



Albemarle Limitada

Santiago, Chile

Teléfono: [REDACTED]

www.albemarlelitio.cl

ALB-GMA-2021-SMA-028

Mat.: Entrega informe Análisis Hídrico-Biótico del sector Vegas de Tilopozo

Santiago, 14 de mayo de 2021

Sr.

Cristóbal de la Maza

Superintendente de Medio Ambiente

SUPERINTENDENCIA DEL MEDIO AMBIENTE

De mi consideración:

Ignacio Toro Labbé, en representación de **Albemarle Limitada**, Rol Único Tributario N° [REDACTED] (en adelante, "**Albemarle**"), ambos domiciliados para estos efectos en [REDACTED], a Ud. respetuosamente digo:

Por medio de la presente, vengo a entregar informe con análisis de componentes hídricas y bióticas en el sector de Tilopozo. Este análisis fue realizado por la empresa consultora Hidromas a pedido de Albemarle, con el fin de revisar el comportamiento histórico y estado actual de variables ambientales críticas para la sostenibilidad del sector, además de identificar posibles causas de afectación a la superficie vegetal en el sector de vegas.

Este informe se entrega en el marco de trabajo colaborativo que la autoridad ha impulsado y dando cumplimiento a los compromisos voluntarios que la compañía ha contraído con la autoridad en las reuniones de dicha mesa colaborativa. Este informe da respuesta, además, a la solicitud realizada por la Superintendencia en la RE 1824/2020 de "entregar información orientada a reducir la hipótesis de riesgo levantada por este organismo en el sector Tilopozo y de la cual no se le está responsabilizando individualmente".

Esperando que el informe pueda ayudar a mejorar el entendimiento de lo que está ocurriendo en dicho sector esperamos estar colaborando para que se tomen las medidas que permitan garantizar su protección en caso de que se estime necesario.

Por nuestra parte, reiteramos nuestro compromiso absoluto para adoptar medidas que aseguren la sostenibilidad del Salar de Atacama y, en particular, la protección de los ecosistemas sensibles. En atención a ese principio general, estamos disponible para resolver cualquier duda que surja a partir de la entrega de esta información y evaluar la necesidad de profundizar con nuevos estudios algunas interrogantes que puedan surgir luego de la revisión de estos antecedentes.

Sin otro particular, se despide atentamente a usted,

Ignacio
Toro

Digitally signed by

Ignacio Toro

Date: 2021.05.14

09:56:18 -04'00'

Ignacio Toro
Gerente Medio Ambiente
Albemarle Limitada



Análisis Hídrico- Biótico del Sector Vegas de Tilopozo

INFORME Rev. 0

PREPARADO PARA



Mayo 2021



Informe Técnico

Análisis Hídrico- Biótico del Sector Vegas de Tilopozo

2020-270-AEALB (OS-11)

HIDROGEOLOGIA y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE LTDA

Suecia 211, Oficina 701-A, Providencia - Santiago Chile

e-mail: [REDACTED]

website: www.hidromas.cl

Tel: +(56-2) 232027540

REV.	Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	DESCRIPCIÓN
Rev.0	FSS/CMT	AMG/MAV	AMG/MAV	Aprobado Cliente
	23.04.2021	29.04.2021	13.05.2021	

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1	Objetivo.....	12
1.2	Área de Estudio.....	12
2	METODOLOGÍA.....	14
2.1	Revisión de Antecedentes.....	14
2.2	Sistematización de la Información.....	16
2.3	Análisis de Teledetección.....	16
2.4	Análisis Variables Hídricas.....	16
2.5	Análisis de la Vegetación.....	17
2.6	Análisis de Variables Forzantes y su Relación con la Vegetación.....	17
2.7	Discusión y Recomendaciones.....	17
3	ANTECEDENTES GENERALES / HISTORIA DE LOS BOMBEO.....	18
3.1	Extracciones de agua en el acuífero.....	21
3.1.1	ALBEMARLE.....	21
3.1.2	MEL.....	25
3.1.3	CMZ.....	28
3.1.4	Extracción total de agua dulce/salobre y acuífero MNT.....	30
3.2	Extracciones de salmuera.....	31
3.2.1	SQM.....	31
3.2.2	Albemarle.....	33
3.2.3	Extracción total de salmuera.....	35
4	ANÁLISIS VARIABLES HIDRICAS / HIDROGEOLÓGICAS.....	36
4.1	Descripción del Funcionamiento Hidrogeológico de la Zona Marginal del Sector Sur del Salar de Atacama.....	36
4.1.1	Caracterización del flujo horizontal en acuífero dulce/salobre en Zona Marginal.....	42
4.1.2	Flujos verticales en la Zona Marginal.....	47
4.1.3	Distribución de conductividad eléctrica en acuífero dulce/salobre.....	56
4.2	Principales forzantes del acuífero dulce/salobre en la Zona Marginal.....	60
4.2.1	Precipitación.....	60
4.2.2	Evapotranspiración.....	70
4.2.3	Evolución de la variación de niveles en el Acuífero de Agua Dulce/Salobre.....	81
4.2.4	Evolución de la variación de niveles en torno a pozo Tilopozo.....	97
4.3	Discusión y análisis de variables hídricas en Sector Humedal de Tilopozo.....	110
5	ANÁLISIS DE LA VEGETACIÓN EN EL SECTOR TILOPOZO.....	121
5.1	Delimitación Humedales Sector Tilopozo.....	121
5.2	Características de la Vegetación en los Humedales de Tilopozo.....	123
5.2.1	Formaciones Vegetacionales Actuales.....	123
5.2.2	Riqueza y Cobertura Actual en Humedales de Tilopozo.....	127
5.2.3	Principales Especies Vegetacionales Existentes en Humedales de Tilopozo.....	131
5.3	Antecedentes y Evolución Histórica de Riqueza y Cobertura en Tilopozo.....	134
5.4	Análisis Histórico de la Vigoridad de la Vegetación (NDVI) (1990-2019).....	140
5.4.1	Serie de Tiempo de NDVI por Humedal.....	140

5.4.2	Series de Tiempo NDVI por Zonas de Humedal	143
5.4.3	Análisis Comparativo de la Evolución del NDVI en Humedales TL1, TL2 y TL3.	148
6	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS INTEGRADO	150
6.1	Aspectos Generales.....	150
6.2	Prácticas Culturales: Quemadas de la Vegetación	152
6.2.1	Identificación de Incendios Mediante Imágenes Satelitales.....	153
6.2.2	Análisis Detallado de Eventos de Incendios y/o Quemadas en Humedales y Relación con NDVI 157	157
6.2.3	Análisis de Eventos de Quemadas en Riqueza y Cobertura de la Vegetación	167
6.2.4	Síntesis.....	170
6.3	Disponibilidad Hídrica y Vegetación	171
6.3.1	Profundidad del nivel freático y su relación con la vegetación.....	171
6.3.2	Precipitación	175
6.3.3	Cambios en la Profundidad del Nivel Freático (1990-2020)	178
7	CONCLUSIONES.....	192
7.1	Sobre las variables hídricas	192
7.2	Sobre la vegetación	194
7.3	Sobre el análisis integrado.....	195
8	RECOMENDACIONES.....	200
9	REFERENCIAS.....	202

FIGURAS

Figura 1-1:	Ubicación principales usuarios en la Cuenca del Salar de Atacama y su Entorno.	11
Figura 1-2:	Área de Estudio Humedal Tilopozo.....	13
Figura 3-1.	Ubicación captaciones en el entorno de Tilopozo	18
Figura 3-2:	Modelo Conceptual del Sector de Tilopozo (EIA MEL).....	20
Figura 3-3.	Ubicación puntos de extracción de agua dulce/salobre Albemarle	23
Figura 3-4.	Caudal medio anual extraído por Albemarle en Tilopozo y Tucúcaro	24
Figura 3-5.	Variación mensual de Caudal medio mensual de extracción en pozo Tilopozo.	24
Figura 3-6.	Caudal medio diario extraído en pozo Tilopozo. Datos 07-16 – 10-20.....	25
Figura 3-7.	Ubicación captaciones en acuífero MNT.....	26
Figura 3-8.	Detalle ubicación captaciones de MEL en acuífero MNT.....	27
Figura 3-9.	Caudal medio anual extraído por MEL en campo de pozos Monturaqui	28
Figura 3-10.	Ubicación captaciones en CMZ en acuífero MNT	29
Figura 3-11.	Caudal medio anual extraído por CMZ en campo de pozos Negrillar	30

Figura 3-12. Caudal medio anual de extracción de agua dulce/salobre en área de estudio.....	30
Figura 3-13. Zonas de extracción de Salmuera en Salar de Atacama de SQM y Albemarle.....	31
Figura 3-14. Caudal de extracción y reinyección de salmuera de SQM en Salar de Atacama.....	32
Figura 3-15. Caudal neto de extracción de salmuera de SQM en Salar de Atacama.....	32
Figura 3-16. Pozos de extracción de salmuera de Albemarle en Salar de Atacama.....	33
Figura 3-17. Caudal de extracción de salmuera de Albemarle en Salar de Atacama.....	34
Figura 3-18. Variación del caudal medio mensual de extracción de salmuera de Albemarle en Salar de Atacama.....	34
Figura 3-19. Caudal medio anual de extracción de salmuera desde el núcleo del Salar de Atacama.....	35
Figura 4-1. Zona marginal del borde sur del Salar de Atacama. Se incluyen principales puntos de monitoreo (ALB, SQM y MEL).....	37
Figura 4-2. Funcionamiento hidrogeológico en zona marginal.....	38
Figura 4-3. Ubicación del acuífero MNT.....	40
Figura 4-4. Ejemplo de separación de acuífero salobre y salmuera, en perfil vertical de CE, pozo MP-04C (diciembre 2013). Perfil completo del pozo (superior) y detalle en torno a la zona de interfase (inferior). Interfase alrededor de 50 m de profundidad.....	41
Figura 4-5. Desplazamiento de la costra de cloruros en la zona de formación de “open pools”.....	42
Figura 4-6. Isopiezas en Zona Marginal del Sector sur del Salar de Atacama. Invierno 2009. Curvas de nivel cada 0,5 m.....	45
Figura 4-7. Estacionalidad de Nivel Freático en Zona Marginal. Laguna la Brava- (punto C).....	46
Figura 4-8. Estacionalidad de Nivel Freático en Zona Marginal. Humedal TL2 en humedal de Tilopozo, punto LM-16.....	47
Figura 4-9. Estacionalidad de Nivel Freático en Zona Marginal. Borde norte humedal TL2, Til-P03.....	47
Figura 4-10. Esquema de evaluación de flujos verticales con registros en piezómetros.....	48
Figura 4-11. Mapa resumen de flujos verticales en Zona Marginal.....	50
Figura 4-12. Ejemplo variación anómala de cota piezométrica en pozo MP-06B.....	50
Figura 4-13. Ejemplos flujo horizontal. Piezómetro PZ-2 (superior) y piezómetro PZ-5 (inferior).....	52
Figura 4-14. Flujo descendente (infiltración) en multipiezómetros TPZ-2 (superior) y TPZ-13 (inferior) ...	53
Figura 4-15. Flujo ascendente en zona de humedal de Tilopozo. Comparación de registros de piezómetros MP-04A y nivel de pelo de agua medido en estación LM-16.....	54
Figura 4-16. Flujo ascendente en borde oeste de Zona Marginal. Registros de multipiezómetro TPZ-9..	54

Figura 4-17. Flujo surgente en el entorno de lagunas. Pozo profundo MP-01A (superior) y pozo somero BA-15 (medio). Ejemplo de pozo somero BA-08, no surgente (inferior).....	55
Figura 4-18. Variación de CE en Zona Marginal ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	58
Figura 4-19. Variación temporal de la CE en humedal de Tilopozo (estación LM-16, superior) y en laguna La Brava (estación LM-03, inferior).....	59
Figura 4-20. Isoyetas de precipitación media anual en cuenca del Salar de Atacama	61
Figura 4-21. Precipitación anual en Salar de Atacama desde 1985	62
Figura 4-22. Comparación precipitación media anual estaciones Rockwood y Peine	63
Figura 4-23. Precipitación media mensual en estaciones evaluadas (1997-2019).....	64
Figura 4-24. Precipitación diaria en estación Rockwood, período 2009-2020 (superior). Precipitación diaria en estación Rockwood en enero – febrero de 2019 (inferior).....	65
Figura 4-25. Variación de la cota piezométrica y relación con precipitación en estaciones TP-2 (superior izquierda), MP-04A y LM-16 (superior derecha), BA-01 (inferior izquierda) y CL-6 (inferior derecha)68	
Figura 4-26. Variación de la profundidad media diaria del nivel freático en pozo somero BA-08 y precipitación diaria en estación Rockwood, período de lluvias verano 2019.....	69
Figura 4-27. Variabilidad estacional de la evapotranspiración. Se presentan registros de evaporación de bandeja en estación Tilopozo y de evapotranspiración potencial estimada	70
Figura 4-28. Curvas teóricas de tasa de evaporación en función de profundidad del nivel freático (superior). Registros de EVT en función de la profundidad del nivel freático en el Salar de Atacama en diciembre de 2019 (inferior).....	72
Figura 4-29. Distribución de tipos de suelo en caracterización de EVT en Zona Marginal	73
Figura 4-30. Distribución de la EVT con la profundidad en diferentes tipos de suelo de la Zona Marginal	74
Figura 4-31. Ubicación de puntos de monitoreo de EVT de Albemarle en Zona Marginal.....	76
Figura 4-32. Registros de EVT medidos por Albemarle en Zona Marginal	77
Figura 4-33. Variación estacional del nivel freático en puntos de monitoreo ubicados en el entorno del humedal de Tilopozo	79
Figura 4-34. Variación estacional del nivel freático en puntos de monitoreo ubicados al norte del humedal de Tilopozo y en el entorno de las lagunas	80
Figura 4-35. Área de evaluación de variación del nivel freático y puntos de monitoreo	82
Figura 4-36. Variación de cota piezométrica en pozo TP-3 y caudal de extracción en zona sur de acuífero MNT. (1) Comienzo de extracción de CMZ (1995). (2) Comienzo de extracción de MEL (1998). (3) Incremento en extracción de MEL y comienzo de profundización de nivel freático en pozo (2000)..	83
Figura 4-37. Descenso de la cota piezométrica en pozos TP-1, TP-2 y TP-3. Nivel mínimo de verano (superior) y máximo de invierno (inferior). Línea segmentada indica precipitación media anual en estación Rockwood	84

Figura 4-38. Perfil longitudinal del descenso de la cota piezométrica en la Zona Marginal, para el período 2001-2016.....	86
Figura 4-39. Variación temporal del descenso del nivel máximo de invierno en el pozo TP-2 y en pozos ubicados al norte del humedal de Tilopozo	88
Figura 4-40. Variación de la cota piezométrica en pozo somero TPZ-4. Líneas segmentadas indican tendencia de valores máximos de invierno (azul) y de mínimos de verano (rojo).....	89
Figura 4-41. Zonificación de área de estudio, de acuerdo a descensos medidos. Línea roja indica radio máximo de influencia de prueba de bombeo.....	89
Figura 4-42. Ubicación de pozos someros en el entorno de las lagunas	90
Figura 4-43. Variación de la cota piezométrica en pozos PAT ubicados al sur de las lagunas.....	92
Figura 4-44. Variación de la cota piezométrica en pozos no PAT ubicados al sur de las lagunas.....	93
Figura 4-45. Comparación de registros de cota piezométrica puntuales y continuos en pozo BA-08	94
Figura 4-46. Ubicación de puntos de monitoreo en lagunas La Punta y La Brava	95
Figura 4-47. Descenso de la cota superficial del pelo de agua en lagunas La Punta y La Brava en puntos de monitoreo de MEL, para registros mínimos de verano (superior) y máximos de invierno (inferior)	96
Figura 4-48. Variación de la cota superficial del pelo de agua en lagunas La Punta y La Brava en puntos de monitoreo de ALB.....	97
Figura 4-49. Puntos de monitoreo en el entorno del pozo Tilopozo. En rojo se indica radio de influencia de prueba de bombeo	98
Figura 4-50: Ubicación de puntos de observación para prueba de bombeo en pozo Tilopozo.....	99
Figura 4-51: Resultados de prueba de bombeo en pozo Tilopozo.....	100
Figura 4-52: Serie de tiempo de profundidad del nivel freático en pozo Tilopozo (1989-2009)	101
Figura 4-53: Variación de cota piezométrica y media móvil de 12 meses en pozo Tilopozo	102
Figura 4-54: Evaluación de tendencia de profundidad del nivel freático en pozo Tilopozo y comparación con nivel luego de prueba de bombeo. Línea segmentada verde indica profundidad aproximada luego de prueba de bombeo.....	102
Figura 4-55: Comparación entre cota piezométrica en pozo Tilopozo (media móvil de 12 meses) y caudal medio mensual de bombeo	103
Figura 4-56: Relación entre la cota piezométrica y el caudal bombeado en pozo Tilopozo. Comparación con caudal medio mensual en período 2001-2020 (superior) y con caudal medio diario en período 2016-2020 (inferior).....	104
Figura 4-57: Ubicación de puntos para análisis de variación de nivel en pozo Tilopozo	105
Figura 4-58: Variación de la media móvil (12 meses) de la cota piezométrica en el pozo Tilopozo y el pozo TPZ-2C. Período 2001-2020 (superior) y detalle para período 2011-2020 (inferior).....	107

Figura 4-59: Comparación entre la variación de media móvil de la cota piezométrica del pozo Tilopozo con los pozos TPZ-12 (superior) y PZ-9 (inferior). Período 2011-2020	108
Figura 4-60: Variación temporal de cota piezométrica en pozo Til-P03	109
Figura 4-61: Variación de la cota piezométrica en pozo MP-04A	109
Figura 4-62. Conductividad eléctrica (superior) y pH (inferior) en punto H (humedal TL2)	112
Figura 4-63. Profundidad del nivel freático (cm) en el entorno del humedal Tilopozo (2011-2014).....	113
Figura 4-64. Variación de Nivel Mínimo de Verano, en Comparación con Registros del Año 2000 en Pozos Someros Ubicados en el Entorno del Humedal Tilopozo	117
Figura 4-65. Variación de la Cota Piezométrica en Puntos de Medición Superficial en Humedal TL2. Datos Originales (Izquierda), Datos Ajustados de Reglilla Tilopozo (Derecha)	117
Figura 4-66. Variación de la Cota Piezométrica en Pozo Somero PZ-9.....	118
Figura 4-67. Variación de Cota Mínima Anual de Verano (superior) y Máxima Anual de Invierno (inferior) en Pozos TP-2, TPZ-3 y PZ-9, Respecto a Cota de Temporada 2008 – 2009, Respectivamente ..	119
Figura 4-68. Isopiezas en Humedal de Tilopozo. Años 2000 (azul), 2009 (rojo) y 2016 (negro). Se Destaca Retroceso de	120
Figura 5-1. Humedales Sector Tilopozo (Situación Base 1990 – 1994).....	122
Figura 5-2. Formaciones Vegetacionales en Humedales de Tilopozo	125
Figura 5-3. Riqueza y Cobertura de Especies en Humedal TL1 (Primavera 2017)	128
Figura 5-4. Riqueza y Cobertura de Especies en Humedal TL2 (Primavera 2017)	129
Figura 5-5. Riqueza y Cobertura de Especies en Humedal TL3 (Primavera 2017)	130
Figura 5-6. Riqueza y Cobertura de Especies en Humedales TL4 y TL5.....	131
Figura 5-7. Riqueza y Cobertura Histórica en Transectas T01 y T02 de MEL, Sector Tilopozo	135
Figura 5-8. Riqueza y Cobertura Histórica en Transectas T03 y T04 de MEL, Sector Tilopozo	136
Figura 5-9. Transectas Levantadas por Albemarle, Sector Humedales Tilopozo.....	137
Figura 5-10. Riqueza y Cobertura en Transectas Cercanas a Humedales de Tilopozo	138
Figura 5-11. Riqueza y Cobertura en Transectas Cercanas a Humedales de Tilopozo	139
Figura 5-12. Serie temporal de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en Humedal Tilopozo N°1	141
Figura 5-13. Serie temporal de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en Humedal Tilopozo N°2	141
Figura 5-14. Serie temporal de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en Humedal Tilopozo N°3	142

Figura 5-15. Serie temporal de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en Humedal Tilopozo N°4	142
Figura 5-16. Serie temporal de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en Humedal Tilopozo N°5	143
Figura 5-17. Serie de Tiempo NDVI 1990-2020 para Humedal 1, Zonas TL1_1, TL1_3 y TL1_5.....	144
Figura 5-18. Serie de Tiempo NDVI 1990-2020 para Humedal 2, Zonas TL2_1, TL2_3 y TL2_5.....	145
Figura 5-19. Serie de Tiempo NDVI 1990-2020 para Humedal 3, Zonas TL3_1, TL3_3 y TL3_5.....	146
Figura 5-20. Serie de Tiempo NDVI 1990-2020 para Humedal 4, Zona TL4_1.....	147
Figura 5-21. Serie de Tiempo NDVI 1990-2020 para Humedal 5, Zona TL5_1 y TL5_3	147
Figura 5-22. Variación temporal de NDVI en humedales TL1_5 (superior), TL2_5 (centro) y TL3_5 (inferior). Cuadrantes de color indican distintos periodos con diferentes tendencias observadas...	149
Figura 6-1. Componentes que determinan la presencia de los diferentes tipos de SVAHT.....	151
Figura 6-2. Comparación antes y después de incendio, Humedal Tilopozo N°3 (superior, 1990), Tilopozo N°2 (centro, 1994) y Tilopozo N°1 (inferior, 1995).....	154
Figura 6-3. Comparación antes y después de incendio, Humedal Tilopozo N°1 (superior, 1997), Tilopozo N°1 (centro, 1999) y Tilopozo N°2 (inferior, 2001).....	155
Figura 6-4. Comparación antes y después de incendio, Humedal Tilopozo N°1 (superior, 2002), Tilopozo N°2 (segunda, 2003) y Tilopozo N°1 (tercera, 2009 e inferior, 2017).....	156
Figura 6-5. Serie de tiempo NDVI para Humedales en Tilopozo TL1 (superior), TL2 (centro) y TL3 (inferior) y eventos asociados a incendios y/o quemas (líneas punteadas verticales).	158
Figura 6-6. Detalle de NDVI para evento de incendio septiembre año 2017, en Humedal Tilopozo N°1 (TL1).....	159
Figura 6-7. Detalle de NDVI para evento de incendio julio año 2001, en Humedal Tilopozo N°2 (TL2)..	159
Figura 6-8. Detalle de NDVI para evento de incendio año 1990 (junio), en Humedal Tilopozo N°3 (TL3).	160
Figura 6-9. Análisis de NDVI entre dos Quemadas Sucesivas en el Humedal TL1.....	161
Figura 6-10. Imagen RGB obtenida desde Dron a una altura de 500 m, septiembre 2017.	163
Figura 6-11. A) Avance subterráneo del incendio T19, B) Renovación general de la vegetación.....	163
Figura 6-12. Registro Fotográfico Transecta TL19, en Humedal TL1_5	166
Figura 6-13. Variación de cobertura y riqueza en transectos T19 y T29, período 2016-2020.....	169
Figura 6-14. Riqueza y Cobertura Histórica en Transectas T01 y T02 de MEL, Sector Tilopozo	170
Figura 6-15. Formaciones vegetacionales del humedal de Tilopozo (superior) y profundidad del nivel freático (cm) en el entorno del humedal Tilopozo para período 2011-2014 (inferior).....	173

Figura 6-16. Cobertura y Altura Media de Distintas Especies del Sector Tilopozo, en Función de la Profundidad del Nivel Freático (registros de 2011-2012).....	174
Figura 6-17. Variación temporal de NDVI en humedales TL1_5 (primera), TL2_5 (segunda) y TL3_5 (tercera) y precipitación anual en estación Rockwood (datos de 1990-1996 de estación Chaxa) (cuarta). Flechas negras en gráficos de NDVI identifican la fecha de ocurrencia de incendios, cuadrantes de color indican distintos periodos con diferentes tendencias observadas	177
Figura 6-18. Relación entre NDVI en TL1_5 y nivel freático en pozos TPZ-4 y TPZ-12. Flechas indicar quemas.....	180
Figura 6-19. Relación entre NDVI en TL2_5 y nivel freático en pozos TPZ-2, TPZ-2C y TPZ-3.....	182
Figura 6-20. Relación entre NDVI en TL2_5 y nivel freático en pozos Tilopozo y TPZ-4	184
Figura 6-21. Relación entre NDVI en TL2_5 y nivel freático en pozos TPZ-8, TPZ-12.....	185
Figura 6-22. Relación entre NDVI máximo anual y nivel de invierno en TL2_5, considerando desfase de 2 años entre variables. Pozos TP-2 (superior), TPZ-2C y TPZ-3 (medio), TPZ-12 y TPZ-8 (inferior)	187
Figura 6-23. Relación entre NDVI en TL3_5 y profundidad del nivel freático en pozos TPZ-8, TPZ-2C y PZ-9.....	189

TABLAS

Tabla 2-1: Principales Documentos Analizados	14
Tabla 4-1 Información utilizada para análisis de piezometría, período junio - septiembre de 2009	43
Tabla 4-2 Multipiezómetros utilizados para caracterizar flujos verticales y resultados del análisis	49
Tabla 4-3 Registros considerados para caracterización de calidad de agua.....	56
Tabla 4-4 Valores medios de precipitación anual en el entorno del Salar de Atacama	60
Tabla 4-6 Puntos de análisis de variación de profundidad del nivel freático	85
Tabla 4-7 Profundidad media del nivel freático en puntos ubicados en el entorno del Sector humedal de Tilopozo	114
Tabla 5-1 Codificación de Humedales y Zonas de NDVI.....	122
Tabla 5-2 Unidades Vegetacionales en Humedales de Tilopozo, año 2020	126
Tabla 5-3 Características principales de algunas especies en Tilopozo	132
Tabla 6-1 Resumen de incendios identificados en Humedal Tilopozo entre 1990 y 2020	153

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1: Informe Teledetección Satelital NDVI Humedal Tilopozo

1 INTRODUCCIÓN

Albemarle Limitada¹, en adelante “Albemarle”, es una de las empresas que extrae salmuera desde el Salar de Atacama. Actualmente, se encuentra en la fase de operación del Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama” (en adelante el “Proyecto”), el cual fue calificado favorablemente, a través de la Resolución de Calificación Ambiental N° 21 de la Comisión de Evaluación Ambiental de la Región de Antofagasta, de fecha 20 de enero del 2016, en adelante RCA N° 21/2016. Además de la extracción de salmuera desde el núcleo del Salar, Albemarle también extrae agua desde pozos de agua dulce/salobre para uso industrial, ubicados hacia la zona sureste del Salar. Estos pozos son Tucúcaro, Peine y Tilopozo, en donde este último, está situado en la denominada zona de Humedales de Tilopozo.

Albemarle, ha adquirido como parte de sus compromisos ambientales y con la comunidad, una operación que permita resguardar los sistemas sensibles que coexisten en la zona marginal del Salar de Atacama y también sus zonas de alimentación. Para lo anterior, Albemarle asumió el compromiso de mantener un Plan de Alerta Temprana, que permite resguardar los sistemas sensibles, que en la zona sur del Salar corresponden a los Sistemas Lagunares de La Punta-La Brava y Peine, haciendo el seguimiento tanto de los niveles de agua, como del comportamiento de los sistemas lagunares presentes y que dependen en alto grado del acuífero Monturaqui – Negrillar - Tilopozo.

Junto con Albemarle y extrayendo salmuera desde el núcleo del Salar, se encuentra **SQM**, el cual a su vez también extrae aguas dulce/salobre, pero en pozos² ubicados hacia el este del Salar, en las zonas de Soncor y Aguas de Quelana. En la Figura 1-1 se puede ver la ubicación del proyecto Albemarle junto con los demás usuarios de la cuenca y del Salar.

Hacia el sur de la cuenca del Salar de Atacama, se encuentran Minera Escondida Limitada, en adelante **MEL**³; y Compañía Minera Zaldívar, en adelante **CMZ**, los cuales poseen pozos de extracción de agua de uso industrial, para sus respectivas faenas mineras, desde el acuífero denominado Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (en adelante acuífero MNT). Dicho acuífero presenta una dirección de flujo subterráneo en sentido sur-norte, es decir, hacia la zona de vegas de Tilopozo y la extracción de agua subterránea desde el campo de pozos MNT, se ubica a unos 50 km al sur del Salar de Atacama. La autorización ambiental de MEL para explotar el acuífero de MNT se refiere a un periodo de 21 años, el cual finalizó en diciembre del año 2019. Respecto de los pozos de extracción de CMZ, ubicados también al sur del Salar en el mismo acuífero MNT, siguen vigentes y con autorización ambiental. La ubicación de los distintos Titulares señalados se presenta en Figura 1-1. En dicha figura, no se muestra la zona de extracción ubicada en el borde este del Salar de Atacama, correspondiente a 10 pozos de SQM con derechos de aprovechamiento aguas por un caudal máximo de 450 l/s, ya que estos no han sido considerados en el presente análisis.

El pasado 30 de julio del 2020, la Superintendencia de Medio Ambiente (**SMA**) a través de las **Resolución Exenta N°1 ROL D-099-2020, formuló cargos a MEL** por descensos provocados más allá del límite

¹ Rockwood Litio Limitada a partir del día 01 de noviembre de 2017 modificó su razón social a “Albemarle Limitada”.

² En el Salar de Atacama, SQM extrae aguas para uso industrial desde 5 puntos de captación, los cuales están autorizados ambientalmente para utilizar un caudal de hasta 240 L/s. Los pozos mencionados corresponden a: CA-2015 (35 L/s), Socaire 5 (65 L/s), Camar 2 (60 L/s), Allana (40 L/s) y Mullay 1 (40 L/s). Ref: (<https://www.sqmsenlinea.com>)

³ Minera Escondida, MEL, es titular, entre otros, de los siguientes proyectos: “Lixiviación de Óxidos de Cobre y Aumento de la Capacidad de Tratamiento de Mineral sulfurado”, RCA N° 1/1997; “Lixiviación de Sulfuros Minera Escondida”, RCA N° 136/2003; y “Suministro Complementario de agua desalinizada para MEL”, RCA N° 205/2009.

indicado en su **Plan de Alerta Temprana (PAT) para “Sector de Tilopozo”**, los cuales habrían disminuido más de 25 cm. en dicho sector, superándose con ello la disminución máxima aceptable del nivel freático que podrían soportar los sistemas vegetacionales, de acuerdo a lo señalado en la evaluación ambiental de MEL en el EIA “Lixiviación de Óxidos de Cobre y Aumento de la Capacidad de Tratamiento de Mineral Sulfurado” (RCA N° 1/1997). De acuerdo a lo informado⁴ por la Dirección General de Aguas (DGA) a la SMA, el umbral de 25 cm vendría siendo superado desde el año 2005.

Teniendo a la vista la evaluación ambiental del EIA de MEL, RCA N°1/1997, y del PAT del mismo titular, es importante señalar que, si bien se establece un umbral máximo de disminución de nivel freático, no queda definido, en ninguno de dichos antecedentes, de manera explícita ni puntual, en dónde deben constatar dichos descensos, quedando acotado sólo al “*sector de Tilopozo*”. Si se consideran las condiciones en las que queda establecido el PAT de MEL, se tiene que el objeto de protección son los humedales y los sistemas vegetacionales de Tilopozo.

Producto de la sanción a MEL, la SMA efectuó un riguroso análisis de la información en la zona, solicitando a la DGA un análisis actualizado de las variables hídricas, en donde se concluye que los descensos habrían aumentado respecto a lo que fue informado previamente en el año 2018. Junto con ello, respecto de la componente vegetación, la SMA efectuó un análisis de imágenes satelitales con la finalidad de diagnosticar el estado y evolución de los sistemas vegetacionales en el “Sector de Tilopozo”, en donde los resultados del análisis arrojaron una disminución del Índice NDVI, indicando una merma en el vigor y/o cobertura de la vegetación. Además de lo anterior, la SMA habría determinado una pérdida total de 2,88 hectáreas de vegetación, lo que representa el 3% del área de 94,68 hectáreas al año 1995. De igual manera, se identificaron transiciones de superficies de mayor a menor vigor o a sectores sin vegetación, pudiendo cuantificarse un total de 24,57 hectáreas que han sufrido algún cambio hacia una disminución de su vigor y/o cobertura, lo que equivale a un 26% de la superficie total al año 1995 (*Ref. numeral 13 y 14 de Res SMA EX N1/ ROL D-099-2020*).

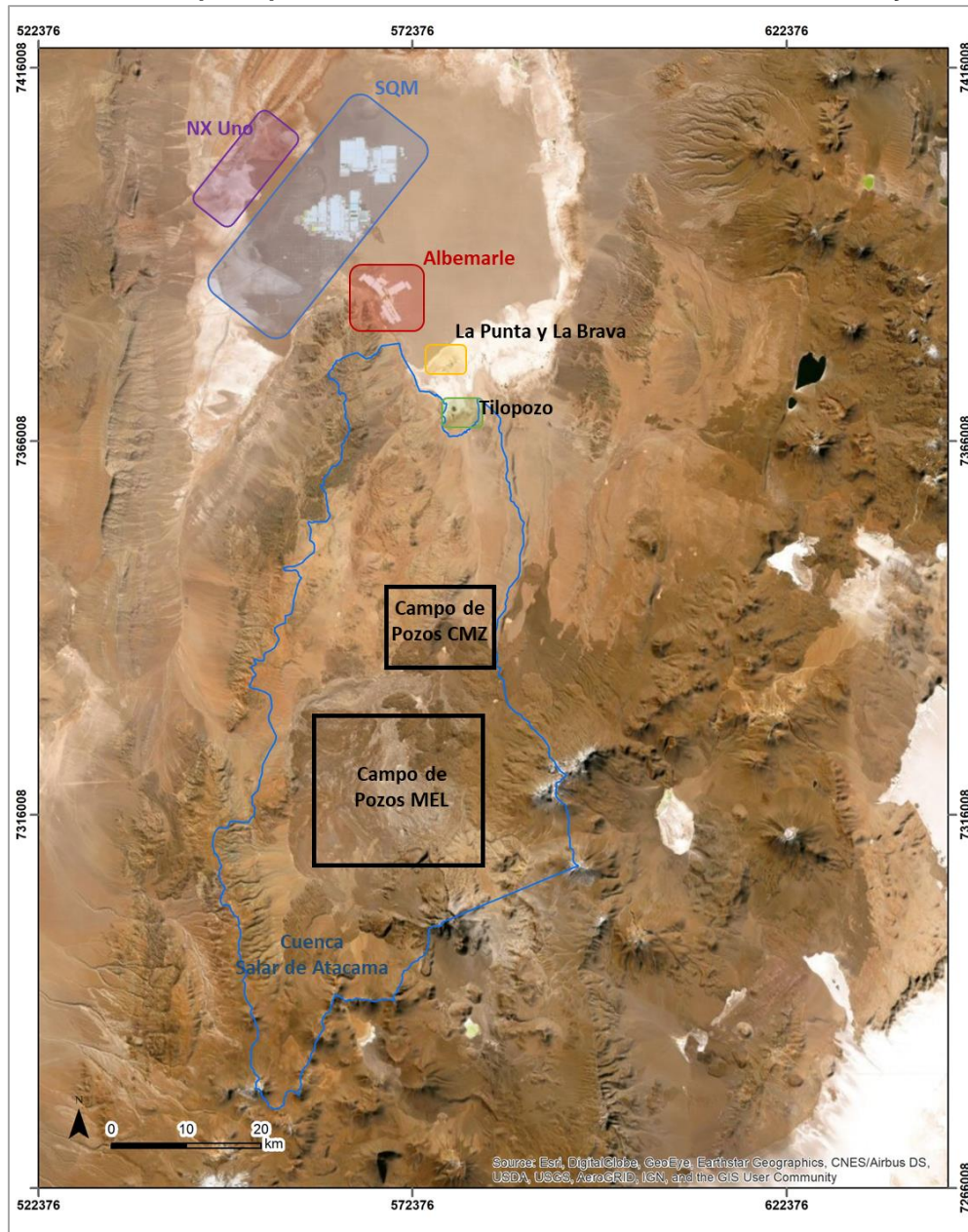
Del análisis de las variables ambientales relevantes, la SMA concluyó que fue posible constatar que los niveles de agua subterránea han experimentado un descenso sostenido en el tiempo desde el inicio de los bombeos de MEL, lo que habría gatillado en el tiempo una disminución de la cobertura y vigor de la vegetación presente en el “Sector de Tilopozo”. Lo anterior, sería consecuencia de la disminución de los flujos aportantes desde el sur hacia la zona de Tilopozo.

Teniendo en cuenta la importancia de los Sistemas Vegetaciones Azonales Hídricos Terrestres (SVAHT) como objetos de protección, y enfocado en la preservación de dichos sistemas en el Salar de Atacama, considerando además los antecedentes antes expuestos y las consecuencias que pudiese traer para los SVAHT en el sector de Tilopozo (producto de la disminución de niveles en el acuífero y disminuciones en los flujos subterráneos de entrada que alimentan dichos sistemas) sumado a la explotación propia en la zona, es que Albemarle se ha planteado el estudiar más localmente dicho sector, tanto con datos propios, que ha ido generando en su Plan de Seguimiento Hídrico (PSAH) y Plan de Manejo Biótico (PMB) a través de los años, como de terceros y compilados e integrados para fines del presente análisis, de manera tal de analizar desde el punto de vista hidrogeológico y vegetacional, la evolución de los SVATH en Tilopozo en relación con las variables hídricas que sustentan dicho sistema.

⁴ Memorando N° 253 de la División Legal de la DGA, de fecha 12 de septiembre de 2018.

Es por lo anterior que Albemarle solicitó a HIDROMAS analizar técnicamente la evolución de las componentes hídricas y bióticas del sector Tilopozo, particularmente el humedal Tilopozo, en el marco del proceso de Sanción que la SMA levantó en contra de MEL. En particular se solicitó analizar este sistema con una visión hídrica y biótica, en el marco del bombeo que Albemarle realiza en el sector, mediante el pozo de bombeo de Tilopozo.

Figura 1-1: Ubicación principales usuarios en la Cuenca del Salar de Atacama y su Entorno.



1.1 Objetivo

El presente informe tiene por objetivo analizar la evolución de la vegetación del sector del humedal Tilopozo, en función de las forzantes hídricas que determinan su existencia. Como objetivos específicos se pueden considerar:

- Analizar la dinámica temporal y espacial de los recursos hídricos que sustentan los humedales de Tilopozo, en función de sus principales forzantes o variables relacionadas.
- Delimitar los humedales del sector Tilopozo en su condición natural, y clasificarlos de acuerdo a distintos sectores de NDVI siguiendo la metodología de teledetección implementada por la SMA para definir los SVAHT de interés (SMA, 2020b).
- Analizar la dinámica temporal y espacial de la vegetación en el sector de Tilopozo, utilizando información de campo, así como teledetección.
- Analizar la relación entre la dinámica temporal de la vegetación del sector Tilopozo y las principales forzantes identificadas.

1.2 Área de Estudio

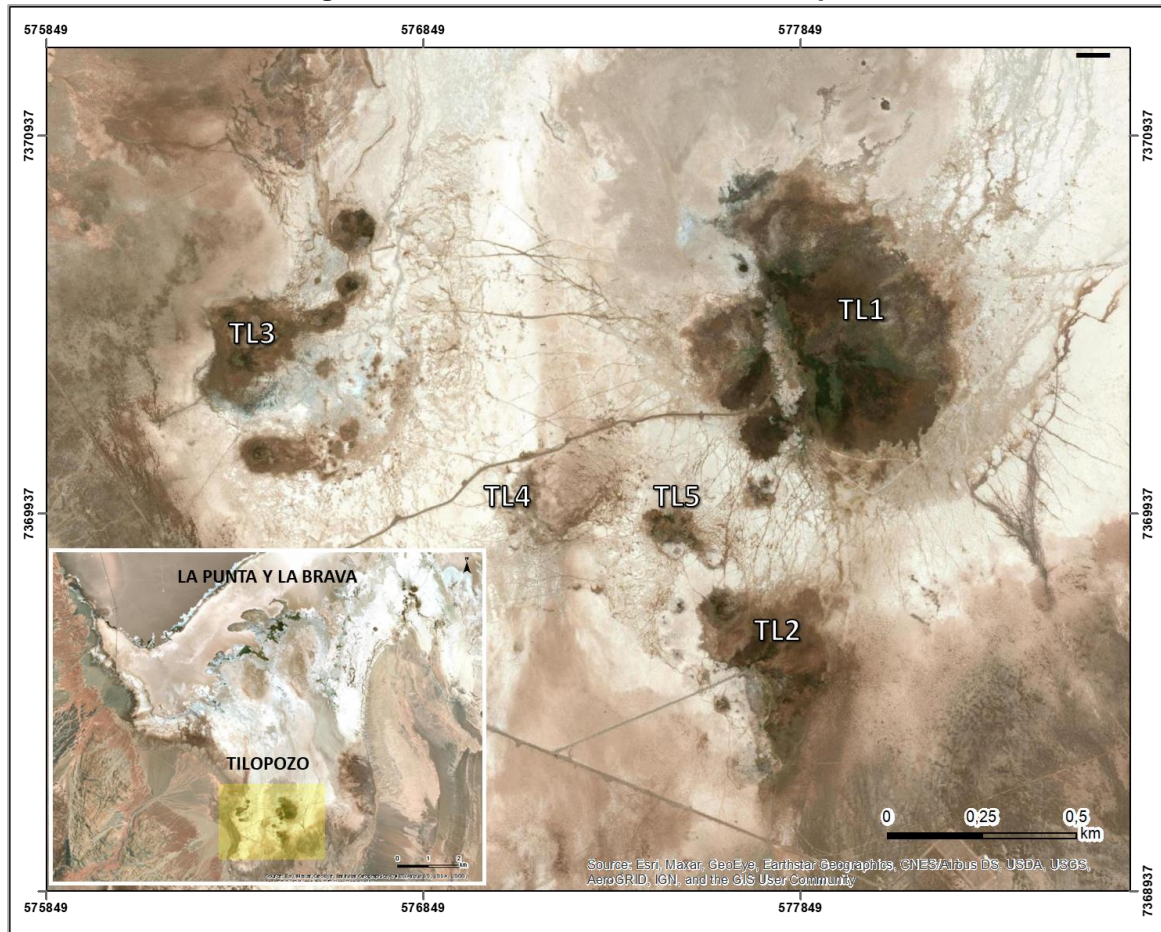
Para la elaboración del presente estudio, se tiene en primer lugar un área de contexto regional y otra, más acotada, para el análisis local.

En la escala regional o macro, para analizar integralmente el comportamiento hídrico, se ha considerado el área que se muestra en la Figura 1-1, que abarca tanto la zona del núcleo del salar como la cuenca sur aportante a la zona de Tilopozo. Para esta área se han recopilado los antecedentes necesarios, de los diferentes actores involucrados, que son útiles para el análisis que se presenta.

A nivel local, el área de estudio corresponde al sector Tilopozo, ubicado en el margen sur del Salar de Atacama, aproximadamente 5 km al sur este de las lagunas La Punta y La Brava. Específicamente, el análisis de este estudio se centra en el comportamiento hídrico y biótico del humedal Tilopozo, cuya área se muestra en la Figura 1-2.

De acuerdo al Inventario Nacional de Humedales, elaborado por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) en el año 2015, en el humedal de Tilopozo se pueden identificar cinco humedales individuales denominados TL1, TL2, TL3, TL4 y TL5. Cabe señalar que durante el desarrollo del presente estudio dicho Inventario fue actualizado, cambiando la fisonomía del humedal de Tilopozo. Para efectos del presente estudio, y en consecuencia con la información base utilizada por la SMA (2020b), se ha considerado el Inventario del año 2015.

Figura 1-2: Área de Estudio Humedal Tilopozo



Fuente: Elaboración propia

2 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del estudio, se consideraron las siguientes actividades.

2.1 Revisión de Antecedentes

En el contexto del área regional de estudio, se recopiló información de antecedentes requeridos para la caracterización de las principales variables hídricas y bióticas (vegetación) en el Sector Tilopozo, considerando información tanto de Albemarle, como de todos los Titulares que tienen relación con las extracciones en la zona: MEL, Zaldívar y SQM. Para esta tarea, se consideraron todos los antecedentes más actualizados presentados al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), todo lo de carácter público.

Adicionalmente, se revisaron los modelos conceptuales hidrogeológicos que han sido elaborados a través del tiempo por los diferentes titulares en la cuenca en el área de estudio, así como también los compromisos ambientales de cada uno de ellos.

Dentro de los antecedentes considerados, se tiene en particular los que forman parte del proceso de sanción de MEL. En la Tabla 2-1 se listan todos los documentos que se tuvieron a la vista y la referencia que se hará de ellos en el presente documento.

Además, se ha utilizado como referencia información generada por Albemarle, de carácter pública que ha sido entregada a la autoridad ambiental en el marco de los compromisos establecidos en el proceso de evaluación ambiental que culmina con la RCA favorable N°21/2016.

Tabla 2-1: Principales Documentos Analizados

Referencia	Antecedentes Recopilados y Revisados
ALB –Cedrem, 2020	Plan de Seguimiento Ambiental Biótico – PMB. Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama RCA N°21/2016”.
ALB- Cedrem, 2017.	Diagnóstico Área Afectada por Incendio, Sector de Tilopozo, en el contexto del “Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Preparado por CEDREM para Albemarle. 2017.
ALB-HIDROMAS, 2020a	Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama. Informe Anual N° 4, período Enero – Diciembre 2019. Estudio realizado por HIDROMAS para Albemarle.
ALB-HIDROMAS, 2020b	Determinación de Evapotranspiración en Salar de Atacama, Campaña de Diciembre de 2019. Proyecto PSAH-2019. Minuta #1/2020. Estudio realizado por HIDROMAS para Albemarle.
ALB-SGA, 2019.	Primera Actualización del Modelo de Flujo de Agua Subterránea en el Salar de Atacama Según RCA 21/2016. Informe de Actualización a Septiembre de 2018. Estudio realizado por SGA para Albemarle
CEA, 2017.	Modelo de Respuesta Vegetacional. Anexo IV.2, Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Monturaqui. Preparado para Minera Escondida Limitada.
CEA, 2012.	Caracterización de la Vegetación y Análisis de su Relación con el Medio Físico, Sector Sur del Salar de Atacama – Sector Tilopozo. Anexo B, del Anexo IV.2: Modelo de Respuesta Vegetacional, Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Monturaqui. Preparado para Minera Escondida Limitada.

Referencia	Antecedentes Recopilados y Revisados
CMZ-GAC, 2019	Estudio de Impacto Ambiental Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar. Adenda 1. Estudio realizado por GAC para Compañía Minera Zaldívar (CMZ).
CMZ-SGA, 2018.	Estudio de Impacto Ambiental Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar. Estudio realizado por SGA para Compañía Minera Zaldívar, 2018. Líneas de Base Hidrogeología y Calidad de Aguas Subterráneas.
DGA-Hidromas 2014.	Informe “Diagnostico y Sistematización de información de Planes de Alerta Temprana Vigentes con condicionamiento de derechos”. Informe Final Volumen I y Anexos. S.I.T. N°336, DGA-HIDROMAS CEF.Ltda. Abril 2014.
DGA, 2001.	Resolución DGA N° 1972/2001. Plan de Alerta Temprana para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, II Región, Antofagasta. DGA julio 2001
HIDROMAS 2017.	Informe Técnico: “Análisis de Zona de Prohibición para acuífero Monturaqui Negrillar Tilopozo”. Albemarle – Hidromas 2017. Documento Interno preparado por HIDROMAS para Albemarle.
MEL 2020.	Informe Anual Monitoreo Ambiental EIA Lixiviación Óxidos de Cobre y Aumento de la Capacidad de Tratamiento de Mineral Sulfurado. Período Año 2019. Año 2020.
MEL-Golder 2017.	Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Monturaqui. Estudio realizado por Golder Associates para Minera Escondida Limitada, 2017. Línea de Base Hidrogeología, Calidad de Agua Superficial, Calidad de Agua Subterránea. Evaluación de Impactos. Capítulo 4, Anexo IV.1. Modelo Hidrogeológico Acuífero de MNT.
MEL-CEA 1996.	Informe: “Estudio de la Respuesta al Stress Hídrico de las Plantas del Sector Sur del Salar de Atacama”. Minera Escondida – Centro de Ecología Aplicada (CEA), Septiembre 1996.
MMA-CEA, 2015	Inventario Nacional de Humedales. Ministerio del Medio Ambiente, 2015.
MMA-EDÁFICA, 2020	Inventario Nacional de Humedales. Ministerio del Medio Ambiente, 2020.
RWL-SGA, 2015.	Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama, Adenda 5, Anexo 1. Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama. Estudio realizado por SGA para Rockwood Lithium, 2015.
SCL-GAC, 2009.	Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama, Adenda 2. Trabajo realizado por GAC para SCL
SMA, 2015.	Informe de Fiscalización Ambiental al Proyecto Minero Refugio, en el año 2015 (DFZ-2015-8-III-RCA-IA)
SMA, 2020b	Informe Técnico de Fiscalización Ambiental DFZ-2019-309-II-RCA. Fiscalización Ambiental Minera Escondida. Superintendencia del Medio Ambiente, abril de 2020.
SQM, 2020	Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama. Líneas de Base de Hidrogeología y calidad de aguas.
SMA, 2020a	Res. Ex. 1312/2020. Requiere Información que Indica e Instruye la Forma y el Modo de Presentación de los Antecedentes Solicitados a Albemarle Ltda.

Fuente: Elaboración propia

2.2 Sistematización de la Información

Con la información recopilada se generaron archivos con los datos compilados en planillas de cálculo en Microsoft Excel, en particular aquella de terceros, tales como registros de profundidad de nivel freático y/o cota piezométrica y de calidad de agua medidos en punto de monitoreo de MEL, SQM y CMZ, ubicados en el área de estudio, además de toda la información de Albemarle que en el marco del PSAH ya se encuentra sistematizada. También fueron elaborados archivos en formato shape para algunas de las variables analizadas, las cuales se trabajaron en Sistema de Información Geográfica (SIG). Toda la cartografía trabajada se encuentra en coordenadas UTM, Datum WGS84, H19S.

2.3 Análisis de Teledetección

A la par con la sistematización de la información, se realizó un análisis de la evolución de la vegetación en el humedal de Tilopozo, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat, de 30 m de resolución espacial, para el período 1990 a 2020. con el objetivo de obtener una serie de tiempo del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI por su sigla en inglés).

Para abordar el análisis de teledetección, se adoptó un enfoque similar al indicado en el Reporte Humedal Tilopozo (SMA, 2020b), con el fin de obtener resultados que pudiesen ser comparables cuantitativamente con dicho informe. El objetivo principal de esta actividad fue generar series de tiempo del índice normalizado de vegetación NDVI en las áreas de interés del humedal Tilopozo, y de esa forma, poder evaluar su tendencia temporal dentro del período de análisis (1990-2020). El detalle de la metodología utilizada para este análisis se presenta en el Anexo 1 de este informe.

2.4 Análisis Variables Hídricas

A la par con el análisis de teledetección, se desarrolló un análisis de diversas variables hídricas, con el fin de (1) describir el funcionamiento hidrogeológico del área de estudio, en particular de la Zona Marginal del borde sur del Salar de Atacama, dentro de la que se ubica el humedal de Tilopozo; (2) caracterizar y analizar el efecto sobre el nivel freático de las principales forzantes del acuífero dulce/salobre que sustenta el humedal de Tilopozo; y (3) analizar el funcionamiento hídrico del sector humedal de Tilopozo, considerando su evolución en el tiempo.

Para lo anterior, se consideró diversa información relevante del área de estudio, en particular los estudios de línea de base y los modelos hidrogeológicos de los Estudios de Impacto Ambiental de: Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (Adenda 5, Rockwood Lithium, 2015); Proyecto Monturaqui (MEL, 2017), Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar, línea de base hidrogeología y calidad de aguas subterráneas (CMZ, 2018); y Estudio de Impacto Ambiental Proyecto “Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental”, Salar de Atacama (SQM, 2020), incluyendo las bases de datos de nivel y calidad de agua asociadas a dichos proyectos. Dicha información ha sido complementada con los registros reportados por Albemarle en su Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH)

Entre los análisis desarrollados, se generaron mapas piezométricos y series de tiempo de variación de la cota piezométrica, para el análisis del flujo subterráneo horizontal y los efectos sobre éste de las extracciones desde el acuífero dulce/salobre y de salmuera y los de forzantes meteorológicas como la precipitación y la evapotranspiración. También se obtuvieron mapas de zonas de surgencia e infiltración para la caracterización del flujo subterráneo vertical, análisis de la ubicación de la interfase salina y su evolución temporal y mapas de distribución espacial de la conductividad eléctrica del acuífero dulce/salobre.

Adicionalmente, para el caso particular del análisis de la evolución del nivel freático en el humedal de Tilopozo, se realizó una descripción y un análisis de la prueba de bombeo del pozo Tilopozo, realizada en el marco de la Adenda 5 del EIA Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (Rockwood Lithium – SGA, 2015), de sus resultados y de la evolución temporal de los niveles de este pozo y del pozo de observación asociado al bombeo.

2.5 Análisis de la Vegetación

Respecto a la vegetación, se analizó su condición actual y su evolución histórica. Respecto a su condición actual, se utilizó la Carta de Ocupación de Tierras (COT) actualizada al año 2020, elaborada por Cedrem Consultores para Albemarle, en el marco del Plan de Manejo Biótico (PMB) contemplado en la RCA N°21/2016, donde se definen las formaciones vegetacionales que permiten caracterizar a los humedales de Tilopozo. También se utilizó información de transectas levantadas en el marco del PMB por Albemarle, y transectas realizadas por MEL.

En cuanto a la evolución histórica de la vegetación, se analizó su riqueza, cobertura y también su vigor, mediante el cálculo y análisis del NDVI. La información utilizada corresponde a transectas señaladas previamente, así como imágenes satelitales del programa Landsat, disponibles gratuitamente.

Es importante tener presente que, aunque la cobertura y el NDVI pueden ser utilizados como indicadores de la evolución de la vegetación, estos no son términos equivalentes, ya que la primera indica la extensión espacial, sin hacer distinción de su estado (vigor). mientras que la segunda, es un reflejo de su vigor

2.6 Análisis de Variables Forzantes y su Relación con la Vegetación

En base a los antecedentes disponibles, se analizó el comportamiento de las principales variables externas que se relacionan con el estado de vegetación y su evolución (o forzantes de la vegetación), y la respuesta de la misma frente a ellas, entendiendo por éstas a los principales elementos/acciones externos a la vegetación, que influyen o pueden condicionar su estado y desarrollo, considerando tanto los asociados a actividades antrópicas, como los “naturales” (sin influencia antrópica). Al respecto, se desarrollaron análisis comparativos e integrados entre el nivel freático en distintos pozos, precipitación histórica, índice NDVI de los humedales y ocurrencia de quemadas de humedales.

2.7 Discusión y Recomendaciones

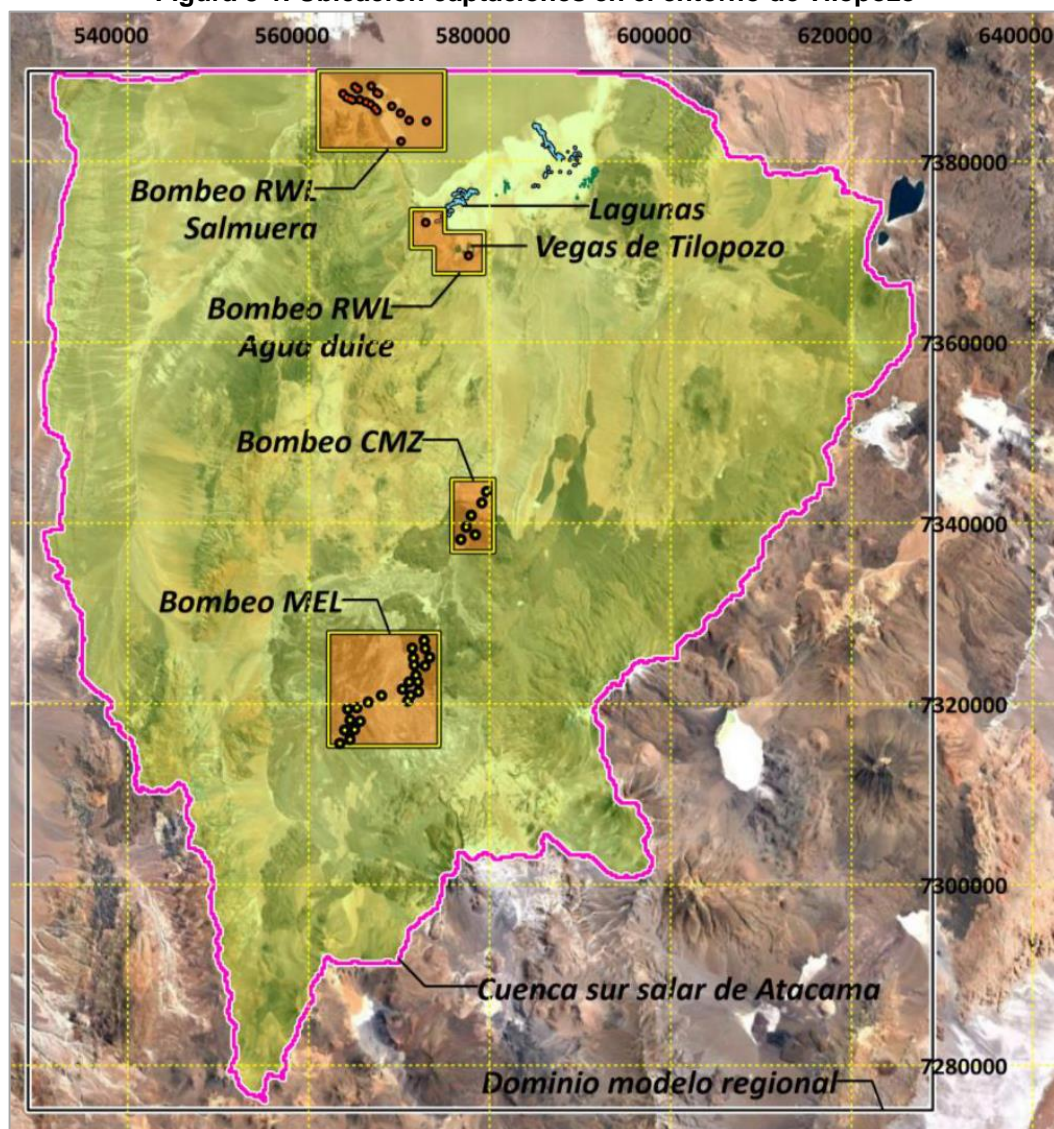
Finalmente se presenta el capítulo Discusión, el cual contiene las principales conclusiones de los análisis realizados, y relacionado directamente con los objetivos del estudio.

Adicionalmente, se identifican las brechas de información existentes para mejorar el entendimiento del comportamiento de la vegetación en el humedal de Tilopozo, en función de sus principales agentes forzantes, y se realizan recomendaciones al respecto.

3 ANTECEDENTES GENERALES / HISTORIA DE LOS BOMBEO

Como fue mencionado, existen diversas operaciones mineras en el entorno del área de estudio, que extraen agua dulce/salobre y/o salmuera, extracciones que podrían generar efectos en el nivel de agua en el Sector Tilopozo (tema que se discute en detalle en el Capítulo 4 del presente). Los bombeos de agua dulce/salobre se distribuyen en el Sector Tilopozo (Albemarle) y al sur del mismo, en los sectores de Monturaqui (MEL) y Negrillar (CMZ), todos del acuífero MNT, mientras que el bombeo de salmuera lo desarrollan las empresas Albemarle y SQM, ubicándose las extracciones en el Sector del Núcleo del Salar de Atacama. En la Figura 3-1 se presenta la ubicación espacial de captaciones en el entorno al sector de Tilopozo, incluyendo parte del área de extracción de salmuera de ALB. En el acápite 3.2 se da cuenta de la extracción de salmuera en el núcleo y se presentan las áreas de extracción de ALB y SQM, en donde SQM reinyecta una fracción del volumen total de salmuera que es extraído.

Figura 3-1. Ubicación captaciones en el entorno de Tilopozo



Fuente: SGA, 2018.

Albemarle inició operaciones en el Salar de Atacama en el año 1983, con su extracción de salmuera en ciertas áreas⁵ aprobadas en el núcleo del Salar (A1 y A2). De acuerdo a la RCA N° 21/2016, inició la fase de operación del proyecto EIA “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama” en septiembre de 2016⁶ y como parte de sus compromisos ambientales, aplicables a las Fases de Operación y Cierre del Proyecto, mantiene y lleva a cabo: (1) un Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH); (2) un Plan de Manejo Biótico (PMB); y (3) un Plan de Alerta Temprana (PAT). Dichos Planes tienen como principal objetivo, ser una herramienta de gestión para monitorear en forma periódica la componente hídrica y la componente biótica en ciertas zonas de la cuenca del Salar de Atacama en cuanto a sus variables físico-químicas y bióticas, e ir verificando en el tiempo el comportamiento previsto de las variables medidas.

En las zonas de acuíferos hacia el sur o sectores de agua dulce/salobre, el inicio de la explotación fue más tardía y actualmente cuenta con 3 pozos de bombeo, específicamente los pozos de: Tilopozo⁷, que inició la extracción en el año 1997; Tucúcaro⁸ en el año 2002 (donde cada uno de ellos tiene la aprobación ambiental para el ejercicio de sus derechos por un máximo de 16,9 L/s entre ambos pozos); y el pozo Peine⁹ que inició su extracción en el año 2013. En la actualidad, de acuerdo a información proporcionada por Albemarle, la extracción que se realiza es menor a lo aprobado ambientalmente, registrándose para el año 2019 caudales promedio de extracción de 5 L/s para Tilopozo, 2 L/s para Tucúcaro y 0,04 L/s para el pozo Peine (*Ref. Informe PSAH N°4_marzo 2020, Tabla 5-59 Caudales bombeados y reportados a la SMA*).

Los dos grandes usuarios de extracciones de agua desde el acuífero Monturaqui – Negrillar - Tilopozo (MNT) corresponden a Compañía Minera Zaldívar (CMZ) y Compañía Minera Escondida (MEL), los que si bien no poseen extracciones en la zona del borde sur del Salar, sí han bombeado desde el acuífero MNT, desde el año 1995 y 1998, respectivamente. Cabe señalar que la aprobación ambiental de la extracción de agua desde el acuífero MNT por parte de MEL concluyó el año 2019.

En el sector de Tilopozo, tiene lugar el Sistema Vegetacional Azonal Hídrico Terrestre (SVAHT) “Humedal de Tilopozo”, el cual ha sido motivo de estudio, seguimiento y protección tanto en el ámbito del SEIA como a nivel sectorial (DGA). De acuerdo a MEL, en el proyecto "Lixiviación de Óxidos de Cobre y Aumento de la Capacidad de Tratamiento de Mineral de Sulfurado", sometido a evaluación ambiental en el año 1996 y aprobado ambientalmente mediante RCA N°001/1997, la estabilidad de la flora y fauna en Tilopozo depende de la profundidad del nivel freático, el que a su vez está condicionado por el flujo de aguas subterráneas que entra al sistema desde el acuífero Monturaqui – Negrillar y que tanto el nivel salino en el Salar de Atacama como la cantidad de agua que entra al sistema Tilopozo depende del flujo pasante a través del acuífero. El modelo conceptual que postuló MEL en su EIA ha sido incorporado en este informe, siendo presentado en la Figura 3-2. Dicho modelo conceptual, es consistente con el modelo conceptual que ha presentado Albemarle en sus evaluaciones ambientales.

⁵ Áreas A1 y A2: la cantidad total de pozos bombeados anualmente es variable y dinámica debido a que los pozos a bombear van cambiando por razones operacionales, respetando el caudal total de bombeo aprobado ambientalmente, para cada una de las áreas, RCA N°21/2016.

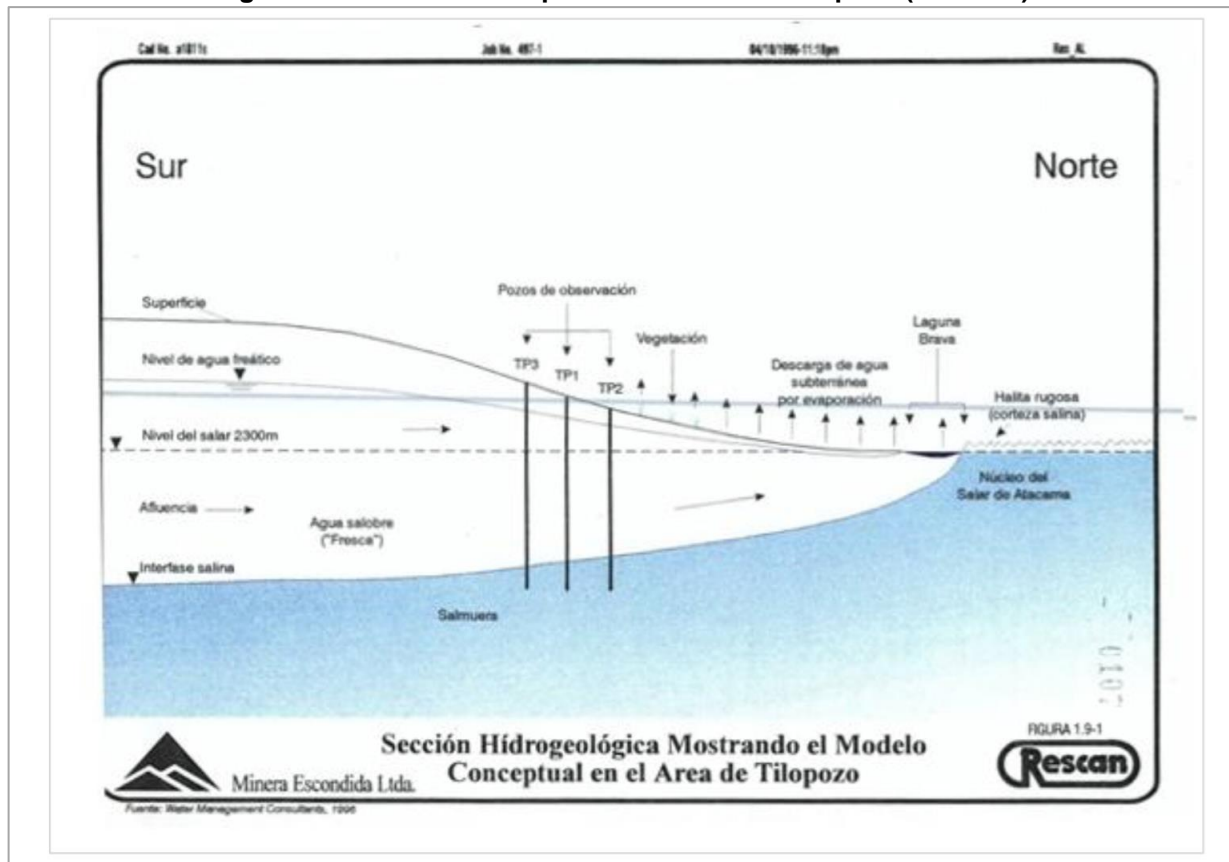
⁶ El inicio de la fase de operación fue informado con una semana de anticipación a la SMA con Carta MA 012.2016, recepcionada con fecha 21.09.2016, SMA Cod.50067.

⁷ Tilopozo: Conforme a R.E. N°316/1983 DGA, permite aprovechamiento de aguas por 8,5 L/s.

⁸ Tucúcaro: Conforme a R.E. N°453/1996 DGA, permite aprovechamiento de aguas por 10 L/s.

⁹ Pozo Peine: Conforme a R.E. N° 584/2000 DGA, permite aprovechamiento de aguas por 5 L/s.

Figura 3-2: Modelo Conceptual del Sector de Tilopozo (EIA MEL)



Fuente: MEL, 1996.

