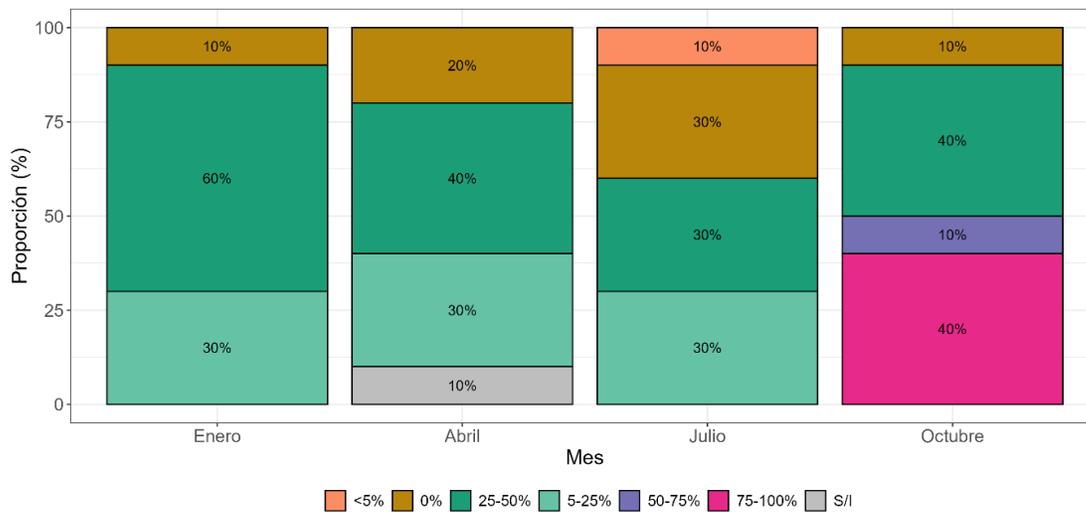


la clase <5 %. Este patrón indica una tolerancia notable a las condiciones invernales en comparación con otras especies del monitoreo.

En octubre, se observó un incremento en los individuos con mayor cobertura foliar, con un 40 % en la clase 75–100 % y un 10 % adicional en 50–75 %, lo que indica una recuperación significativa al inicio de la primavera. Solo un 10 % de los individuos no presentó follaje (0 %).

En conjunto, estos resultados sugieren que *A. atacamensis* mantiene una actividad fotosintética estable a lo largo del año, con una marcada recuperación hacia la primavera, lo que podría estar asociado a una mayor tolerancia a las condiciones climáticas del área o a su estrategia adaptativa como especie perenne.

Figura 4.13. Porcentaje de copa viva de los individuos de *Atriplex atacamensis* monitoreados en las campañas 2024



Fuente: elaboración propia

b. *Distichlis spicata*

La especie *D. spicata* mostró una notable variabilidad en la proporción de copa viva a lo largo del monitoreo 2024, reflejando una respuesta fenológica diversa entre campañas. En enero, todos los individuos presentaron algún grado de actividad fotosintética, con un 50 % en la clase 5–25 %, 33,3 % en 25–50 % y un 16,7 % con cobertura foliar entre 50–75 %, lo que indica un buen estado vegetativo en el periodo estival (Figura 4.14).

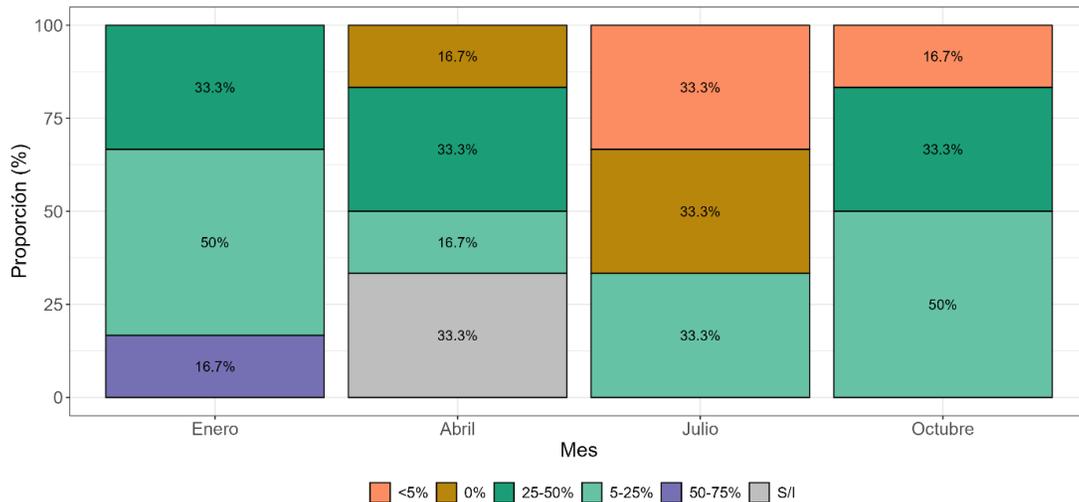
En abril, la actividad vegetativa disminuyó levemente: un 16,7 % de los individuos no presentó copa viva (categoría 0 %) y un 33,3 % se clasificó sin información (S/I). No obstante, el 50 % restante mantuvo cierto nivel de follaje activo, distribuido entre las clases 5–25 % (16,7 %) y 25–50 % (33,3 %).

Durante julio, se evidenció el mayor grado de estrés vegetativo, con un 33,3 % de los individuos en categoría <5 % y otro 33,3 % sin copa viva (0 %). Solo un tercio de los individuos (33,3 %) mostró follaje activo, todos en la clase 5–25 %, lo que coincide con el periodo invernal y las condiciones más restrictivas del año.

En octubre, se observó una recuperación, con un 83,3 % de los individuos presentando alguna proporción de follaje verde, distribuidos en las clases 5–25 % (50 %) y 25–50 % (33,3 %). Solo un 16,7 % de los individuos se mantuvo en categoría <5 %, sin observarse individuos completamente sin follaje.

Estos resultados indican que *D. spicata* posee una fenología flexible, con capacidad de mantener actividad fotosintética en distintas épocas del año, aunque con signos de estrés invernal. La recuperación observada en primavera sugiere una respuesta estacional favorable en condiciones menos restrictivas.

Figura 4.14. Porcentaje de copa viva de los individuos de *Distichlis spicata* monitoreados en las campañas de 2024



Fuente: elaboración propia

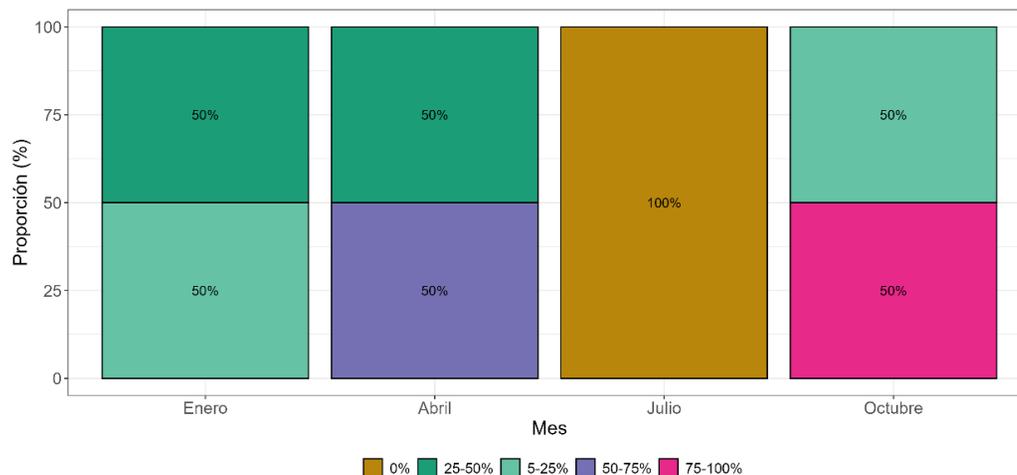
c. *Nitrophila atacamensis*

La especie *N. atacamensis* presentó una marcada variabilidad estacional en la proporción de copa viva a lo largo del año 2024 (Figura 4.15). En los meses de verano (enero), los individuos se distribuyeron equitativamente entre las categorías de cobertura 5–25 % y 25–50 %, con un 50 % de los ejemplares en cada clase, lo que sugiere una actividad fotosintética moderada. Durante abril, esta tendencia se mantuvo para la mitad de los individuos (25–50 %), mientras que la otra mitad presentó un aumento en la cobertura foliar, alcanzando la categoría 50–75 %.

En contraste, en julio se evidenció un receso vegetativo absoluto, con el 100 % de los individuos registrados en la categoría 0 %, es decir, sin presencia de follaje activo. Esta situación cambió de forma significativa en octubre, donde se observó una recuperación notable: el 50 % de los individuos presentó una cobertura de copa viva entre 5–25 %, mientras que el otro 50 % alcanzó la categoría más alta registrada (75–100 %).

Estos resultados podrían evidenciar una respuesta fenológica bimodal de la especie, con máximos de actividad fotosintética en otoño y primavera, y un cese completo durante el invierno. Esta dinámica sugiere una alta sensibilidad estacional, posiblemente influenciada por la disponibilidad hídrica y las condiciones térmicas del sitio. No obstante, debido al bajo número de individuos monitoreados ($n = 2$), estos resultados deben interpretarse con cautela.

Figura 4.15. Porcentaje de copa viva de los individuos de *Nitrophila atacamensis* monitoreados en las campañas 2024



Fuente: elaboración propia

d. *Tessaria absinthioides*

La especie *Tessaria absinthioides* mostró una baja proporción de cobertura foliar activa a lo largo de todas las campañas del año 2024 (Figura 4.16), con una alta dominancia de individuos sin follaje (categoría 0 %). En enero, un 62,6 % de los ejemplares se encontraba sin copa viva, mientras que el resto se distribuyó principalmente entre las categorías 5–25 % (11,4 %), 25–50 % (12,2 %) y 50–75 % (11,4 %), indicando una condición vegetativa parcial en un pequeño grupo de individuos.

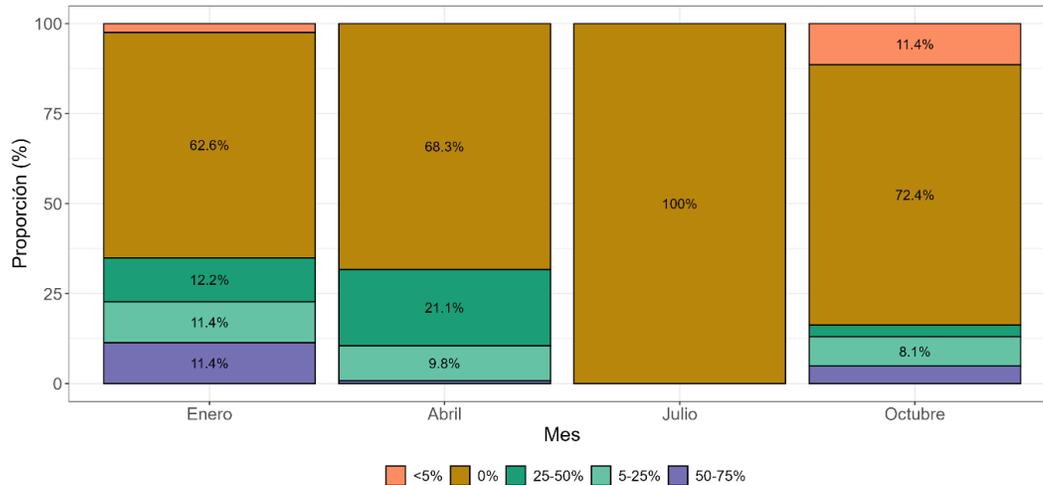
Durante abril, la proporción de individuos sin follaje aumentó al 68,3 %, y aunque un 21,1 % presentó cobertura entre 25–50 %, el porcentaje de individuos con cobertura superior a 50 % disminuyó. En julio, se observó un receso vegetativo total, con el 100 % de los individuos en la categoría 0 %, evidenciando la inactividad completa de la especie durante el invierno.

En octubre se registró una leve recuperación, aunque el 72,4 % de los individuos permaneció sin follaje. Solo un 11,4 % alcanzó la categoría <5 % de cobertura viva, y el resto se mantuvo en categorías bajas.

Estos resultados reflejan una copa viva marcadamente inactiva, con predominio del estado sin follaje durante todo el año, y únicamente breves repuntes de actividad vegetativa en los meses más cálidos. Este patrón podría estar asociado a condiciones ambientales restrictivas para los individuos monitoreados o como hemos señalado previamente el número de individuos que permanecen senescente o muertos durante el año.



Figura 4.16. Porcentaje de copa viva de los individuos de *Tessaria absinthioides* monitoreados en las campañas de 2024



Fuente: elaboración propia

4.4.3 Vitalidad

Durante las campañas de monitoreo realizadas a lo largo del año 2024, se observó una alta proporción de individuos en condición seca, lo que sugiere una disminución general en la vitalidad de la vegetación monitoreada (Figura 4.12, Figura 4.17). En enero, más de la mitad de los individuos (55,3 %) fueron clasificados como secos, mientras que un 21,9 % presentaba crecimiento normal y un 20,6 % se encontraba en condición débil. Esta distribución indica que, al inicio del año, coexistían estados avanzados de senescencia con algunos niveles de vigor moderado.

En abril, se registró un aumento en los individuos secos, alcanzando un 61,7 %, acompañado de una disminución en la proporción de individuos con crecimiento normal (12,1 %) y un leve incremento en los débiles (23,4 %). Esta tendencia continuó durante el invierno, cuando en julio se evidenció el punto más crítico del año, con un 92,2 % de los individuos secos y solo un 5,7 % mostrando alguna señal de crecimiento normal, lo que refleja un receso vegetativo generalizado.

Para octubre, se observó una ligera recuperación: la proporción de individuos secos disminuyó a 63,8 %, mientras que los individuos con crecimiento normal aumentaron a 23,4 %. No obstante, el estado general de la vegetación aún reflejaba bajos niveles de vitalidad, con solo un 12,1 % en condición débil y ausencia de categorías vigorosas.

Estos resultados sugieren que la vegetación monitoreada experimenta una marcada estacionalidad en su estado de vitalidad, con un claro receso durante los meses más fríos (julio) y una recuperación parcial hacia la primavera (octubre), lo cual corresponde a la tendencia general observada en los años previos de monitoreo. La alta proporción de individuos secos durante todo el año podría estar reflejando condiciones ambientales restrictivas, estrés hídrico persistente o procesos de degradación progresiva en la vegetación del sitio.

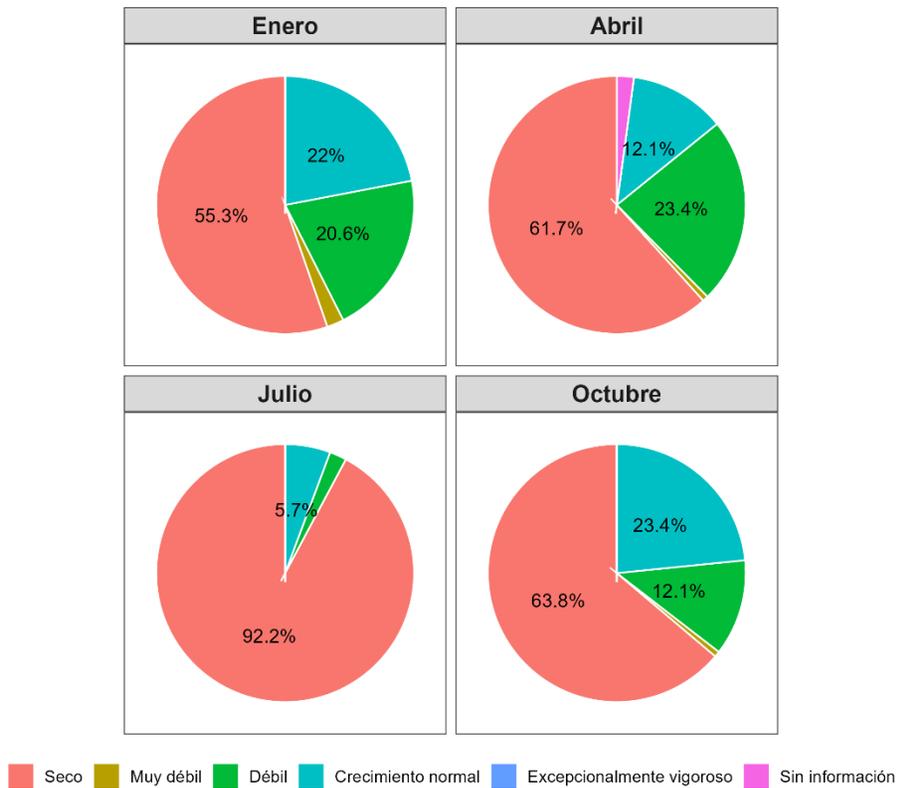


Tabla 4-7. Resumen de individuos por categoría de vitalidad

Categoría	Número de Individuos por categoría de vitalidad				Proporción (%) del número de individuos por categoría de vitalidad			
	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre
Seco	78	87	130	90	55.32	61.70	92.20	63.83
Muy débil	3	1	0	1	2.13	0.71	0.00	0.71
Débil	29	33	3	17	20.57	23.40	2.13	12.06
Crecimiento normal	31	17	8	33	21.99	12.06	5.67	23.40
Excepcionalmente vigoroso	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Sin información	0	3	0	0	0.00	2.13	0.00	0.00
Total	141	141	141	141	100.00	100.00	100.00	100.00

Fuente: elaboración propia

Figura 4.17. Vitalidad de los individuos monitoreados en las campañas de 2024



Fuente: elaboración propia



4.4.3.1 Vitalidad según especies

En la siguiente sección, se muestra la evolución de la categoría de vitalidad para las cuatro especies objeto de seguimiento *A. atacamensis*, *D. spicata*, *N. atacamensis* y *T. absinthioides*, monitoreados para los trimestres del 2024: enero (verano), abril (otoño), julio (invierno) y octubre (primavera).

a. *Atriplex atacamensis*

La especie *A. atacamensis* presentó una condición de vitalidad relativamente estable a lo largo del año 2024, con una alta proporción de individuos en estado de crecimiento normal, particularmente en las campañas de invierno y primavera (Figura 4.18). En enero, el 40 % de los individuos mostró crecimiento normal, seguido por un 30 % en condición débil, un 20 % muy débil y un 10 % seco, lo que sugiere una diversidad de estados fisiológicos al inicio del año.

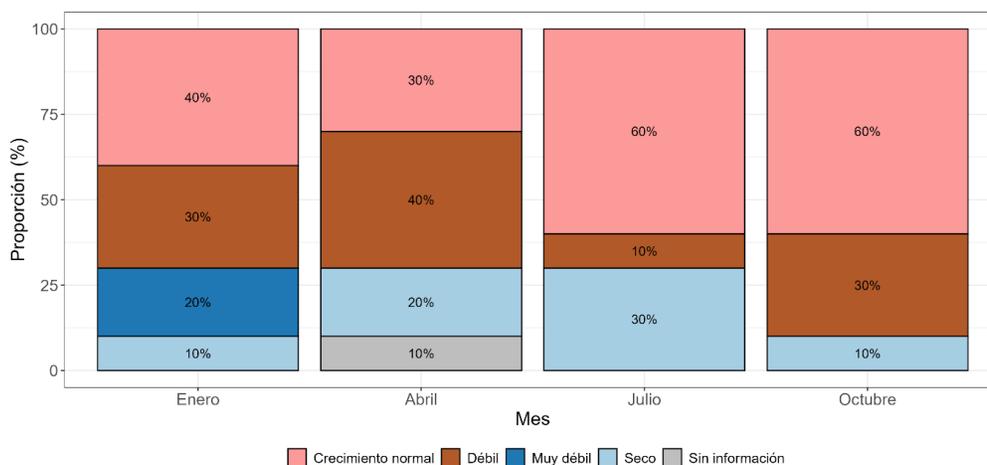
En abril, se mantuvo la proporción de individuos sin información (10 %), mientras que los estados de crecimiento normal (30 %) y débil (30 %) dominaron la población, acompañados por un 20 % en condición muy débil y un 10 % seco. Esta distribución sugiere una ligera disminución del vigor respecto a enero, aunque sin cambios extremos.

Durante julio, se observó el punto más alto de vitalidad: un 60 % de los individuos fue clasificado con crecimiento normal y un 30 % en condición muy débil. No se registraron individuos secos ni sin información en esta campaña, lo que podría indicar una buena respuesta fisiológica en esta época invernal.

En octubre, se mantuvo la proporción de individuos con crecimiento normal (60 %) y se registró un aumento en la proporción de individuos débiles (30 %), mientras que los estados de muy débil disminuyeron en proporción.

Estos resultados sugieren que *A. atacamensis* mantiene una buena condición fisiológica general durante el año, con una alta capacidad de mantener el crecimiento activo incluso en invierno, y baja incidencia de estados secos, lo que podría reflejar una mejor adaptación a las condiciones ambientales del sitio en comparación con otras especies monitoreadas.

Figura 4.18. Vitalidad de los individuos de *Atriplex atacamensis* monitoreados en la campaña 2024



Fuente: elaboración propia



b. *Distichlis spicata*

La especie *D. spicata* presentó una variabilidad importante en su estado de vitalidad a lo largo del año 2024, reflejando una condición general intermedia, con predominio de categorías Débil y Crecimiento normal. (Figura 4.19).

En enero, se observó una distribución equitativa entre individuos en condición de crecimiento normal (50 %) y débiles (50 %), lo que sugiere un buen estado fisiológico general al inicio del año.

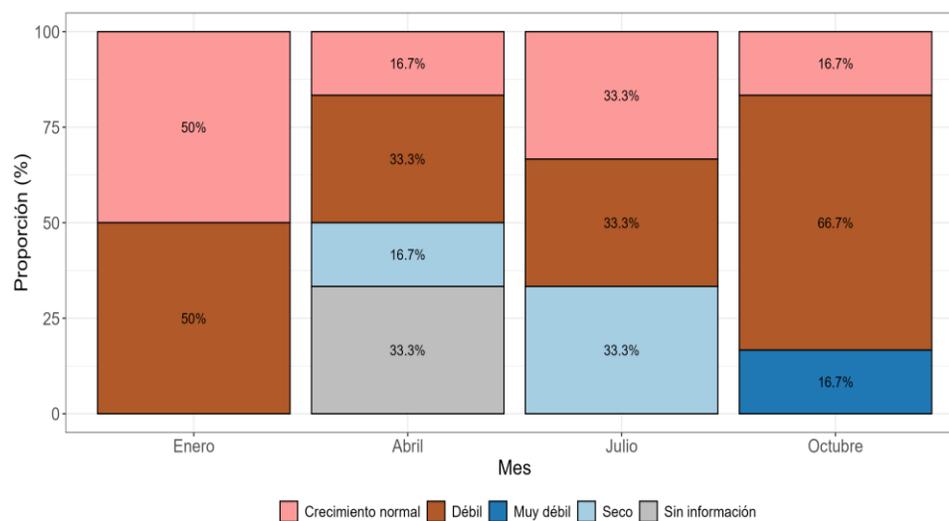
Durante abril, la proporción de individuos con crecimiento normal disminuyó drásticamente al 16,7 %, mientras que las categorías débil y seco alcanzaron un 33,3 % cada una. Además, un 16,7 % se registró como muy débil, lo que indica un descenso marcado en la vitalidad respecto de la campaña anterior, posiblemente asociado a condiciones ambientales desfavorables o a una fase fenológica regresiva.

En julio se mantuvo la tendencia hacia estados menos vigorosos, con una distribución homogénea entre las categorías crecimiento normal, débil y muy débil (33,3 % cada una), sin presencia de individuos secos ni sin información. Este patrón podría reflejar cierta estabilidad dentro de un rango de estrés fisiológico, o bien responder a la influencia de condiciones invernales que afectan a gran parte de las especies presentes en estos ambientes.

En octubre, se observó un incremento en los individuos débiles (66,7 %), mientras que las categorías crecimiento normal y muy débil se mantuvieron en 16,7 % cada una, sin registros de individuos secos. Esta distribución sugiere una recuperación parcial hacia la primavera.

En conjunto, los resultados indican que *D. spicata* mantiene cierto grado de resiliencia, con capacidad para sostener crecimiento activo en parte de su población. Sin embargo, también se evidencia una alta proporción de individuos en estados subóptimos de vitalidad durante buena parte del año. Cabe señalar que estos monitoreos se basan en apreciaciones visuales de carácter cualitativo, por lo que los resultados están sujetos a la interpretación del observador.

Figura 4.19. Vitalidad de los individuos de *Distichlis spicata* monitoreados en las campañas de 2024



Fuente: elaboración propia



c. *Nitrophila atacamensis*

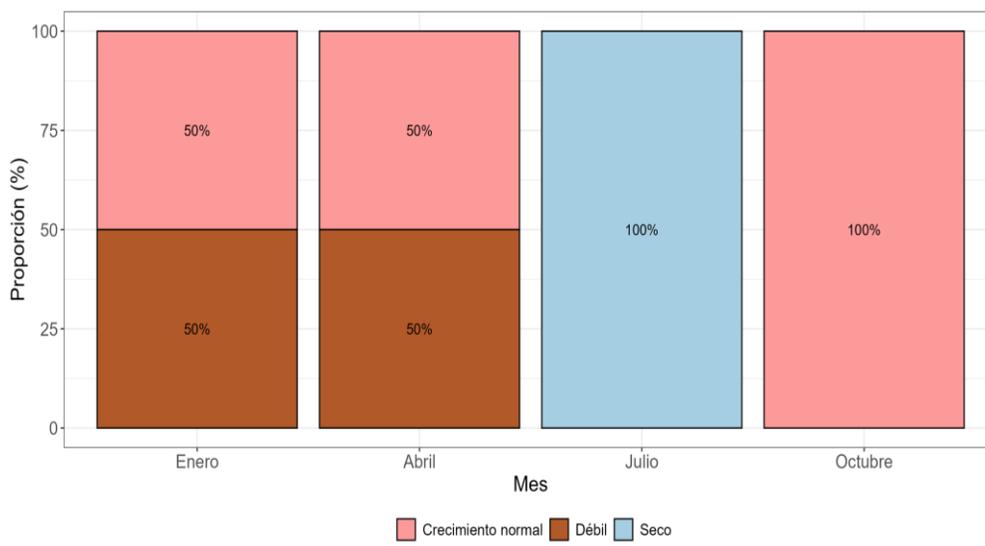
La especie *N. atacamensis* mostró patrones contrastantes en su estado de vitalidad a lo largo de las campañas de 2024, destacando por cambios abruptos entre periodos de mayor y menor vigor (Figura 4.20).

Durante las campañas de verano y otoño (enero y abril), la distribución de los individuos fue equivalente entre las categorías crecimiento normal y débil (50 % cada una)..

En julio, se registró un cambio radical en la condición de la población, con el 100 % de los individuos clasificados como secos, lo que indica un receso vegetativo total durante el invierno, posiblemente asociado a bajas temperaturas o condiciones ambientales restrictivas características de la estación. Volviendo a presentar una recuperación completa en el otoño con el 100% de los individuos en la categoría de Crecimiento normal.

Este patrón sugiere que *N. atacamensis* responde de forma marcadamente estacional, alternando entre fases de receso total y fases de recuperación de vitalidad, lo cual podría formar parte de su estrategia adaptativa en ambientes desérticos extremos.

Figura 4.20. Vitalidad de los individuos de *Nitrophila atacamensis* monitoreados en las campañas de 2024



Fuente: elaboración propia

d. *Tessaria absinthioides*

La especie *Tessaria absinthioides* presentó una condición de vitalidad predominantemente desfavorable durante las campañas de 2024, con un alto porcentaje de individuos clasificados en la categoría seco a lo largo del año (Figura 4.21).

En enero, el 62,6 % de los individuos se encontraba en estado seco, mientras que un 17,9 % fue clasificado como débil y un 18,7 % mostró crecimiento normal.