A nivel sectorial, la Dirección General de Aguas (DGA) al momento de aprobar los derechos de aprovechamiento de aguas en los pozos de MEL, en el acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, los dejó condicionados a un Plan de Alerta Temprana (PAT) que denominó PAT-MNT, el cual está directamente relacionado con la protección de las vegas de Tilopozo y con la prevención de efectos sobre dichos sistemas, producto de los bombeos. Dicho Plan fue sancionado administrativamente mediante la Resolución DGA N° 1972 del 23 de Julio de 2001. Al respecto, cabe señalar que las bases del plan de monitoreo asociado a este PAT se remontan al informe "Estudio de la Respuesta al Stress Hídrico de las Planas del Sector Sur del Salar de Atacama" (MEL – CEA, 1996), desarrollado en el contexto del proyecto "Lixiviación de Óxidos de Cobre y Aumento de la Capacidad de Tratamiento de Mineral de Sulfurado". En este informe se estudió la profundidad máxima a la que se extendían las raíces de las distintas especies de flora presentes en la zona de Tilopozo, concluyendo que las plantas podían soportar una disminución en el nivel freático de alrededor 25 cm, sin que esto implicara extinción local de las poblaciones.

En el sector de Negrillar del acuífero MNT (al sur de Tilopozo) se encuentra la extracción de Compañía Minera Zaldívar (CMZ), con 6 pozos de extracción. Considerando que la explotación de CMZ sería de hasta 400 L/s desde Negrillar y la de MEL de hasta 1400 L/s desde Monturaqui, surgieron condiciones de operación impuestas en la evaluación ambiental de MEL (RCA N°001/1997), de un bombeo máximo, conjunto entre MEL y CMZ, de 1800 L/s en el acuífero de MNT, con el fin de mantener las condiciones que quedaron establecidos en el PAT-MNT. Bajo estas condiciones, y utilizando un modelo numérico, MEL procedió a determinar el tiempo de bombeo máximo desde su campo de pozos en la zona de Monturaqui,

combinado con la extracción de CMZ en Negrillar, de modo de no generar afectación en el humedal Tilopozo.

Las evaluaciones hidrogeológicas realizadas consideraron, como fue indicado, una extracción máxima combinada de 1800 l/s desde el acuífero MNT, para que el nivel freático no descendiera por debajo de 25 cm. en el sector de Tilopozo, en relación al nivel al año de la evaluación (1997). Así, las principales conclusiones que surgieron, atinentes al proyecto de MEL, es que para las tasas de bombeo máximo señaladas, las que se extenderían por un tiempo de 20 años en el caso de CMZ¹⁰ y de 21 en el de MEL, la disminución en el flujo pasante a través del acuífero sería de hasta un 6%, lo que implicaría una reducción potencial en el nivel freático en Tilopozo de 20 cm, valor que estaba por debajo de los 25 cm que el sistema podría soportar y por lo tanto, una condición de no afectación al humedal ubicado en el Sector Tilopozo.

Como fuera mencionado en la introducción de este informe, las condiciones del PAT de MEL no habrían sido cumplidas, y de acuerdo a lo informado por la DGA, se habrían constatado descensos más allá de 25 cm. desde el año 2005 a la fecha, con una tendencia al aumento de dichos descensos. Ahora bien, es importante mencionar que teniendo a la vista la evaluación ambiental del EIA de MEL, RCA N°001/1997, y el PAT del mismo titular, si bien se establece un umbral máximo de disminución de nivel freático, en opinión de HIDROMAS no queda definido, en ninguno de dichos antecedentes, de manera explícita ni puntual, de modo de no dar pie a una posible interpretación, dónde deben constatarse dichos descensos, quedando acotado sólo al “sector de Tilopozo”.

Dada la importancia que tienen los bombeos realizados, tanto en el sector sur del acuífero MNT como en la zona misma de Tilopozo, y en los efectos que pueda tener la reducción de niveles y de flujo subterráneo en el humedal Tilopozo, es que previo al análisis de las variables hídricas y/o hidrogeológicas, se describe, para cada uno de los 3 titulares involucrados en la sostenibilidad de Tilopozo, a saber Albemarle, MEL y CMZ, la evolución de las extracciones subterráneas en el acuífero MNT y en Tilopozo. Adicionalmente, se presenta la descripción y evolución de las extracciones en el núcleo del Salar (Salmuera).

Las diferentes extracciones se describen en las siguientes secciones.

3.1 Extracciones de agua en el acuífero

3.1.1 ALBEMARLE

En el área de estudio, Albemarle cuenta con dos puntos de captación de agua: pozo Tilopozo y Tucúcaro , este último ubicado a unos 3 km al sur-oeste de laguna La Brava, (ver Figura 3-3), los cuales cuentan con derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas por 8,5 l/s y 10 l/s, respectivamente, de acuerdo a las resoluciones exentas de la Dirección General de Aguas (DGA) N°316/1983 y N°453/1996. De éstos, hasta 2016 Albemarle contaba con autorización ambiental para extraer 10,9 l/s entre ambos puntos, según Res N°403/2013, la cual se incrementó en 6 l/s por medio de la RCA N° 21/2016 (Albemarle-HIDROMAS, 2020).

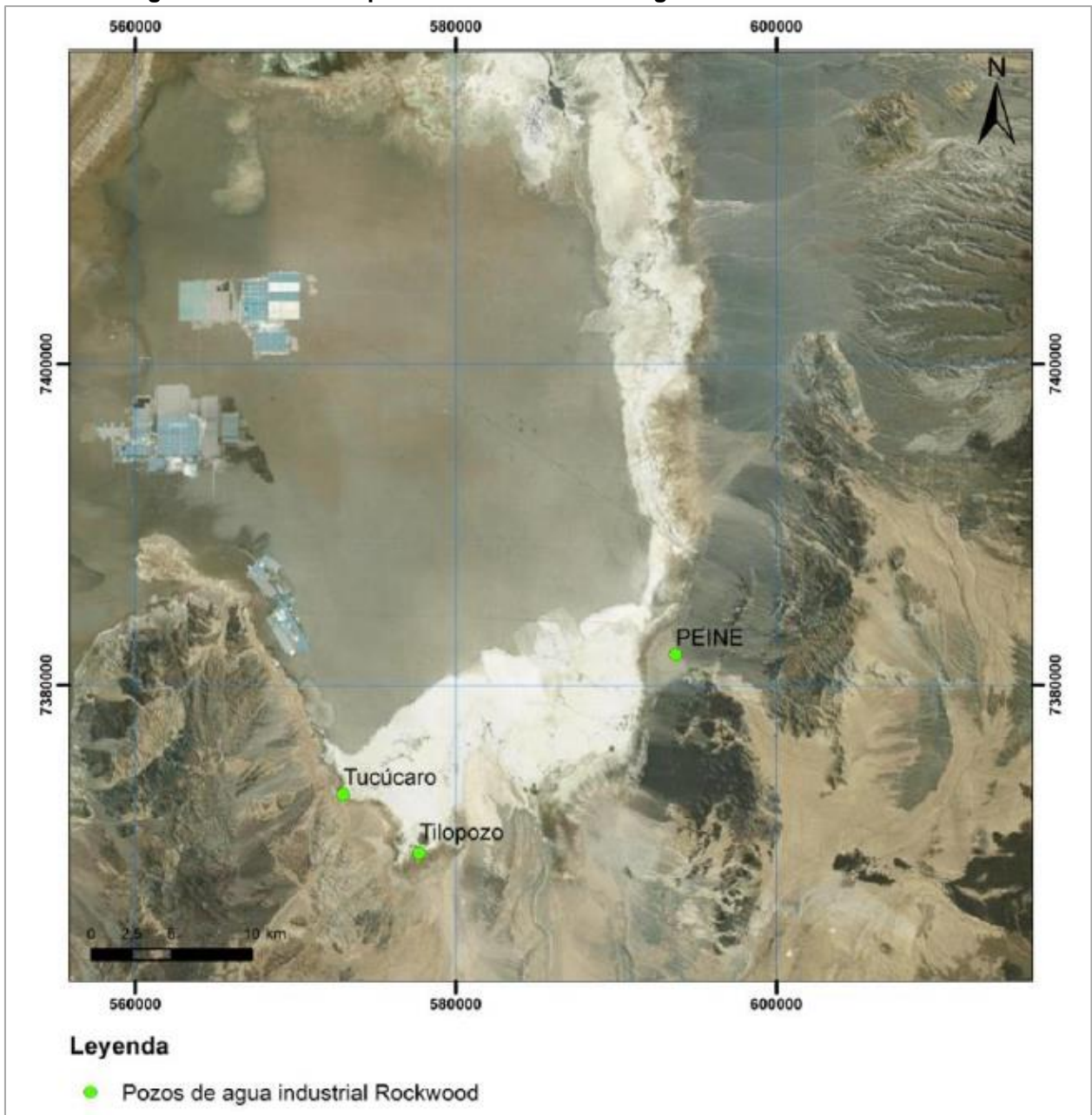
Adicionalmente, Albemarle cuenta con un pozo de extracción de agua dulce en el Sector Peine, con derechos de aprovechamiento por 5 l/s. No obstante, desde 2016 éste ha reducido su bombeo, correspondiendo el caudal medio anual extraído durante 2019 a 0,04 l/s (Albemarle-HIDROMAS, 2020).

¹⁰ ORD.D.E SEA N° 180768 del 08.06.2018 indica que la continuidad operacional de CMZ es por 30 años, es decir, hasta octubre de 2025.

Respecto a la extracción en el pozo Tilopozo, la operación comenzó en octubre de 1997 y se cuenta con registros del caudal bombeado a escala mensual y diaria. Entre 1997 y 2019 ha presentado un caudal medio anual de extracción igual a 4,94 l/s, variando entre 2,25 l/s (2013) y 7,4 l/s (2009), con un período de máxima extracción entre 2009 y 2012 (caudal promedio igual a 6,92 l/s), seguido de un período de extracción mínima entre 2013 y 2015 (2,94 l/s promedio) (Ver Figura 3-4). El caudal de extracción en este pozo presenta variabilidad estacional, siendo normalmente superiores los caudales bombeados durante el período primavera – verano. Considerando la mediana del caudal medio mensual extraído entre 1997 y 2019, la extracción mínima se realiza durante el mes de agosto (4,51 l/s), mientras que la máxima corresponde a noviembre (5,88 l/s) (Figura 3-5). Al respecto, cabe destacar que desde 2016 en adelante, se han reducido los caudales bombeados durante el período otoño – invierno, respecto del período anterior, con un valor medio mensual mínimo igual a 3,11 l/s (junio). En lo que respecta a la información a escala diaria, registros diarios facilitados por Albemarle para el período julio 2016 – octubre 2020, dan cuenta de un caudal medio y uno máximo diario de bombeo muy similares a los valores medios anuales respectivos (4,93 l/s y 7,43 l/s). Estos registros permiten también apreciar que la extracción ha sido continua y que el mayor tiempo de detención en el período se ha extendido por 7 días consecutivos, en mayo de 2019 y junio de 2020 (Figura 3-6).

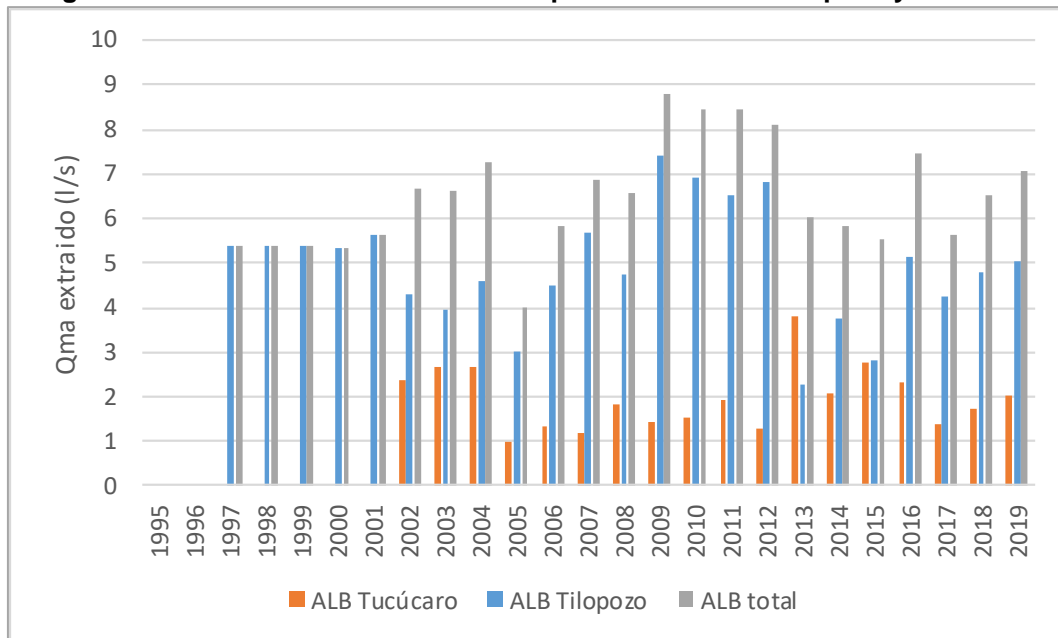
En lo que respecta a la extracción desde el pozo Tucúcaro, se cuenta con registros desde febrero de 2002, presentando un caudal medio anual de extracción igual a 1,96 l/s, cuyos valores mínimo y máximo han correspondido a 0,97 l/s (2005) y 3,78 l/s (2013), respectivamente (Ver Figura 3-4). Se debe destacar que los caudales extraídos entre el pozo Tilopozo y Tucúcaro en conjunto entre 2002 y 2016, con un caudal promedio del orden de 6,5 l/s, fue similar al caudal extraído desde 2016 en adelante (6,7 l/s).

Figura 3-3. Ubicación puntos de extracción de agua dulce/salobre Albemarle



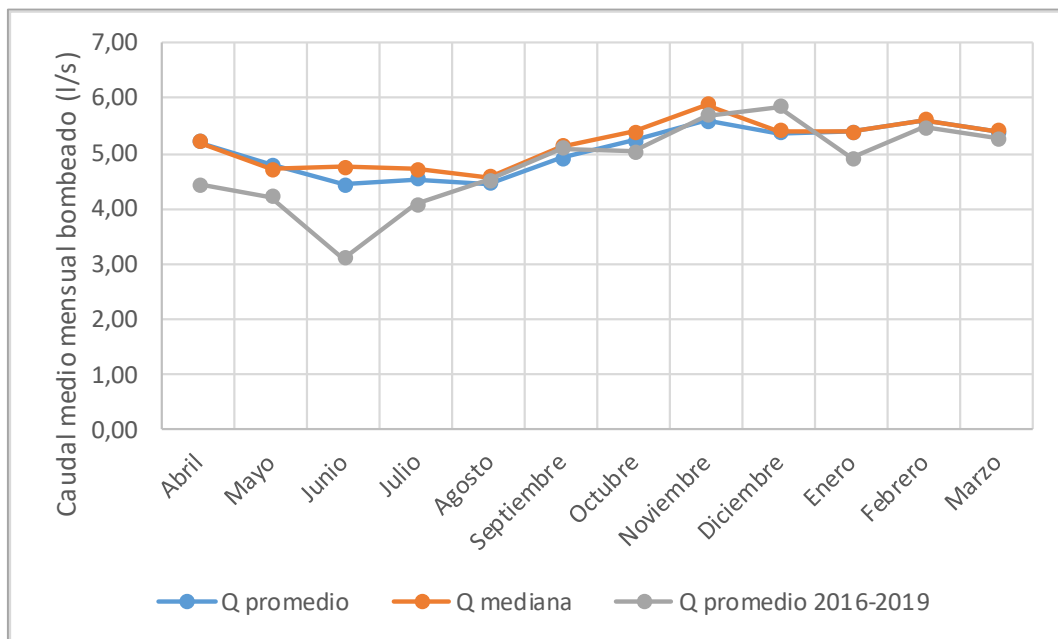
Fuente: Rockwood Lithium - SGA, 2015.

Figura 3-4. Caudal medio anual extraído por Albemarle en Tilopozo y Tucúcaro

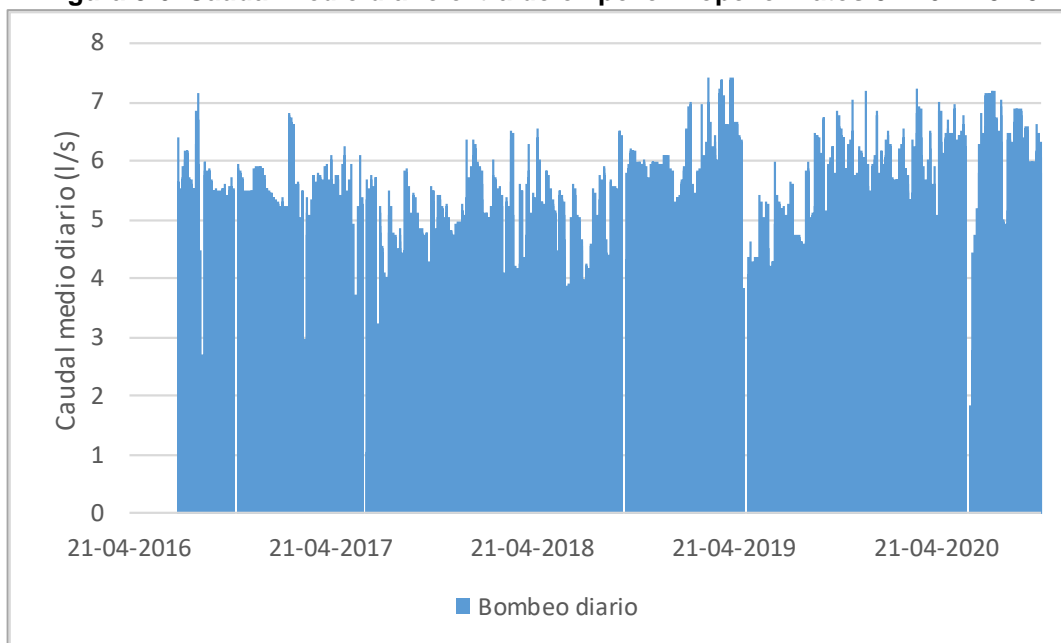


Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de Albemarle, 2020.

Figura 3-5. Variación mensual de Caudal medio mensual de extracción en pozo Tilopozo. Datos 1998-2019



Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de Albemarle, 2020.

Figura 3-6. Caudal medio diario extraído en pozo Tilopozo. Datos 07-16 – 10-20

Fuente: Elaboración propia a partir registros facilitados por Albemarle.

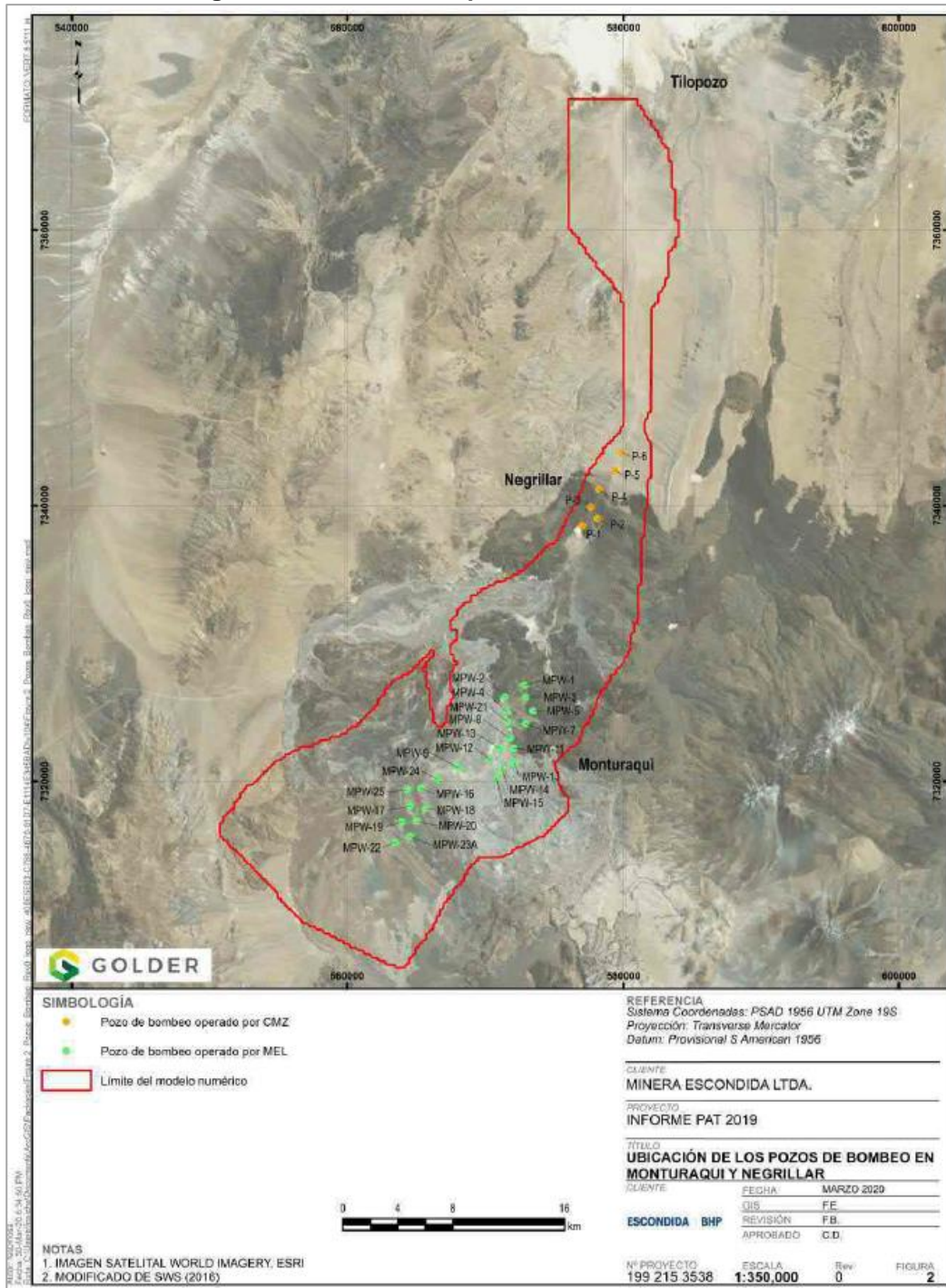
3.1.2 MEL

Las extracciones de MEL se ubican en el campo de pozos de Monturaqui, ubicado unos 50 km al sur de Tilopozo (ver Figura 3-7, en la que se presentan los pozos de producción, en conjunto con los que cuenta CMZ, y **Figura 3-8** en que se detalla la ubicación de los pozos del MEL). De acuerdo al Estudio de Impacto Ambiental “Proyecto Monturaqui”¹¹, MEL tiene constituidos derechos de aprovechamiento de agua por 1.835,8 l/s (MEL-Golder, 2017). Al respecto, cabe señalar que, en Rockwood Lithium – SGA (2015) se indica que, entre MEL y CMZ tienen constituidos derechos de aprovechamiento de agua subterránea por un caudal cercano a 1.720 l/s. De acuerdo al PAT-MNT, en el acuífero MNT el máximo caudal medio mensual que puede ser extraído corresponde a 1.800 l/s, en conjunto.

La operación de MEL comenzó con 20 pozos de extracción el cuarto trimestre de 1998 (MEL - Golder, 2017), con un caudal aproximado a 200 l/s, incrementándose a cerca de 600 l/s el año 2000 y superando 1.000 l/s durante 2003, año en que se incorporaron 3 nuevos pozos de bombeo (el año 2005 se incorporó un nuevo pozo, de un total de 24). Entre 2003 y 2019 el caudal medio anual bombeado varió entre 1.058 l/s y 1.399 l/s (MEL, 2020). La variación anual del caudal medio extraído se presenta en la Figura 3-9.

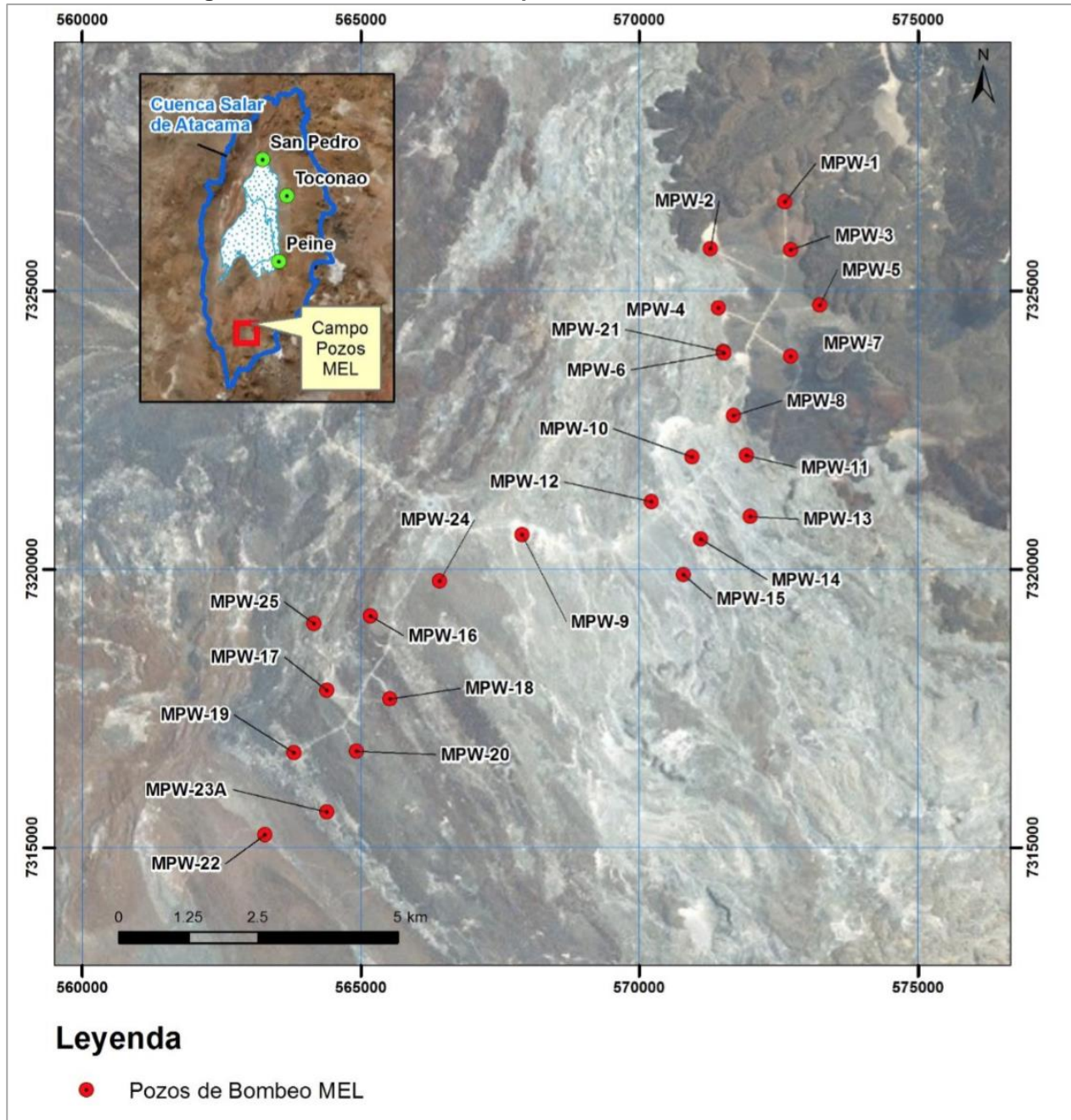
¹¹ Proyecto desistido de la evaluación ambiental

Figura 3-7. Ubicación captaciones en acuífero MNT

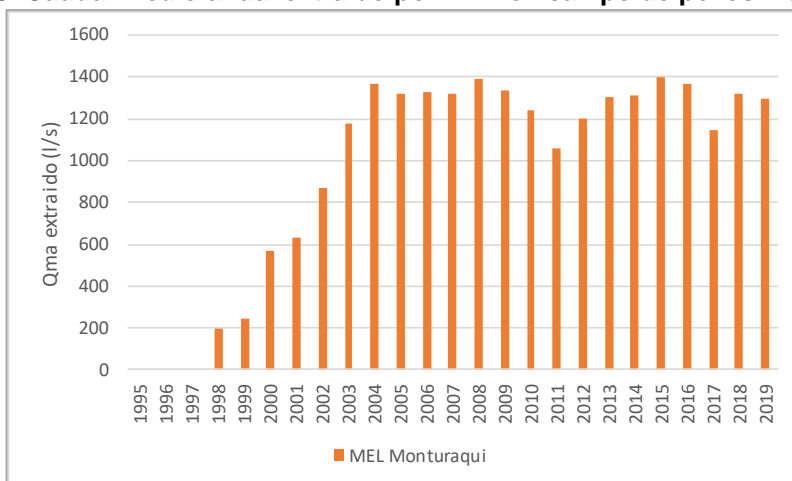


Fuente: MEL, 2020.

Figura 3-8. Detalle ubicación captaciones de MEL en acuífero MNT



Fuente: Rockwood Lithium - SGA, 2015.

Figura 3-9. Caudal medio anual extraído por MEL en campo de pozos Monturaqui¹²

Fuente: Elaboración propia a partir de registros obtenidos de MEL, 2020.

3.1.3 CMZ

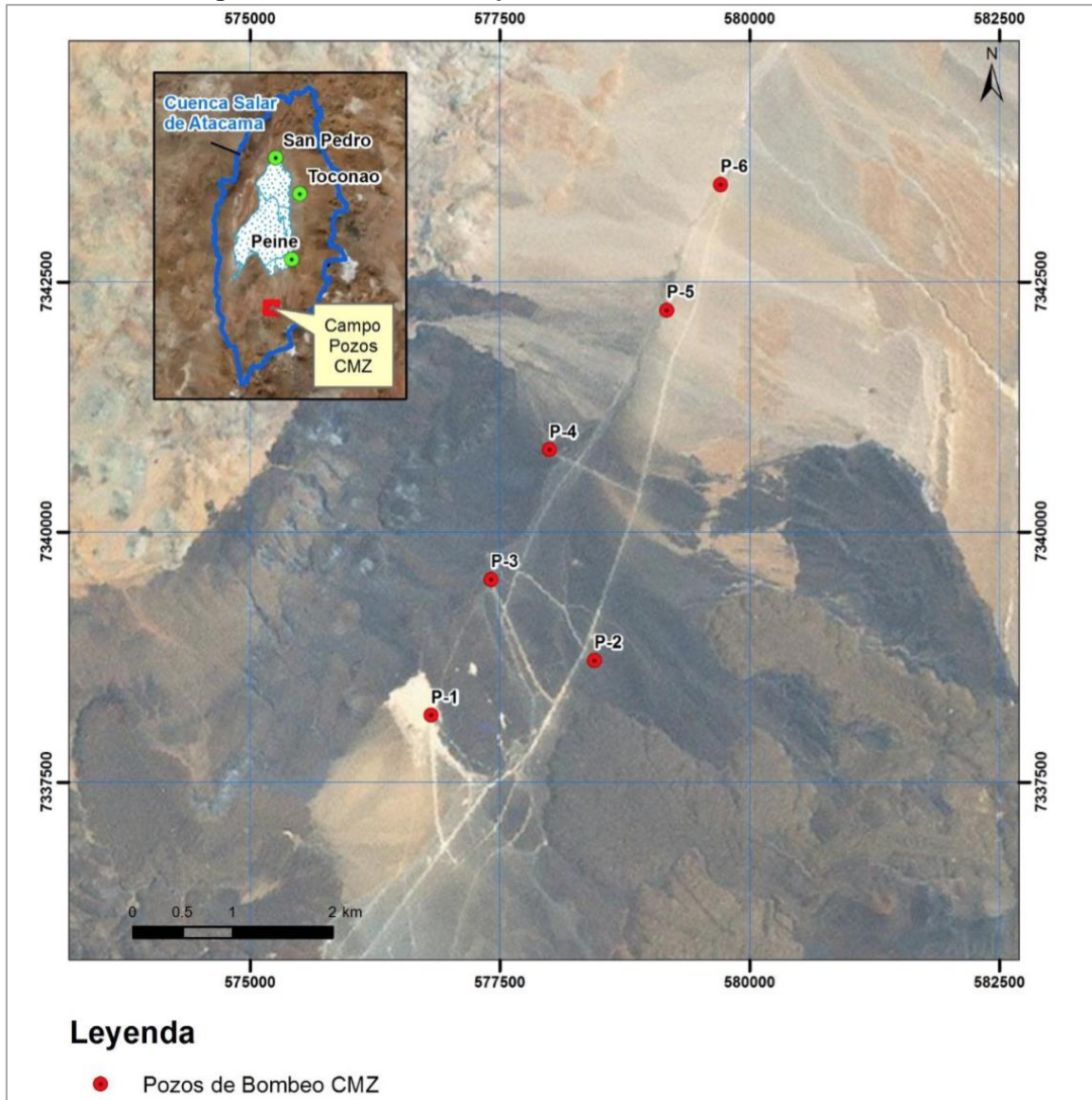
Las extracciones de CMZ se ubican en el campo de pozos de Negrillar, ubicado unos 30 km al sur de Tilopozo (ver Figura 3-7 y **Figura 3-10**). En Rockwood Lithium – SGA (2015), se indica que CMZ cuenta con derechos de aprovechamiento de agua subterránea por 625 l/s, mientras que en MEL – Golder (2017) se señala que estos corresponden a 556,5 l/s. Al respecto, se debe señalar que Proyecto Zaldívar cuenta con aprobación ambiental para una tasa de bombeo máxima de 500 L/s en el sector de Negrillar, de acuerdo a la resolución Exenta N° 574 de 8 de octubre de 1993, de COREMA II Región, que aprobó el Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Zaldívar (CMZ – SGA, 2018). Históricamente su extracción ha sido inferior a dicho valor.

La operación en el Sector Negrillar comenzó en junio de 1995 (CMZ - SGA, 2018), presentando un caudal medio anual del orden de 170 l/s hasta 2019, con una tendencia al alza en el tiempo. Al respecto, de acuerdo a lo indicado por CMZ en su EIA de 2018, el caudal medio extraído aumentó desde un promedio de 140 l/s para el período 1998-2005 a 192 l/s para el período 2006-2016. Si se consideran los registros reportados por MEL (2020)¹³, para el período posterior (2017-2019) el caudal medio de extracción se incrementó a 206 l/s. El detalle de la variación anual del caudal medio extraído se presenta en la Figura 3-11.

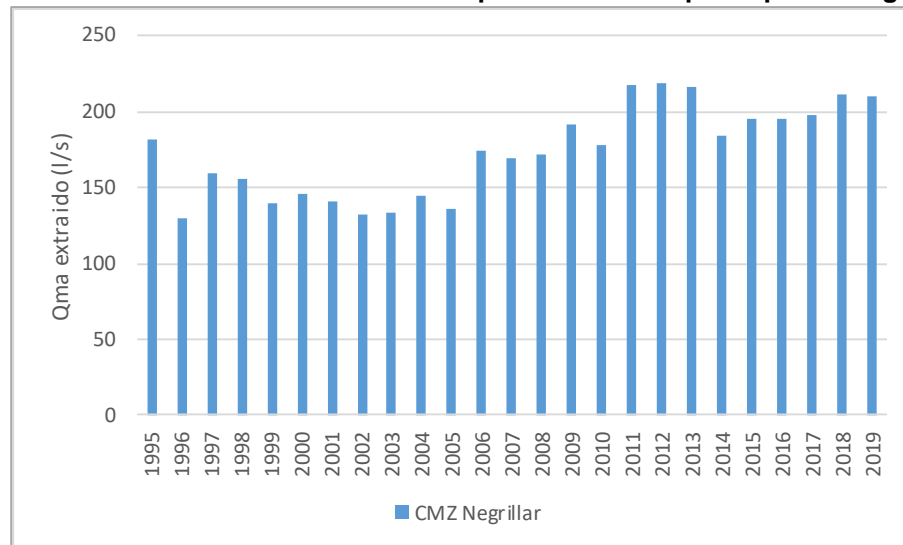
¹² Caudal medio del año 1998 se determinó como el valor promedio para el período septiembre-diciembre.

¹³ De acuerdo a Rockwood Lithium – SGA (2015) “la extracción de aguas en el sur de la cuenca ambas compañías cuentan con un convenio de colaboración que le permite a MEL acceder a la información de extracción realizada por CMZ”.

Figura 3-10. Ubicación captaciones en CMZ en acuífero MNT



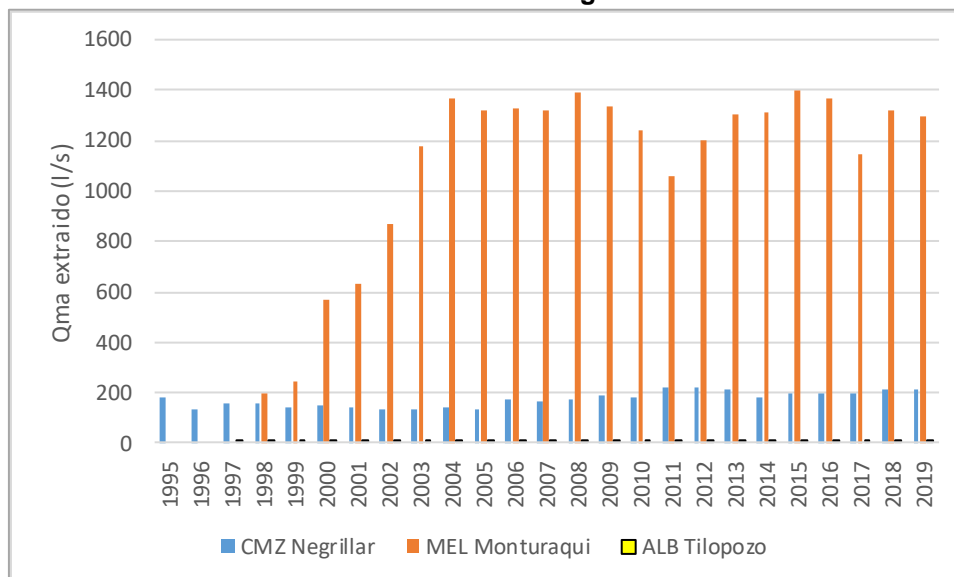
Fuente: Rockwood Lithium - SGA, 2015.

Figura 3-11. Caudal medio anual extraído por CMZ en campo de pozos Negrillar¹⁴

Fuente: Elaboración propia a partir de registros obtenidos de MEL, 2020.

3.1.4 Extracción total de agua dulce/salobre y acuífero MNT

La Figura 3-12 presenta la magnitud del caudal bombeado desde 1995 en adelante, para los diferentes titulares que cuentan con derechos de aprovechamiento. Es de destacar que desde el año 2000 a las fecha, con el incremento en el bombeo de MEL, las extracciones en el acuífero han sido superiores a la recarga del mismo, la que ha sido estimada que es del orden de 600 l/s (ver acápite 4.1 para mayor detalle).

Figura 3-12. Caudal medio anual de extracción de agua dulce/salobre en área de estudio

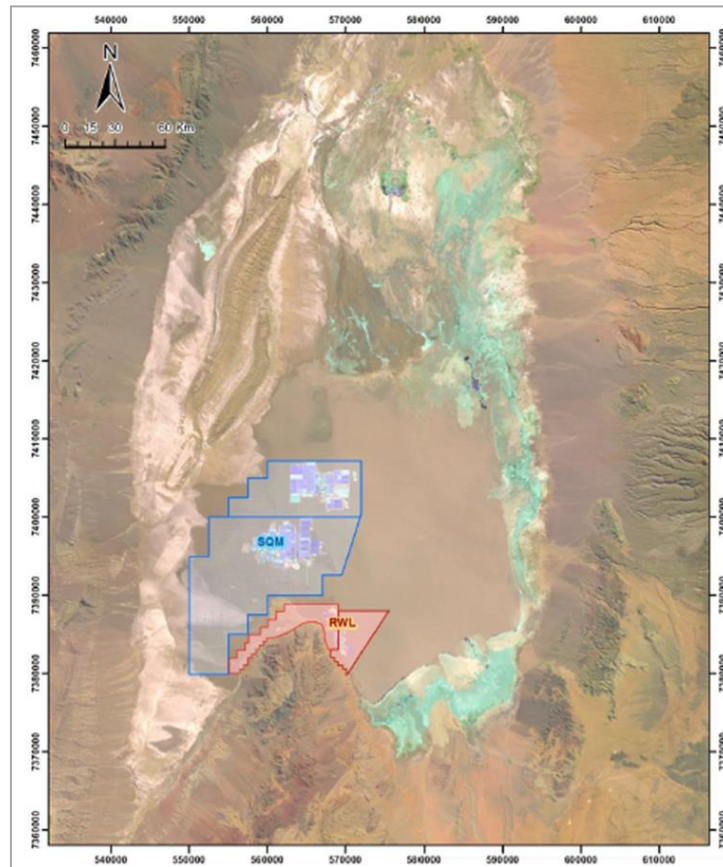
Fuente: Elaboración propia a partir de registros de MEL (2020) y de la Base de datos de Albemarle (2020).

¹⁴ Caudal medio del año 1995 se determinó como el valor promedio para el período julio-diciembre.

3.2 Extracciones de salmuera

La Figura 3-13 muestra el sector donde se ubican los pozos de extracción de salmuera de SQM y Albemarle en el núcleo del Salar de Atacama. El detalle de las extracciones se presenta a continuación.

Figura 3-13. Zonas de extracción de Salmuera en Salar de Atacama de SQM y Albemarle



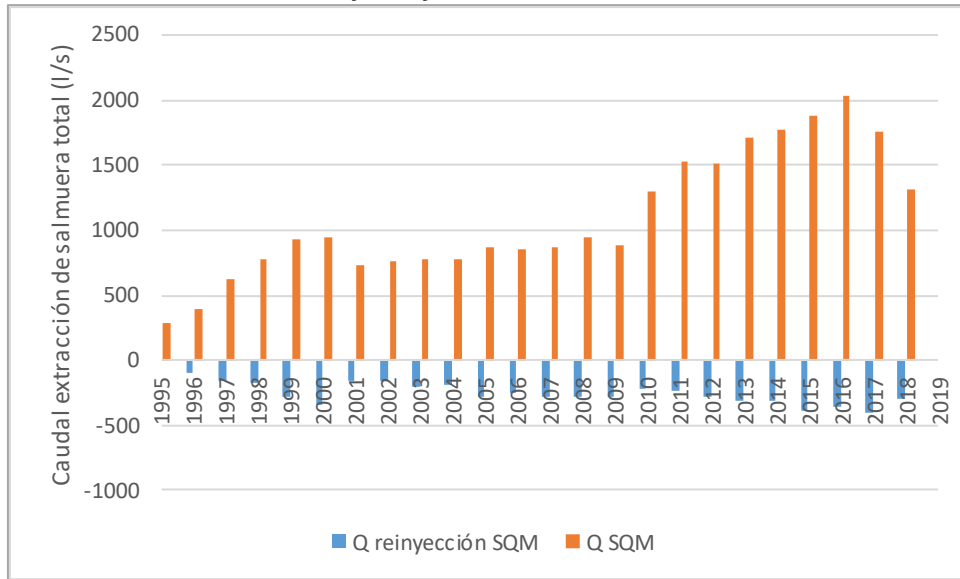
Fuente: SQM (2020).

3.2.1 SQM

La extracción de salmuera por parte de SQM en el Salar de Atacama comenzó en noviembre de 1994, con un caudal del orden de 70 l/s. La regla operacional de la explotación de salmuera autorizada a SQM de acuerdo a la RCA N° 226/2006, considera incrementos escalonados de extracción en el tiempo, de manera que al final del proyecto (año 2031) el caudal medio anual total neto bombeado sea igual a 1.700 L/s. De acuerdo a dicha regla, al año 2020, SQM está autorizada para extraer un caudal de 1.600 l/s (SQM, 2020). Por otra parte, desde 1996 que SQM reinyecta salmuera al núcleo. Tal como el caudal de extracción se ha incrementado en el tiempo, el caudal de reinyección también lo ha hecho, desde valores mayoritariamente en el rango 100 l/s – 200 l/s entre 1996 y 2004, a caudales superiores a 300 l/s desde 2013 en adelante (SQM, 2020).

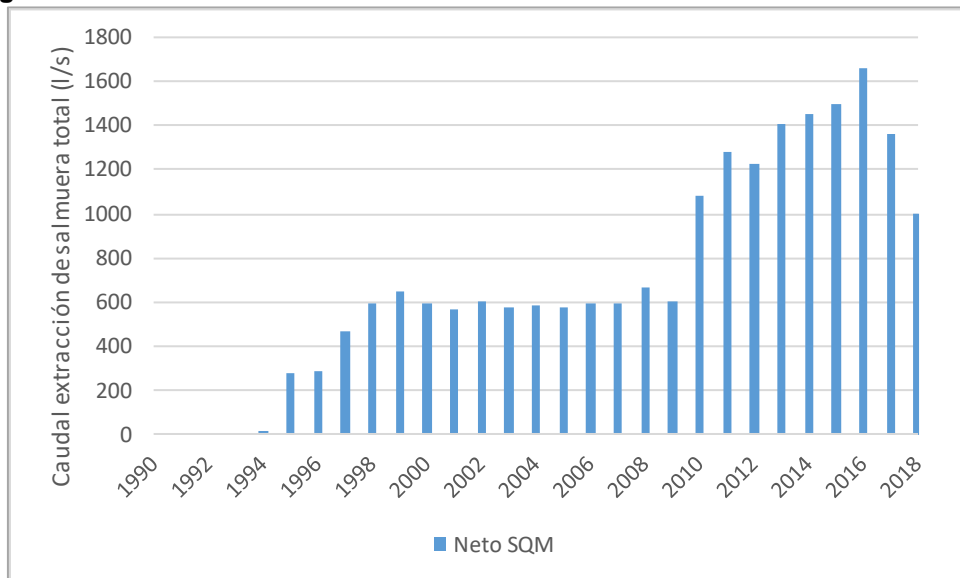
Un resumen con los caudales medios anuales bombeados e inyectados por SQM, se presenta en la Figura 3-14, donde los caudales reinyectados se presentan como valores negativos. En la Figura 3-15 se presenta el caudal neto de salmuera extraído por SQM, correspondiente a la diferencia entre la extracción y la reinyección.

Figura 3-14. Caudal de extracción y reinyección de salmuera de SQM en Salar de Atacama



Fuente: Elaboración propia a partir de registros de SQM (2020).

Figura 3-15. Caudal neto de extracción de salmuera de SQM en Salar de Atacama

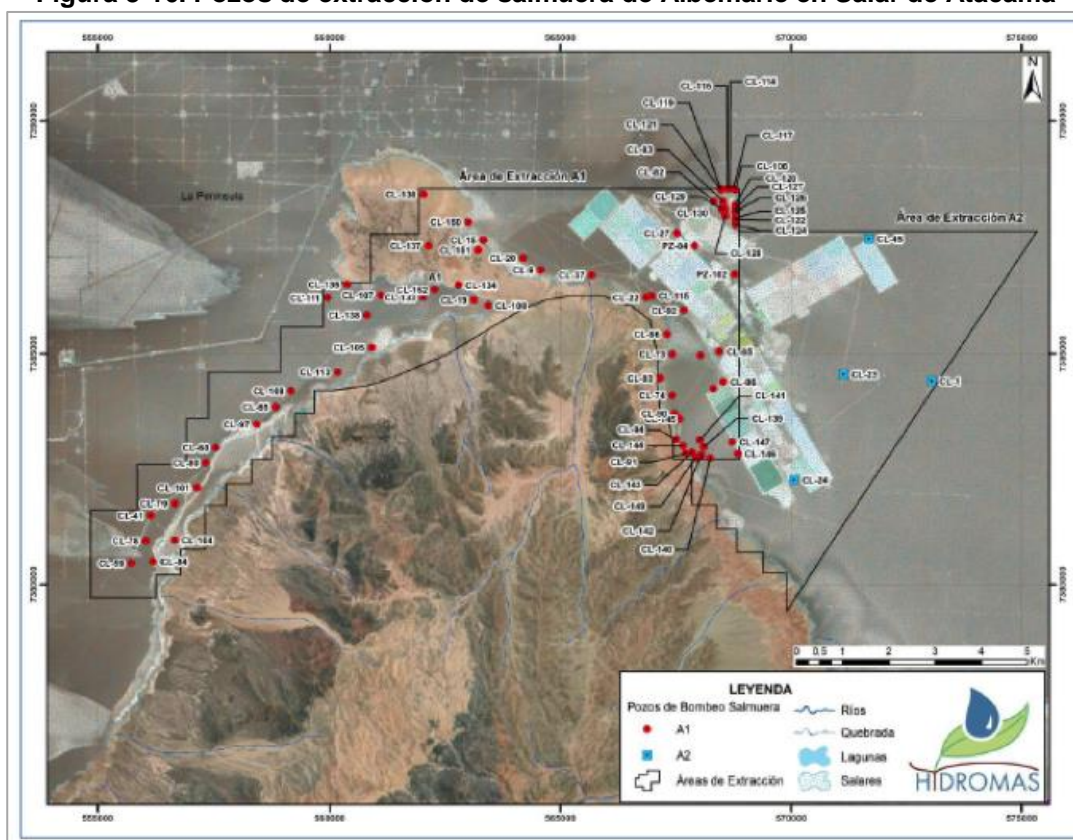


Fuente: Elaboración propia a partir de registros de SQM (2020).

3.2.2 Albemarle

La extracción de salmuera en el Núcleo del Salar de Atacama por parte de Albemarle al año 2019, es realizada por medio de un conjunto de pozos de extracción, divididos en dos sectores contiguos, denominados A1 y A2 (ver Figura 3-16). Comenzó el año 1983 (en ese momento, a través del proyecto de la Sociedad Chilena del Litio Limitada), considerando una extracción anual media igual a 48,6 l/s. El caudal bombeado se mantuvo con algunas leves variaciones hasta el año 1997, en el que se incrementó levemente, por sobre 50 l/s. El año 2000 en la Resolución Exenta N° 092/2000¹⁵ se autorizó un incremento de la extracción de salmuera a 113 l/s, mientras que en 2006 se autorizó un nuevo aumento, por medio de la Resolución Exenta N° 3132/2006¹⁶, hasta 142 l/s (Rockwood Lithium – SGA, 2015).—De este modo, a partir de 2006 se verificó un aumento en la extracción de salmuera, alcanzando valores máximos los años 2008 y 2010, en torno a 200 l/s, disminuyendo a registros del orden de 150 l/s entre 2013 y 2016. Con posterioridad, se ha verificado un aumento del caudal, cuyo valor durante 2019 correspondió a 442 l/s, el que está autorizado en la RCA N° 21/2016, la que permitió un incremento en 5 etapas semestrales del caudal de extracción, desde 142 l/s en 2016, hasta un valor máximo igual a 442 l/s, a alcanzar no antes de octubre de 2018. Lo anterior se refleja en la Figura 3-17, que muestra la serie de tiempo de la extracción media anual.

Figura 3-16. Pozos de extracción de salmuera de Albemarle en Salar de Atacama

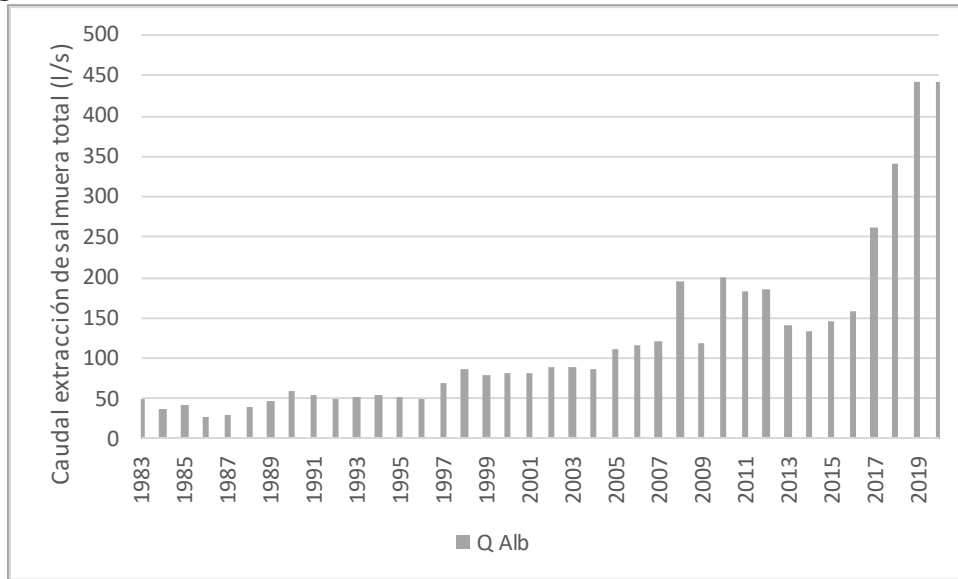


Fuente: ALB - HIDROMAS (2020).

¹⁵ Resolución Exenta N° 092/2000, dictada por la Comisión Regional de Medio Ambiente, Región de Antofagasta, que aprobó la DIA del proyecto “Construcción de Pozas de Evaporación Solar”.

¹⁶ Resolución Exenta N° 3132/2006, dictada por la Comisión Regional de Medio Ambiente, Región de Antofagasta, que aprobó DIA del proyecto “Modificación al Proyecto Construcción de Pozas de Evaporación Solar”.

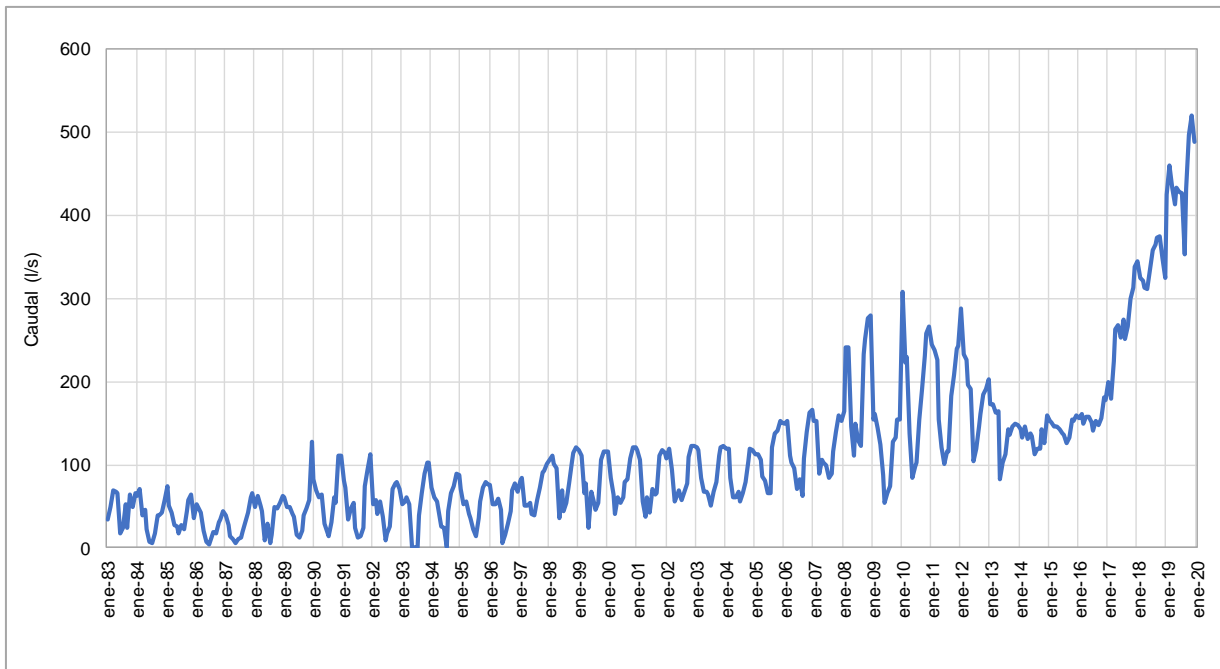
Figura 3-17. Caudal de extracción de salmuera de Albemarle en Salar de Atacama



Fuente: Elaboración propia a partir de registros de Rockwood Lithium - SGA (2015) y de base de datos de Albemarle (2020).

Se debe destacar que la extracción de salmuera presenta una variación estacional considerable, con caudales máximos durante el verano y mínimos en invierno, con diferencias que pueden superar los 200 l/s entre los valores extremos, lo que está asociado a los cambios en las tasas de evaporación entre ambas épocas (Rockwood Lithium - SGA, 2015). La serie de tiempo mensual de extracción de salmuera se muestra en la Figura 3-18.

Figura 3-18. Variación del caudal medio mensual de extracción de salmuera de Albemarle en Salar de Atacama

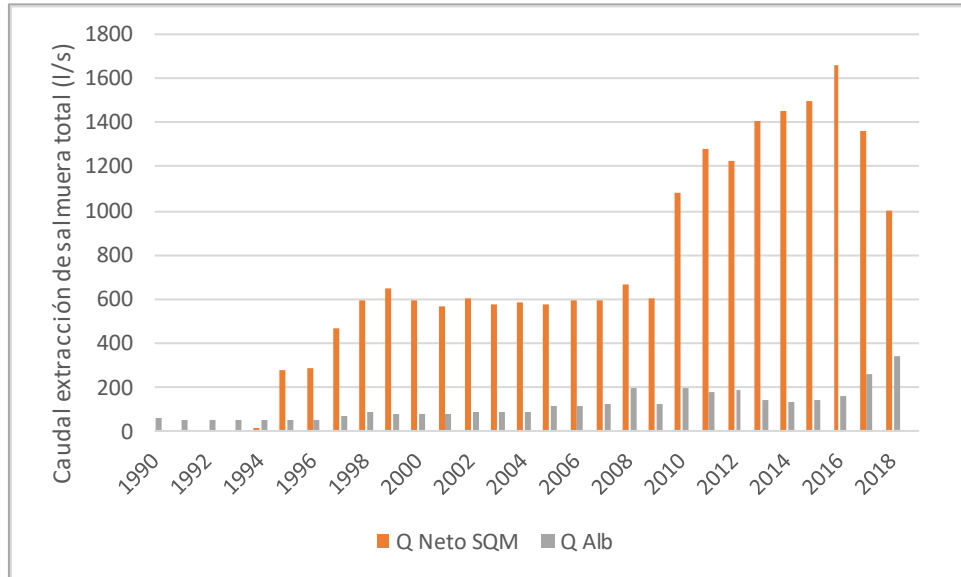


Fuente: Albemarle - Hidromas (2020).

3.2.3 Extracción total de salmuera

La Figura 3-19 presenta la variación del caudal de salmuera neto extraído en el Salar de Atacama, diferenciando entre los registros asociados a SQM y los correspondientes a Albemarle.

Figura 3-19. Caudal medio anual de extracción de salmuera desde el núcleo del Salar de Atacama



Fuente: Elaboración propia a partir de registros de SQM (2020) y de la base de datos de Albemarle (2020).

4 ANÁLISIS VARIABLES HIDRICAS / HIDROGEOLÓGICAS

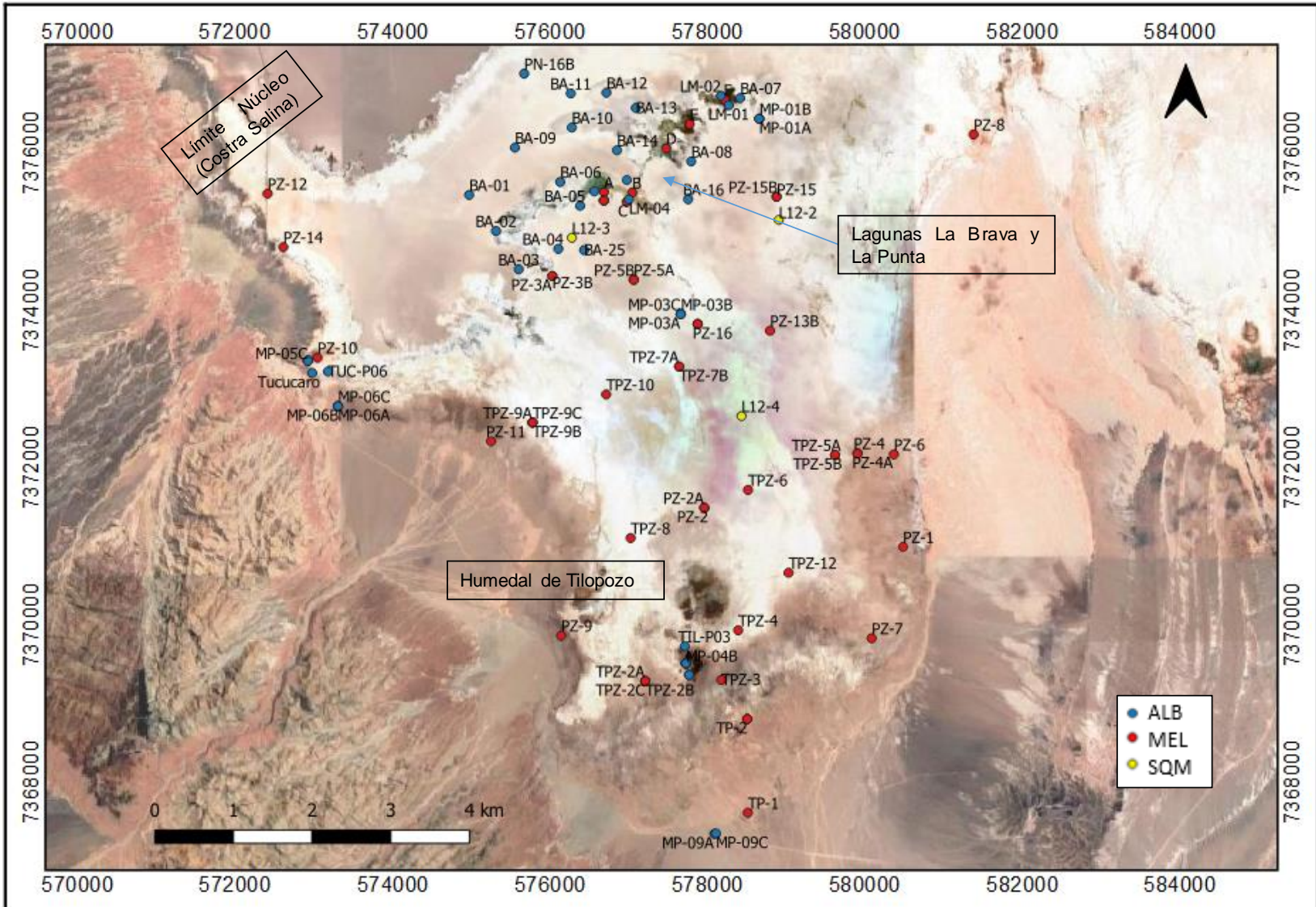
4.1 Descripción del Funcionamiento Hidrogeológico de la Zona Marginal del Sector Sur del Salar de Atacama

La zona marginal del Salar de Atacama corresponde al área en que se produce la transición entre los depósitos sedimentarios del borde del Salar y los depósitos evaporíticos del núcleo. En esta zona se encuentran los sistemas lagunares y, en profundidad, en la zona saturada, el acuífero de agua dulce/salobre, la interfase salina y la salmuera debajo de éste. En la Zona Marginal ocurre la mayor parte de la evaporación de la cuenca (RWL-SGA, 2015). En el borde sur del Salar de Atacama, dentro de la Zona Marginal se ubican tanto las lagunas La Punta y La Brava, como el Sector Tilopozo, dentro del cual se desarrolla el humedal de Tilopozo (ver Figura 4-1).

RWL-SGA (2015) desarrolló un esquema conceptual del funcionamiento hidrogeológico de este sector, enfocado principalmente en el funcionamiento de las lagunas (ver Figura 4-2), el que es en términos generales coincidente con el modelo conceptual planteado por MEL-Golder (2017) en el EIA Proyecto Monturaqui, para la misma zona. De acuerdo a dicho modelo conceptual, a lo descrito por MEL- Golder (2017), CMZ-SGA (2018) y SQM (2020), y a la información hidrogeológica e hidroquímica existente para el área de estudio, las características principales del sistema hidrogeológico de la Zona Marginal sur del Salar de Atacama, dentro de la cual se emplaza el humedal Tilopozo, corresponden a las siguientes:

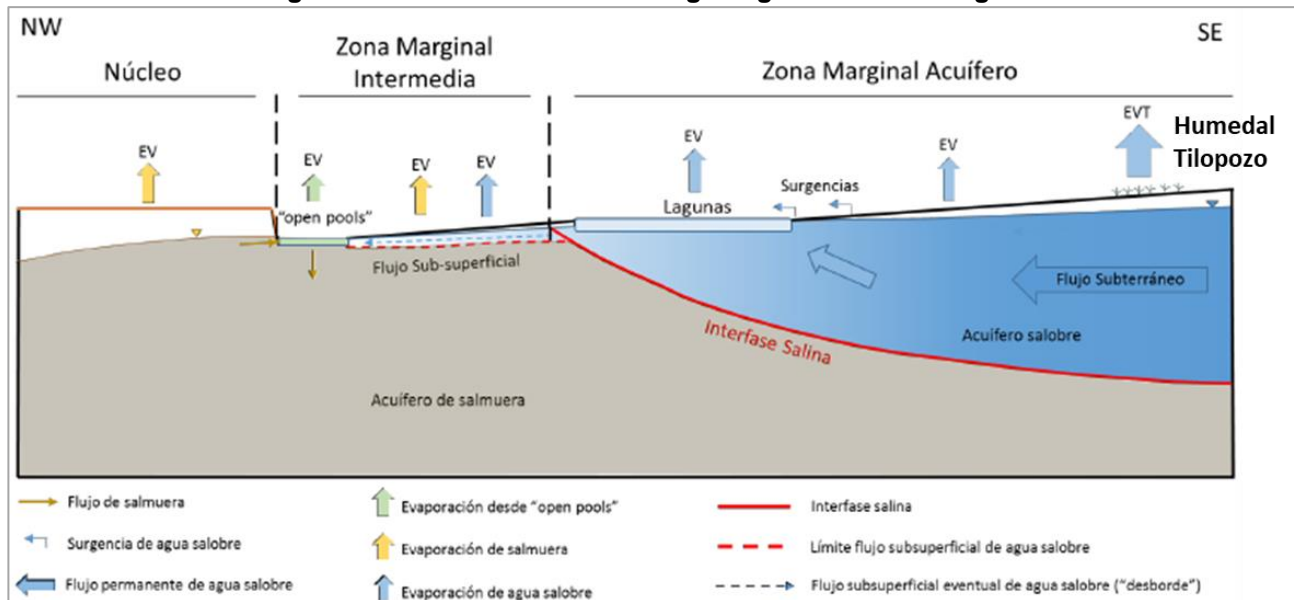
- En el Sector Marginal se evidencia un sector de aguas someras de características dulce/salobre, con un flujo con dirección desde SE hacia NW, el que es parte de un sistema de mayor escala (acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, MNT), que se extiende por más de 50 km hacia el sur, y que presenta un flujo en dirección hacia Tilopozo (ver Figura 4-3). La recarga de este sistema se concentra fundamentalmente en la zona sur del acuífero, habiendo sido estimada su magnitud en 612 l/s y 640 l/s por RWL-SGA (2015) y MEL- Golder (2017), respectivamente. Cabe señalar que en forma previa, en el Informe Técnico N° 234 del DARH 2014, la DGA estimó un valor inferior de la recarga, correspondiente a 403 l/s (HIDROMAS, 2017).
- La evapotranspiración corresponde a la única descarga natural de la Zona Marginal. De acuerdo a los balances definidos en los EIA de Rockwood Lithium de 2015 y de MEL de 2017, la evapotranspiración sería del orden de 600 l/s, presentando variaciones significativas espacialmente, en función de las características del tipo de recubrimiento y la profundidad del nivel freático. En la mayor parte de la Zona Marginal la evaporación es suficiente para mantener los niveles por debajo de la superficie. Al respecto, la profundidad del nivel freático es somero, inferior o del orden de un metro en gran parte de la Zona Marginal (ALB-HIDROMAS, 2020a), en particular en la zona del humedal de Tilopozo.
- En el borde norte de la zona marginal, se produce la surgencia del acuífero, lo que se manifiesta en el desarrollo de sistemas hídricos superficiales, entre los que se destacan las lagunas La Punta y La Brava (ver Figura 4-2). De este modo, y tal como se indica en Rockwood Lithium – SGA, 2015, "*el origen de la alimentación de las lagunas del Sistema La Punta-La Brava se sitúa en las zonas distales en el extremo sur de la cuenca a mayor altura, caracterizadas por aguas cloruradas sódicas, dulces a salobres, y de composición isotópica ligera representativa de las aguas de recarga de la región, provenientes de los acuíferos de Monturaqui y Negrillar*" (Pág 79. Apéndice I: Funcionamiento Lagunar, Anexo 1, Adenda 5 Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama de Albemarle).

Figura 4-1. Zona marginal del borde sur del Salar de Atacama. Se incluyen principales puntos de monitoreo (ALB, SQM y MEL)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-2. Funcionamiento hidrogeológico en zona marginal



Fuente: Modificado de RWL-SGA, 2015.

- La surgencia se produce en la zona de interacción del acuífero dulce/salobre con la salmuera del núcleo. El acuífero fluyendo desde el SE hacia el NW “empuja” la salmuera en dicha dirección. Por un balance de momentum, y asociado a la diferencia de densidad entre los dos cuerpos de agua, se produce la inmersión de la salmuera, que se extiende de manera inclinada por debajo del acuífero dulce/salobre. De acuerdo a los registros del pozo TP-3, dicha extensión es superior a 9 km hacia el sur de las lagunas, más allá del humedal de Tilopozo (MEL, 2017), mientras que estimaciones presentadas en RWL-SGA (2015) indican que podría extenderse por sobre 13 km al sur de las lagunas.
- Debido a la significativa diferencia de densidad entre la salmuera y el agua dulce/salobre del acuífero proveniente desde el sur la mezcla entre ambos fluidos es muy baja. De acuerdo a MEL-Golder (2017), en las zonas de mayor mezcla, el espesor de dicha zona alcanzaría 2 metros. A modo de ejemplo, la Figura 4-4 muestra un perfil vertical de conductividad eléctrica (CE) medido en diciembre de 2013 en el pozo MP-04C (ALB-HIDROMAS, 2020a), ubicado en el entorno del humedal de Tilopozo. Se aprecia que la interfase se ubica en torno a 50 m de profundidad, existiendo un incremento de la CE superior a 100.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre 50 m y 52,5 m y que la inexistencia de datos entre 45 m y 50 m impide determinar con mayor precisión su ubicación. De este modo, se desarrolla una interfase, que corresponde a una superficie, que separa y desconecta a ambos fluidos. Por otra parte, al ubicarse en la zona inferior, la salmuera sostiene el acuífero salobre, funcionando como su basamento, como se aprecia en el esquema de la Figura 4-2.
- La interfase intersecta la superficie en el punto en el cual la salmuera se profundiza, zona ubicada al norte de las lagunas. Dicho sector marca el límite norte de la Zona Marginal del acuífero, desarrollándose entre esta zona y el núcleo del Salar, una Zona Marginal Intermedia. En eventos de alta precipitación, aumenta el nivel y la superficie de las lagunas y parte de esta agua, que no es evaporada, se infiltra y fluye de manera subsuperficial hacia el núcleo, en la zona del límite de la costra de cloruros, donde se forman algunos pozones denominados “open pools”, en los cuales el

agua se evapora y disuelve la costra de cloruros, formando salmuera (RWL-SGA, 2015). Este sector limita el Núcleo, de la Zona Marginal Intermedia. Cabe señalar que los “open pools” muestran un desplazamiento hacia el núcleo, como muestra la siguiente comparación de la ubicación del límite de la costra salina en los años 2003 y 2013 (Figura 4-5), realizada por medio de imágenes satelitales por RWL-SGA (2015).

- De acuerdo a lo descrito, el humedal de Tilopozo se alimenta un flujo subterráneo de agua dulce/salobre, cuya principal fuente proviene desde el sur del Salar de Atacama. Cambios en su balance, podrían generar cambios en la Zona Marginal, en particular en el flujo y el nivel del agua subterránea en este sector. Adicionalmente, la dinámica del acuífero en la Zona Marginal está relacionada con la salmuera en el Núcleo del Salar de Atacama, con la que forma una interfase sobre la que se ubica el acuífero. Por este motivo, cambios piezométricos en el núcleo del Salar de Atacama en las cercanías de la Zona Marginal, podrían generar modificaciones en el acuífero en la Zona Marginal.
- Es importante hacer notar que se han considerado los rangos de conductividad eléctrica (CE) señalados por RWL-SGA (2015) para caracterizar agua dulce, salobre y salmuera, definición realizada en el contexto de las características de la calidad de agua de la Zona Marginal del Salar de Atacama:

Agua dulce: $CE < 4.500 \mu\text{S}/\text{cm}$

Agua salobre: $4.500 \mu\text{S}/\text{cm} < CE < 200.000 \mu\text{S}/\text{cm}$

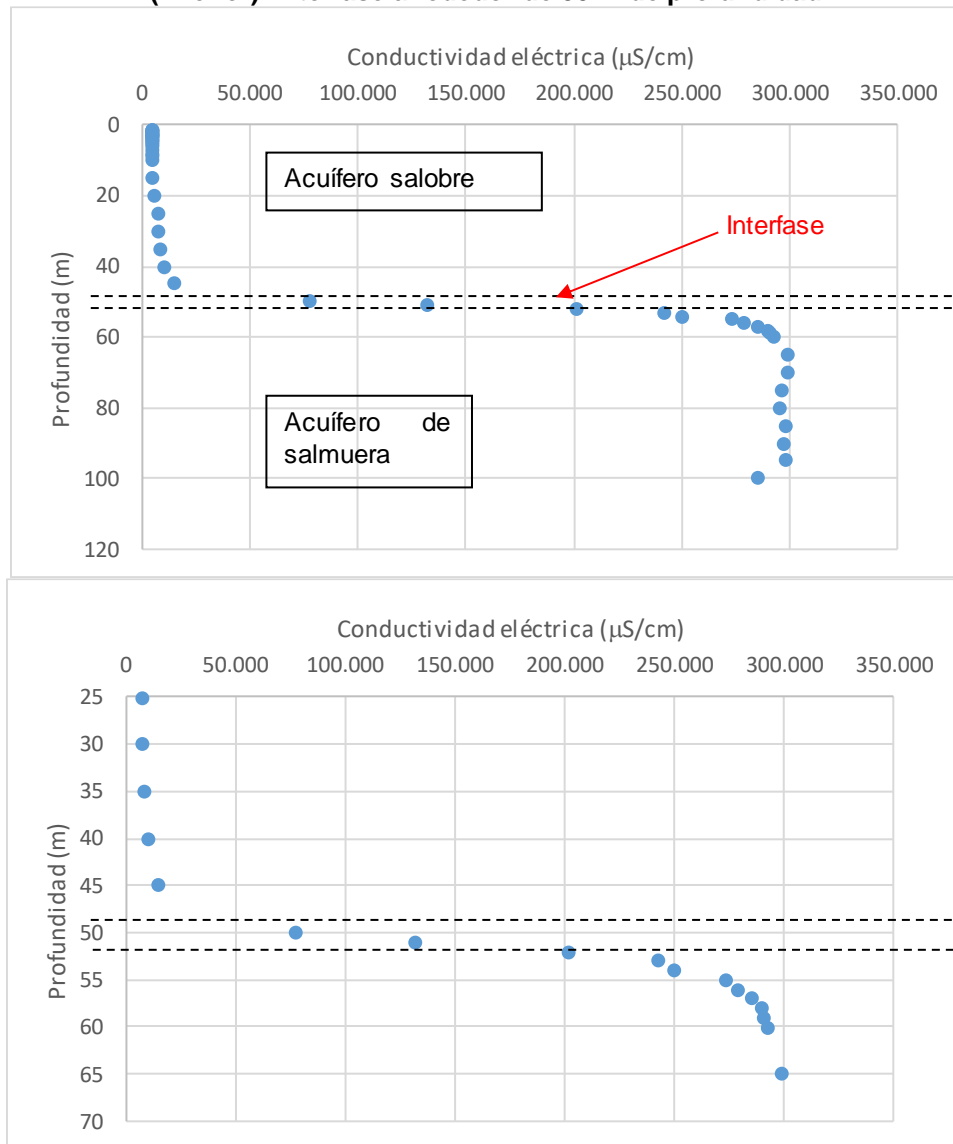
Salmuera: $CE > 200.000 \mu\text{S}/\text{cm}$

Figura 4-3. Ubicación del acuífero MNT



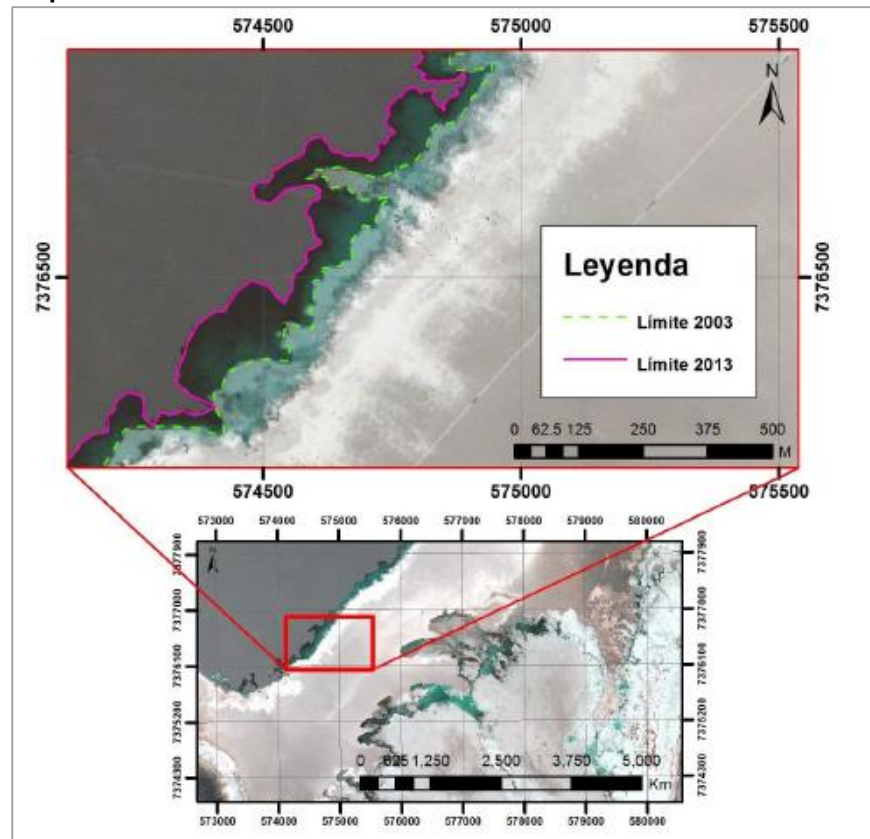
Fuente: Modificado de HIDROMAS, 2017.

Figura 4-4. Ejemplo de separación de acuífero salobre y salmuera, en perfil vertical de CE, pozo MP-04C (diciembre 2013). Perfil completo del pozo (superior) y detalle en torno a la zona de interfase (inferior). Interfase alrededor de 50 m de profundidad.



Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de Albemarle, 2020.

Figura 4-5. Desplazamiento de la costra de cloruros en la zona de formación de “open pools”



Fuente: RWL-SGA, 2015.

4.1.1 Caracterización del flujo horizontal en acuífero dulce/salobre en Zona Marginal

De acuerdo a lo descrito previamente, el acuífero MNT presenta un flujo que escurre desde el sur, en dirección al Núcleo del Salar de Atacama, extendiéndose más de 50 km al sur de Tilopozo.

No se cuenta con información que permita realizar una caracterización espacial de la piezometría del acuífero, para un período previo al inicio de las extracciones de agua de CMZ (1995), Albemarle (1997) y MEL (1998) (para mayor detalle, ver acápite 3.1). De acuerdo a esto, y considerando la información disponible, para determinar la piezometría se han considerado mediciones realizadas en el año 2009, en el cual se contaba con más de 25 puntos de medición de la profundidad del nivel freático en la Zona Marginal, además de puntos de monitoreo de nivel de agua superficial en el humedal de Tilopozo y las lagunas La Brava y La Punta.

Aunque de dicha época (2009) hay registros de puntos de medición de MEL, Albemarle y SQM, para efectos de este análisis de la piezometría inicial se han considerado las mediciones realizadas por MEL, debido a que, por una parte, contaba con mayor información de puntos de monitoreo y, por otra, no es posible utilizar en conjunto la información de las diferentes empresas, ya que las cotas de referencia de los puntos de medición no son las mismas. Para el análisis se ha considerado la cota máxima del período de invierno (junio – septiembre), de modo incluir los registros que presentan un menor efecto de la evapotranspiración. En la Tabla 4-1 se presenta el detalle de los puntos de monitoreo incluidos y valores característicos de la cota piezométrica para el invierno de 2009.

Los resultados se presentan en la Figura 4-6, en la que se muestran las isopiezas del acuífero MNT Zona Marginal del Sector sur del Salar de Atacama, cada 0,5 m, para registros de invierno de 2009, extendiendo el análisis por el borde sur hasta el punto de monitoreo TP-3, ubicado en la Zona Callejón de Tilopozo. Cabe mencionar que éstas se determinaron sin hacer corrección por densidad variable, en atención a que no se cuenta con la información de esta variable en cada uno de los pozos utilizados para el cálculo de las isopiezas. Para efectos de la determinación de las isopiezas la implicancia de la densidad variable puede significar un desplazamiento generalizado de las líneas en toda al área de análisis, sin embargo no tiene efectos en la dirección de flujo a nivel macro, siendo este siempre desde el sur del Salar de Atacama.

En la misma figura se destacan, en color café, los humedales ubicados en el Sector Tilopozo, definidos por la SMA (2020b), en el Informe de Fiscalización Ambiental a Minera Escondida (para mayor detalle, ver acápite 5.1). Los resultados muestran que la dirección principal del flujo es desde la zona del humedal de Tilopozo, hacia las lagunas, con un desnivel de 6 - 7 metros aproximadamente. En el entorno del humedal, el flujo se da en dirección sur – norte, mientras que en la zona intermedia y hacia las lagunas, la dirección corresponde a sureste (SE) – noroeste (NW). Adicionalmente, en el borde oeste hay una leve componente suroeste – noreste. Esta componente del flujo se manifiesta en la mayor cota piezométrica del pozo PZ-11, respecto a otros pozos ubicados en su entorno y se relacionaría con flujos provenientes desde el sector del Cordón de Lila. Además fue medida en una prueba de bombeo realizada el año 2014 en la zanja Tucúcaro, en la que se midió de manera previa a la prueba, la existencia de un desnivel en dicha dirección (ver apéndice D en RWL-SGA, 2015). Por otra parte, se observa un incremento de la cota piezométrica en torno al punto H, en el humedal TL2 (ver isopieza 2.307), que está asociado a la surgencia de agua en dicho sector.

Con respecto a la variabilidad temporal del nivel freático, los cambios interanuales son descritos y evaluados en el acápite 4.2, en el que se analiza la evolución del sistema hídrico como consecuencia de los efectos producidos por sus principales forzantes. En cuanto a los cambios intranuales, en diversos puntos de monitoreo se puede apreciar la existencia de variación estacional, como consecuencia de la evapotranspiración y que en gran parte de la extensión del área estudiada los niveles son someros, ubicándose el nivel freático a menos de 1 m de profundidad, respecto de la superficie. De este modo, en el período de verano los niveles alcanzan su máxima profundidad, mientras que en invierno se presentan los niveles más someros. No obstante, la amplitud de la variación del nivel freático es diversa entre los diferentes sectores de la Zona Marginal, debido a la combinación de diversos elementos condicionantes, como la profundidad del nivel freático, la cobertura del suelo y posiblemente la existencia de flujos verticales, lo que se discute con mayor detalle en el acápite 4.2.2.

Tabla 4-1 Información utilizada para análisis de piezometría, período junio - septiembre de 2009

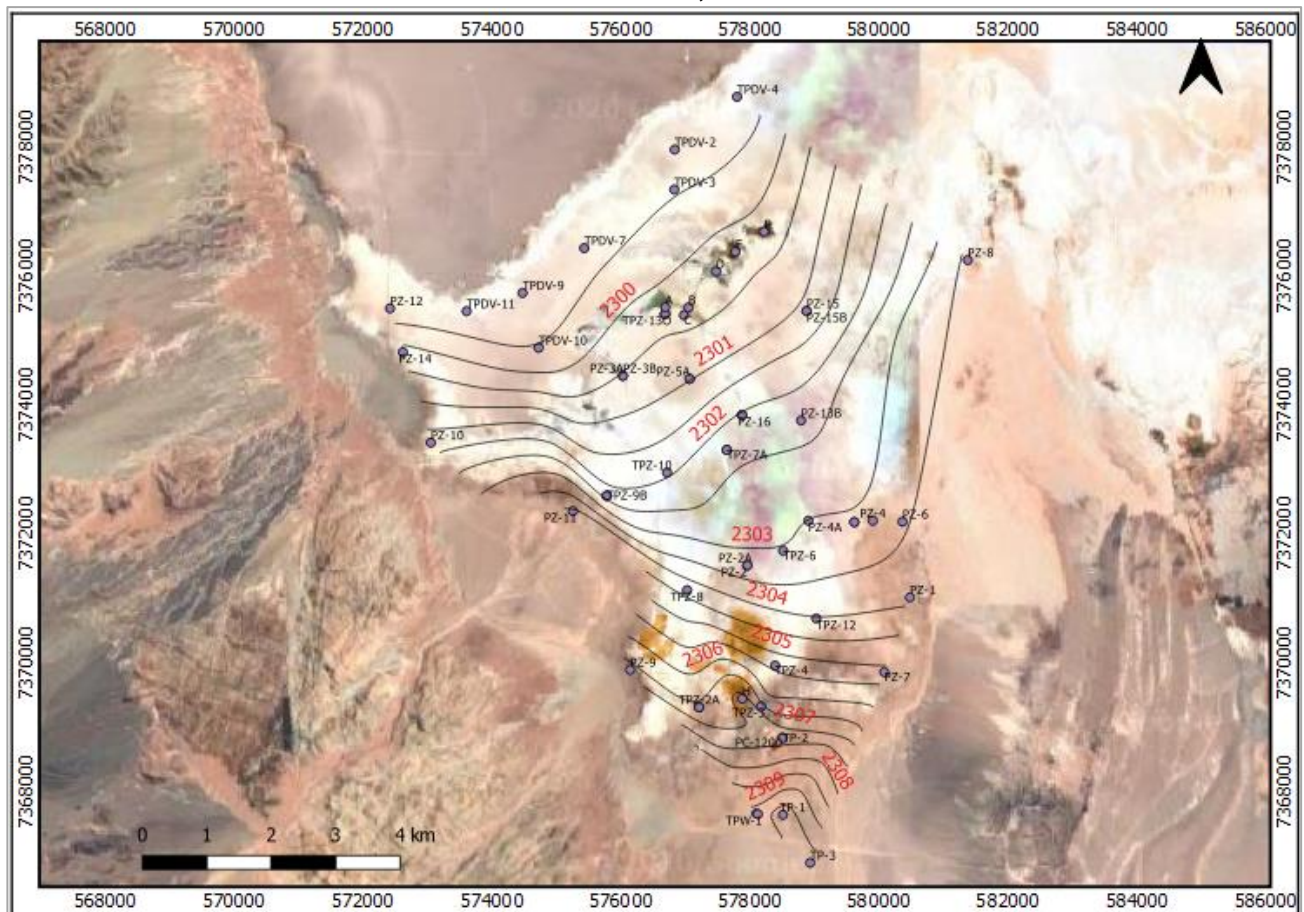
Estación	WGS 84, 19S		Cota Max (m s.n.m)	Cota Min (m s.n.m)	Cota Promedio (m s.n.m)
	E (m)	N (m)			
PC-1200	578494	7368814	2307,10	2307,05	2307,08
PZ-1	580474	7370992	2303,86	2303,86	2303,86
PZ-10	573038	7373394	2301,77	2301,69	2301,73
PZ-11	575243	7372332	2304,40	2304,40	2304,40
PZ-12	572404	7375478	2299,14	2299,05	2299,11
PZ-13B	578785	7373737	2302,26	2302,26	2302,26
PZ-14	572604	7374799	2300,18	2300,10	2300,14
PZ-15	578870	7375439	2301,02	2301,02	2301,02
PZ-15B	578869	7375438	2301,03	2301,03	2301,03

Estación	WGS 84, 19S		Cota Max	Cota Min	Cota Promedio
	E (m)	N (m)	(m s.n.m)	(m s.n.m)	(m s.n.m)
PZ-16	577866	7373821	2302,20	2302,09	2302,15
PZ-16A	577866	7373821	2302,19	2302,14	2302,16
PZ-16B	577867	7373821	2302,17	2302,08	2302,13
PZ-2	577950	7371487	2303,14	2303,08	2303,11
PZ-2A	577950	7371488	2303,15	2303,08	2303,12
PZ-3A	576019	7374432	2300,49	2300,46	2300,47
PZ-3B	576020	7374432	2300,49	2300,45	2300,47
PZ-4	579898	7372182	2303,09	2303,02	2303,06
PZ-4A	578897	7372182	2303,11	2303,02	2303,07
PZ-5A	577054	7374385	2300,99	2300,91	2300,96
PZ-5B	577055	7374384	2301,00	2300,91	2300,97
PZ-6	580358	7372167	2303,31	2303,23	2303,28
PZ-7	580076	7369831	2305,12	2305,03	2305,08
PZ-8	581371	7376229	2303,60	2303,51	2303,57
PZ-9	576132	7369866	2306,75	2306,67	2306,70
TE-1	578091	7367635	2309,18	2309,13	2309,16
TP-1	578503	7367615	2309,86	2309,71	2309,76
TP-2	578497	7368805	2307,30	2307,25	2307,28
TP-3	578925	7366868	2309,73	2309,68	2309,71
TPDV-10	574711	7374866	2299,39	2299,39	2299,39
TPDV-11	573593	7375436	2299,09	2298,97	2299,03
TPDV-2	576822	7377945	2299,10	2299,05	2299,07
TPDV-3	576816	7377324	2299,49	2299,47	2299,48
TPDV-4	577790	7378764	2299,03	2299,01	2299,02
TPDV-7	575418	7376415	2299,25	2299,17	2299,21
TPDV-9	574462	7375719	2299,14	2299,14	2299,14
TPW-1	578113	7367626	2309,25	2309,20	2309,23
TPZ-10	576704	7372928	2301,85	2301,76	2301,80
TPZ-12	579020	7370663	2303,98	2303,88	2303,92
TPZ-13C	576674	7375391	2300,38	2300,29	2300,35
TPZ-13E	576675	7375391	2300,22	2300,14	2300,20
TPZ-13O	576674	7375391	2300,45	2300,38	2300,42
TPZ-2A	577200	7369287	2306,30	2306,18	2306,22
TPZ-2B	577201	7369287	2306,12	2305,99	2306,04
TPZ-2C	577201	7369287	2306,39	2306,28	2306,31
TPZ-3	578166	7369303	2305,89	2305,80	2305,84
TPZ-4	578381	7369933	2305,26	2305,18	2305,23
TPZ-5A	579612	7372160	2302,99	2302,91	2302,96
TPZ-5B	579611	7372160	2303,06	2302,99	2303,02
TPZ-6	578506	7371715	2302,97	2302,90	2302,94
TPZ-7A	577631	7373281	2302,25	2302,18	2302,23
TPZ-7B	577631	7373281	2302,44	2302,41	2302,42

Estación	WGS 84, 19S		Cota Max (m s.n.m)	Cota Min (m s.n.m)	Cota Promedio (m s.n.m)
	E (m)	N (m)			
TPZ-8	577015	7371104	2304,27	2304,22	2304,25
TPZ-9B	575768	7372570	2302,11	2302,04	2302,07
TPZ-9C	575769	7372570	2301,96	2301,94	2301,95
A	576677	7375496	2300,16	2300,07	2300,13
B	577035	7375491	2300,21	2300,18	2300,20
C	576965	7375372	2300,17	2300,15	2300,16
D	577465	7376054	2300,23	2300,22	2300,23
E	577765	7376360	2300,37	2300,24	2300,27
F	578209	7376670	2300,12	2300,04	2300,09
H	577873	7369420	2307,57	2307,37	2307,42

Fuente: Elaboración propia a partir de MEL-Golder (2017).

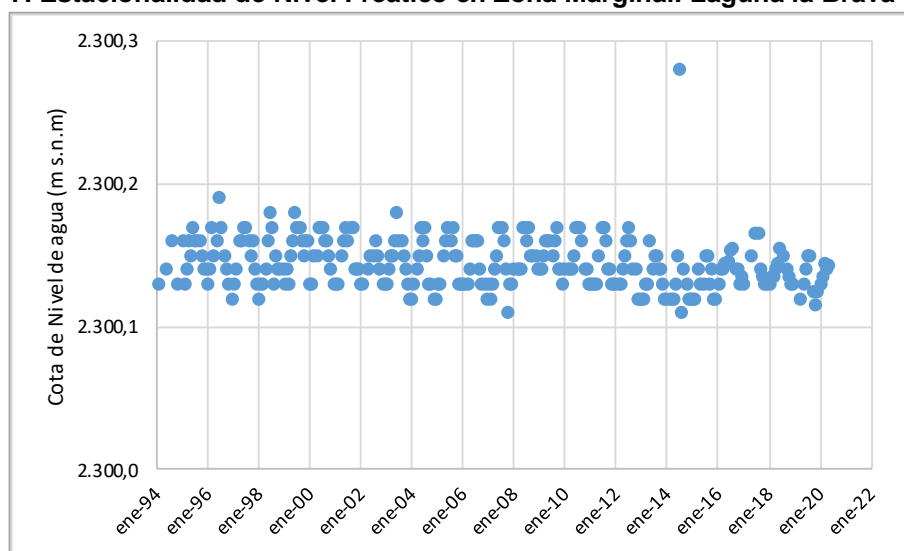
Figura 4-6. Isopiezas en Zona Marginal del Sector sur del Salar de Atacama. Invierno 2009. Curvas de nivel cada 0,5 m



Fuente: Elaboración propia a partir de registros de MEL- Golder (2017).

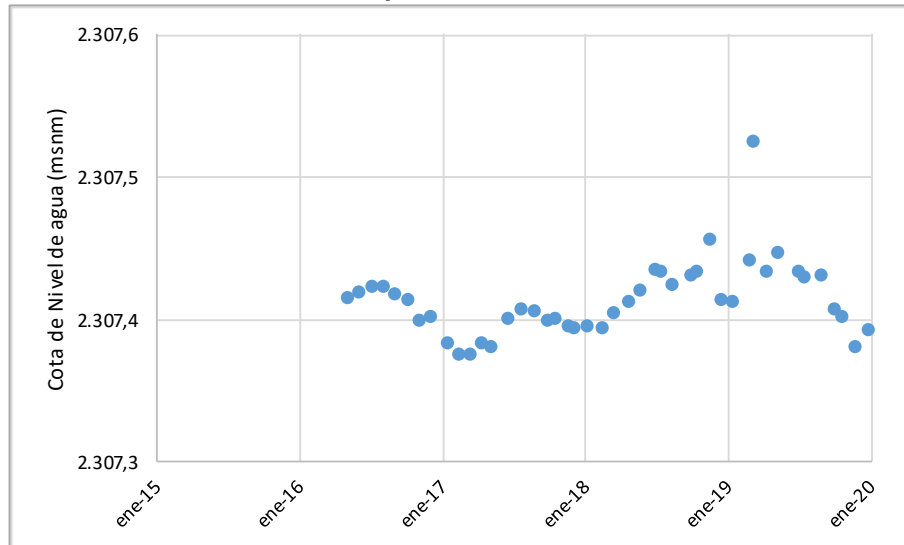
En la Figura 4-7 a Figura 4-9, se muestran ejemplos de la variación del nivel freático en diferentes sectores de la Zona Marginal, con el objeto de caracterizar su variación estacional. Se hace énfasis en lo anterior, ya que en secciones posteriores del presente informe se desarrolla un análisis respecto a los cambios temporales, interanuales, del nivel freático. Se incluyen puntos superficiales en Laguna La Brava (punto C) y el humedal de Tilopozo (punto LM-16, de Albemarle, ubicado en humedal TL2) y un pozo somero (Til-P03), ubicado en el borde norte de humedal TL2, también de Albemarle. En todos los puntos se aprecian registros mínimos en verano. En el punto C hay una variación estacional con amplitud cercana a 5-10 cm, mientras que en Til-P03 es del orden de 40 cm. En el caso del punto LM-16, aunque los valores máximos normalmente se verifican en invierno (salvo en 2019, asociado al efecto de precipitaciones intensas, que se describen en el acápite 4.2.1.1 y que también generaron efectos en el nivel medido en el pozo Til-P03), no es tan marcada la tendencia estacional, diferenciándose los valores máximos y mínimos en alrededor de 5 cm.

Figura 4-7. Estacionalidad de Nivel Freático en Zona Marginal. Laguna la Brava- (punto C)



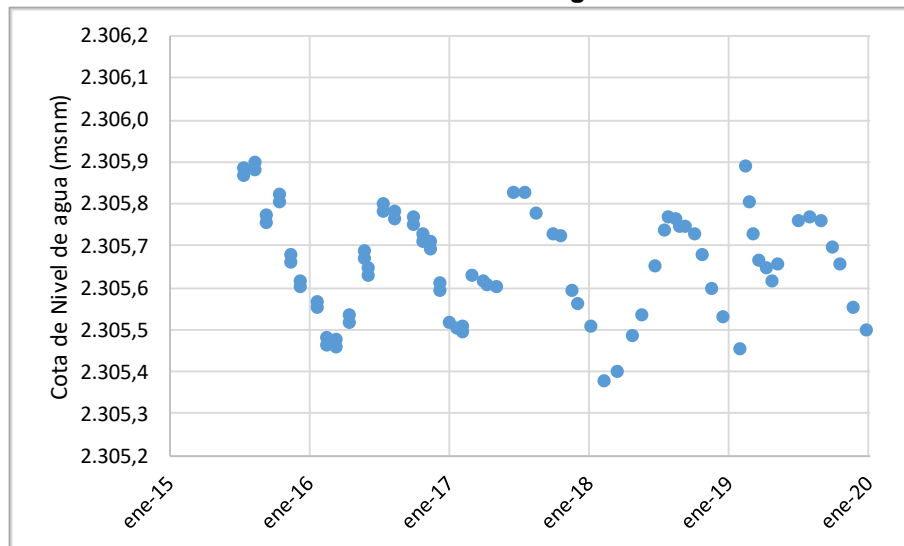
Fuente: Elaboración propia

Figura 4-8. Estacionalidad de Nivel Freático en Zona Marginal. Humedal TL2 en humedal de Tilopozo, punto LM-16



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-9. Estacionalidad de Nivel Freático en Zona Marginal. Borde norte humedal TL2, Til-P03



Fuente: Elaboración propia

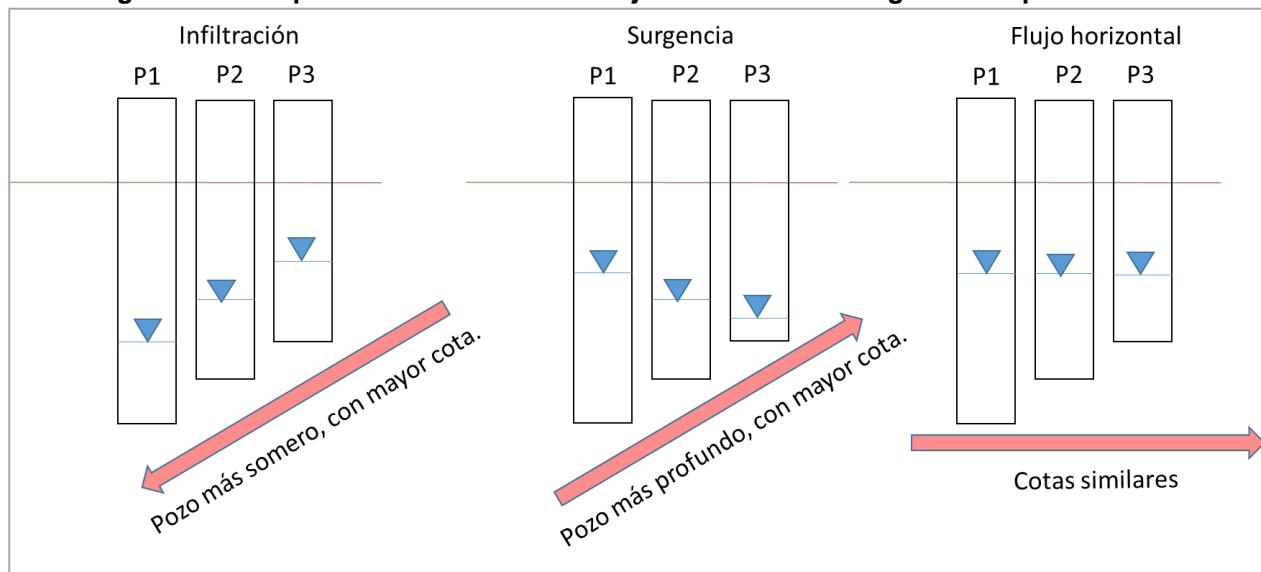
4.1.2 Flujos verticales en la Zona Marginal

El modelo conceptual descrito en la Sección 4.1, da cuenta en términos generales de la dinámica del acuífero en la Zona Marginal del borde sur del Salar de Atacama (dulce/salobre). Sin embargo, no hace referencia a condiciones particulares que se dan en el humedal de Tilopozo.

La existencia de sectores con presencia de agua superficial, como las lagunas La Punta y La Brava, son una consecuencia de la existencia de flujos ascendentes con una componente vertical variable, que producen la surgencia del agua subterránea. Es posible evaluar la existencia y la dirección de flujos subterráneos

verticales, por medio de mediciones en multipiezómetros, donde la diferencia de cota piezométrica sería una evidencia de la existencia de dichos flujos verticales. En términos generales, si el pozo habilitado a mayor profundidad corresponde al que presenta una mayor cota piezométrica, esto indica que hay mayor presión a mayor profundidad, por lo que el flujo es ascendente (surgencia). En caso contrario, si el pozo habilitado a menor profundidad es el que presenta una mayor cota piezométrica, esto es indicativo de que el flujo es descendente (infiltración). Si las cotas medidas por los diferentes piezómetros son similares, sería indicativo de un flujo horizontal, sin una componente vertical significativa (ver Figura 4-10).

Figura 4-10. Esquema de evaluación de flujos verticales con registros en piezómetros



Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis se cuenta con información de registros de cota piezométrica en diferentes multipiezómetros someros propiedad de MEL (identificados como “TPZ” y “PZ”), correspondientes a grupos de 2 ó 3 piezómetros habilitados a diferentes profundidades, hasta los primeros 3 a 4 metros bajo el nivel de terreno, los que permiten identificar y describir diversas zonas de afloramiento e infiltración en el sector de estudio (Tabla 4-2 y Figura 4-11). Además, también se cuenta para el análisis con el multipiezómetro MP-04A de Albemarle, ubicado en el entorno del humedal de Tilopozo, cuyos registros de cota piezométrica han sido comparados con las mediciones del pelo de agua en el punto de monitoreo superficial LM-16, ubicado en el mismo humedal. Adicionalmente, se han incluido en el análisis registros del pozo MA-01 y del barreno BA-15, por la relación entre la cota piezométrica del pozo y la cota de terreno (tema que se detalla más adelante). Por otra parte, no se han considerado los multipiezómetros MP-X en el análisis (par de piezómetros MP-XA y MP-XB), dado que por un lado presentan diferencias significativas de densidad entre ellos (el pozo profundo, MP-XB, mide en salmuera) y a que en su mayoría los pozos MP-XB presentan registros irregulares en su cota piezométrica. A modo de ejemplo, la Figura 4-12 muestra la variación de la cota piezométrica en el pozo MP-06B, ubicado en el entorno del Cordón de Lila, cuya variación en el período de registros ha sido cercana a 6 metros, lo que se puede deber a problemas constructivos de los pozos y/o a método de medición.

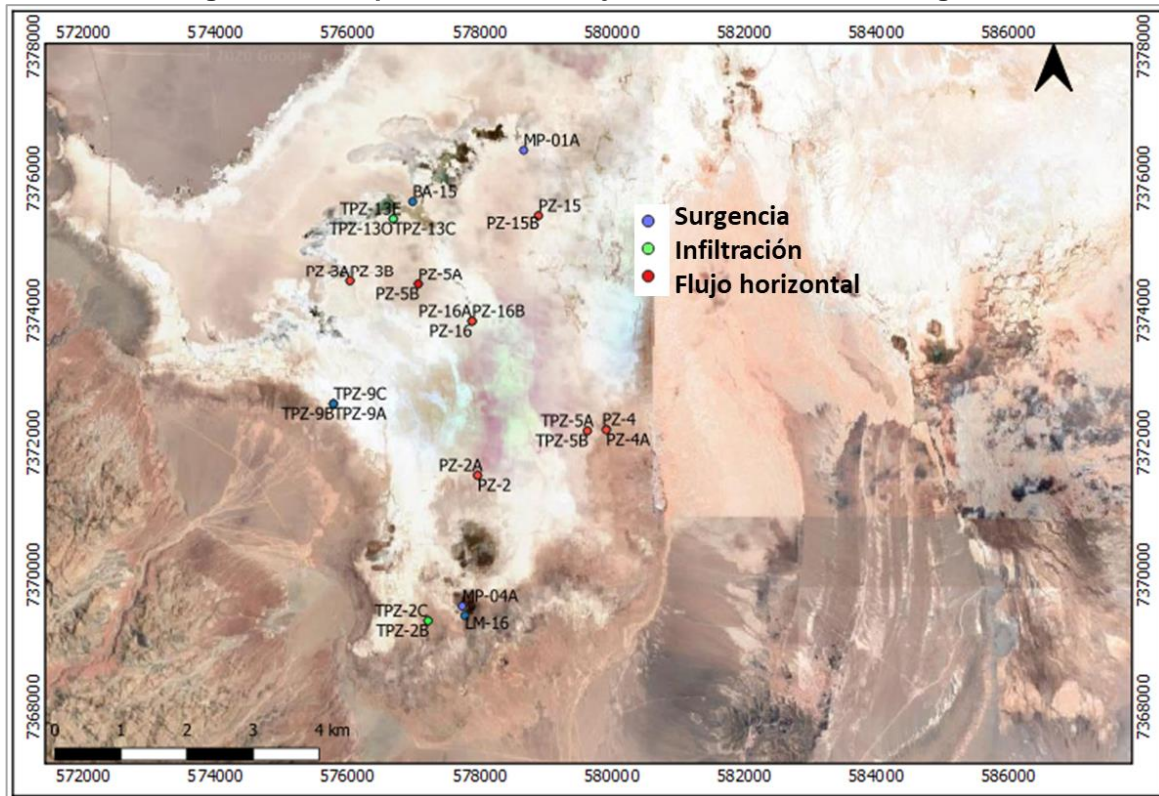
Tabla 4-2 Multipiezómetros utilizados para caracterizar flujos verticales y resultados del análisis

Punto de medición	Cota terreno	Profundidad habilitación	Cota habilitación	Período de registros	P50 ⁽¹⁾ Cota piezométrica	Diferencia cota	Tipo de flujo
	m s.n.m	m	m s.n.m		m s.n.m	m	
TPZ-2B	2307,18	2,32	2304,86	2000-2017	2306		Infiltración
TPZ-2A	2307,72	2	2305,72	2000-2017	2306,165	-0,165	
TPZ-2C	2307,31	1,32	2305,99	2000-2017	2306,27	-0,105	
TPZ-13C	2300,72	2,9	2297,82	2007-2017	2300,325		Infiltración
TPZ-13O	2300,81	1,41	2299,4	2007-2017	2300,4	-0,075	
TPZ-5B	2304,23	2,86	2301,37	2000-2017	2302,995		Flujo horizontal/leve surgencia
TPZ-5A	2303,75	1,4	2302,35	2000-2017	2302,985	0,01	
TPZ-9A ⁽²⁾	2302,39	4,4	2297,99	2000-2017	2301,99		Surgencia
TPZ-9B	2302,35	2,2	2300,15	2000-2017	2301,945	0,045	
TPZ-9C	2302,33	1,4	2300,93	2000-2017	2301,787	0,158	
PZ-16	2302,54	1,52	2301,02	2008-2017	2302,078		Flujo horizontal
PZ-16A	2302,48	0,63	2301,85	2008-2017	2302,08	-0,002	
PZ-16B	2302,54	0,6	2301,94	2008-2017	2302,075	0,005	
PZ-15	2301,56	1,72	2299,84	2008-2009	2301,075		Flujo horizontal/leve surgencia
PZ-15B	2301,48	0,68	2300,8	2008-2009	2301,085	-0,01	
PZ-2	2303,67	1,7	2301,97	2008-2017	2303,0405		Flujo horizontal
PZ-2A	2303,71	0,73	2302,98	2008-2017	2303,045	-0,0045	
PZ-3A	2300,76	0,79	2299,97	2008-2017	2300,42		Flujo horizontal
PZ-3B	2300,75	0,7	2300,05	2008-2017	2300,415	0,005	
PZ-4	2303,75	1,52	2302,23	2008-2017	2303,02		Flujo horizontal
PZ-4A	2303,78	0,85	2302,93	2008-2017	2303,02	0	
PZ-5A	2301,53	0,75	2300,78	2008-2017	2300,956		Flujo horizontal/leve infiltración
PZ-5B	2301,54	0,58	2300,96	2008-2017	2300,963	-0,007	
MP-04A	2308,099	41,5	2266,599	2013-2019	2307,637		Surgencia
LM-16	2307,413	-	-	2013-2019	2307,413	0,224	
MP-01A	2300,733	7,15	2293,583	2013-2019	2300,740	(3)	Surgencia
BA-15	2300,013	1,095	2298,918	2013-2019	2299,991	(3)	Surgencia

¹ P50 corresponde a mediana. ² Se usaron registros hasta 2009, por anomalías en TPZ-9A. ³ Para análisis de flujo vertical, se compara cota piezométrica con cota de terreno.

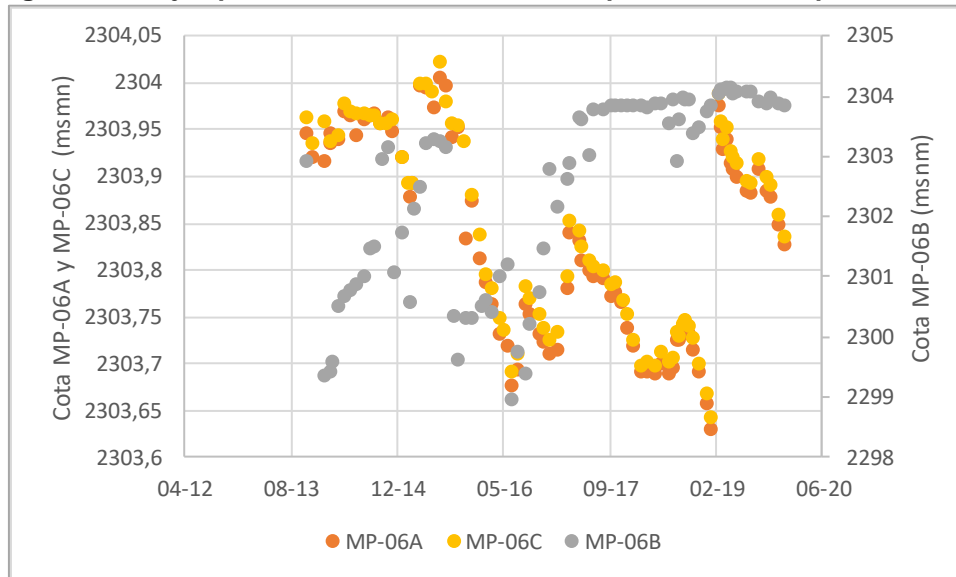
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-11. Mapa resumen de flujos verticales en Zona Marginal



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-12. Ejemplo variación anómala de cota piezométrica en pozo MP-06B



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al análisis desarrollado, se observa la existencia de flujos horizontales en gran parte de la extensión del área estudiada. Respecto a los flujos verticales, se verificaron flujos surgentes en la zona del humedal de Tilopozo, en las lagunas y en el borde oeste de la zona marginal, junto a depósitos aluviales del

Cordón de Lila. Adicionalmente, existiría un flujo vertical descendente (infiltración) en el multipiezómetro TPZ-2. Una descripción de los principales resultados se presenta a continuación.

- Flujo horizontal. La cota piezométrica es similar en los piezómetros, en las diferentes campañas de monitoreo. Esto se verificó en la mayoría de los puntos interiores de la Zona Marginal. En algunos de ellos hubo diferencias menores (del orden de un centímetro), pero permanentes en el tiempo, por lo que se considera que el flujo es horizontal, pero con una leve componente vertical. La Figura 4-13 muestra ejemplos de flujo horizontal en el piezómetro PZ-2 y horizontal, pero con una leve componente vertical, en PZ-5.
- Flujo vertical - Infiltración: La cota piezométrica es mayor en los piezómetros habilitados a mayor cota. En el borde suroeste del humedal de Tilopozo, en el multipiezómetro TPZ-2 se presenta esta condición, tal como se aprecia en la Figura 4-14. Se verificó una situación similar para el multipiezómetro TPZ-13, ubicado junto a la laguna La Brava, unos 100 m al sur de esta, y en el entorno de diferentes afloramientos de agua. En este sentido, se habría esperado que los flujos fueran ascendentes. Aunque es posible que el resultado obtenido en este último caso se deba a algún problema asociado a la construcción del multipiezómetro, también podría ser una consecuencia de la heterogeneidad del sistema, donde las condiciones locales tienen una influencia significativa en el flujo, lo que podría implicar la existencia de flujos con características diferentes en zonas cercanas, y/o a cambios en la densidad. La Figura 4-14 muestra las mediciones en los piezómetros.
- Flujo vertical- Flujo surgente: Se verificaron condiciones de surgencia en tres sectores, los que se describen a continuación:

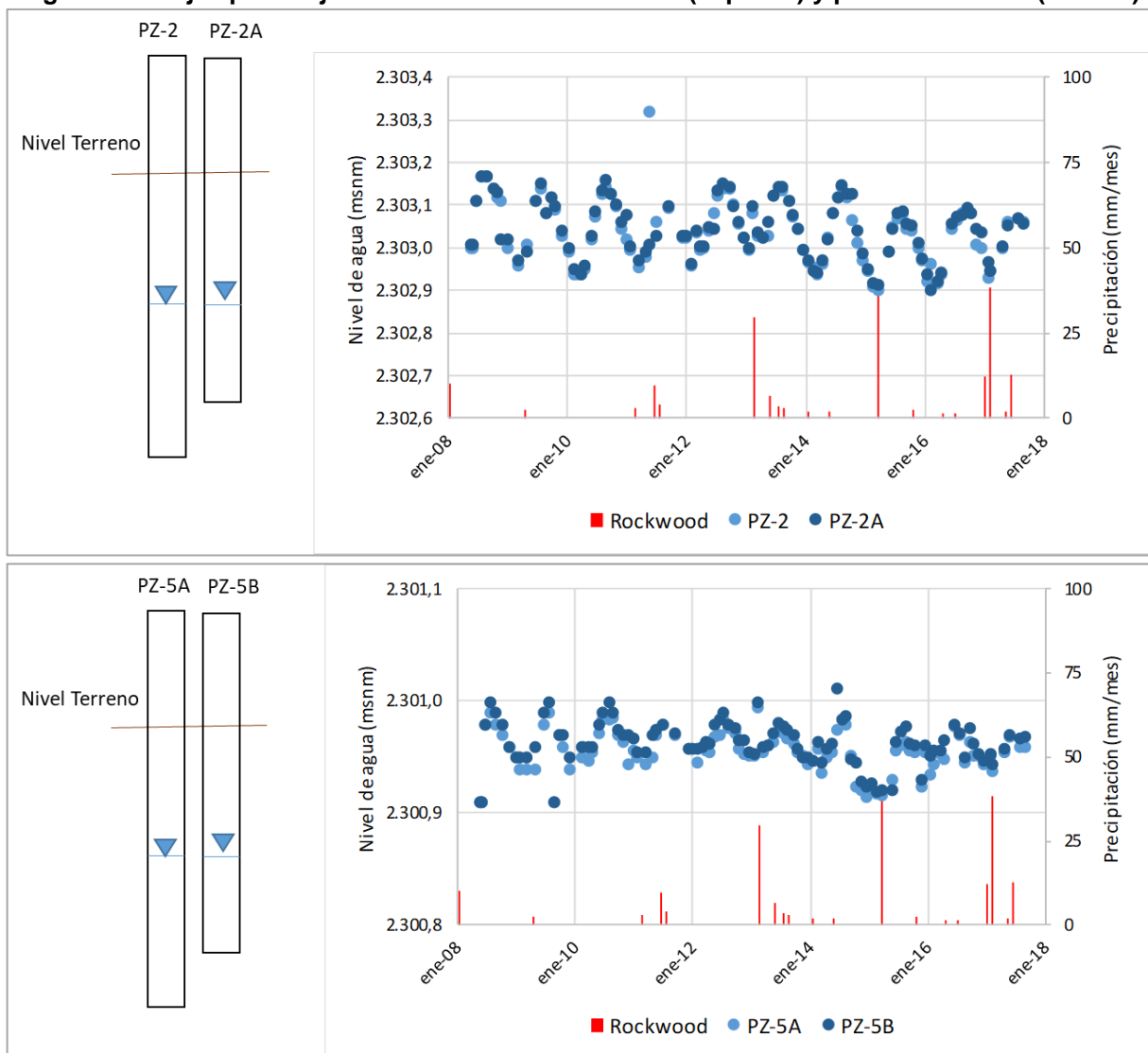
Sector humedal de Tilopozo: Para el análisis de los registros se consideró el pozo MP-04A y el punto superficial LM-16, ambos ubicados en el humedal TL2. La cota piezométrica medida en este pozo es superior a la del pelo de agua del punto superficial LM-16 (ver Figura 4-15). Al respecto, cabe destacar que el punto de monitoreo LM-16 se ubica unos 150 m al sur del multipiezómetro MP-04 y que el flujo subterráneo del acuífero MNT escurre hacia el norte, por lo que se esperaría que su cota fuera superior a la de los pozos. Considerando lo anterior, la presencia de agua superficial en LM-16 sería consecuencia de flujos subterráneos que afloran en presión en este sector. Esto daría cuenta de la existencia de flujos verticales ascendentes (surgencia), en el humedal TL2, posiblemente en diferentes secciones de este.

Zona borde oeste: En el multipiezómetro TPZ-9, ubicado en una zona de depósitos aluviales asociados al Cordón de Lila, se verificó la existencia de un flujo ascendente, con mayores cotas del nivel de agua en los pozos habilitados a mayor profundidad. Se debe destacar que, de acuerdo a los registros, el piezómetro TPZ-9A comenzó a funcionar de manera irregular durante el año 2009, por lo que para efectos de la Tabla 4-2 solamente se consideran los registros hasta ese año para este multipiezómetro. Los resultados se presentan en la Figura 4-16.

Zona lagunas: De acuerdo a lo indicado, en la zona de las lagunas solamente se cuenta con un punto que permite realizar análisis de flujos verticales a partir de registros de multipiezómetros (multipiezómetro TPZ-13, en este caso), siendo este descendente. Debido a que en ese sector afloran las aguas que forman las lagunas, se estima que esto podría dar cuenta de una condición hidrogeológica local en torno TPZ-13, o podría estar asociado a algún problema relacionado con uno o varios de los piezómetros que lo componen. Para verificar la existencia de surgencia en esta zona,

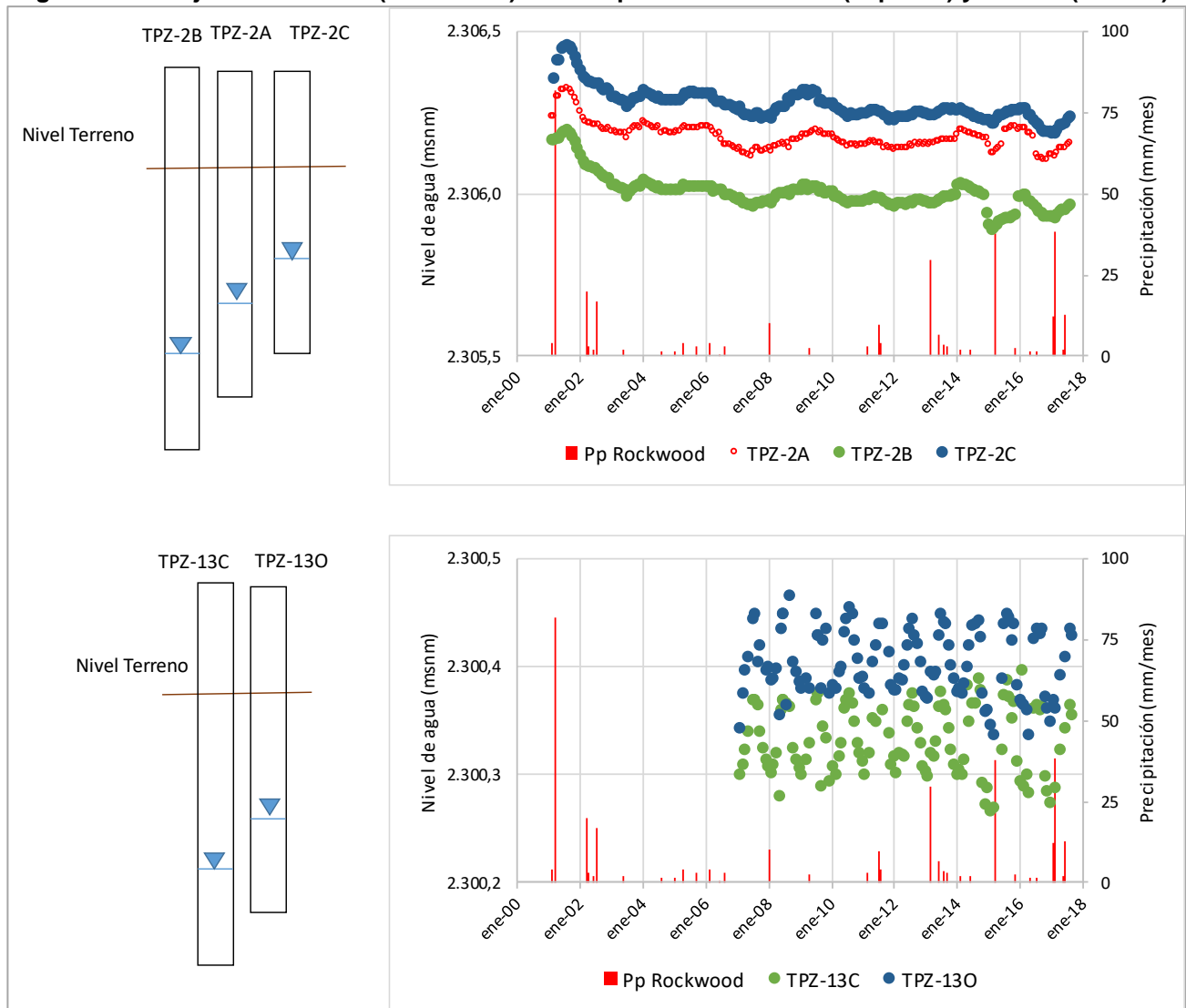
se desarrolló un análisis complementario, utilizando para esto la información de los barrenos (pozos someros) de propiedad de Albemarle ubicados al norte de las lagunas La Punta y La Brava (“BA”), y el multipiezómetro MP-01A, habilitado a poco más de 7 metros de profundidad. Se comparó la cota medida en estos puntos de monitoreo, con la cota de terreno. Si la cota piezométrica es superior a la cota de terreno (NT), esto implica que hay surgencia de los flujos. Los resultados se presentan en la Figura 4-17 y muestran que en el pozo MP01-A y en el barreno BA-15 existe surgencia de aguas durante invierno (en verano disminuyen los niveles por efecto de la evapotranspiración, ver acápite 4.2.2). También se muestra como ejemplo el barreno BA-08, en el que el nivel de agua se mantiene de forma permanente por debajo del nivel de terreno, no existiendo afloramiento superficial. En este caso, no es posible determinar la existencia de flujo vertical.

Figura 4-13. Ejemplos flujo horizontal. Piezómetro PZ-2 (superior) y piezómetro PZ-5 (inferior)



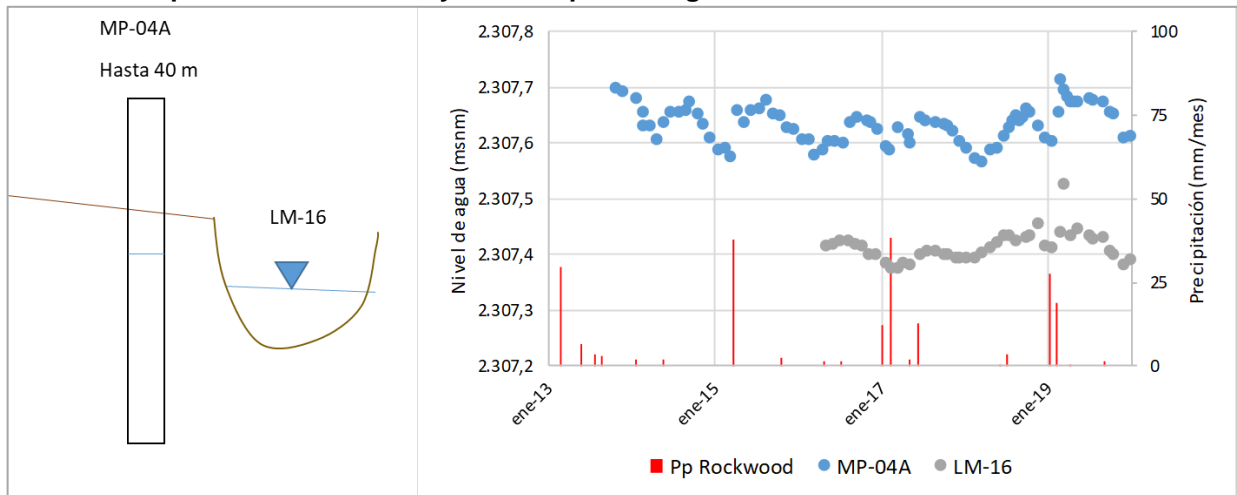
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-14. Flujo descendente (infiltración) en multipiezómetros TPZ-2 (superior) y TPZ-13 (inferior)



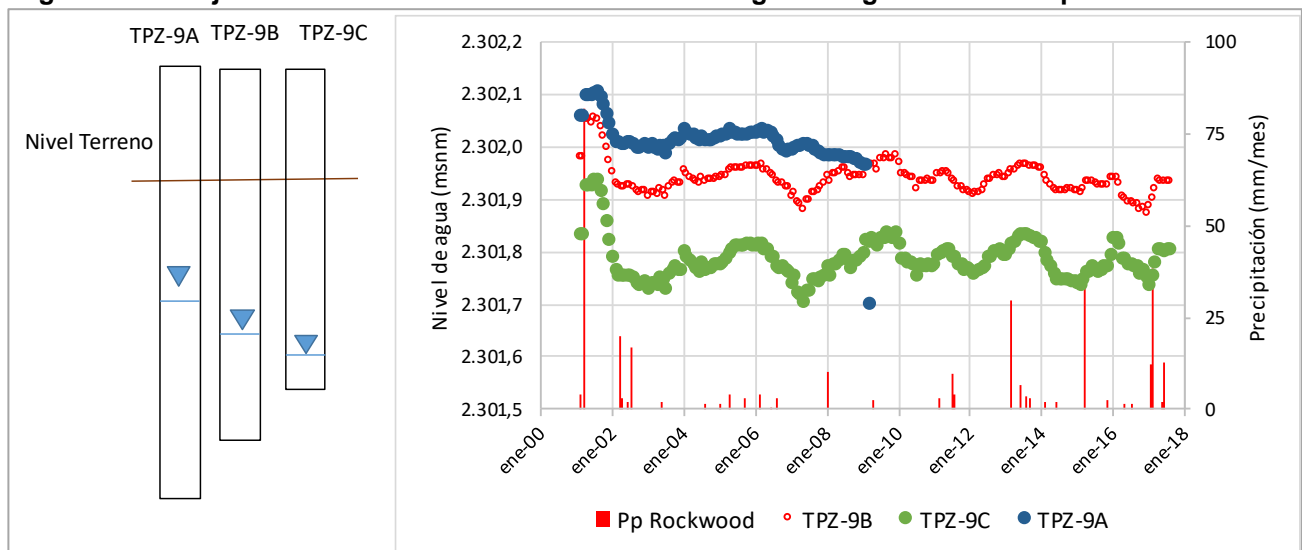
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-15. Flujo ascendente en zona de humedal de Tilopozo. Comparación de registros de piezómetros MP-04A y nivel de pelo de agua medido en estación LM-16



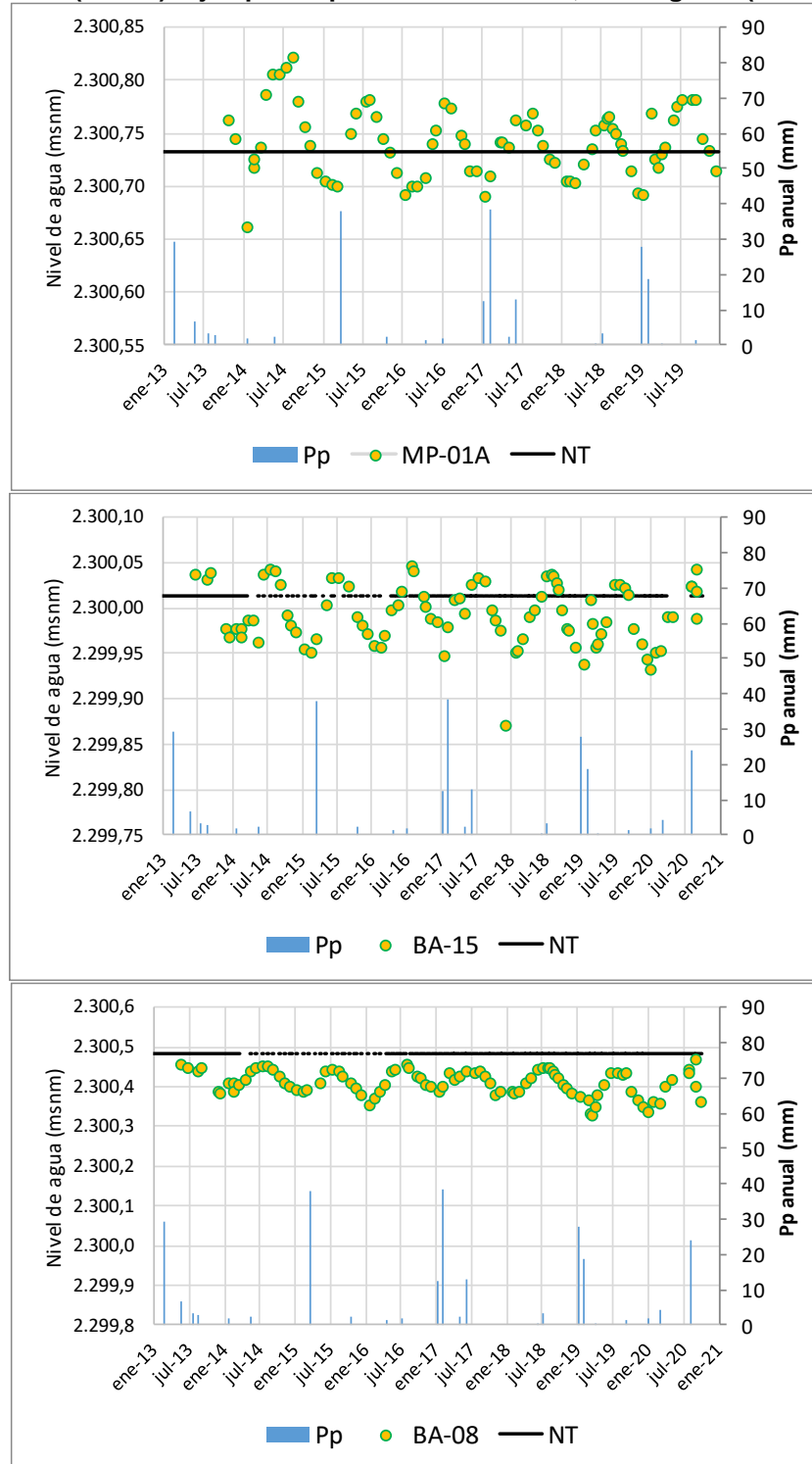
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-16. Flujo ascendente en borde oeste de Zona Marginal. Registros de multipiezómetro TPZ-9



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-17. Flujo surgente en el entorno de lagunas. Pozo profundo MP-01A (superior) y pozo somero BA-15 (medio). Ejemplo de pozo somero BA-08, no surgente (inferior)



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Distribución de conductividad eléctrica en acuífero dulce/salobre

La calidad de agua en el acuífero MNT en la Zona Marginal es variable en el espacio, en particular, en lo que respecta a la concentración de sales disueltas. Para su caracterización, se ha incluido información de puntos de monitoreo superficial y de diversos pozos someros, cuyos registros no estén influenciados por la presencia del acuífero profundo de salmuera. Es importante destacar que, con la excepción de puntos de monitoreo superficial y de los piezómetros MP-01 a MP-09 de Albemarle, no se cuenta con series de tiempo consistentes en relación a la frecuencia de medición y con extensión temporal suficiente, que permitan evaluar la variación en el tiempo de la salinidad del agua.

Se ha considerado el parámetro conductividad eléctrica para caracterizar la concentración de sales disueltas. La Tabla 4-3 muestra los valores mínimo y máximo medidos en cada punto de monitoreo con información, indicando el número total de datos y el período de los registros.

Tabla 4-3 Registros considerados para caracterización de calidad de agua

Estación	CE Min ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE Max ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	N° datos	Período de registros	Origen información
PZ-10	5.090	14.100	15	2010-2015	MEL- Golder (2017) y GAC-CMZ (2019).
PZ-12	87.300	142.200	15	2009-2015	
PZ-13B	3.050	13.500	15	2009-2015	
PZ-16	3.180	20.760	16	2010-2015	
PZ-16A	7.270	7.270	1	2013	
PZ-2	2.820	12.630	19	2009-2015	
PZ-3b	14.060	57.350	13	2009-2015	
PZ-4	3.980	12.340	14	2010-2015	
PZ-5A	4.470	25.430	15	2009-2015	
PZ-7	2.940	4.200	15	2010-2015	
PZ-8	6.200	17.520	16	2009-2015	
PZ-9	4.740	7.750	6	2009-2011	
TE-4	3.040	11.800	16	2010-2015	
TPDV-09	136.600	136.600	1	2013	
TPDV-2	40.600	79.200	15	2010-2015	
TPZ-12	2.880	16.360	15	2010-2015	
TPZ-1A	9.560	9.560	1	2013	
A	65.300	155.400	76	1996-2016	
B	22.300	187.600	76	1996-2016	
C	21.000	81.500	76	1996-2016	
D	15.560	40.000	76	1996-2016	
E	15.380	34.500	76	1996-2016	
F	21.100	93.600	76	1996-2016	
H	3.900	4.220	76	1996-2016	
BA-07	35.700	41.050	2	2017-2018	SQM, 2020.
BA-08	50.900	68.870	2	2017-2018	
BA-09	98.240	98.240	1	2018	
BA-10	49.100	49.400	2	2017-2018	

Estación	CE Min ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE Max ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	N° datos	Período de registros	Origen información	
BA-11	29.100	53.220	2	2017-2018		
L12-2	20.300	36.720	3	2017-2018		
L12-3	16.840	21.080	3	2017-2018		
PZ-5B	10.130	10.130	1	2013	RWL-SGA (2015).	
PZ-8	9.100	11.470	7	2013		
Tilopozo	3.720	4.310	8	2013		
TP-1	3.630	4.230	6	2013		
TPDV-08	223.500	246.300	6	2013		
TPDV-09	84.800	136.600	1	2013		
TPZ-2A	2.870	2.870	1	2013		
Tucúcaro	6.280	7.430	8	2013		
LM-01	31.700	94.000	20	2016-2019		Base de datos Albemarle (2020).
LM-02	32.100	93.700	20	2016-2019		
LM-03	71.300	180.100	20	2016-2019		
LM-04	49.000	179.300	20	2016-2019		
LM-16	3.980	5.050	20	2016-2019		
MP-01A	20.500	27.330	48	2013-2019		
MP-03A	5.660	9.780	49	2013-2019		
MP-04A	4.120	7.160- 42.900 ⁽¹⁾	50	2013-2019		
MP-05A	23.100	71.800	49	2013-2019		
MP-06A	11.780	74.600	23	2013-2019		
MP-09A	4.100	5.870	19	2013-2019		

¹ Durante 2016-2018 se midieron diversos valores superiores a 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se estima que estos registros podrían estar influenciados por la salmuera ubicada bajo el acuífero dulce/salobre.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de RWL-SGA (2015), MEL- Golder (2017), CMZ-GAC (2019), SQM (2020) y ALB (2020).