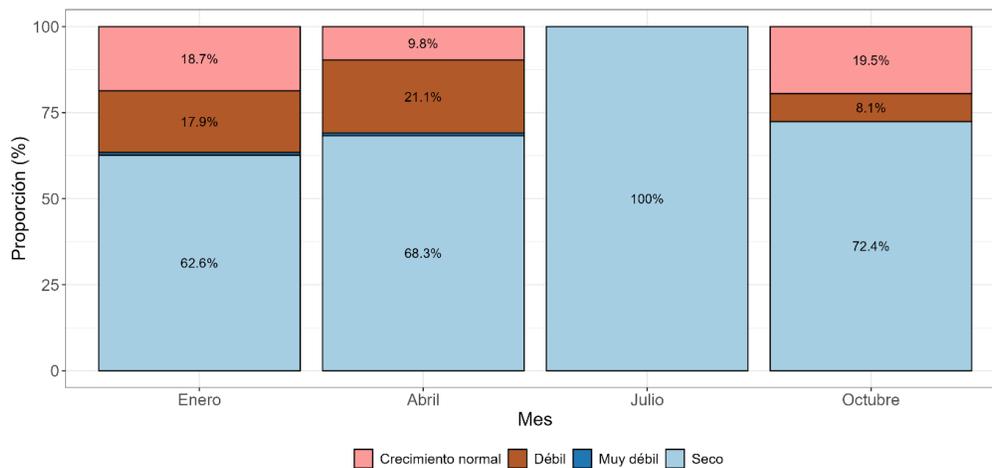
Durante abril, la proporción de individuos secos se mantuvo elevada (68,3 %), con un leve aumento en la categoría débil (21,1 %) y una disminución de aquellos con crecimiento normal (9,8 %), lo que indica una pérdida adicional en la condición general.

En julio, todos los individuos evaluados (100 %) fueron clasificados como secos, lo que indica un receso vegetativo total o una condición crítica sostenida durante el invierno.

Hacia octubre, se observó una leve recuperación: el porcentaje de individuos secos descendió al 72,4 %, mientras que un 19,5 % mostró crecimiento normal y un 8,1 % se mantuvo en estado débil. No obstante, la condición general continuó siendo mayoritariamente desfavorable.

En conjunto, los resultados evidencian una situación persistente de senescencia en *T. absinthioides*, con una escasa proporción de individuos en condiciones óptimas y una alta representación de estados de receso o reducción durante todo el año. Aunque se observan señales puntuales de recuperación, la tendencia general podría estar indicando una elevada sensibilidad a condiciones ambientales restrictivas o un proceso de disminución gradual asociado al ciclo de vida de esta especie.

Figura 4.21 Vitalidad de los individuos de *Tessaria absinthioides* monitoreados en las campañas de 2024



Fuente: elaboración propia



5 Discusión

En la siguiente sección se presenta un análisis del período histórico disponible para los parámetros ambientales evaluados, incluyendo el contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS), la profundidad de la napa freática y el estado vital de la vegetación (fenología, cobertura de follaje verde y vitalidad de las plantas). Este análisis abarca desde el año 2007 hasta 2024, permitiendo observar tendencias temporales y posibles relaciones entre estas variables a lo largo del tiempo.

En la Figura 5.1 se observa la variación estacional del contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS) para el período 2007-2024, complementada con los datos presentados desde la Tabla 5-1 hasta la

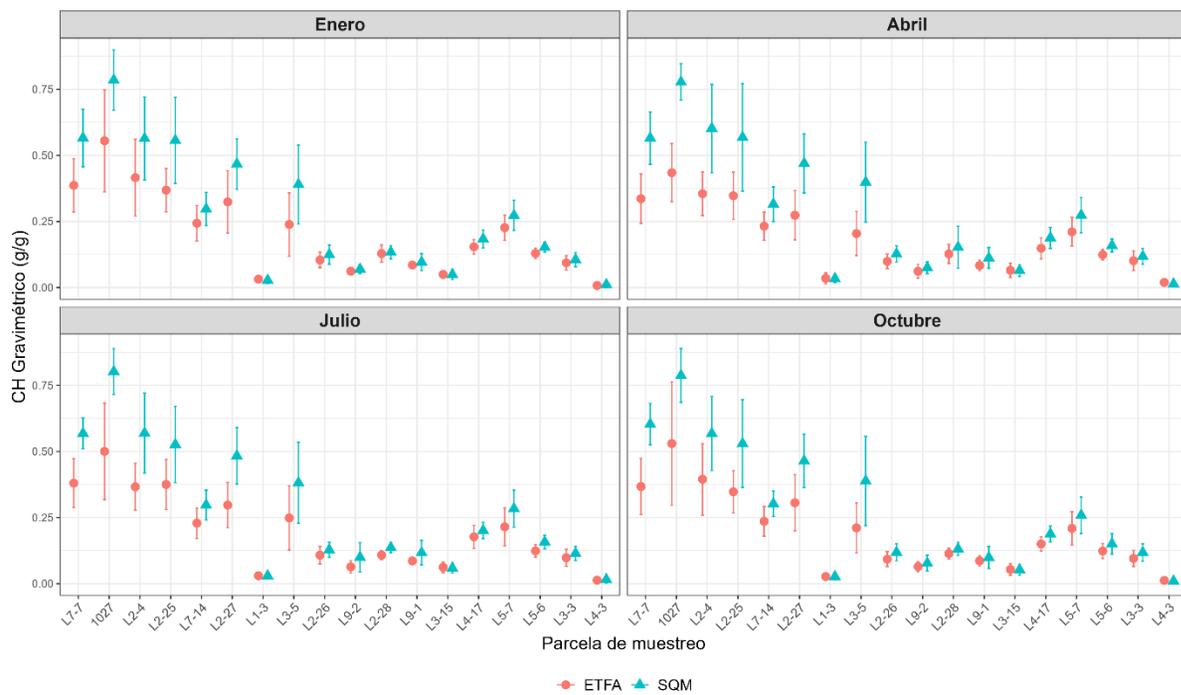
Tabla 5-10, que representan valores promedio por parcela de monitoreo y por trimestre. En general, se mantiene el patrón ya documentado de mayor contenido de humedad en las parcelas ubicadas al oeste del área de estudio (por ejemplo, L7-7 y 1027), mientras que las parcelas orientales (como L4-3 y L3-3) presentan consistentemente los valores más bajos de CHS, con registros cercanos a cero en todos los periodos evaluados. Esta diferencia espacial ha sido reportada en estudios previos, y puede asociarse a una mayor exposición, pendiente o a las características edáficas propias de los sectores orientales.

A nivel temporal, se mantiene el patrón de mayor contenido de humedad en los meses de enero y abril, posiblemente asociado a eventos de precipitación o recarga puntual (Anexo 3). Este comportamiento estacional sugiere que la variabilidad intra-anual sigue siendo un factor clave en la disponibilidad hídrica del suelo, aspecto relevante al momento de analizar su relación con el estado vital de la vegetación.

En cuanto a la comparación entre laboratorios, se mantiene a nivel histórico la tendencia previamente observada, en la cual el laboratorio ETFA reporta valores ligeramente inferiores a los obtenidos por el Laboratorio Metalúrgico de SQM, particularmente en parcelas con mayores contenidos de humedad. No obstante, ambas curvas presentan patrones similares, lo que indica que la tendencia espacial y temporal del CHS se conserva independientemente del laboratorio que realiza la medición. Por ello, para los análisis históricos de CHS, se consideran únicamente los datos correspondientes al Laboratorio Metalúrgico de SQM.



Figura 5.1. Variación del contenido de humedad gravimétrico del suelo, por parcela de monitoreo, desde el año 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



Tabla 5-1. Contenido de humedad del suelo (g/g) reportado por el laboratorio metalúrgico de SQM Salar. Mes de enero, período 2007–2024

Parcela de monitoreo	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
2007	S/I																	
2008	0,798	0,894	0,614	0,935	0,247	0,48	0,013	0,381	0,127	0,072	0,149	0,105	0,031	0,224	0,233	0,17	0,103	0,005
2009	0,723	0,908	0,524	0,707	0,263	0,501	0,007	0,385	0,104	0,069	0,151	0,031	0,014	0,209	0,23	0,166	0,063	0,003
2010	0,499	0,731	0,997	0,625	0,384	0,622	0,024	0,603	0,202	0,092	0,177	0,17	0,023	0,225	0,356	0,16	0,116	0,008
2011	0,487	0,798	0,769	0,828	0,354	0,578	0,022	0,554	0,184	0,044	0,146	0,096	0,043	0,208	0,299	0,162	0,122	0,003
2012	0,537	0,78	0,461	0,397	0,353	0,487	0,021	0,418	0,119	0,041	0,148	0,049	0,055	0,19	0,239	0,158	0,128	0,001
2013	0,559	0,876	0,622	0,792	0,364	0,555	0,033	0,56	0,105	0,085	0,085	0,114	0,085	0,225	0,339	0,163	0,112	0,044
2014	0,512	0,7	0,631	0,505	0,3	0,469	0,03	0,553	0,114	0,065	0,121	0,087	0,061	0,162	0,213	0,163	0,135	0,005
2015	0,55	0,734	0,549	0,426	0,316	0,464	0,029	0,48	0,114	0,09	0,122	0,118	0,057	0,143	0,329	0,155	0,092	0,003
2016	0,501	0,83	0,555	0,465	0,324	0,546	0,033	0,466	0,14	0,087	0,126	0,102	0,05	0,137	0,336	0,166	0,112	0,017
2017	0,531	0,785	0,48	0,477	0,354	0,46	0,024	0,378	0,106	0,067	0,139	0,125	0,04	0,217	0,361	0,167	0,085	0,006
2018	0,51	0,806	0,483	0,48	0,291	0,491	0,025	0,436	0,122	0,091	0,124	0,098	0,048	0,185	0,221	0,167	0,126	0,01
2019	0,632	0,913	0,717	0,577	0,34	0,472	0,059	0,423	0,189	0,071	0,175	0,093	0,052	0,153	0,224	0,149	0,111	0,003
2020	0,523	0,78	0,559	0,476	0,221	0,488	0,031	0,163	0,11	0,068	0,141	0,086	0,068	0,178	0,231	0,112	0,123	0,017
2021	S/I	S/I	0,447	0,472	0,282	0,376	0,043	0,22	0,103	0,079	0,139	0,107	0,07	0,176	0,266	0,146	0,12	0,018
2022	0,39	0,641	0,336	0,406	0,137	0,247	0,004	0,127	0,064	0,048	0,108	0,065	0,025	0,122	0,174	0,114	0,043	0,004
2023	0,537	0,904	0,41	0,445	0,28	0,428	0,038	0,331	0,128	0,062	0,133	0,121	0,059	0,217	0,284	0,157	0,137	0,03
2024	0,764	0,48	0,431	0,451	0,242	0,281	0,034	0,152	0,087	0,049	0,088	0,068	0,055	0,153	0,304	0,118	0,069	0,013
CHS Promedio ± Desv Stand	0,566	0,785	0,564	0,557	0,297	0,467	0,028	0,390	0,125	0,069	0,134	0,096	0,049	0,184	0,273	0,153	0,106	0,011
	0,106	0,110	0,153	0,158	0,061	0,093	0,013	0,145	0,035	0,016	0,024	0,031	0,018	0,033	0,056	0,019	0,026	0,011

S/I: Indica que no se pudieron tomar mediciones. Por ejemplo, el monitoreo de enero de 2007 no es presentado ya que los reportes del informe comenzaron en abril de ese año (en la etapa preoperacional del proyecto). Se aclara que el monitoreo (operacional) inició una vez que los pozos (tanto de extracción como de observación) fueron habilitados, comenzando en julio de 2007.



Tabla 5-2. Contenido de humedad del suelo (g/g) reportado por el laboratorio metalúrgico de SQM Salar. Mes de abril, período 2007 – 2024

Parcela de monitoreo	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
2007	0,453	0,753	0,838	1,079	0,217	0,496	0,04	0,524	0,183	0,097	0,183	0,115	0,066	0,242	0,338	0,198	0,133	0,004
2008	0,644	0,798	0,795	0,817	0,258	0,509	0,029	0,403	0,131	0,107	0,157	0,056	0,052	0,211	0,259	0,18	0,132	0,004
2009	0,872	0,666	0,929	1,017	0,362	0,766	0,019	0,628	0,156	0,068	0,167	0,178	0,039	0,263	0,244	0,163	0,121	0,009
2010	0,623	0,849	0,845	0,6	0,381	0,552	0,086	0,54	0,171	0,058	0,137	0,147	0,052	0,238	0,448	0,179	0,111	0,007
2011	0,533	0,858	0,529	0,554	0,491	0,502	0,017	0,626	0,104	0,037	0,104	0,051	0,067	0,163	0,238	0,187	0,106	0,01
2012	0,56	0,84	0,707	0,641	0,379	0,582	0,035	0,502	0,138	0,088	0,166	0,086	0,096	0,197	0,28	0,158	0,168	0,017
2013	0,533	0,831	0,618	0,463	0,327	0,458	0,028	0,443	0,128	0,066	0,106	0,128	0,084	0,162	0,313	0,165	0,124	0,009
2014	0,548	0,732	0,475	0,397	0,344	0,445	0,037	0,419	0,129	S/I	0,117	0,21	0,051	0,19	0,238	0,162	0,135	0,007
2015	0,551	0,718	0,628	0,4	0,331	0,451	0,027	0,424	0,114	0,091	0,143	0,118	0,054	0,177	0,242	0,202	0,157	0,033
2016	0,515	0,778	0,534	0,455	0,289	0,479	0,028	0,5	0,106	0,082	0,455	0,106	0,05	0,183	0,317	0,165	0,102	0,013
2017	0,651	0,818	0,556	0,507	0,32	0,533	0,027	0,429	0,139	0,1	0,135	0,112	0,06	0,16	0,302	0,162	0,104	0,018
2018	0,5	0,705	0,65	0,569	0,317	0,417	0,025	0,321	0,106	0,084	0,13	0,101	0,048	0,136	0,248	0,133	0,077	0,008
2019	S/I	S/I	0,612	0,512	0,324	0,398	0,05	0,434	0,175	0,104	0,161	0,112	0,086	0,234	0,325	0,138	0,161	0,033
2020	S/I	S/I	0,382	0,392	0,213	0,53	0,033	0,287	0,089	0,074	0,118	0,125	0,068	0,163	0,297	0,15	0,111	0,014
2021	0,482	0,711	0,434	0,475	0,282	0,32	0,026	0,189	0,095	0,065	0,1	0,116	0,053	0,179	0,187	0,144	0,126	0,018
2022	0,559	0,671	0,356	0,428	0,251	0,311	0,019	0,168	0,076	0,028	0,128	0,074	0,044	0,102	0,152	0,114	0,059	0,006
2023	0,539	0,848	0,515	0,475	0,287	0,418	0,053	0,195	0,149	0,065	0,134	0,102	0,128	0,188	0,297	0,14	0,123	0,024
2024	0,485	0,861	0,432	0,445	0,307	0,284	0,033	0,141	0,102	0,062	0,106	0,077	0,06	0,195	0,203	0,123	0,074	0,014
CHS Promedio ± Desv Stand	0,566	0,777	0,602	0,568	0,316	0,470	0,034	0,399	0,127	0,075	0,153	0,112	0,064	0,188	0,274	0,159	0,118	0,014
	0,096	0,067	0,162	0,198	0,064	0,109	0,016	0,147	0,030	0,022	0,077	0,038	0,021	0,039	0,065	0,024	0,028	0,009



Tabla 5-3. Contenido de humedad del suelo (g/g) reportado por el laboratorio metalúrgico de SQM Salar. Mes de julio, período 2007 – 2024

Parcela de monitoreo	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
2007	S/I	0,806	0,759	0,987	0,237	0,568	0,024	S/I	S/I	0,12	S/I	0,094	S/I	S/I	0,272	0,183	0,097	0,004
2008	0,577	0,913	0,484	0,583	0,279	0,509	0,031	0,41	0,16	0,069	0,159	0,093	0,05	0,208	0,263	0,175	0,109	0,015
2009	0,693	0,857	0,868	0,642	0,332	0,546	0,022	0,304	0,156	0,129	0,168	0,228	0,031	0,202	0,388	0,177	0,142	0,01
2010	0,601	0,767	0,864	0,74	0,365	0,637	0,024	0,691	0,19	0,122	0,149	0,169	0,044	0,262	0,377	0,186	0,15	0,008
2011	0,53	0,802	0,534	0,446	0,23	0,49	0,022	0,419	0,122	0,071	0,14	0,138	0,031	0,25	0,282	0,185	0,102	0,005
2012	0,619	0,799	0,673	0,545	0,383	S/I	0,026	0,519	0,136	0,111	0,164	0,112	0,091	0,213	0,339	0,098	0,146	0,017
2013	0,608	0,925	0,617	0,458	0,334	0,697	0,038	0,549	0,133	0,085	0,137	0,139	0,077	0,214	0,363	0,171	0,106	0,009
2014	0,563	0,694	0,551	0,457	0,337	0,519	0,033	0,39	0,119	0,071	0,129	0,09	0,064	0,183	0,222	0,178	0,109	0,005
2015	0,594	0,909	0,638	0,455	0,337	0,465	0,029	0,541	0,119	0,087	0,128	0,103	0,052	0,179	0,318	0,167	0,144	0,029
2016	0,519	0,728	0,516	0,397	0,312	0,493	0,022	0,47	0,106	0,076	0,119	0,098	0,05	0,179	0,284	0,174	0,113	0,015
2017	0,617	0,781	0,616	0,46	0,349	0,548	0,025	0,485	0,139	0,095	0,15	0,118	0,062	0,18	0,298	0,167	0,117	0,017
2018	0,496	0,799	0,448	0,488	0,328	0,506	0,03	0,39	0,151	0,084	0,116	0,094	0,056	0,163	0,267	0,161	0,09	0,005
2019	0,608	0,813	0,507	0,515	0,233	0,448	0,054	0,337	0,138	0,103	0,158	0,108	0,09	0,234	0,378	0,148	0,169	0,029
2020	S/I	S/I	0,446	0,426	0,231	0,347	0,035	0,232	0,101	0,075	0,107	0,095	0,064	0,143	0,201	0,128	0,085	0,017
2021	0,522	0,6	0,48	0,542	0,342	0,421	0,039	0,227	0,127	0,095	0,135	0,218	0,064	0,219	0,301	0,144	0,117	0,018
2022	0,508	0,712	0,299	0,392	0,188	0,314	0,008	0,178	0,074	0,031	0,121	0,074	0,037	0,211	0,151	0,137	0,081	0,059
2023	0,57	0,847	0,559	0,495	0,257	0,421	0,053	0,202	0,12	0,068	0,122	0,088	0,082	0,187	0,213	0,145	0,111	0,018
2024	0,467	0,888	0,391	0,445	0,278	0,287	0,019	0,141	0,08	0,301	0,111	0,05	0,051	0,193	0,188	0,111	0,073	0,006
CHS Promedio ± Desv Stand	0,568	0,802	0,569	0,526	0,297	0,483	0,030	0,381	0,128	0,100	0,136	0,117	0,059	0,201	0,284	0,158	0,115	0,016
	0,056	0,084	0,147	0,140	0,055	0,104	0,011	0,148	0,028	0,054	0,019	0,045	0,018	0,030	0,068	0,025	0,026	0,013



Tabla 5-4. Contenido de humedad del suelo (g/g) reportado por el laboratorio metalúrgico de SQM Salar. Mes de octubre, período 2007 – 2024

Parcela de monitoreo	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
2007	0,713	0,776	0,731	0,974	0,275	0,515	0,012	0,525	0,142	0,141	0,131	0,075	0,078	0,208	0,349	0,215	0,166	0,005
2008	0,609	0,958	0,648	0,712	0,272	0,520	0,024	0,348	0,134	0,126	0,165	0,093	0,031	0,225	0,239	0,195	0,134	0,003
2009	0,694	0,673	0,878	0,556	0,358	0,545	0,030	0,681	0,153	0,102	0,178	0,224	0,043	0,241	0,416	0,159	0,138	0,006
2010	0,751	0,763	0,547	0,410	0,344	0,512	0,020	0,481	0,169	0,06	0,124	0,102	0,040	0,203	0,26	0,088	0,136	0,007
2011	0,664	0,826	0,527	0,386	0,337	0,540	0,018	0,498	0,146	0,053	0,134	0,124	0,035	0,222	0,251	0,183	0,098	0,003
2012	0,644	0,838	0,611	0,852	0,348	0,610	0,031	0,527	0,123	0,101	0,151	0,113	0,059	0,212	0,290	0,175	0,132	0,011
2013	0,649	0,817	0,534	0,478	0,344	0,578	0,042	0,49	0,115	0,078	0,138	0,136	0,060	0,186	0,252	0,161	0,128	0,008
2014	0,632	0,712	0,526	0,512	0,321	0,539	0,039	0,465	0,124	0,075	0,138	0,04	0,076	0,17	0,286	0,163	0,129	0,005
2015	0,529	0,856	0,748	0,482	0,332	0,481	0,025	0,471	0,134	0,086	0,14	0,098	0,048	0,186	0,258	0,171	0,151	0,022
2016	0,57	0,915	0,624	0,491	0,326	0,529	0,027	0,435	0,111	0,075	0,114	0,101	0,049	0,178	0,254	0,164	0,114	0,011
2017	0,573	0,707	0,511	0,621	0,316	0,406	0,033	0,51	0,115	0,095	0,136	0,102	0,059	0,169	0,249	0,151	0,105	0,016
2018	0,535	0,977	0,640	0,515	0,341	0,537	0,034	0,422	0,140	0,079	0,15	0,113	0,079	0,200	0,301	0,153	0,125	0,015
2019	S/I	S/I	0,643	0,455	0,248	0,411	0,047	0,344	0,136	0,083	0,148	0,107	0,085	0,211	0,307	0,154	0,168	0,026
2020	S/I	S/I	0,472	0,445	0,278	0,379	0,037	0,289	0,113	0,074	0,114	0,105	0,067	0,154	0,292	0,158	0,111	0,023
2021	0,533	0,663	0,368	0,425	0,287	0,293	0,000	0,157	0,069	0,055	0,128	0,091	0,028	0,162	0,172	0,120	0,085	-0,010
2022	0,527	0,668	0,337	0,318	0,166	0,303	0,005	0,034	0,040	0,009	0,086	0,035	0,010	0,128	0,110	0,053	0,040	0,003
2023	0,550	0,751	0,516	0,472	0,264	0,342	0,032	0,161	0,102	0,042	0,103	0,047	0,057	0,184	0,190	0,142	0,090	0,010
2024	0,479	0,70	0,360	0,436	0,281	0,319	0,025	0,156	0,069	0,058	0,083	0,077	0,045	0,147	0,181	0,105	0,073	0,008
CHS Promedio ± Desv Stand	0,603	0,788	0,568	0,530	0,302	0,464	0,027	0,389	0,119	0,077	0,131	0,099	0,053	0,188	0,259	0,151	0,118	0,010
	0,076	0,099	0,136	0,161	0,047	0,098	0,012	0,164	0,031	0,030	0,024	0,041	0,019	0,029	0,067	0,037	0,032	0,008



Tabla 5-5. Contenido de humedad del suelo (g/g) reportado por el laboratorio metalúrgico de SQM Salar. Promedio anual, período 2007-2024

Parcela de monitoreo	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
2007	0,583	0,778	0,776	1,013	0,243	0,526	0,025	0,525	0,163	0,119	0,157	0,095	0,072	0,225	0,32	0,199	0,132	0,004
2008	0,657	0,891	0,635	0,762	0,264	0,505	0,024	0,386	0,138	0,094	0,158	0,087	0,041	0,217	0,249	0,18	0,12	0,007
2009	0,746	0,776	0,8	0,731	0,329	0,59	0,02	0,5	0,142	0,092	0,166	0,165	0,032	0,229	0,32	0,166	0,116	0,007
2010	0,619	0,778	0,813	0,594	0,369	0,581	0,039	0,579	0,183	0,083	0,147	0,147	0,04	0,232	0,36	0,153	0,128	0,008
2011	0,554	0,821	0,59	0,554	0,353	0,528	0,02	0,524	0,139	0,051	0,131	0,102	0,044	0,211	0,268	0,179	0,107	0,005
2012	0,59	0,814	0,613	0,609	0,366	0,56	0,028	0,492	0,129	0,085	0,157	0,09	0,075	0,203	0,287	0,147	0,144	0,012
2013	0,587	0,862	0,598	0,548	0,342	0,572	0,035	0,511	0,12	0,079	0,117	0,129	0,077	0,197	0,317	0,165	0,118	0,018
2014	0,564	0,71	0,546	0,468	0,326	0,493	0,035	0,457	0,122	0,07	0,126	0,107	0,063	0,176	0,24	0,167	0,127	0,006
2015	0,556	0,804	0,641	0,441	0,329	0,465	0,028	0,479	0,12	0,089	0,133	0,109	0,053	0,171	0,287	0,174	0,136	0,022
2016	0,526	0,813	0,557	0,452	0,313	0,512	0,028	0,468	0,116	0,08	0,204	0,102	0,05	0,169	0,298	0,167	0,110	0,014
2017	0,593	0,773	0,541	0,516	0,335	0,487	0,027	0,451	0,125	0,089	0,140	0,114	0,055	0,182	0,303	0,162	0,103	0,014
2018	0,510	0,822	0,555	0,513	0,319	0,488	0,029	0,392	0,13	0,085	0,130	0,102	0,058	0,171	0,259	0,154	0,105	0,010
2019	0,620	0,863	0,62	0,515	0,286	0,432	0,053	0,385	0,16	0,090	0,161	0,105	0,078	0,208	0,309	0,147	0,152	0,023
2020	0,523	0,780	0,465	0,435	0,236	0,436	0,034	0,243	0,103	0,073	0,120	0,103	0,067	0,159	0,255	0,137	0,108	0,018
2021	0,512	0,658	0,432	0,478	0,298	0,353	0,027	0,198	0,098	0,074	0,125	0,133	0,054	0,184	0,232	0,139	0,112	0,012
2022	0,496	0,673	0,332	0,386	0,185	0,294	0,009	0,127	0,064	0,029	0,111	0,062	0,029	0,141	0,147	0,104	0,056	0,018
2023	0,549	0,837	0,500	0,472	0,272	0,402	0,044	0,222	0,125	0,059	0,123	0,089	0,082	0,194	0,246	0,146	0,115	0,020
2024	0,549	0,732	0,404	0,444	0,277	0,293	0,028	0,148	0,085	0,118	0,097	0,068	0,053	0,172	0,219	0,114	0,072	0,010
CHS Promedio ± Desv Stand	0,574	0,788	0,579	0,552	0,302	0,473	0,030	0,394	0,126	0,081	0,139	0,106	0,057	0,191	0,273	0,156	0,115	0,013
	0,059	0,061	0,127	0,148	0,048	0,088	0,009	0,139	0,027	0,021	0,024	0,025	0,016	0,025	0,047	0,022	0,022	0,006
Pendiente	-0,007	-0,004	-0,021	-0,022	-0,004	-0,014	0,000	-0,023	-0,004	-0,001	-0,002	-0,002	0,001	-0,004	-0,006	-0,003	-0,002	0,001
Valor-p	0,004	0,128	0,000	0,000	0,090	0,000	0,473	0,000	0,001	0,225	0,025	0,084	0,488	0,000	0,006	0,000	0,029	0,008
Resultado	S	N/S	S	S	N/S	S	N/S	S	S	N/S	N/S	N/S	N/S	S	N/S	S	N/S	S

Regresión lineal: p-valor < 0,05 se consideró estadísticamente significativo

S: significativo - N/S: No significativo



Tabla 5-6. Contenido de humedad del suelo (g/g). ETFA* SGS (2016-2017), Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA (2018-2022) y ALS Life Sciences Chile (2024). Enero

Parcela de monitoreo	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-32	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
2017	0,328	0,439	0,325	0,32	0,256	0,233	0,018	0,283	0,098	0,053	0,18	0,104	0,034	0,168	0,256	0,14	0,075	0,003
2018	0,525	0,792	0,532	0,457	0,321	0,496	0,031	0,415	0,121	0,085	0,134	0,096	0,059	0,184	0,302	0,143	0,124	0,012
2019	0,509	0,796	0,656	0,462	0,318	0,413	0,048	0,402	0,162	0,070	0,165	0,087	0,044	0,156	0,207	0,155	0,105	0,003
2020	0,431	0,681	0,547	0,416	0,288	0,442	0,041	0,135	0,104	0,068	0,130	0,083	0,073	0,167	0,223	0,138	0,116	0,012
2021	S/I	S/I	0,408	0,437	0,245	0,363	0,038	0,204	0,094	0,069	0,131	0,091	0,063	0,154	0,269	0,138	0,107	0,015
2022	0,279	0,389	0,277	0,299	0,133	0,202	0,006	0,113	0,066	0,054	0,104	0,069	0,033	0,109	0,147	0,104	0,049	0,003
2023	0,318	0,380	0,285	0,284	0,210	0,235	0,038	0,231	0,113	0,051	0,105	0,083	0,042	0,177	0,202	0,117	0,107	0,004
2024	0,316	0,408	0,295	0,272	0,176	0,208	0,032	0,125	0,077	0,044	0,080	0,068	0,049	0,117	0,207	0,100	0,065	0,011
CHS Promedio ± Desv Stand	0,387	0,555	0,416	0,368	0,243	0,324	0,032	0,239	0,104	0,062	0,129	0,085	0,050	0,154	0,227	0,129	0,094	0,008
	0,093	0,179	0,136	0,077	0,063	0,110	0,013	0,112	0,027	0,013	0,031	0,012	0,013	0,025	0,045	0,019	0,025	0,005

(*): Aunque en el 2016 comenzaron las mediciones de CHS a través de Entidades Técnicas Fiscalizadores (ETFAs), se implementaron en el mes de octubre.

(**): Los datos ETFAs se presentan diferenciados de los análisis del laboratorio metalúrgico de SQM, ya que las metodologías implementadas son distintas entre ambos

Fuente: elaboración propia



Tabla 5-7. Contenido de humedad del suelo (g/g). ETFA* SGS (2016-2017), Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA (2018-2022) y ALS Life Sciences Chile (2024). Abril

Parcela de Monitoreo	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
2017	0,375	0,418	0,327	0,319	0,23	0,341	0,026	0,254	0,111	0,087	0,123	0,096	0,048	0,127	0,205	0,138	0,086	0,015
2018	0,474	0,648	0,52	0,437	0,251	0,273	0,008	0,195	0,104	0,061	0,111	0,066	0,047	0,123	0,231	0,127	0,099	0,009
2019	S/I	S/I	0,414	0,494	0,342	0,356	0,052	0,372	0,156	0,1	0,15	0,1	0,097	0,212	0,282	0,156	0,183	0,037
2020	S/I	S/I	0,391	0,393	0,227	0,421	0,03	0,241	0,083	0,078	0,095	0,116	0,073	0,148	0,286	0,143	0,122	0,012
2021	0,291	0,394	0,302	0,321	0,239	0,224	0,023	0,17	0,075	0,046	0,091	0,09	0,044	0,129	0,15	0,111	0,094	0,015
2022	0,394	0,396	0,27	0,297	0,174	0,226	0,022	0,14	0,068	0,022	0,183	0,074	0,043	0,095	0,151	0,107	0,066	0,008
2023	0,246	0,423	0,323	0,21	0,169	0,136	0,046	0,15	0,109	0,042	0,169	0,061	0,117	0,2	0,218	0,105	0,096	0,047
2024	0,236	0,327	0,293	0,306	0,225	0,212	0,074	0,113	0,086	0,056	0,094	0,066	0,052	0,154	0,164	0,105	0,066	0,011
CHS Promedio ± Desv Stand	0,336	0,434	0,355	0,347	0,232	0,274	0,035	0,204	0,099	0,061	0,127	0,084	0,065	0,149	0,211	0,124	0,102	0,019
	0,086	0,100	0,077	0,084	0,050	0,087	0,020	0,078	0,026	0,024	0,034	0,019	0,026	0,037	0,051	0,019	0,035	0,014

(*) Aunque en el 2016 comenzaron las mediciones de CHS a través de Entidades Técnicas Fiscalizadores (ETFAs), se implementaron en el mes de octubre.

(**) Los datos ETFAs se presentan diferenciados de los análisis del laboratorio metalúrgico de SQM, ya que las metodologías implementadas son distintas entre ambos

Fuente: elaboración propia



Tabla 5-8. Contenido de humedad del suelo (g/g). ETFA* SGS (2016-2017) Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA (2018-2022) y ALS Life Sciences Chile (2023). Julio

Parcela de monitoreo	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
2017	0,357	0,41	0,35	0,327	0,272	0,303	0,03	0,324	0,124	0,088	0,112	0,091	0,064	0,169	0,217	0,139	0,099	0,015
2018	0,502	0,8	0,499	0,486	0,345	0,416	0,023	0,457	0,167	0,078	0,108	0,097	0,061	0,177	0,281	0,159	0,107	0,006
2019	0,521	0,717	0,471	0,533	0,224	0,395	0,055	0,36	0,136	0,091	0,146	0,105	0,105	0,276	0,347	0,127	0,17	0,031
2020	S/I	S/I	0,417	0,429	0,224	0,355	0,034	0,233	0,111	0,073	0,105	0,087	0,066	0,157	0,228	0,129	0,09	0,017
2021	0,291	0,394	0,343	0,315	0,181	0,178	0,033	0,208	0,085	0,063	0,098	0,092	0,048	0,184	0,205	0,121	0,099	0,014
2022	0,356	0,413	0,249	0,272	0,163	0,238	0,016	0,151	0,077	0,036	0,108	0,07	0,039	0,174	0,131	0,128	0,073	0,004
2023	0,325	0,315	0,32	0,328	0,193	0,272	0,028	0,139	0,089	0,048	0,095	0,063	0,066	0,128	0,152	0,081	0,079	0,012
2024	0,309	0,454	0,282	0,312	0,228	0,219	0,021	0,116	0,073	0,031	0,092	0,083	0,046	0,151	0,157	0,107	0,068	0,007
CHS Promedio ± Desv Stand	0,380	0,500	0,366	0,375	0,229	0,297	0,030	0,248	0,108	0,064	0,108	0,086	0,062	0,177	0,215	0,124	0,098	0,013
	0,086	0,169	0,083	0,089	0,054	0,080	0,011	0,113	0,031	0,022	0,016	0,013	0,019	0,041	0,067	0,021	0,030	0,008

(*): Aunque en el 2016 comenzaron las mediciones de CHS a través de Entidades Técnicas Fiscalizadores (ETFA), se implementaron en el mes de octubre.

(**) Los datos ETFA se presentan diferenciados de los análisis del laboratorio metalúrgico de SQM, ya que las metodologías implementadas son distintas entre ambos

Fuente: elaboración propia



Tabla 5-9. Contenido de humedad del suelo (g/g). ETFA* SGS (2016-2017), Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA (2018-2022) y ALS Life Sciences Chile (2023). Octubre

Parcela de monitoreo	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
2016	0,336	0,471	0,471	0,288	0,251	0,345	0,022	0,209	0,092	0,069	0,107	0,086	0,044	0,143	0,205	0,137	0,092	0,009
2017	0,33	0,397	0,319	0,29	0,239	0,187	0,029	0,325	0,111	0,084	0,12	0,094	0,049	0,131	0,211	0,128	0,099	0,014
2018	0,529	0,893	0,557	0,481	0,346	0,479	0,036	0,348	0,135	0,078	0,151	0,122	0,079	0,156	0,278	0,152	0,109	0,011
2019	S/I	S/I	0,597	0,452	0,225	0,387	0,045	0,297	0,118	0,086	0,139	0,097	0,078	0,189	0,264	0,157	0,164	0,025
2020	S/I	S/I	0,474	0,418	0,290	0,399	0,037	0,229	0,108	0,069	0,122	0,100	0,067	0,178	0,313	0,151	0,107	0,023
2021	0,292	0,399	0,26	0,278	0,221	0,153	0,012	0,117	0,069	0,066	0,106	0,083	0,041	0,123	0,148	0,110	0,074	0,004
2022	0,506	0,836	0,349	0,308	0,160	0,291	0,006	0,101	0,046	0,026	0,101	0,059	0,009	0,182	0,167	0,098	0,073	0,001
2023	0,325	0,315	0,320	0,328	0,193	0,272	0,028	0,139	0,089	0,048	0,095	0,063	0,066	0,128	0,152	0,081	0,079	0,012
2024	0,254	0,399	0,206	0,285	0,194	0,241	0,027	0,133	0,066	0,057	0,086	0,076	0,051	0,122	0,143	0,096	0,062	0,010
CHS Promedio ± Desv Stand	0,367	0,530	0,395	0,348	0,235	0,306	0,027	0,211	0,093	0,065	0,114	0,087	0,054	0,150	0,209	0,123	0,095	0,012
	0,099	0,216	0,128	0,075	0,053	0,100	0,012	0,089	0,027	0,018	0,020	0,018	0,021	0,025	0,059	0,026	0,029	0,007

(*): Aunque en el 2016 comenzaron las mediciones de CHS a través de Entidades Técnicas Fiscalizadores (ETFAs), se implementaron en el mes de octubre.

(**) Los datos ETFa se presentan diferenciados de los análisis del laboratorio metalúrgico de SQM, ya que las metodologías implementadas son distintas entre ambos

Fuente: elaboración propia



Tabla 5-10. Contenido de humedad del suelo (g/g). ETFA SGS (2016-2017), Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA (2018-2022) y ALS Life Sciences Chile (2023). Promedio anual, período 2016 – 2024

Parcela de monitoreo	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
2016*	0,336	0,471	0,471	0,288	0,251	0,345	0,022	0,209	0,092	0,069	0,107	0,086	0,044	0,143	0,205	0,137	0,092	0,009
2017	0,348	0,416	0,33	0,314	0,249	0,266	0,026	0,297	0,111	0,078	0,134	0,096	0,049	0,149	0,222	0,136	0,09	0,012
2018	0,508	0,783	0,527	0,465	0,316	0,416	0,025	0,354	0,132	0,076	0,126	0,095	0,062	0,16	0,273	0,145	0,11	0,01
2019	0,515	0,757	0,535	0,485	0,277	0,388	0,05	0,358	0,143	0,087	0,15	0,097	0,081	0,208	0,275	0,149	0,156	0,024
2020	0,431	0,681	0,457	0,414	0,257	0,404	0,035	0,209	0,102	0,072	0,113	0,096	0,07	0,163	0,263	0,14	0,108	0,016
2021	0,292	0,396	0,328	0,338	0,222	0,229	0,026	0,174	0,081	0,061	0,106	0,089	0,049	0,148	0,193	0,12	0,094	0,012
2022	0,384	0,508	0,286	0,294	0,158	0,239	0,013	0,126	0,064	0,035	0,124	0,068	0,031	0,14	0,149	0,109	0,066	0,004
2023	0,303	0,358	0,312	0,287	0,191	0,229	0,035	0,165	0,1	0,047	0,116	0,068	0,073	0,158	0,181	0,096	0,09	0,019
2024	0,279	0,397	0,269	0,294	0,206	0,220	0,038	0,122	0,075	0,047	0,088	0,073	0,050	0,136	0,168	0,102	0,065	0,010

(*): Aunque en el 2016 comenzaron las mediciones de CHS a través de Entidades Técnicas Fiscalizadores (ETFAs), se implementaron en el mes de octubre.

(**): Los datos ETFA se presentan diferenciados de los análisis del laboratorio metalúrgico de SQM, ya que las metodologías implementadas son distintas entre ambos

Fuente: elaboración propia



La evolución interanual del contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS) en cada parcela de monitoreo se presenta en las Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4, diferenciando los valores obtenidos por el laboratorio de SQM (azul) y ETFA (rojo). Esta información permite analizar con mayor detalle la tendencia de este parámetro en el tiempo, así como su variabilidad espacial dentro del área de estudio.

En general, se observa una disminución progresiva del CHS en la mayoría de las parcelas, especialmente en aquellas ubicadas en sectores con valores históricamente altos, como L7-7, 1027 y L2-25. Estas parcelas presentan pendientes negativas significativas, lo que sugiere una pérdida sostenida de humedad en el perfil edáfico, posiblemente asociada a cambios en la dinámica de recarga, mayor evaporación o procesos de drenaje. En 1027, por ejemplo, el CHS disminuye desde valores cercanos a 0,7 g/g en 2007 hasta aproximadamente 0,4 g/g en 2024, manteniendo sin embargo niveles relativamente superiores al promedio del resto de las parcelas.

Parcelas como L2-4, L2-27 y L3-5 también muestran una tendencia descendente, mientras que otras con bajos contenidos de humedad, como L1-3, L9-2, L2-28 y L9-1, mantienen niveles consistentemente bajos (<0,1 g/g), sin evidencias claras de cambios significativos a lo largo del tiempo. Estas últimas se ubican mayormente en el sector oriental o en zonas con mayor exposición y menor capacidad de retención hídrica, lo que podría explicar su comportamiento más estable y seco.

Cabe destacar la parcela L3-5, que presenta una de las disminuciones más marcadas del conjunto, con una pendiente negativa bien definida, posiblemente reflejando una mayor vulnerabilidad a la pérdida de humedad, asociada a factores como escasa cobertura vegetal, textura arenosa o exposición a vientos dominantes.

En cuanto a la comparación entre laboratorios, se observa que, si bien el laboratorio ETFA tiende a reportar valores levemente inferiores, ambas curvas reflejan patrones similares, reforzando la validez de la tendencia general observada. Las mayores discrepancias se evidencian en parcelas con altos valores históricos de CHS (por ejemplo, L7-7, 1027 y L2-25), particularmente en los años más recientes.

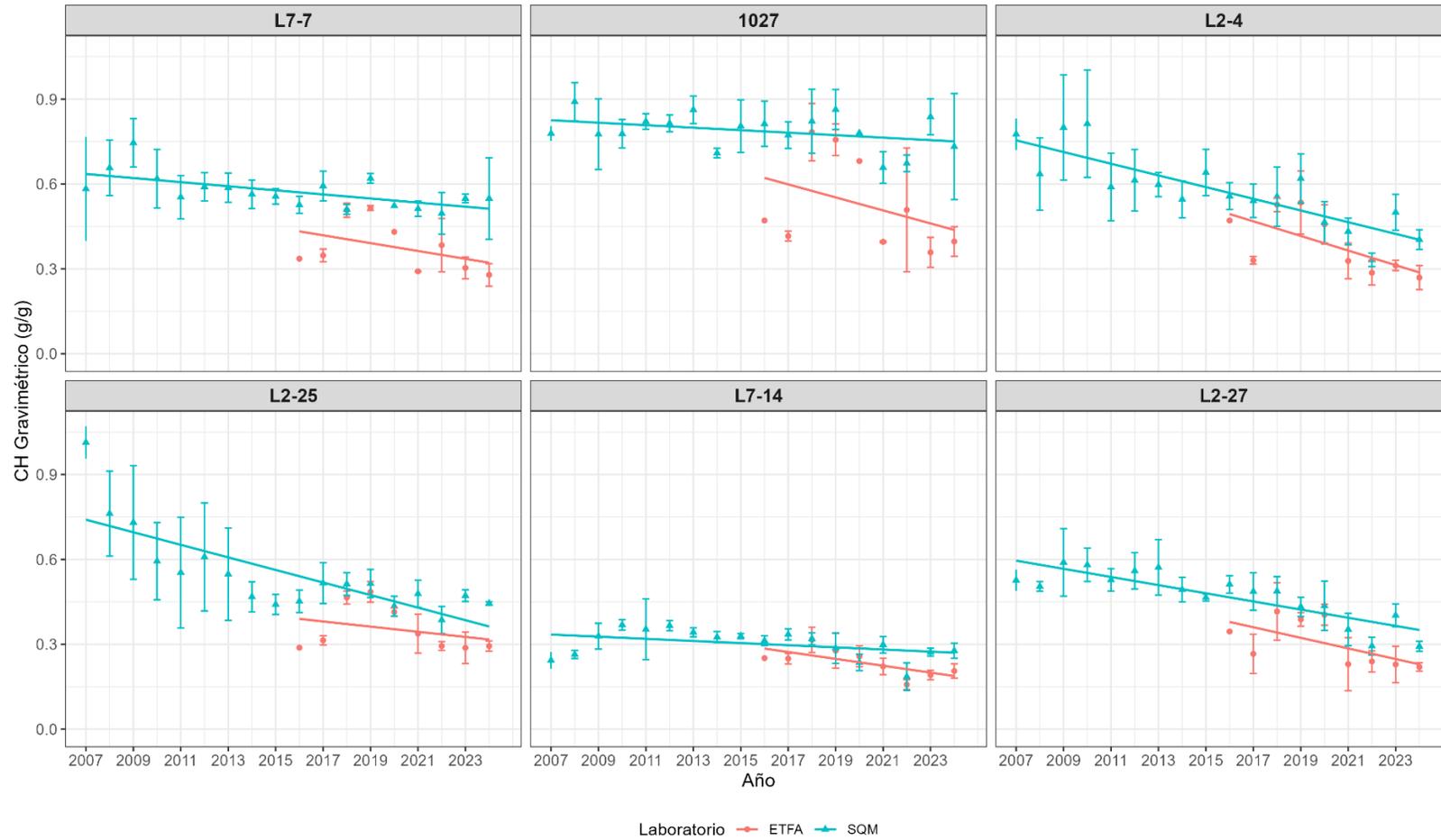
Este análisis detallado permite identificar los sectores con mayor disminución de CHS y, por ende, con mayor riesgo de alteraciones en la disponibilidad hídrica para la vegetación. Las parcelas con valores persistentemente bajos o en declive acentuado podrían representar zonas donde la vegetación experimenta un mayor estrés hídrico.

Respecto a los datos correspondientes a 2024, se observa que varias parcelas mantienen la tendencia registrada en 2023, presentando valores puntuales de CHS superiores a los de años anteriores. Este comportamiento es evidente en parcelas como L2-4, donde se mantiene el nivel elevado observado el año anterior. Asimismo, se registra un leve repunte en parcelas como 1027, L7-7 y L3-5, interrumpiendo parcialmente la tendencia decreciente que mostraban en años previos. En parcelas como L2-25 y L7-14, los valores de 2024 reflejan también una leve recuperación o estabilización respecto a 2023. Por el contrario, en otras parcelas como L1-3, L9-1, L9-2, L2-26 y L2-28, se mantiene la estabilidad en valores bajos, sin evidencias de repunte.

Cabe destacar que, al igual que en 2023, parte del aumento puntual observado en 2024 podría estar asociado a eventos de precipitación registrados durante los primeros meses del año, detallados en el Anexo 3. En particular, la ocurrencia de lluvias estivales podría haber favorecido una mayor infiltración y retención de humedad en parcelas ubicadas al este del Salar, donde la napa es más profunda y el CHS resulta más sensible a este tipo de pulsos hídricos. Esta hipótesis refuerza la importancia de considerar las condiciones climáticas anuales al interpretar las fluctuaciones observadas en el monitoreo de humedad del suelo.



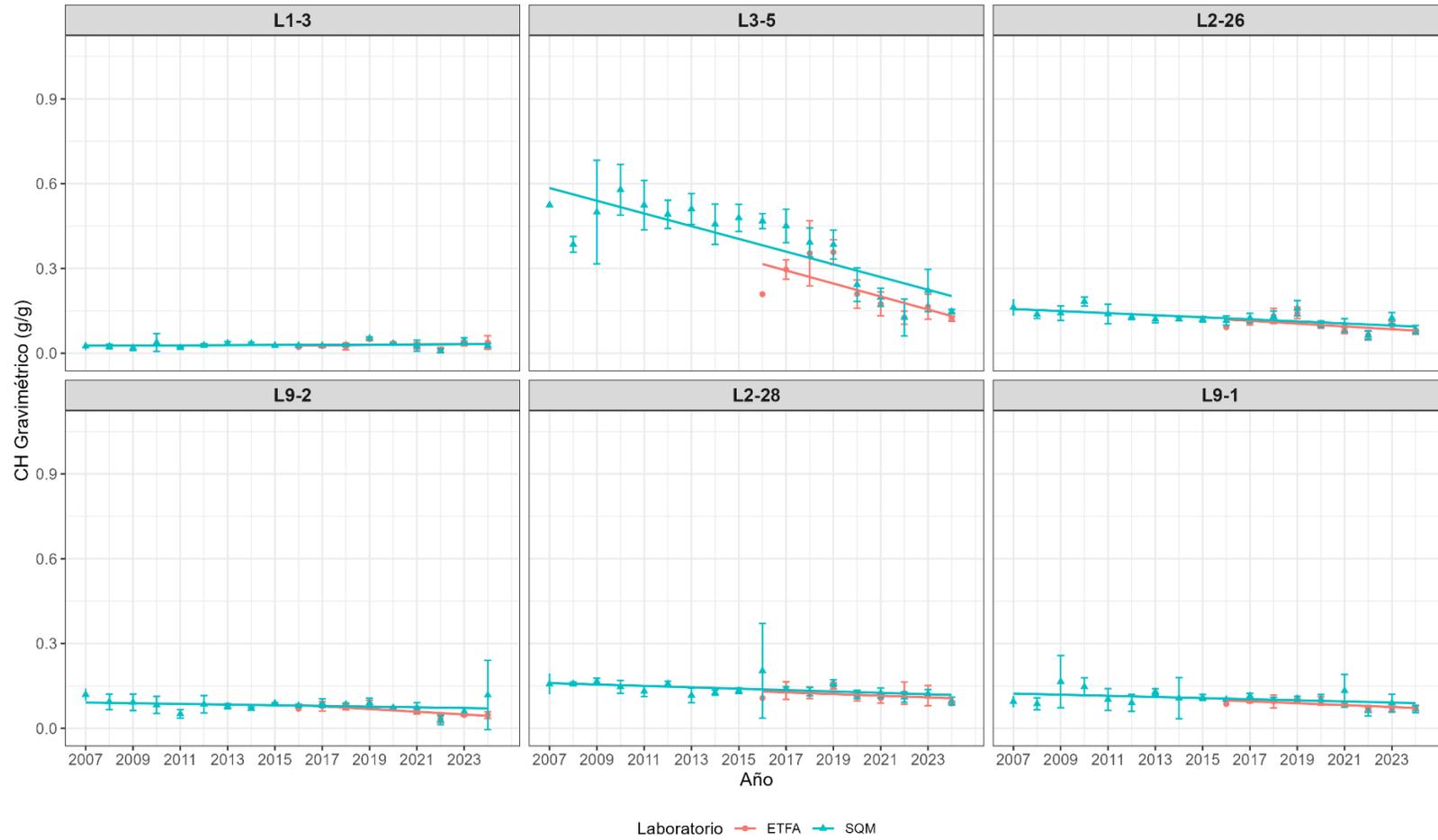
Figura 5.2. Detalle por parcela de monitoreo de la variación del promedio anual de contenido de humedad gravimétrico del suelo, medido desde el año 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



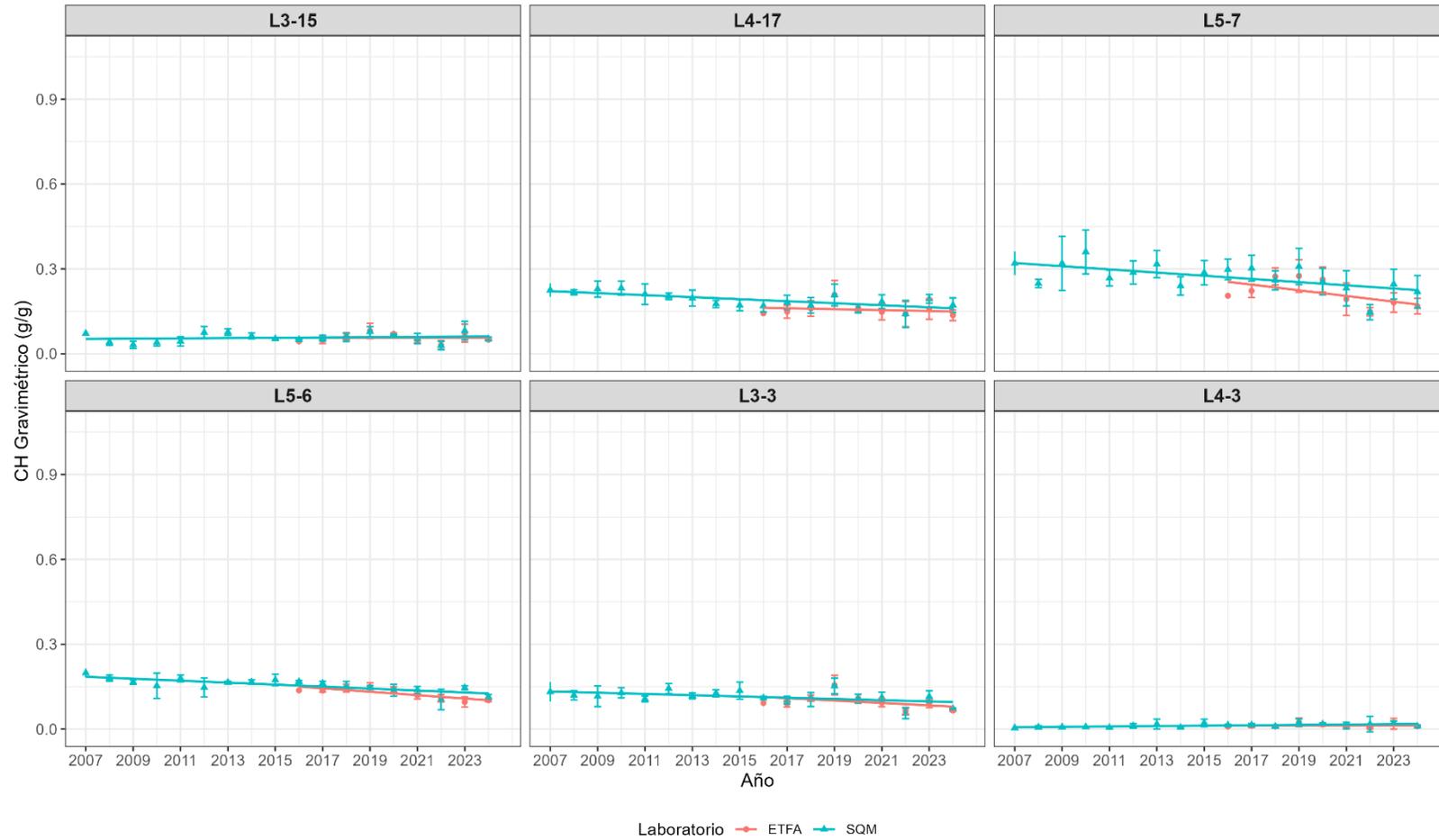
Figura 5.3. Detalle por parcela de monitoreo de la variación del promedio anual de contenido de humedad gravimétrico del suelo, medido desde el año 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



Figura 5.4. Detalle por parcela de monitoreo de la variación del promedio anual de contenido de humedad gravimétrico del suelo, medido desde el año 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



5.1 Variación de la profundidad de la napa en el tiempo

La información recopilada en 2024 muestra la mantención de la tendencia histórica de aumento en la profundidad de la napa freática respecto al nivel de base de 2007 (Figura 5.5,

Tabla 5-11 a la

Tabla 5-15). Esta tendencia, identificada en 11 de los 18 pozos evaluados, indica un progresivo descenso del nivel freático, con aumentos en la profundidad media anual que, en algunos casos, superan los 60 cm en el período de monitoreo.

Al igual que en años anteriores, destacan los pozos L1-3, L2-28 y L3-15 por presentar los mayores incrementos acumulados desde 2007, alcanzando profundidades promedio de 7,17 m, 3,41 m y 3,64 m, respectivamente. Estas cifras confirman lo reportado en campañas previas, manteniéndose el patrón de incremento positivo y significativo en estos sectores. La pendiente de las rectas de ajuste para estos pozos refuerza dicha tendencia, evidenciando un comportamiento consistente en el tiempo.

No obstante, también se identifican pozos cuya profundidad ha permanecido estable o ha disminuido. En particular, los pozos L4-3, L3-5 y L7-14 muestran valores que indican una menor profundidad en 2024 respecto al promedio histórico, lo que sugiere una recuperación del nivel freático o mayor cercanía del agua a la superficie. El caso del pozo L4-3 es especialmente relevante: desde 2007 ha registrado una disminución acumulada de 2,56 m, con una profundidad actual de 13,483 m, significativamente menor a los 16,04 m observados en el año base (p -valor = 0,000).