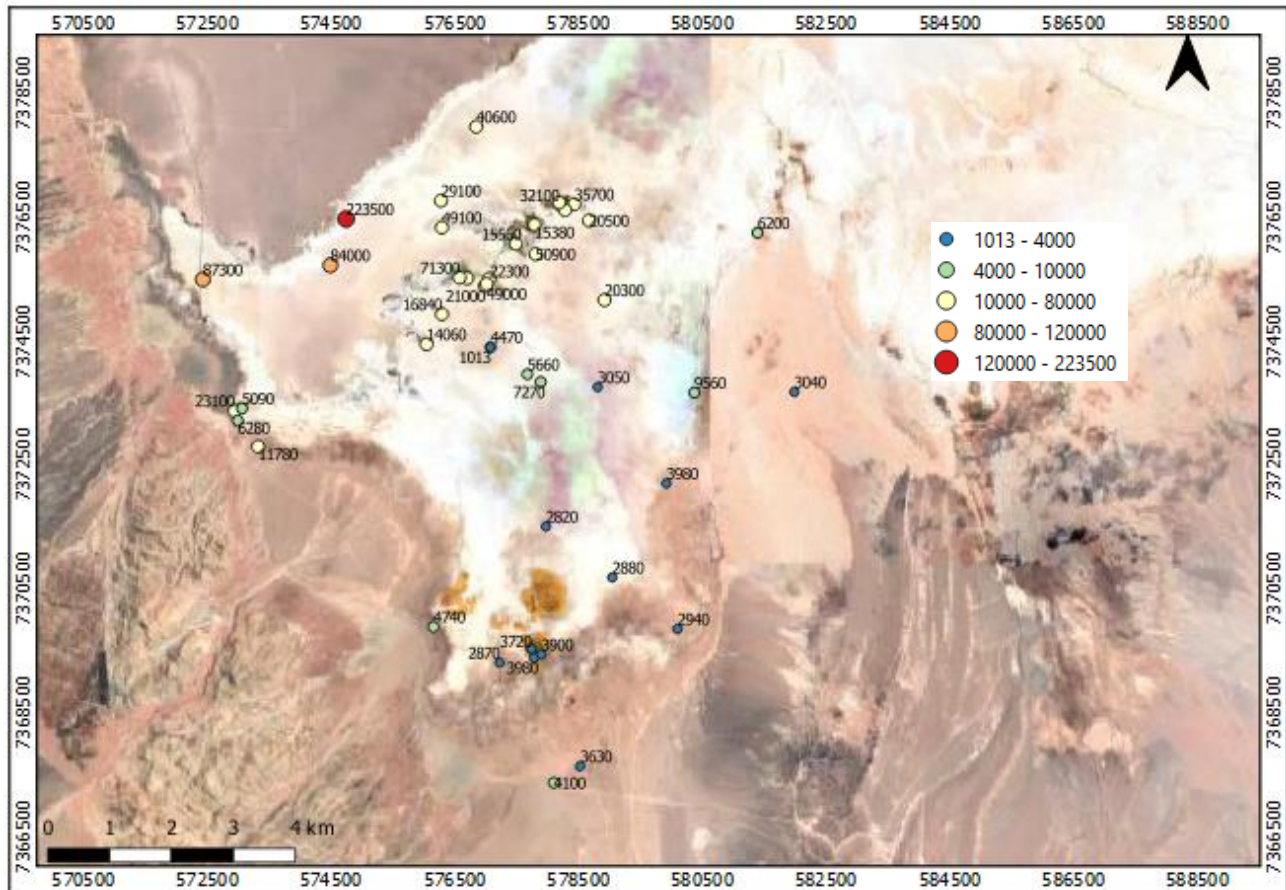
La Figura 4-18 muestra la distribución espacial de los registros de CE, en el cual se indica valor mínimo de CE en cada estación de monitoreo.

De acuerdo a los registros, en el borde sur de la Zona Marginal y, en particular, en torno al humedal de Tilopozo (entre otros, pozos TPZ-2A, MP-04A y Tilopozo y estaciones de monitoreo de agua superficial LM-16 y H, ubicadas una junto a la otra), la conductividad eléctrica varía en torno a 2.500 – 5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mostrando una baja variabilidad entre los valores mínimos y máximos. Es importante tener presente para el caso de los pozos indicados, que la extensión temporal de los registros es acotada, por lo que no incluye potenciales cambios interanuales, salvo para el pozo MP-04A. Respecto a este último, durante el período 2016-2018 presentó valores de CE superiores a 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo el valor máximo superior a 40.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se estima que alguno de esos valores pudo haber estado influenciado por la salmuera ubicada bajo el acuífero dulce/salobre, no representando la calidad de agua de este último.

Hacia el norte del humedal de Tilopozo, los valores mínimos son, en diversos puntos de medición, del orden de 3.000 – 6.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, hasta un sector 1 – 2 km al sur de las lagunas, aunque hay un incremento en los registros máximos, hasta valores superiores a 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ver pozos PZ-2, PZ-10, PZ12, PZ-16b, por

ejemplo en Tabla 4-3). En el entorno de las lagunas, en tanto, se observan incrementos significativos de la CE, con valores máximos en el rango de las conductividades de salmuera y con alta variabilidad entre los valores mínimo y máximo de algunas estaciones de monitoreo, en particular en puntos ubicados en la laguna La Brava, como por ejemplo en las estaciones LM-03 y A (rango de registros 71.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 180.100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 65.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 155.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente).

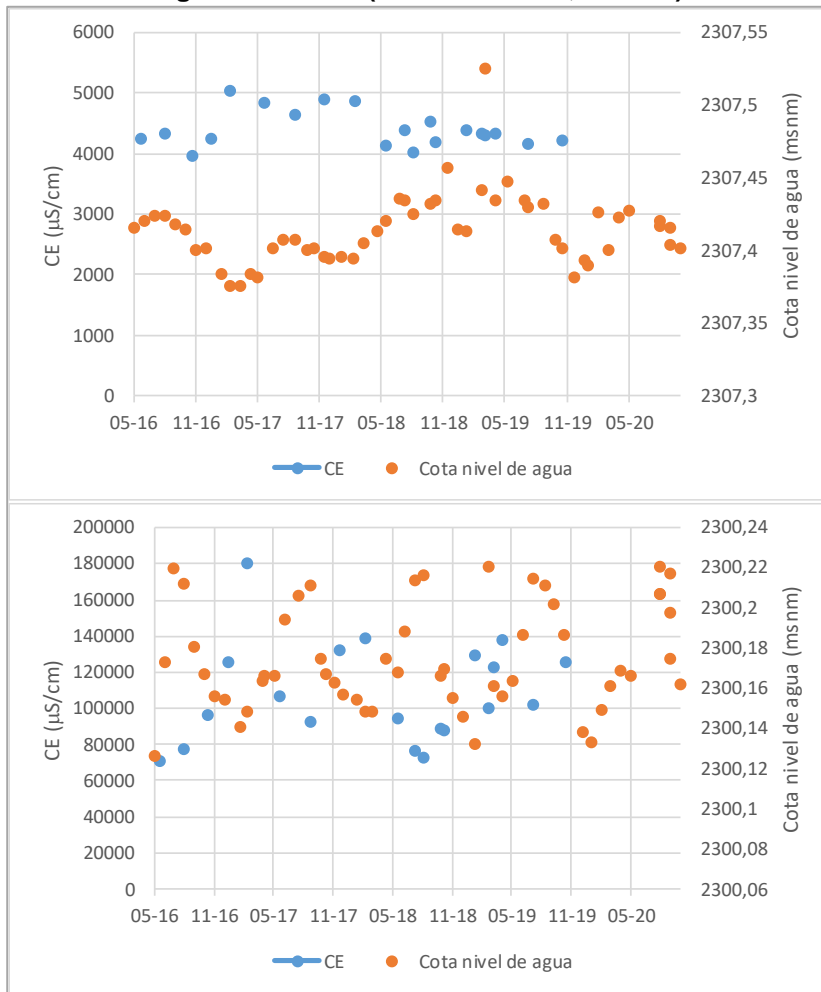
Figura 4-18. Variación de CE en Zona Marginal ($\mu\text{S}/\text{cm}$)



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4-19 muestra las diferencias en la dinámica de la variación temporal de la CE entre el sector del humedal de Tilopozo (estación LM-16) y la laguna La Brava (LM-03), ambas estaciones de monitoreo superficial. Se aprecia que en el humedal de Tilopozo existe una variabilidad mínima de la CE en el tiempo, en la que no se aprecian componentes estacionales, mientras que LM-03 presenta una variación marcadamente estacional, con valores máximos en verano y mínimos en invierno. Durante el año 2019 es menos claro este comportamiento, lo que estaría asociado a la ocurrencia de precipitaciones significativas entre los meses de enero y febrero de dicho año, que incrementaron los niveles en las lagunas y posiblemente modificaron la calidad de las aguas, dada la mayor dilución asociada (mayor detalle respecto a la precipitación y sus efectos sobre el nivel de agua de dicho evento, se indica en el acápite 4.2.1). Cabe señalar que la menor variabilidad de la CE en la zona de Tilopozo y la estacionalidad en la zona de las lagunas descrita es consistente con información presentada por MEL- Golder (2017) para los mismos sectores en estaciones de monitoreo superficial (A, B, C, D, E, F y H), considerando una mayor extensión temporal de los registros.

Figura 4-19. Variación temporal de la CE en humedal de Tilopozo (estación LM-16, superior) y en laguna La Brava (estación LM-03, inferior)



Fuente: Elaboración propia a partir de información de base de datos de Albemarle, 2020.

4.2 Principales forzantes del acuífero dulce/salobre en la Zona Marginal

Se entiende como forzante del acuífero dulce/salobre (acuífero MNT en Zona Marginal), a los elementos/acciones externos que generan un efecto sobre la profundidad del nivel freático (o el flujo), tanto de origen antrópico, como “natural” (entendido este último como sin influencia antrópica directa). Debido a que el objeto del presente estudio está asociado al análisis y entendimiento de la dinámica temporal de este acuífero, se han relevado las forzantes que varían o pueden variar en el tiempo, considerando la máxima escala temporal del estudio (decenas de años).

Desde el punto de vista de los elementos “naturales” que influyen en el nivel del agua en el acuífero, la precipitación (recarga) y la evapotranspiración (descarga) son las principales forzantes de la variación del nivel freático. En relación a las actividades antrópicas, la de mayor influencia potencial en el nivel freático del acuífero dulce/salobre corresponde a las extracciones de agua en el entorno, asociadas a actividades mineras. Estas incluyen las existentes desde los sectores Negrillar y Monturaqui, zona desde donde proviene el flujo del acuífero dulce/salobre, y en la Zona Marginal (en particular, el Tilopozo). En esta sección se analizan y describen estas forzantes, presentándose su evolución en el tiempo y su relación con cambios identificados en el nivel freático en la Zona Marginal.

4.2.1 Precipitación

4.2.1.1 Caracterización de la precipitación en el área de estudio

La Figura 4-20 presenta las isoyetas con la precipitación media anual en el Salar de Atacama y su cuenca afluyente (RWL-SGA, 2015). El núcleo del Salar, que se ubica en la zona más baja de la cuenca, presenta la menor tasa de precipitación, variando entre 10 mm/año y 20 mm/año, como valores promedio. Esta tasa se incrementa en todas las direcciones, siendo mayor la tasa de incremento hacia el este, debido a la relación creciente de la precipitación con la altitud (cerca de 60 mm/1000 m).

La Figura 4-20 también muestra la ubicación de las diferentes estaciones pluviométricas existentes en el área. Al respecto, de las ubicadas en el Salar y en su entorno, se cuenta con información actualizada para las estaciones SCL (actualmente, denominada Rockwood), Peine, Chaxa y Camar, cuya información principal se presenta en la Tabla 4-4, la que incluye la precipitación promedio anual (Pp_m) de todo el período de mediciones con que cuenta la estación y desde el año 1997, año a partir del cual se cuenta con información en la estación Rockwood (ex SCL). Además se presenta la mediana de la precipitación anual (Pp_{50}). Como complemento a lo anterior, la Figura 4-21 presenta la variación anual de la precipitación en las tres estaciones ubicadas en la zona más baja del salar (no se incluye Camar), considerando que estas presentan valores medios similares.

Tabla 4-4 Valores medios de precipitación anual en el entorno del Salar de Atacama

Estación	Cota	Período de registros	Pp_m (mm)	Pp_m 1997-2020 (mm)	Pp_{50} 1997-2020 (mm)
Rockwood	2.300	1997-2020 ⁽¹⁾	20,6	20,6 ⁽²⁾	8,5
Peine	2.460	1974-2018 ⁽³⁾	20,3	21,4	9,0
Chaxa	2.304	1990-2017 ⁽⁴⁾	16,9	21,1	10,3
Camar	2.700	1979-2018 ⁽³⁾	42,3	46,9	32,9

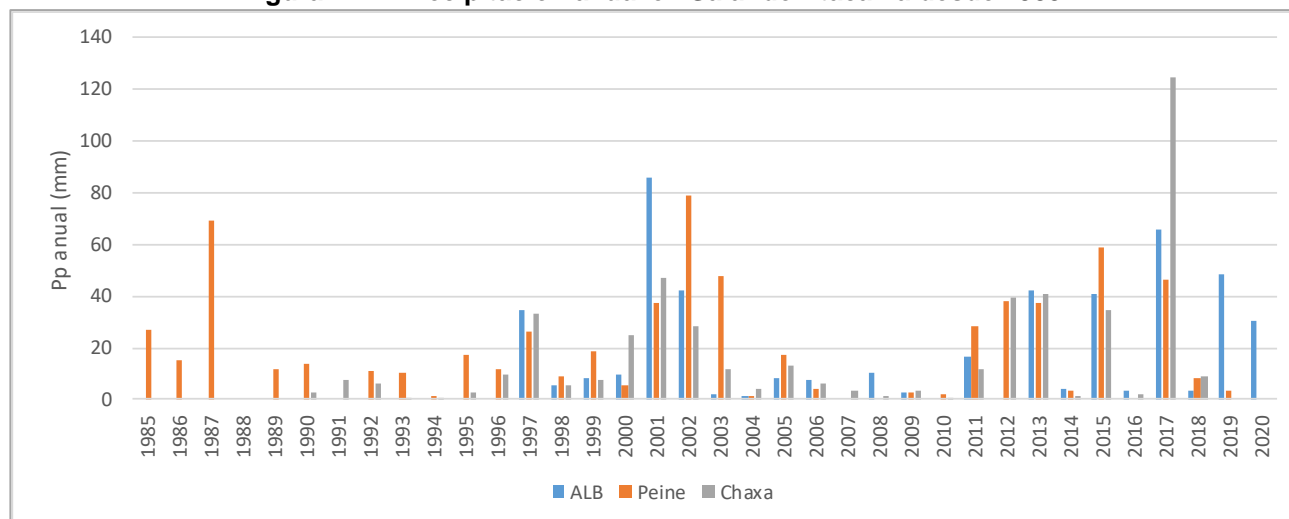
¹Se cuenta con registros diarios hasta diciembre del año 2020, información facilitada por Albemarle. ²No considera registros de 2012 (0 mm), considerados posiblemente anómalos. ³ Con registros hasta julio de 2019. ⁴ Con registros hasta julio de 2018.

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de Albemarle, 2020.

Figura 4-20. Isoyetas de precipitación media anual en cuenca del Salar de Atacama



Fuente: RWL-SGA, 2015.

Figura 4-21. Precipitación anual en Salar de Atacama desde 1985

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de Albemarle, 2020.

De la serie de tiempo de precipitación en el Salar (Figura 4-21), se aprecia la existencia de períodos de años consecutivos en los que la precipitación fue inferior a la media, siendo los más extendidos 1988-1996 y 2004-2010. En este último período además, entre 2006 y 2010, la precipitación de cada año fue inferior a la mediana, con la excepción del año 2008 en la estación Rockwood, donde se registró 10 mm. Por otra parte, los años 2001-2002 (y 2003 en el caso de la estación Peine) presentaron una precipitación superior a la precipitación promedio anual, al igual que los años del período 2012-2015, con la excepción de 2014, que correspondió a un año seco. Otros años en los que hubo precipitaciones significativas corresponden a 1997, 2017 y 2019. Adicionalmente, en agosto de 2020 hubo un evento de precipitación que en dos días superó el promedio anual en la estación Rockwood (23,8 mm). Entre los años 1997 y 2010 hubo 3 años con precipitación total superior a 10 mm, mientras que entre 2011 y 2020 hubo 6 años con precipitación superior a 10 mm, en 5 de los cuales fue mayor a 20 mm.

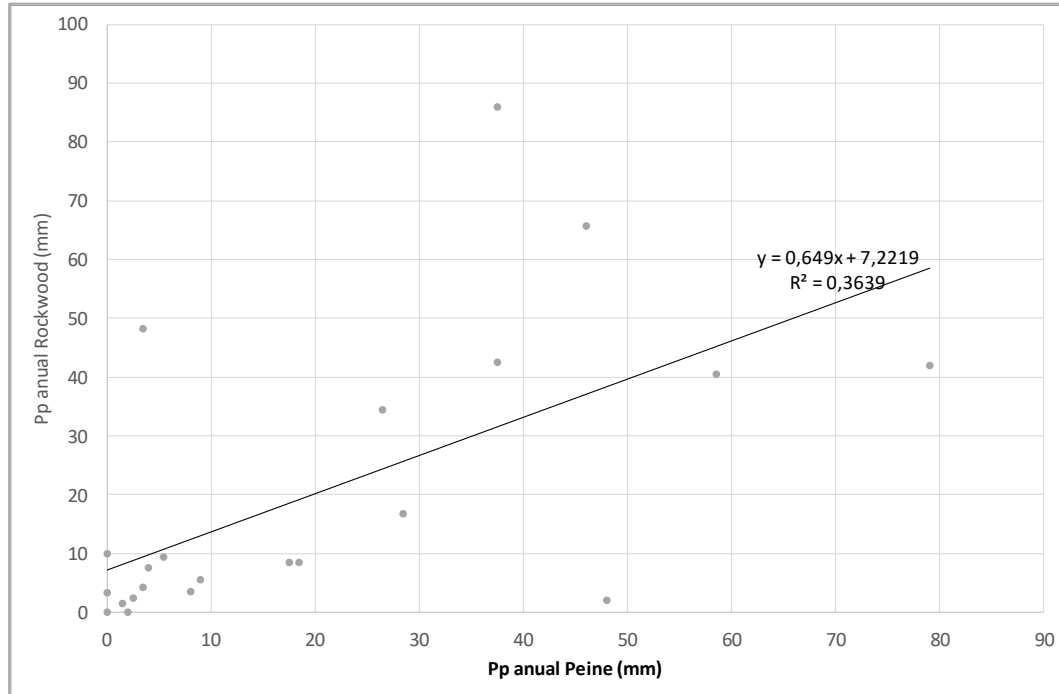
Aunque los registros medios de las estaciones ubicadas en el Salar de Atacama muestran valores similares (Tabla 4-4), en la Figura 4-21 se puede apreciar que existen diferencias en los registros de las diferentes estaciones, que darían cuenta que la precipitación no siempre se da de manera homogénea en el Salar, existiendo eventos de precipitación que se manifiestan solamente en algunos sectores del mismo, o se presentan de manera conjunta, pero con magnitudes considerablemente diferentes. Así, por ejemplo, la estación Peine no registra precipitación durante los meses de enero y febrero de 2019, mientras que en la estación Rockwood se registraron 46,7 mm. Del mismo modo, durante 2003 la precipitación acumulada anual en la estación Peine correspondió a 48 mm, mientras que en la estación Rockwood la precipitación fue igual a 2 mm. La Figura 4-22 compara los registros anuales de ambas estaciones, permitiendo verificar lo señalado. Además incluye la regresión lineal de los registros, observándose que el coeficiente de determinación (r^2) es igual a 0,36, indicando que no hay buena correlación en la precipitación anual de ambas estaciones.

La variación estacional de la precipitación se muestra en la Figura 4-23. En ella se presentan los valores mensuales promedio, para cada una de las estaciones evaluadas (considerando el período 1997-2019). Se aprecia que los principales eventos de precipitación están asociados al invierno altiplánico, concentrándose normalmente entre los meses de enero y marzo. Al respecto, se debe destacar que pese a la ocurrencia de eventos de precipitación durante el verano, de acuerdo a lo indicado en el acápite 4.1.1, este período

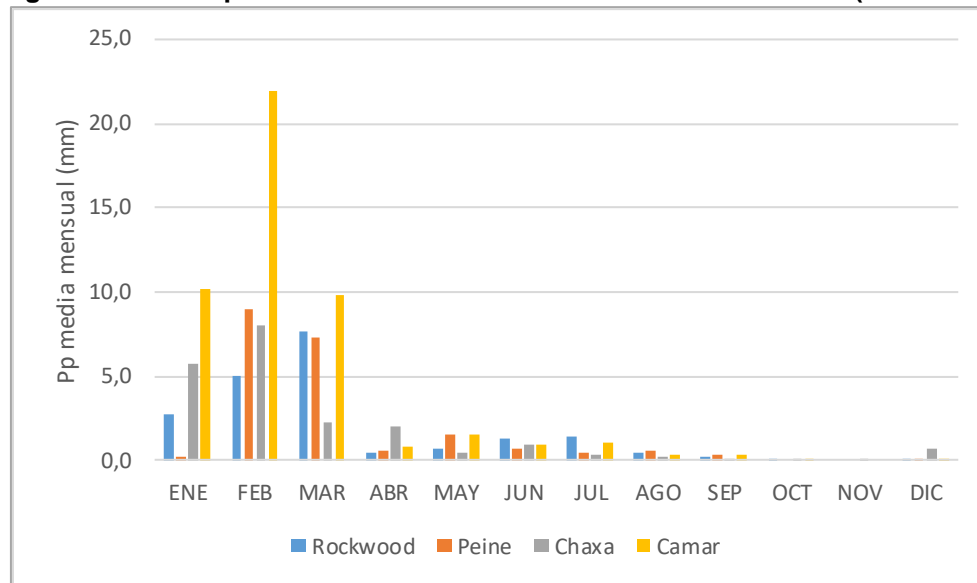
coincide con una profundización de los niveles freáticos, asociado a mayores tasas de evapotranspiración (ver sección 4.2.2).

Por otra parte, en la figura además se verifican las diferencias en la distribución espacial de la precipitación en el Salar de Atacama. Por ejemplo, en la estación Rockwood la precipitación media mensual es creciente entre enero y marzo, en Chaxa el máximo se verifica durante febrero, reduciéndose en más de un 50% en marzo, y en Peine la precipitación es mínima en enero, en febrero es similar a la de Chaxa y en marzo es el doble de esta última.

Figura 4-22. Comparación precipitación media anual estaciones Rockwood y Peine



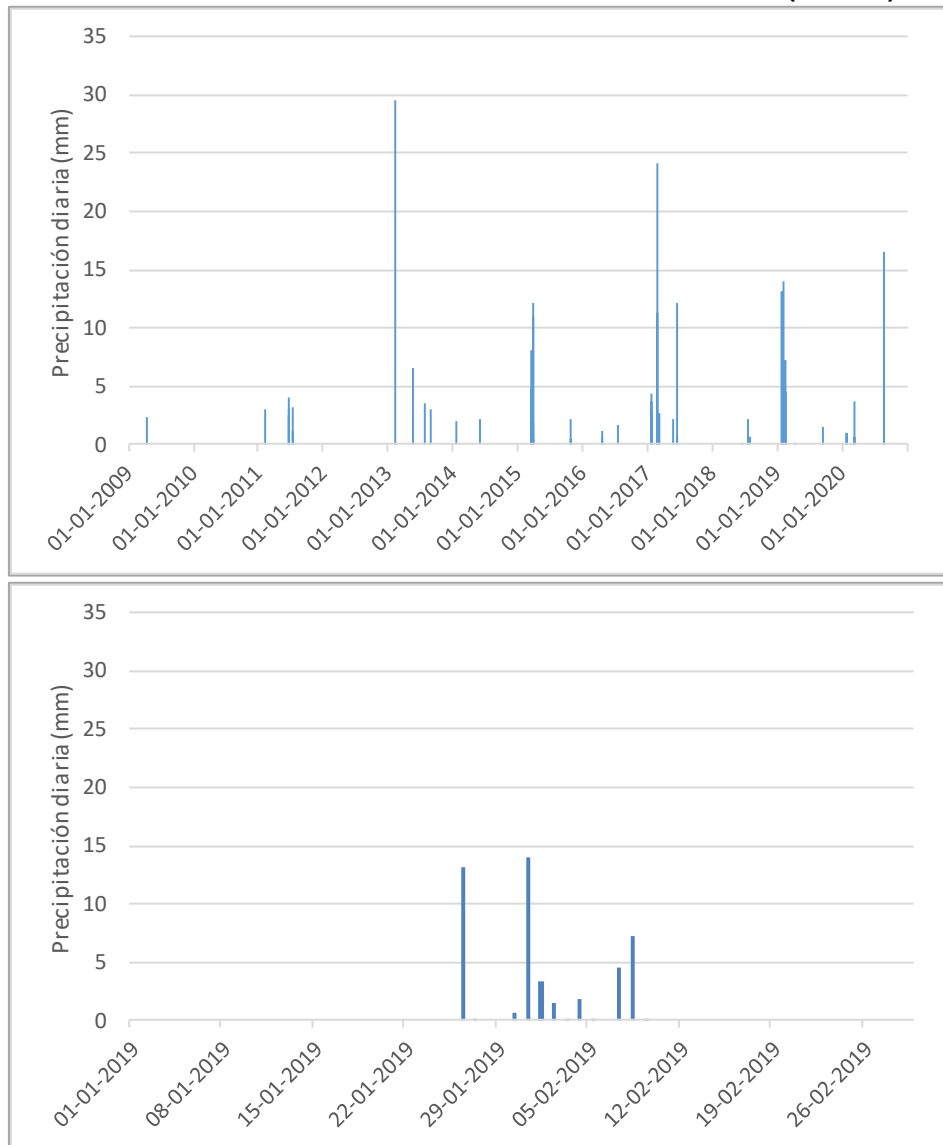
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de Albemarle, 2020.

Figura 4-23. Precipitación media mensual en estaciones evaluadas (1997-2019)

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de Albemarle, 2020.

En lo que respecta a la variación de la precipitación diaria, se cuenta con registros diarios de la estación Rockwood entre enero de 2009 y de 2020, los que se presentan en la Figura 4-24. Se puede apreciar que los eventos de precipitación de mayor extensión temporal correspondieron a los de los años 2015, 2017, 2019 y 2020, aunque en este último año, fueron de una magnitud significativamente inferior, Así, la precipitación total de enero-marzo de 2020 (6,4 mm) fue inferior a la máxima precipitación diaria de 2015, 2017 y 2019, en todos los casos superior a 10 mm. El año 2017 correspondió al de mayor precipitación total del período 2009-2020. Durante el verano de ese año, el total de días con precipitación fue igual a 9 (concentradas entre el 13 de enero y el 25 de febrero), con un máximo de 4 días consecutivos. En 2019, aunque la precipitación total fue inferior, durante el verano precipitó un número total de 12 días, los que se verificaron en un período más acotado que las lluvias de 2017 (entre el 26 de enero y el 9 de febrero de 2019). En el 2019 se presentó un número de siete días consecutivos con lluvia.

Figura 4-24. Precipitación diaria en estación Rockwood, período 2009-2020 (superior). Precipitación diaria en estación Rockwood en enero – febrero de 2019 (inferior)



Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de Albemarle, 2020.

4.2.1.2 Relación entre la precipitación y la variación del nivel freático

Un análisis presentado en MEL- Golder (2017) para 20 años de registros de profundidad del nivel freático en el Sector Monturaqui, mostró que en 10 años consecutivos existen 5 a 6 eventos de precipitación que generan recarga del acuífero. Considerando esta recurrencia, y por medio de la generación de series sintéticas de precipitación, obtuvieron que solamente eventos de precipitación superiores a 21 mm en Tilopozo, generan recarga del acuífero.

La Figura 4-25 presenta la variación de la cota piezométrica en puntos ubicados en distintos sectores del área de estudio, en comparación con la precipitación media mensual en la estación Rockwood. Los puntos que se incluyen corresponden a TP-2 ubicado en el borde norte de la Zona Marginal; MP-04A ubicado en el

entorno del humedal de Tilopozo; LM-16 en el humedal Tilopozo; BA-01 ubicado en el entorno de las lagunas; y CL-6 localizado en el borde sur del núcleo. Se observan respuestas disímiles entre algunos puntos de monitoreo, que dan cuenta de la heterogeneidad del sistema y de la respuesta localizada que puede presentar frente al efecto de precipitación, los que se presentan a continuación. Respecto a esto último, es importante hacer notar que la variación del nivel en el barreno BA-01, no necesariamente es replicada en los otros barrenos instalados en el entorno de las lagunas.

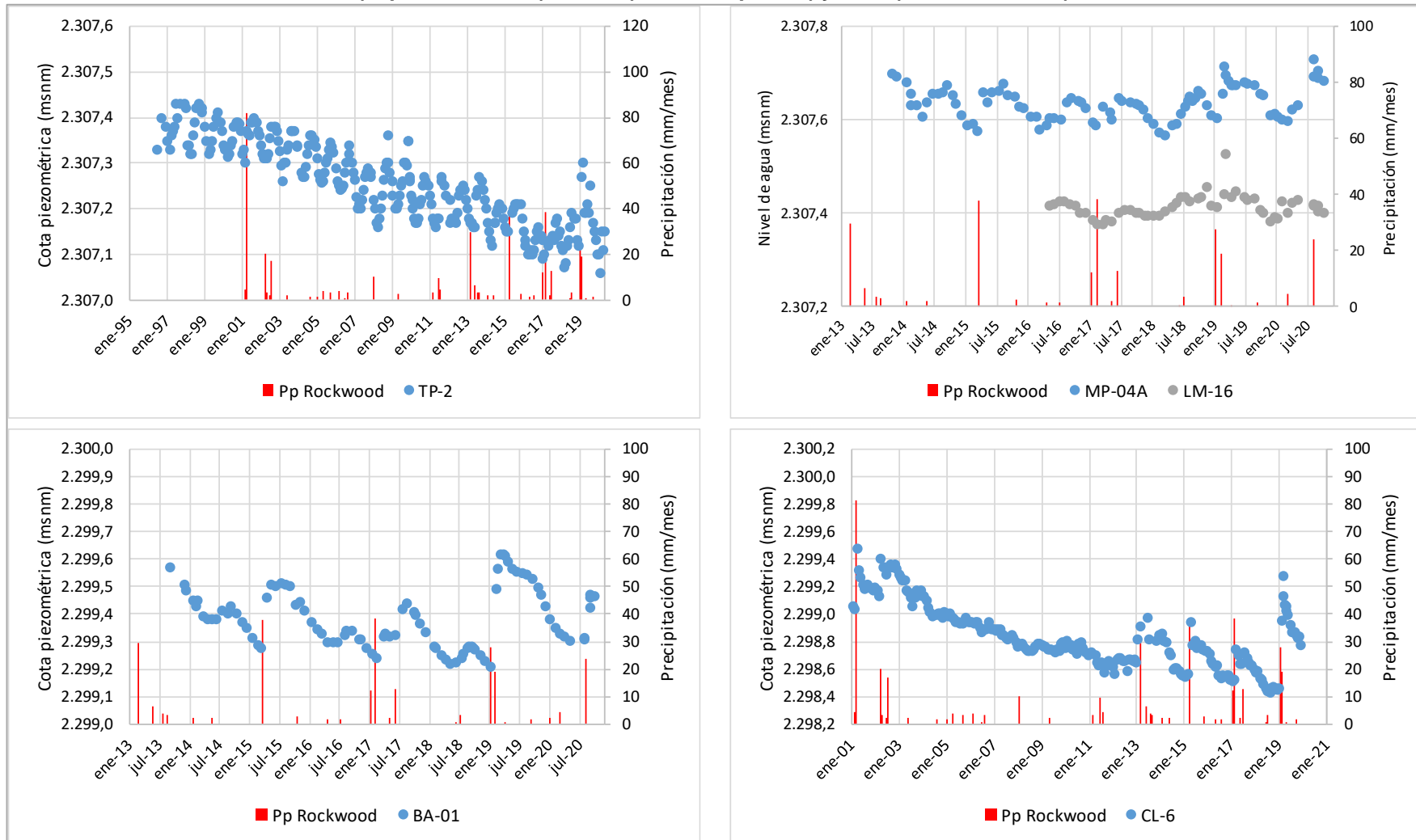
- TP-2: La profundidad del nivel freático es del orden de 4 metros (3,7 m – 4,05 m entre 1996-2020). El principal incremento en la cota piezométrica se produjo con la precipitación de enero y febrero de 2019 (27,8 mm y 18,9 mm, respectivamente), aumentando 18 cm la cota medida en la campaña de marzo de 2019, con respecto a la medida en diciembre de 2020. En contraste, la precipitación de marzo de 2001 (81,7 mm), solamente generó un incremento de 7 cm en la cota piezométrica. Cabe señalar que precipitaciones menores, pero ocurridas en otoño-invierno de 2011 (13,72 mm) y 2013 (6,5 mm), generaron cambios similares a los medidos en marzo de 2001 en el nivel de agua. Otros eventos de precipitación superior a 20 mm de febrero de 2013, marzo de 2015 y febrero de 2017 no modificaron de manera significativa la cota piezométrica.
- MP-04A: La profundidad del nivel freático es del orden de 1 metro. Al igual que en TP-2, el principal incremento de la cota piezométrica en este pozo ocurrió con posterioridad a la precipitación de enero de 2019 y febrero de 2019, siendo este superior a 10 cm. No obstante, a diferencia de lo medido en TP-2, el pozo MP-04A sí presentó cambios en el nivel, luego de las precipitaciones señaladas de 2015 y 2017. Otro evento en el que hubo una variación muy significativa del nivel freático, correspondió a la precipitación de agosto de 2020 (23,8 mm). Por otra parte, pese a que la precipitación de enero y febrero de 2017 fue levemente superior a la de 2019 (50,7 mm y 46,7 mm, respectivamente), la variación del nivel freático fue del orden de 5 cm, mientras que en 2019, como fue señalado, esta fue superior a 10 cm.
- LM-16: Aunque el período de registros es más acotado (2016-2020), solamente se verificó un cambio significativo en el nivel de agua luego de la precipitación de enero y febrero de 2019.
- BA-01: pozo somero ubicado en la zona de las lagunas. La profundidad del nivel freático es del orden de 1,5 m. Se puede apreciar que los eventos de precipitación de verano ya descritos de 2015, 2017 y 2019 generaron incrementos en la cota piezométrica, siendo este último el de mayor efecto (cerca de 30 cm). Adicionalmente, una precipitación menor en magnitud que las descritas, ocurrida en julio de 2017 (12,4 mm), generó cambios en el nivel freático similares a los producidos con la precipitación de enero y febrero de 2017. Por otra parte, la precipitación de agosto de 2020 (23,8 mm) produjo cambios superiores a 10 cm en el nivel freático. Este tipo de pozos, presenta gran variabilidad estacional en el nivel freático, producto de la evaporación que experimentan.
- CL-6: Pozo situado en el núcleo mismo. La profundidad del nivel freático ha variado entre 0,6 m y 1,7 m en el tiempo que se tiene registro (2001-2020). Se observa que el pozo presentó incrementos en la cota piezométrica luego de los eventos de precipitación de verano de 2013, 2015, 2017 y 2019 correspondiendo, de los analizados, al que mayor variación presentó luego de esta última, incrementándose la cota piezométrica en más de 80 cm. Por otra parte, aunque también mostró un cambio en el nivel freático luego de la precipitación de julio de 2017, fue más leve que el descrito para BA-01 (8 cm).

En general, se puede apreciar que el mayor incremento del nivel de agua se verificó como consecuencia de la precipitación de enero y febrero de 2019, pese a que hubo eventos previos en los que la precipitación fue superior (verano de 2001 y 2017, por ejemplo). Además, en algunas estaciones de medición, luego de eventos de precipitación de invierno inferiores a las ocurridas durante el verano, hubo incrementos del nivel de magnitudes similares a los verificados en verano (TP-2, MP-04A, BA-01). Por otra parte, se debe destacar que los pozos TP-2 y CL-6, que muestran tendencias de largo plazo de profundización del nivel freático, retoman dicha tendencia luego de los eventos de precipitación. En el caso del pozo somero BA-01, que mostró una tendencia al descenso del nivel freático entre 2016 y 2018, se deben considerar nuevos registros para evaluar si retoma dicha tendencia luego de las precipitaciones de verano de 2019. Finalmente, se debe destacar que el nivel de agua superficial en el humedal de Tilopozo (estación LM-16), presenta cambios muy acotados como consecuencia de eventos de precipitación, y al igual que lo mencionado para otros pozos, luego del incremento del nivel como consecuencia de la precipitación de enero y febrero de 2019, aparentemente retomó su tendencia.

En relación a que los eventos de precipitación no modifican la tendencia previa de evolución del nivel freático, se debe considerar que, de acuerdo a MEL- Golder (2017), en resultados obtenidos a partir de un análisis de la isotopía de las aguas del acuífero MNT en la zona de Monturaqui, las aguas de dicho acuífero tienen una antigüedad superior a 55 años. Es decir, la precipitación que dio paso a dicha recarga ocurrió hace más de 55 años (límite temporal dado por el análisis isotópico realizado). Por lo tanto, existen décadas de retardo entre cambios meteorológicos y su manifestación en la recarga del acuífero en su zona sur, que posteriormente fluye hacia el área de estudio.

Con respecto a la diferencia en la respuesta del nivel freático a los diferentes eventos de precipitación, se puede apreciar que la precipitación diaria máxima de 2013 (29,5 mm) y 2017 (24,1 mm) y la de agosto de 2020 (16,5 mm) fueron superiores a la de 2019 (14 mm), no obstante en este último caso ocurrió en el contexto de una serie de varios días de precipitación, siendo la duración de dicho evento superior a los de los otros años señalados (ver Figura 4-24). Al respecto, cabe destacar que en el caso de 2013 la precipitación se concentró en un día, en 2017 en cuatro y en 2020 en dos, mientras que en 2019, tal como se indicó de manera previa, hubo 12 días con precipitación, en un período de 15 días consecutivos. Se infiere entonces que la duración del evento o la cantidad de días de lluvia es una pieza clave en el grado de respuesta del sistema en general, tanto para la zona del núcleo, como para la zona marginal. Asimismo, las condiciones meteorológicas (nubosidad, temperatura y evaporación) durante los eventos de lluvia pueden condicionar la cantidad de agua que llega al sistema y por lo tanto la respuesta del nivel freático.

Figura 4-25. Variación de la cota piezométrica y relación con precipitación en estaciones TP-2 (superior izquierda), MP-04A y LM-16 (superior derecha), BA-01 (inferior izquierda) y CL-6 (inferior derecha)



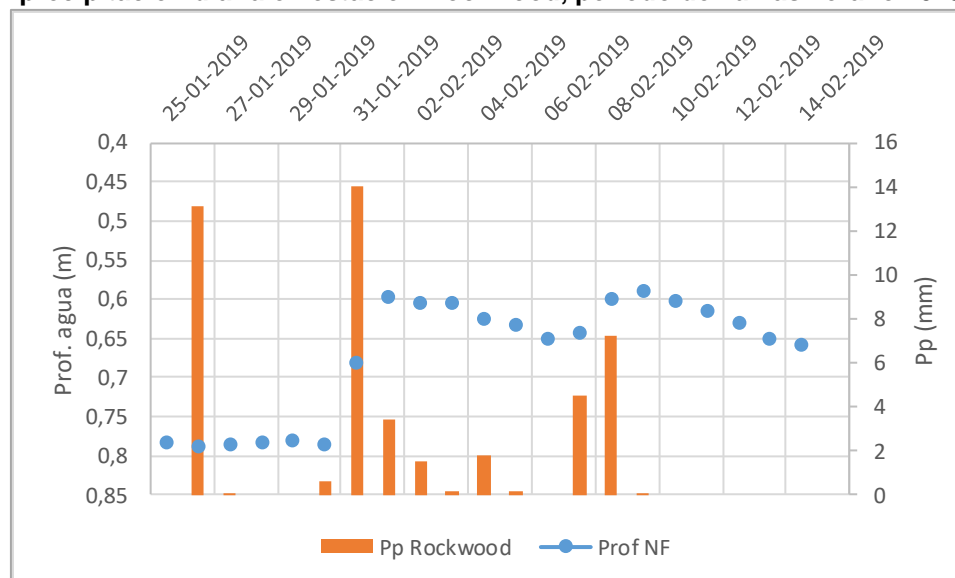
Fuente: Elaboración propia.

Para analizar y describir los cambios en el nivel de agua, producidos por la precipitación, se cuenta con registros de sensores instalados en pozos someros en el entorno de las lagunas, facilitados por Albemarle. La Figura 4-26 muestra los cambios del promedio diario de la profundidad del nivel freático en el pozo somero BA-08, en conjunto con la precipitación diaria, para el periodo de lluvias de 2019 (se muestran datos entre el 25 de enero y el 14 de febrero).

De la gráfica, se puede apreciar que la precipitación de los días 26 y 27 de enero no generó cambios en la profundidad del nivel freático, pese a la significativa tasa de precipitación del día 26 (13 mm). Cinco días después, el 31 de enero, una lluvia de magnitud similar (14 mm), produjo un incremento de la cota piezométrica de casi 20 cm. Se infiere entonces que, el primer evento generó un aumento en la humedad del suelo, lo que habría facilitado un incremento del nivel de agua cinco días después con la segunda lluvia, pese a que la magnitud fue similar a la primera. Por otra parte, durante los cinco días posteriores el nivel freático volvió a profundizarse, pese a la ocurrencia de lluvias, todas inferiores a 4 mm. Es posible que dichas lluvias, aunque no generaron incrementos del nivel freático, favorecieron una mantención de la humedad del suelo, de modo que la precipitación de los días 7 y 8 de febrero (4,5 mm y 7,2 mm, respectivamente), volviera a incrementar el nivel de agua, en unos 6 cm. Una vez finalizadas las lluvias, el sistema vuelve a su tendencia decreciente de nivel en el período de verano. Cabe destacar que en otros pozos para los que se cuenta con información de sensores (BA-07, BA-16), se verificó la misma respuesta en la variación del nivel.

De acuerdo a lo anterior, el efecto de las precipitaciones y la recarga directa que estas generan en el acuífero de la Zona Marginal, están asociados a diversas condiciones, que incluyen la magnitud del evento de precipitación, su extensión, no definida exclusivamente como número de días consecutivos con precipitación, sino que considerando además el efecto que dicha extensión genera en la humedad del suelo, el período del año en que se genera la precipitación y el sector de la Zona Marginal en que se evalúa el efecto.

Figura 4-26. Variación de la profundidad media diaria del nivel freático en pozo somero BA-08 y precipitación diaria en estación Rockwood, período de lluvias verano 2019



Fuente: Elaboración propia.

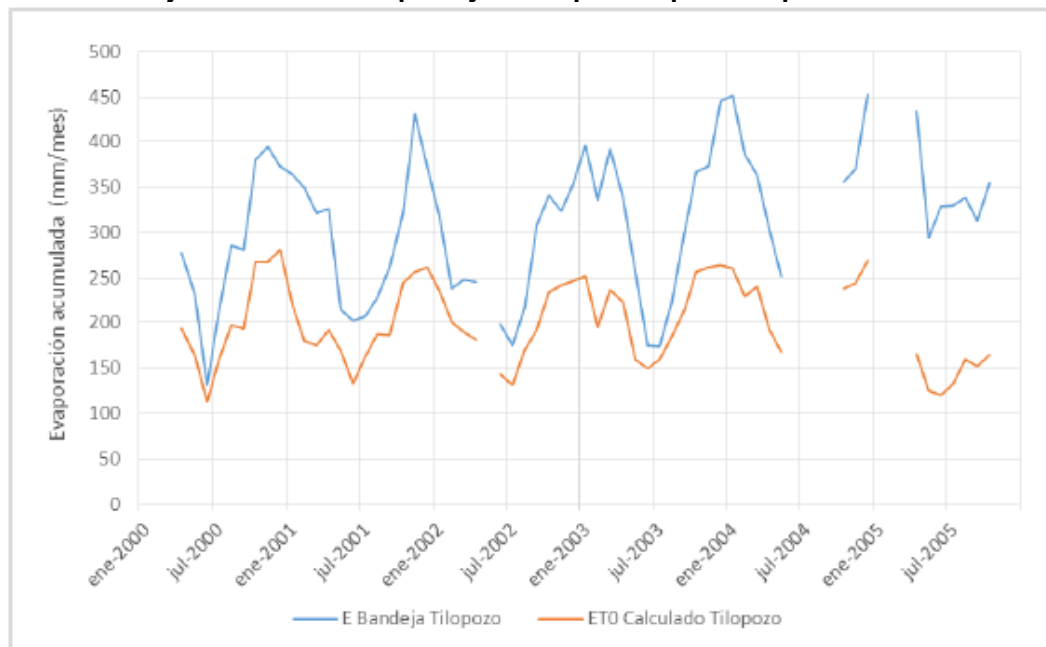
4.2.2 Evapotranspiración

4.2.2.1 Características generales de la EVT en el área de estudio

La evapotranspiración (EVT) corresponde a la única descarga natural del acuífero en la zona dulce/salobre. Es una de las principales forzantes que influye en el nivel de agua. Debido a que depende de una serie de factores, es variable tanto espacial como temporalmente, razón por la que se sugiere sea medida localmente, para su caracterización y uso (MEL- Golder, 2017).

En lo que respecta a la variación temporal, la EVT presenta una componente estacional, como causa de su dependencia de la radiación solar. Al respecto, en la Figura 4-27 se presenta a modo de ejemplo, la serie de evaporación de bandeja en la estación Tilopozo y la evapotranspiración potencial en Tilopozo (MEL- Golder, 2017) en el periodo 2000 – 2005, en la que se aprecian los valores máximos en verano y los mínimos en invierno.

Figura 4-27. Variabilidad estacional de la evapotranspiración. Se presentan registros de evaporación de bandeja en estación Tilopozo y de evapotranspiración potencial estimada



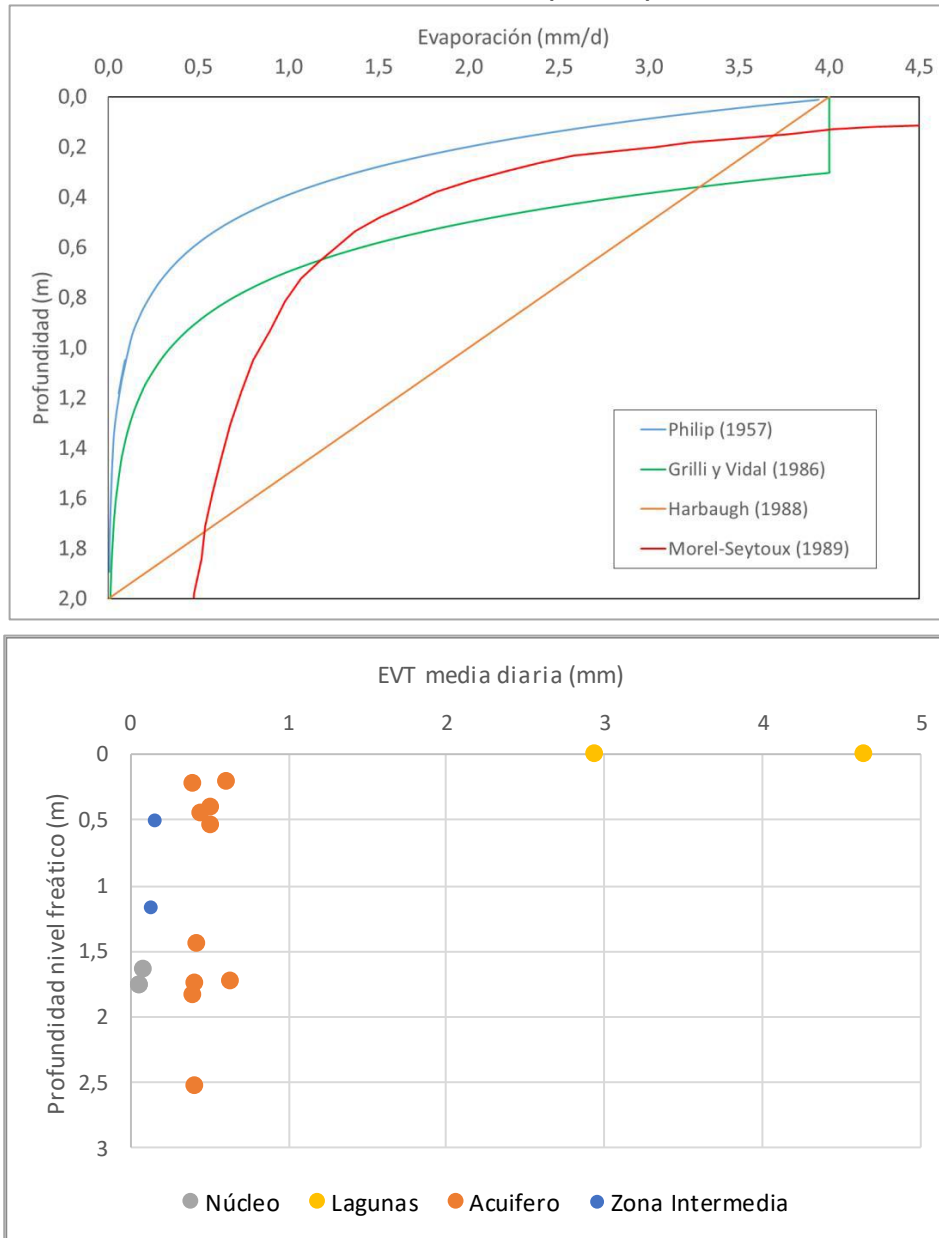
Fuente: MEL- Golder (2017).

En cuanto a la variación espacial, la EVT depende de la profundidad del nivel freático. Se estima que la evapotranspiración disminuye de manera exponencial con la profundidad y es común que la curva de extinción, que indica como varía la EVT en profundidad, corresponda a un ajuste exponencial o potencial realizado a partir de los valores medidos. La Figura 4-28 (superior) muestra ejemplos de curvas teóricas utilizadas para estimar la tasa de evaporación con la profundidad del nivel freático. Por otra parte, la Figura 4-28 (inferior) muestra la relación entre la EVT y la profundidad del nivel freático, medida por el método del Domo en diferentes puntos de monitoreo ubicados en el Salar de Atacama, para la campaña de diciembre de 2019 (ALB-HIDROMAS, 2020b).

De manera adicional a las diferencias asociadas a la profundidad del nivel freático, también existen diferencias relacionadas con la cobertura del suelo, o el tipo de suelo. Esto se puede apreciar en la Figura 4-28 (inferior), en la que, por ejemplo, los registros medidos en el núcleo presentan una menor EVT para una misma profundidad del nivel freático que las mediciones realizadas en la zona denominada acuífero. Esto es consistente con lo presentado por MEL- Golder (2017), que realizó una caracterización espacial de la EVT y su relación con el tipo de suelo en la Zona Marginal. En dicho caso, se consideraron tres tipos de suelo, identificando diferencias en la EVT entre éstos. Se distinguieron los tipos de suelo limo salino (EVT inferior a 0,4 mm/d, con registros de EVT hasta 4 m de profundidad), sulfato granular (EVT inferior a 1,5 mm/d, con registros hasta 0,9 m) y zona de estratificación salina (EVT en superficie superior a 2 mm/d, con registros hasta casi 1,5 m). La Figura 4-29 muestra los diferentes tipos de suelo existentes en la Zona Marginal de acuerdo a MEL- Golder (2017), para los cuales fue evaluada la EVT. La clasificación de tipos de suelo utilizadas por Albemarle corresponden a las de Mardones (SGA-Roockwood, 2015) y la **Figura 4-30** muestra la equivalencia para algunos de ellos, de acuerdo a MEL-Golder (2017)

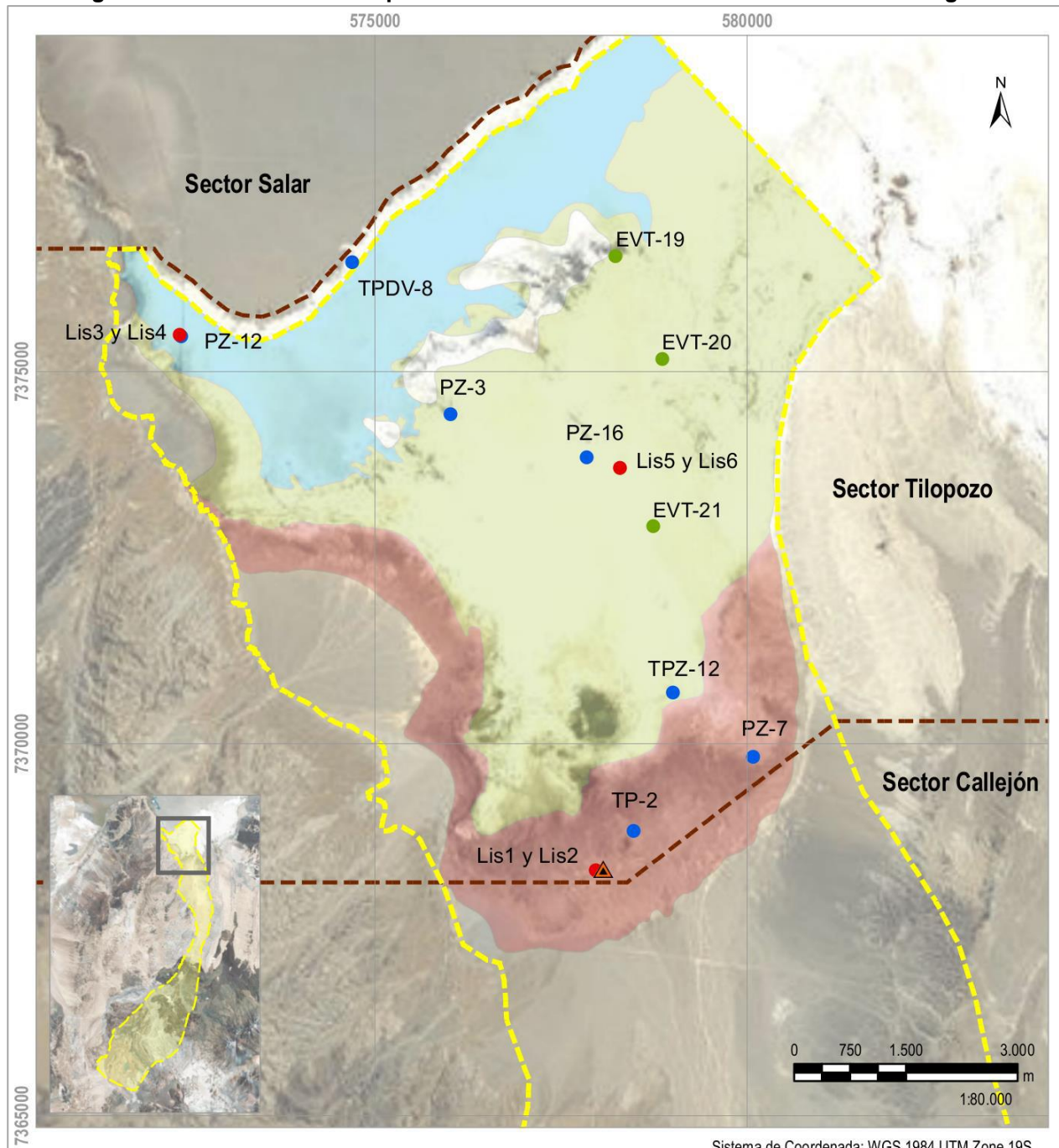
Finalmente, en lo que respecta a la cobertura, también se debe considerar que la presencia de vegetación y el tipo de vegetación generan cambios espaciales en la EVT, de la misma manera que la concentración de sales disueltas en el agua (RWL-SGA, 2015; MEL- Golder, 2017).

Figura 4-28. Curvas teóricas de tasa de evaporación en función de profundidad del nivel freático (superior). Registros de EVT en función de la profundidad del nivel freático en el Salar de Atacama en diciembre de 2019 (inferior)



Fuente: Superior: RWL-SGA (2015). Inferior: Modificado de ALB-HIDROMAS (2020b).

Figura 4-29. Distribución de tipos de suelo en caracterización de EVT en Zona Marginal



Sistema de Coordenada: WGS 1984 UTM Zone 19S

SIMBOLOGÍA

- Área de estudio
- Límite sectores
- ▲ Parcela experimental TPZ, MEL

- Lisímetro MEL
- Domos - Evaporación MEL
- Domos - Evaporación Rockwood Lithium

LEYENDA

- Costras Salinas**
- Estratificación salina
 - Limo salino
 - Sulfato granular

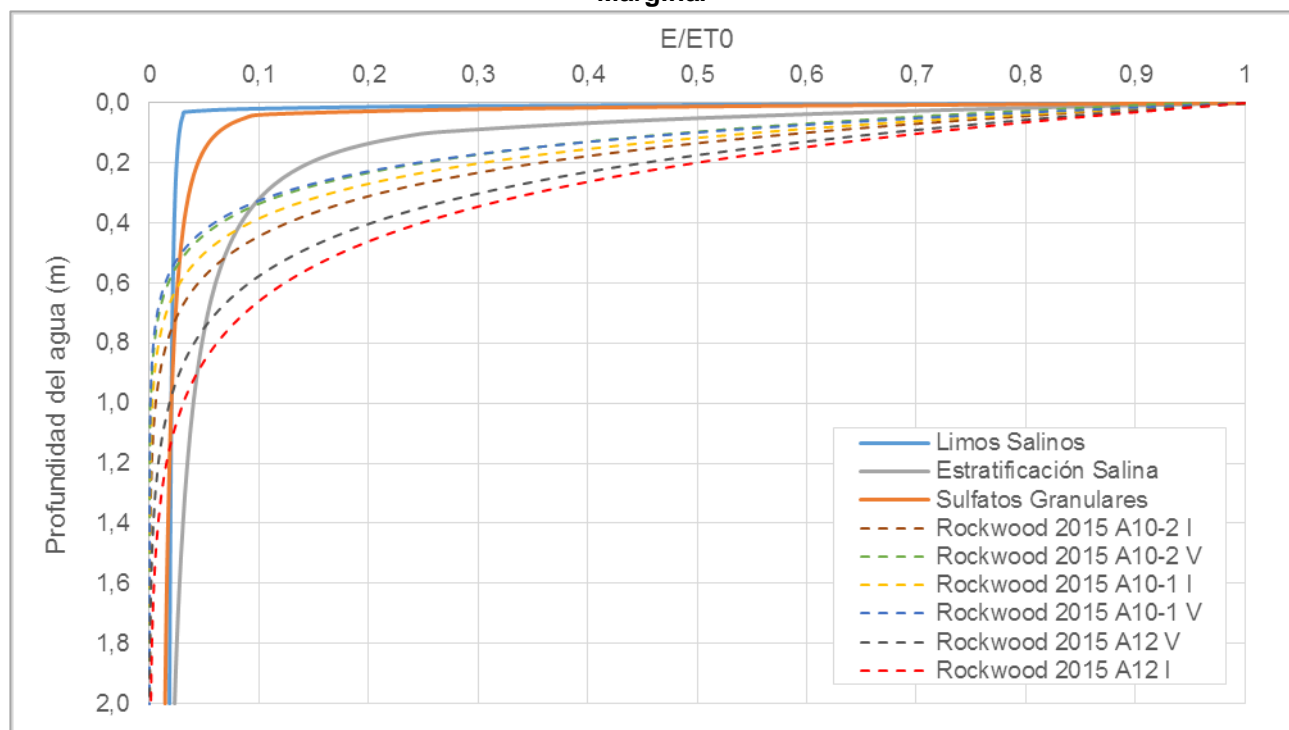
Fuente: MEL- Golder (2017).

4.2.2.2 EVT en Zona Marginal y relación con la profundidad del nivel freático

La Figura 4-30 muestra la curva de EVT ajustada para los diferentes tipos de suelo definidos para la Zona Marginal, de acuerdo al análisis realizado por MEL- Golder (2017), incorporando curvas desarrolladas por RWL-SGA (2015), a modo de comparación y complemento. De acuerdo a MEL- Golder, la zona de Estratificación Salina, en cuyo borde norte se ubica el humedal de Tilopozo, es equivalente a la zona A10-1 utilizada por Albemarle. Adicionalmente, la zona Limos Salinos, ubicada al sur del mismo humedal, es equivalente a la zona A12 de Albemarle (Figura 4-29).

Al respecto, cabe señalar que en Rockwood – SGA (2015) se señala que la profundidad de extinción, correspondiente a la profundidad del nivel freático en la que no existiría EVT, es igual a 2 m. Sin embargo, MEL – Golder (2017) aunque no se reporta un valor de la profundidad de extinción, señala que en el tipo de suelo Limo Salino, la EVT se extiende hasta 4 metros de profundidad.

Figura 4-30. Distribución de la EVT con la profundidad en diferentes tipos de suelo de la Zona Marginal



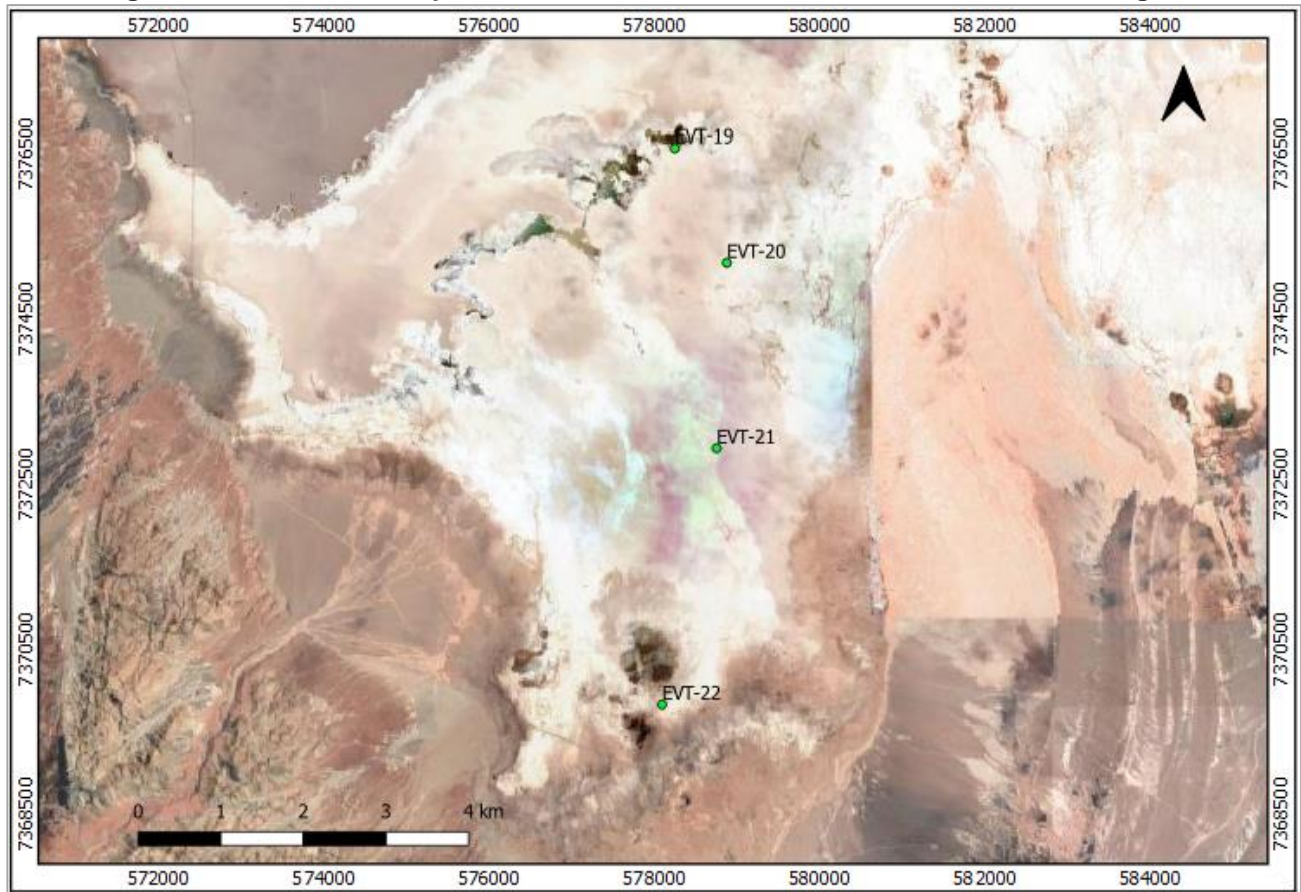
Fuente: MEL- Golder (2017)

Complementariamente, Albemarle cuenta con un monitoreo estacional de evapotranspiración en el Salar de Atacama, que incluye cuatro puntos de medición en la Zona Marginal, uno ubicado en la zona de las lagunas (EVT-19), dos en suelo desnudo (EVT-20 y EVT-21) y uno en una vega muy clara de *D.spicata* (ALB-Cedrem, 2020), ubicado unos 70 m al noreste del borde noreste del humedal TL2 (EVT-22). De lo anterior se desprende que no existen puntos de monitoreo en los cinco humedales definidos por la SMA (2020b), en el Informe de Fiscalización Ambiental a Minera Escondida (MEL).

La ubicación de los puntos de monitoreo se presenta en la Figura 4-31. La variación temporal de la EVT en cada uno de estos, para el período 2013-2020, se presenta en la Figura 4-32. Se puede apreciar, a nivel temporal, una disminución en la EVT de los puntos de medición EVT-19 y EVT-21 entre los registros previos y los posteriores a marzo de 2016. Al respecto, cabe señalar que en la estación EVT-19 la medición es sobre

agua en superficie, mientras que EVT-21 mide en suelo desnudo. No obstante, si se consideran solamente los valores medidos en las campañas posteriores a marzo de 2016, no se observa tendencia creciente, ni decreciente de la EVT en el tiempo en dichas estaciones. Se desconoce el origen de las diferencias entre las mediciones posteriores a marzo de 2016 y las previas, sin embargo se estima que estas no estarían asociadas a cambios en la profundidad del nivel freático o la cota piezométrica (profundización). Lo anterior, considerando que no se aprecian cambios en la EVT en los puntos de medición EVT-22 y EVT-20, pese a que de los cuatro puntos EVT-22 es el que se ubica más al sur, en una zona en la que la profundización del nivel sería mayor, y que los cambios medidos en EVT-19 se han producido pese a en este se mantiene la condición del agua presente en superficie libre. Es importante tener esto en consideración, ya que de acuerdo a MEL- Golder (2017), la profundización del nivel freático como consecuencia de las extracciones desde el sur del acuífero MNT, genera una disminución de la EVT, ya que el nivel de agua está más profundo, lo que a su vez genera que disminuya la velocidad de avance del cono de depresión (MEL-Golder, 2018). Se debe tener presente que, considerando que la EVT es de menor magnitud durante el invierno, esta potencial disminución de la EVT por la profundización del nivel freático sería principalmente válida en el período de verano, en el que la EVT presenta una mayor magnitud.