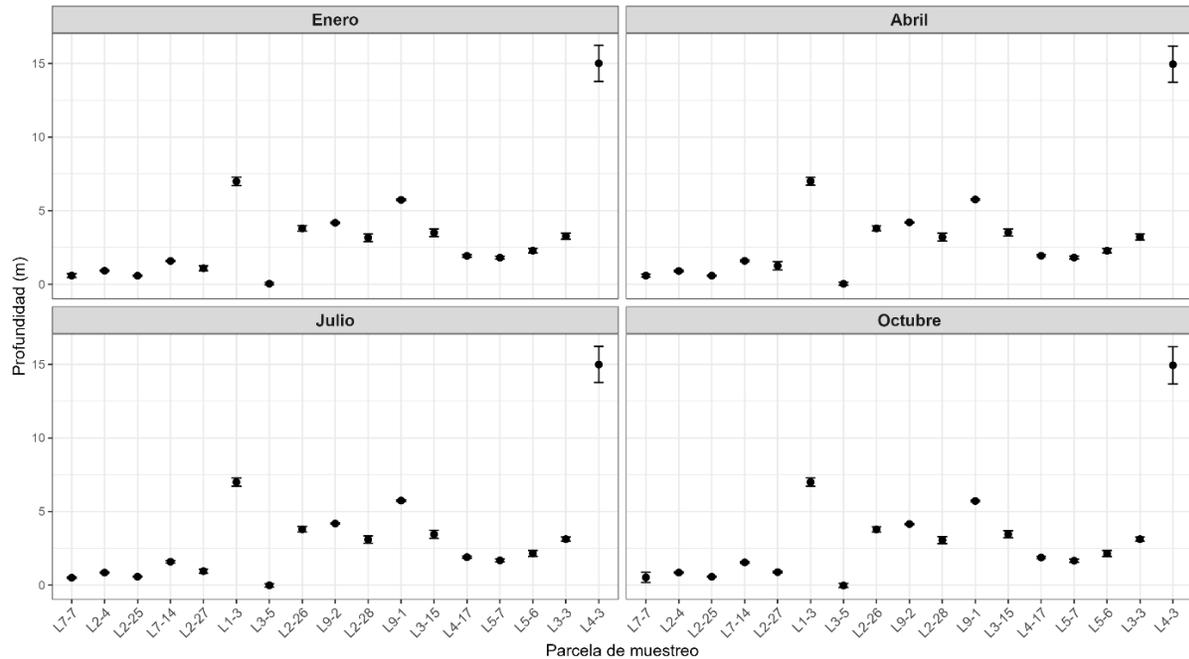
Por su parte, los pozos L3-5 y L7-14 evidencian una estabilidad relativa con leves variaciones interanuales. Aunque el pozo L3-5 muestra un leve ascenso en 2024, la tendencia general sigue sin ser significativa (p -valor > 0,05). En el caso del pozo L7-14, si bien existe una variación moderada, se mantiene dentro del rango observado históricamente.

En relación con el CHS, se observa que algunas de estas parcelas (especialmente aquellas asociadas a los pozos con menor profundidad, como L3-15 y L7-14) registran contenidos de humedad del suelo relativamente estables, lo cual respalda la hipótesis de que el CHS puede ser sensible a variaciones en la profundidad de la napa, dependiendo del tipo de suelo.

En conjunto, los resultados obtenidos en 2024 refuerzan las tendencias detectadas en el período 2007-2023, confirmando un patrón generalizado de profundización del nivel freático en la mayoría de los puntos monitoreados, con algunas excepciones localizadas que presentan estabilidad o recuperación.



Figura 5.5. Variación promedio histórica de la profundidad de la napa (2007-2024), por parcela de monitoreo para los cuatro trimestres estudiados



En febrero de 2012 el pozo L1-3 desapareció debido a los aluviones desencadenados por lluvias estivales. El 17 de marzo de 2012 se perforó un nuevo pozo a pocos metros del desaparecido. El evento fue reportado en el primer informe de monitoreo (año 2013), posterior a dicha construcción.

Fuente: elaboración propia



Tabla 5-11. Profundidad de la napa (m) por pozo de monitoreo de enero durante el periodo 2007 a 2024

Pozos	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
Año																		
2008	0,52	0,479	0,855	0,575	1,556	0,972	6,525	0,061	3,515	4,103	2,771	5,639	3,017	1,804	1,646	1,956	2,94	16,022
2009	0,51	0,475	0,855	0,553	1,558	0,957	6,537	0,074	3,505	4,113	2,787	5,661	3,061	1,835	1,684	2,036	2,97	16,034
2010	0,54	0,499	0,884	0,564	1,576	0,978	6,553	0,096	3,548	4,151	2,842	5,687	3,152	1,894	1,719	2,111	3,01	16,138
2011	0,49	0,461	0,868	0,549	1,567	0,948	6,600	0,069	3,58	4,122	2,863	5,657	3,241	1,888	1,707	2,134	3,03	16,254
2012	0,55	0,49	0,887	0,551	1,589	0,966	6,647	0,083	3,633	4,169	2,942	5,715	3,329	1,943	1,754	2,179	3,07	16,258
2013	0,59	0,523	0,888	0,549	1,619	0,962	7,000	0,131	3,686	4,166	2,981	5,723	3,417	1,954	1,749	2,204	3,15	16,387
2014	0,58	0,519	0,883	0,551	1,62	1,003	7,032	0,025	3,745	4,172	3,047	5,717	3,493	1,992	1,785	2,241	3,18	16,390
2015	0,55	0,532	0,916	0,551	1,655	1,045	7,112	0,063	3,839	4,238	3,142	5,775	3,577	2,022	1,796	2,281	3,28	15,863
2016	0,62	0,542	0,911	0,542	1,65	0,972	7,171	0,071	3,857	4,133	3,178	5,683	3,607	2,006	1,744	2,274	3,36	15,417
2017	0,57	0,503	0,92	0,543	1,672	1,033	7,229	0,053	3,925	4,207	3,274	5,751	3,662	2,026	1,803	2,314	3,42	14,687
2018	0,62	0,588	0,94	0,65	1,543	1,042	7,108	0,034	3,91	4,174	3,356	5,751	3,795	2,035	1,916	2,438	3,51	14,25
2019	0,64	0,606	0,97	0,654	1,57	1,090	7,172	0,053	3,944	4,239	3,378	5,813	3,779	2,027	1,933	2,456	3,52	13,853
2020	S/I	0,631	0,976	0,639	1,534	S/I	7,188	-0,070	3,941	4,162	3,268	5,74	3,684	1,978	1,931	2,459	3,45	13,611
2021	1	S/I	0,98	0,643	1,585	1,421	7,261	-0,110	3,992	4,188	3,464	5,763	3,703	1,903	1,909	2,441	3,45	13,523
2022	S/I	S/I	0,966	0,635	1,565	1,434	7,279	-0,150	4,005	4,225	3,528	5,807	3,691	1,846	1,915	2,438	3,41	13,493
2023	0,52	0,53	0,964	0,529	1,531	1,254	7,237	0,180	3,965	4,196	3,456	5,775	3,666	1,84	1,814	2,434	3,37	13,493
2024	S/I	0,609	0,974	0,618	1,547	1,293	7,198	-0,152	3,924	4,245	3,47	5,822	3,659	1,844	1,934	2,444	3,39	13,435
Promedio ± Des stand	0,593	0,527	0,916	0,580	1,587	1,072	6,978	0,042	3,787	4,172	3,142	5,729	3,492	1,937	1,800	2,275	3,256	15,105
	0,122	0,049	0,043	0,045	0,043	0,158	0,284	0,081	0,177	0,041	0,249	0,051	0,250	0,077	0,092	0,157	0,197	1,167

S/I: Sin mediciones dado el cierre de la RNLf por falta de permiso de ingreso según Protocolo de acceso aprobado por CONAF



Tabla 5-12. Profundidad de la napa (m) por pozo de monitoreo de abril durante el periodo 2007 a 2024

Pozos	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
Año																		
2008	0,663	0,527	0,864	0,584	1,601	1,189	6,55	0,087	3,562	4,18	2,865	5,695	3,045	1,845	1,71	1,994	2,937	15,982
2009	0,628	0,51	0,861	0,621	1,598	1,181	6,554	0,083	3,554	4,19	2,89	5,704	3,105	1,866	1,728	2,064	2,971	16,055
2010	0,662	0,514	0,879	0,577	1,611	1,225	6,579	0,111	3,57	4,195	2,914	5,729	3,194	1,927	1,68	2,06	3,018	16,154
2011	0,601	0,504	0,882	0,551	1,603	1,148	6,608	0,088	3,599	4,2	2,937	5,718	3,264	1,937	1,767	2,151	3,037	16,221
2012	0,516	0,494	0,828	0,522	1,605	0,959	6,945	0,053	3,594	4,097	2,91	5,683	3,327	1,941	1,759	2,181	3,001	16,299
2013	0,57	0,518	0,874	0,539	1,593	1,037	6,981	0,114	3,695	4,19	3,006	5,725	3,429	1,973	1,8	2,243	3,17	16,347
2014	0,688	0,604	0,896	0,553	1,644	1,184	7,069	0,092	3,779	4,228	3,102	5,765	3,529	2,025	1,784	2,254	3,254	16,218
2015	0,447	0,465	0,859	0,53	1,553	0,924	7,128	0,041	3,812	4,175	3,119	5,729	3,58	1,934	1,596	2,131	2,879	15,705
2016	0,713	0,615	0,958	0,535	1,688	1,273	7,19	0,107	3,91	4,205	3,281	5,737	3,666	2,039	1,816	2,303	3,411	15,229
2017	0,399	0,504	0,869	0,525	1,614	1,067	7,232	0,055	3,906	4,191	3,301	5,734	3,672	2,021	1,811	2,307	3,315	14,553
2018	0,716	0,664	0,965	0,661	1,575	1,336	7,131	0,106	3,919	4,25	3,435	5,813	3,802	2,053	1,939	2,452	3,529	14,136
2019	S/I	0,511	0,829	0,602	1,412	0,944	7,005	-0,125	3,773	4,161	3,04	5,765	3,633	1,951	1,857	2,414	3,181	13,793
2020	S/I	S/I	0,984	0,652	1,594	1,563	7,223	-0,094	3,983	4,219	3,41	5,785	3,72	1,985	1,952	2,461	3,465	13,609
2021	S/I	S/I	0,975	0,645	1,619	1,78	7,279	-0,115	4,021	4,248	3,534	5,811	3,717	1,909	1,918	2,432	3,412	13,526
2022	S/I	S/I	0,958	0,641	1,611	1,784	7,281	-0,135	4,026	4,266	3,575	5,832	3,705	1,867	1,903	2,421	3,373	13,492
2023	0,46	0,562	0,89	0,593	1,53	1,2	7,149	0,169	3,894	4,245	3,521	5,815	3,667	1,842	1,913	2,429	3,303	13,486
2024	S/I	0,69	0,979	0,624	1,6	1,641	7,214	-0,119	3,966	4,296	3,591	5,856	3,684	1,882	1,934	2,451	3,366	13,414
Promedio ± Des stand	0,589	0,538	0,898	0,583	1,591	1,237	6,994	0,040	3,787	4,203	3,178	5,753	3,503	1,945	1,808	2,269	3,204	15,050
	0,105	0,055	0,051	0,047	0,057	0,257	0,261	0,095	0,166	0,040	0,248	0,045	0,235	0,066	0,098	0,153	0,201	1,158

S/I: Sin mediciones dado el cierre de la RNLf por falta de permiso de ingreso según Protocolo de acceso aprobado por CONAF



Tabla 5-13. Profundidad de la napa (m) por pozo de monitoreo de julio durante el periodo 2007 a 2024

Pozos	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
Años																		
2007	0,545	0,442	0,798	0,563	1,565	0,864	6,527	0,012	3,517	4,12	2,733	5,645	2,863	1,769	1,52	1,735	2,893	16,089
2008	0,48	0,42	0,784	0,548	1,56	0,855	6,547	0,056	3,524	4,14	2,737	5,678	3,013	1,82	1,542	1,852	2,913	15,987
2009	0,475	0,416	0,798	0,544	1,557	0,854	6,55	0,057	3,509	4,151	2,757	5,689	3,07	1,835	1,565	1,9	2,921	16,047
2010	0,487	0,42	0,819	0,544	1,573	0,866	6,59	0,058	3,562	4,173	2,812	5,708	3,182	1,897	1,583	1,976	2,953	16,158
2011	0,475	0,424	0,819	0,545	1,583	0,869	6,647	0,058	3,635	4,177	2,871	5,709	3,272	1,918	1,602	2,007	2,996	16,264
2012	0,451	0,416	0,809	0,529	1,587	0,858	6,976	0,097	3,656	4,112	2,897	5,685	3,337	1,917	1,625	2,054	3,001	16,306
2013	0,439	0,421	0,809	0,532	1,588	0,842	6,988	-0,01	3,694	4,149	2,955	5,702	3,401	1,928	1,626	2,082	3,068	16,413
2014	0,516	0,464	0,829	0,538	1,617	0,875	7,09	0,003	3,799	4,206	3,031	5,749	3,497	1,975	1,631	2,131	3,057	16,073
2015	0,434	0,426	0,834	0,524	1,604	0,861	7,137	-0,016	3,835	4,108	3,092	5,666	3,571	1,951	1,623	2,137	3,128	15,627
2016	0,55	0,491	0,852	0,537	1,654	0,905	7,209	0,001	3,909	4,207	3,181	5,751	3,635	1,997	1,675	2,198	3,194	15,034
2017	0,468	0,453	0,84	0,527	1,645	0,878	7,251	-0,06	3,962	4,163	3,215	5,716	3,659	1,995	1,673	2,211	3,201	14,418
2018	0,539	0,514	0,888	0,64	1,534	1,002	7,148	-0,018	3,92	4,237	3,324	5,814	3,754	2,005	1,787	2,346	3,301	14,044
2019	S/I	0,449	0,871	0,619	1,464	0,922	7,094	-0,135	3,866	4,142	3,116	5,736	3,634	1,948	1,773	2,349	3,231	13,725
2020	S/I	S/I	0,902	0,627	1,549	1,11	7,235	-0,168	3,982	4,206	3,324	5,787	3,671	1,918	1,786	2,358	3,271	13,579
2021	0,566	0,523	0,899	0,623	1,557	1,301	7,277	-0,202	4,017	4,232	3,387	5,809	3,668	1,836	1,79	2,356	3,277	13,51
2022	S/I	S/I	0,895	0,623	1,544	1,254	7,256	-0,231	3,995	4,22	3,403	5,792	3,654	1,814	1,783	2,354	3,27	13,495
2023	0,496	0,5	0,88	0,603	1,523	1,026	7,164	0,239	3,91	4,244	3,371	5,824	3,63	1,796	1,791	2,354	3,244	13,528
2024	0,606	0,555	0,907	0,605	1,852	-	7,193	-0,221	3,951	4,263	3,41	5,827	3,637	1,852	1,794	2,372	3,257	13,374
Promedio ± Des stand	0,502	0,458	0,846	0,571	1,586	0,950	6,993	-0,014	3,791	4,181	3,090	5,738	3,453	1,898	1,676	2,154	3,121	14,982
	0,048	0,043	0,040	0,041	0,077	0,139	0,274	0,111	0,177	0,047	0,241	0,057	0,261	0,072	0,095	0,196	0,141	1,193

S/I: Sin mediciones dado el cierre de la RNLF por falta de permiso de ingreso según Protocolo de acceso aprobado por CONAF



Tabla 5-14. Profundidad de la napa (m) por pozo de monitoreo de octubre durante el periodo 2007 a 2024

Pozos	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
Años																		
2007	0,405	0,394	0,785	0,561	1,54	0,85	6,525	0,000	3,523	4,087	2,655	5,62	2,98	1,758	1,486	1,700	2,895	15,992
2008	0,408	0,371	0,781	0,544	1,527	0,842	6,543	0,049	3,512	4,111	2,707	5,659	3,019	1,795	1,522	1,832	2,909	16,007
2009	0,408	0,395	0,795	0,538	1,526	0,832	6,541	0,052	3,521	4,117	2,729	5,673	3,094	1,825	1,539	1,879	2,914	16,113
2010	0,404	0,385	0,802	0,532	1,534	0,833	6,594	0,036	3,553	4,131	2,784	5,677	3,188	1,868	1,557	1,95	2,949	16,197
2011	0,419	0,394	0,813	0,532	1,545	0,846	6,634	0,037	3,601	4,127	2,838	5,675	3,269	1,879	1,582	1,989	2,973	16,237
2012	0,414	0,407	0,82	0,523	1,564	0,839	6,976	0,07	3,65	4,113	2,895	5,688	3,357	1,897	1,593	2,044	3,011	16,342
2013	0,441	0,428	0,825	0,526	1,58	0,847	7,021	0,008	3,707	4,126	2,944	5,678	3,433	1,929	1,614	2,071	3,076	16,398
2014	0,42	0,425	0,836	0,522	1,584	0,839	7,085	0,013	3,777	4,165	3,013	5,732	3,505	1,946	1,614	2,125	3,084	16,012
2015	0,438	0,425	0,832	0,529	1,596	0,843	7,149	0,044	3,837	4,083	3,075	5,643	3,582	1,989	1,615	2,136	3,13	15,522
2016	0,451	0,446	0,853	0,529	1,621	0,852	7,217	0,042	3,896	4,166	3,153	5,723	3,615	1,968	1,65	2,189	3,192	14,83
2017	0,475	0,443	0,852	0,527	1,632	0,857	7,264	0,067	3,939	4,133	3,191	5,684	3,669	1,971	1,657	2,201	3,212	14,317
2018	0,461	0,487	0,896	0,641	1,498	0,92	7,153	-0,035	3,912	4,201	3,286	5,785	3,726	1,971	1,777	2,346	3,292	13,938
2019	S/I	0,478	0,894	0,621	1,472	0,96	7,146	-0,154	3,899	4,121	3,149	5,714	3,632	1,917	1,759	2,345	3,241	13,667
2020	S/I	S/I	0,904	0,61	1,507	0,943	7,236	-0,207	3,969	4,159	3,285	5,74	3,654	1,881	1,758	2,349	3,263	13,541
2021	0,475	0,492	0,91	0,626	1,514	0,973	7,255	-0,239	3,984	4,198	3,333	5,786	3,649	1,802	1,773	2,347	3,27	13,496
2022	S/I	S/I	0,895	0,616	1,499	0,933	7,226	-0,268	3,96	4,184	3,334	5,767	3,633	1,79	1,758	2,34	3,249	13,495
2023	0,455	0,478	0,903	0,605	1,492	0,974	7,165	0,261	3,898	4,211	3,31	5,801	3,613	1,775	1,776	2,352	3,245	13,424
2024	1,771	0,49	0,906	0,594	1,49	-	7,168	-0,275	3,911	4,218	3,323	5,798	3,609	1,829	1,771	2,343	3,24	13,159
Promedio ± Des stand	0,523	0,434	0,850	0,565	1,540	0,881	6,994	-0,028	3,781	4,147	3,056	5,714	3,457	1,877	1,656	2,141	3,119	14,927
	0,334	0,040	0,045	0,042	0,046	0,053	0,275	0,139	0,171	0,041	0,234	0,054	0,237	0,074	0,098	0,202	0,140	1,227

S/I: Sin mediciones dado el cierre de la RNLF por falta de permiso de ingreso según Protocolo de acceso aprobado por CONAF



Tabla 5-15. Profundidad promedio anual (m) de la napa por pozo de monitoreo durante el período 2007 a 2024

Pozos	L7-7	1027	L2-4	L2-25	L7-14	L2-27	L1-3	L3-5	L2-26	L9-2	L2-28	L9-1	L3-15	L4-17	L5-7	L5-6	L3-3	L4-3
Años																		
2007	0,475	0,418	0,792	0,562	1,553	0,857	6,526	0,006	3,520	4,104	2,694	5,633	2,922	1,764	1,503	1,718	2,894	16,041
2008	0,518	0,449	0,821	0,563	1,561	0,965	6,541	0,063	3,528	4,134	2,770	5,668	3,024	1,816	1,605	1,909	2,926	16,000
2009	0,505	0,449	0,827	0,564	1,560	0,956	6,546	0,066	3,522	4,143	2,791	5,682	3,083	1,840	1,629	1,970	2,943	16,062
2010	0,522	0,455	0,846	0,554	1,574	0,976	6,579	0,075	3,558	4,163	2,838	5,700	3,179	1,897	1,635	2,024	2,982	16,162
2011	0,497	0,446	0,846	0,544	1,575	0,953	6,622	0,063	3,604	4,157	2,877	5,690	3,262	1,906	1,665	2,070	3,009	16,244
2012	0,483	0,452	0,836	0,531	1,586	0,906	6,886	0,076	3,633	4,123	2,911	5,693	3,338	1,925	1,683	2,115	3,022	16,301
2013	0,510	0,473	0,849	0,537	1,595	0,922	6,998	0,061	3,696	4,158	2,972	5,707	3,420	1,946	1,697	2,150	3,117	16,386
2014	0,550	0,503	0,861	0,541	1,616	0,975	7,069	0,033	3,775	4,193	3,048	5,741	3,506	1,985	1,704	2,188	3,143	16,173
2015	0,467	0,462	0,86	0,534	1,602	0,918	7,132	0,033	3,831	4,151	3,107	5,703	3,578	1,974	1,658	2,171	3,105	15,679
2016	0,583	0,524	0,894	0,536	1,653	1,001	7,197	0,055	3,893	4,178	3,198	5,724	3,631	2,003	1,721	2,241	3,288	15,128
2017	0,479	0,476	0,87	0,531	1,641	0,959	7,244	0,029	3,933	4,174	3,245	5,721	3,666	2,003	1,736	2,258	3,286	14,494
2018	0,584	0,563	0,922	0,648	1,538	1,075	7,135	0,022	3,915	4,216	3,350	5,791	3,769	2,016	1,855	2,396	3,407	14,092
2019	0,642	0,511	0,891	0,624	1,480	0,979	7,104	0,000	3,871	4,166	3,171	5,757	3,670	1,961	1,831	2,391	3,294	13,760
2020	-	0,631	0,942	0,632	1,546	1,205	7,221	0,000	3,969	4,187	3,322	5,763	3,682	1,941	1,857	2,407	3,361	13,585
2021	0,681	0,508	0,941	0,634	1,569	1,369	7,268	0,000	4,004	4,217	3,430	5,792	3,684	1,863	1,848	2,394	3,351	13,514
2022	S/I	S/I	0,929	0,629	1,555	1,351	7,261	0,000	3,997	4,224	3,460	5,800	3,671	1,829	1,840	2,39	3,326	13,494
2023	0,483	0,518	0,909	0,608	1,519	1,114	7,179	0,000	3,917	4,224	3,415	3,644	5,804	1,813	1,840	2,392	3,290	13,483
2024	0,583,	0,586	0,942	0,610	1,622	1,467	7,193	0,000	3,938	4,256	3,449	5,826	3,647	1,852	1,858	2,403	3,313	13,346
Promedio ± Des stand	0,573	0,496	0,877	0,577	1,575	60,715	6,983	0,032	3,784	4,176	3,114	5,613	3,585	1,907	1,731	2,199	3,170	14,997
	0,170	0,055	0,045	0,042	0,042	246,000	0,277	0,029	0,175	0,039	0,252	0,480	0,595	0,075	0,104	0,198	0,168	1,195

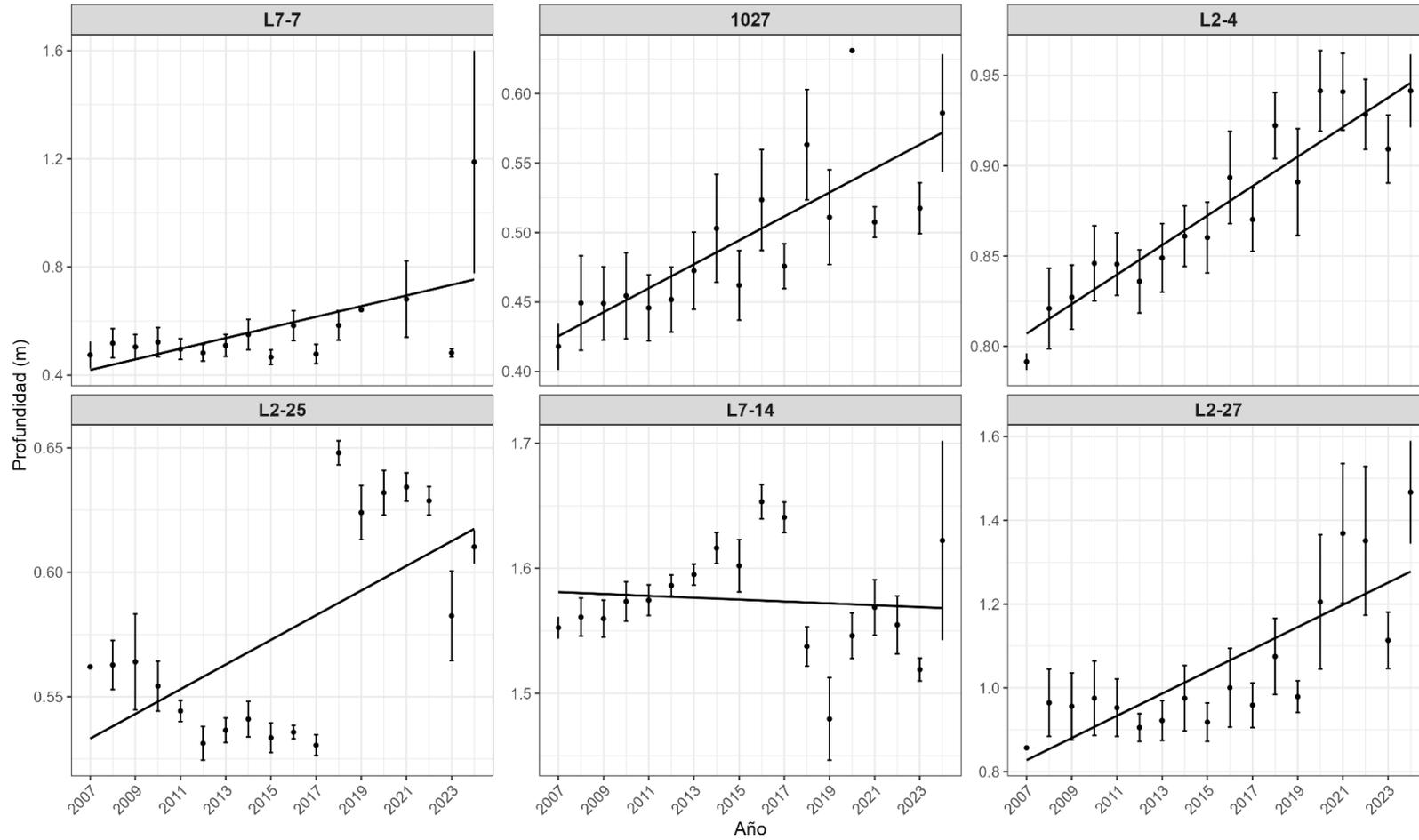
S/I: Sin mediciones dado el cierre de la RNLF por falta de permiso de ingreso según Protocolo de acceso aprobado por CONAF



La mayoría de los pozos monitoreados muestra un aumento en la profundidad de la napa respecto a 2007, lo que refleja una disminución sostenida del nivel freático. Mientras que, pozos tales como L3-15, L23-3-28 y L3-5, ubicados en las cercanías del pozo de extracción Camar-2 (fuera de operación desde 2018), presentaron disminución de su profundidad en 0.6 m y estabilización de estos en el período analizado. Si bien en algunos sectores se ha observado una estabilización o recuperación del nivel freático tras la detención de ciertas operaciones, esta tendencia no se presenta de forma generalizada en el acuífero. Esto sugiere la influencia persistente de múltiples factores que actúan de manera conjunta y a escala regional, afectando la dinámica del sistema hidrogeológico. Esta interpretación se respalda en las tendencias positivas y significativas de las pendientes de las rectas de regresión (ver Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8). Además, la falta de un aumento sostenido en los registros de precipitación disponibles (Anexo 3) descarta que estas variaciones se deban a mayores aportes hídricos superficiales.