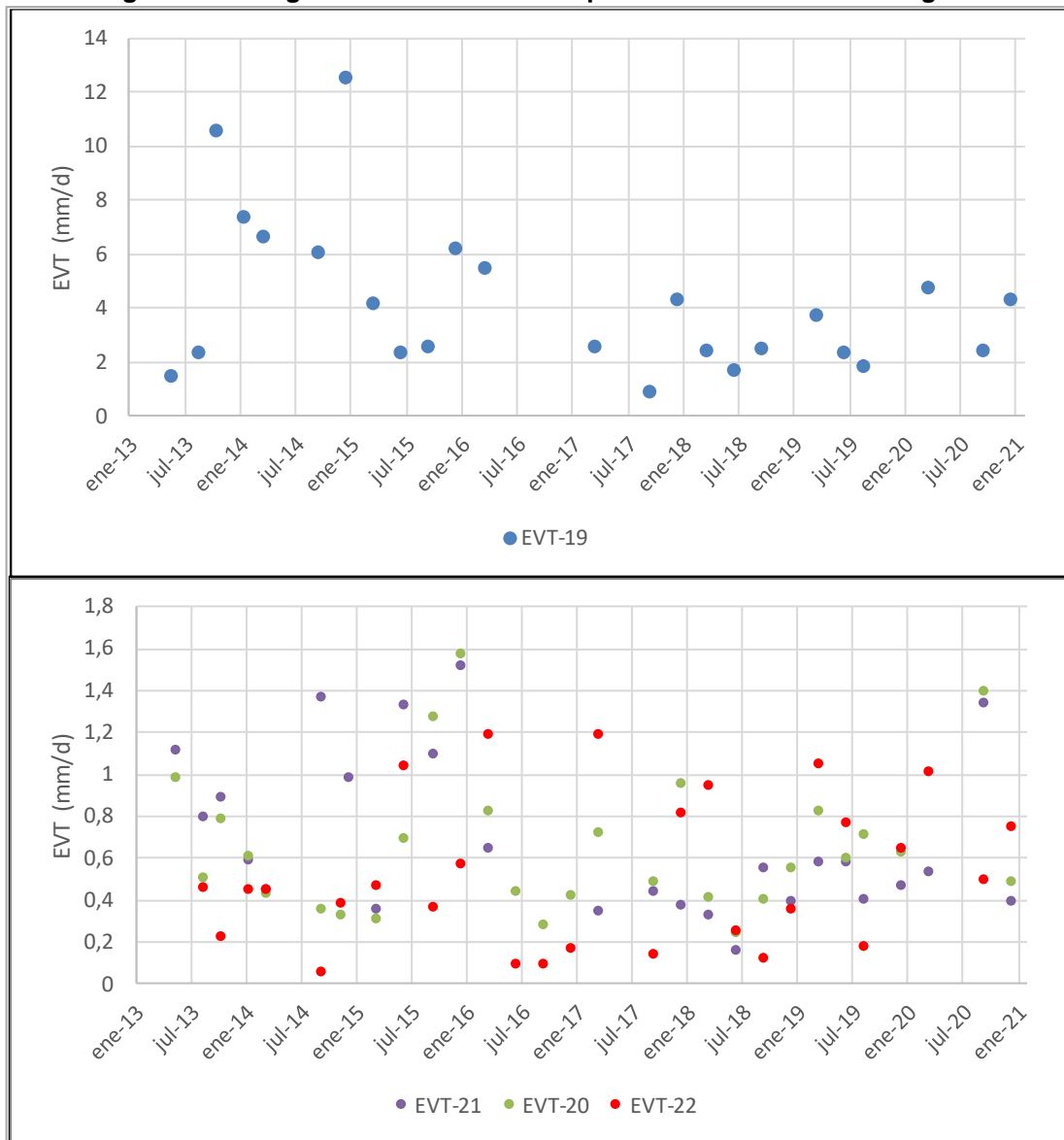
Por otra parte, se destaca que los valores registrados en EVT-19 son significativamente superiores a los medidos en las estaciones restantes, lo que es esperable, considerando que se ubica en la zona lagunar. Las otras estaciones muestran registros similares, siendo levemente inferiores los asociados a la estación EVT-21, considerando el período posterior a marzo de 2016. Cabe señalar que la estación EVT-22, ubicada en el sector Tilopozo, cercana a los humedales TL2_1 y T2_5, ha presentado registros históricos variables entre 0 mm/d y 1,2 mm/d, mostrando una variabilidad estacional levemente superior a la de las estaciones EVT-20 y EVT-21, considerando las mediciones posteriores a marzo de 2016.

Figura 4-31. Ubicación de puntos de monitoreo de EVT de Albemarle en Zona Marginal

Fuente: Elaboración propia.

Ya ha sido señalado que la variación estacional de la profundidad del nivel freático en los puntos de monitoreo de la Zona Marginal, con las mayores profundidades medidas en el período de verano, están asociados al efecto de la EVT. Esto sería incluso válido para el pozo TP-2, cuyo nivel freático está a cerca de 4 m de profundidad, de acuerdo a las mediciones realizadas por MEL- Golder (2017) en la zona Limo Salino.

Figura 4-32. Registros de EVT medidos por Albemarle en Zona Marginal

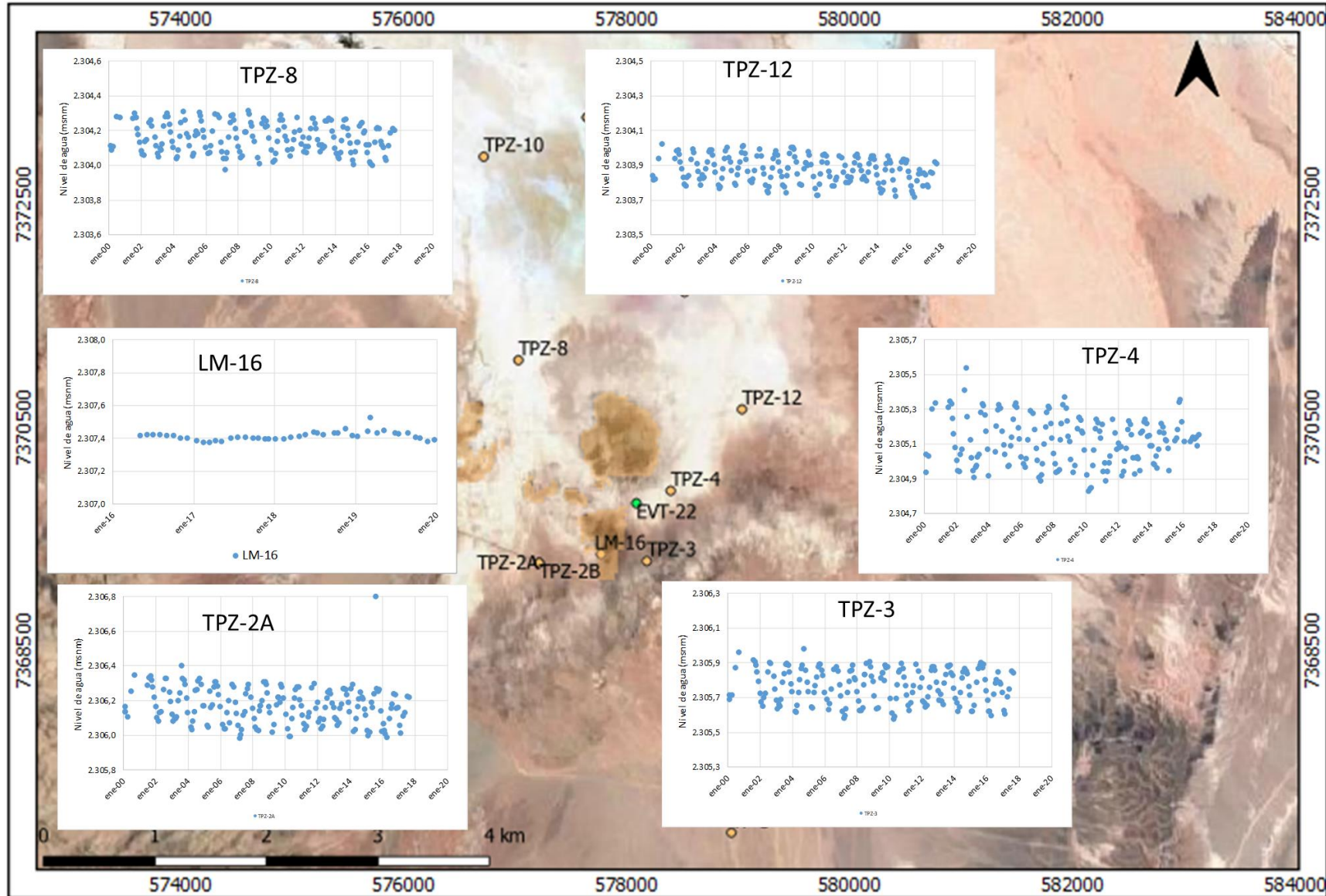


Fuente: ALB-HIDROMAS (2020a)

La estacionalidad del nivel freático se ha verificado en diferentes sectores del área de estudio, difiriendo su magnitud desde el punto de vista espacial. En la zona del humedal de Tilopozo, en los pozos someros ubicados en el entorno del humedal (Figura 4-33), se observa que la diferencia entre los registros mínimo de verano y máximo de invierno ha presentado una variación máxima del orden de 30 cm – 45 cm. Esto sería consecuencia de una mayor EVT en esta zona, respecto a la ubicada más al norte (la que pudiera estar asociada probablemente a la profundidad del nivel freático, tipo de suelo y salinidad del agua) (ver Figura 4-34). Por otra parte, la estación superficial LM-16 presenta una variabilidad inferior a 5 cm (registradas desde 2016 a 2020). De acuerdo a los antecedentes evaluados (ver acápite 4.1.2), se estima que esto no sería causa de una menor EVT, sino que sería consecuencia de la existencia de flujos verticales que afloran en presión en el humedal.

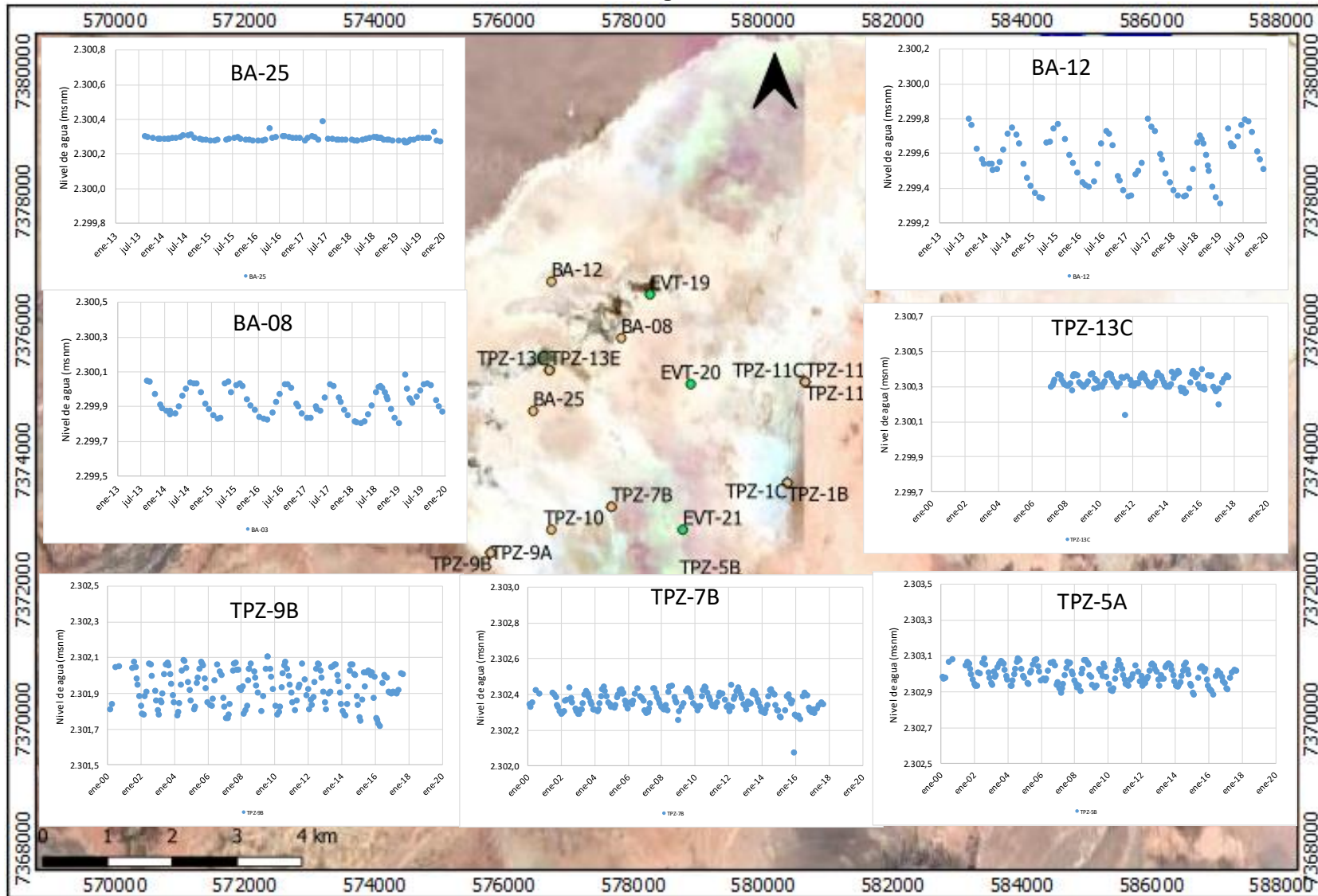
Hacia el norte del humedal de Tilopozo, hay mayor variabilidad en la amplitud de los niveles (Figura 4-34). El multipiezómetro TPZ-09, ubicado al oeste de Tilopozo, y el pozo somero BA-12, ubicado al norte de las lagunas, presentan diferencias entre las mediciones de invierno y verano, similares a las verificadas en el entorno del humedal Tilopozo. Por otra parte, el pozo somero BA-25 y el piezómetro TPZ-13C presentan variaciones inferiores a 5 cm y 10 cm, respectivamente. En ambos casos, la profundidad del nivel freático es del orden o inferior 50 cm respecto al nivel de terreno, por lo que se estima que no sería limitante para la EVT. Por lo tanto, la menor variabilidad en estos pozos no se debería a que el nivel sea muy profundo. Al menos en el caso del pozo somero BA-25, se estima que esta menor variabilidad podría deberse a la existencia de flujos ascendentes en este sector combinado con el tipo de suelo y la densidad del agua.

Figura 4-33. Variación estacional del nivel freático en puntos de monitoreo ubicados en el entorno del humedal de Tilopozo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-34. Variación estacional del nivel freático en puntos de monitoreo ubicados al norte del humedal de Tilopozo y en el entorno de las lagunas



Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Evolución de la variación de niveles en el Acuífero de Agua Dulce/Salobre

La extracción de agua desde los campos de pozos de Monturaqui y Negrillar, ha generado descensos significativos del nivel freático en el sector sur del acuífero MNT, que han sido descritos por MEL- Golder (2017), CMZ-SGA (2018) y que fueron parte del análisis realizado por la SMA en la Resolución Exenta N° 1 / ROL D-099-2020, del 30 de julio de 2020, que formula cargos a Minera Escondida Limitada.

El análisis ha mostrado descensos de decenas de metros en el nivel freático hasta cerca de 20 km al sur del humedal de Tilopozo, en el pozo DGA-2, y del orden de metros en el punto ASC-4, ubicada a 5 km al sur del humedal de Tilopozo.

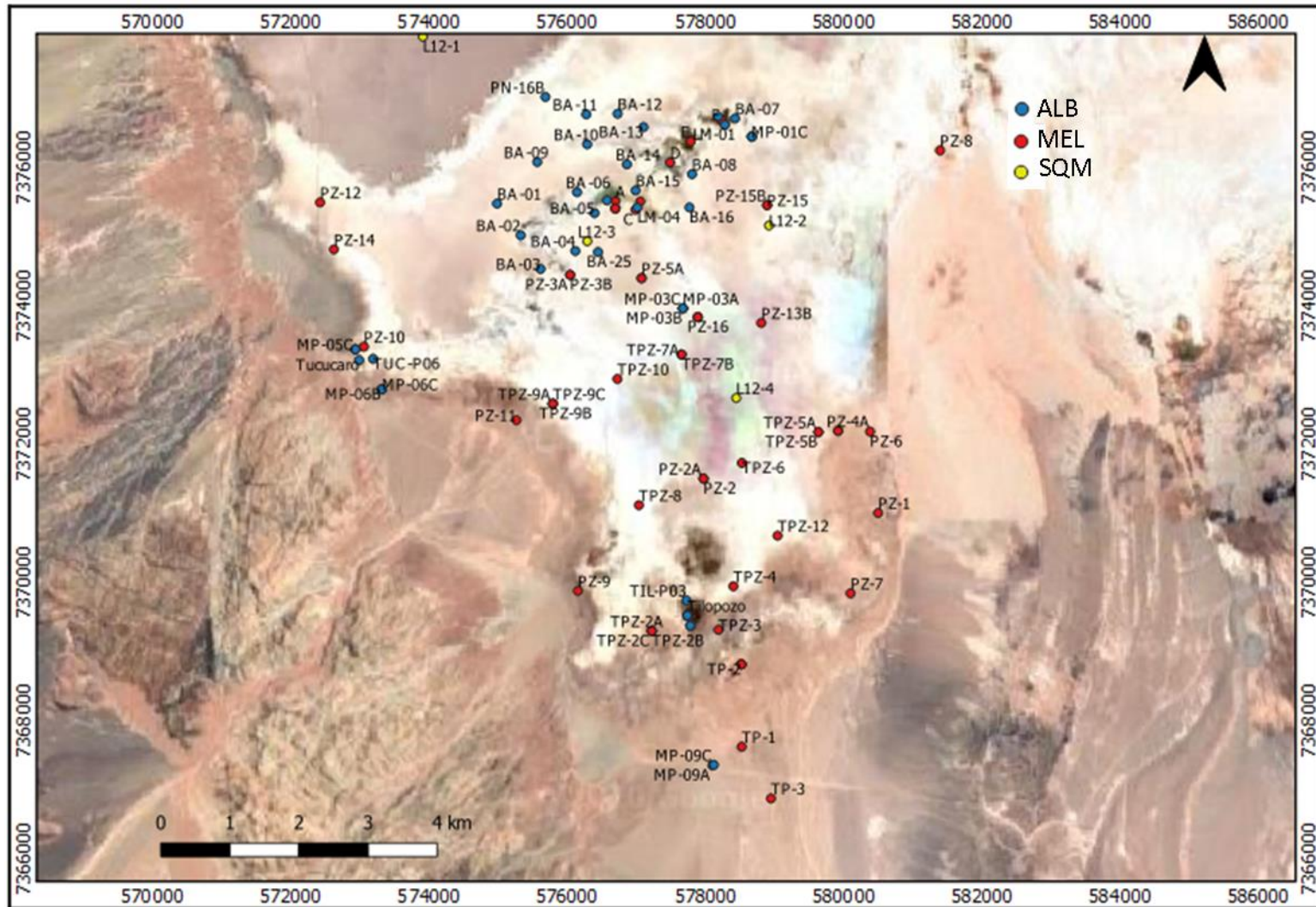
Considerando lo anterior, el análisis se ha centrado en describir y cuantificar los efectos en la profundidad del nivel freático en la Zona Marginal y en el tramo ubicado inmediatamente al sur del humedal de Tilopozo, hasta el pozo TP-3. En la Figura 4-35 se muestra la extensión del área analizada y los puntos de monitoreo existente en la misma.

4.2.3.1 Variación del nivel freático al sur del humedal de Tilopozo

En esta sección se analiza la evolución del nivel freático al sur del humedal de Tilopozo, en particular en los pozos TP-3, TP-1 y TP-2, ubicados aproximadamente a 2,2 km, 1,5 km y 0,3 km al sur del humedal, respectivamente, y en cuyo descenso se fundamentó la formulación de cargos de la SMA a Minera Escondida Limitada.

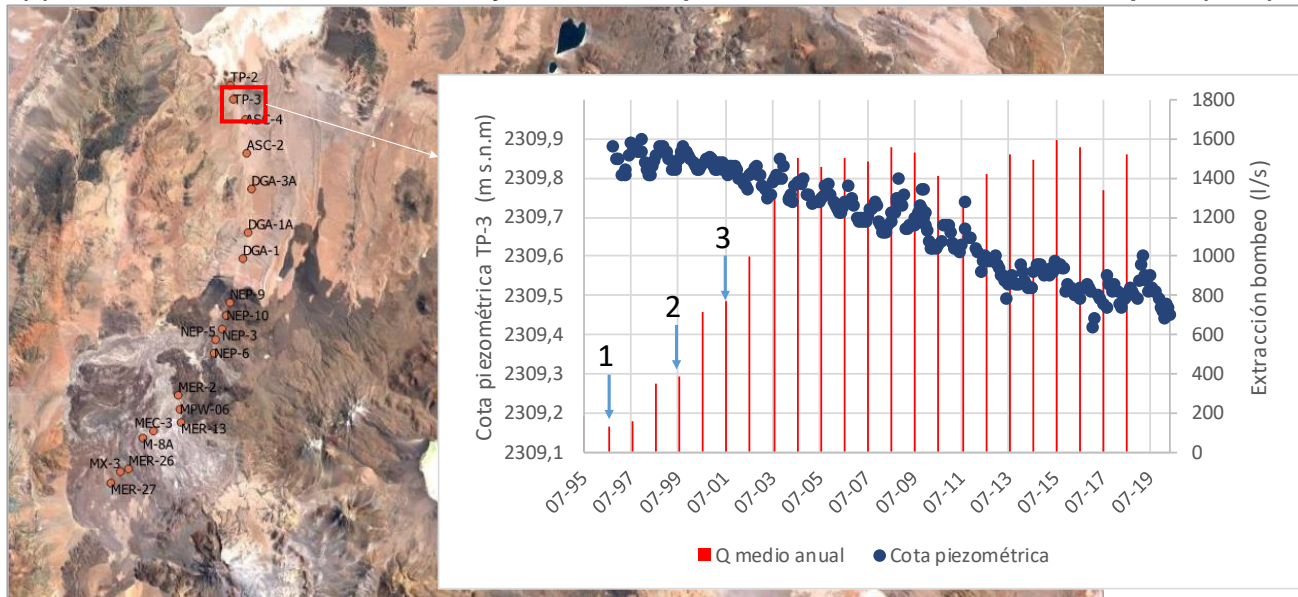
La Figura 4-36 muestra la variación de la cota piezométrica en el pozo TP-3 junto con la extracción conjunta de agua por bombeo de parte de MEL y CMZ. Se observa la existencia de una variación estacional con una amplitud del orden de 10 cm, y una tendencia al descenso de los niveles, que se ha desarrollado desde el año 2000, en el que se observó una disminución de la cota piezométrica, al reducirse el nivel máximo de invierno respecto a los registros del período previo. Así, cinco años luego del comienzo de las extracciones de CMZ del sector Negrillar (1995) y dos años luego del comienzo de la extracción de agua de MEL en el campo de pozos de Monturaqui y coincidente con un incremento significativo de la misma (1998 y 2000 respectivamente, ver acápite 3.1), ya se percibía un efecto de ésta en el nivel medido en el pozo TP-3, producto de las extracciones de aguas arriba. Considerando el período 2000-2020, se puede apreciar una profundización cercana a 40 cm en el pozo TP-3 (Figura 4-36).

Figura 4-35. Área de evaluación de variación del nivel freático y puntos de monitoreo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-36. Variación de cota piezométrica en pozo TP-3 y caudal de extracción en zona sur de acuífero MNT. (1) Comienzo de extracción de CMZ (1995). (2) Comienzo de extracción de MEL (1998). (3) Incremento en extracción de MEL y comienzo de profundización de nivel freático en pozo (2000)

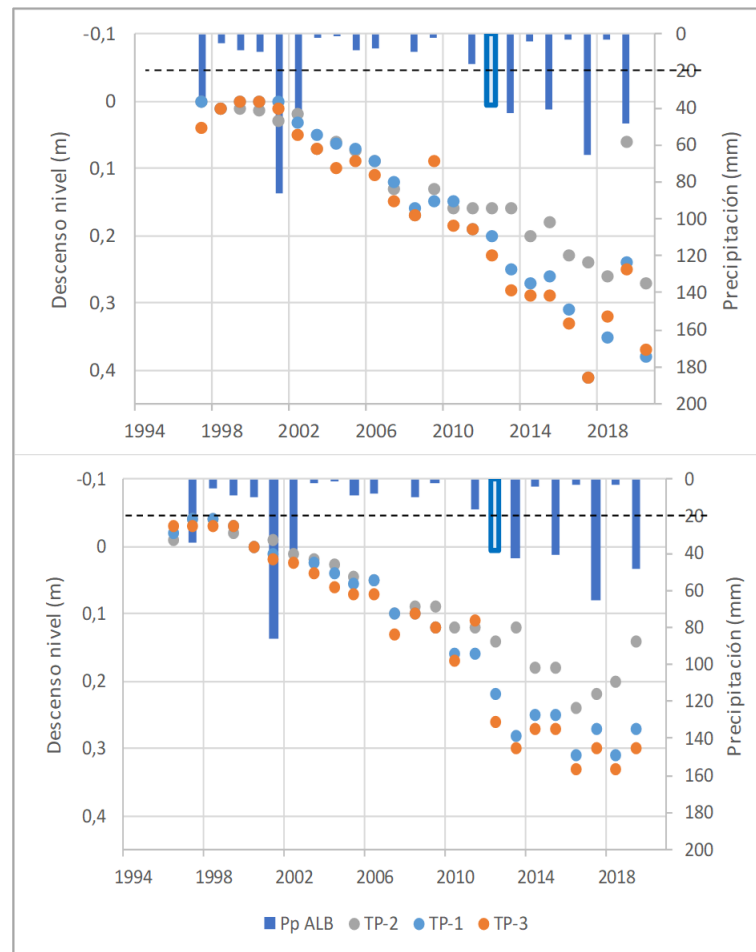


Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar la magnitud de la variación del nivel freático, se ha cuantificado el descenso de los niveles mínimos anuales medidos en verano y los máximos anuales registrados durante el invierno, en el entendido de la existencia de estacionalidad en los registros. Para esto, se determina para cada año el nivel mínimo (más profundo) medido en verano y el nivel máximo (más somero) medido en invierno. Ambos niveles son comparados con un valor de referencia de verano e invierno, respectivamente, calculándose el descenso o ascenso del nivel, respecto a dicha referencia, considerándose como referencias los niveles medidos en el verano e invierno del año 2000, dado que en ese año se verificó el comienzo de la profundización del nivel freático en TP-3. La Figura 4-37 presenta estos registros, incluyendo además la precipitación en la estación Rockwood. Cabe señalar que, para efectos de esa figura, para el año 2012 se consideró la precipitación promedio de las estaciones Peine y Chaxa (la estación pluviométrica Rockwood no se encontró operativa).

Se observa una tendencia de profundización de los niveles en TP-1, TP-2 y TP-3, en magnitudes similares para los tres pozos hasta el año 2010, en el que acumulan entre 15 cm y 20 cm de descenso en los registros mínimos de verano y entre 10 cm y 15 cm en los registros máximos de invierno. Con posterioridad, y coincidentemente con un aumento de la precipitación a partir de 2011, el pozo TP-2 (ubicado más cerca de Tilopozo, ver Figura 4-35), presentó una tendencia de variación diferente a la de los pozos TP-1 y TP-3, reduciéndose su tasa de descenso. Al año 2020, el nivel mínimo de verano se ha profundizado cerca de 40 cm en estos últimos, mientras que en el pozo TP-2 la profundización ha sido igual a 27 cm. Al respecto, se debe hacer notar que pese al incremento del nivel de verano del año 2019, como causa de la precipitación de ese año, el año 2020 se retomó la tendencia previa al descenso que registraban los tres pozos (Figura 4-37 superior). Respecto a los niveles máximos medidos en invierno, al año 2018 el descenso acumulado fue del orden de 30 cm en los pozos TP-1 y TP-3 y de 20 cm en el pozo TP-2 (Figura 4-37 inferior). Cabe destacar que los registros de 2019 están afectados por la precipitación del verano de ese año.

Figura 4-37. Descenso de la cota piezométrica en pozos TP-1, TP-2 y TP-3. Nivel mínimo de verano (superior) y máximo de invierno (inferior). Línea segmentada indica precipitación media anual en estación Rockwood



Fuente: *Elaboración propia.*

4.2.3.2 Variación del nivel freático en Zona Marginal

De acuerdo a lo señalado, se ha verificado una profundización del nivel freático en el acuífero dulce/salobre, al sur del humedal de Tilopozo, considerando los registros del pozo más cercano, TP-2, la que es del orden de 30 cm para los registros de verano, y de 20 cm para los de invierno, teniendo en consideración que el descenso ha sido medido respecto a la cota del nivel de agua del año 2000.

Para extender este análisis hacia la zona marginal, se han considerado los pozos someros "TPZ", propiedad de MEL, ya que cuentan con información desde el año 2000, hasta el año 2017. Por otra parte, pese a que comenzó a ser monitoreado de manera previa al año 2000, no se ha incluido información del punto de medición superficial existente en el humedal de Tilopozo, medido por diferentes titulares (denominado como LM-16, H y Reglilla_Tilopozo, por Albemarle, SQM y MEL, respectivamente, ver acápite 4.3), debido a la existencia de flujos surgentes y a aparentes anomalías de los registros, reconocidas por MEL- Golder (2017) en dicho punto de medición. Los puntos de medición considerados se indican en la Tabla 4-5 y su ubicación se puede apreciar en la Figura 4-35.

Tabla 4-5 Puntos de análisis de variación de profundidad del nivel freático

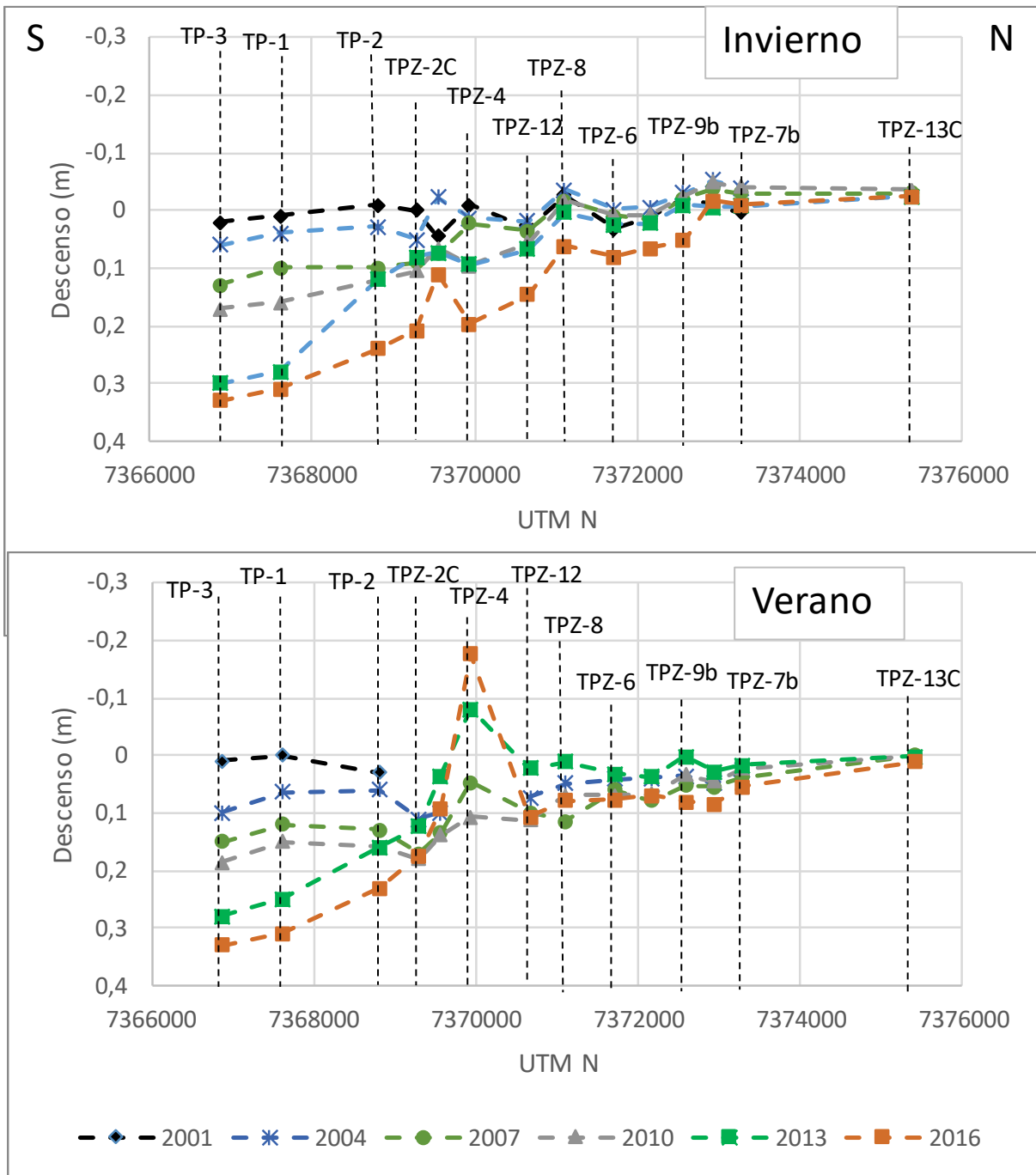
Estación	E (UTM)	N (UTM)	Cota terreno (m.s.n.m)	Período de registros
TP-3	578.925	7.366.868	2.325,66	1996 – 2020
TP-1	578.503	7.367.615	2.319,27	1996 – 2020
TP-2	578.497	7.368.805	2.310,87	1996 – 2020
TPZ-2C	577.201	7.369.287	2.307,31	2000 – 2017
TPZ-3	578.166	7.369.303	2.307,00	2000 – 2017
TPZ-4	578.381	7.369.933	2.306,09	2000 – 2016
TPZ-12	579.020	7.370.663	2.304,73	2000 – 2017
TPZ-8	577.015	7.371.104	2.304,82	2000 – 2017
TPZ-6	578.506	7.371.715	2.303,90	2000 – 2017
TPZ-5B	579.611	7.372.160	2.304,23	2000 – 2017
TPZ-9B	575.768	7.372.570	2.302,35	2000 – 2017
TPZ-10	576.704	7.372.928	2.302,54	2000 – 2017
TPZ-7B	577.631	7.373.281	2.302,78	2000 – 2017
TPZ-13C	576.674	7.375.391	2.300,72	2007 – 2017

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los registros medidos en los pozos indicados en la Tabla 4-5 (período 2000-2017), se generaron perfiles longitudinales de descenso del nivel freático, para el nivel mínimo anual de verano y máximo anual de invierno. Para lo anterior se siguió el siguiente proceso:

- Para cada pozo, en cada año del período evaluado, se determinó la cota piezométrica mínima de verano y la cota máxima de invierno.
- Considerando como referencia los niveles medidos durante el verano e invierno del año 2000 (febrero y septiembre, respectivamente), se calculó la variación del nivel mínimo de verano y máximo de invierno, para cada año. Un registro positivo indica descenso (o profundización) del nivel freático, respecto al valor medido el año 2000; y un registro negativo implica ascenso, o un nivel más somero respecto del año 2000. En el caso del pozo TPZ-13C, sin registros en el año 2000, se usó como referencia para determinar el descenso, las mediciones del año 2007.
- Se ordenaron los pozos longitudinalmente, desde el sur hacia el norte. En el borde sur se ubica el pozo TP-3, construido 2 km al sur de Tilopozo y en el borde norte se ubica el pozo TPZ-13C, junto a laguna La Punta.
- Se generaron perfiles longitudinales del descenso de la cota piezométrica para diferentes años.
- Los resultados de este proceso se presentan en la Figura 4-38. Esta muestra perfiles longitudinales del descenso del nivel máximo de invierno y mínimo de verano en la Zona Marginal, para períodos trianuales, entre 2001 y 2016.

Figura 4-38. Perfil longitudinal del descenso de la cota piezométrica en la Zona Marginal, para el período 2001-2016



Fuente: Elaboración propia.

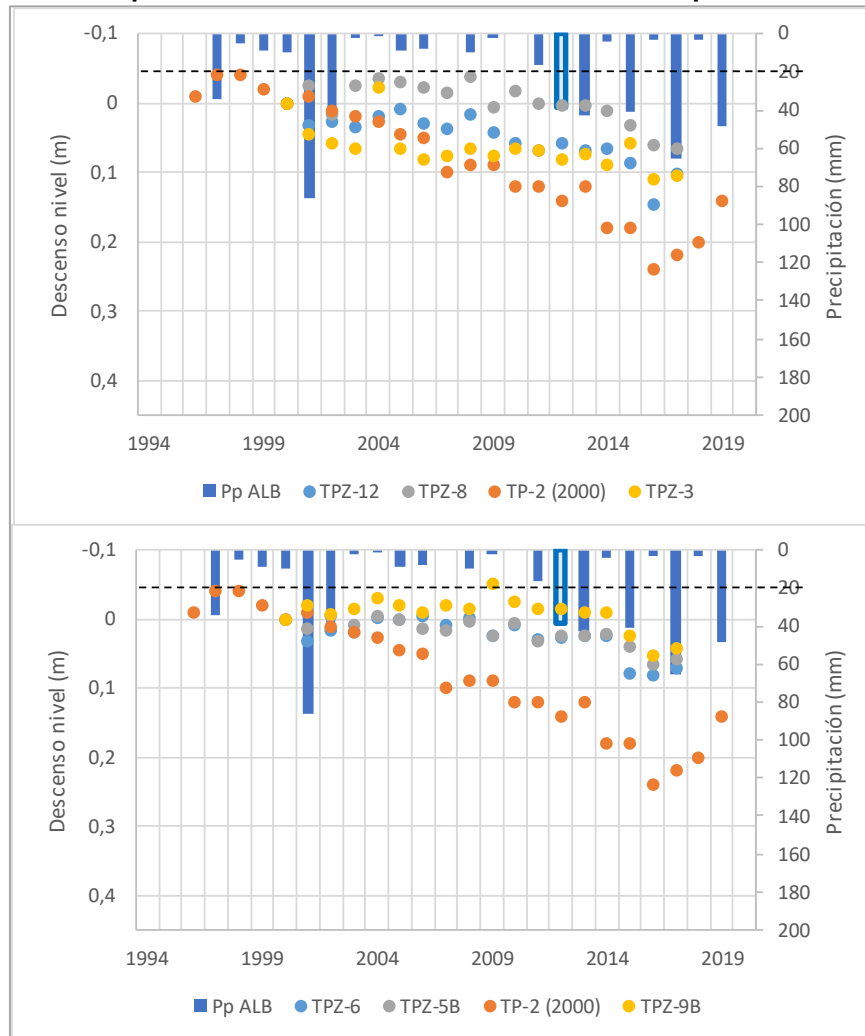
De manera complementaria, la Figura 4-39 muestra las series de tiempo del descenso de los registros máximos de invierno, para diferentes pozos ubicados al norte del humedal de Tilopozo (a modo de referencia respecto al descenso proveniente desde el sur, se incluye también el pozo TP-2). A partir de los resultados presentados en la Figura 4-38 y Figura 4-39, se destaca:

- Existe una dinámica diferente entre la variación del nivel freático en verano e invierno.

- En el caso del descenso del nivel freático de los máximos registros del período invernal (**Figura 4-38** y **Figura 4-39**), se observa un incremento de la profundización del nivel freático en el tiempo, la que se extiende hasta el pozo TPZ-9B, ubicado cerca de 2 km al norte del humedal de Tilopozo. El descenso disminuye hacia el norte, variando al año 2016 entre 10 cm y 20 cm en los pozos ubicados en el entorno del humedal de Tilopozo (TPZ-2C a TPZ-12) y siendo inferior a 10 cm al norte del mismo. Por otra parte, mientras el pozo TPZ-12 muestra una tendencia consistente a la profundización del nivel freático desde el año 2006 (Figura 4-39), en pozos ubicados al norte (entre TPZ-8 y TPZ-9B, por ejemplo), el descenso comenzó a aumentar a partir del 2014.
- Respecto al nivel freático mínimo del verano, aunque los niveles posteriores a los medidos durante 2000 muestran un descenso (o profundización) del nivel freático, no es clara la tendencia de incremento en el tiempo para el tramo ubicado al norte de TPZ-2C (borde sur del humedal de Tilopozo). La precipitación de 2013 posiblemente generó un incremento de la cota piezométrica, debido a que en diversos pozos el nivel mínimo de verano más alto correspondió al del año 2013, lo que se puede apreciar en la línea verde en Figura 4-38. Por otra parte, los registros del año 2016 fueron los más bajos (mayor descenso) en la mayoría de los puntos de monitoreo, con la excepción principal del pozo TPZ-4. En general, al año 2016, la magnitud del descenso del nivel freático para condiciones de verano respecto a los niveles del año 2000 fue del orden o inferior a 10 cm, al norte de TPZ-2C.
- Se destaca la condición particular del pozo TPZ-4, cuyos niveles mínimos de verano fueron máximos en 2013 y 2016, línea naranja en Figura 4-38, pese a que durante el período de invierno presentaron la tendencia opuesta. Al respecto, en la Figura 4-40 se muestra la variación temporal de la cota piezométrica de dicho pozo, diferenciando entre los registros de primavera-verano y los de otoño-invierno. Se puede apreciar que los valores máximos de invierno presentan una tendencia consistente al descenso, mientras que los registros de verano no muestran una tendencia clara, profundizándose en algunos años y haciéndose más someros en otros, correspondiendo los registros mínimos del año 2015 a valores similares a los del año 2000.
- Las diferencias estacionales entre los niveles máximos de invierno y mínimos de verano, y en particular, la tendencia menos clara observada para los registros de verano, tendrían su explicación en dos forzantes meteorológicas: La precipitación, que normalmente se concentra en el período de verano y que puede generar incrementos del nivel que en general se acotan a dicha época y la evapotranspiración, que al ser la forzante que domina los cambios estacionales en el nivel freático, tiene capacidad de regular el descenso de los niveles durante el período de verano.
- Respecto a lo anterior, MEL- Golder (2018) señala que la *“disminución del nivel freático en el sector de TP-2, no genera una disminución equivalente y rápida del nivel freático en un punto más al norte, ya que se induce primero una disminución de la evaporación al profundizarse el nivel freático desde aguas arriba”*. De este modo, se disminuye la velocidad de avance del cono de depresión. En este sentido, se debe destacar que efectivamente la menor disminución del nivel freático en verano tendría relación con la evapotranspiración. Dada la extensión de los datos y la variación de los mismos, con los registros de EVT con los que se cuenta, no es posible verificar lo anterior. Aunque existen un par de puntos de medición que muestran una disminución de la EVT entre el período previo a marzo de 2016 y el posterior, en el punto de medición ubicado más al sur y más cercano a los humedales (EVT-22), no se han apreciado cambios de largo plazo en la EVT, que estén dando cuenta de una disminución de la misma.

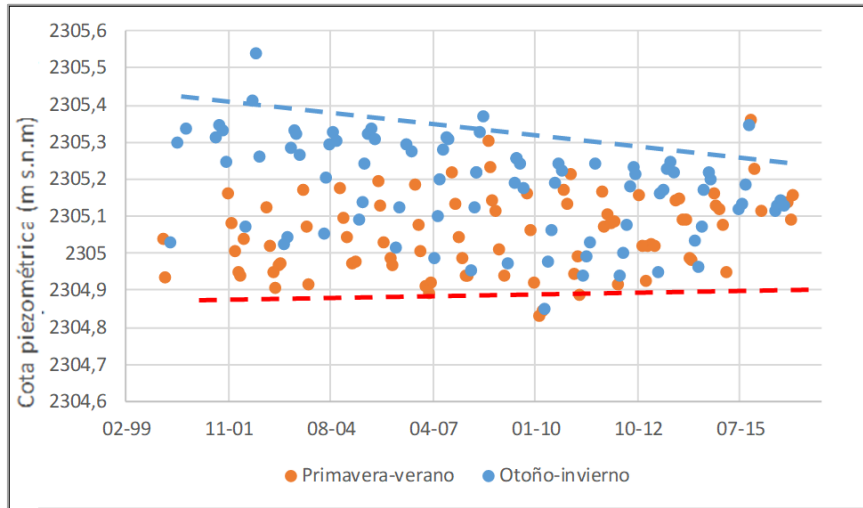
- La Figura 4-41 muestra un resumen esquemático de los resultados obtenidos, diferenciando entre el borde sur de Tilopozo y la Zona Marginal y dividiendo esta última en tres tramos, de acuerdo a los resultados obtenidos: Humedal de Tilopozo, sector intermedio y zona de lagunas. De manera adicional, en la figura se indica la ubicación del radio de influencia de la prueba de bombeo de Tilopozo realizada el año 2014. En el acápite **Error! Reference source not found.** se describen y detallan los resultados de esta.

Figura 4-39. Variación temporal del descenso del nivel máximo de invierno en el pozo TP-2 y en pozos ubicados al norte del humedal de Tilopozo



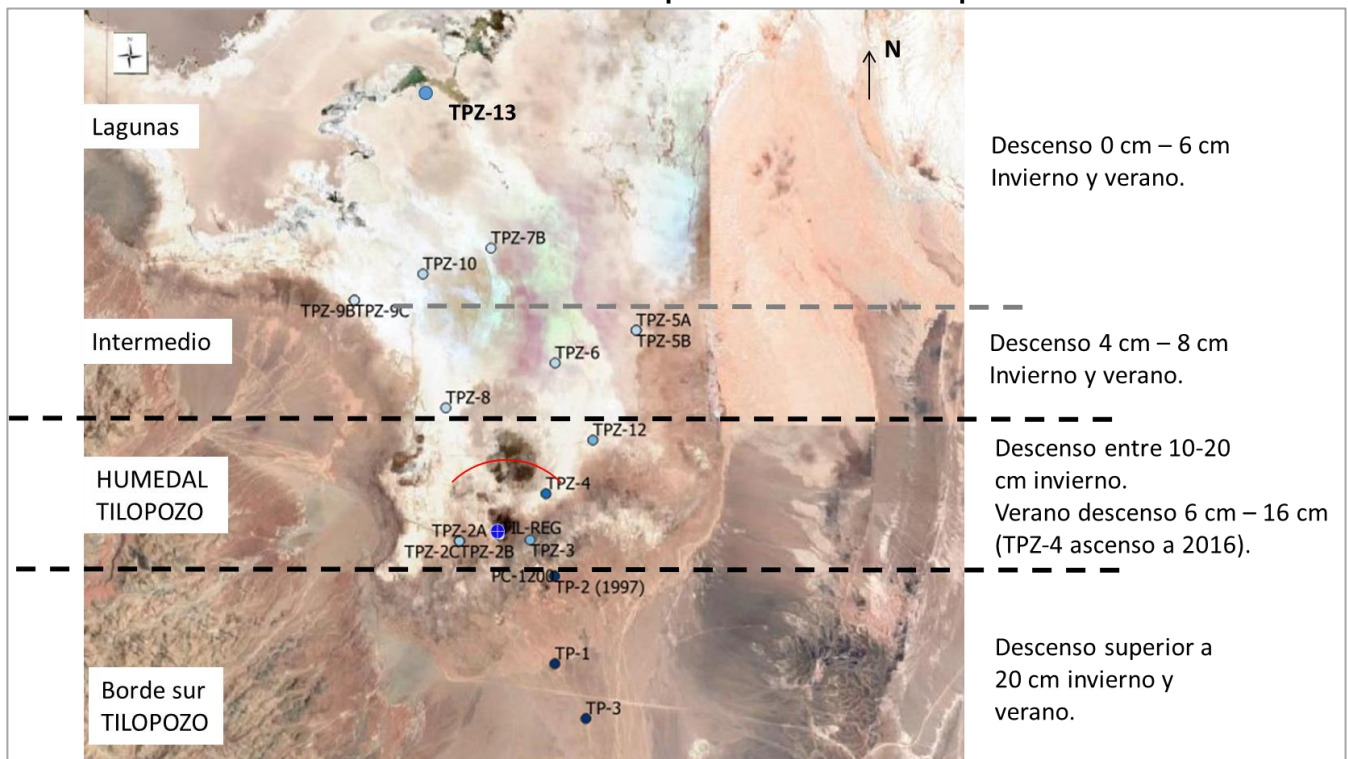
Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 4-40. Variación de la cota piezométrica en pozo somero TPZ-4. Líneas segmentadas indican tendencia de valores máximos de invierno (azul) y de mínimos de verano (rojo)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-41. Zonificación de área de estudio, de acuerdo a descensos medidos. Línea roja indica radio máximo de influencia de prueba de bombeo Tilopozo



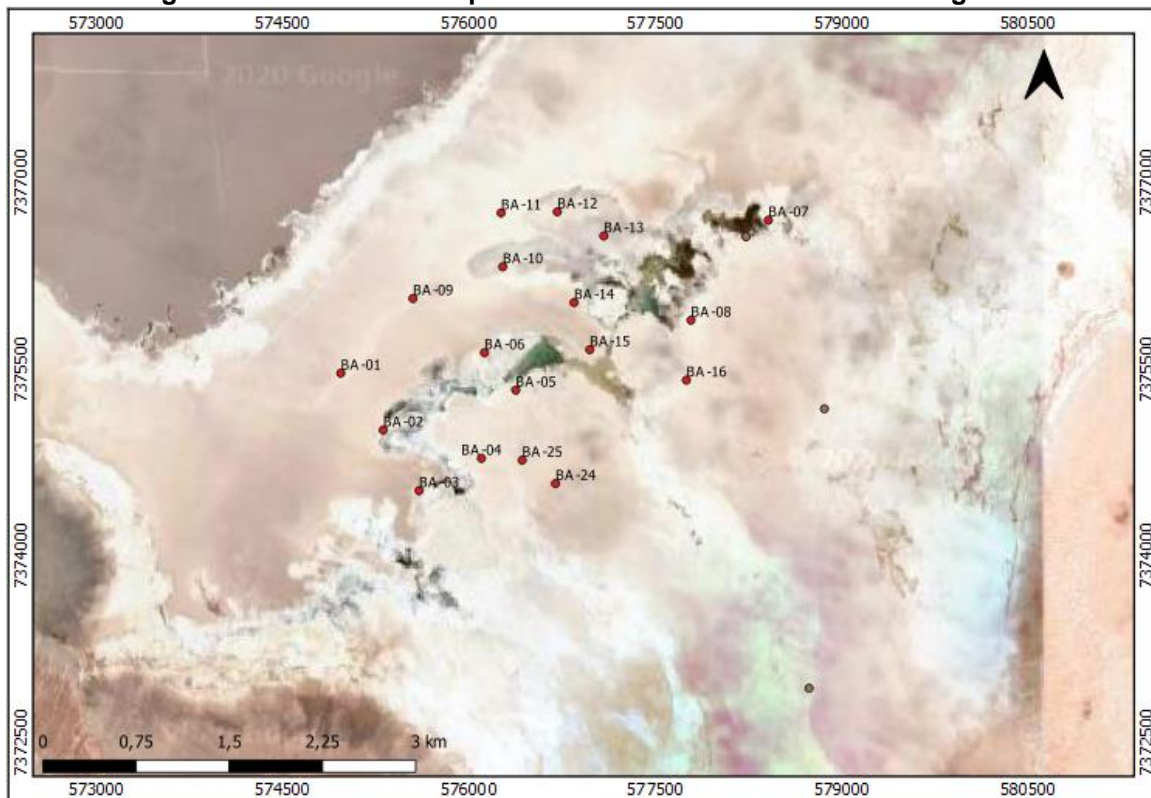
Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.3 Variación del nivel freático en el entorno de las lagunas La Brava y La Punta

De acuerdo al análisis de la sección anterior, los efectos del descenso del nivel freático proveniente desde el sur alcanzarían el sector de lagunas (en su borde sur), pero serían de menor magnitud.

Albemarle cuenta con información de profundidad del nivel freático en barrenos (pozos someros) instalados en el borde sur de las lagunas La Punta y La Brava: BA-04, BA-05 y BA-25 hacia el oeste, cercanas a La Brava, y BA-16, BA-08 y BA-07, hacia el este, cercanas a La Punta. La ubicación de estos puntos se presenta en la Figura 4-42. Se debe destacar que los pozos someros BA-05, BA-07 y BA-16 son parte del Plan de Alerta Temprana (PAT) de Albemarle, presentando valores umbrales mínimos para la cota piezométrica.

Figura 4-42. Ubicación de pozos someros en el entorno de las lagunas



Fuente: Elaboración propia.

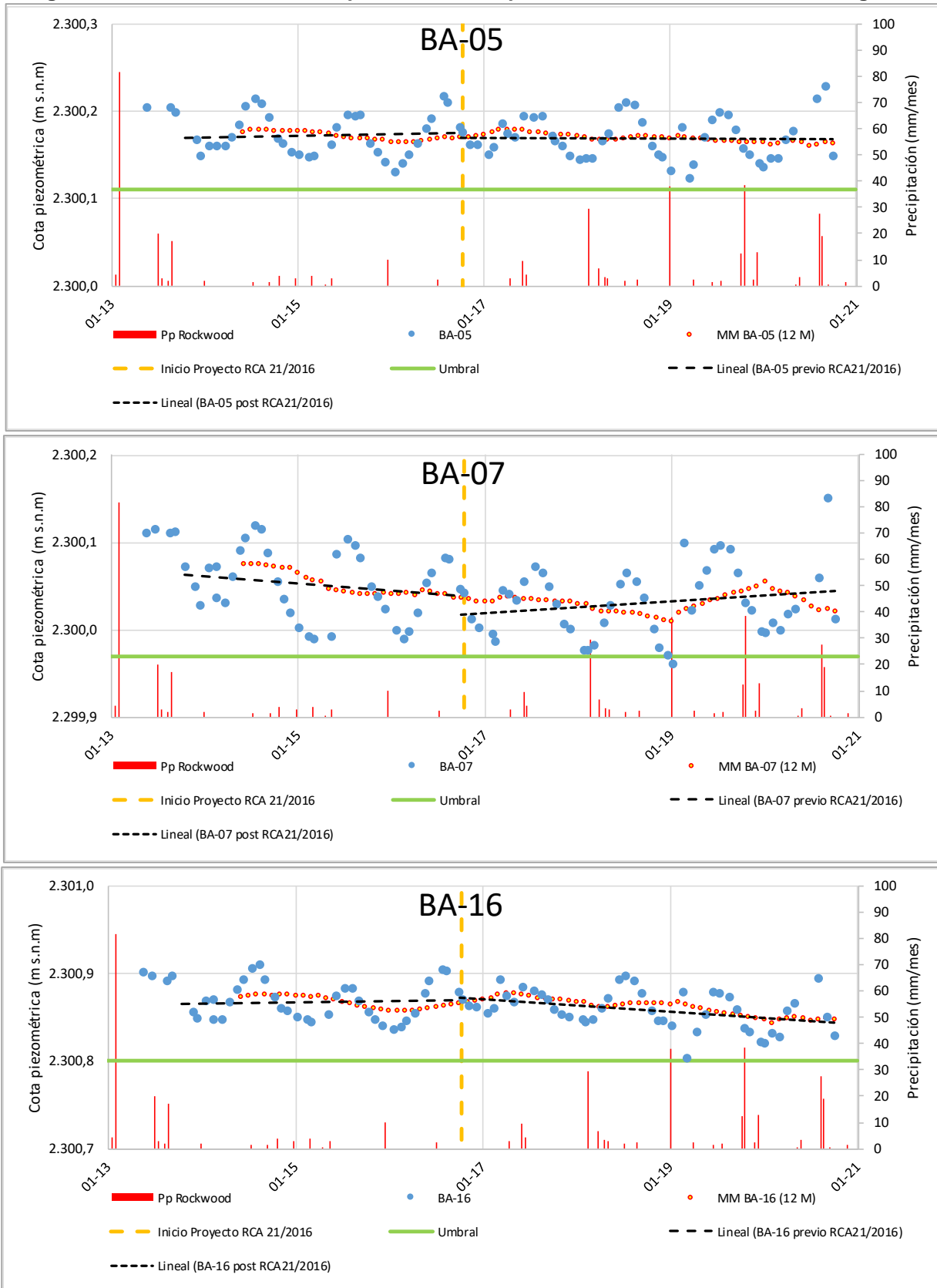
La **Figura 4-43** muestra la variación temporal de la cota piezométrica en los barrenos incluidos en el PAT de Albemarle (BA-05, BA-07 y BA-16), mientras que en la Figura 4-44 se presentan los barrenos restantes ubicados al sur de las lagunas (BA-04, BA-25 y BA-08). Además de los registros medidos, en estas figuras se incluyen la media móvil de 12 meses de los mismos (de modo de facilitar la visualización de tendencias en los registros, al eliminar la estacionalidad), la precipitación en la estación SCL-Rockwood y se indica como hito el año 2016, de acuerdo al inicio de la operación del proyecto de Albemarle aprobado por RCA N° 21/2016. Para el caso de los barrenos que son parte del PAT (Figura 4-43), de manera adicional a la información descrita y a solicitud de Albemarle, se han incluido los umbrales respectivos de cada uno y las tendencias de los niveles de Figura 4-43 determinadas por medio de una regresión lineal. Considerando que los registros presentan estacionalidad de 12 meses, para no generar alteraciones en las regresiones, se han considerado períodos completos para su determinación. Así, por ejemplo, la tendencia del período previo a

octubre de 2016 se ha determinado con las mediciones del período octubre 2013 – septiembre 2016, por lo que no incluye los primeros registros medidos (mayo 2013 – agosto 2013).

De acuerdo a las series de tiempo presentadas, los pozos BA-07, BA-16, BA-04 y BA-08 muestran una tendencia al descenso, correspondiendo el mayor descenso acumulado al pozo BA-07, cercano a siete (7) cm al año 2020, de acuerdo a los valores de la media móvil de 12 meses, no obstante un breve incremento en el último período como causa de las precipitaciones de enero y febrero de 2019 y la de agosto de 2020. Por otra parte, descensos casi nulos se aprecian en los pozos BA-05 y BA-25, del orden de 1 cm para el período de análisis. Ambos valores son consistentes con la existencia de afloramiento de agua en el pozo BA-25.

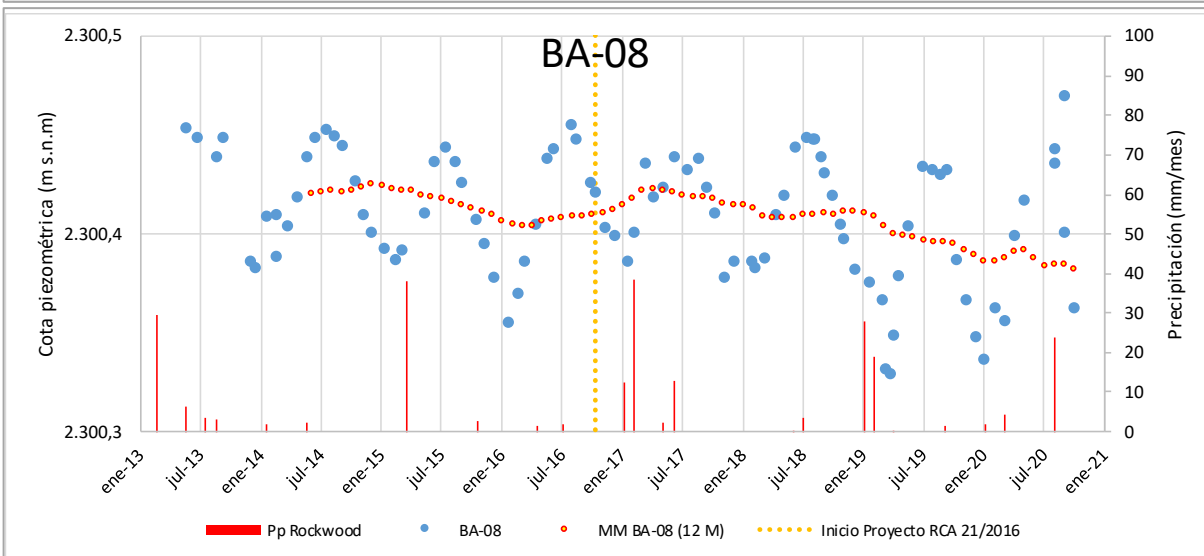
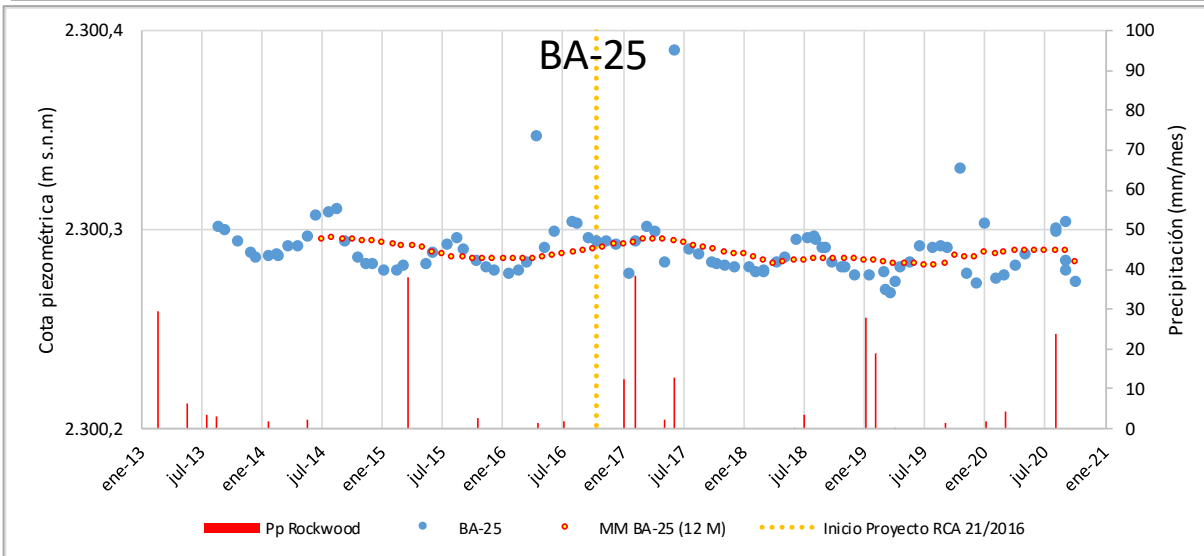
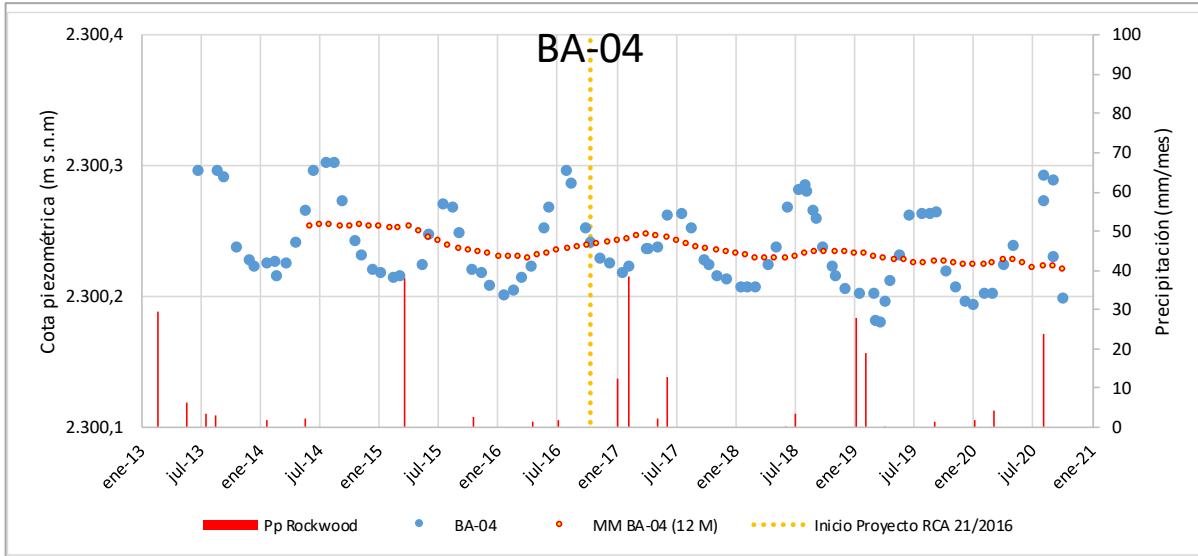
El efecto de la precipitación en el nivel medido en los barrenos no es homogéneo. En particular, esto es válido para el evento de precipitación de enero y febrero de 2019. Mientras en algunos casos, como BA-07, el nivel se incrementó luego de presentar valores mínimos en enero de 2019, otros mantuvieron su nivel con una variación mínima (BA-05), mientras que otros no modificaron en el corto plazo su tendencia a la profundización (BA-08). Al respecto, se destaca que los pozos BA-04, BA-08 y BA-16 presentan un descenso en el nivel medido en marzo de 2019, por debajo de los niveles previos a las lluvias, pese a la precipitación de febrero de 2019. Datos de registros de sensores instalados en los pozos BA-08 y BA-16 muestran que estos descensos no corresponden a anomalías asociadas a un potencial desplazamiento del pozo somero, sino que a la evolución del nivel en el pozo y a que las lluvias de febrero de 2019 tuvieron un efecto de corto plazo. La Figura 4-45 muestra un ejemplo de esto para el pozo BA-08, en el que se incluyen registros de cota piezométrica en el pozo obtenidos manualmente y de los sensores. Este da cuenta de la importancia de contar con registros continuos para la evaluación de la dinámica del pozo.

Figura 4-43. Variación de la cota piezométrica en pozos PAT ubicados al sur de las lagunas

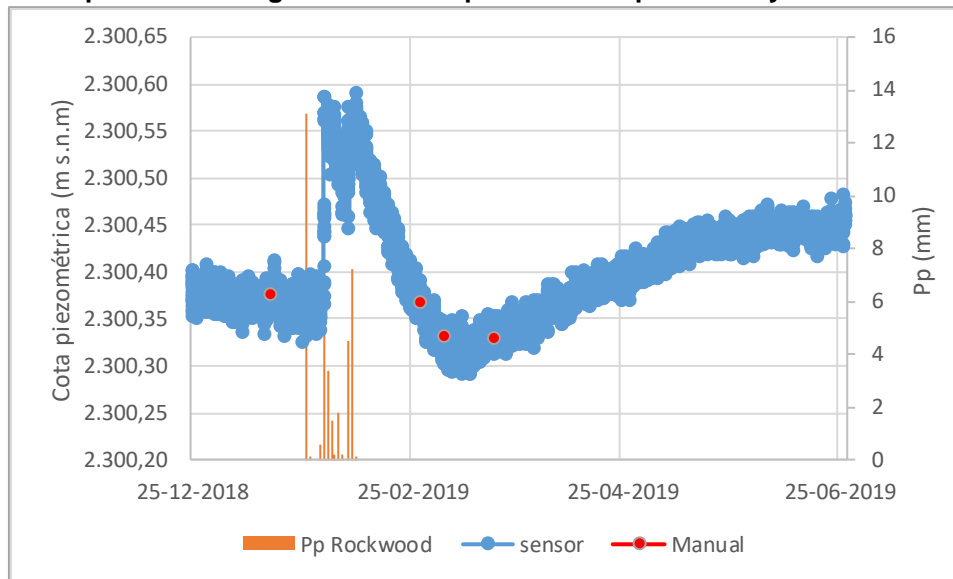


Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-44. Variación de la cota piezométrica en pozos no PAT ubicados al sur de las lagunas



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-45. Comparación de registros de cota piezométrica puntuales y continuos en pozo BA-08

Fuente: Elaboración propia.

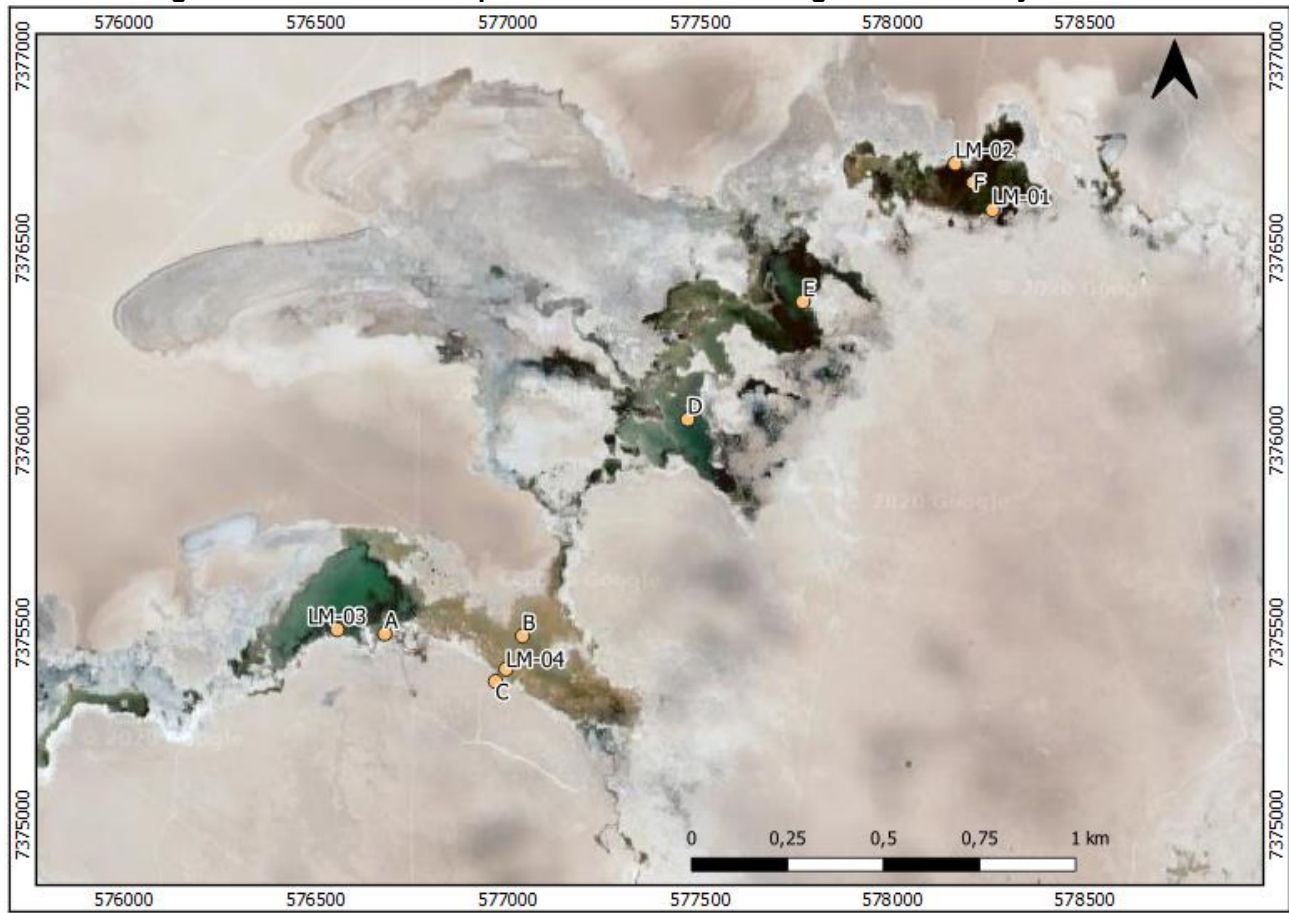
4.2.3.4 Variación del nivel de agua en lagunas La Punta y La Brava.

La Figura 4-46 muestra la ubicación de los puntos de monitoreo de nivel de agua en las lagunas La Punta y La Brava, incluyendo los de propiedad de Albemarle y los de MEL.

En la Figura 4-47 se presenta el descenso del nivel de agua en el período 1995-2020 en los puntos A, B, C, D, E y F, para los registros mínimo de verano y máximo de invierno, en comparación con los registros de 1995. Se aprecia que el nivel en las lagunas no ha presentado variaciones significativas en el tiempo, con la excepción de los puntos A y F, ambos ubicados en los bordes de las lagunas, que muestran descensos. De manera complementaria, se cuenta con registros limnimétricos en ambas lagunas en puntos de monitoreo de Albemarle (LM-01, LM-02, LM-03 y LM-04) solamente desde 2016, tres de los cuales se ubican en torno a los puntos A y F (ver Figura 4-46). La Figura 4-48 muestra la variación de la cota del pelo de agua en estos puntos, observándose que no han presentado cambios significativos en su nivel para el período con registros.

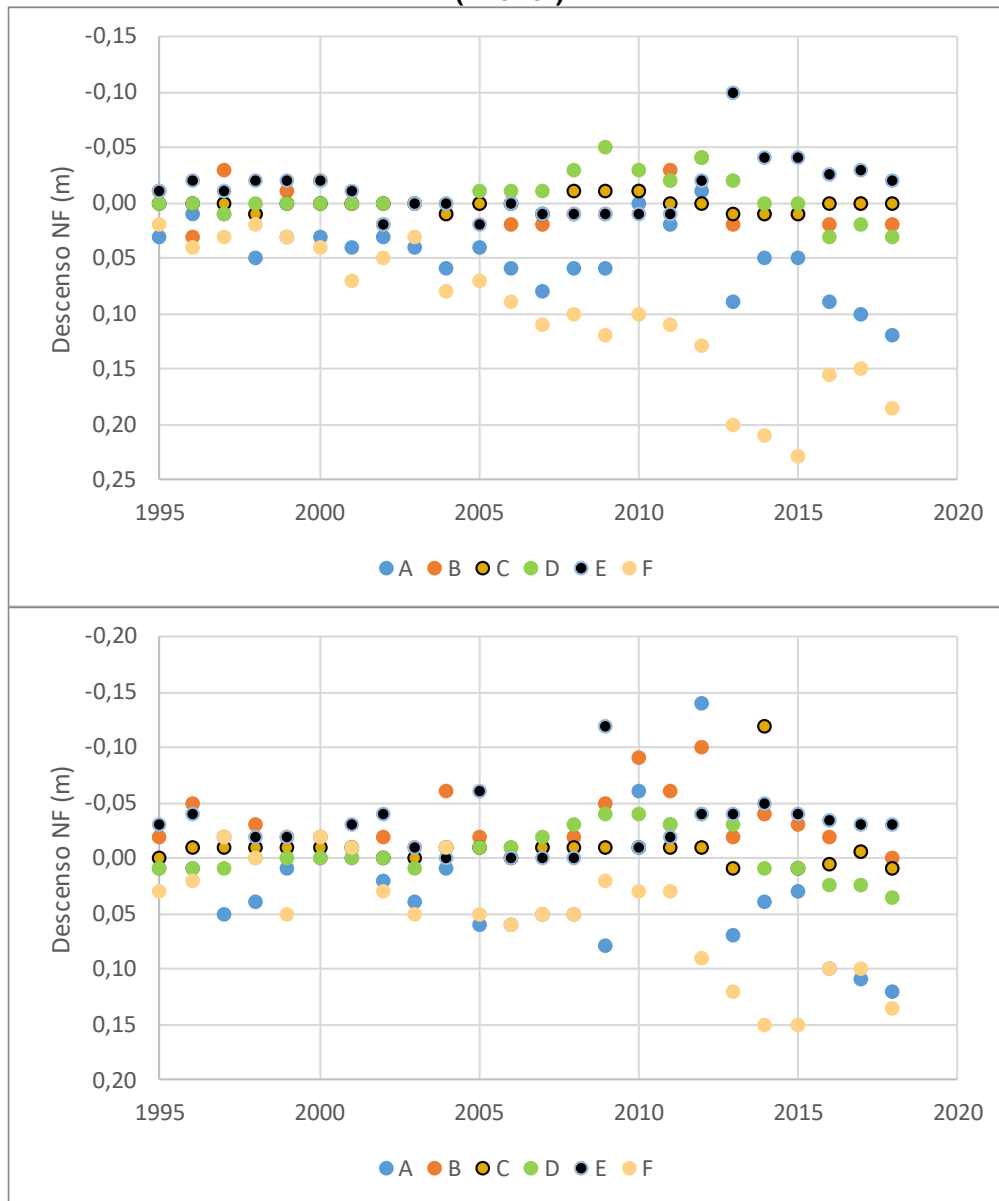
Respecto a la tendencia decreciente del nivel en los puntos A y F, no hay certeza respecto a su origen. Por ejemplo, en el caso del punto F, el nivel de agua presenta una disminución desde antes de 2005, y tal como se muestra en el acápite 4.2.3.2, en dicho período no hubo cambios significativos en la profundidad del nivel de agua en los pozos someros ubicados al norte de las lagunas. Así, los descensos identificados podrían no estar necesariamente asociados a cambios en el acuífero, pudiendo relacionarse con otras condiciones particulares o locales como, por ejemplo, alteraciones en los limnímetros. Al respecto, MEL- Golder (2017) señala que el punto "F" "(se ubica) en una cubeta que conforma el brazo más septentrional de la laguna (la Punta) y que podría, eventualmente, estar separado y sujeto a efectos locales, variaciones en la batimetría, o cambios en la instalación de la estaca", agregando que su comportamiento "no puede asociarse a cambios en el sistema subterráneo del acuífero MNT".

Figura 4-46. Ubicación de puntos de monitoreo en lagunas La Punta y La Brava



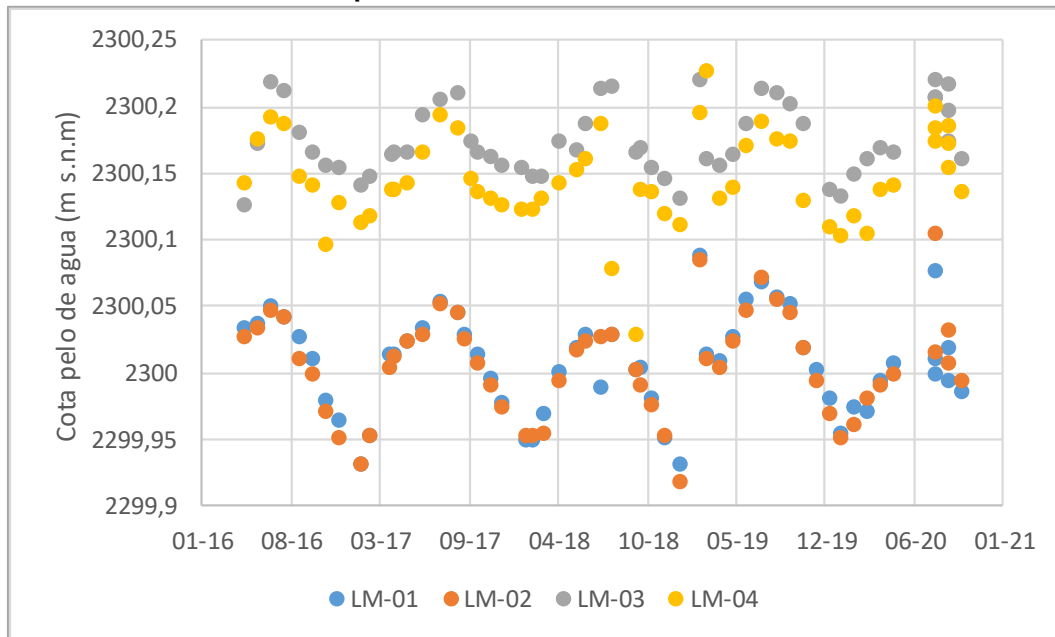
Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 4-47. Descenso de la cota superficial del pelo de agua en lagunas La Punta y La Brava en puntos de monitoreo de MEL, para registros mínimos de verano (superior) y máximos de invierno (inferior)



Fuente: Elaboración propia a partir de MEL-Golder, 2017.

Figura 4-48. Variación de la cota superficial del pelo de agua en lagunas La Punta y La Brava en puntos de monitoreo de ALB



Fuente: Elaboración propia a partir de registros de base de datos de Albemarle, 2020.

4.2.4 Evolución de la variación de niveles en torno a pozo Tilopozo

El pozo Tilopozo, utilizado por Albemarle para el bombeo de agua desde el acuífero dulce/salobre, se ubica en el humedal TL2, cerca del punto de monitoreo superficial LM-16, cuyos registros de nivel y calidad de agua han sido analizados en secciones previas de este documento. En el entorno del pozo de bombeo existen otros puntos de observación de profundidad del nivel freático, los que se muestran en la Figura 4-49. Junto al pozo se ubica una noria, cuyo nivel de agua se deprime al mismo ritmo que el del pozo (RWL-SGA, 2015). La extracción de agua se realiza a través de una bomba ubicada en el pozo, a 2,5 m de profundidad y de acuerdo a información entregada por Albemarle, la bomba opera de manera permanente, durante las 24 horas, salvo en situaciones particulares en las que se deba detener.

Para estudiar el efecto del bombeo en el nivel freático del acuífero dulce/salobre, se han analizado los resultados de la prueba de bombeo realizada en agosto de 2014 y la evolución en el tiempo del nivel de agua en el entorno del pozo.

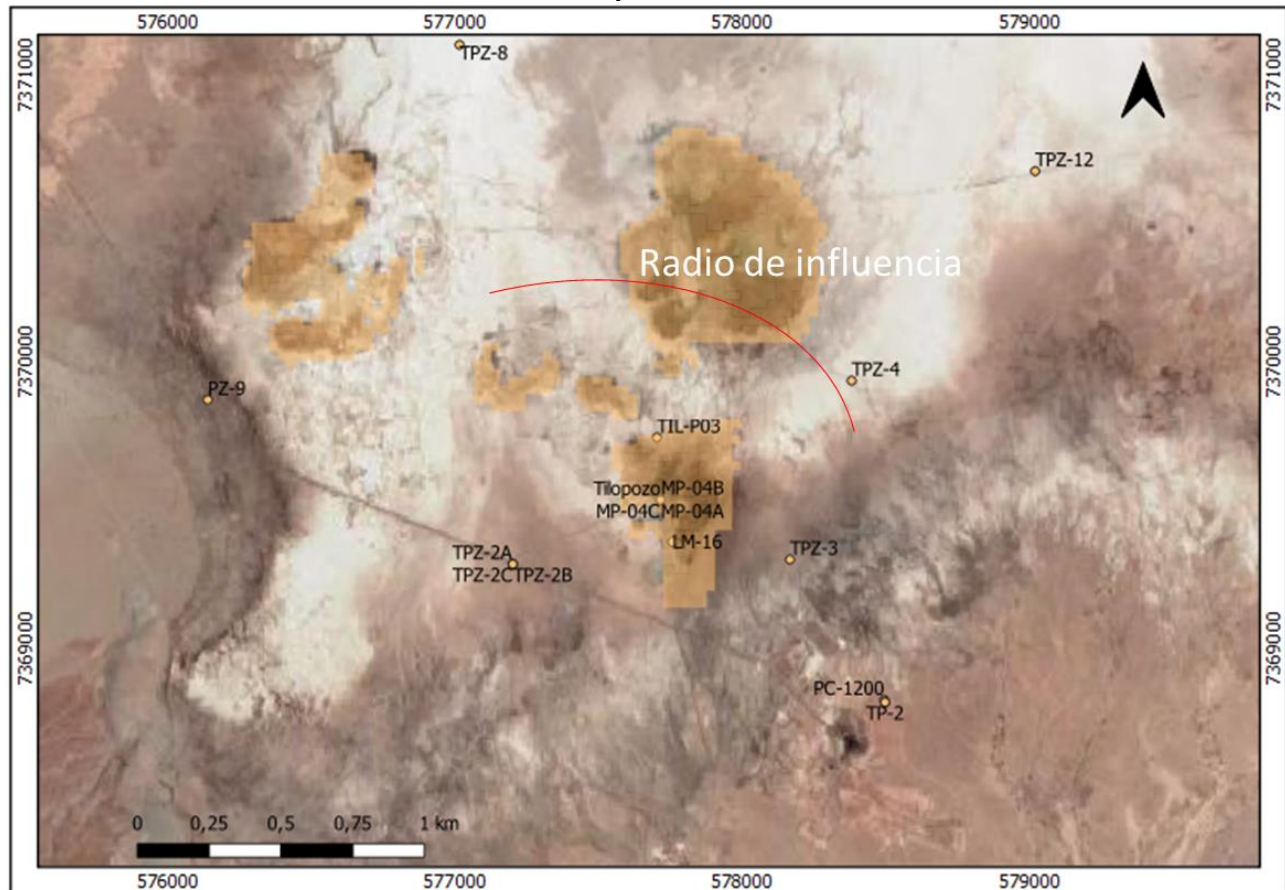
4.2.4.1 Antecedentes previos en pozo Tilopozo

De acuerdo a información presentada en el Apéndice D del Anexo 1 de la Adenda 5 del Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama de Albemarle (RWL-SGA, 2015), Albemarle realizó una prueba de bombeo en el pozo Tilopozo en agosto 2014.

La prueba fue realizada en la época que corresponde el período del año en el que el nivel de las aguas se encuentra más somero (invierno), considerando la estacionalidad de los niveles. El bombeo se extendió durante alrededor de 4 días (98 horas), con un caudal constante igual a 8,26 l/s.

Se construyeron 3 pozos someros de observación al norte del pozo de bombeo, instalados en el humedal TL2 o en su límite norte. Adicionalmente, se evaluó el descenso del nivel freático en el pozo MP-04A, ubicado al norte del pozo de bombeo. El esquema de medición y la ubicación de los puntos de observación, se presenta en la Figura 4-50.

Figura 4-49. Puntos de monitoreo en el entorno del pozo Tilopozo. En rojo se indica radio de influencia de prueba de bombeo

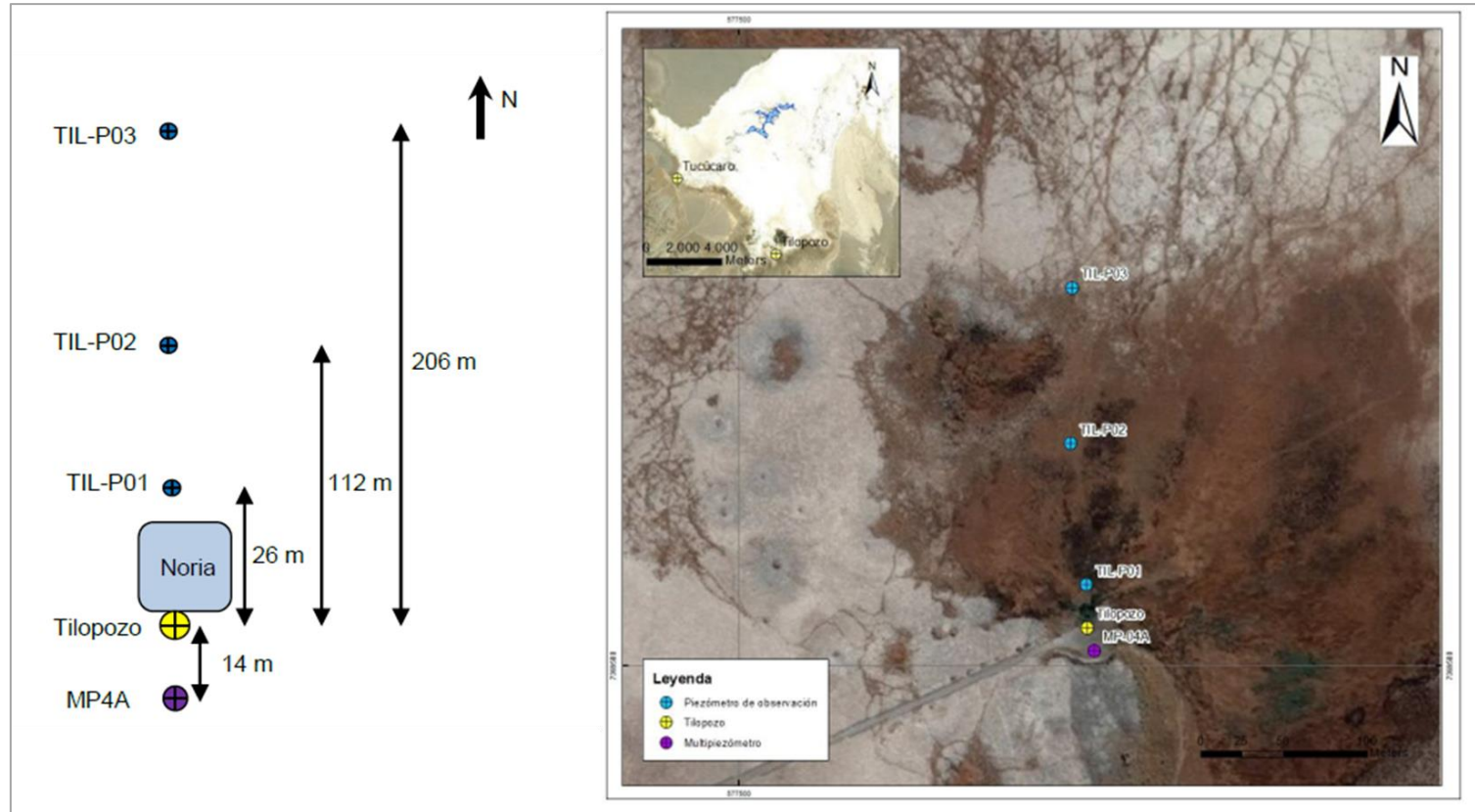


Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la prueba de bombeo mostraron un descenso de 15 cm en el pozo de bombeo y en el pozo de observación Til-P01, ubicado en la zona central del humedal TL2; de 9 cm en el pozo de observación Til-P02, dentro del mismo humedal, pero más cerca de su borde; y de 5 cm en Til-P03, en el borde norte del humedal.

Por otra parte, en la prueba de bombeo se verificó que el pozo MP-04A, ubicado al sur del pozo Tilopozo, presentó un descenso de 1,5 cm luego de los cuatro días que duró la prueba. Considerando su mayor profundidad (40 m), en relación a los pozos de observación (1 m) se estimó que el bajo efecto en su nivel, pese a la cercanía con el pozo Tilopozo, se debía a que podía estar en contacto con otros niveles acuíferos. Al respecto, de acuerdo a lo analizado en secciones previas del presente informe, existirían flujos verticales ascendentes en el punto de monitoreo superficial LM-16, ubicado unos 130 m al norte de los pozos Tilopozo y MP-04A, por lo que no se descarta que dichos flujos también se produzcan en otros puntos cercanos, como, por ejemplo, MP-04A.

Figura 4-50: Ubicación de puntos de observación para prueba de bombeo en pozo Tilopozo

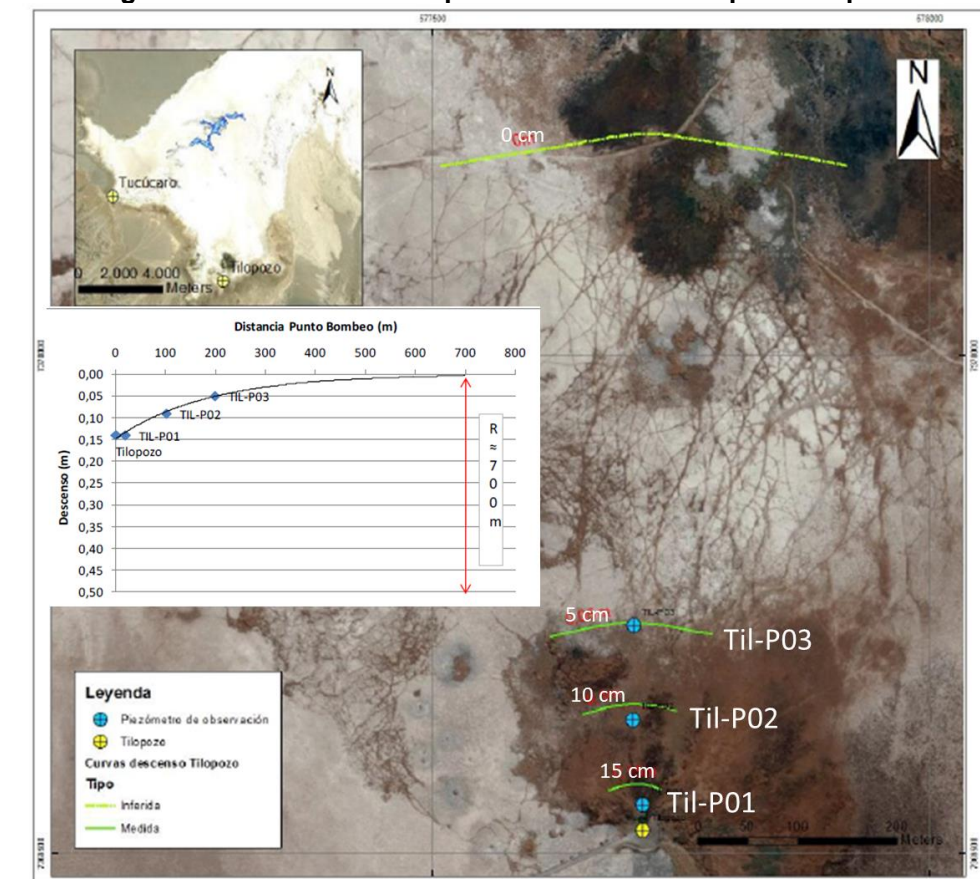


Fuente: RWL-SGA, 2015.

Con los resultados obtenidos en los pozos someros de observación, se determinó un radio de influencia del bombeo, el que se extiende hasta los 700 m, alcanzando hacia el norte el humedal TL1 (ver Figura 4-51). Se debe señalar que, dado que el objetivo del análisis de la prueba de bombeo era verificar la no existencia de afectación de las lagunas La Punta y La Brava, como causa de la extracción de agua desde el pozo Tilopozo, en el análisis no se consideró una potencial extensión hacia el sur. Es más, el bajo efecto evidenciado en el pozo MP-04A (ubicado 15 m al sur del pozo de bombeo), fue explicado como una consecuencia de las características del pozo, y no se asoció o relacionó con el acuífero. Considerando que el flujo subterráneo proviene desde el sur, y de acuerdo a la condición surgente verificada al menos en el punto LM-16, se estima que el radio de influencia hacia el sur podría ser menor, aunque esto debe ser verificado con mediciones.

Cabe destacar que en la Adenda 1 del EIA Proyecto Monturaqui (MEL- Golder, 2018), se indica que, de acuerdo a los registros reportados de la prueba de bombeo de Tilopozo presentados en la Adenda 5 del EIA de Rockwood Lithium (Rockwood Lithium, 2015), “la estabilización no se aprecia de forma concluyente” luego del tercer y cuarto día de prueba, dando a entender que si la prueba se hubiera prolongado por más tiempo, se podría haber generado una mayor profundización de los niveles y una mayor extensión del radio de influencia. Al respecto, es importante señalar que, dado los registros de la prueba de bombeo, de haberse prolongado por más tiempo no debiera haber generado un cambio significativo en la profundización del nivel en el pozo Til-P03, del orden de unos pocos centímetros. Así, de ser efectivo lo indicado por MEL-Golder (2018), de todos modos el radio de influencia no debiera alcanzar las lagunas La Punta y La Brava.

Figura 4-51: Resultados de prueba de bombeo en pozo Tilopozo



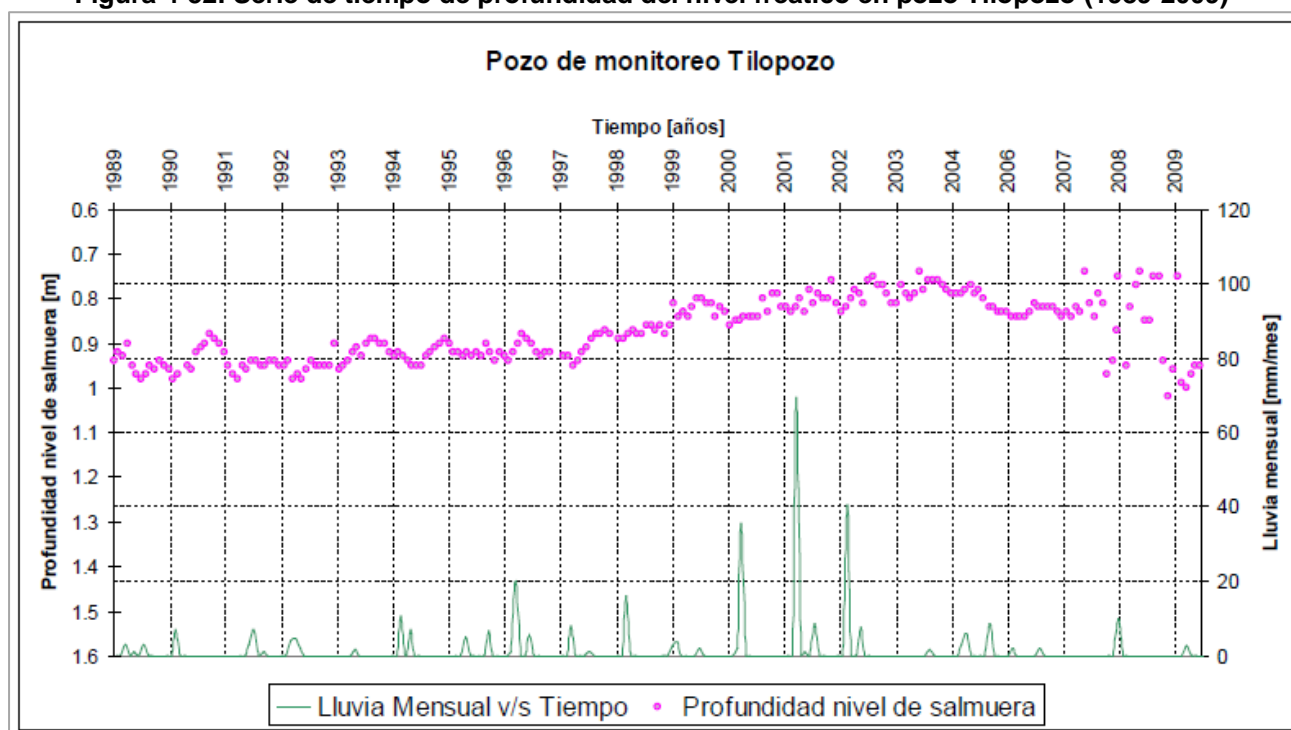
Fuente: RWL-SGA, 2015.

En definitiva, de acuerdo a los resultados de la prueba de bombeo, y considerando la extensión del radio de influencia exclusivamente hacia el sur, solamente existen dos pozos en los que se puede verificar un potencial efecto de la operación del pozo: el mismo pozo Tilopozo y Til-P03. Estos se analizan en los siguientes acápite

4.2.4.2 Variación del nivel freático en pozo Tilopozo y su relación con su bombeo

El pozo Tilopozo presenta registros en la base de datos de Albemarle desde el año 2001. No obstante, de acuerdo a SCL-GAC (2009) existe información del nivel freático al menos desde el año 1989 en dicho pozo (ver Figura 4-52, que muestra registros hasta el año 2009). Según esta, el sistema en condición natural, sin bombeo, habría presentado una profundidad del nivel freático relativamente estable, en torno a 0,9 m y con baja estacionalidad, que podría ser indicador de flujos verticales ascendentes. No obstante, el inicio de las operaciones de bombeo (1997) habría generado un ascenso del nivel, variando la profundidad desde 0,9 m a 0,8 m, aproximadamente, lo que no parece ser consistente.

Figura 4-52: Serie de tiempo de profundidad del nivel freático en pozo Tilopozo (1989-2009)

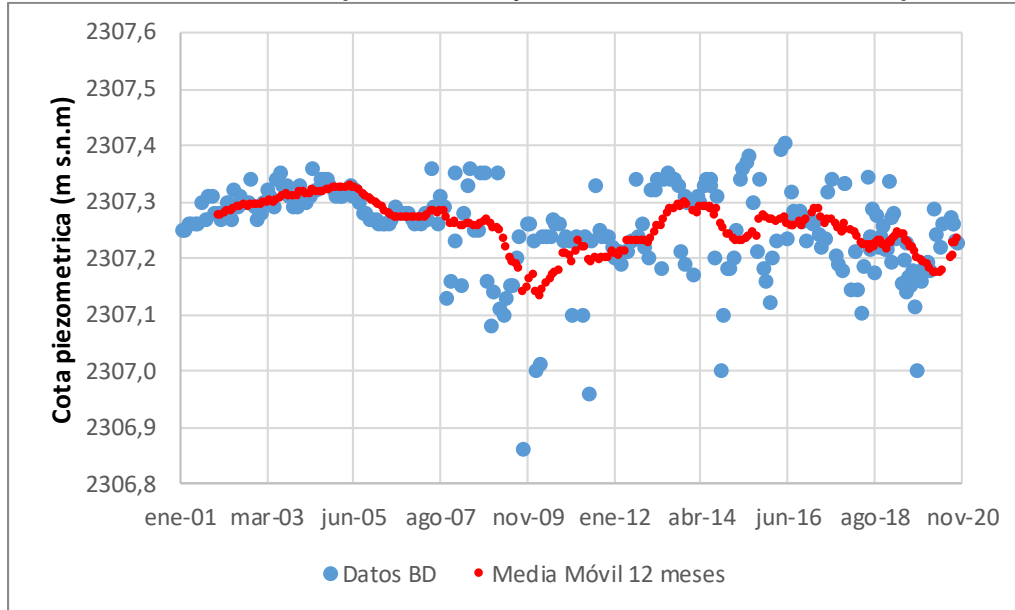


Fuente: SCL-GAC, 2009.

Para el análisis de la evolución de los registros medidos en el pozo Tilopozo se ha considerado la base de datos interna de Albemarle, cuya información es coincidente con la presentada por SCL-GAC (2009). En lo que respecta a la evolución de los registros en el pozo Tilopozo, para el análisis ha sido considerada la serie de tiempo completa, usando una media móvil de 12 meses para evaluar la tendencia del nivel (Figura 4-53) y adicionalmente se ha diferenciado entre mediciones de otoño-invierno (abril – septiembre) y primavera-verano (octubre – marzo), para estudiar cambios estacionales (Figura 4-54), incorporando en esta figura una estimación de la profundidad del nivel freático luego de la prueba de bombeo, bajo el supuesto de que el nivel de referencia correspondió al reportado para el mes de agosto de 2014. Respecto a la variación interanual, se destaca la profundización del nivel freático entre 2009 y 2010, años en que se verificó el mayor bombeo desde el pozo, y la recuperación posterior hasta 2013, año en el que volumen extraído fue mínimo (ver Figura 4-55). Desde dicho período en adelante existe una tendencia a la profundización del nivel.

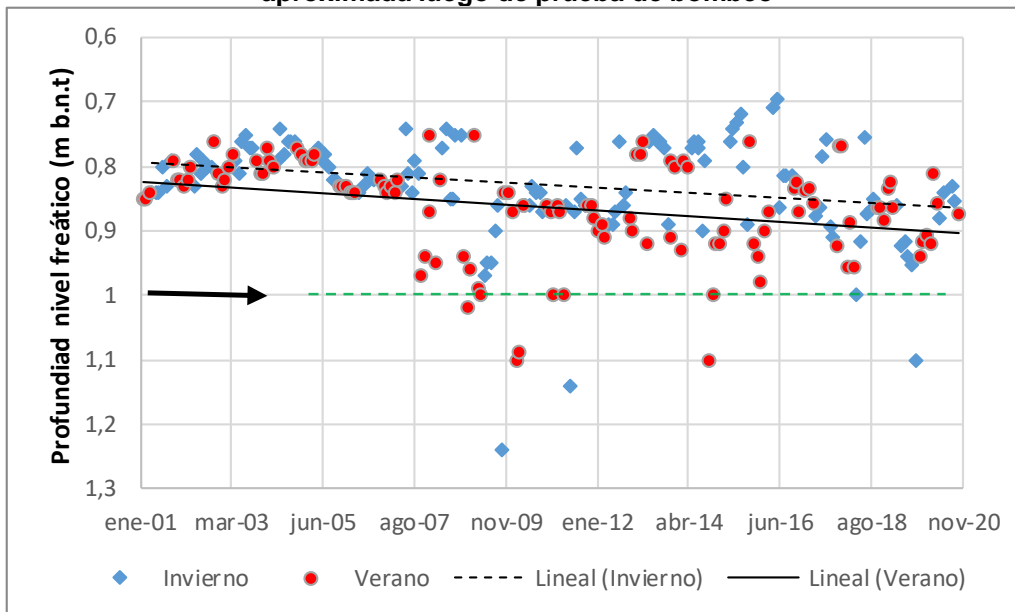
Respecto a las diferencias estacionales, se puede observar que los niveles medidos en el período de verano son levemente más profundos que los medidos en invierno (diferencia promedio del orden de 3 cm). El que los niveles de verano sean más profundos que los de invierno es consistente con un mayor bombeo en esta época y con el efecto de la evapotranspiración en el nivel freático. Sin embargo, la baja diferencia entre ambos periodos podría dar cuenta de la surgencia de aguas en este sector.

Figura 4-53: Variación de cota piezométrica y media móvil de 12 meses en pozo Tilopozo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-54: Evaluación de tendencia de profundidad del nivel freático en pozo Tilopozo y comparación con nivel luego de prueba de bombeo. Línea segmentada verde indica profundidad aproximada luego de prueba de bombeo

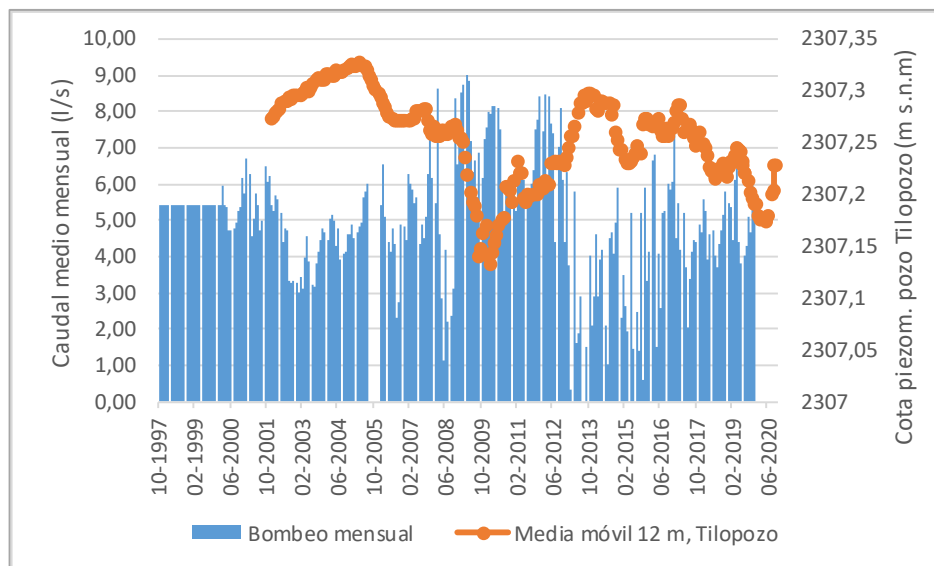


Fuente: Elaboración propia.

Aunque los últimos niveles medidos durante 2020 muestran una profundidad similar a la de enero de 2001 (87 cm y 85 cm, respectivamente), se ha verificado un incremento en la oscilación y dispersión de los registros en el tiempo desde 2012 a la fecha, y en ambos períodos (invierno – verano) se observa una tendencia lineal decreciente del nivel freático (profundización), con una tasa de descenso en torno a cuatro (4) mm/año (Figura 4-54). Es importante destacar que, tal como se muestra en la Figura 4-53, esta tendencia agrega distintos períodos en los que se ven cambios diversos, tanto ascendentes, como descendentes del nivel freático.

La dispersión de algunos registros, podría dar cuenta de que los niveles medidos estarían influenciados principalmente por las condiciones particulares del bombeo y no tanto por la variación del nivel freático en el área donde se ubica el pozo. En ese sentido, el no contar con registros continuos de la profundidad del nivel freático en el pozo Tilopozo dificulta analizar y evaluar estas relaciones. La Figura 4-55 compara el bombeo medio mensual (l/s) y la cota piezométrica del pozo Tilopozo. Tal como se indica de manera previa, la máxima profundización del pozo coincidió con un incremento del bombeo en el año 2008, hasta tasas medias mensuales de 8 l/s – 9 l/s. Asimismo, dicho nivel comenzó una recuperación cuando el bombeo disminuyó (2010-2011), pero mantuvo su tendencia de recuperación, pese a un nuevo aumento del caudal extraído durante 2012 (hasta 8 l/s). El máximo nivel se alcanzó en 2013, en un período en el que incluso hubo meses en que no hubo bombeo, de acuerdo a los registros de Albemarle. La posterior tendencia de descenso para el período 2013-2019 se ha dado para caudales inferiores a los del período 2008-2012 (4 l/s – 6 l/s).

Figura 4-55: Comparación entre cota piezométrica en pozo Tilopozo (media móvil de 12 meses) y caudal medio mensual de bombeo

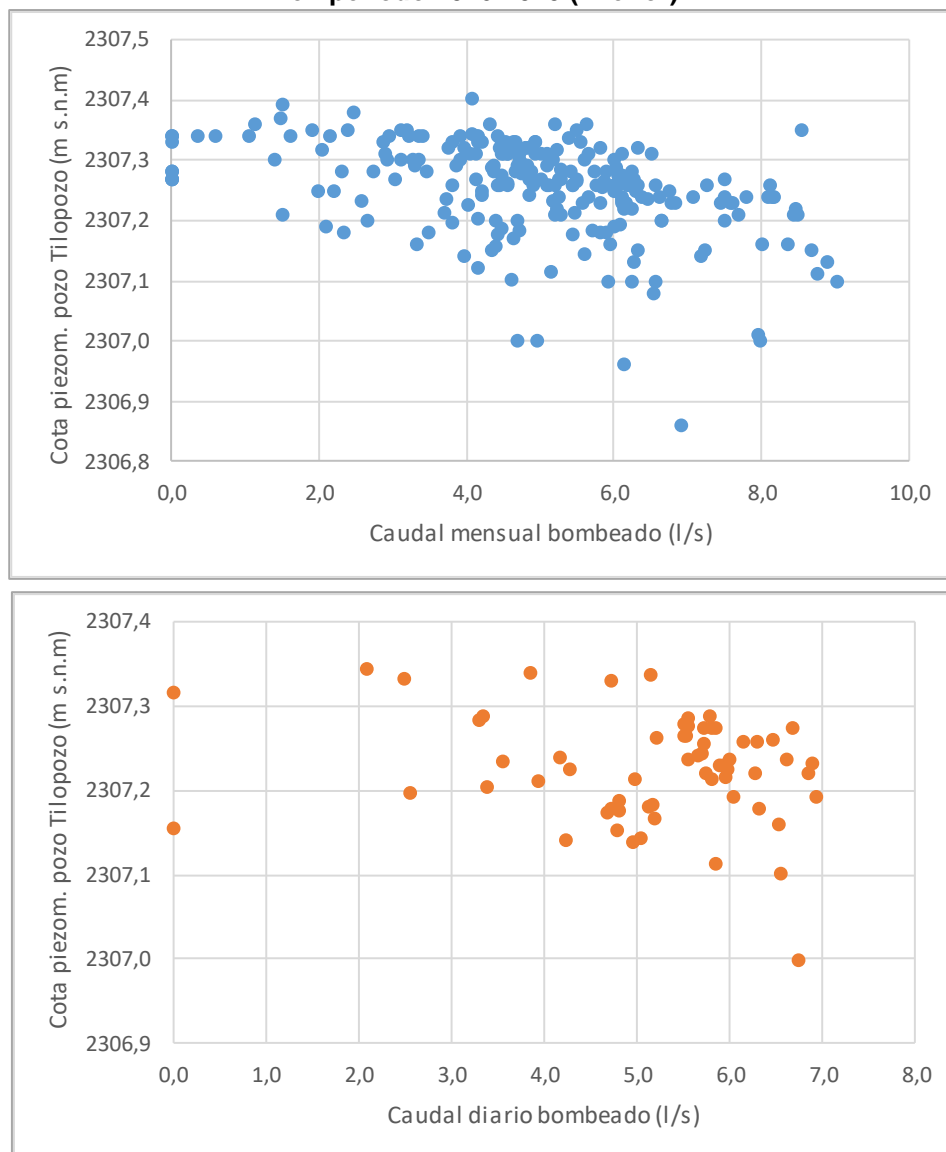


Fuente: Elaboración propia.

Como complemento a lo indicado en el párrafo previo, la Figura 4-56 presenta la relación entre el caudal en el pozo Tilopozo y la cota piezométrica en el mismo (valores puntuales en este caso, a diferencia de la Figura 4-55, en que se muestra la media móvil). Se presentan valores de caudal a escala media mensual (período 2001-2020) y medio diario (2016-2020). En el caso del caudal medio diario, se consideró el caudal bombeado el mismo día de realizada la medición de la cota piezométrica en el pozo. Aunque los registros muestran una alta dispersión, se aprecia una tendencia decreciente de la cota piezométrica, es decir una

profundización del nivel freático, con el incremento del caudal bombeado, fundamentalmente al considerar los registros medios mensuales de caudal, que incluyen un período de tiempo de mayor extensión.

Figura 4-56: Relación entre la cota piezométrica y el caudal bombeado en pozo Tilopozo. Comparación con caudal medio mensual en período 2001-2020 (superior) y con caudal medio diario en período 2016-2020 (inferior)



Fuente: Elaboración propia.

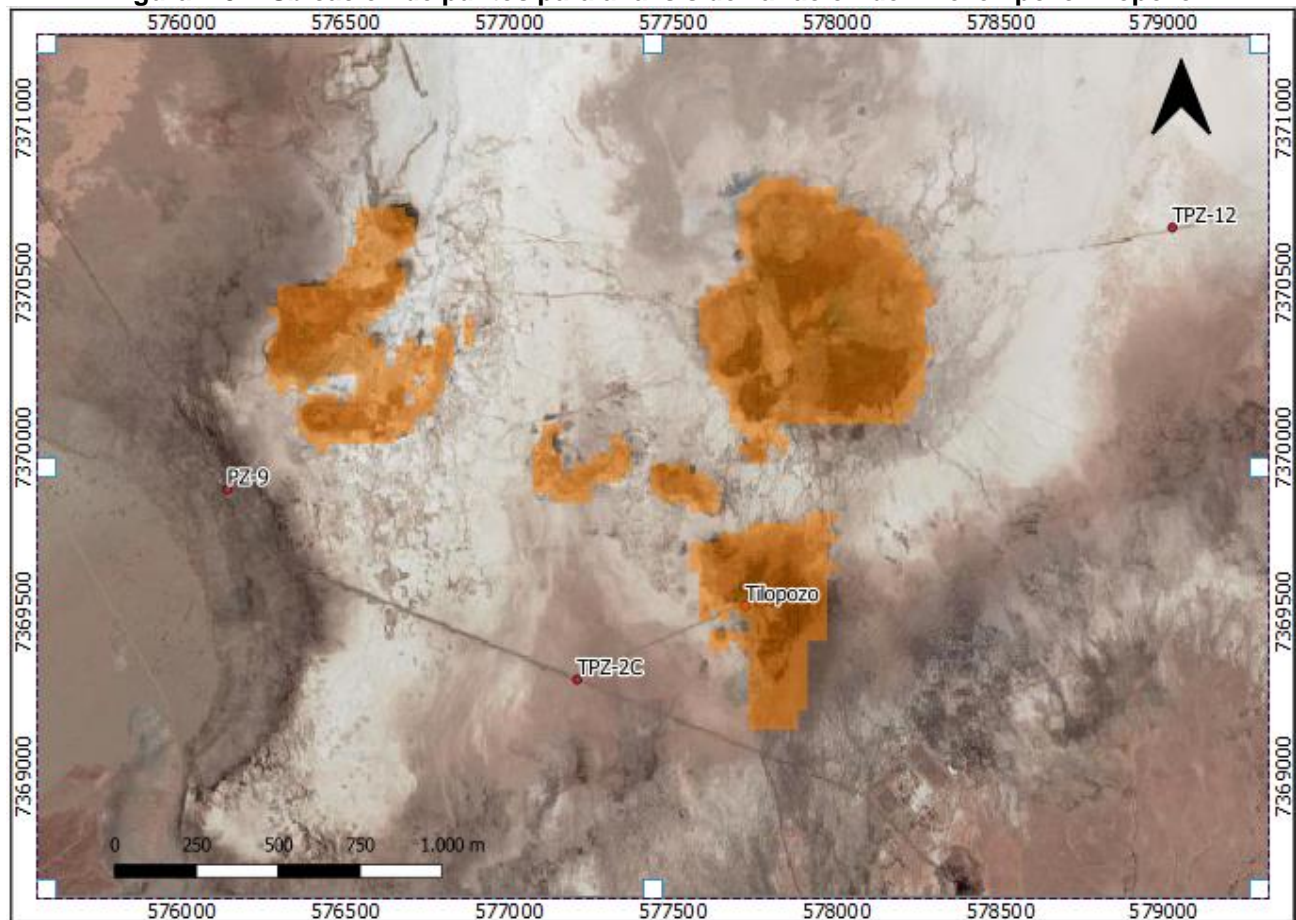
Finalmente, en lo que respecta al pozo Tilopozo, se debe destacar que ha presentado mediciones puntuales que habrían sido inferiores (más profundas) a las medidas durante la prueba de bombeo (Figura 4-54). Al respecto, se debe destacar que en la mayoría de los casos esta situación ha correspondido a registros del período de verano, en particular en el período de mayor bombeo, en los que naturalmente el nivel del pozo es más profundo, por efecto de la evapotranspiración. No obstante, la variación estacional natural del pozo Tilopozo sería de unos pocos centímetros, por lo que la evapotranspiración no explicaría completamente esta condición (ver Figura 4-52). Un descenso del pozo por debajo del nivel alcanzado luego de la prueba de bombeo, podría explicarse por cambios en el nivel en el acuífero MNT o como causa del bombeo (esta

relación se analiza en los acápites 4.2.4.2 y 4.2.4.3), en este último caso esta situación pudiera generar que el radio de influencia tenga una mayor extensión respecto del que se obtuvo en la prueba de bombeo del 2014.

4.2.4.3 Variación del nivel freático en pozo de Tilopozo y su relación con acuífero MNT en el entorno del humedal de Tilopozo

Se evaluó la relación entre la profundidad del nivel freático del pozo Tilopozo y la de pozos someros ubicados en el entorno del humedal de Tilopozo. Para la evaluación fueron considerados, además del pozo Tilopozo, los pozos TPZ-2C, TPZ-12 y PZ-9, ubicados respectivamente al sur, noreste y en el borde noroeste del humedal (Figura 4-57). El pozo TPZ-2C se ubica a 560 metros al suroeste del pozo Tilopozo, mientras que la distancia entre los pozos TPZ-12 y PZ-9 y el pozo Tilopozo es superior a 1000 metros. La evaluación fue realizada, con el objeto de verificar si las tendencias identificadas en el pozo Tilopozo tienen relación con los cambios en el nivel del acuífero, que como ha sido descrito en el acápite 4.2.3, han sido influenciados por la extracción de agua al sur de Tilopozo.

Figura 4-57: Ubicación de puntos para análisis de variación de nivel en pozo Tilopozo



Fuente: Elaboración propia.

La comparación se muestra en la Figura 4-58 y Figura 4-59, en las que se presentan series de tiempo de la media móvil de los últimos 12 meses de la cota piezométrica para los pozos indicados. En la primera figura se muestran registros de los pozos TPZ-2C y Tilopozo para el período 2001-2020 (superior), y un detalle de los mismos para el período 2011-2020 (inferior), mientras que en la segunda figura se presentan datos del

pozo Tilopozo en conjunto con la información de los pozos TPZ-12 (superior) y PZ-9 (inferior), en ambos casos para el período 2010-2020.

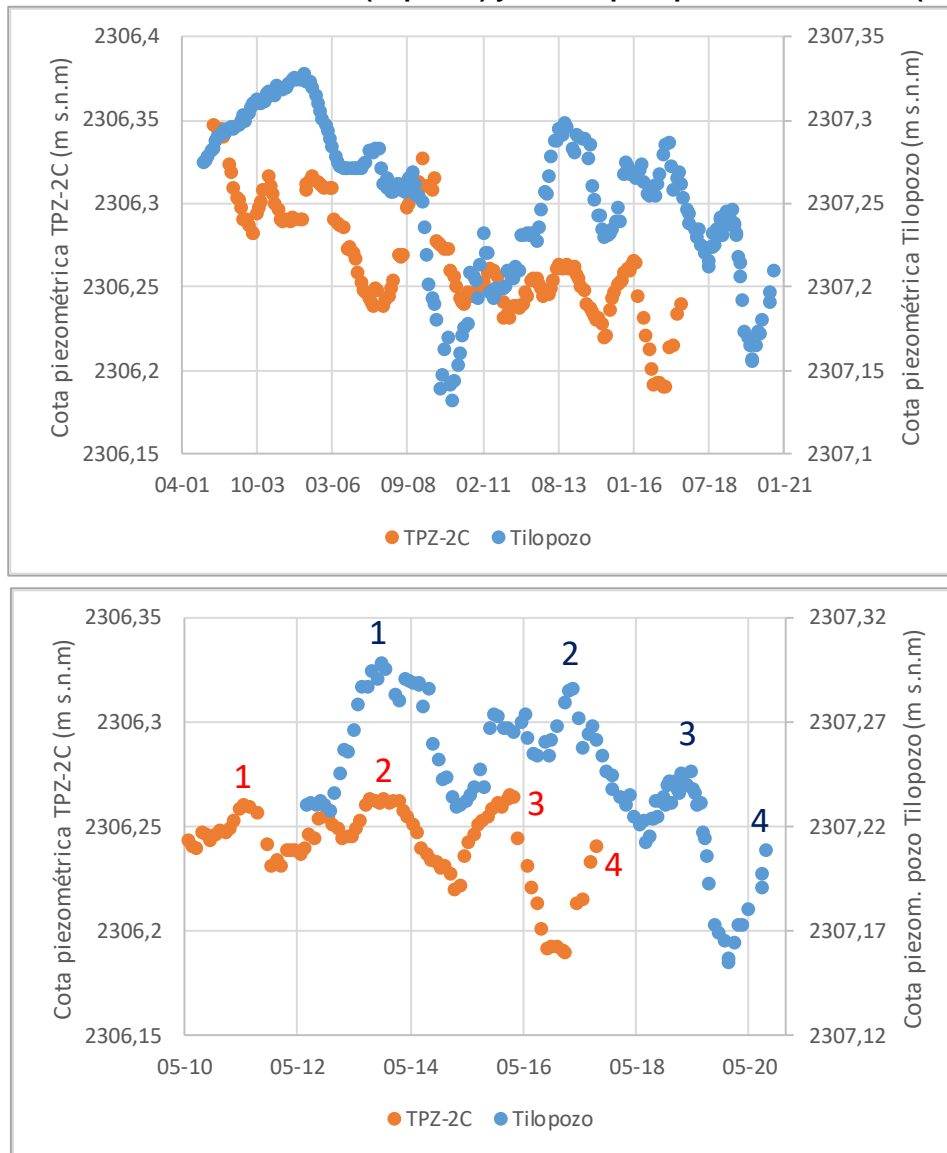
En lo que respecta al nivel del pozo Tilopozo y su relación con la variación de la cota piezométrica en el pozo TPZ-2C, en primer lugar se puede apreciar que la magnitud de los cambios y la forma de los mismos no se corresponde entre ambos pozos, en particular en los períodos de máxima variación en el pozo Tilopozo (2008-2013), que coinciden con la época de máximo bombeo (ver Figura 4-55). Esto podría dar cuenta del efecto del bombeo en el nivel del pozo Tilopozo.

Sin embargo, en particular para el período posterior a 2013 (Figura 4-58, inferior), se observa un desfase de cerca de 2 - 3 años en el comportamiento de ambos pozos, en el que se aprecian coincidencias, que podrían dar cuenta del tiempo que demora en llegar la señal de cambio en el nivel entre ambos pozos. Por ejemplo, hay similitud en la variación del nivel en el pozo TPZ-2C entre los años 2010 y 2017 (considerando los valores promediados cada 12 meses), con la variación del nivel medido en el pozo Tilopozo entre los años 2013 y 2020 (ver Figura 4-58 inferior), lo que se puede observar en los peaks identificados con los números 1, 2, 3 y 4 de la figura. Así, es posible que los cambios más abruptos en la magnitud de los niveles en el pozo Tilopozo, como los del período 2008-2013, tengan relación con el bombeo del mismo. Adicionalmente, y de manera simultánea, existirían cambios en el nivel del pozo que estarían asociados a variaciones del nivel freático en el acuífero MNT en el entorno del humedal Tilopozo, pero que se encontrarían desfasados respecto a estas últimas en 2 a 3 años.

El análisis anterior, se complementa con la comparación de la variación del nivel en el pozo Tilopozo, con pozos ubicados hacia el noreste (TPZ-12) y noroeste (PZ-9), Figura 4-59, considerando el mismo período de detalle del análisis (2010-2020). Si es que el desfase descrito entre los pozos TPZ-2C y Tilopozo tiene relación con el hecho de que este último se ubica más al norte, debiera existir un mayor desfase entre TPZ-12 y/o PZ-9, con respecto a TPZ-2C, ya que se ubican más al norte que el pozo Tilopozo. No obstante, se puede apreciar que ambos (TPZ-12 y PZ-9) presentan una variabilidad similar a la del pozo TPZ-2C (salvo algunos registros de PZ-9, que podrían estar asociados a su ubicación cerca del Cordón de Lila), mostrando el mismo desfase respecto al nivel del pozo Tilopozo. Al respecto, se debe tener presente que el pozo TPZ-12 está ubicado 1,3 km más al norte que TPZ-2C (a cerca de 2,3 km al noreste), mientras que PZ-9 se encuentra unos 600 m más al norte que TPZ-2C (1,2 km al noroeste)

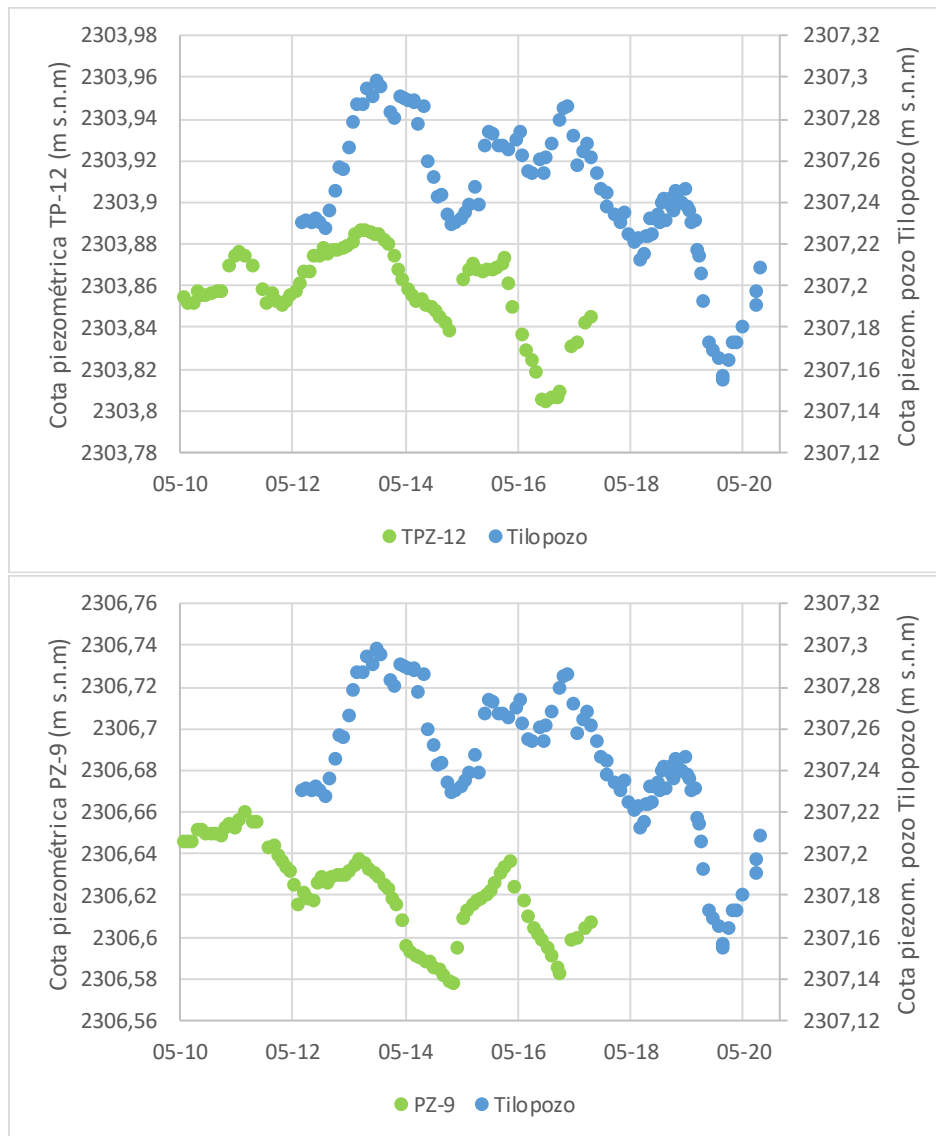
De este modo, mientras por un lado el nivel freático en los bordes sur, noreste y noroeste del humedal de Tilopozo presenta una variación conjunta, en fase y sincronía, por otro lado, en el pozo Tilopozo, ubicado en un punto intermedio, dentro del humedal, existiría un desfase respecto a estos. Se estima que dicho desfase se relacionaría con la existencia de surgencias en el humedal, cuya extensión espacial se desconoce, aunque también podría estar asociada a una capacidad de regulación hidrológica interna del humedal (Earle et al., 2003). Lo anterior realza la importancia de contar con información local del nivel freático, medida en el humedal, para la mejora en su entendimiento.

Figura 4-58: Variación de la media móvil (12 meses) de la cota piezométrica en el pozo Tilopozo y el pozo TPZ-2C. Período 2001-2020 (superior) y detalle para período 2011-2020 (inferior)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-59: Comparación entre la variación de media móvil de la cota piezométrica del pozo Tilopozo con los pozos TPZ-12 (superior) y PZ-9 (inferior). Período 2011-2020



Fuente: Elaboración propia.

4.2.4.4 Variación del nivel freático en pozo Til-P03

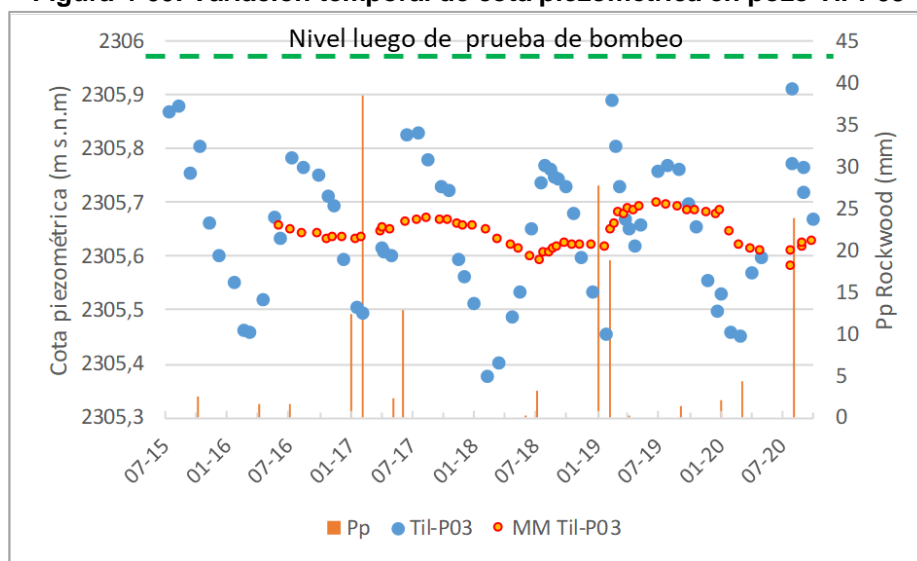
En lo que respecta al pozo Til-P03, existiría un error en la cota medida durante la prueba de bombeo realizada en 2014 (3.305,94 m s.n.m), ya que todos los registros posteriores serían inferiores a esta (ver Figura 4-60), pese a que dicho año no correspondió a un año húmedo (la precipitación anual en la estación Rockwood fue inferior a 5 mm). Por este motivo, no se puede hacer una comparación entre la medición durante la prueba y los registros posteriores de este pozo.

Respecto a la variación en el tiempo de la profundidad del nivel freático en el pozo Til-P03, se destaca el amplio rango de variación entre verano e invierno (Figura 4-60), superior o similar a la de los pozos someros

ubicados en el entorno del humedal de Tilopozo (piezómetros TPZ-2, TPZ-4, TPZ-3, entre otros), siendo superior a 40 cm en algunos períodos. Por otra parte, también se destaca una tendencia al descenso del nivel máximo medido en invierno, lo que no se replica para los valores mínimos de verano, que se han visto influenciados por las precipitaciones de 2017 y 2019. Al respecto, se debe destacar que ambas tendencias son consistentes con las verificadas en otros pozos ubicados en el entorno del humedal de Tilopozo (ver acápite 4.2.3.2), por lo que podrían estar asociadas a cambios producidos por el descenso del nivel del acuífero MNT en el sector sur.

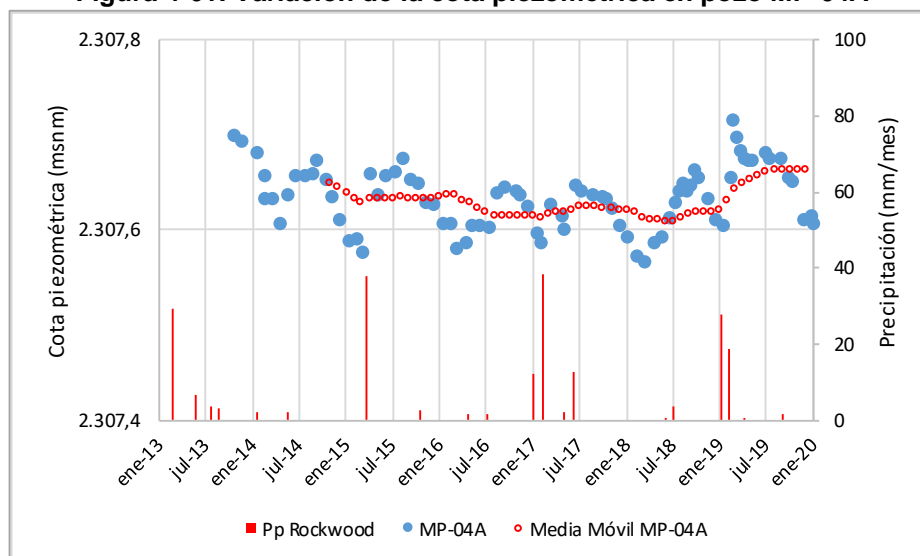
Finalmente, se debe señalar que no se aprecian tendencias en el cambio del nivel de agua en el limnómetro LM-16 (Figura 4-8), mientras que en el pozo MP-04A hubo una tendencia decreciente de los niveles entre 2013 y 2018, pero luego se ha presentado una recuperación del mismo, previa a la precipitación de 2019 (Figura 4-61).

Figura 4-60: Variación temporal de cota piezométrica en pozo Til-P03



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-61: Variación de la cota piezométrica en pozo MP-04A



Fuente: Elaboración propia.