Figura 5.6. Variación del promedio anual de profundidad de la napa del suelo, medido desde el año 2007 a 2024

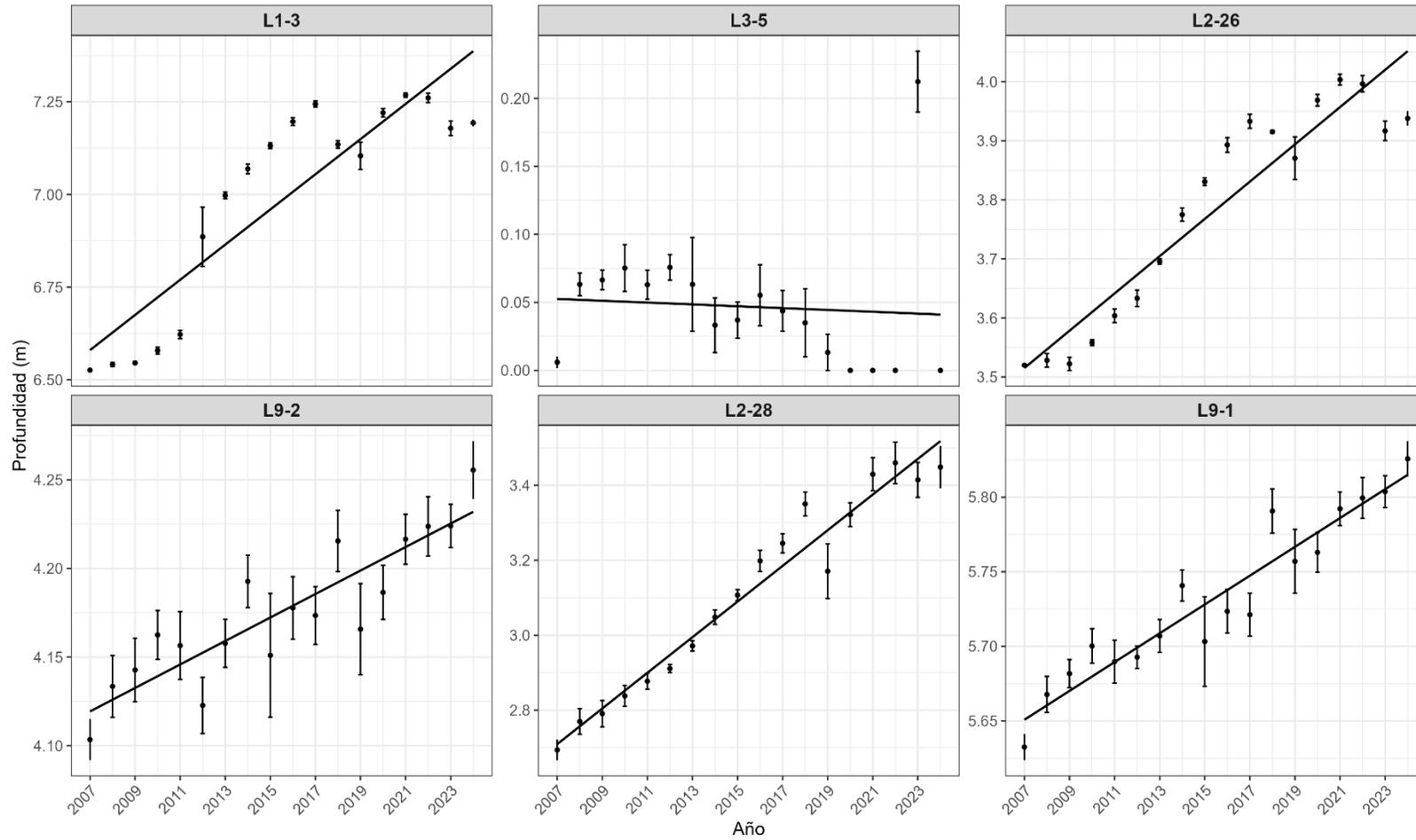


*Los pozos L7-7 y 1027, suelen tener restricciones de acceso a la RNLF de acuerdo con el protocolo de ingreso a la unidad

Fuente: elaboración propia



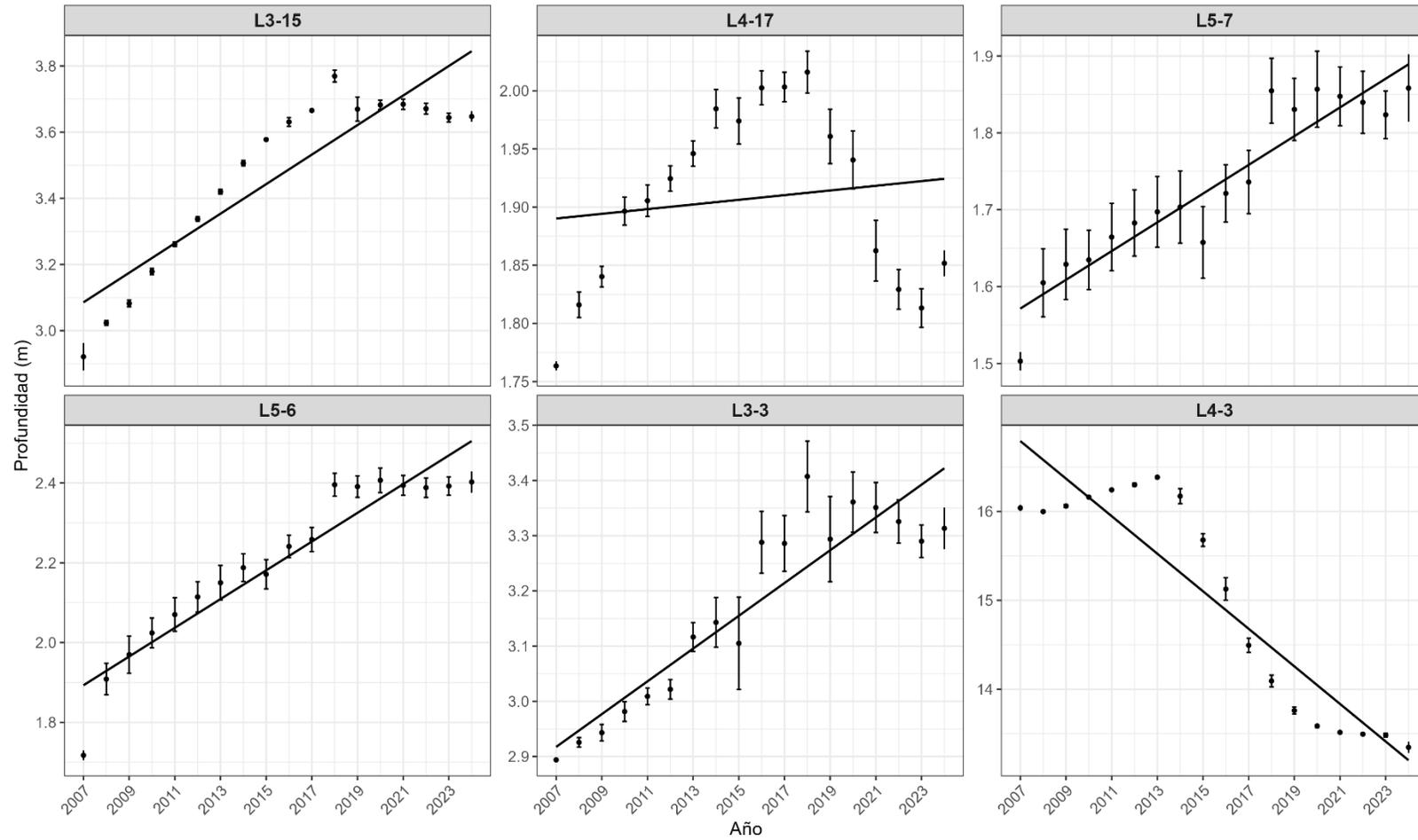
Figura 5.7. Variación del promedio anual de profundidad de la napa del suelo, medido desde el año 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



Figura 5.8. Variación del promedio anual de profundidad de la napa del suelo, medido desde el año 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



5.2 Comportamiento histórico de la napa subterránea y la humedad de suelo (2007-2024)

Se evaluó la relación entre el contenido de humedad superficial del suelo (CHS, g/g) y la profundidad de la napa freática (m) para las 18 parcelas monitoreadas entre 2007 y 2024. El análisis incluyó el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson por pozo (Tabla 5-16) y a nivel global, permitiendo la evaluación de un modelo de ajuste exponencial decreciente para el conjunto de datos (Figura 5.9).

A nivel global, la relación histórica entre el contenido de humedad del suelo (CHS) y la profundidad de la napa freática para todos los pozos monitoreados mostró una correlación negativa significativa ($r = -0.61$, $p < 0.001$). La figura de dispersión con la tendencia ajustada evidencia que, en general, a mayor profundidad de la napa el CHS disminuye, lo que confirma la influencia del nivel freático en la disponibilidad hídrica del suelo y destaca que la napa superficial actúa como la principal fuente de humedad edáfica.

Sin embargo, el análisis por pozo revela una marcada variabilidad espacial en la dinámica hídrica del Salar de Atacama. Las correlaciones varían entre -0.56 y 0.47 , con mayor fuerza negativa en pozos como L2-26 ($r = -0.56$) y L5-6 ($r = -0.55$), mientras que otros presentan correlaciones débiles o incluso positivas, como L1-3 ($r = 0.15$). Esta heterogeneidad sugiere que factores locales como textura del suelo, pendiente, microtopografía, salinidad, tipo de vegetación o presencia de capas impermeables pueden estar modulando la respuesta del sistema.

Además, la variabilidad interanual del período analizado, junto con eventos extremos como lluvias intensas, aludes o intervenciones antrópicas, podría estar influyendo en los patrones observados. En ciertos sectores, las correlaciones negativas significativas podrían reflejar zonas donde el ascenso de la napa contribuye directamente a la humedad superficial, mientras que en otros, la humedad registrada podría responder a procesos superficiales independientes de la napa.

Estos resultados son coherentes con lo reportado históricamente en el Borde Este del Salar de Atacama, donde el gradiente oeste-este determina mayor humedad en parcelas occidentales y napas más someras. En conjunto, los hallazgos refuerzan la necesidad de considerar la variabilidad espacial y temporal en el diseño de este monitoreo.



Figura 5.9 Relación entre la concentración de CHS y la profundidad de la napa en distintos pozos de monitoreo durante las campañas 2007-2024

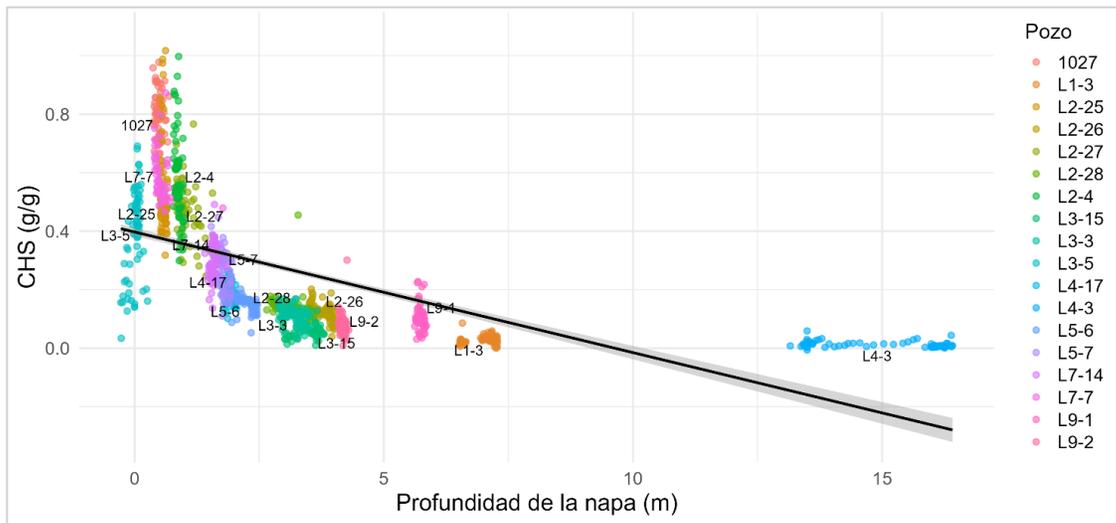


Tabla 5-16. Coeficientes de correlación de Pearson (r) y valores de p entre CHS y profundidad de la napa freática para cada pozo monitoreado (2007–2024)

Pozo	n	r	p_value
1027	67	-0.176	0.183
L7-7	66	-0.283	0.0380
L7-14	71	0.247	0.0389
L1-3	71	0.147	0.226
L2-26	71	-0.562	0.000
L2-25	71	-0.143	0.236
L2-4	71	-0.487	0.000
L2-28	71	-0.199	0.101
L2-27	71	-0.504	0.000
L3-15	71	0.253	0.036
L3-5	71	0.470	0.000
L3-3	71	-0.377	0.001
L4-3	71	-0.279	0.019
L4-17	71	-0.227	0.060
L5-6	71	-0.553	0.000
L5-7	71	-0.317	0.007
L9-2	71	-0.131	0.283
L9-1	71	-0.157	0.193

Asociaciones significativas si $p < 0,05$. Como criterio de relevancia hidrogeológica, se considera correlación moderada cuando $r \geq 0,50$. Los valores de r negativos indican relación inversa: una napa más profunda se asocia con menor CHS.

Fuente: elaboración propia



5.3 Variación interanual de la vegetación

5.3.1 Antecedentes relevantes en la adquisición de datos en terreno

Los antecedentes presentados a continuación fueron recopilados y adaptados a partir del informe técnico de Geobiota (2023), con el fin de contextualizar eventos que podrían haber influido en la dinámica de la vegetación observada durante el período de monitoreo.

- El primero se relaciona con las fuertes precipitaciones registradas durante la época estival de 2019 (ver Anexo 3, Registro de precipitaciones mensuales 2007–2024), las cuales provocaron un aluvión que descendió desde la quebrada de Camar y afectó varias parcelas asociadas a los pozos de monitoreo L3-15, L3-3, L3-5, L2-27 y L2-28, con pérdida parcial de ejemplares vegetales en dichos sitios. Durante la campaña de abril de 2020, SQM procedió a reetiquetar los individuos afectados por el evento.
- Por otra parte, y de acuerdo con el protocolo de ingreso a la Reserva Nacional Los Flamencos (ver Anexo 7), que restringe el acceso a esta durante el periodo de nidificación de aves altiplánicas (octubre a febrero), no fue posible realizar monitoreos en parcelas ubicadas en las inmediaciones de los pozos L7-7 y 1027 durante las campañas de 2018 y 2019.

5.3.2 Análisis general de la vitalidad

El análisis de la vitalidad de la vegetación en las parcelas monitoreadas entre 2007 y 2024 revela variaciones interanuales relevantes, diferenciadas por trimestre de medición y categoría de vigor (Figura 5.10).

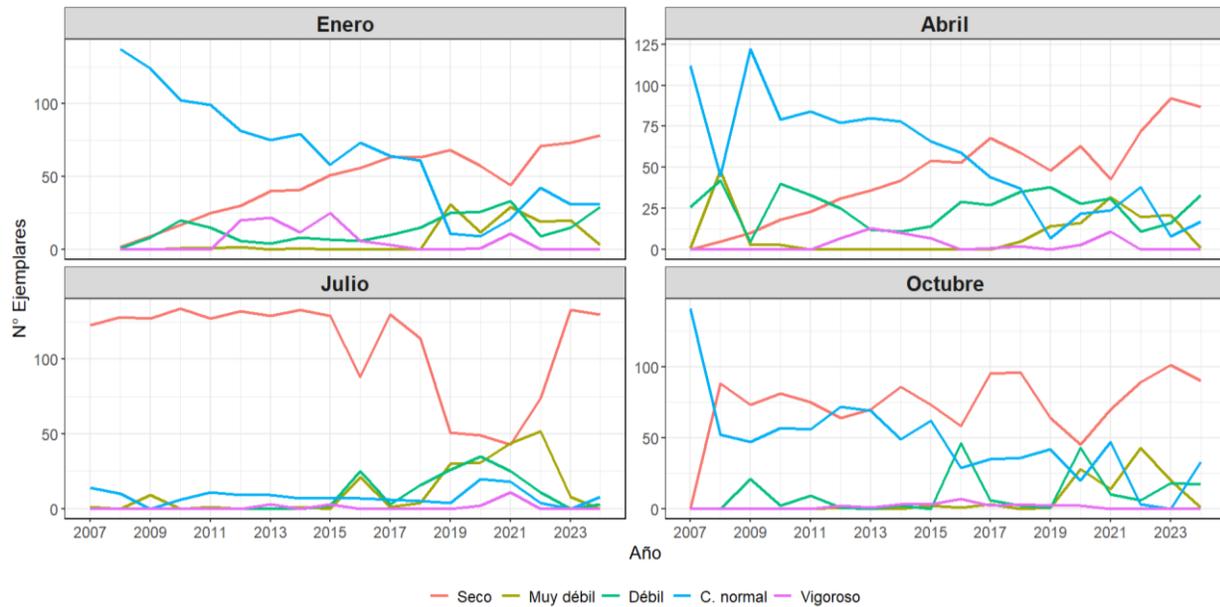
En los trimestres 1 y 2, se evidencia una disminución sostenida de los individuos clasificados con crecimiento normal, tendencia que ha sido acompañada por un aumento progresivo en la categoría seca, así como fluctuaciones en los estados débil y muy débil. Por el contrario, los individuos vigorosos se han mantenido escasos durante todo el periodo analizado. Este patrón podría sugerir una reducción progresiva hacia una menor vitalidad durante los primeros meses del año.

El trimestre 3 presenta un comportamiento diferenciado. Durante los primeros años del monitoreo (2007–2015), los individuos secos dominaron el registro, con valores que superaron los 100 ejemplares. A partir de 2016, esta categoría disminuye, mientras que aumentan los individuos clasificados como débil, muy débil e incluso vigoroso en algunos periodos recientes. Este cambio puede reflejar una leve recuperación de las condiciones vegetacionales durante esta época del año o una redistribución en los estados de vitalidad ante nuevas condiciones ambientales.

En el trimestre 4, destaca un aumento sostenido en la cantidad de individuos secos a partir del año 2021, mientras que los ejemplares con crecimiento normal muestran una tendencia a la disminución, alcanzando valores nulos en algunos años recientes. Las categorías débil y muy débil aparecen de manera esporádica, sin una tendencia clara, lo que sugiere una mayor vulnerabilidad de la vegetación en esta etapa del ciclo anual.

En conjunto, los resultados muestran una alta proporción de individuos en la categoría de vitalidad seca, especialmente en otoño e invierno, lo que refleja una marcada estacionalidad fenológica. Esta condición, observada de forma consistente en los últimos años, es coherente con el diseño de marcaje de individuos fijos desde 2007 y con el ciclo natural de las especies monitoreadas.

Figura 5.10. Variación del número de individuos por categoría de vitalidad, según trimestre de monitoreo desde el año 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia

5.3.3 Análisis por especie

El análisis histórico de las especies monitoreadas entre 2007 y 2024 debe ser interpretado considerando ciertos eventos reportados previamente que pudieron haber afectado tanto la vitalidad de los individuos como la continuidad del monitoreo.

En particular, el alud registrado en 2019 desde la quebrada de Camar se identifica como un evento disruptivo que pudo haber afectado directamente la condición de los individuos ya sea por daño físico, colmatación o alteración del sustrato. Junto con la variabilidad climática interanual, estos eventos extremos parecen haber tenido un impacto acumulativo sobre la vegetación, cuya recuperación en años húmedos ha sido solo parcial. De hecho, en los informes anuales de suelo de 2019 y 2020 (Geobiota) se reporta la imposibilidad de monitorear algunos ejemplares durante ese periodo, afectando varias parcelas.

Asimismo, la presencia de registros clasificados como “Permiso CONAF–Comunidades” o “Sin información” en determinados años representa una limitación en la continuidad de la serie histórica. No obstante, estos vacíos no impiden identificar tendencias generales en la respuesta de cada especie frente a las condiciones ambientales del Salar de Atacama.

5.3.3.1 *Atriplex atacamensis*

Categoría de Fenología (Figura 5.11)

Durante el periodo 2007-2024, la fenología de *Atriplex atacamensis* evidenció una marcada estacionalidad, con mayor presencia de individuos en floración y fructificación durante los meses de verano (enero y abril), en respuesta a la disponibilidad hídrica estival. En contraste, durante los trimestres de julio y octubre predominaron los estados



vegetativos y senescentes, lo que sugiere una estrategia conservativa ante condiciones ambientales menos favorables.

En años como 2012 y 2017 se registró una expresión fenológica más activa, con floración temprana en enero y fructificación sostenida hasta abril, seguida de un marcado receso vegetativo en el segundo semestre. No obstante, a partir de 2016 se observa una reducción sostenida en la producción de frutos, reflejando un cambio en la dinámica reproductiva. Esta tendencia persiste en años posteriores (como por ejemplo 2021 y 2022), donde predomina el crecimiento vegetativo, y se acentúa en 2023, con una expresión reproductiva particularmente baja en el segundo semestre.

El año 2024 muestra una leve recuperación de la floración en octubre, aunque con menor intensidad respecto a años previos. La persistencia de estados senescentes y la baja proporción de individuos en fructificación sugieren que la funcionalidad fenológica de la especie aún no se ha restablecido completamente.

Estos cambios podrían estar asociados tanto a perturbaciones físicas del hábitat, como el alud reportado en 2019, o a la variabilidad interanual de las precipitaciones. Aunque la presencia de registros clasificados como “Permiso CONAF–COMUNIDADES” o “Sin información” limita la continuidad de algunos trimestres, los datos disponibles permiten identificar una tendencia general hacia la reducción de la actividad reproductiva en los últimos años.

Categoría de Copa viva (Figura 5.12)

Durante el período 2007–2024, la cobertura de copa viva en *A. atacamensis* mostró una tendencia general a la reducción de follaje verde. En los primeros años del monitoreo (2007-2011), se observó una proporción considerable de individuos con coberturas medias y altas (25-50% y >50%), reflejando una expresión foliar más favorable.

A partir de 2012 se evidencia un aumento sostenido en las categorías de cobertura baja (5-25%), indicando una reducción progresiva de la superficie foliar activa. Desde 2016 comienza a registrarse con mayor frecuencia la categoría de 0% de cobertura (especialmente en los trimestres de julio y octubre) aunque sin llegar a ser predominante. Su recurrencia estacional sugiere que una fracción de individuos pierde completamente el follaje verde en ciertas épocas del año.

Los trimestres de invierno y primavera (julio y octubre) concentran la mayor proporción de coberturas reducidas (<25%), posiblemente asociadas a condiciones climáticas restrictivas o a una menor actividad fotosintética estacional. En 2019 y 2020 se observa un aumento en la proporción de individuos sin cobertura foliar, coincidiendo con el evento de alud de 2019. Este disturbio, junto con la variabilidad climática, parece haber influido negativamente en la estructura foliar de la especie.

Durante los años 2021–2023 se mantiene una alta frecuencia de individuos con coberturas muy bajas, particularmente en el segundo semestre. En 2024 se observa una leve recuperación en las categorías intermedias (25-50%) en algunos trimestres, principalmente en abril, aunque aún persiste una proporción relevante de individuos con cobertura <5% o nula, lo que indica que la recuperación foliar sigue siendo parcial.

Si bien existen limitaciones en algunos años por registros sin información o bajo “Permiso CONAF–COMUNIDADES”, la tendencia general es consistente con una pérdida progresiva de cobertura viva.



Categoría de Vitalidad (Figura 5.13)

Entre 2007 y 2024, se evidencia una disminución progresiva en la proporción de individuos con condición normal de vitalidad en *A. atacamensis*, especialmente desde 2012. En los primeros años del monitoreo (2007–2011), la categoría C. normal predominó en todos los trimestres, indicando un estado fisiológico adecuado en la mayoría de los individuos (cerca de los 10 muestreados en cada campaña).

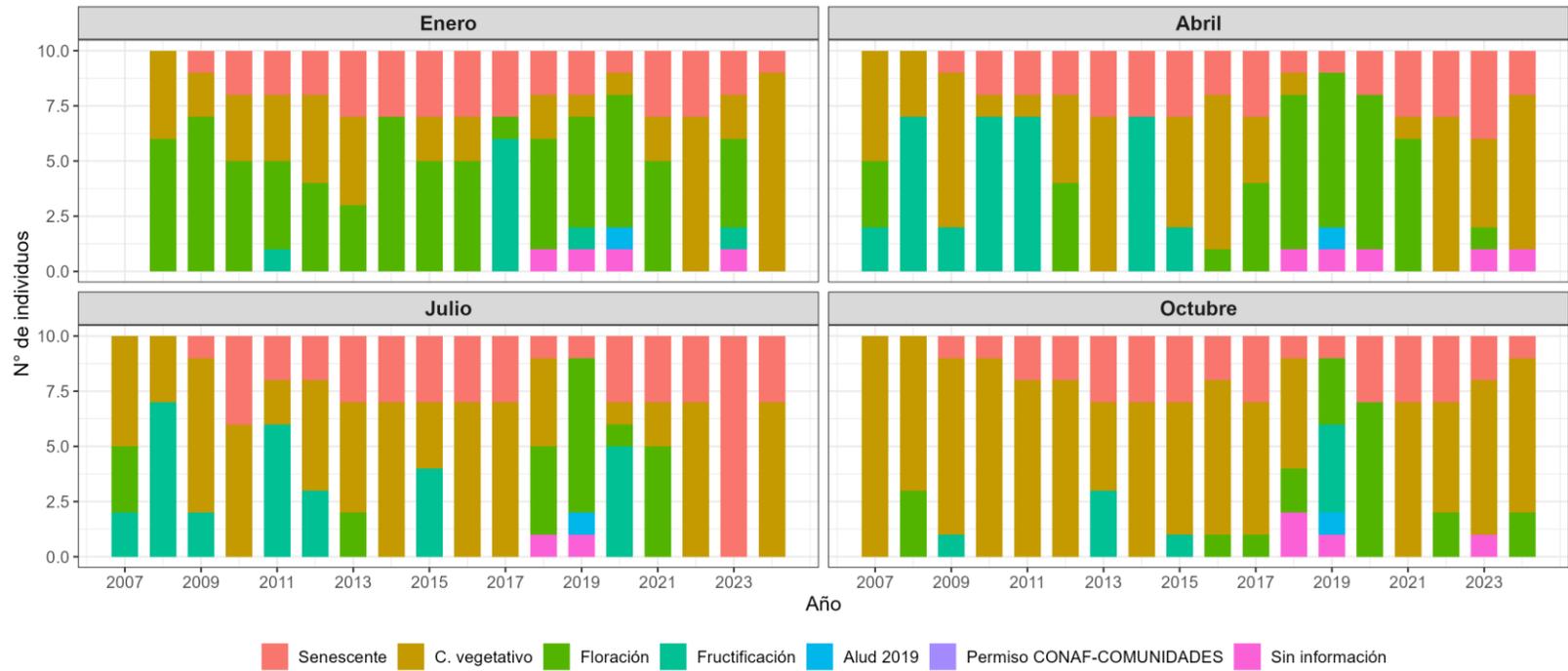
A partir de 2012 se registra un aumento en las categorías Seca, Muy débil y Débil, especialmente en abril, julio y octubre, lo que refleja un declive sostenido en la condición vital. En 2019 se observa un cambio abrupto, con alta proporción de individuos en condición seca o muy débil, en coincidencia con el evento de alud reportado ese año. Este efecto se extiende durante 2021–2023, donde predominan las categorías de senescencia, lo que sugiere que la población monitoreada no ha logrado una recuperación significativa.

En 2024 se observa una recuperación, con un aumento de individuos en condición normal o vigorosa en algunos trimestres (notablemente en julio y octubre), aunque aún persisten proporciones en estados categorías débil.

Al igual que en las otras variables, los registros clasificados como “Permiso CONAF–COMUNIDADES” o “Sin información” dificultan una lectura continua, pero no impiden identificar una tendencia general hacia el deterioro progresivo de la vitalidad, asociado tanto a eventos extremos como a condiciones de estrés ambiental prolongado.



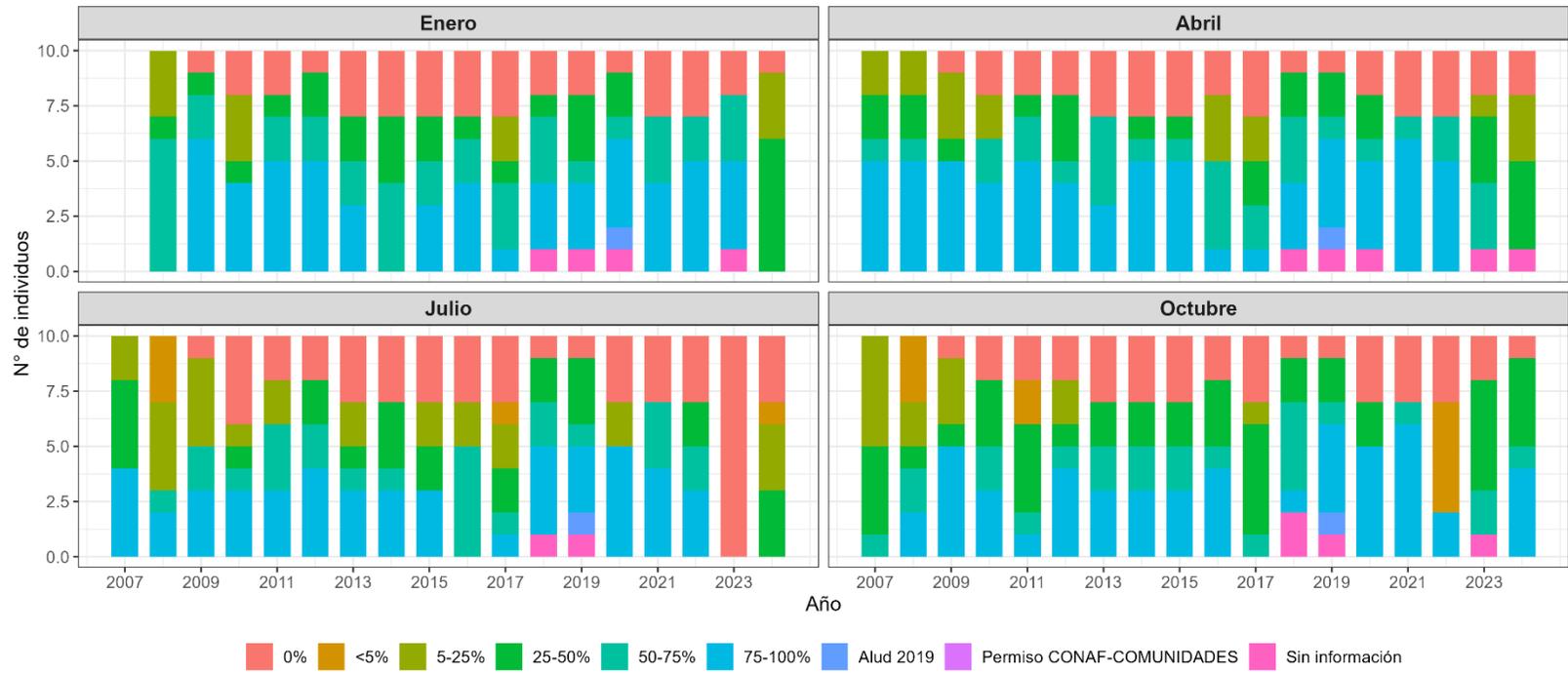
Figura 5.11. *Atriplex atacamensis*: Número de individuos por categoría de fenología, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



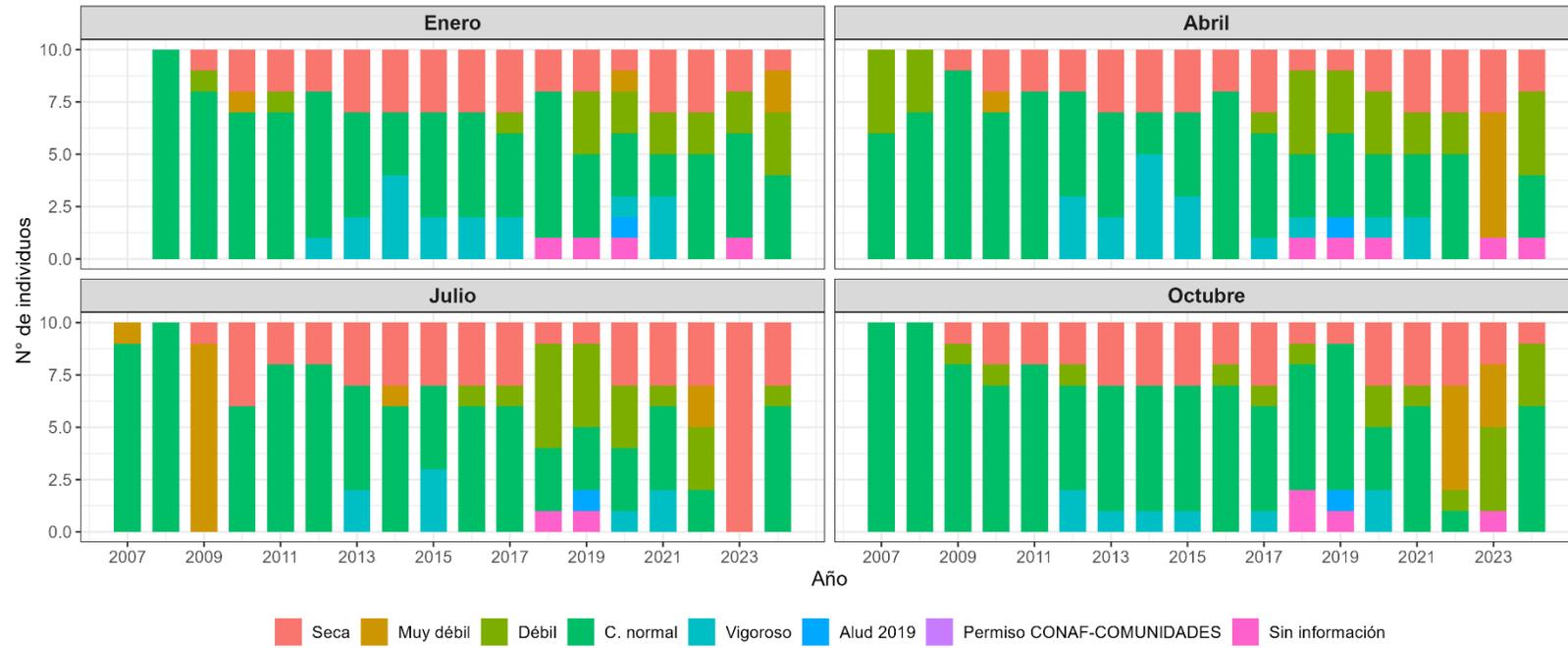
Figura 5.12. *Atriplex atacamensis*: Número de individuos por categoría de copa viva, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



Figura 5.13. *Atriplex atacamensis*: Número de individuos por clase de vitalidad, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



5.3.3.2 *Distichlis spicata*

Categoría de Fenología (Figura 5.14)

En la Figura 5.14, se observa que la fenología de *D. spicata* entre 2007 y 2024 presenta una marcada estabilidad en sus fases vegetativas a lo largo del año, con escasa expresión de estados reproductivos. Durante todo el periodo, predominan los individuos en estado vegetativo y senescente, especialmente en los trimestres de julio y octubre, lo que sugiere una estrategia conservativa frente a condiciones climáticas desfavorables o una baja inversión en reproducción sexual en este ambiente.

En los primeros años del monitoreo (2007–2012), se registraron escasos individuos en floración o fructificación, concentrados principalmente en enero y abril, aunque sin una recurrencia estacional marcada. Esta baja expresión reproductiva se mantiene en los años posteriores, con años como 2019 y 2020 sin registros de fases reproductivas en ningún trimestre. Incluso en 2023 y 2024, donde otras especies muestran cierta recuperación fenológica, *D. spicata* mantiene un comportamiento predominantemente vegetativo.

La limitada expresión reproductiva podría estar asociada a restricciones hídricas, alta salinidad del sustrato o al carácter clonal de la especie en estos sistemas. Si bien existen años con registros ausentes o clasificados como “Permiso CONAF–COMUNIDADES” o “Sin información”, la tendencia general sugiere que *D. spicata* mantiene una dinámica fenológica estable, con baja variación interanual y escasa reproducción sexual a lo largo del periodo evaluado.

Categoría de Copa Viva (Figura 5.15)

En la Figura 5.15, se aprecia que la cobertura de copa viva en *D. spicata* entre 2007 y 2024 exhibe una alta variabilidad interanual, con predominio de coberturas bajas a medias (<25% y 25–50%) en la mayoría de los trimestres. En los primeros años del monitoreo (2007–2011), los individuos se distribuyen entre las categorías de cobertura muy baja (<5%) y cobertura media (25–50%), lo que sugiere una condición estructural moderadamente activa en la población.

A partir de 2012 se observa un incremento progresivo en la frecuencia de individuos con cobertura nula (0%) y cobertura muy baja, especialmente en los trimestres de julio y octubre, lo que podría indicar una reducción en la actividad fotosintética estacional o una respuesta a condiciones climáticas más restrictivas. Esta tendencia se intensifica entre 2015 y 2018, donde se consolidan las categorías de menor cobertura como dominantes, particularmente en invierno y primavera.

El evento de alud ocurrido en 2019 coincide con una leve reconfiguración de las coberturas, sin evidenciar un impacto abrupto como en otras especies. No obstante, entre 2020 y 2022 se registra una relativa estabilidad en la expresión foliar, con un aumento de individuos en las categorías intermedias (25–50% y 50–75%) durante los trimestres de verano (enero y abril), lo que sugiere una capacidad de recuperación parcial frente a disturbios previos. En 2023 y 2024, esta recuperación se atenúa, con un nuevo incremento de las categorías más bajas (<5% y 0%), reflejando una posible disminución estructural del follaje.

La presencia recurrente de registros clasificados como “Permiso CONAF–COMUNIDADES” o “Sin información” limita la continuidad de algunas series, pero no impide identificar una tendencia general hacia la dominancia de coberturas bajas en la población monitoreada de *D. spicata*, con solo episodios puntuales de recuperación parcial.



Categoría de Vitalidad (Figura 5.16)

La evaluación de la condición de vitalidad revela una marcada predominancia de individuos clasificados con condición normal durante los primeros años del monitoreo, especialmente en los trimestres de abril y octubre entre 2007 y 2014. Esta tendencia indica una estructura poblacional mayoritariamente estable durante ese período.

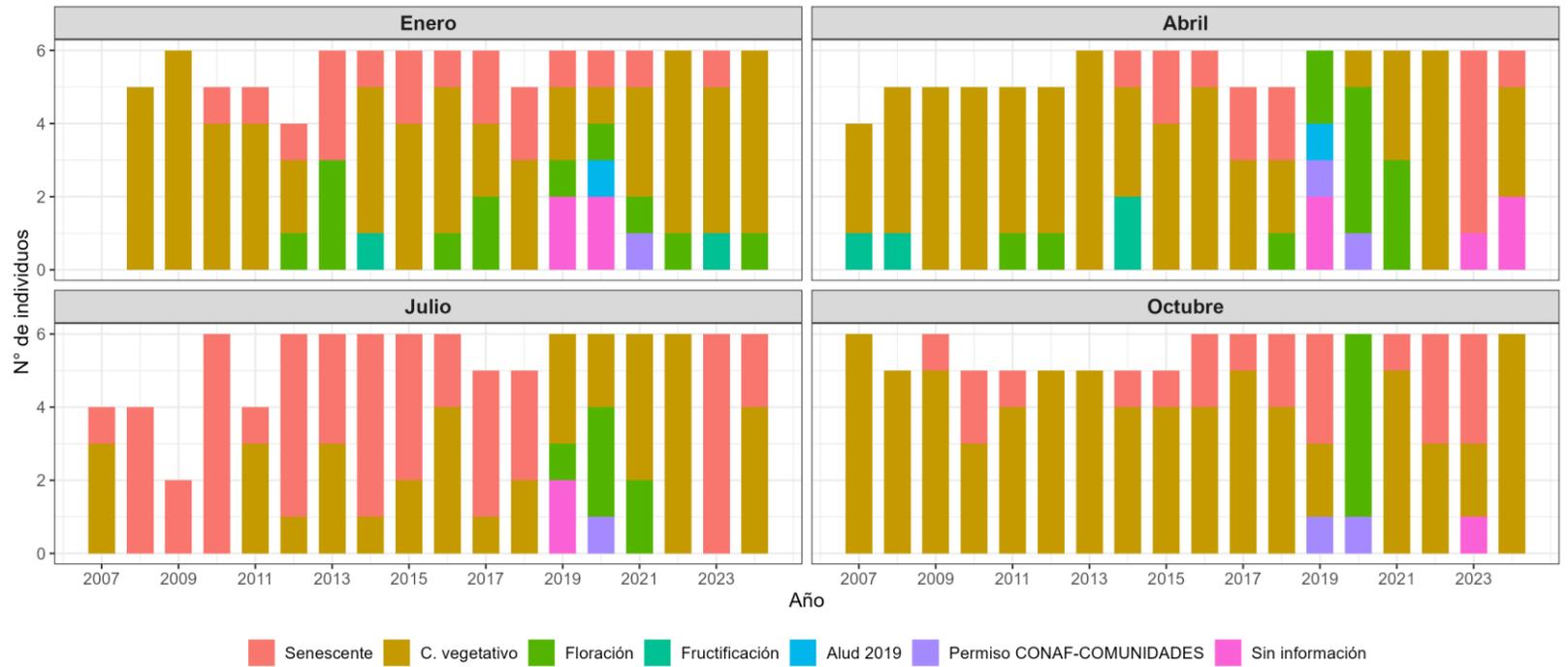
No obstante, a partir de 2015 se evidencia un cambio en la composición de categorías, con un aumento sostenido de individuos clasificados como débil, muy débil o seco (particularmente en julio y octubre) lo que sugiere una disminución progresiva en la condición fisiológica de la especie. Esta disminución es más notoria entre 2016 y 2018, coincidiendo con la reducción generalizada de coberturas activas observada en los bloques anteriores.

Durante el alud de 2019 y años posteriores, se produce una mayor diversificación en las categorías de vitalidad, con apariciones puntuales de individuos vigorosos en verano (enero y abril de 2019) y un leve repunte en la categoría normal hacia 2020. Sin embargo, esta recuperación resulta transitoria, ya que en los trimestres invernales y primaverales de los años siguientes se mantiene el predominio de condiciones fisiológicas comprometidas.

Esta dinámica, en conjunto con las categorías de registro como “Permiso CONAF–COMUNIDADES” o “Sin información”, sugiere que *D. spicata* presenta una resiliencia limitada frente a perturbaciones ambientales sostenidas, mostrando fluctuaciones en su vitalidad que parecen responder tanto a la estacionalidad como a la historia de eventos disruptivos a escala local.



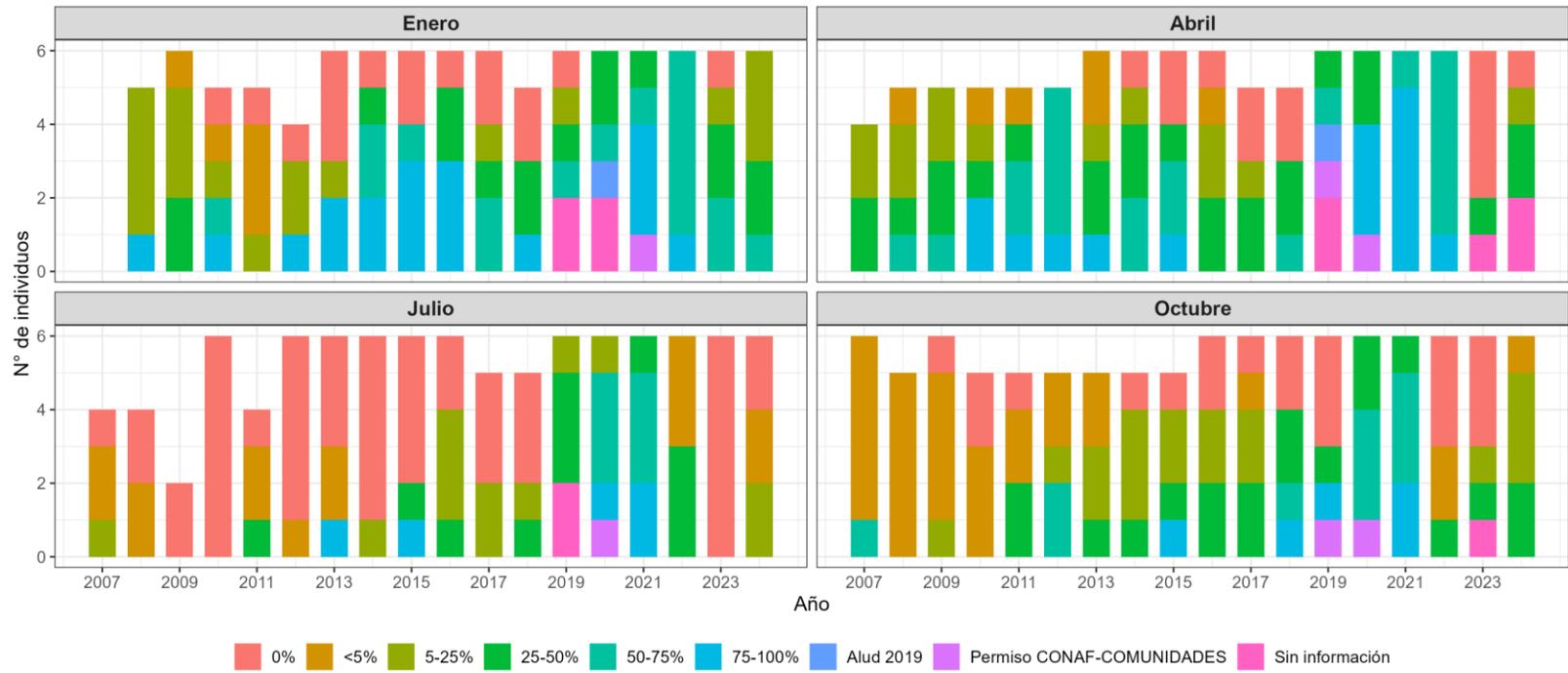
Figura 5.14. *Distichlis spicata*: Número de individuos por categoría de fenología, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



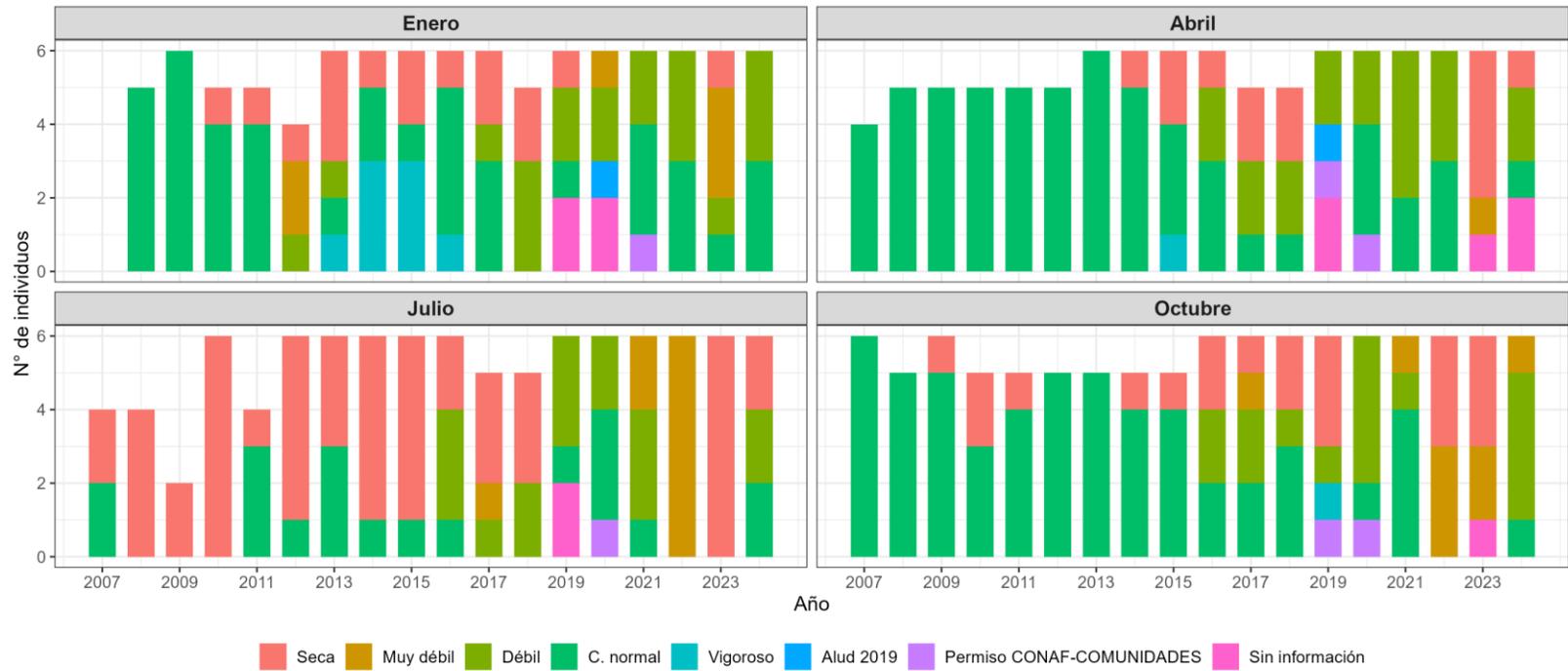
Figura 5.15. *Distichlis spicata*: Número de individuos por clase de copa viva, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



Figura 5.16. *Distichlis spicata*: Número de individuos por categoría de vitalidad, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



5.3.3.3 *Nitrophila atacamensis*

Categoría de Fenología (Figura 5.17)

La fenología de *Nitrophila* entre 2007 y 2024 muestra un patrón altamente conservador, con predominancia casi absoluta de la fase vegetativa (color café) en los trimestres de verano y otoño (enero y abril). Esta estabilidad indica una marcada adaptación a mantener actividad metabólica sin desarrollar estructuras reproductivas evidentes durante gran parte del año. Las fases reproductivas (floración y fructificación) son poco frecuentes y aparecen de manera aislada en los primeros años (2007–2008) y posteriormente entre 2017 y 2019, sin una estacionalidad clara ni recurrencia interanual, lo que sugiere una baja inversión en reproducción sexual.

Durante el invierno (julio), el comportamiento fenológico cambia abruptamente: desde 2007 hasta 2010 predominan los individuos en estado senescente, condición que persiste con regularidad en los años siguientes. A partir de 2018, esta categoría alterna con el estado vegetativo, pero no se evidencian registros florales o de fructificación, reafirmando la baja actividad reproductiva de la especie en este trimestre, lo que podría ser un comportamiento al clima estival característicos de otras especies de la zona.

En primavera (octubre), se mantiene el estado vegetativo hasta el año 2016. A partir de entonces, se observa un aumento en la categoría senescente y la interrupción del monitoreo por permisos especiales (2019–2020). Desde 2021 en adelante, los registros disponibles muestran nuevamente un predominio del estado senescente, lo que podría relacionarse con una respuesta a condiciones climáticas desfavorables o limitaciones edáficas que inhiben el desarrollo reproductivo.

La aparición puntual de floración en abril de 2017 y julio de 2018, así como de fructificación en enero y abril de 2007, sugiere que *Nitrophila* puede expresar eventos reproductivos bajo ciertas condiciones específicas, aunque estos no se repiten ni se consolidan como patrones fenológicos recurrentes. En conjunto, estos resultados refuerzan la hipótesis de una estrategia fenológica conservativa, con escasa plasticidad reproductiva y fuerte dependencia del crecimiento vegetativo como vía principal de mantenimiento poblacional.

Categoría de Copa viva (Figura 5.18)

La categoría de copa viva en individuos de *N. atacamensis* entre 2007 y 2024 evidencia patrones estacionales contrastantes y una notable variabilidad interanual. Durante los meses de enero y abril, se registra una alta proporción de individuos con copas vivas superiores al 75% (color celeste), especialmente entre 2010 y 2018. Esta condición sugiere una mayor actividad vegetativa durante el verano y el inicio del otoño, en respuesta a condiciones ambientales más favorables. A partir de 2019, no obstante, se observa un incremento en la fragmentación de categorías, incluyendo proporciones crecientes de individuos con copas vivas entre 25% y 75%, lo que indicaría una posible reducción parcial de la cobertura foliar.

En julio, las especies presentan condiciones de senescencia predominante. Predominando dicha categoría (0%) desde 2010 hasta 2018, lo que evidencia una pérdida completa de follaje en gran parte de los individuos durante el invierno. Esta tendencia se mantiene en varios años posteriores, con ligeros repuntes en la cobertura (categorías intermedias) entre 2019 y 2022. Esta condición invernal podría estar asociada a estrategias de reducción de biomasa como mecanismo de tolerancia al estrés ambiental, como bajas temperaturas o menor disponibilidad hídrica en invierno.

En octubre, se observa una mayor heterogeneidad en las categorías de copa viva, lo que sugiere una transición fenológica donde coexisten individuos en diferentes estados de recuperación. Si bien en algunos años se detectan



porcentajes elevados de cobertura (>50%), en otros se evidencian regresiones importantes, incluyendo copas completamente secas, como en 2023. Esto podría estar vinculado a eventos climáticos puntuales o a la acumulación de estrés fisiológico desde la estación seca.

El evento de alud de 2019 no genera un cambio abrupto en las proporciones de copa viva, pero sí coincide con una mayor heterogeneidad y la interrupción de acceso a algunos sectores, lo que se refleja en la ausencia de información en ciertos trimestres. En los años recientes (2023–2024), se mantiene una diversidad de categorías, sin una recuperación clara hacia los niveles de cobertura de la primera década del monitoreo.

En conjunto, la dinámica de copa viva en *N. atacamensis* refuerza la idea de una especie con marcada sensibilidad estacional, particularmente sensible durante el invierno, pero capaz de mantener o mostrar recuperación en verano y otoño. La cobertura foliar parece responder a condiciones ambientales fluctuantes.

Categoría de Vitalidad (Figura 5.19)

La condición de vitalidad de *N. atacamensis* entre 2007 y 2024 presenta una dinámica contrastante entre trimestres. En los meses de enero y abril se observa una predominancia sostenida de individuos clasificados con condición normal (categoría rosada), especialmente entre 2007 y 2018. Esta estabilidad inicial sugiere una buena adaptación de la especie a las condiciones estivales y otoñales durante ese periodo. Sin embargo, a partir de 2019 comienza a manifestarse una mayor diversidad en las categorías de vitalidad, con la aparición de individuos clasificados como débil en verano y otoño, lo que podría reflejar una disminución progresiva en la condición fisiológica de algunos individuos.

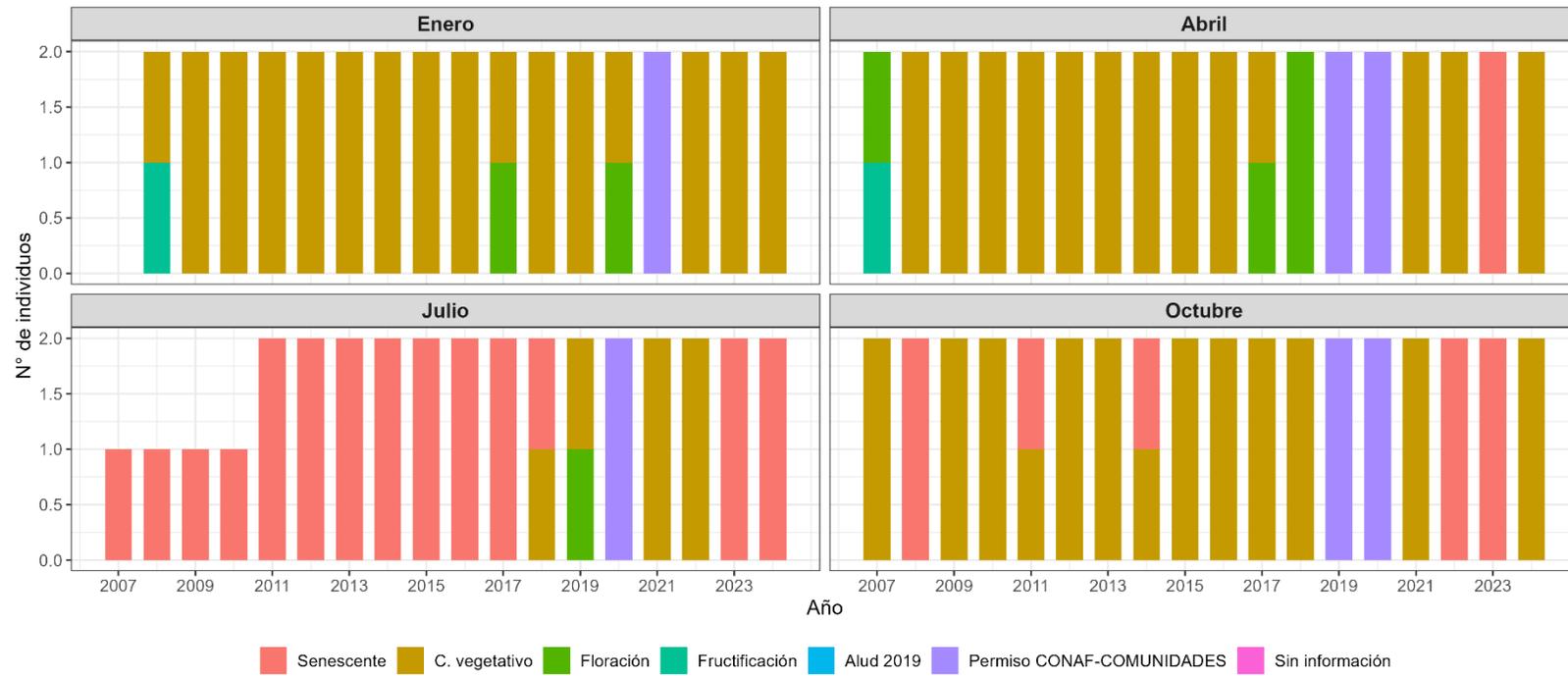
En los trimestres invernales (julio) y primaverales (octubre), la tendencia es distinta. Desde los primeros años del monitoreo se registra una proporción significativa de individuos con condición seca, particularmente entre 2007 y 2011. A partir de 2012, se observa un aumento progresivo de individuos con condición débil y muy débil, destacando una mayor vulnerabilidad de la especie en estos trimestres más restrictivos. Esta tendencia se mantiene durante toda la década, con leves repuntes en la categoría normal en 2019 y 2020.

El evento de alud de 2019 no parece haber generado un quiebre abrupto en la condición de vitalidad, pero sí coincide con un mayor fraccionamiento de las categorías, pero sí da lugar al no ingreso de sectores donde estaba presente la especie, lo que interrumpe la continuidad temporal. No obstante, en años recientes (2023–2024), se observa una recuperación parcial, con predominancia de categorías normales y secas, aunque sin alcanzar la estabilidad de la primera mitad del periodo.