4.3 Discusión y análisis de variables hídricas en Sector Humedal de Tilopozo

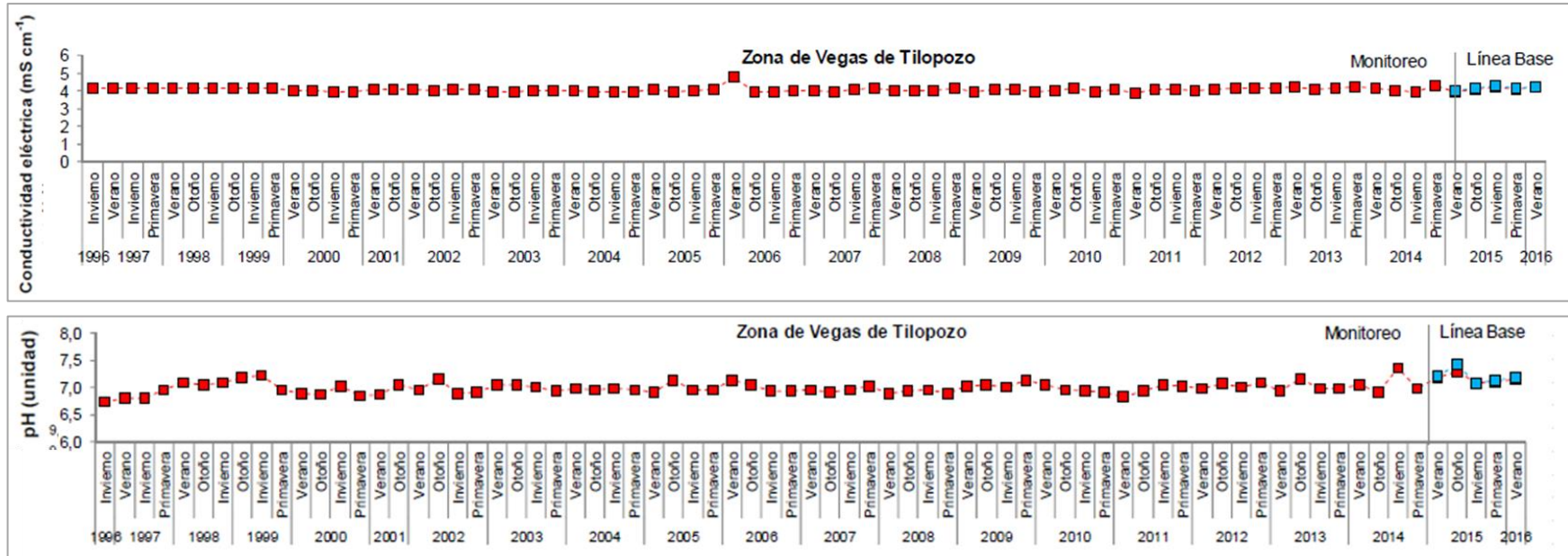
De acuerdo a lo descrito en las secciones previas, respecto al funcionamiento hídrico del humedal, se puede afirmar lo siguiente:

- El humedal de Tilopozo se alimenta de las aguas provenientes del acuífero MNT, que se extiende hacia el sur por más de 50 km, y cuya recarga se da fundamentalmente en la zona sur, escurriendo de manera subterránea, en dirección S-N hacia el Salar de Atacama.
- La recarga del acuífero en el Sector de Tilopozo, como consecuencia de la precipitación que cae de manera directa en el mismo, puede generar cambios en el nivel de agua que se extienden por meses. Sin embargo, los registros muestran que actualmente la precipitación no modifica la tendencia de largo plazo del nivel freático, que en el entorno del humedal es a la profundización.
- En relación a los cambios intranuales en el acuífero de agua dulce-salobre, se tiene que el nivel freático, en los pozos ubicados en el entorno del humedal, presenta variación estacional, con diferencias superiores a 40 cm entre los niveles medidos en invierno y verano, en algunos de los pozos. En comparación con el resto de la Zona Marginal, sin considerar las lagunas, en este sector es donde se genera la mayor variabilidad estacional del nivel freático.
- La profundización del nivel freático durante el verano, verificada en la mayoría de los pozos de la zona marginal, se debería al efecto de la evapotranspiración. Al respecto, cabe destacar que no existen mediciones de EVT en el humedal mismo, existiendo un único punto de monitoreo ubicado al noreste del borde del humedal (EVT-22, ver Figura 4-31).
- Desde el punto de vista de la caracterización de los flujos, el humedal de Tilopozo y los sectores adyacentes corresponden a un sistema heterogéneo. Esto, considerando que existen zonas en las que se produce flujos verticales ascendentes, otras cercanas en que existiría infiltración, mientras que en otros sectores predominan la componente horizontal de los flujos, siendo la vertical casi nula.
- Se ha verificado la existencia de zonas de surgencia en el humedal TL2, de cuya extensión no se cuenta con información. Al respecto, el punto de monitoreo superficial LM-16 existe un flujo subterráneo vertical ascendente, y es posible que esta condición se extienda a otros sectores del humedal. En el pozo Tilopozo, la baja variabilidad estacional reportada para el período 1989 – 1997 (previo al inicio del bombeo), es un indicio de que también podría presentar un flujo vertical ascendente. Así, en el humedal existirían zonas localizadas, de extensión desconocida, con condiciones hídricas particulares. Por otra parte, en el multipiezómetro TPZ-2, ubicado cerca de 500 m al oeste del humedal TL2, el flujo vertical es descendente (infiltración).
- La conductividad eléctrica medida en los pozos ubicados en el entorno del humedal de Tilopozo varía principalmente en el rango 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ver Figura 4-62). Respecto a los registros de CE medidos en el humedal en puntos de agua superficial H (MEL) y LM-16 (Albemarle), ubicados en un mismo sector, sus registros son consistentes, mostrando una muy baja variabilidad (interanual e intranual), estando normalmente en el rango 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Como complemento a lo anterior, registros de pH en el humedal de Tilopozo (MEL- Golder, 2017) muestran que sus aguas son neutras y que no presentaron una variación temporal significativa en el

período 1996-2016 (ver Figura 4-62). Estos valores son consistentes con los registrados en el punto LM-16, en el cual el pH varió entre 6,8 UpH y 8,0 UpH entre 2016 y 2019.

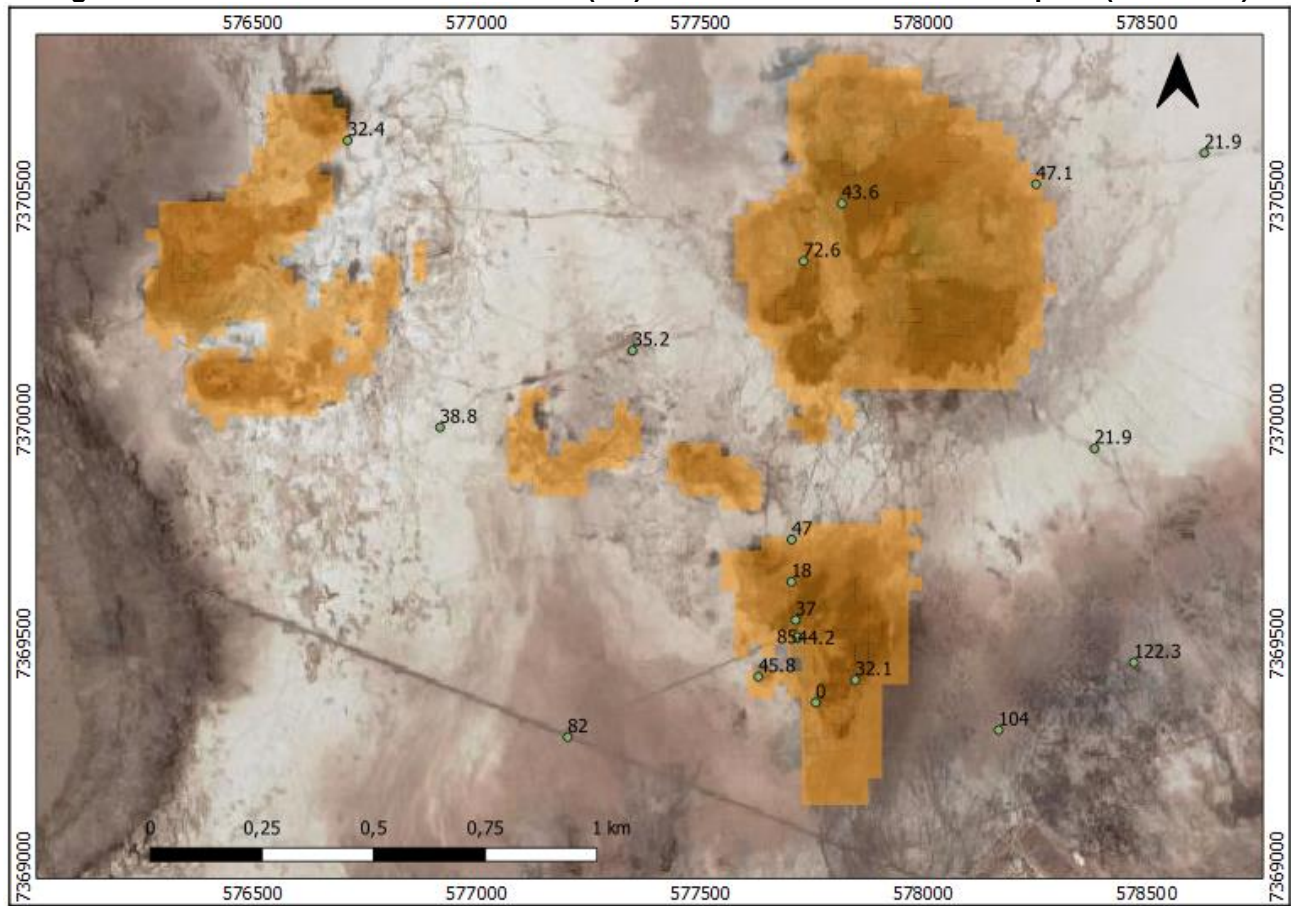
Con el objeto de caracterizar la profundidad del nivel freático en el entorno del humedal de Tilopozo, la Figura 4-63 muestra diversos registros medidos en diferentes puntos de monitoreo ubicados en este sector. Debido a que existe un número limitado de puntos de monitoreo en la zona, se han considerado mediciones realizadas en diferentes períodos de tiempo, concentrándose la información entre 2011 y 2014. Asimismo, dado que una parte importante de los datos corresponden a valores promedios del período 2011-2012 reportados por MEL (MEL- Golder, 2017), para los puntos restantes también han sido utilizados valores promedio, en vez de registros puntuales. Por este motivo, los registros **deben considerarse solamente a modo referencial**. El detalle de los datos se indica en la Tabla 4-6.

Figura 4-62. Conductividad eléctrica (superior) y pH (inferior) en punto H (humedal TL2)



Fuente: Modificado de MEL- Golder (2017).

Figura 4-63. Profundidad del nivel freático (cm) en el entorno del humedal Tilopozo (2011-2014)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-6 Profundidad media del nivel freático en puntos ubicados en el entorno del Sector humedal de Tilopozo

Punto	Este (UTM)	Norte (UTM)	NF (m b.n.t)	Fuente	Período
P8 ¹	576649	7371158	20,3	MEL- Golder (2017)	2011-2012
P9 ¹	576708	7370622	32,4		2011-2012
P10 ¹	576915	7369980	38,8		2011-2012
P11 ¹	577346	7370152	35,2		2011-2012
P12 ¹	577729	7370352	72,6		2011-2012
P13 ¹	577815	7370481	43,6		2011-2012
P14 ¹	578250	7370524	47,1		2011-2012
P15 ¹	577628	7369422	45,8		2011-2012
P16 ¹	577845	7369415	32,1		2011-2012
P17 ¹	578469	7369454	122,3		2011-2012
P23 ¹	578627	7370594	21,9		2011-2012
P24 ¹	578529	7370966	26,9		2011-2012
TPZ-2C	577201	7369287	82,0		2011-2014
TPZ-3	578166	7369303	104,0		2011-2014
TPZ-4	578381	7369933	21,9		2011-2014
TPZ-8	577015	7371104	26,0		2011-2014
H	577756	7369364	0,0	2011-2014	
MP-04A	577716	7369509	44,2	Albemarle (2020)	2013-2014
Tilopozo	577715	7369511	85,0		2011-2014
TIL-P01 ²	577711	7369549	37,0	RWL-SGA (2015)	2014
TIL-P02 ²	577702	7369635	18,0		2014
TIL-P03 ²	577703	7369729	47,0 (5,0) ³		2014

¹En MEL- Golder (2017) se reporta valor promedio de período 2011-2012. ² Valores estimados a partir de información reportada en Apéndice D, Anexo 1, Adenda 5 del EIA Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama. ³ De acuerdo a registros de prueba de bombeo, profundidad habría correspondido a 5 cm. No obstante, mediciones posteriores (hasta 2020), muestran un valor promedio igual a 47 cm.

Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a la dinámica hídrica del humedal, se destaca que una de las principales limitaciones del análisis corresponde a que, dentro del humedal, solamente se cuenta con información del pozo Tilopozo y de los puntos de monitoreo superficial LM-6, H y Reglilla_Tilopozo.

En los puntos previos, se describe el funcionamiento del humedal de Tilopozo. A continuación se detallan los principales cambios temporales identificados en la Zona Marginal, de acuerdo a la información analizada, enfocados en los asociados con el humedal de Tilopozo:

- La extracción de agua desde los campos de pozos de Monturaqui y Negrillar ha generado un cono de descenso del nivel del agua subterránea, que ha avanzado hacia el norte, es decir, hacia la zona del humedal de Tilopozo, evidenciado por los descensos detectados en los pozos ubicados en el entorno de las vegas (aguas arriba y aguas debajo de las mismas). Cinco y dos años después del inicio de las operaciones de CMZ (1995) y MEL (1998), respectivamente, y coincidiendo con un incremento en el caudal extraído en el acuífero MNT (2000), se verificó un efecto en el nivel medido en el pozo TP-3, ubicado 2 km al sur del humedal de Tilopozo.

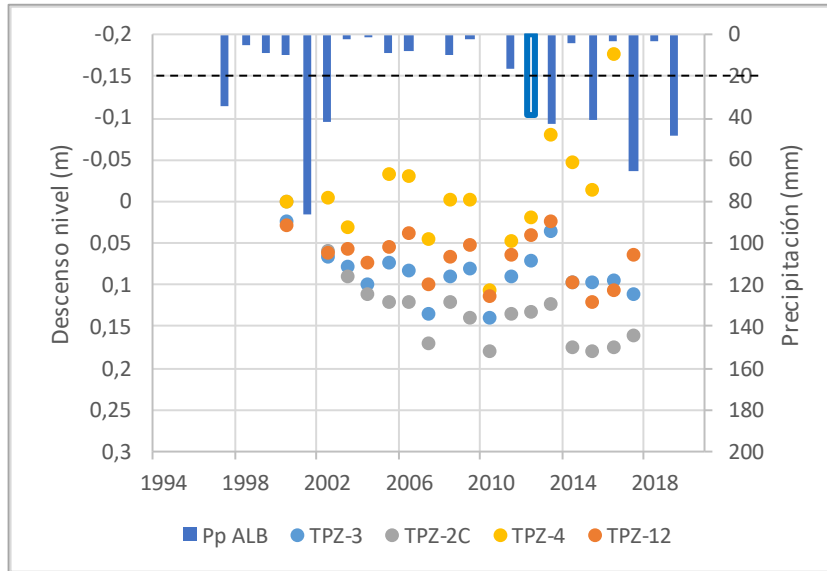
- En los pozos TP-1, TP, 2 y TP-3, ubicados al sur del humedal de Tilopozo, se ha verificado un descenso de los niveles máximo de invierno y mínimo de verano, superior a 20 cm entre 2000 y 2020. Esta profundización del nivel freático es una consecuencia del avance del cono de descenso asociado a la extracción de agua desde el sur del acuífero MNT. Considerando las dimensiones del acuífero, de extensión superior a 50 km, se estima que, dada su inercia, el nivel freático debiera seguirse deprimiendo en esta zona durante los próximos años.
- Como fue señalado, con la excepción del pozo Tilopozo, no se cuenta con información de la variación del nivel del agua subterránea en el humedal. Sin embargo, sí hay registros en los piezómetros TPZ-2 y TPZ-3, ubicados al este y oeste del humedal TL2, en TPZ-4, ubicado al este, entre los humedales TL1 y TL2 y en TPZ-12, construido al este del humedal TL2, a la altura del borde norte del mismo. En todos se ha verificado una tendencia de profundización del nivel freático entre los años 2000 y 2017, fundamentalmente en el período de invierno, tal como se describe en el acápite 4.2.3.2. Los descensos variaron entre 10 cm y 20 cm. En el caso del período de verano, el efecto combinado de la precipitación y la evapotranspiración generan una tendencia no tan evidente de descenso, aunque los niveles al año 2016-2017 fueron entre 5 cm y 15 cm inferiores a los medidos el año 2000, salvo en el pozo TPZ-4, como se muestra en la Figura 4-64. Considerando el avance del cono de descenso del nivel de agua desde el sur, se estima que el nivel freático debiera seguir profundizándose en el tiempo.
- Respecto al pozo Tilopozo, sus registros de profundidad del nivel freático son concordantes con el caudal extraído en el pozo, en particular durante el período de máximas y mínimas extracciones (2008-2013). De manera adicional, se apreció un aparente desfase de entre 2 y 3 años entre la variación de los niveles del pozo y la variación del nivel en el acuífero MNT en el entorno del humedal de Tilopozo, considerando para lo anterior registros de los pozos TPZ-2C, TPZ-12 y PZ-9. Lo anterior, centrado en los registros del período 2010-2020, considerando los valores medios móviles de 12 meses. Este desfase es consistente con la existencia de surgencias en la zona del humedal de Tilopozo, en particular en TL2, aunque podría estar relacionado también con la capacidad de autoregulación hidrológica del humedal. No existe información que permita confirmar o descartar que se produzca un efecto similar en el nivel de agua en los otros humedales (TL1, TL3, TL4 y TL5).
- En el caso de los puntos de monitoreo superficial, ubicados en el humedal TL2, en primer lugar se destaca que las tres empresas con puntos de monitoreo (ALB, SQM y MEL) presentan cotas de referencia diferente, pese a que están ubicados en el mismo lugar, con una diferencia de cota de casi dos metros entre la referencia considerada por SQM y la de MEL (Figura 4-65), por lo que para efectos gráficos de su comparación se ha restado 1,7 m al nivel reportado por SQM. Adicionalmente, los puntos de medición de MEL (H) y SQM (Reglilla Tilopozo) muestran una tendencia al alza, la que se estima no sería representativa de la tendencia real del nivel de agua. De acuerdo a MEL- Golder (2017), esta tendencia podría ser *“atribuible a un posible asentamiento de la regleta, situación habitual en este tipo de mediciones”*. A partir de 2004, los registros del punto H se han mantenido estables, salvo dos cambios abruptos de 20 cm (primero descenso, luego ascenso), relacionados con un cambio en la referencia de medición. Esto es consistente con la estabilidad que muestran los valores medidos en la estación LM-16 (Albemarle, 2016-2020), y dan cuenta de que el nivel superficial en el punto de monitoreo se ha mantenido estable, pese a los descensos verificados en los pozos someros cercanos a este.

- Adicionalmente, por el borde oeste del Sector Tilopozo, junto al humedal TL3, se encuentra el pozo somero PZ-9, con registros entre los años 2008-2017. Del mismo modo que los piezómetros “TPZ”, el pozo PZ-9 muestra una tendencia al descenso en los niveles reportados. Al comparar con los valores medidos en julio de 2008 y abril de 2009 (no se cuenta con registros durante los meses de verano de 2009), el pozo PZ-9 acumula cerca de 10 cm de descenso al año 2017, tanto durante el período de invierno, como en el de verano. En la Figura 4-66 se muestra la serie de tiempo de la cota piezométrica, mientras que en la Figura 4-67 se presenta la variación anual de los registros mínimo de verano y máximo de invierno, en comparación con las mediciones de abril de 2009 y julio de 2008, respectivamente. A modo de referencia y comparación, en esta figura también se han incluido los descensos medidos en los pozos TP-2 y TPZ-3, respecto a registros del invierno de 2008 y verano de 2009. De acuerdo a lo anterior, se concluye que se verifican descensos en el entorno del humedal TL3.
- Finalmente, en la Figura 4-68 se presentan las isopiezas elaboradas en el Sector del humedal de Tilopozo, con la información analizada, para diferentes años (2000, 2009 y 2016), considerando la máxima cota piezométrica medida en el invierno de cada año respectivo. Para su elaboración, han sido utilizados los registros de los pozos indicados en la Tabla 4-1. Es importante destacar que todos se encuentran fuera de los humedales, por lo que las isopiezas están extrapoladas en estos.

De las isopiezas, o curvas equipotenciales, se puede apreciar el descenso en la profundidad del nivel freático en el tiempo, a través del desplazamiento hacia el sur de las isopiezas, que en la zona media del humedal es de un desplazamiento aproximado de 100 m – 200 m entre los años 2000 y 2016. Por ejemplo, la curva 2.305,5 m s.n.m se ubicaba en el borde sur del humedal TL1 durante el año 2000 y el año 2016 ya cruzaba el borde norte del humedal TL2, habiéndose desplazado cerca de 150 m hacia el sur. Así, en el borde norte del humedal TL2, mientras el año 2000 la cota piezométrica presentó un valor intermedio entre 2.306 m s.n.m y 2.305,5 m s.n.m, el año 2016 disminuyó a 2.305,5 m s.n.m, indicando una profundización del nivel freático.

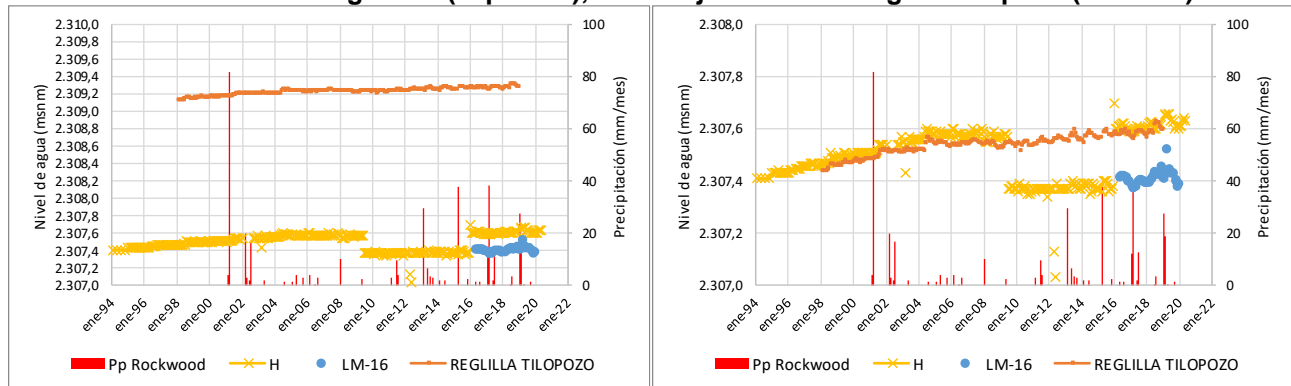
Por otra parte, se debe destacar que el cambio en la forma de las isopiezas del año 2000 en el borde oeste, respecto a las del año 2009 y 2017, se debería a que en ese periodo no se contaba con información de pozos ubicados en dicho borde (por ejemplo, PZ-9, ver Figura 4-68).

Figura 4-64. Variación de Nivel Mínimo de Verano, en Comparación con Registros del Año 2000 en Pozos Someros Ubicados en el Entorno del Humedal Tilopozo



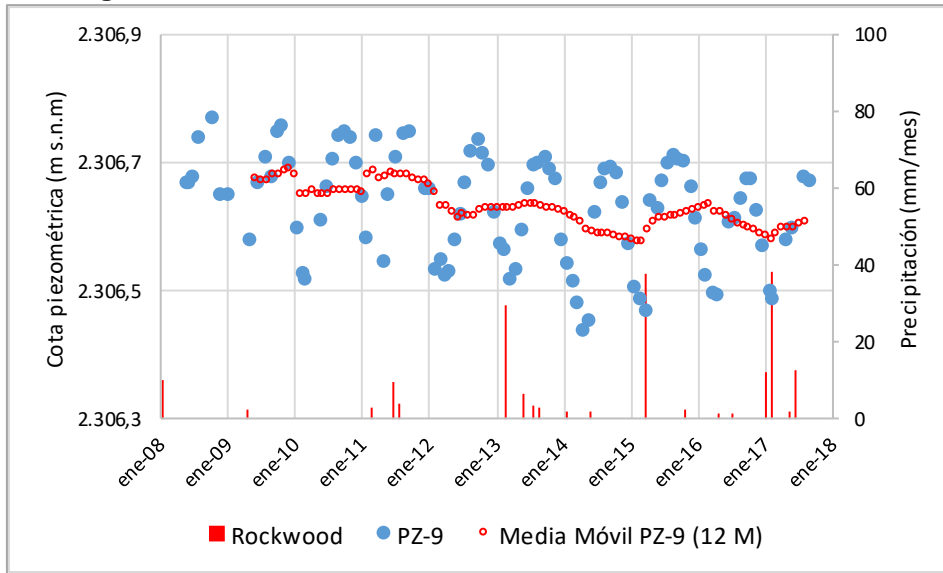
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-65. Variación de la Cota Piezométrica en Puntos de Medición Superficial en Humedal TL2. Datos Originales (Izquierda), Datos Ajustados de Reglilla Tilopozo (Derecha)



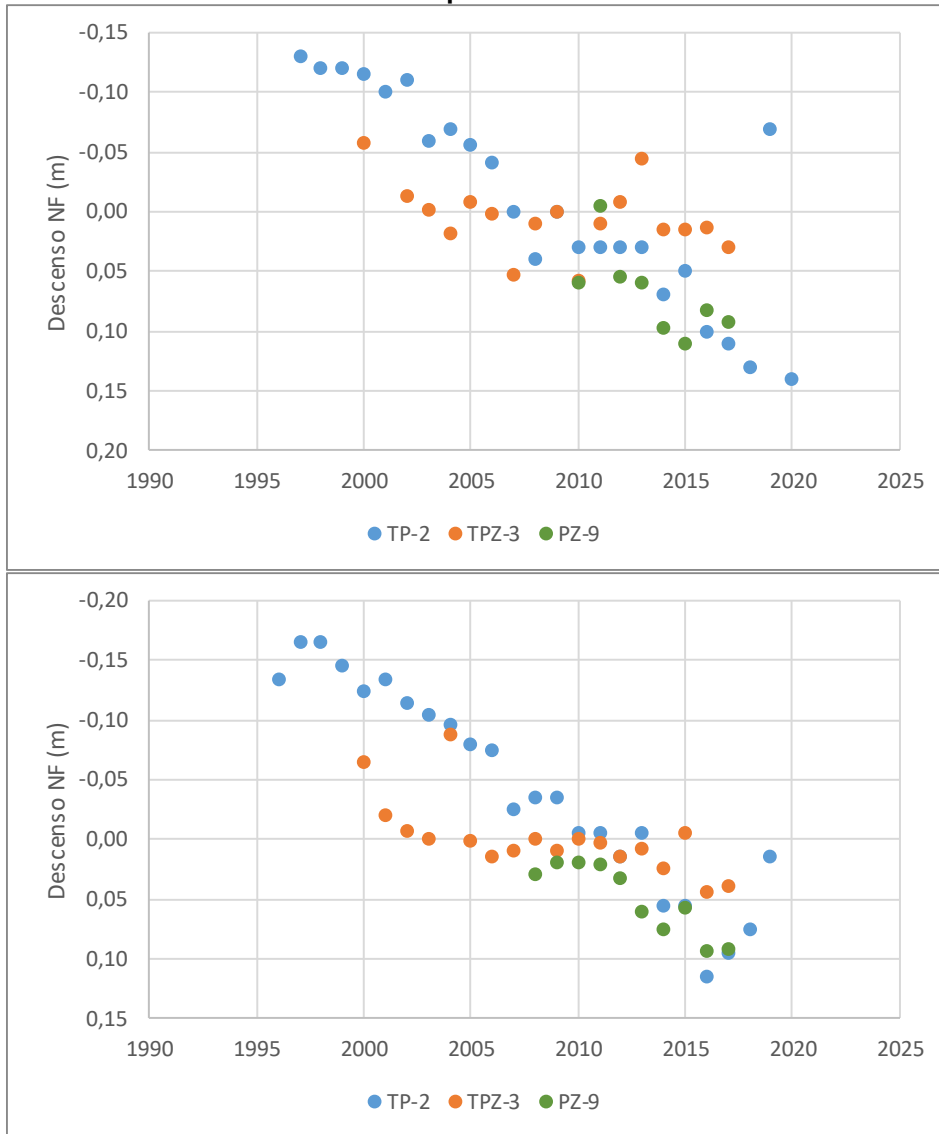
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-66. Variación de la Cota Piezométrica en Pozo Somero PZ-9



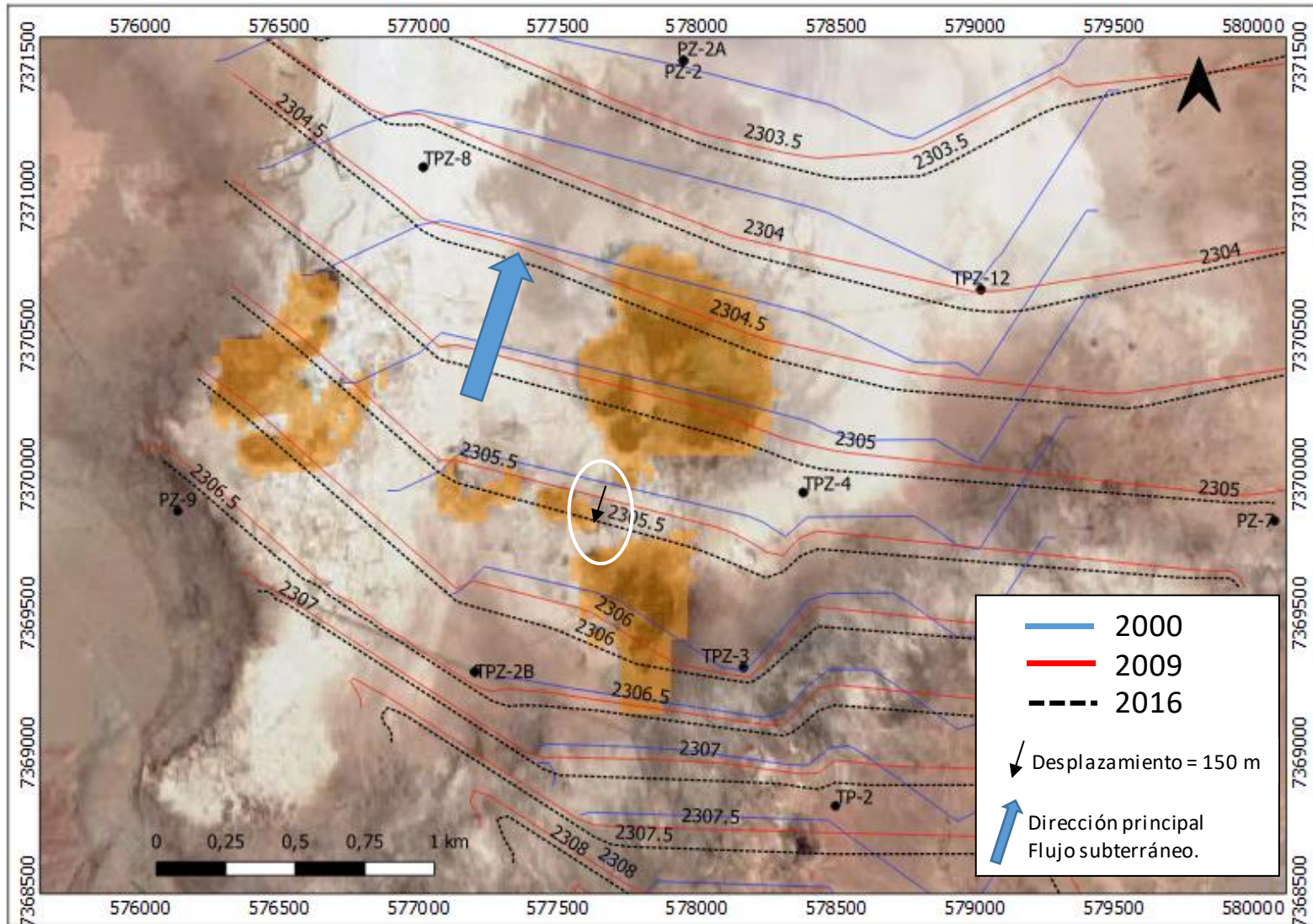
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-67. Variación de Cota Mínima Anual de Verano (superior) y Máxima Anual de Invierno (inferior) en Pozos TP-2, TPZ-3 y PZ-9, Respecto a Cota de Temporada 2008 – 2009, Respectivamente



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-68. Isopiezas en Humedal de Tilopozo. Años 2000 (azul), 2009 (rojo) y 2016 (negro). Se Destaca Retroceso de Curva 2.305,5 m s.n.m., que pasa por el Humedal TL1 en Año 2000 y por el Humedal TL2 en 2016



Fuente: Elaboración propia.

5 ANÁLISIS DE LA VEGETACIÓN EN EL SECTOR TILOPOZO

Existen diferentes variables/parámetros utilizadas para caracterizar el estado y evolución de la vegetación. Entre estos destacan su cobertura, riqueza, biomasa aérea, vigorosidad, entre otros. En el contexto del presente estudio, y de acuerdo a la información disponible, se ha considerado como principal variable de análisis, aunque no exclusiva, la vigorosidad de la vegetación, estimada por medio del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés).

En este sentido, se debe destacar que el análisis de la evolución de la vegetación, mediante el índice NDVI, se extiende por un período de 30 años. Dentro de este período, también se cuenta con información de otras variables relevantes para caracterizar la vegetación (cobertura, riqueza), pero en lapsos de tiempo acotados y que además en su mayoría no ha sido levantada dentro los humedales estudiados. Adicionalmente, es importante señalar que, para el cálculo del NDVI, se ha considerado como referencia la metodología desarrollada por SMA (2020a), en la cual fueron analizadas imágenes satelitales generar series temporales de la evolución de este índice.

5.1 Delimitación Humedales Sector Tilopozo

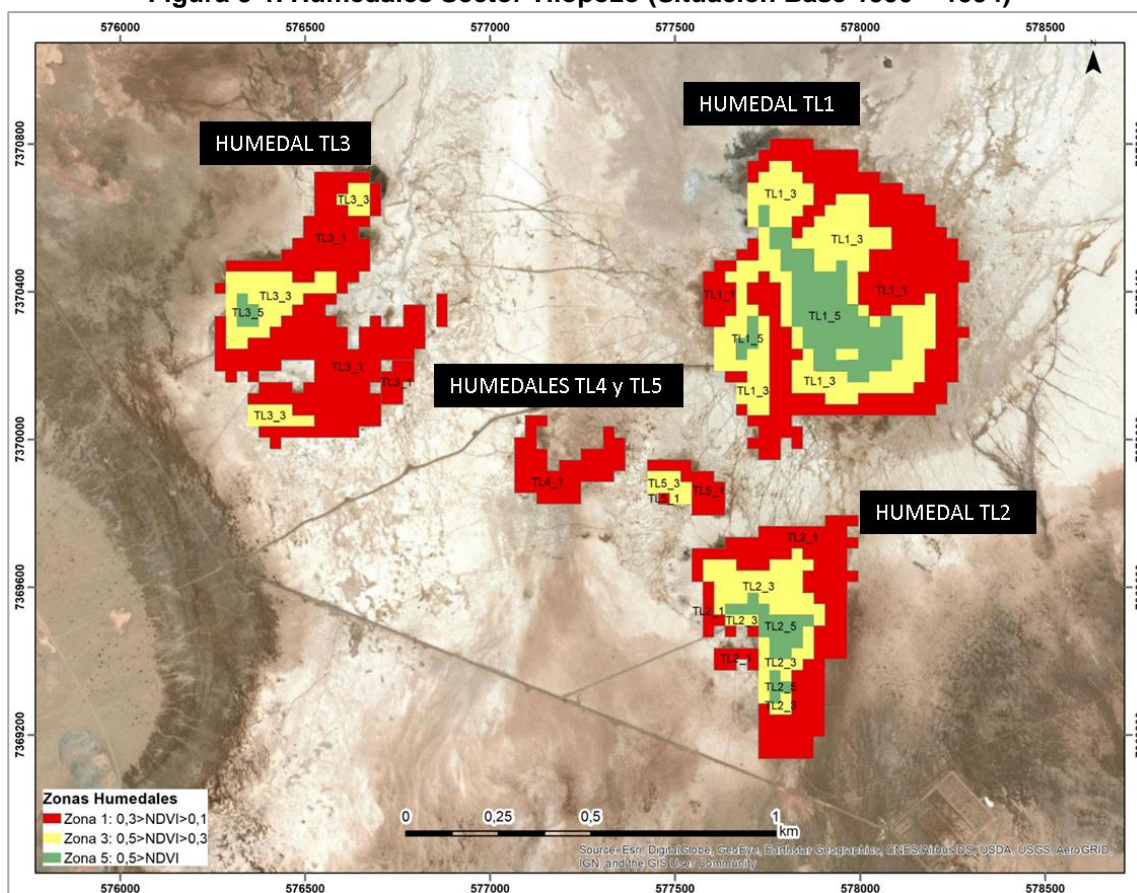
Desde el punto de vista de la vegetación, el área de estudio local corresponde a 5 humedales, los cuales fueron definidos por la SMA (2020b) en el Informe de Fiscalización Ambiental a Minera Escondida (MEL), donde se realizó un análisis de teledetección para delimitar las zonas cubiertas por vegetación. En dicho informe, se explica la metodología de delimitación, la cual fue replicada para efectos del presente estudio y es explicada en la sección 2 de este informe, considerando en especial los siguientes aspectos clave:

- El periodo base para la delimitación de los humedales, es aquel comprendido entre 1990 y 1994, ya que se trataría de un periodo sin intervención antrópica. Se establece como umbral de vegetación, todos aquellos valores de NDVI mayores a 0,1. Sectores con $NDVI < 0,1$ son asumidos como áreas desprovistas de vegetación.
- Asimismo, y para la definición de los bordes de humedal, se utiliza el Inventario Nacional de Humedales (MMA, 2015), más un buffer de 20 m.
- Finalmente, cada uno de los cinco humedales resultantes, se divide en tres zonas, de acuerdo a los siguientes rangos de NDVI:
 - Zona 1: polígonos con NDVI entre 0,1 y 0,3.
 - Zona 3: polígonos con NDVI entre 0,3 y 0,5.
 - Zona 5: polígonos con NDVI mayor a 0,5.

Como resultado de lo anterior, se obtuvieron los humedales indicados en la Figura 5-1, los cuales totalizan 90,47 ha. Esta superficie es levemente menor a la indicada por la SMA en su informe (SMA, 2020b), donde se totalizaron 94,68 ha. Sin embargo, se considera una buena aproximación de los análisis realizados.

De acuerdo a las subdivisiones antes señaladas (humedal_zona), cada polígono resultante se ha codificado, de la forma en que se indica en la Tabla 5-1.

Figura 5-1. Humedales Sector Tilopozo (Situación Base 1990 – 1994)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-1 Codificación de Humedales y Zonas de NDVI

Nombre en Inventario Nacional de Humedales MMA (2015)	Nombre de humedal en SMA (2020b)	Segmentación por Zona de Vigoridad NDVI	Polígonos de análisis “Humedal_Zona”	Área (ha)
Tilopozo N°1	TL1	Zona 5 (NDVI>0.5)	TL1_5	7,27
		Zona 3 (0.5 >NDVI>0.3)	TL1_3	15,06
		Zona 1 (0.3 >NDVI> 0.1)	TL1_1	20,21
Tilopozo N°2	TL2	Zona 5 (NDVI>0.5)	TL2_5	2,05
		Zona 3 (0.5 >NDVI>0.3)	TL2_3	5,38
		Zona 1 (0.3 >NDVI> 0.1)	TL2_1	10,86
Tilopozo N°3	TL3	Zona 5 (NDVI>0.5)	TL3_5	0,44
		Zona 3 (0.5 >NDVI>0.3)	TL3_3	4,85
		Zona 1 (0.3 >NDVI> 0.1)	TL3_1	18,19
Tilopozo N°4	TL4	Zona 1 (0.3 >NDVI> 0.1)	TL4_1	3,83
Tilopozo N°5	TL5	Zona 3 (0.5 >NDVI>0.3)	TL5_3	0,81
		Zona 1 (0.3 >NDVI> 0.1)	TL5_1	1,52
Total (ha)				90,47

Fuente: Modificado de Izumi Consultores, 2020 (Anexo 1).

5.2 Características de la Vegetación en los Humedales de Tilopozo

5.2.1 Formaciones Vegetacionales Actuales

Utilizando la última versión disponible de la Carta de Ocupación de Tierras (COT), generada por Albemarle en el marco del Plan de Manejo Biótico (PMB) estipulado en la RCA N°21/2016, se caracteriza el área de estudio local, en términos de las formaciones vegetacionales que conforman actualmente cada uno de los cinco humedales delimitados. Esta clasificación se presenta en la Figura 5-2 y en la Tabla 5-2. Al respecto, se destaca la presencia de las siguientes especies por humedal.

5.2.1.1 Humedal 1 (TL1)

Con 42,54 ha, corresponde al humedal de mayor superficie en el área de estudio (47% del área total). Este humedal tiene una fisonomía principalmente de vega, aunque con una presencia menor de matorral.

En la zona de menor vigor NDVI (TL1_1), destaca la presencia de vegas con dominancia de *Distichlis spicata* y vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus*, que en conjunto totalizan el 43% de superficie del Humedal 1. Otras especies presentes en esta zona son *Baccharis juncea*, *Juncus balticus* y *Lycium humile*. En cuanto a las formaciones vegetacionales, la mayor presencia la constituye el tipo vega, y en segundo lugar el matorral hídrico.

La zona de vigor intermedio (TL1_3) corresponde a vegas, donde la mayor superficie corresponde a una vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus*, totalizando el 21% de superficie del Humedal 1. También se encuentra presencia de *Baccharis juncea*, *Juncus balticus* y *Distichlis spicata*.

La zona de mayor vigor (TL1_5) comprende el 17% de la superficie total del Humedal 1. Corresponde a vegas, donde la formación más extensa corresponde a una vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus*, que comprende al 16,3% del área total, es decir, prácticamente toda esta zona corresponde a esta formación. Otras especies presentes en TL1_5 son *Baccharis juncea* y *Distichlis spicata*.

5.2.1.2 Humedal 2 (TL2)

Con 18,29 ha, corresponde al tercer humedal de mayor superficie en el área de estudio (20% del área total). Cerca del 70% de este humedal tiene una fisonomía de vega, mientras que la porción restante presenta superficie de matorral.

En la zona de menor vigor (TL2_1), existen formaciones con fisonomía de vega y matorral. Las más extensas, corresponden a la vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus* (23,2% de superficie del Humedal 2) y matorral - vega de *Tessaria absinthioides* y *Distichlis spicata* (18,5% de superficie del Humedal 2).

La zona de vigor intermedio (TL2_3), está compuesta principalmente por vegas de *Schoenoplectus californicus* (26% de superficie del Humedal 2). También existe presencia de *Tessaria absinthioides* y *Distichlis spicata*.

La zona de mayor vigor (TL2_5), está compuesta principalmente por vegas de *Schoenoplectus californicus* (11% de superficie del Humedal 2). También existe presencia de *Tessaria absinthioides* y *Distichlis spicata*.

5.2.1.3 Humedal 3 (TL3)

El Humedal 3 totaliza 23,48 ha que corresponden al 26% de la superficie total analizada, siendo el segundo humedal más extenso. Presenta formaciones con fisonomía de vega, matorral hídrico y matorral.

La zona de menor vigor (TL3_1) concentra el 70% de la superficie de este humedal, y comprende formaciones con fisonomía de vega, matorral hídrico y matorral. Los sectores más extensos corresponden a la formación matorral hídrico - vega con dominancia de *Lycium humile* (40% de la superficie del Humedal 3), y la formación vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus* (17% de la superficie del Humedal 3). En esta zona también existe presencia de *Juncus balticus*, *Tessaria absinthioides* y *Distichlis spicata*.

La zona de vigor intermedio (TL3_2) comprende formaciones con fisonomía de vega, matorral hídrico y matorral y abarca el 21% del Humedal 3. La formación más extensa de esta zona es la vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus* (16% de la superficie del Humedal 3). También existe presencia de las especies *Baccharis juncea*, *Distichlis spicata*, *Lycium humile*, *Juncus balticus* y *Tessaria absinthioides*.

La zona de vigor alto (TL3_5) comprende una vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus*, que corresponde al 2% del área del Humedal 3.

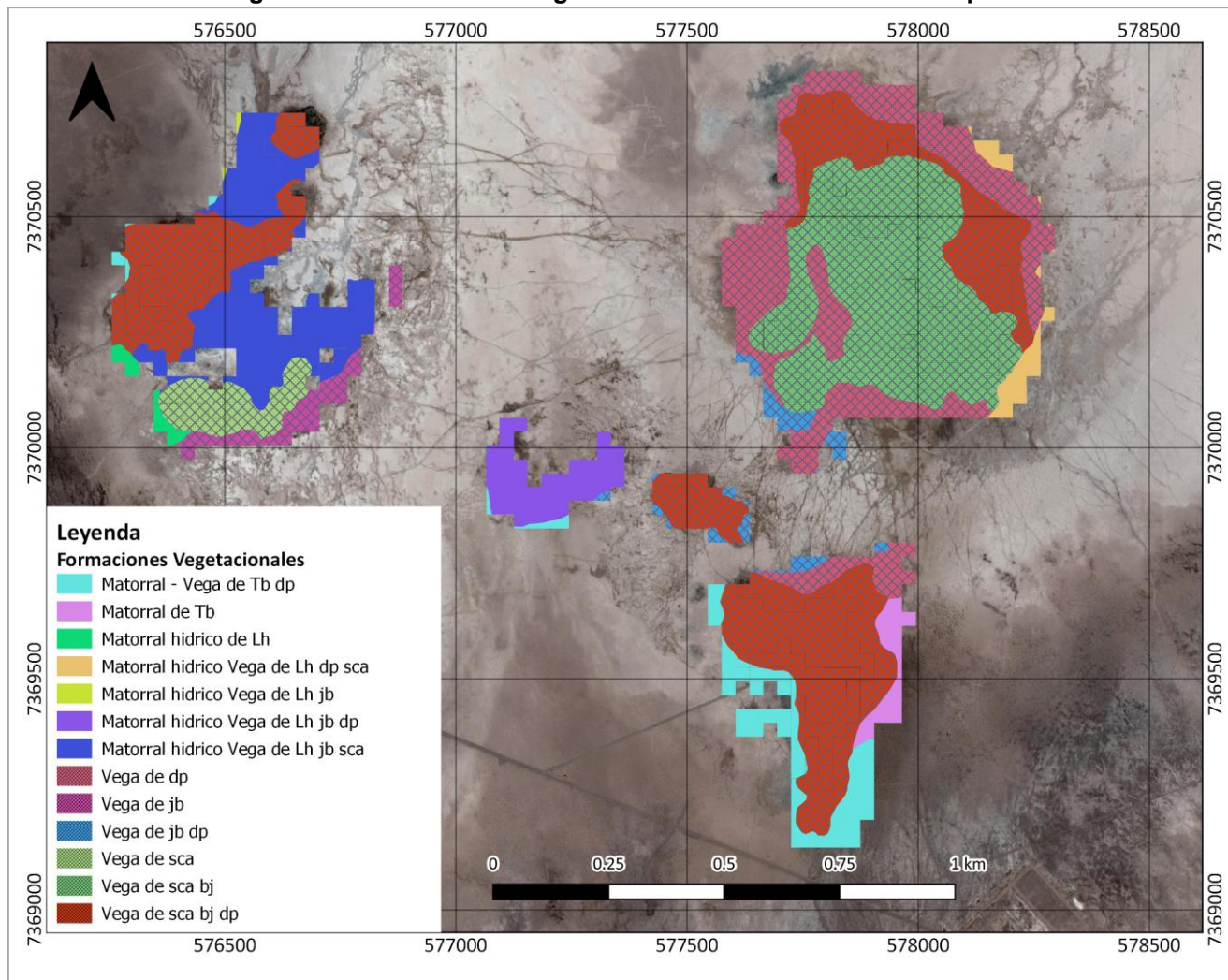
5.2.1.4 Humedal 4 (TL4)

El Humedal 4 comprende 3,83 ha (4% del área total de humedales) con fisonomía de vega, matorral hídrico y matorral, todas ellas identificadas como de bajo vigor (TL4_1). La principal formación es matorral hídrico - vega con dominancia de *Lycium humile*, que corresponde al 93% del área del Humedal 4. También existe presencia de *Tessaria absinthioides*, *Juncus balticus* y *Distichlis spicata*.

5.2.1.5 Humedal 5 (TL5)

Este humedal de 2,33 ha es el más pequeño de los cinco analizados (3% del área total de humedales) y su fisonomía principal es de vega. Cuenta con una zona de vigor bajo (TL5_1) y otra de vigor intermedio (TL5_3), siendo la primera la de mayor superficie (65% del humedal 5). En ambas zonas de vigor se presentan formaciones de vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus* como las principales. También hay presencia de *juncus balticus*.

Figura 5-2. Formaciones Vegetacionales en Humedales de Tilopozo



Dp: *Distichlis spicata*; bj: *Baccharis juncea*; sca: *Schoenoplectus californicus*; Lh: *Lycium humile*; jb: *Juncus balticus*; Tb: *Tessaria absinthioides*.

Fuente: Elaboración propia a partir de ALB-Cedrem, 2020.

Tabla 5-2 Unidades Vegetacionales en Humedales de Tilopozo, año 2020

Humedal_Zona	Formación Vegetacional	Área (ha)	Humedal_Zona	Formación Vegetacional	Área (ha)	
TL1_1	Vega de dp	9,67	TL3_1	Matorral hidrico Vega de Lh jb sca	9,28	
	Vega de sca bj dp	4,48		Vega de sca bj dp	3,99	
	Vega de sca bj	4,13		Vega de sca	2,31	
	Matorral hidrico Vega de Lh dp sca	1,3		Vega de jb	2,04	
	Vega de jb dp	0,63		Matorral hidrico de Lh	0,39	
TL1_3	Vega de sca bj	9,06		Matorral - Vega de Tb dp	0,12	
	Vega de dp	2,88		Matorral hidrico Vega de Lh jb	0,05	
	Vega de sca bj dp	2,86		TL3_3	Vega de sca bj dp	3,64
	Vega de jb dp	0,26			Vega de sca	0,71
TL1_5	Vega de sca bj	6,92			Matorral hidrico Vega de Lh jb sca	0,28
	Vega de dp	0,18	Matorral hidrico de Lh		0,18	
	Vega de sca bj dp	0,18	Matorral - Vega de Tb dp		0,04	
TL2_1	Vega de sca bj dp	4,24	Vega de jb		0	
	Matorral - Vega de Tb dp	3,39	TL3_5	Vega de sca bj dp	0,44	
	Vega de dp	1,63	TL4_1	Matorral hidrico Vega de Lh jb dp	3,57	
	Matorral de Tb	1,3		Matorral - Vega de Tb dp	0,2	
TL2_3	Vega de jb dp	0,29	Vega de jb dp	0,06		
	Vega de sca bj dp	4,74	TL5_1	Vega de sca bj dp	1,21	
	Matorral - Vega de Tb dp	0,64		Vega de jb dp	0,31	
TL2_5	Vega de sca bj dp	1,99	TL5_3	Vega de sca bj dp	0,76	
	Matorral - Vega de Tb dp	0,06		Vega de jb dp	0,04	

Dp: *Distichlis spicata*; bj: *Baccharis juncea*; sca: *Schoenoplectus californicus*; Lh: *Lycium humile*; jb: *Juncus balticus*; Tb: *Tessaria absinthioides*.

Fuente: Elaboración propia a partir de ALB-Cedrem, 2020.

5.2.2 Riqueza y Cobertura Actual en Humedales de Tilopozo

De acuerdo a la revisión de antecedentes realizada, se ha constatado por parte de diferentes titulares de proyectos, la existencia de distintos esfuerzos de muestreo en relación a la riqueza y cobertura de la vegetación en el Sector de Tilopozo, mediante el método de las transectas, los cuales cuentan con distintas resoluciones espaciales (puntos de muestreo) y temporales (cantidad de campañas). De todos ellos, el realizado por MEL en el año 2017, en el marco de la Adenda Complementaria 2 para el EIA del Proyecto Monturaqui, es el que cuenta con la mayor cantidad de transectas en el área de los humedales de Tilopozo, las cuales permiten caracterizar la riqueza y cobertura en cada uno de los cinco humedales.

5.2.2.1 Humedal Tilopozo 1 (TL1)

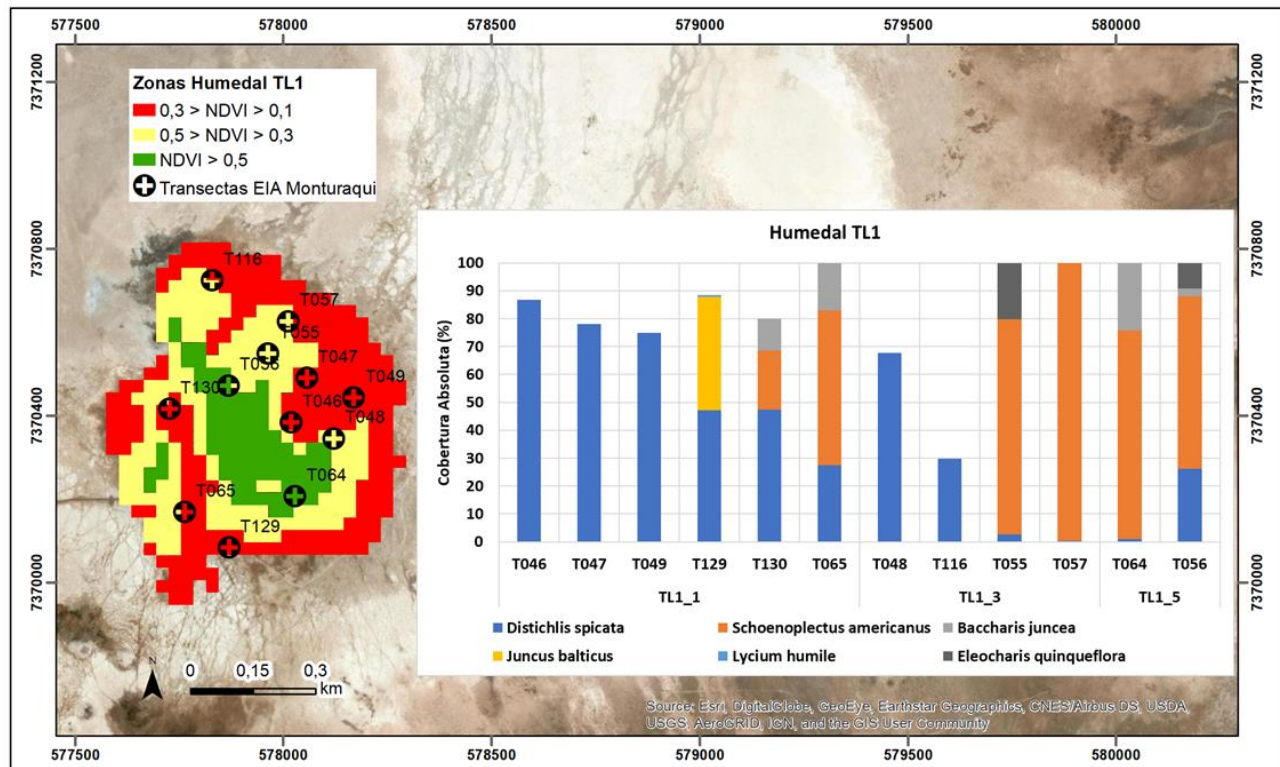
En la Figura 5-3 se presenta la distribución de transectas levantadas por MEL-CEA (2017), en el Humedal TL1, así como la riqueza y cobertura absoluta capturada en la primavera de 2017. En la gráfica de la Figura 5-3, las transectas han sido organizadas en tres grupos: 6 transectas en zona TL1_1 (vigor bajo), 4 transectas en zona TL1_3 (vigor medio) y 2 transectas en la zona TL1_5 (vigor alto).

En términos generales, se observan coberturas sobre el 75% en TL1_1, entre 30% y 100% de cobertura en TL1_3, y 100% de cobertura en TL1_5. La riqueza registrada para este humedal en primavera de 2017 fue de 6 especies, siendo las más representadas las especies *Distichlis spicata*, *Schoenoplectus californicus* y *Baccharis juncea*.

Al respecto, en la zona TL1_1, la mayor representación, así como la mayor cobertura, corresponde a la especie *Distichlis spicata*, registrándose como única especie en 3 de las 6 transectas evaluadas, ubicadas al este del humedal. Destaca también la transecta T65, ubicada en el borde de la zona TL1_1 y TL1_3, donde se observa una cobertura importante de *Schoenoplectus californicus*, del orden del 55% de cobertura absoluta.

Hacia la zona TL1_3, se observan dos transectas con alta representatividad de *Distichlis spicata*, y dos transectas con cobertura de *Schoenoplectus californicus* mayor al 80%. Finalmente, las dos transectas de la zona TL1_5, muestran una cobertura del 100%, donde la mayor presencia corresponde a *Schoenoplectus californicus*.

Figura 5-3. Riqueza y Cobertura de Especies en Humedal TL1 (Primavera 2017)

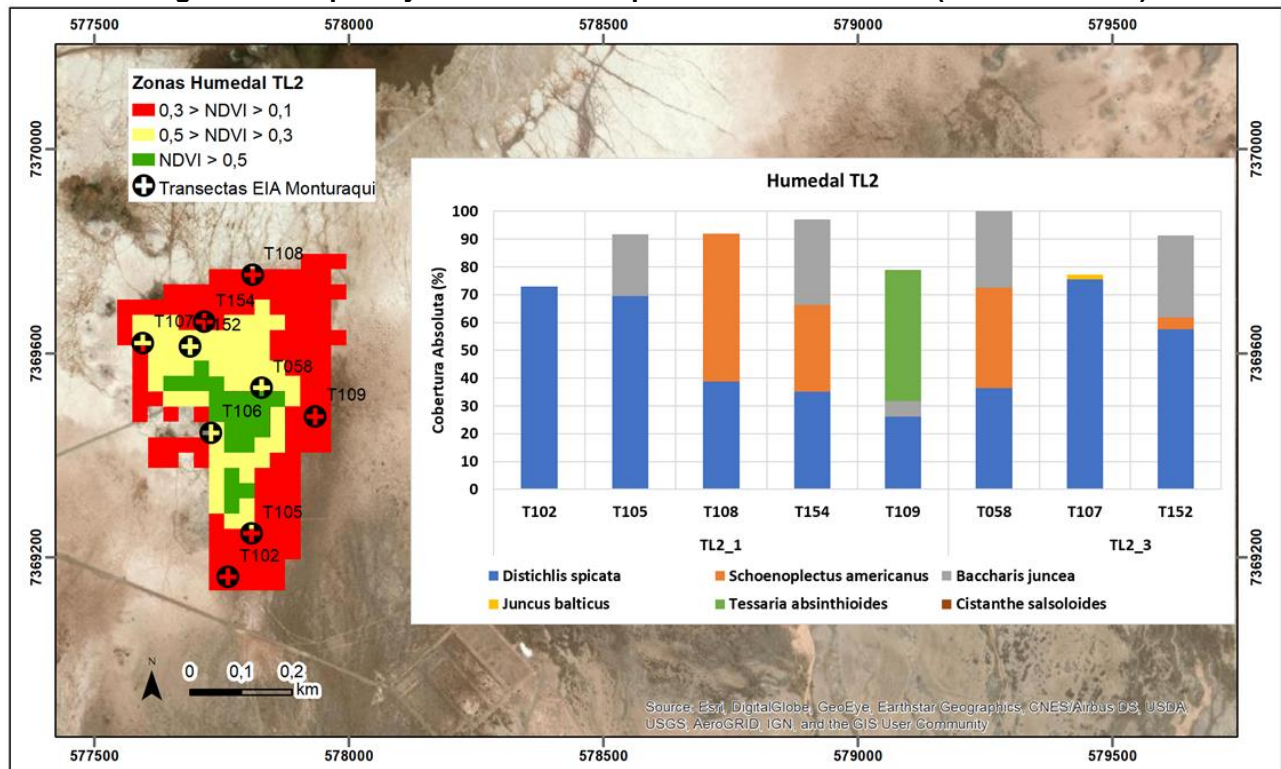


Fuente: Elaboración propia

5.2.2.2 Humedal Tilopozo 2 (TL2)

En la Figura 5-4 se presenta la distribución de transectas levantadas por MEL-CEA (2017) en el Humedal TL2, así como la riqueza y cobertura absoluta capturada en la primavera de 2017. En la gráfica de la Figura 5-4, las transectas han sido organizadas en dos grupos: 5 transectas en zona TL2_1 (vigor bajo) y 3 transectas en zona TL2_3 (vigor medio). En la zona TL2_5 (vigor alto) no se cuenta con transectas. En este humedal se registraron 6 especies, observándose que la especie *Distichlis spicata* está presente en la totalidad de las transectas, en coberturas que varían aproximadamente entre un 25% (T109 en TL2_1) a un 75% (T107 en TL2_3). Por otra parte, *Baccharis juncea* se observa representada en 5 de las 8 transectas, en coberturas del orden del 5% (T109 en TL2_1) a 30% aproximadamente (T152 en TL2_3). *Schoenoplectus californicus* se encuentra representado en 4 de las 8 transectas, con coberturas que van desde 4% (T107 en TL2_3) a 53% (T108 en TL2_1). Las restantes especies se encuentran escasamente representadas, destacándose *Tessaria absinthioides*, la cual presentó un 47% de cobertura, pero únicamente en una transecta.

Figura 5-4. Riqueza y Cobertura de Especies en Humedal TL2 (Primavera 2017)



Fuente: Elaboración propia

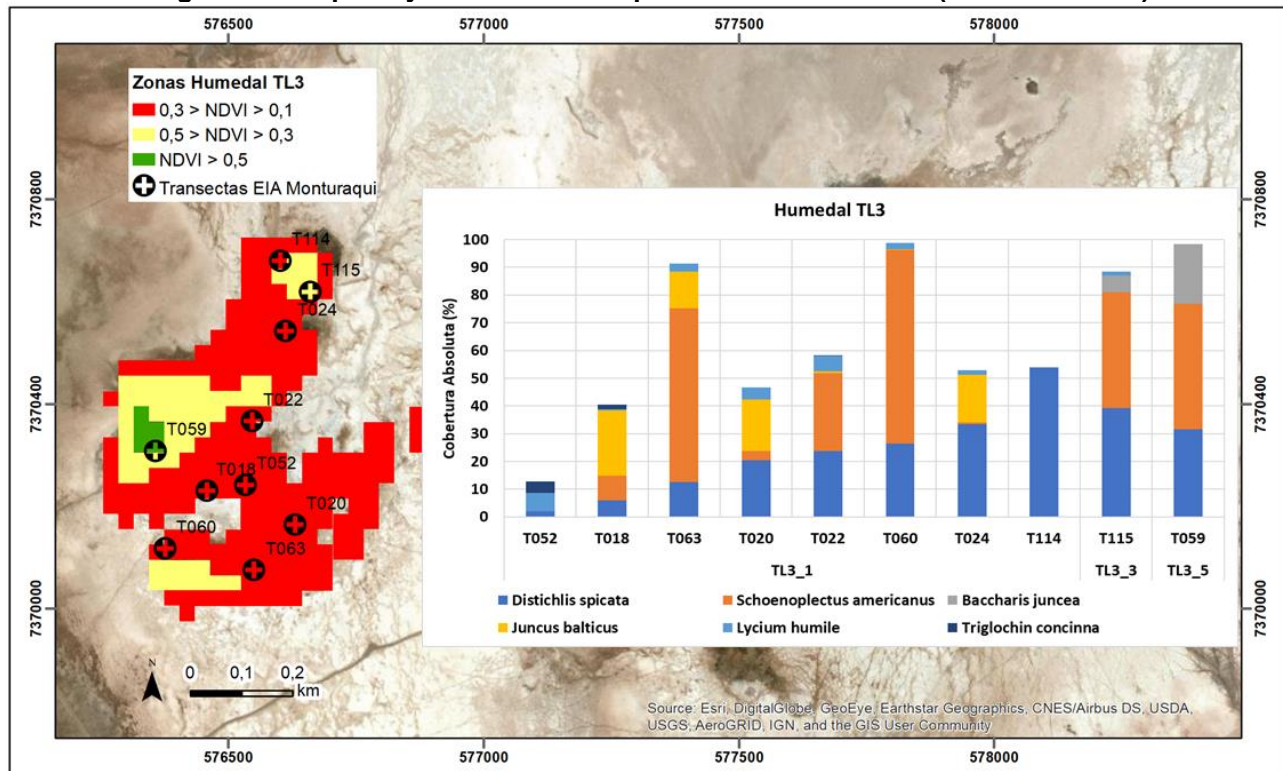
5.2.2.3 Humedal Tilopozo 3 (TL3)

En la Figura 5-5 se presenta la distribución de transectas levantadas por MEL-CEA (2017), en el Humedal TL3, así como la riqueza y cobertura absoluta capturada en la primavera de 2017. En la gráfica de la Figura 5-5, las transectas han sido organizadas en tres grupos: 8 transectas en zona TL3_1 (vigor bajo), 1 transecta en zona TL3_3 (vigor medio) y 1 transecta en la zona TL3_5 (vigor alto).

Al igual que en los humedales TL1 y TL2, se registraron 6 especies en TL3, siendo las especies más representadas, en términos de su presencia, *Distichlis spicata* (presente en las 10 transectas evaluadas), *Schoenoplectus californicus* (en 8 de las 10 transectas) y *Lycium humile* (en 8 de las 10 transectas).

En términos de cobertura, en la zona TL3_1 se registró una importante variabilidad del recubrimiento de vegetación, con coberturas bajo el 15% en ciertos sectores (T52), entorno al 50% (5 de las 8 transectas) y sobre el 90% (T63 y T60). En las zonas TL3_3 y TL3_5 cuentan con una transecta cada una, donde la cobertura absoluta de la vegetación osciló entre 88% y 98%, con participación importante de *Schoenoplectus californicus* y *Distichlis spicata*.

Figura 5-5. Riqueza y Cobertura de Especies en Humedal TL3 (Primavera 2017)



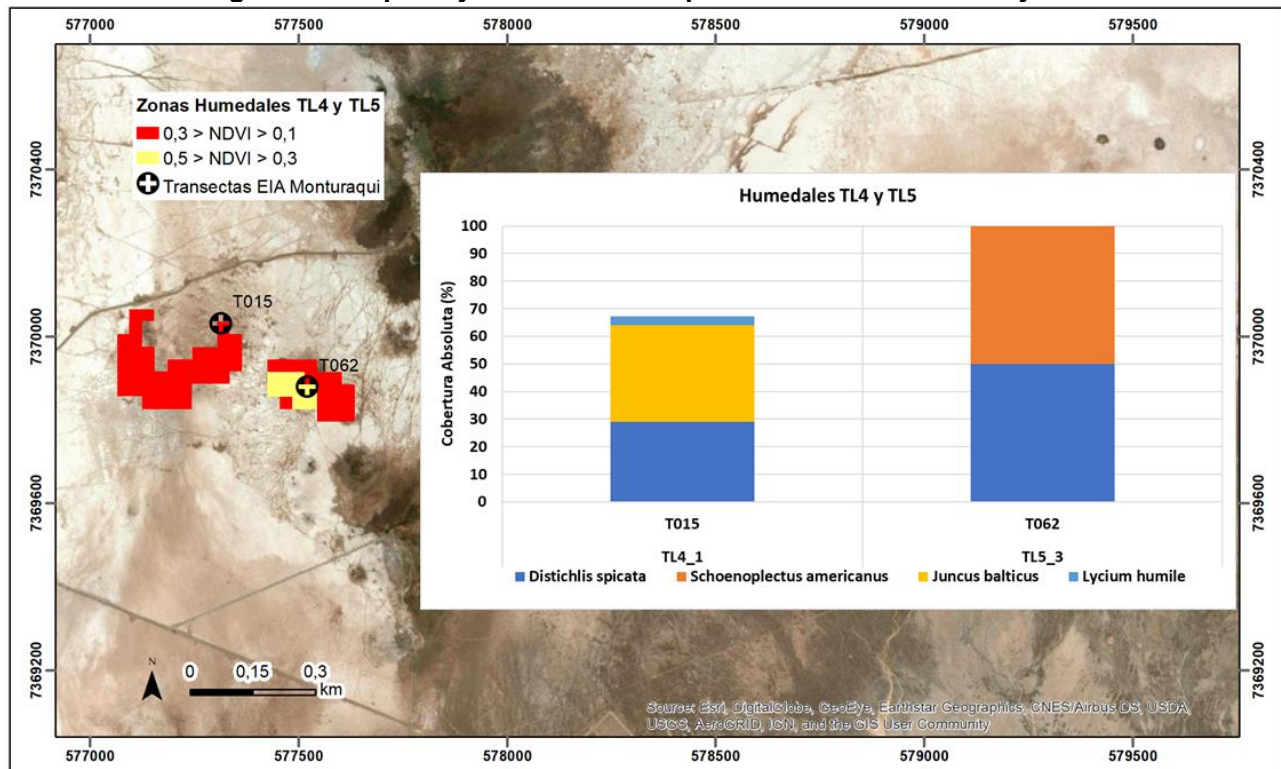
Fuente: Elaboración propia

6.2.2.3 Humedales Tilopozo 4 y 5 (TL4 y TL5)

En la Figura 5-6 se presenta la riqueza en cobertura de especies registradas en primavera de 2017, en los humedales TL4 y TL5, cada uno de los cuales fue representado mediante una única transecta. La riqueza registrada fue de 4 especies entre ambos humedales, mientras que la cobertura fue de 67% en TL4 (transecta T15) y 100% en TL5 (transecta T62).

En el humedal TL4, las especies mayormente representadas fueron *Distichlis spicata* (29%) y *Juncus balticus* (35%), mientras que en el humedal TL5, las especies con mayor representatividad fueron *Distichlis spicata* (50%) y *Schoenoplectus californicus* (50%).