En conjunto, la vitalidad de *Nitrophila* sugiere una mayor sensibilidad a la estacionalidad, con buen desempeño en verano y otoño, pero con una condición más comprometida en invierno y primavera, probablemente asociada a factores de estrés hídrico o salino. Esta variabilidad intra-anual sugiere una respuesta fenológica más marcada a la estacionalidad, con una resiliencia moderada frente a disturbios prolongados.



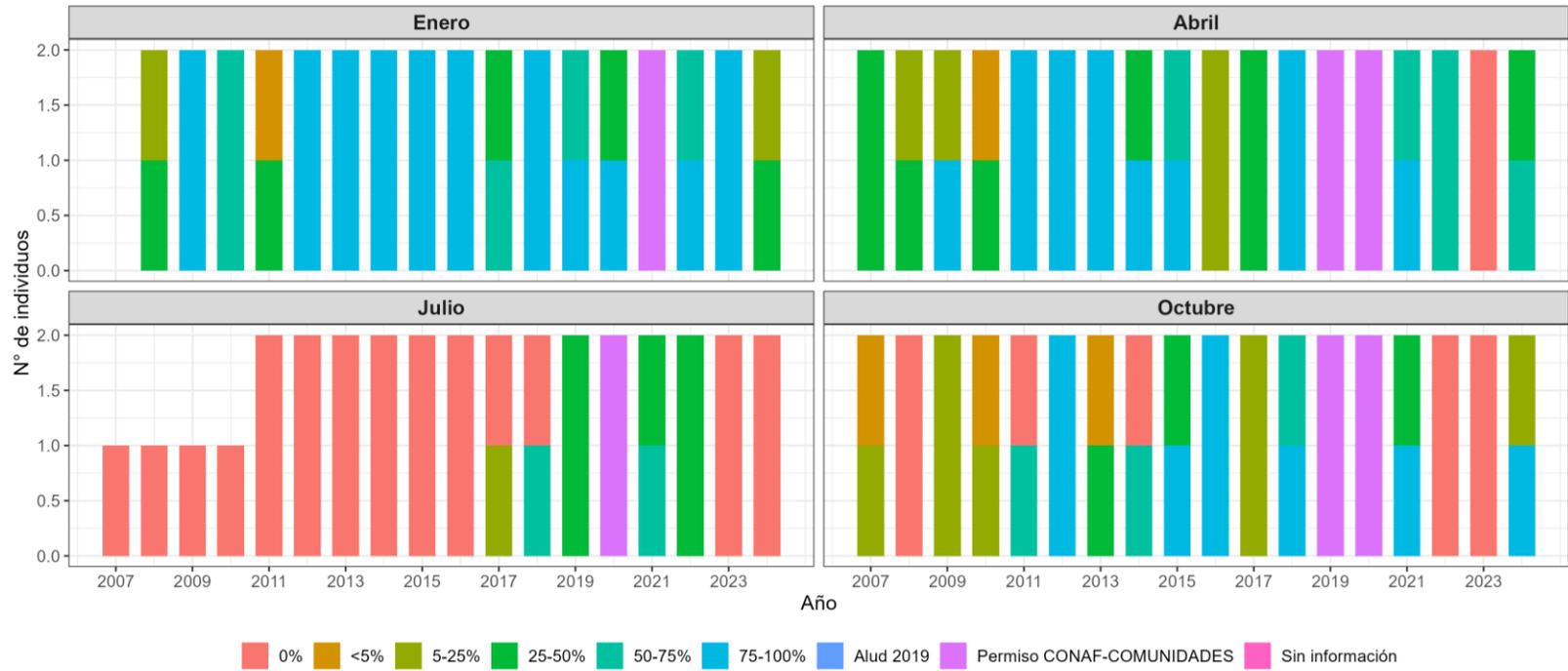
Figura 5.17. *Nitrophila atacamensis*: Número de individuos por categoría de fenología, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



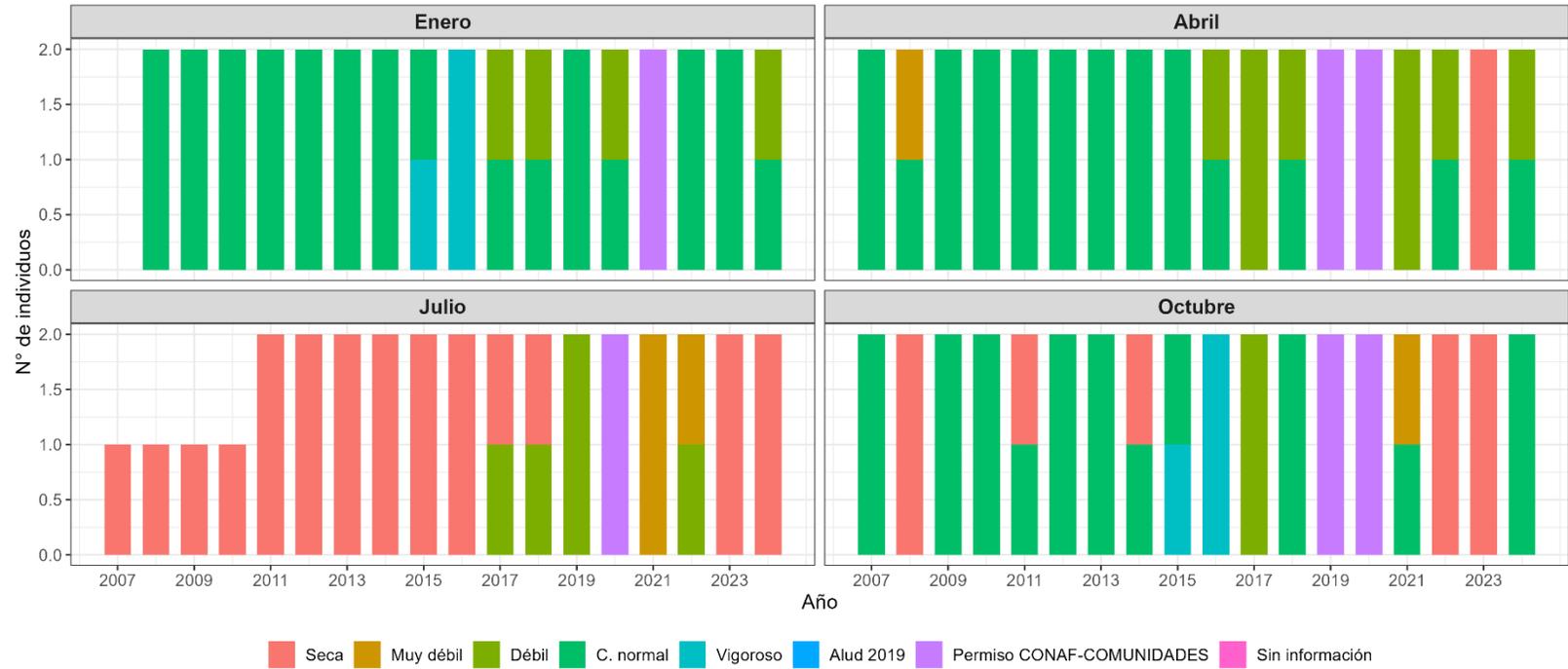
Figura 5.18. *Nitrophila atacamensis*: Número de por categoría por clase de copa viva, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



Figura 5.19. *Nitrophila atacamensis*: Número de individuos por categoría de vitalidad, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



5.3.3.4 *Tessaria absinthioides*

Categoría de Fenología (Figura 5.20)

El análisis fenológico de *T. absinthioides* entre 2007 y 2024 muestra patrones marcados por la estacionalidad y por una alta proporción de individuos en estado senescente a lo largo del periodo, especialmente en los meses de invierno y primavera.

Durante enero, los registros fenológicos muestran una coexistencia entre estados senescentes y vegetativos desde 2007 hasta 2014. A partir de 2015 se observa una disminución gradual de individuos en condición vegetativa, acompañada de un aumento sostenido en la proporción de individuos senescentes. La floración y fructificación se detectan de forma ocasional entre 2009 y 2022, aunque con baja frecuencia y limitada representación en los conteos. En 2019, el evento de alud y posteriores restricciones por permisos de acceso explican interrupciones en los registros. En los años más recientes (2022–2024), la fenología de la especie se caracteriza por un predominio casi exclusivo del estado senescente.

En abril, se evidencia una mayor diversidad fenológica hasta el año 2016, con presencia de estados vegetativos, de floración y fructificación. No obstante, esta diversidad disminuye a partir de 2017, incrementándose la proporción de individuos senescentes, lo que se mantiene hasta 2024. La floración se presenta de forma discontinua, con registros puntuales entre 2011 y 2022, mientras que la fructificación es menos frecuente y aparece solo de manera ocasional, posiblemente asociada a años de mayor disponibilidad hídrica.

Durante el invierno (julio), la totalidad de los individuos se registran como senescentes en casi todos los años, con excepción del periodo entre 2017 y 2021, donde se documenta cierta reactivación fenológica. En esos años se detecta una mayor proporción de individuos en estado vegetativo, floración y fructificación, aunque esta tendencia no se sostiene más allá de 2021. El predominio del estado senescente durante julio sugiere una marcada influencia de las condiciones climáticas invernales sobre el ciclo fenológico de la especie.

En octubre, si bien se mantiene una alta proporción de individuos senescentes, también se observa una mayor diversidad fenológica en comparación con julio. Entre 2015 y 2021 se reportan registros esporádicos de floración y fructificación, lo que indica una ligera reactivación hacia la primavera, probablemente favorecida por el aumento de temperaturas y la transición hacia la temporada de crecimiento. Sin embargo, esta reactivación no es suficiente para contrarrestar la tendencia general de senescencia observada en la mayoría de los años. Lo que podría estar influenciado por la persistencia en el monitoreo de individuos en estado senescente permanente.

En conjunto, los resultados muestran que *T. absinthioides* presenta una marcada estacionalidad fenológica, con predominancia del estado senescente en todos los trimestres del año, aunque con momentos puntuales de actividad vegetativa, floración y fructificación. Las interrupciones observadas en 2019 y 2020 responden a eventos climáticos extremos y a restricciones logísticas documentadas.

Categoría de copa viva (Figura 5.21)

El análisis de la proporción de copa viva en *T. absinthioides* revela una tendencia sostenida hacia la reducción de la vitalidad estructural de los individuos entre 2007 y 2024, con un incremento progresivo en la proporción de individuos sin cobertura foliar (0%).

Durante el mes de enero, entre 2007 y 2013, se observó una mayor proporción de individuos con coberturas intermedias a altas (50–75% y 75–100%), con una distribución equilibrada de clases de copa viva. Sin embargo, a partir de 2014 comienza un marcado aumento de la categoría 0%, lo que indica una pérdida progresiva del follaje.



Este patrón se intensifica desde 2018 en adelante, con un predominio absoluto de individuos sin copa viva en los años más recientes, lo que evidencia un declive sostenido en la condición general de la especie. La cobertura foliar completa (75–100%) desaparece por completo hacia el final del periodo.

En abril, los resultados reflejan una situación similar, aunque con mayor variabilidad entre los años. Hasta 2014, hay una representación considerable de coberturas entre 25% y 75%, pero desde 2015 comienza a destacarse un incremento de individuos con 0% de copa viva. Entre 2018 y 2024, esta categoría pasa a ser predominante, especialmente en los últimos tres años. Las coberturas más altas se tornan cada vez menos frecuentes, evidenciando una reducción generalizada del vigor estructural de la población.

En julio, desde 2007 y hasta 2016, la totalidad de los individuos presentan copa viva 0%, indicando una defoliación generalizada durante el invierno. Aunque entre 2017 y 2020 aparecen registros esporádicos de individuos con coberturas entre 25% y 75%. En los años más recientes vuelve a dominar la categoría 0%, lo que sugiere un patrón invernal recurrente de pérdida completa de follaje, probablemente relacionado con condiciones climáticas invernales.

En octubre, la cobertura de copa viva muestra el inicio de una ligera recuperación en el follaje vivo, con un aumento relativo en las categorías intermedias (25–75%) entre 2015 y 2021. Aunque esta recuperación es parcial, refleja una respuesta positiva durante la primavera. . A partir de 2022, se retoma el predominio de individuos sin copa viva, lo que sugiere que la especie no alcanza niveles óptimos de cobertura estructural incluso en esta estación, posiblemente anticipando condiciones de estrés que se consolidan en otoño.

En conjunto, los resultados evidencian que *T. absinthioides* ha experimentado cambios progresivos en su cobertura de copa viva, con una mayor presencia de individuos defoliados a lo largo del periodo de monitoreo. Este patrón, consistente entre estaciones y más marcado en invierno, podría estar vinculado a factores ambientales extremos, eventos climáticos puntuales como el alud de 2019, y una posible disminución en la disponibilidad hídrica. No obstante, la aparición de coberturas intermedias en ciertos años y estaciones sugiere que la especie mantiene cierta capacidad de respuesta y adaptación frente a las condiciones del entorno.

Categoría de vitalidad (Figura 5.22)

La categoría de vitalidad muestra una transición en la condición de los individuos de *T. absinthioides* a lo largo del periodo monitoreado, con una disminución de las categorías normal, débil, muy débil y un aumento sostenido de individuos clasificados como secos, lo que sugiere una disminución progresiva en la vitalidad general de la especie.

Durante enero, entre 2007 y 2012, la mayoría de los individuos fueron clasificados con una condición normal, sin presencia de categorías vigorosas. A partir de 2013 se observa un cambio importante, con un aumento progresivo de individuos secos, manteniéndose en 2024. En paralelo, disminuyen las proporciones de individuos en condición débil y muy débil, mientras que la condición normal se mantiene en proporciones intermedias.

En abril, se detecta una transición aún más evidente. Si bien en los primeros años predomina la condición normal, con cierta presencia de estados debilitados, a partir de 2015 se incrementa el número de individuos secos, llegando a representar más del 60% de la población monitoreada en los últimos años. La disminución de las categorías de condición normal y aumento de categoría seca se mantiene en consonancia con la pérdida de copa viva reducida.

En julio, destaca la presencia casi absoluta de individuos secos durante todo el periodo. Esta condición se mantiene de manera estable entre 2007 y 2024, con excepciones puntuales entre 2018 y 2021, cuando se registran algunos individuos en condición débil, muy débil o vigorosa. Esta estabilidad sugiere que *T. absinthioides* presenta una respuesta muy marcada de esta especie ante a las condiciones invernales en el Salar de Atacama.

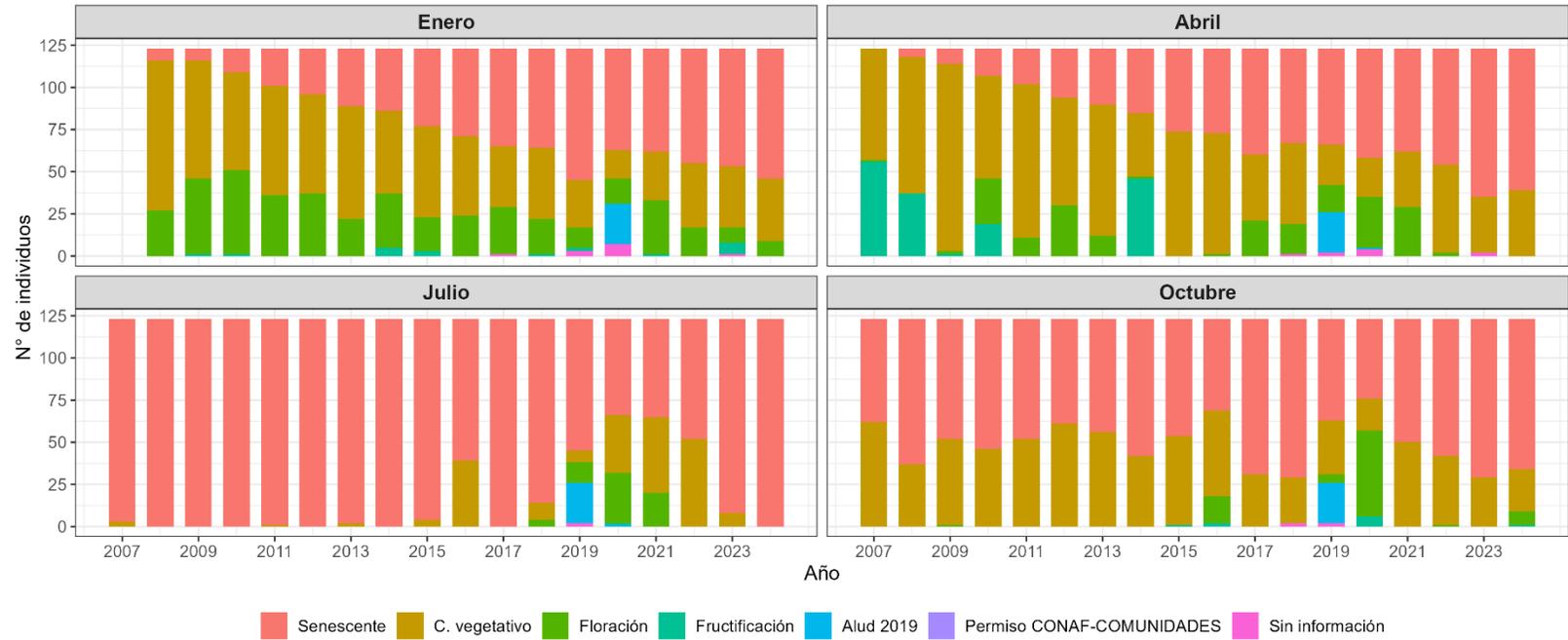


En octubre, la distribución de categorías de vitalidad es similar a la de abril. Durante los primeros años predominan los individuos en condición normal, pero a partir de 2015 se produce un aumento sostenido en la categoría seca, que se convierte en la dominante hacia el final del periodo. Al mismo tiempo, se reduce la proporción de individuos debilitados. La condición vigorosa se presenta de forma marginal entre 2018 y 2020.

En conjunto, los datos sugieren que *T. absinthioides* ha mostrado una respuesta marcada frente a las condiciones climáticas, con una mayor proporción de individuos secos en los meses fríos (julio y octubre) y señales de recuperación parcial hacia el final del periodo evaluado. Este patrón podría estar vinculado a la fenología de la especie, su ciclo de vida y su capacidad de “rebrote”, así como a su adaptación a las condiciones cambiantes del ecosistema del Salar de Atacama. No obstante, el predominio creciente de individuos secos sugiere que factores como la disminución de la disponibilidad hídrica, la mayor frecuencia de eventos extremos (como aluviones) y la presión por herbívora podrían estar afectando su vitalidad. Estos elementos, combinados con la estacionalidad marcada del desierto altoandino, podrían limitar la capacidad de recuperación de la especie en ciertos momentos del año, reflejando una respuesta fisiológica más conservadora ante un entorno restrictivo.



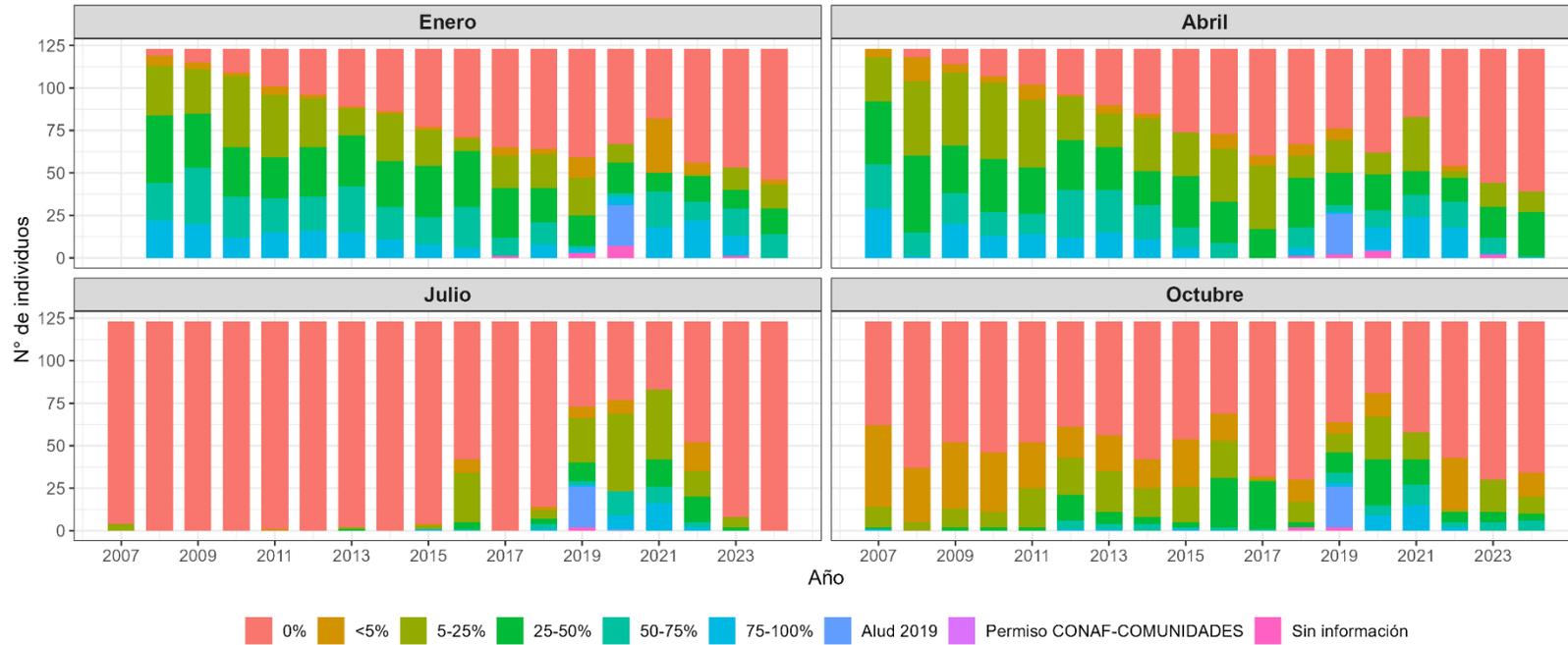
Figura 5.20. *Tessaria absinthioides*: Número de individuos por categoría de fenología, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



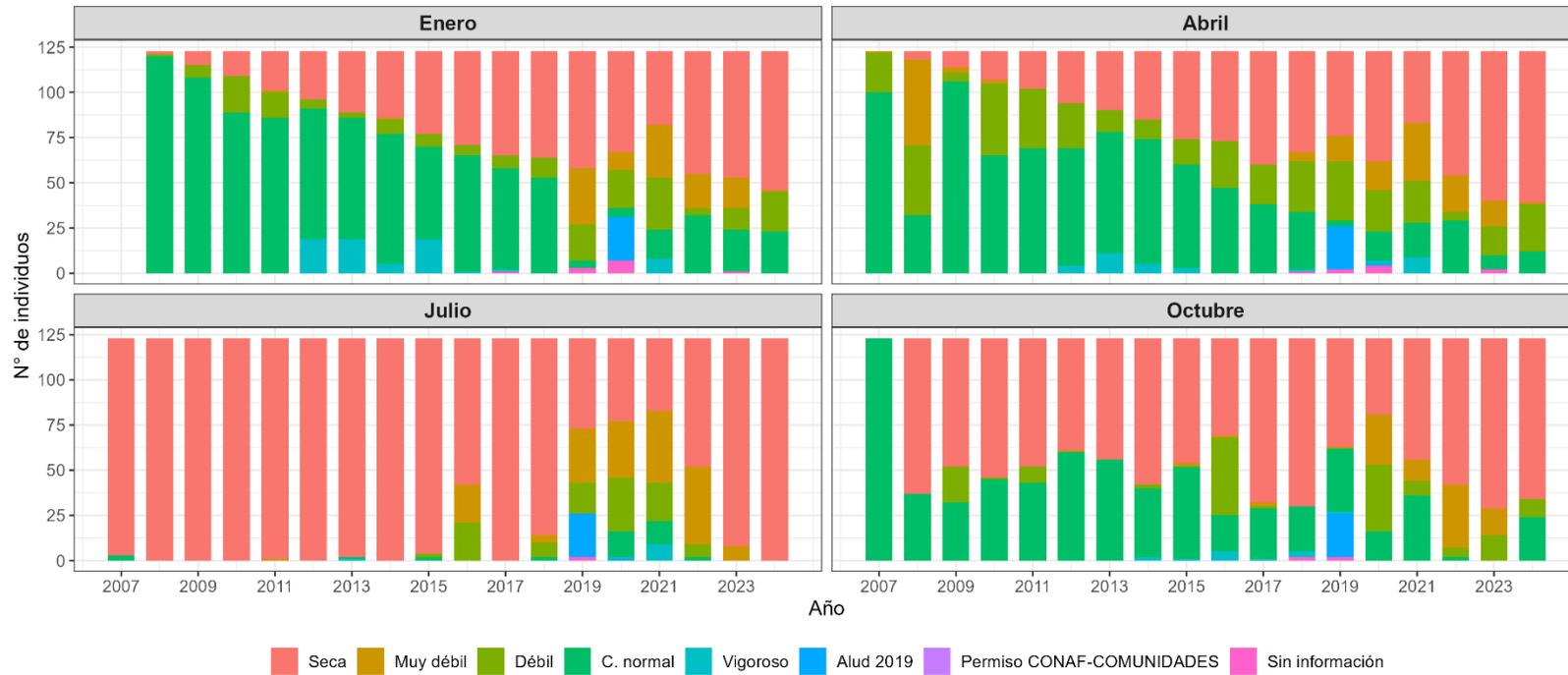
Figura 5.21. *Tessaria absinthioides*: Número de individuos por clase de copa viva, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia



Figura 5.22. *Tessaria absinthioides*: Número de individuos por categoría de vitalidad, campañas 2007 a 2024



Fuente: elaboración propia

5.4 Relación de la vitalidad de la vegetación y el contenido de humedad

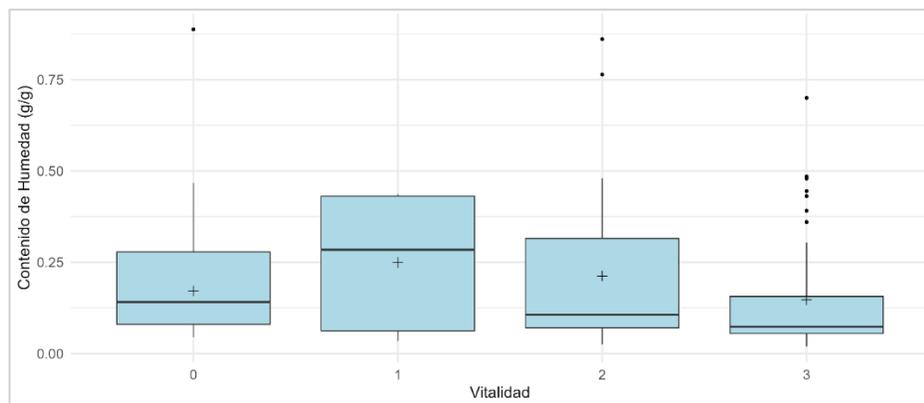
Durante 2024 se analizó la variación del contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS, g/g) en función de la categoría de vitalidad de la vegetación. Los resultados (Tabla 5-17) muestran diferencias entre categorías: las medianas fueron más bajas en los individuos Secos (0,141 g/g) y en Crecimiento Normal (0,073 g/g, con amplia dispersión), mientras la categoría Muy Débil mostró valores altos, aunque con un tamaño de muestra muy reducido (n = 5). Por su parte, la figura de caja (Figura 5.23) refuerza esta alta variabilidad intra-categoría, con valores atípicos en todas las clases.

Tabla 5-17. Resumen de la variación del contenido de humedad gravimétrico del suelo (g/g) por categoría de vitalidad para el 2024

Vitalidad	N	Media	DE	Min	Max	Mediana	Q1	Q3
0 - Seco	385	0,171	0,115	0,045	0,888	0,141	0,08	0,278
1 - Muy débil	5	0,249	0,194	0,034	0,436	0,284	0,062	0,431
2 - Débil	82	0,212	0,188	0,025	0,861	0,106	0,07	0,315
3 - Crecimiento normal	89	0,147	0,150	0,019	0,7	0,073	0,055	0,156

Las unidades de la media, desviación estándar (D.E.), mediana, Q1 y Q3, corresponden a g/g (gramos de agua por gramos de suelo)
Fuente: elaboración propia

Figura 5.23. Variación del contenido de humedad gravimétrico del suelo por categoría de vitalidad 2024



Las cajas representan el rango intercuartílico, la línea central la mediana, el signo “+” el promedio y los puntos fuera de las cajas corresponden a valores atípicos.

Categoría de vitalidad: 0=Seco; 1=Muy débil; 2=Débil; 3=Normal; 4=Excepcionalmente vigoroso

Fuente: elaboración propia

Al comparar con el periodo 2007-2023 (Tabla 5.18), el patrón se mantiene: las parcelas con menor humedad superficial concentran más individuos secos, y el aumento de CHS se asocia a una mayor proporción de individuos en condición normal (Figura 5.24). No obstante, la significancia de esta relación no es uniforme y el tamaño del efecto es moderado, lo que indica que el CHS no es el único determinante del estado fisiológico de la vegetación.

Esta variabilidad podría responder a múltiples factores ecológicos, como las propiedades del suelo (textura, salinidad y costras), la microtopografía, microclima y la dinámica poblacional de los individuos fijos monitoreados



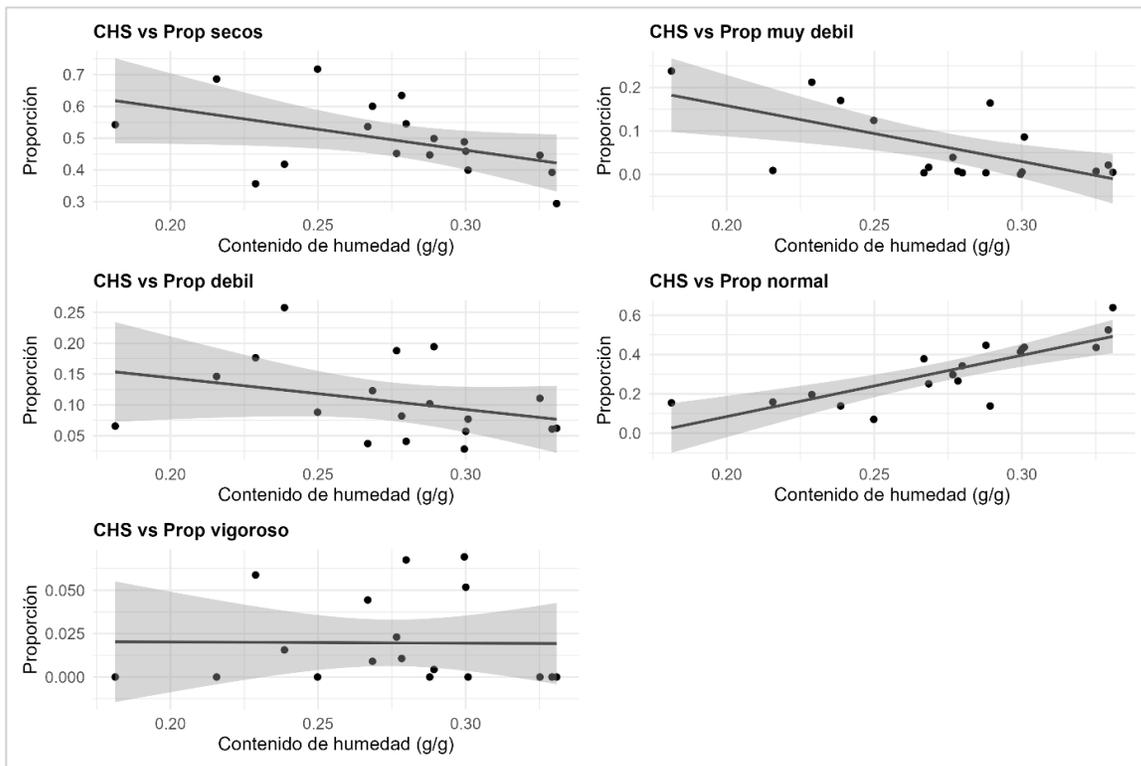
desde 2007, muchos de los cuales presentan senescencia natural y podrían reaccionar débilmente a los pulsos de humedad. Las observaciones de campo 2024 (Anexo 1) respaldan este patrón: se registran individuos persistentes en categorías bajas a pesar de variaciones locales de CHS, junto a otros individuos no monitoreados que muestran categorías de vitalidad alta, como crecimiento normal y/o vigoroso.

Tabla 5-18. Resumen de la variación del contenido de humedad gravimétrico del suelo (g/g) por categoría de vitalidad para el periodo 2007-2023.

Vitalidad	N	Media	D.E.	Min	Max	Mediana	Q1	Q3
0 - Seco	4566	0,23	0,17	0,00	1,00	0,16	0,11	0,32
1 - Muy débil	563	0,20	0,15	0,00	1,00	0,14	0,09	0,28
2 - Débil	939	0,26	0,20	0,01	1,00	0,18	0,10	0,43
3 - Crecimiento normal	3041	0,27	0,21	0,01	1,08	0,17	0,11	0,38
4 - Excepcionalmente vigoroso	199	0,28	0,22	0,03	0,92	0,17	0,08	0,47

Las unidades de la media, desviación estándar (D.E.), mediana, Q1 y Q3, corresponden a g/g (gramos de agua por gramos de suelo)
Fuente Geobiota, Informe CHS2023.

Figura 5.24. Relación entre el contenido de humedad del suelo (CHS) y la proporción de individuos por categoría de vigor (periodo 2007-2024)



Se muestran los modelos lineales ajustados entre el contenido de humedad del suelo (CHS, expresado en g/g) y la proporción anual de individuos en cinco categorías de vigor (seco, muy débil, débil, normal y vigoroso). Cada punto representa un promedio anual por sitio, y las bandas grises corresponden a intervalos de confianza del 95 %. Fuente: elaboración propia



La Figura 5.26 muestra que, a escala anual y por sitio, existe una tendencia a mayor proporción de individuos secos cuando la napa es más profunda y, en sentido inverso, una mayor proporción de individuos en crecimiento normal cuando la napa es más somera. Sin embargo, los intervalos de confianza amplios y las pendientes evidencian que esta relación no es directa ni consistente entre categorías y campañas (ver Anexo 5). La Tabla 5.19 refuerza este patrón: las distribuciones por categoría se solapan ampliamente, lo que indica un bajo poder explicativo de la profundidad de la napa por sí sola sobre el estado vital.

Las especies monitoreadas son mayormente halófitas que dependen de la humedad superficial y de pulsos de recarga en los primeros centímetros del suelo más que del nivel freático profundo. A ello se suma la heterogeneidad edáfica (textura y salinidad) y la microtopografía, que regulan la infiltración, la retención o la evaporación del agua. Además, la estructura etaria de las poblaciones (con individuos longevos y senescentes monitoreados desde 2007) reduciría la capacidad de detectar respuestas rápidas a cambios en la napa, y al CHS (ver Anexo 1).

Este conjunto de procesos podría explicar por qué las categorías Muy débil, Débil y Vigorosa muestran relaciones tenues o no lineales con la profundidad, y por qué el efecto observado en las categorías Seco o Crecimiento normal, si bien detectable, no es determinante. En resumen, la vitalidad es el resultado de la interacción entre la profundidad de la napa, el contenido de humedad, las propiedades del suelo, la microtopografía, el microclima y la dinámica poblacional, más que de un único factor.

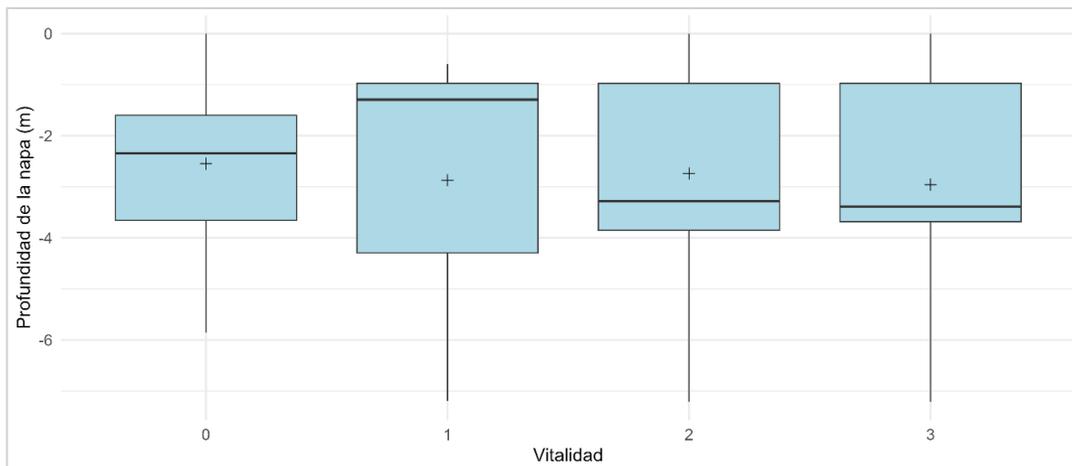
Tabla 5-19. Resumen de la variación de la profundidad de la napa por categoría de Vitalidad

Vitalidad	N	Media	DE	Min	Max	Mediana	Q1	Q3
0 - Seco	385	2,548	1,572	0,000	5,856	2,343	1,6	3,659
1 - Muy débil	5	2,871	2,830	0,594	7,198	1,293	0,974	4,296
2 - Débil	82	2,740	2,019	0	7,214	3,2815	0,975	3,854
3 - Crecimiento normal	89	2,958	2,071	0	7,214	3,39	0,974	3,684

Las unidades de la media, desviación estándar (D.E.), mediana, Q1 y Q3

Fuente: elaboración propia

Figura 55.25. Variación de la profundidad de la napa por categoría de Vitalidad 2024



Las cajas representan el rango intercuartílico, la línea central la mediana, el signo “+” el promedio y los puntos fuera de las cajas corresponden a valores atípicos.

Categoría de vitalidad: 0=Seco; 1=Muy débil; 2=Débil; 3=Normal; 4=Excepcionalmente vigoroso

Fuente: elaboración propia



En la Figura 5.26 se muestra la relación entre la profundidad de la napa freática (en metros) y la proporción de individuos clasificados en cada una de las cinco categorías de estado vital evaluadas entre los años 2007 y 2024.

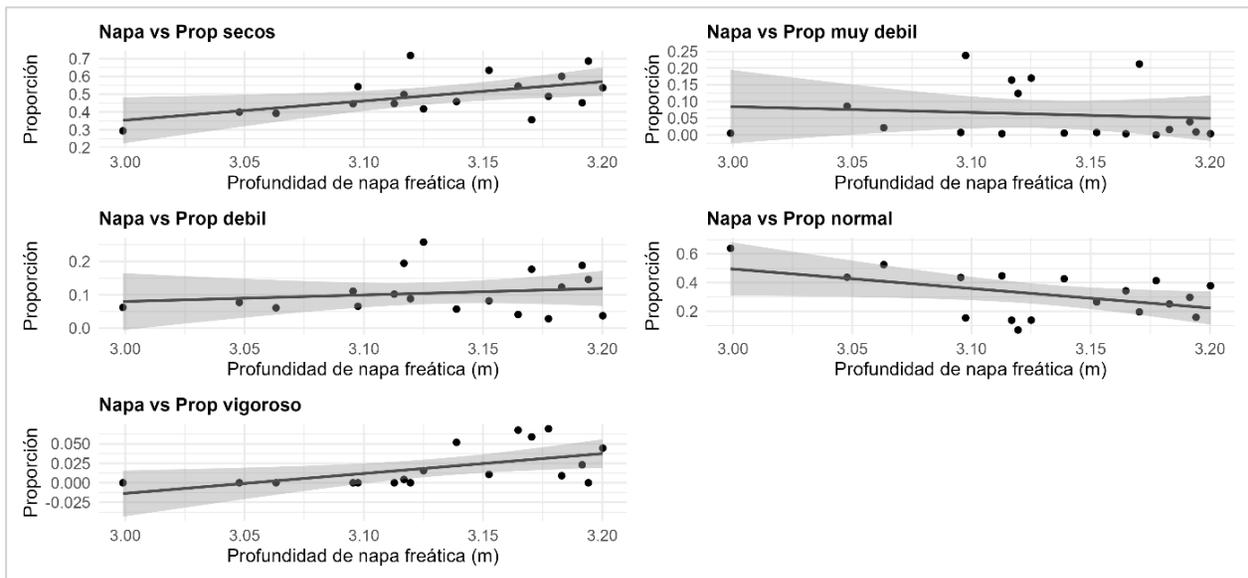
Se observa una tendencia positiva entre la profundidad de la napa freática y la proporción de individuos secos, lo que indica que, a mayor profundidad de la napa (es decir, menor disponibilidad hídrica subterránea), aumenta la proporción de individuos en condición seca.

De manera inversa, se identificó una tendencia negativa en la proporción de individuos con crecimiento normal, la cual disminuye a medida que se incrementa la profundidad de la napa, lo que refuerza la hipótesis de que una menor disponibilidad de agua subterránea podría estar asociada a una disminución en el vigor de las plantas.

NO obstante, en las categorías de individuos Muy débil, Débil y Vigorosa, las relaciones fueron más tenues o sin una tendencia clara, aunque se destaca un ligero aumento en la proporción de individuos vigorosos con niveles de napa más superficiales, lo que podría indicar que, cuando el recurso hídrico está más accesible, algunas plantas logran mantenerse en mejor estado fisiológico.

Estas relaciones deben interpretarse con cautela, dado que múltiples factores adicionales pueden influir en el estado de la vegetación, tales como la especie, edad, competencia interespecífica y condiciones microambientales.

Figura 5.26. Relación entre la profundidad de la napa freática y la proporción de individuos por categoría de vigor (periodo 2007–2024)



Se muestran los modelos lineales ajustados entre la profundidad de la napa freática (en metros) y la proporción anual de individuos en cinco categorías de vigor (seco, muy débil, débil, normal y vigoroso). Cada punto representa un promedio anual por sitio, y las bandas grises corresponden a intervalos de confianza del 95 %.

Fuente: elaboración propia



5.4.1 Análisis satelital y dinámica espacial de la vegetación

Con base en los antecedentes del monitoreo satelital y el análisis multitemporal de parcelas realizado entre 2006 y 2024 (Geobiota, PSAB 18, 2024), se observa que la vegetación presente en el Borde Este del Salar de Atacama se mantiene mayoritariamente dentro de los rangos históricos de variabilidad. Aunque se detectaron incrementos puntuales en las categorías de vitalidad baja (débil, muy débil y seca), así como leves reducciones en la cobertura de copa verde y en la ocurrencia de fases reproductivas (floración y fructificación) durante el último año, dichos cambios se encuentran dentro del intervalo de fluctuación registrado en campañas previas, sin constituir una desviación significativa de la dinámica general de la vegetación.

Adicionalmente, se identificaron algunos sectores (principalmente en la zona sur del área de estudio y en comunidades vegetales con menor cobertura o adaptaciones más restringidas) donde se aprecian señales de cambio más notorias. Estas zonas coinciden en parte con áreas caracterizadas por mayor profundidad de napa freática y menores valores de contenido de humedad del suelo. Sin embargo, al considerar la totalidad de la superficie con cobertura vegetal, las comunidades dominantes (como el matorral de *T. absinthioides* y la pradera de *D. spicata*) mantienen estabilidad relativa en términos de distribución espacial y cobertura.

Estos antecedentes permiten inferir que, a escala de paisaje, la vegetación del Borde Este no presenta indicios de alteraciones atribuibles a la operación minera. No obstante, se recomienda mantener una vigilancia focalizada en las zonas donde se han evidenciado variaciones incipientes, a fin de evaluar su evolución en campañas futuras y ajustar preventivamente las estrategias de monitoreo de ser necesario.

Los patrones observados en el contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS), la profundidad de la napa freática y el estado vital de la vegetación resultan consistentes con lo reportado en años anteriores, consolidando una tendencia espacial y temporal estable que no evidencia impactos significativos atribuibles a la operación minera.

Los datos recopilados muestran que el CHS presenta sus valores más altos en las parcelas occidentales, particularmente en 1027 y L7-7, disminuyendo progresivamente hacia el este. Este patrón se asocia con una napa freática más somera en los sectores occidentales, lo que favorece la capilaridad del agua en el perfil edáfico. La relación inversa entre CHS y profundidad de la napa fue respaldada estadísticamente por modelos exponenciales con coeficientes de determinación superiores a 0,5 en la mayoría de las campañas, tanto en los datos del laboratorio acreditado (ETFA: ALS) como del interno (Laboratorio Metalúrgico SQM).

Esta coherencia sugiere que la disponibilidad hídrica del suelo está de cierta manera influenciada por la cercanía del nivel freático. No obstante, se observa una mayor variabilidad interanual en las parcelas con napa más superficial, lo que podría estar relacionado con una mayor sensibilidad a la dinámica hidroclimática. Parcelas como L4-3, en cambio, mantienen un CHS bajo y estable, lo que refuerza su carácter de zona árida y potencialmente más vulnerable a variaciones en la recarga hídrica.

El análisis de las cuatro especies monitoreadas en el marco del CHS 2024 evidencia respuestas diferenciadas frente a las condiciones ambientales del Salar de Atacama, moduladas por una interacción compleja de factores bióticos y abióticos. Entre los factores abióticos, destaca la profundidad de la napa freática, cuya oscilación ha sido



documentada como un modulador clave de la vegetación en ecosistemas hipersalinos y áridos (SQM Salar y Prammar Ambiental, 2005).

El modelo estadístico aplicado (MANOVA) evidenció la existencia de una relación positiva y significativa entre el CHS y la vitalidad de la vegetación, en especial en las categorías normales y vigorosas (Anexo 5). Esta asociación resulta coherente desde el punto de vista ecológico, dado que una mayor disponibilidad hídrica favorece el metabolismo de las plantas, su actividad foliar y reproductiva. Por el contrario, la relación entre la profundidad de la napa y la vitalidad fue estadísticamente significativa en algunos casos, pero no biológicamente coherente, lo que sugiere que la profundidad per se no determina la condición vegetal sin considerar la interacción con factores como textura del suelo, salinidad o accesibilidad radicular. De hecho, se reporta, que por lo menos para la formación de Matorral de Brea-Cachiyuyo (*Tessaria absinthioides*-*Atriplex atacamensis*) localizados en el límite oriental del sistema vegetacional denominado Borde Este del Salar de Atacama, no dependen para su subsistencia de la napa freática (SQM Salar y Prammar Ambiental, 2005).

Los datos de monitoreo muestran que individuos categorizados como secos (categoría 0) coexisten con ejemplares vigorosos o en rebrote dentro de una misma parcela (ver Anexo 1). Esta heterogeneidad sugiere que la vitalidad no refleja exclusivamente las condiciones ambientales actuales, sino que puede estar influenciada por factores como la fenología de las especies, la regeneración vegetativa y el envejecimiento natural de los individuos.

En el caso de *T. absinthioides*, especie dominante en el área, se ha descrito un sistema radical profundo con raíces gemíferas horizontales que permiten el rebrote clonal (Irazusta *et al.*, 2009). Además, se ha clasificado como una especie semihalófito, con adaptaciones morfológicas como succulencia radicular, tricomas foliares densos y reducción del tamaño foliar bajo condiciones salinas, especialmente en presencia de NaCl o Na₂SO₄ (Degano, 1999). Estas características confieren a la especie una alta tolerancia a suelos salinos y permiten la coexistencia de tallos secos y nuevos brotes dentro de un mismo individuo.

En contraste, otras especies monitoreadas como *D. spicata* y *N. atacamensis* muestran una mayor dependencia de la humedad edáfica superficial, así como una sensibilidad marcada a la salinización del suelo y al aumento de la aridez. En el caso de *D. spicata*, si bien presenta adaptaciones morfofisiológicas que toleran salinidad moderada, pero no condiciones de aridez severa simultánea, su vigor disminuye significativamente cuando dicha salinidad se combina con bajos niveles de humedad en el suelo, particularmente en zonas de transición entre vegas y salares (Asuesco, 2020)

Por su parte, *N. atacamensis* requiere niveles relativamente estables de humedad en la capa subsuperficial del suelo para mantener su funcionalidad fisiológica y su presencia está estrechamente ligada a condiciones edáficas específicas. Diversos estudios han documentado su alta sensibilidad a fluctuaciones en el CHS y a procesos de salinización edáfica (Asuesco, 2020).

En este contexto, el contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS) surge como un indicador sensible y directamente relacionado con la vitalidad vegetal. Estudios como los de Zhang y Shao (2008) y Hao *et al.* (2025) han demostrado que la humedad superficial del suelo regula procesos fisiológicos esenciales como la fotosíntesis, la absorción de nutrientes y el crecimiento. Esto concuerda con los análisis realizados en el Borde Este del Salar de Atacama, donde las zonas con mayor CHS presentaron mayores proporciones de individuos vigorosos y en floración.



Adicionalmente, la variabilidad interanual de las precipitaciones constituye un factor modulador clave (ver Anexo 3), ya que episodios esporádicos de lluvias pueden generar pulsos de humedad aprovechables por especies con raíces más superficiales, independientemente de la profundidad de la napa.

No puede descartarse tampoco que parte de la categoría seco responda a procesos de decaimiento fisiológico natural tras más de 15 años de seguimiento, lo cual es particularmente relevante en diseños de parcelas permanentes que no capturan adecuadamente la dinámica de reclutamiento. Esto es especialmente pertinente en *T. absinthioides*, cuya longevidad y capacidad de rebrote vegetativo permiten una estabilidad estructural no necesariamente asociada a la vitalidad aérea inmediata.

El estado vital de la vegetación reflejó una alta proporción de individuos en condición senescente durante los meses de invierno, especialmente en especies dominantes como *T. absinthioides*, lo que es coherente con patrones fenológicos estacionales. Sin embargo, esta condición se mantuvo parcialmente en otras estaciones, lo que podría estar influenciado por el monitoreo sobre individuos fijos de edad avanzada.

En contraste, especies como *A. atacamensis* y *D. spicata* mostraron una mayor actividad fotosintética a lo largo del año, con presencia de estados vegetativos activos y recuperación en primavera. Estas diferencias interespecíficas reflejan estrategias adaptativas distintas frente a la disponibilidad hídrica, y subrayan la necesidad de un enfoque taxonómicamente diferenciado en el análisis de la vegetación.

Además, el análisis satelital de cobertura vegetal del borde este del Salar (Geobiota, PSAB 18, 2023) muestra patrones estables en el largo plazo, con fluctuaciones locales asociadas a condiciones hidrológicas específicas. En sectores del noreste se ha evidenciado incluso un leve aumento de cobertura, mientras que en algunas zonas del sur se registran descensos puntuales. Estos resultados refuerzan la idea de que la respuesta de la vegetación está modulada por diversos factores como la dinámica de la napa freática, el CHS, la regeneración clonal o sexual y las características biológicas de cada especie.

En un contexto más amplio, los resultados de 2024 se alinean con la tendencia general observada desde el año 2007. La estabilidad relativa del CHS y del estado de la vegetación en parcelas históricamente monitoreadas refuerza la idea de que no se han producido cambios acumulativos significativos atribuibles a las extracciones del proyecto.

Finalmente, es importante destacar que todos los resultados presentados en este informe se enmarcan en una metodología de seguimiento basada en el marcaje de individuos fijos desde el año 2007, conforme a lo establecido en la RCA N°226/2006. Esta estrategia ha permitido construir una base robusta de seguimiento y detectar tendencias multitemporales, pero también implica ciertas limitaciones inherentes al diseño. Tras más de 15 años de monitoreo, es esperable que algunos individuos hayan completado su ciclo fenológico, presentando estados de senescencia o decaimiento fisiológico natural. Las observaciones de campo realizadas durante 2024 (ver Anexo 1) evidencian que, en varias parcelas, existen individuos no marcados que muestran categorías de vitalidad superiores a los ejemplares monitoreados, bajo condiciones locales similares tanto de CHS como de profundidad de la napa. Esto sugiere que el sistema vegetal mantiene procesos activos de regeneración y adaptación. Por tanto, los resultados deben interpretarse como representativos de una cohorte históricamente etiquetada, y no necesariamente del conjunto completo de la vegetación presente en las parcelas. En este contexto, los hallazgos son coherentes con el enfoque metodológico aplicado y se mantienen dentro de los rangos históricos.



6 Conclusiones

Los resultados del monitoreo ambiental correspondiente al año 2024 en el Borde Este del Salar de Atacama permiten concluir que las variables evaluadas (contenido de humedad gravimétrico del suelo (CHS), profundidad de la napa freática y estado vital de la vegetación) se mantienen dentro de los rangos de variabilidad registrados desde 2007, sin evidenciar alteraciones significativas atribuibles a la operación minera.

Se confirma la persistencia de un gradiente espacial del CHS, con valores más altos hacia el sector occidental (e.g., parcelas 1027 y L7-7) y mínimos en el sector oriental (e.g., L4-3 y L3-3). Este patrón se relaciona con la profundidad de la napa freática, que tiende a ser más somera en el oeste y más profunda hacia el este. Los análisis estadísticos respaldan esta asociación mediante una correlación inversa y significativa entre ambas variables. La estabilidad interanual de estos patrones sugiere una configuración hidrológica relativamente estable, pese a las extracciones hídricas en el entorno.

En cuanto a la vegetación, se registró una alta proporción de individuos en estado de senescencia durante el invierno, en concordancia con la estacionalidad del ecosistema. Sin embargo, especies como *A. atacamensis* y *D. spicata* mostraron mayor actividad fotosintética a lo largo del año, reflejando distintas estrategias adaptativas frente a la disponibilidad hídrica. La dominancia de *T. absinthioides* en las parcelas monitoreadas influye considerablemente en los patrones generales observados, ya que su alta proporción de individuos senescentes puede atribuirse tanto a su fenología natural como al envejecimiento de los ejemplares marcados desde el inicio del monitoreo.

El análisis multivariado indicó que una mayor disponibilidad hídrica en el suelo se asocia positivamente con el estado fisiológico de la vegetación. No obstante, la relación con la profundidad de la napa no resultó consistentemente significativa desde el punto de vista biológico, lo que resalta la necesidad de incorporar variables complementarias (como textura del suelo, salinidad o características de regeneración) para una interpretación más integral de la dinámica ecosistémica.

En el marco de la continuidad del programa de monitoreo, se plantea la necesidad de avanzar hacia mejoras metodológicas que aumenten la representatividad de la vegetación evaluada y fortalezcan la interpretación ecológica del sistema. Por ello, se propone durante el 2025 explorar ajustes metodológicos que aumenten la representatividad de la vegetación evaluada, de modo que permitan la incorporación de individuos reclutados o regenerados de forma natural dentro de las parcelas monitoreadas, a fin de captar adecuadamente la dinámica poblacional de las especies y sus respuestas fisiológicas al ambiente (ver Anexo 1). Asimismo, se propone revisar puntos de muestreo con datos atípicos o no representativos y considerar la revisión de parámetros edáficos que aporten información adicional sobre las condiciones locales del suelo.



7 Bibliografía

Ausenco (2020). *Estudio Historia de Vida de Especies Vegetales Azonales del Salar de Atacama. Informe Consolidado Primer Semestre 2020*. Informe técnico para Albemarle Ltda.

Degano, C. A. (1999). Respuestas morfológicas y anatómicas de *Tessaria absinthioides* (Hook. et Arn.) DC. a la salinidad. *Brazilian Journal of Botany*, 22, 357-363.

Geobiota Consultores (2023). *Informe anual: Contenido de humedad del suelo 2023 (CHS Datos 2023)*. SQM Salar SpA

Irazusta, M. I., Isola, M. D. M., & Martin Montiel, D. (2009). Anatomía de Raíz de *Tessaria absinthioides* (Hook. & Arn.) DC. y *T. dodoneifolia ssp. dodoneifolia* (Hook. & Arn.) Cabrera.

Hao, Y., Mao, J., Bachmann, C. M., Hoffman, F. M., Koren, G., Chen, H., ... & Dai, Y. (2025). Soil moisture controls over carbon sequestration and greenhouse gas emissions: a review. *npj climate and atmospheric science*, 8(1), 16.

Salar, SQM., y Ambiental, P. (2005). Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama: adenda II, Anexo IV, Estudio de profundidad de raíces en *Tessaria absinthioides* y *Atriplex atacamensis*, en sector oriental del borde este del Salar de Atacama.

SQM (2023). Anexo 5. Niveles formato Res.894 (Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico -PSAHN°33), 2023.

SQM (2023). Anexo 5. Niveles formato Res.894 (Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico -PSAHN°34), 2023.

RCA N°226 (2006). *Resolución de calificación ambiental del proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama (SQM Salar S.A.)*. Comisión regional de medio ambiente, Región de Antofagasta. 19 de octubre 2006. Pp: 29-47.

Zhang, P., & Shao, M. A. (2015). Spatio-temporal variability of surface soil water content and its influencing factors in a desert area, China. *Hydrological Sciences Journal*, 60(1), 96-110.