Figura 5-6. Riqueza y Cobertura de Especies en Humedales TL4 y TL5






Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Principales Especies Vegetacionales Existentes en Humedales de Tilopozo

De acuerdo a las características de las formaciones vegetacionales presentes en los Humedales de Tilopozo (sección 5.2.1), así como de la riqueza y cobertura medida por transectos (sección 5.2.2), se desprende la existencia de seis especies como dominantes o principales acompañantes de las formaciones descritas. Algunas de sus características se describen a continuación, las cuales han sido extraídas íntegramente del estudio de MEL-CEA (2017), el cual presenta una recopilación bibliográfica de las características de estas especies.

La información obtenida en la mencionada revisión bibliográfica, se presenta en formato de ficha por especie, en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3 Características principales de algunas especies en Tilopozo

Especie	Descripción	Fotografía
Distichlis spicata	Hierba perenne, perteneciente a la familia de las gramíneas, de amplia distribución geográfica, asociada a suelos con alta salinidad.	
	El sistema radicular está compuesto por estolones, los que potencialmente pueden conectar con otros individuos de la misma población, para así compartir agua y en algunos casos, nutrientes	
	Forma montículos de hasta 80 cm de altura que dan una fisionomía característica a la vegetación.	
	Cuenta con sistemas acordes con la supervivencia en ambientes extremos	
Baccharis juncea	Especie característica de ambientes húmedos a saturados, para la cual Poblete (1991) indica que posee aislación de cristales de sal en la epidermis. Puede superar el metro de altura.	
	Sus raíces se ubicarían preferentemente en la zona saturada, aunque algunos estudios señalan la presencia de raíces por sobre el nivel freático.	
	En general, en el sector de Tilopozo se presenta asociada a <i>Schoenoplectus californicus</i> , en zonas donde existen afloramientos de agua libre o zonas muy húmedas.	
Schoenoplectus californicus	Es una herbácea perenne acuática, la cual puede alcanzar hasta 2 m de altura y presenta una alta producción de biomasa aérea.	
	Especie frecuente en los ambientes con saturación o alta humedad en el suelo.	

Fuente: Elaboración propia a partir de MEL-CEA, 2017.

Tabla 5-3 Características principales de algunas especies en Tilopozo (continuación).

Especie	Descripción	Fotografía
Lycium humile	Planta perenne, de tallo leñoso y propagación por estolones. En general se presenta de tamaño pequeño.	
	Esta especie corresponde a una suculenta, la cual almacena agua en sus tejidos aéreos.	
	Es capaz de lidiar con condiciones de alta salinidad mediante un mecanismo activo de formación de cristales de sal.	
Juncus balticus	Especie perenne, que puede alcanzar alturas cercanas a 1,2 metros, y cuenta con rizomas reptantes.	
	Poblete et al. (1991) no reportan la existencia de mecanismos de supervivencia en ambientes salinos, sin embargo, es una especie comúnmente reportada en este tipo de ambientes.	
	La profundidad de raíces de esta especie se correlaciona positivamente con el nivel freático. Esto, considerando que existe un rango dentro del cual las raíces son capaces de adaptarse. En particular, en el acápite 0 se muestran resultados de un estudio realizado en Tilopozo (MEL-CEA, 2012), de acuerdo al cual esta especie se desarrolla fundamentalmente en zonas en las cuales la profundidad del nivel freático es inferior a 60 cm.	
Tessaria absinthioides	Arbusto de amplia distribución en Chile y en países limítrofes. Localmente abundante, alcanza unos 50 cm de altura.	
	Presenta un crecimiento clonal, es decir, varios individuos comparten una misma raíz.	
	Presenta gran diversidad de formas y profundidad de raíces, relacionables a la disponibilidad de agua en el medio. Ha sido identificada en Tilopozo en zonas con profundidades del nivel freático hasta valores superiores a 2,15 m (MEL-CEA, 2012).	
	Tiene potencialidad para desarrollarse tanto en ambientes con y sin presencia de sales en el suelo, además de ser tolerante a una amplia variedad de tipos de suelos.	

Fuente: Elaboración propia a partir de MEL-CEA, 2017.

5.3 Antecedentes y Evolución Histórica de Riqueza y Cobertura en Tilopozo

En el entorno del área de estudio local, se cuenta con la información de cuatro transectas que han sido medidas históricamente por MEL (1999-2019), una de las cuales se ubica sobre el Humedal TL2, zona 1 (TL2_1), mientras que las otras tres se encuentran en el borde sur del Humedal TL1 y entre los Humedales TL1 y TL2. De acuerdo a lo informado por MEL-CEA (2020), se puede señalar lo siguiente:

- La transecta T01, ubicada en el borde norte del Humedal TL2_1 (Figura 5-7), presentó los mayores valores de riqueza (de cuatro a seis especies), en el periodo comprendido entre enero de 1999 y julio de 2004, siendo predominantes las especies *D. spicata*, *J. balticus* y en menor medida *L. humile*, y presentando en un menor grado de cobertura, inferior a 10%, *S. californicus*, *N. atacamensis* y *T. concinna*. Posteriormente, la riqueza disminuyó a dos especies (*D. spicata* y *J. balticus*), mientras que en el último monitoreo disponible, se registró solamente la presencia de una especie.

Respecto a la cobertura, se han registrado valores sobre el 60% de manera constante a partir de julio de 2007, observándose un máximo de 100% desde julio de 2017 hasta enero de 2019. En tanto, los mínimos valores para la misma transecta fueron observados durante enero de 2005 y julio de 2006 con 7,4% y 9,9%, respectivamente.

- Para la transecta T02, ubicada entre el sur del Humedal TL1 y el norte del Humedal TL2 (Figura 5-7), los mayores valores de riqueza (cinco y seis especies) fueron registrados en los años 2000 y 2001, cuando se encontraron de forma exclusiva las especies *Nitrophila atacamensis* y *Triglochin concinna*, las cuales dejaron de presentar registro luego de enero de 2003 y enero de 2004, respectivamente. Desde que se tiene registros, la especie *D. spicata* ha sido dominante para esta transecta, junto con la especie *J. balticus*, la cual alcanzó mayor valor de cobertura que *D. spicata* durante 2011, volviendo a ser codominante de *D. spicata* desde enero 2012, hasta dejar de ser registrada desde julio 2018 hasta la fecha. Además, desde enero 2012, la especie *L. humile* se ha hecho cada vez más presente en cobertura hasta alcanzar un máximo de 32,8% en enero 2017 para luego volver a valores bajo el 5% hasta lo observado a la fecha.

La cobertura histórica de la transecta fluctuó entre un máximo de 86,9% y un mínimo 6,1%, registrados durante enero de 2011 y julio de 2004, respectivamente

- La transecta T03, ubicada al sur del Humedal TL1 (Figura 5-8), desde la temporada de verano del año 2000 hasta enero de 2003, registró la mayor riqueza, con un total de 4 especies durante las campañas de verano principalmente. Desde la fecha mencionada hasta la campaña de 2019, las especies dominantes han sido *D. spicata* y *J. balticus*, sin embargo, la especie *L. humile*, fue registrada con una mayor cobertura que el resto de las especies durante enero de 2005, para luego disminuir su presencia y registrarse de manera intermitente entre los años 2006 y 2016, no observándose hasta la fecha.

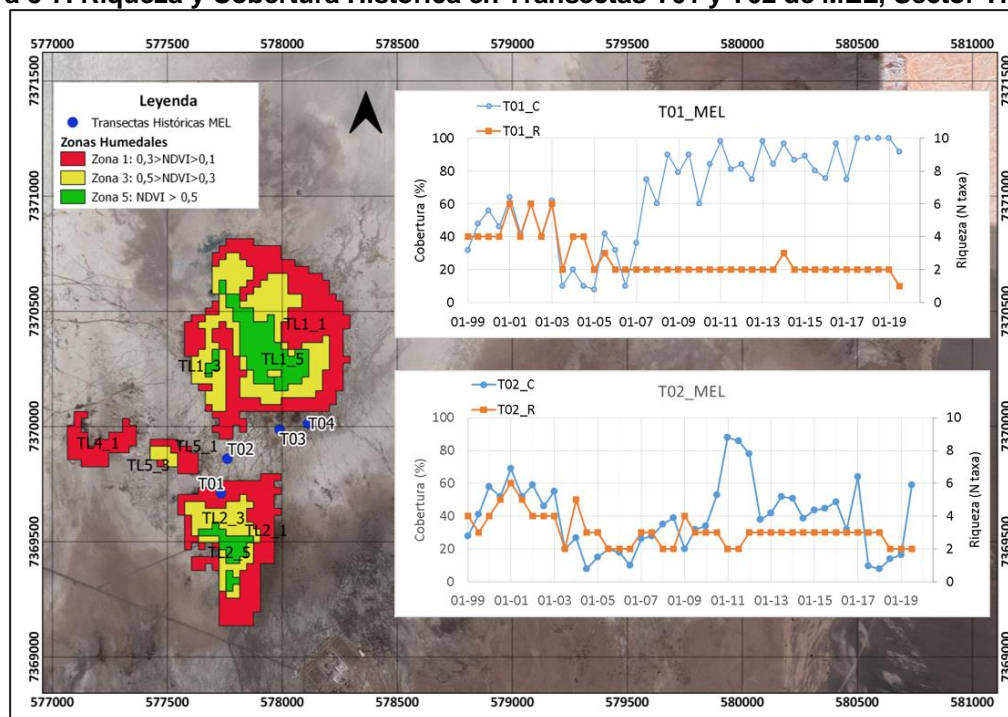
Durante los años 2012 y 2013 se presentaron los valores máximos de cobertura histórica para esta transecta, con 75,4% registrado en julio de 2012, seguido de un 72,1% para ambas campañas de 2011, mientras que el mínimo valor se obtuvo julio de 2006 con un 2,5%.

- En la transecta T04, ubicada al este de la transecta T03 (Figura 5-8), los mayores registros de riqueza se presentaron hasta enero de 2003 (hasta 4 especies), para luego disminuir entre 2 a 3

especies hasta el año 2016, y posteriormente encontrar ausencia de especies en varias campañas. Desde enero de 2008 hasta julio 2010, la especie *L. humile* fue dominante en este sector, sin embargo entre julio 2011 y julio 2013 lo fue *D. spicata* para luego *L. humile* volver a dominar desde enero de 2015 hasta julio de 2016 por sobre *D. spicata* y *J. balticus*. En las últimas campañas con registro, sólo se ha detectado *D. spicata* (julio 2019).

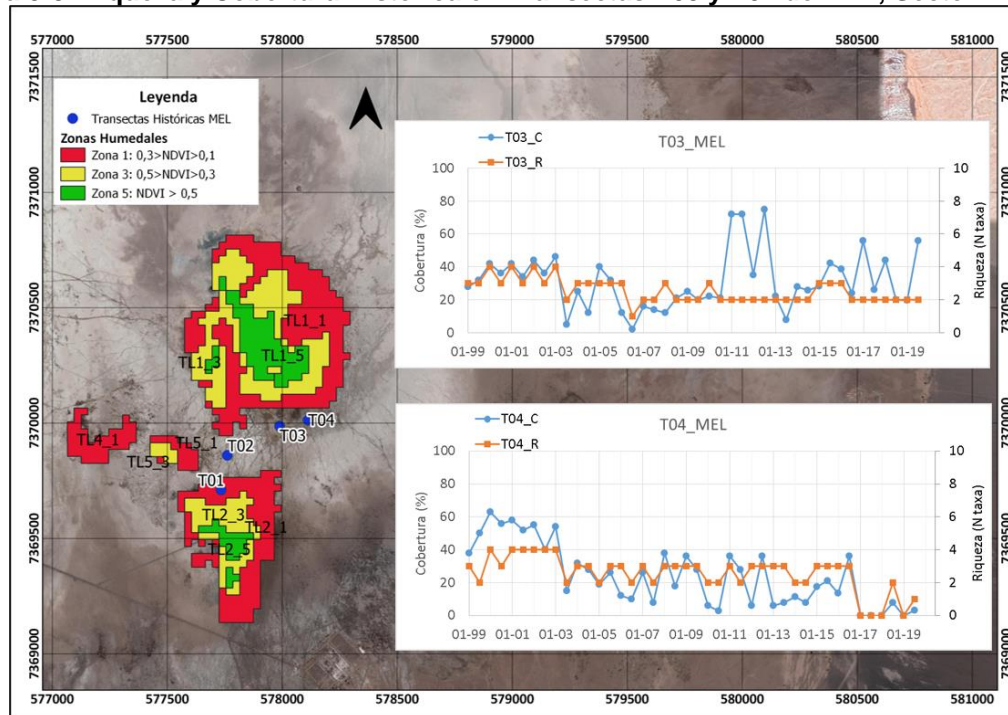
Respecto a la cobertura, ha oscilado entre un máximo de 63% (enero 2020) y un mínimo de 3% durante julio 2012 y julio 2019. Adicionalmente, desde enero 2017, se registraron 4 campañas sin presencia de especies.

Figura 5-7. Riqueza y Cobertura Histórica en Transectas T01 y T02 de MEL, Sector Tilopozo



Fuente: Elaboración propia a partir de MEL-CEA (2020).

Figura 5-8. Riqueza y Cobertura Histórica en Transectas T03 y T04 de MEL, Sector Tilopozo



Fuente: Elaboración propia a partir de CEA-MEL (2020).

Los registros muestran variabilidad en la cobertura absoluta medida en las transectas, algunas de las cuales se han incrementado en los últimos años, respecto al comienzo del período de registros (1999-2005), como T01, mientras que otras han disminuido, como T04. Respecto a la riqueza, en general los mayores valores se presentaron en el comienzo del período de registros, siendo los valores actuales inferiores a estos.

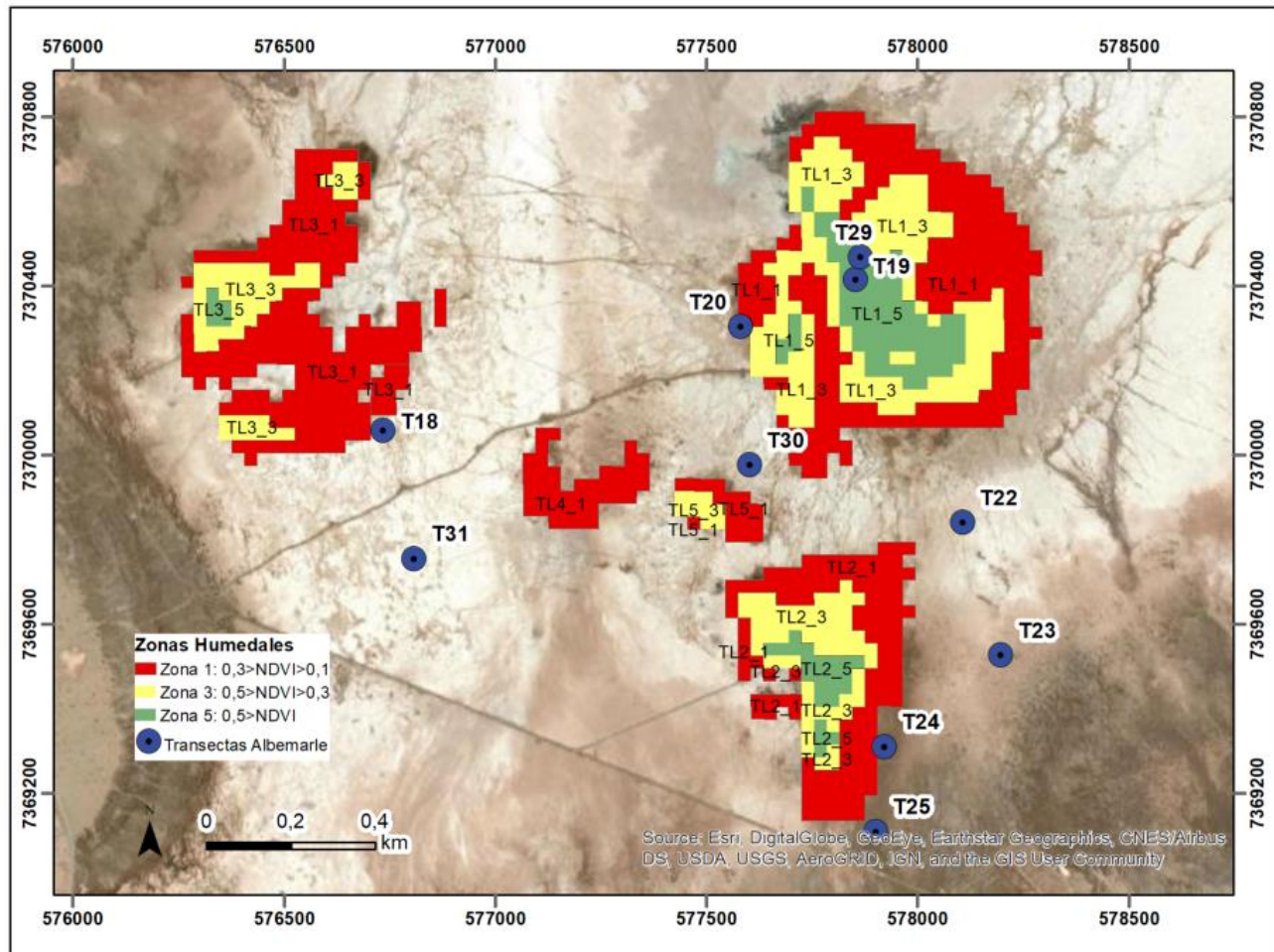
Por su parte, y en el marco del Plan de Manejo Biótico (PMB) estipulado en la RCA N°21/2016, Albemarle lleva a cabo un seguimiento de Flora y Vegetación mediante el método de las transectas que, en el entorno de los Humedales de Tilopozo, considera el levantamiento de 10 transectas que son semestralmente informadas a la Autoridad. La ubicación de estas transectas se presenta en la Figura 5-9. En la Figura 5-10 y Figura 5-11, se presentan los resultados de riqueza y cobertura medidos en estas transectas, desde el año 2016 a 2019.

En la Figura 5-10 se presentan aquellas transectas ubicadas en el humedal TL1 y/o en su entorno. En este conjunto de transectas se observa que las mayores coberturas registradas (entre 80% y 100% en el caso de *S. californicus*) están en la zona TL1_5 (transectas T19 y T29), mientras que en el borde de este (transectas T29 y T30) se dan coberturas menores (hasta un máximo de 40% de *D. Spicata*). En cuanto a la riqueza, las transecta T19, T29 y T30 presentan 3 especies mientras que las transectas T20 varía entre 1 y 2 especies. En términos temporales, se observa un comportamiento relativamente estable en el tiempo de la riqueza y cobertura. Estos registros son coherentes con las características de la formación vegetacional sobre la cual se levantan las transectas (sección 5.2.1), correspondiendo las transectas T19 y T29 a una vega muy densa de *Schoenoplectus californicus* y *Baccharis juncea*, T20 a una vega poco densa de *Distichlis spicata* y T30 a un *herbasal de juncus balticus*.

En la Figura 5-11 se presentan aquellas transectas donde se ha registrado una menor cobertura a lo largo del tiempo, y que corresponden a T18, T22, T23, T25 y T31. Adicionalmente, en atención a su ubicación

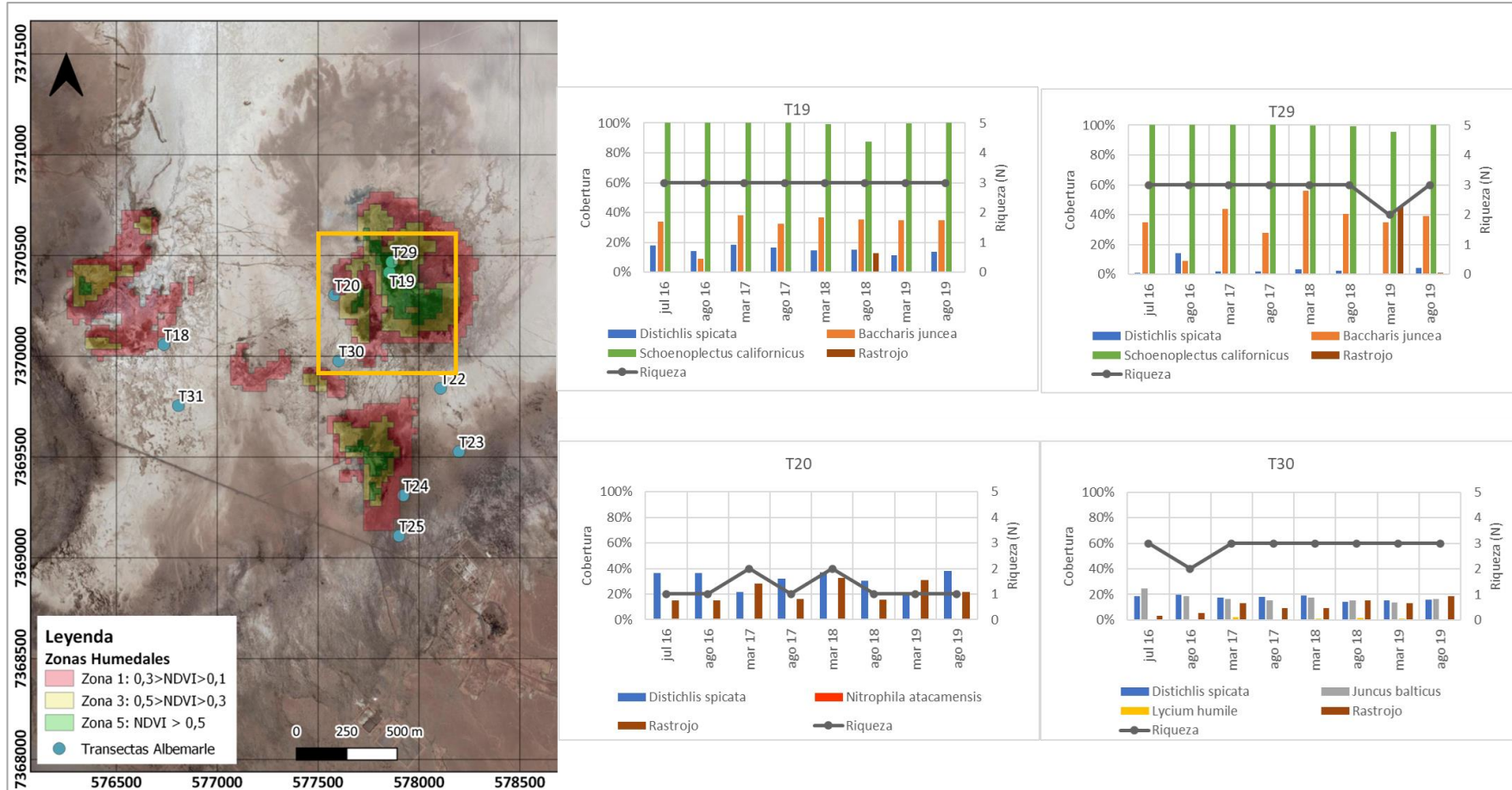
relativa se incluye a transecta T24. En términos generales, todas estas transectas se encuentran fuera del área de Humedales delimitados o bien en los márgenes de ellos. Las coberturas de las especies más representadas en la mayoría de las transectas analizadas son del orden del 10%, con excepción de la T24 que llegan al 40%. La riqueza oscila entre 1 y 3 especies en todas las transectas. Los resultados de cobertura son coherentes con las características de la formación vegetacional sobre la cual se levantan las transectas (sección 5.2.1), correspondiendo la mayoría de estas a la fisonomía de “vega muy clara”, “vega clara” o “matorral claro”, asociándose el término “claro” a una baja densidad territorial de especies.

Figura 5-9. Transectas Levantadas por Albemarle, Sector Humedales Tilopozo



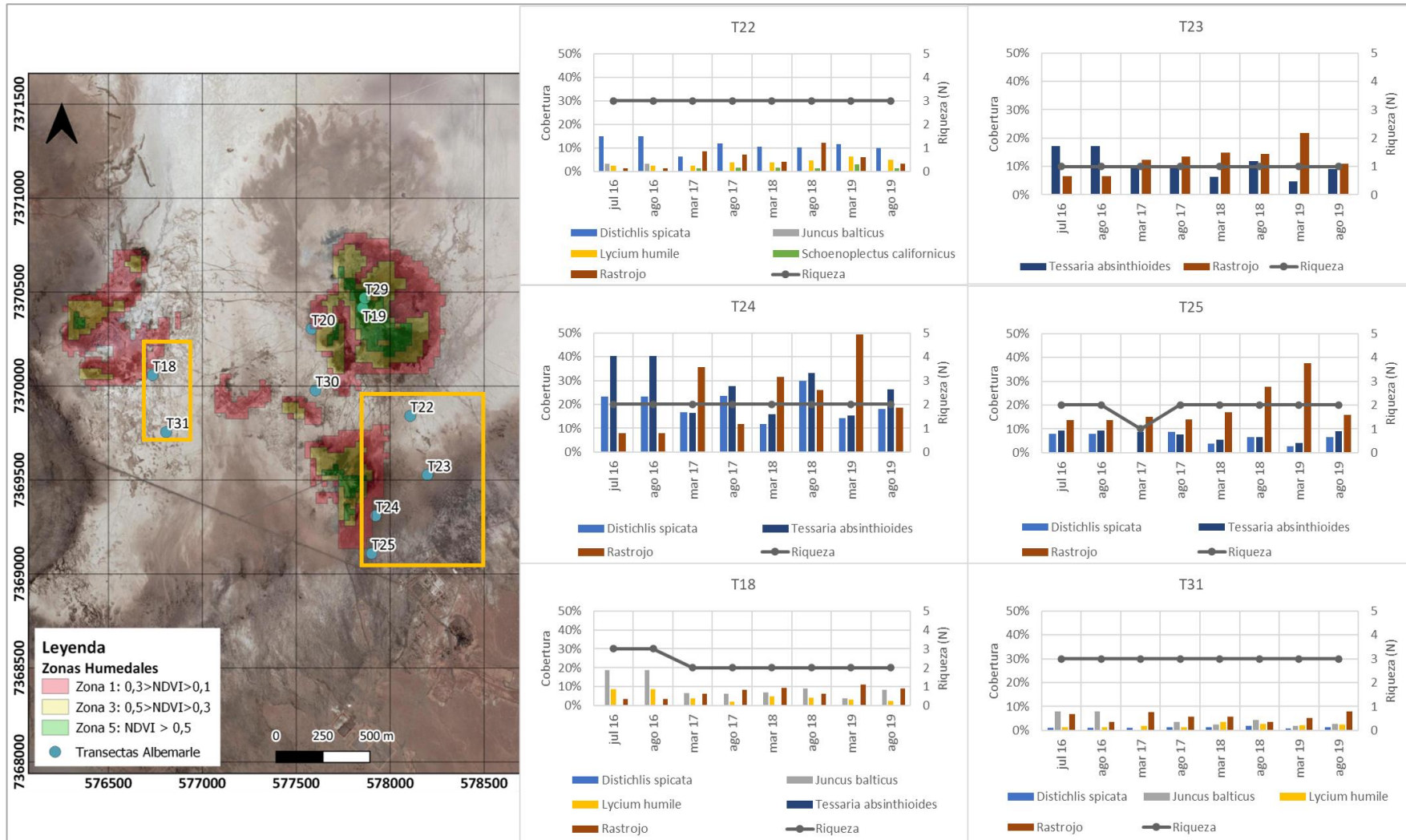
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-10. Riqueza y Cobertura en Transectas Cercanas a Humedales de Tilopozo



Fuente: Elaboración propia a partir de ALB-Cedrem, 2020.

Figura 5-11. Riqueza y Cobertura en Transectas Cercanas a Humedales de Tilopozo



Fuente: Elaboración propia a partir de ALB-Cedrem, 2020.

5.4 Análisis Histórico de la Vigoridad de la Vegetación (NDVI) (1990-2019)

Para analizar la evolución de la vegetación en el tiempo en el sector Tilopozo, se ha realizado un análisis de teledetección, que consiste en estudiar un sector fijo a través del tiempo mediante el uso de imágenes satelitales, de acuerdo a la determinación de índices espectrales en los píxeles de dicho sector. En este caso, se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), que puede ser interpretado como biomasa fotosintéticamente activa o, en términos simples, como una estimación de la vigoridad y/o salud de la vegetación. Este análisis ha considerado una metodología descrita de manera general en la sección 2, la cual está basada en la metodología aplicada por la SMA en su informe SMA (2020b). Los resultados presentados a continuación son parte de un reporte más extenso, el cual se presenta de manera detallada en el Anexo 1 de este informe.

El periodo analizado considera los años 1990 a 2020, por lo que es posible visualizar tendencias de mediano/largo plazo. El periodo 1990-1994 ha sido considerado como la base para delimitar los humedales, dado que se trata de una condición sin intervención antrópica en su entorno. Respecto de la metodología es importante señalar que el análisis se realizó mediante el uso de imágenes satelitales Landsat, de 30 m. de resolución espacial, analizando un total de 773 escenas o imágenes Landsat 5, 7 y 8, con el objetivo de obtener una serie de tiempo del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), donde la zona 5 es la de mayor vigor (TLi_5) y la zona 1 (Ti_1) de menor vigor.

5.4.1 Serie de Tiempo de NDVI por Humedal

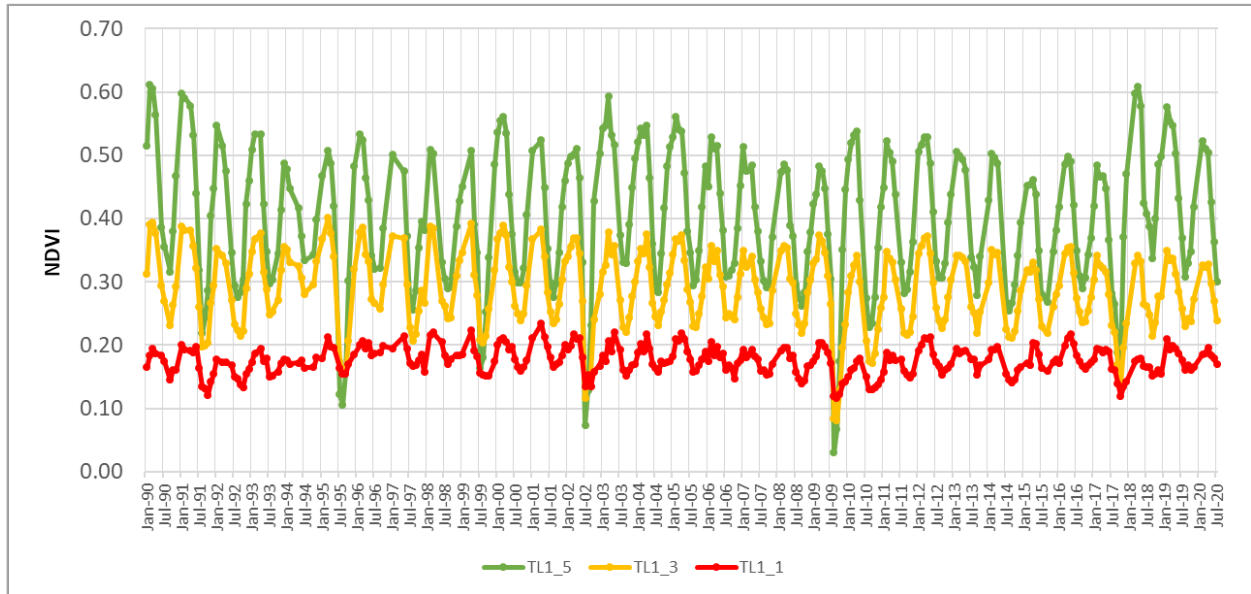
En la Figura 5-12 a Figura 5-16, se presentan las series de tiempo de NDVI, agrupadas para cada uno de los humedales en estudio, y separadas en distintas series de datos, de acuerdo a las Zonas identificadas en cada humedal (Tabla 5-1).

En general se observa una marcada variabilidad estacional de NDVI, dada por valores mínimos de invierno y valores máximos en verano-otoño. A su vez, la magnitud de esta variabilidad presenta una heterogeneidad espacial, donde se observa una amplitud mayor en las zonas más vigorosas (Ejemplo: Zona 5), que tienden estar en el centro del humedal. Esta amplitud estacional se reduce en la Zona 3, y sigue disminuyendo hacia la periferia de cada humedal (Zona 1).

En general, se aprecia que en algunos polígonos de la zona de alto vigor (Zona 5), como el TL2_5 y TL3_5, existe un descenso notorio en el tiempo, donde el índice NDVI mostraba valores máximos estacionales del orden de 0,55 a 0,6 (hasta el año 2004 para TL2_5 y hasta el año 1994 para TL3_5), últimamente muestra valores en torno 0,4. El polígono TL1_5 en tanto, no parece mostrar tendencia al descenso, de hecho en los últimos años presenta valores máximos de NDVI del orden de 0,55 a 0,6. En la zona de vigor medio (Zona 3), se puede notar que el polígono TL3_3 exhibe un descenso en el tiempo, donde el índice NDVI solía mostrar valores máximos estacionales del orden de 0,4 hasta el año 2001, últimamente muestra valores en torno 0,3 (Figura 5-14). Para el resto de los polígonos no es claro poder definir una tendencia gráfica, por lo que es conveniente usar un análisis de tendencia mediante regresiones, que se presenta en el acápite siguiente.

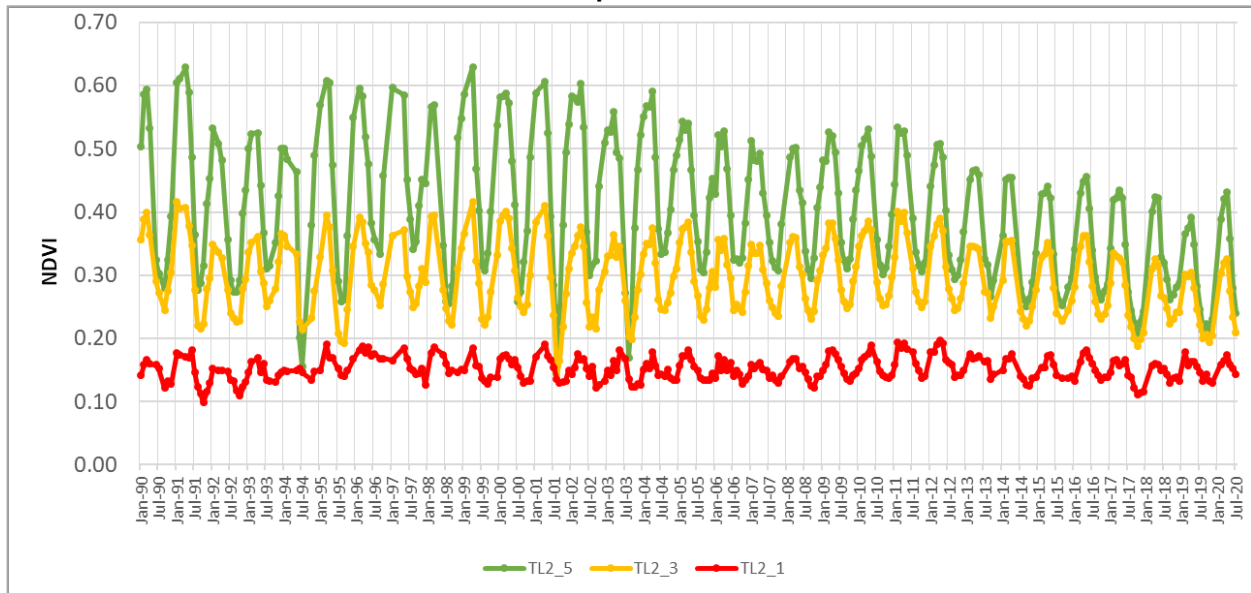
Cabe indicar que, en ciertos períodos se aprecia una caída abrupta de los valores (por ejemplo, TL1 en los años 1995, 2002 y 2009, entre otros), los cuales, de acuerdo a la fotointerpretación de imágenes, se pueden asociar a incendios y/o quemadas de la cobertura vegetal. Este tema es abordado en el acápite 6.2.

Figura 5-12. Serie temporal de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en Humedal Tilopozo N°1



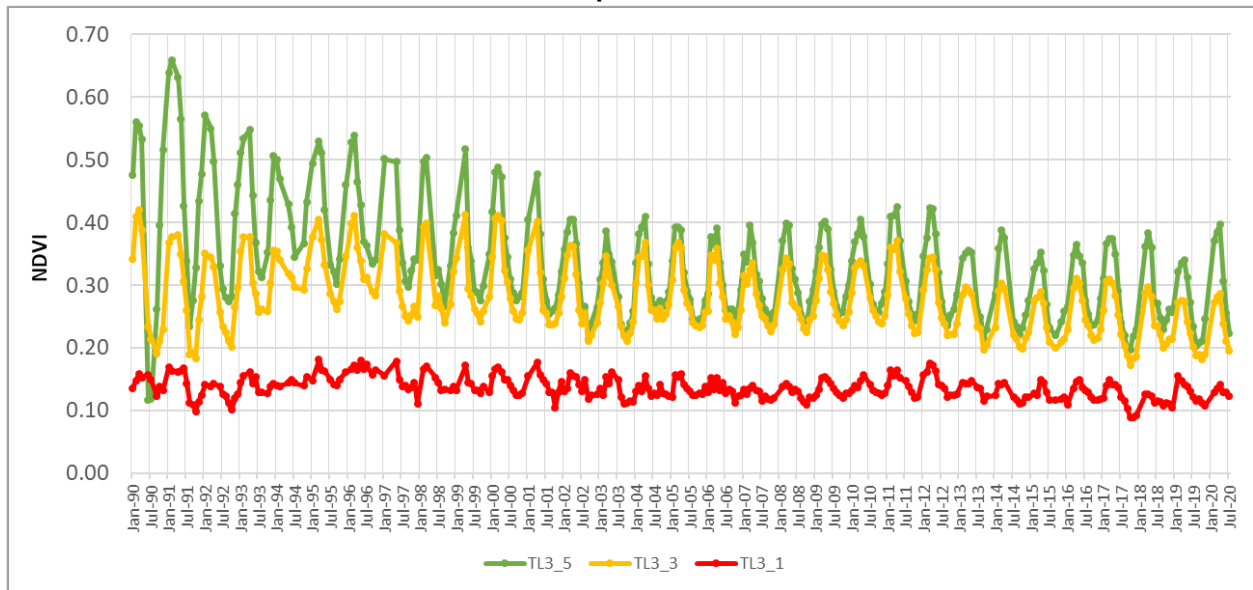
Fuente: Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 5-13. Serie temporal de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en Humedal Tilopozo N°2



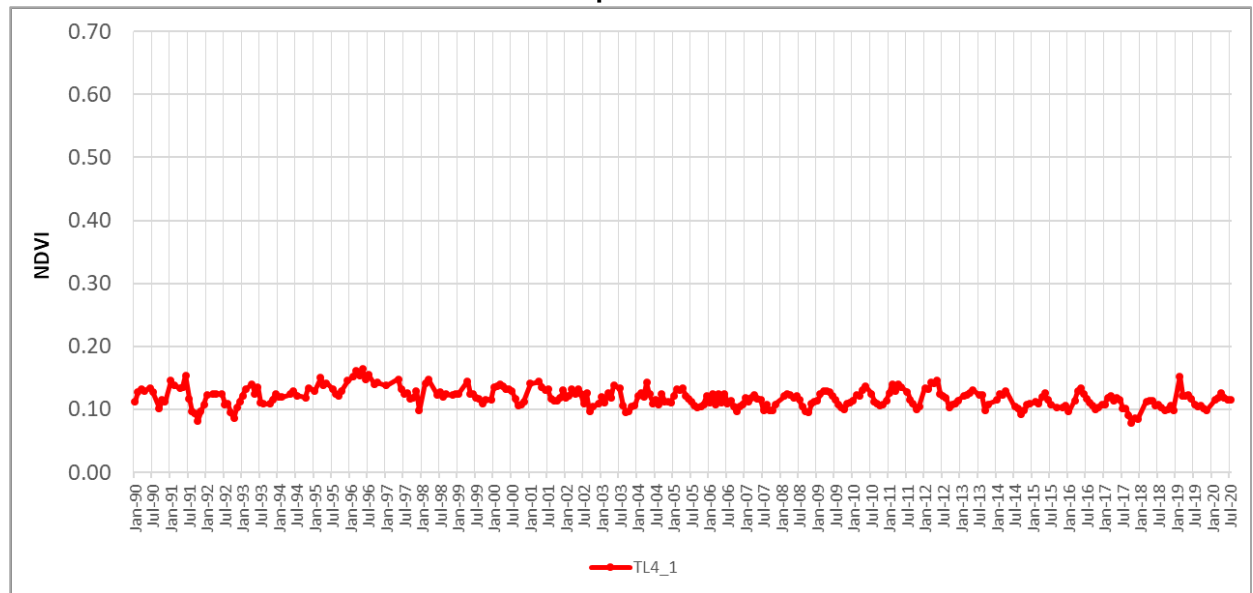
Fuente: Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 5-14. Serie temporal de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en Humedal Tilopozo N°3



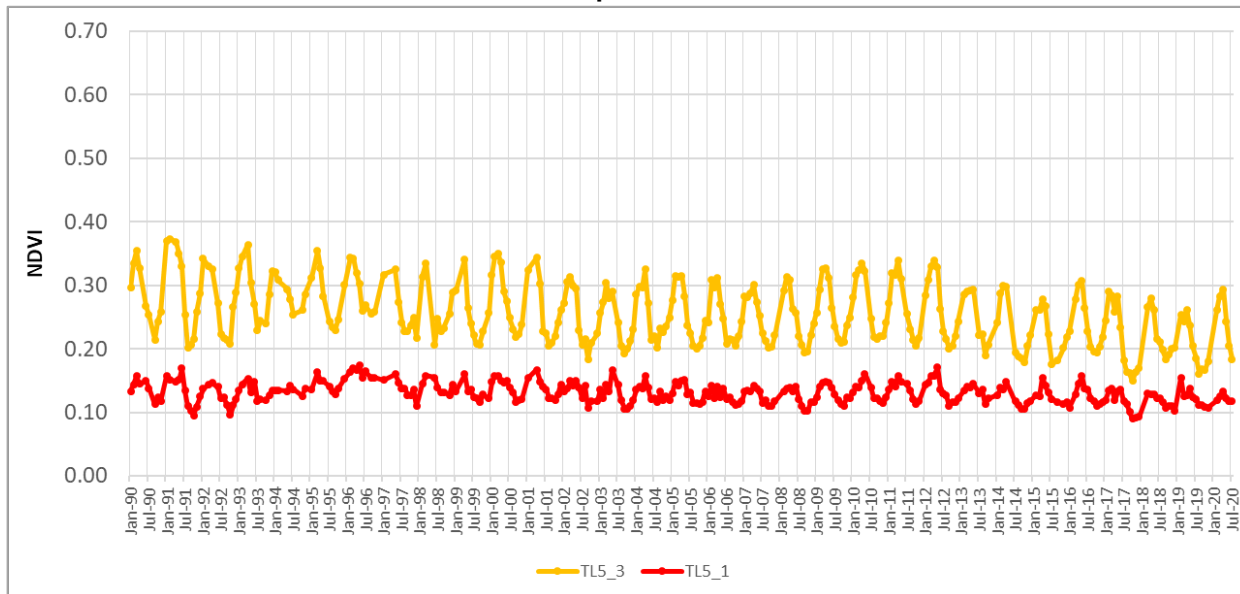
Fuente: Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 5-15. Serie temporal de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en Humedal Tilopozo N°4



Fuente: Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 5-16. Serie temporal de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en Humedal Tilopozo N°5



Fuente: Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

5.4.2 Series de Tiempo NDVI por Zonas de Humedal

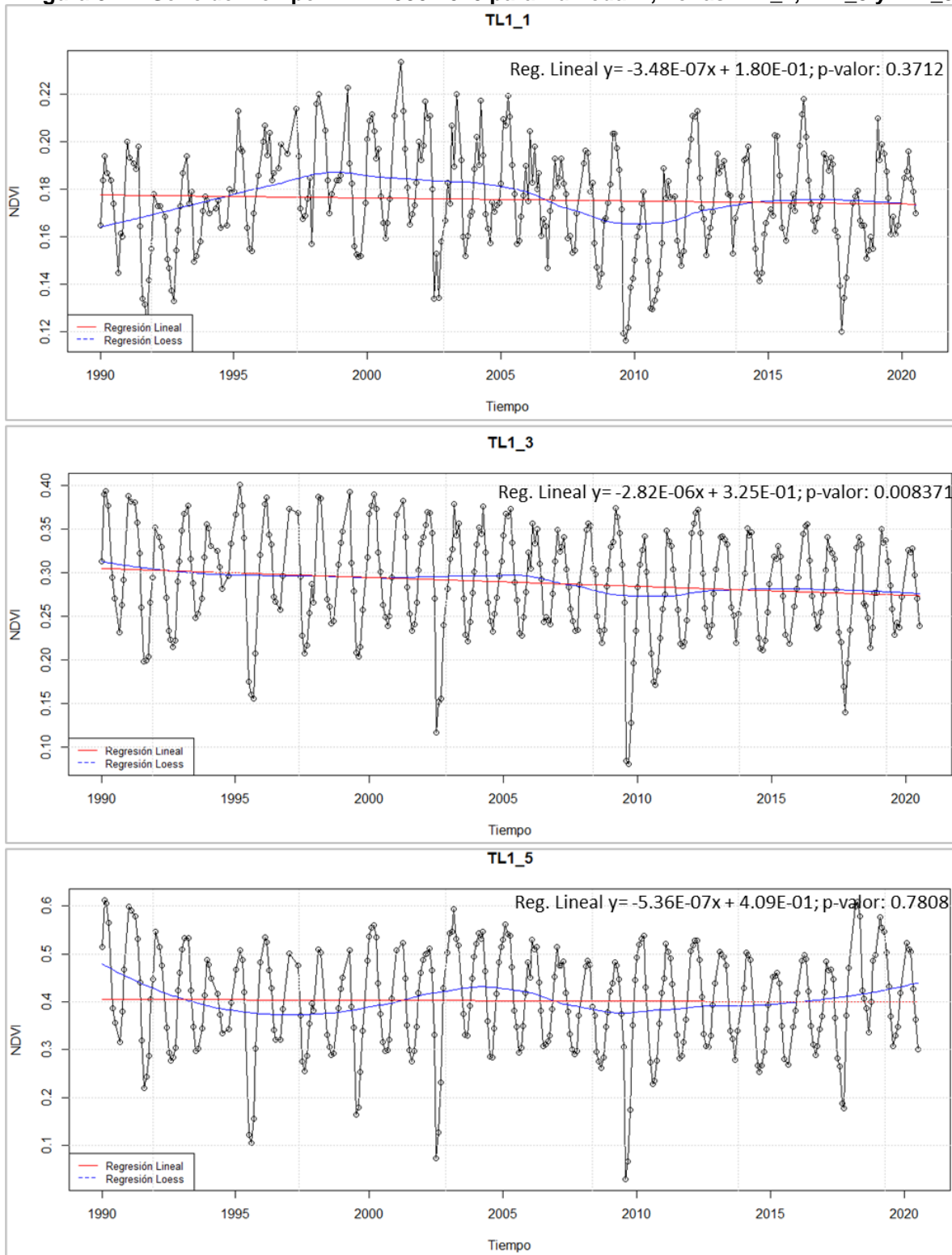
Con el fin de analizar la evolución inter-anual en cada polígono en forma individual (Zonas de cada Humedal) y poder cuantificar las tendencias para el período completo de análisis desde enero 1990 hasta julio 2020, se aplicaron herramientas de regresión lineal y regresión LOESS¹⁷. En la Figura 5-17 a la Figura 5-21 se muestran los resultados gráficos y los parámetros de la regresión.

De dichos análisis, se obtiene que la mayoría de los polígonos (11 de 12 casos), muestran una tendencia al descenso con pendientes negativas, es decir a una condición de menor vigorosidad. Al considerar el período 1990-2020, sólo el polígono TL2_1 mostró una pendiente positiva. En relación a esas pendientes, la mayor parte de los polígonos (9 de 12) tuvieron una tendencia estadísticamente significativa (parámetro p-valor < 0,05)¹⁸. Las excepciones fueron los polígonos TL1_5, TL1_1 y TL2_1.

¹⁷ LOESS: Locally Estimated Scatterplot Smoothing, es una regresión polinomial local que ajusta modelos simples a subconjuntos localizados de los datos para construir serie suavizada, considerada una generalización de la media móvil y la regresión polinomial.

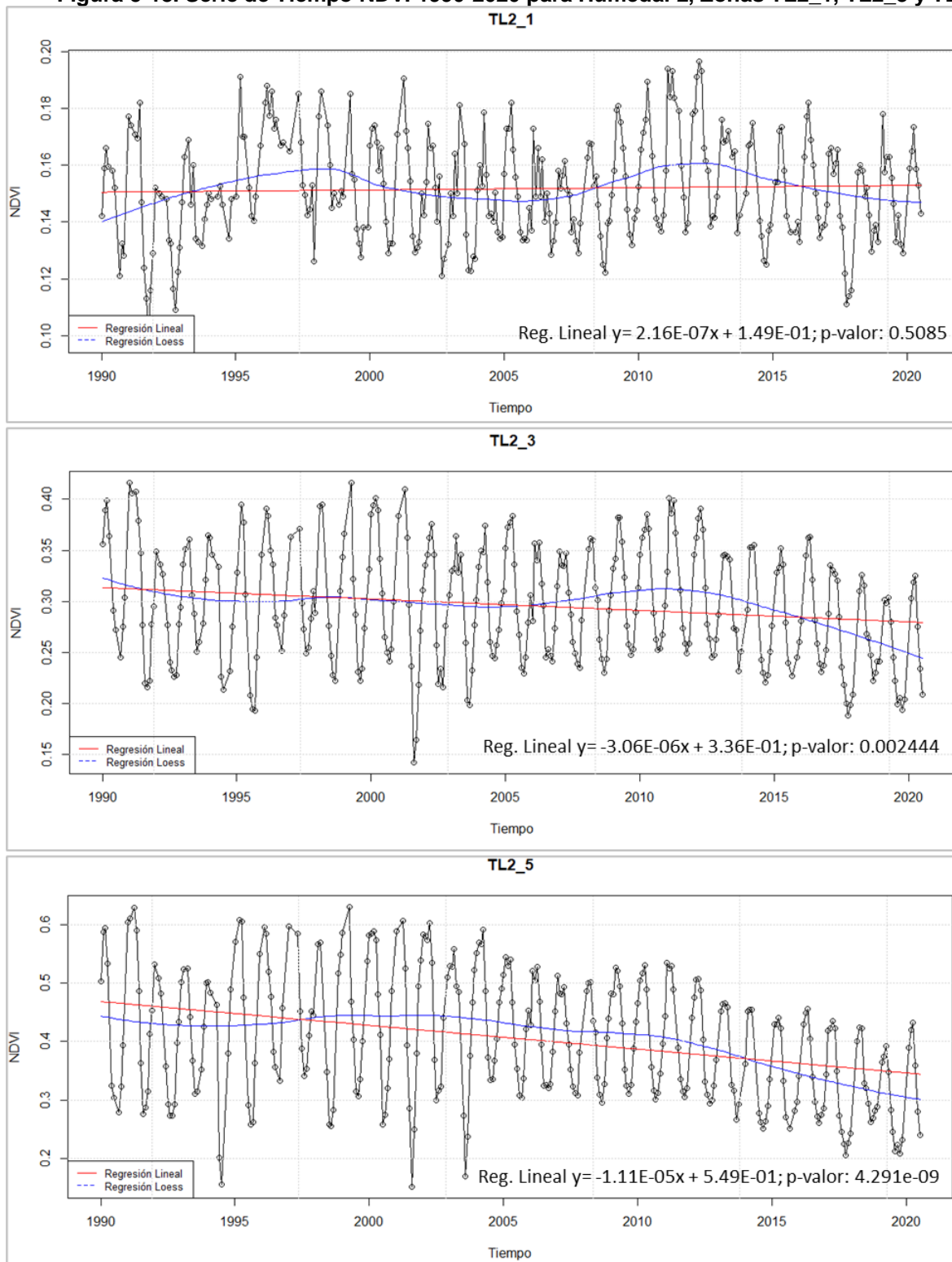
¹⁸ En el caso de que la tendencia sea estadísticamente significativa, el error de considerar que la tendencia del NDVI es al descenso es inferior a 5% (p-valor < 0,05). En cambio, si la tendencia no es estadísticamente significativa, aunque la tendencia sea decreciente, dicho error sería superior a 5%.

Figura 5-17. Serie de Tiempo NDVI 1990-2020 para Humedal 1, Zonas TL1_1, TL1_3 y TL1_5.



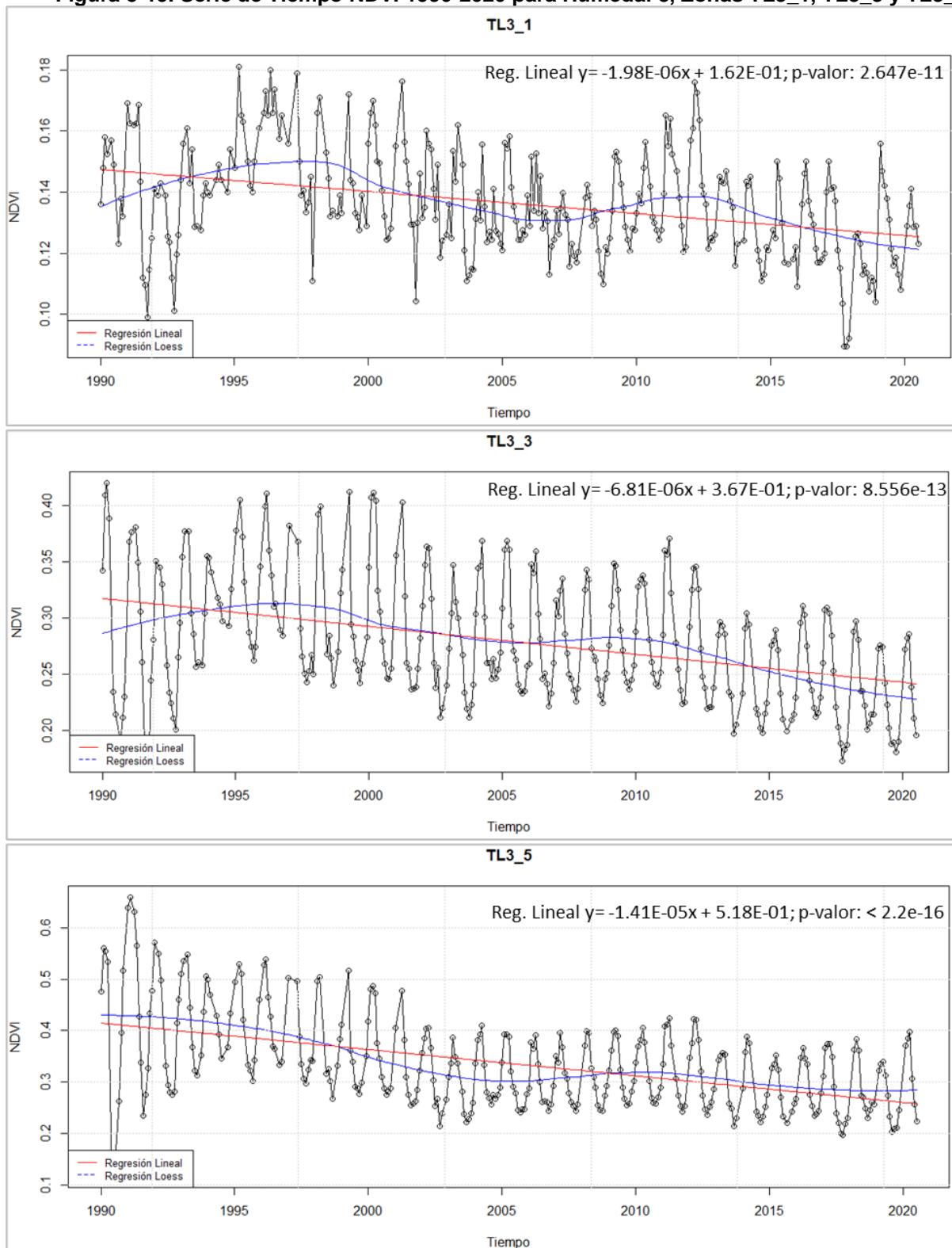
Fuente: Modificado de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 5-18. Serie de Tiempo NDVI 1990-2020 para Humedal 2, Zonas TL2_1, TL2_3 y TL2_5.



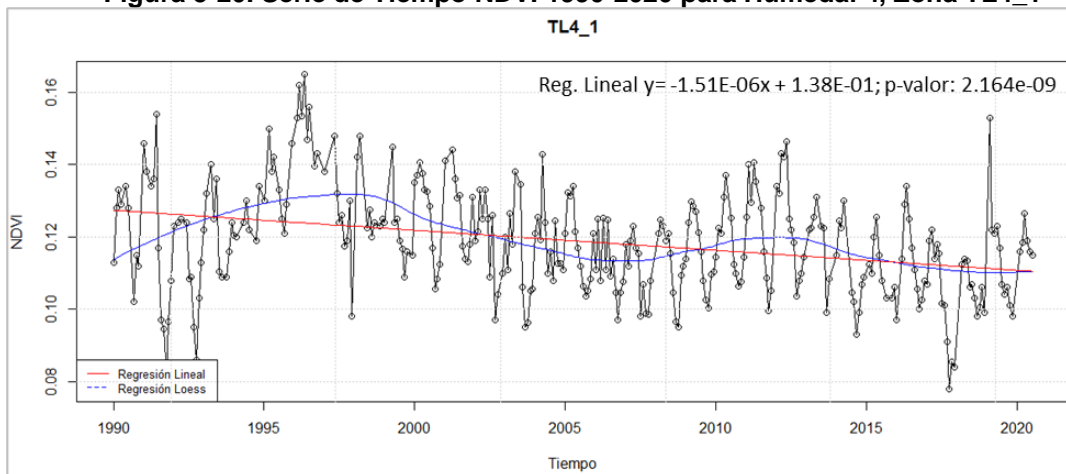
Fuente: Modificado de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 5-19. Serie de Tiempo NDVI 1990-2020 para Humedal 3, Zonas TL3_1, TL3_3 y TL3_5.



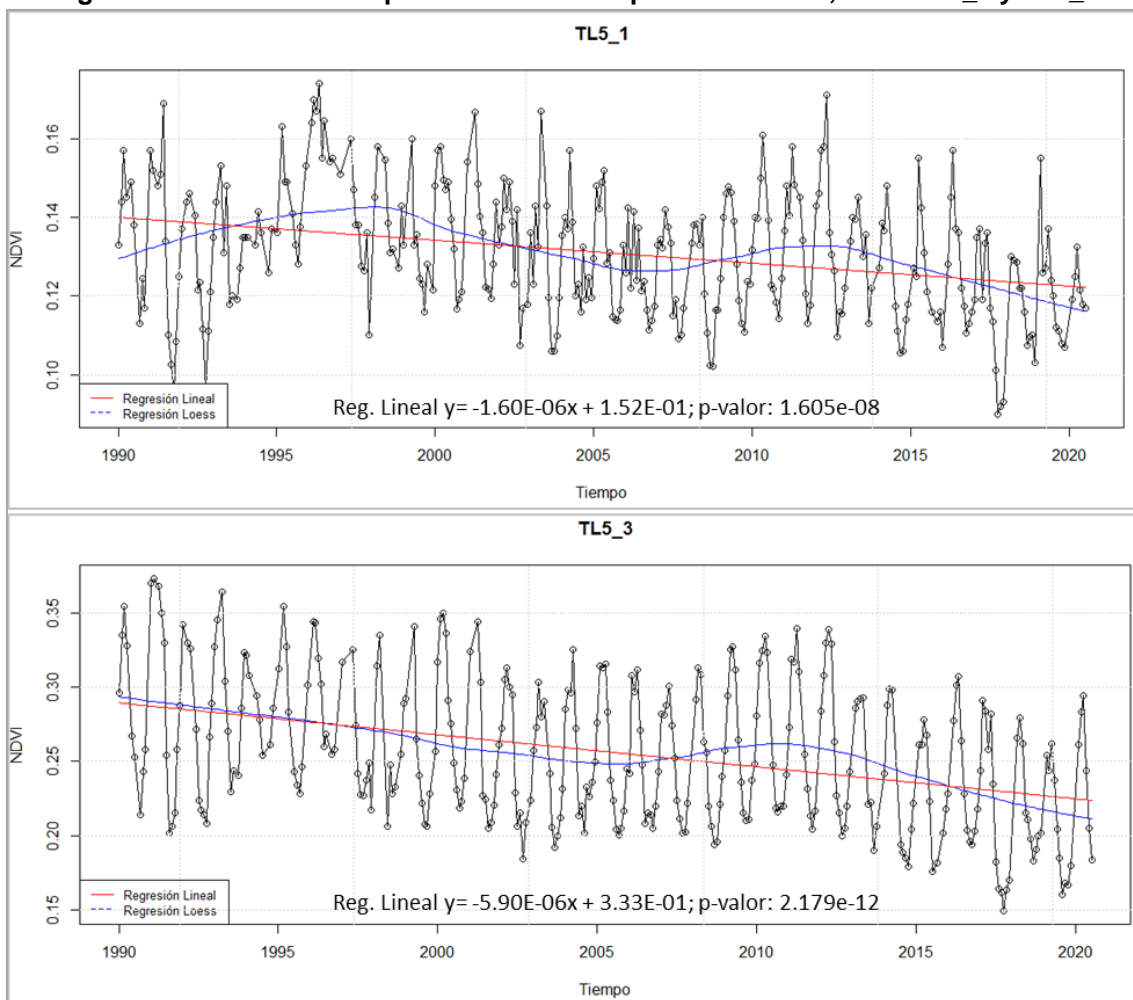
Fuente: Modificado de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 5-20. Serie de Tiempo NDVI 1990-2020 para Humedal 4, Zona TL4_1



Fuente: Modificado de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 5-21. Serie de Tiempo NDVI 1990-2020 para Humedal 5, Zona TL5_1 y TL5_3



Fuente: Modificado de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

5.4.3 Análisis Comparativo de la Evolución del NDVI en Humedales TL1, TL2 y TL3.

De acuerdo a lo descrito en el acápite 5.4.1, del análisis de largo plazo (1990-2020) de las series de tiempo de NDVI en los 5 humedales estudiados, se observa una tendencia generalizada al descenso del NDVI (pendiente negativa en 11 de los 12 polígonos), siendo dicha tendencia estadísticamente significativa en 9 de los 12 zonas en las cuales se han clasificado los humedales de interés. Lo anterior indica una tendencia en el largo plazo a una menor vigorosidad.

Adicionalmente, dichos resultados muestran que las zonas en las que se da la mayor variabilidad (de corto y largo plazo) en el NDVI corresponden a las asociadas a la vegetación con mayor vigor (TL1_5, TL2_5 y TL3_5). Esto se analiza con mayor detalle en el siguiente capítulo del informe, en el acápite 6.2, asociado al efecto de las prácticas culturales en la vegetación. Al respecto, cabe destacar que la vegetación dominante en esas zonas coincide con la de mayor sensibilidad a cambios en la disponibilidad hídrica de las aguas, lo que es descrito y analizado con mayor detalle más adelante, en el acápite 6.3.1.

La Figura 5-22 muestra la evolución temporal del NDVI en los tres polígonos indicados, en donde se puede apreciar que la dinámica del NDVI de cada polígono es diferente.

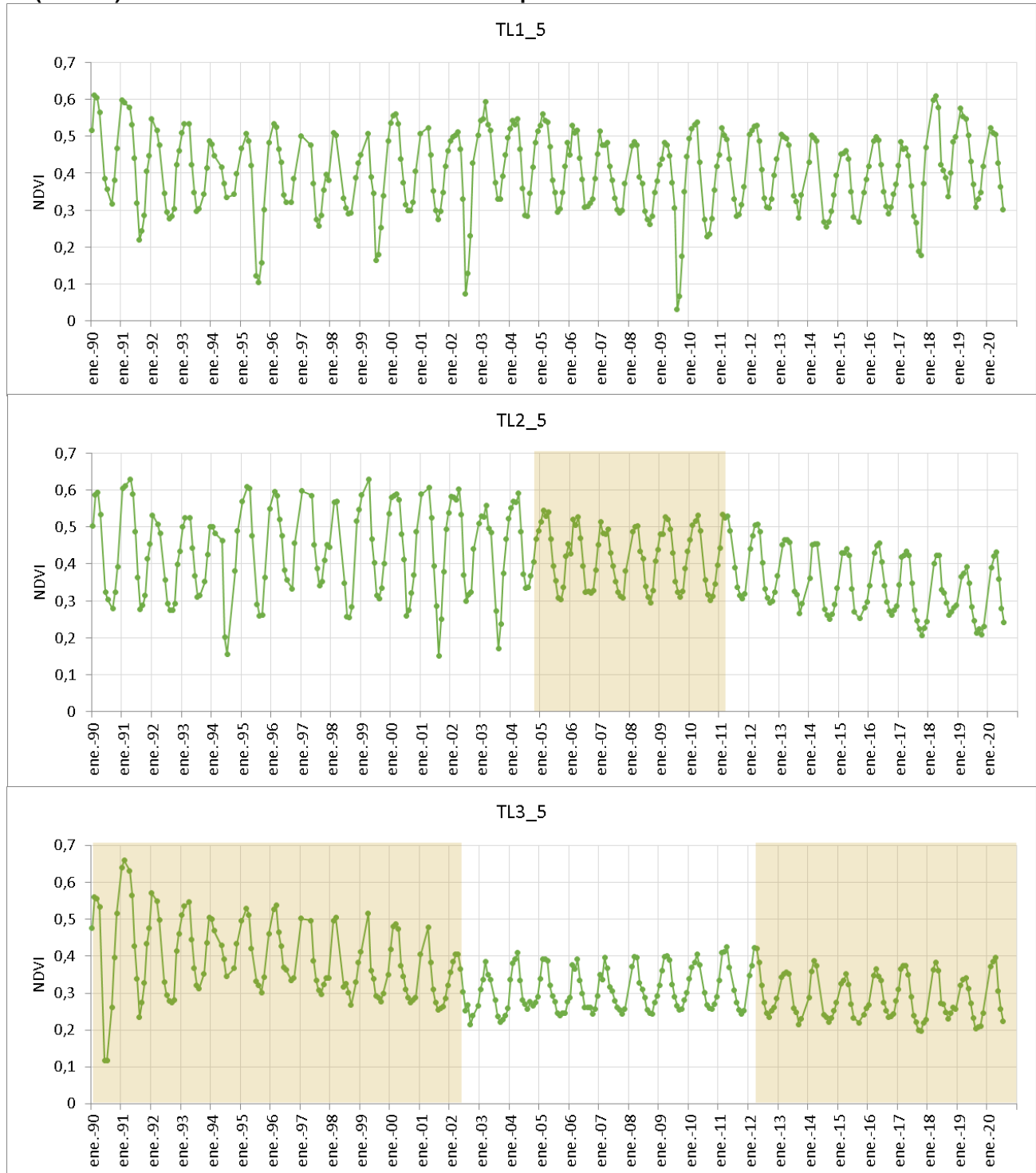
En el caso del humedal TL1_5, en una mirada de largo plazo, es decir considerando la evolución de toda la data (1990-2020), se puede apreciar que el NDVI muestra en general una tendencia estable en el tiempo, correspondiendo a uno de los tres polígonos estudiados que no presenta una tendencia al descenso con significancia estadística. Dentro de esta tendencia estable del NDVI, se identificaron diferentes períodos de hasta 5 años consecutivos, en los que disminuyó de forma consistente (por ejemplo, entre 2003 y 2009), seguidos de un año en que se generó un incremento abrupto, para retomar posteriormente la tendencia descendente. Esta dinámica particular se describe en detalle y analiza en el acápite 6.2.

Para el humedal TL2_5 se presenta un primer período (1990-2004), con alzas y descensos del NDVI máximo anual, con estos registros variando entre 0,55 y 0,6 normalmente. En un segundo periodo, 2005-2011 (pintado en color café), se observa un descenso del NDVI máximo anual respecto al período anterior, a valores del orden de 0,5, presentando un aparente equilibrio y una tendencia relativamente estable, con un leve descenso del NDVI máximo entre 2005 y 2008 y un posterior leve ascenso entre 2008 y 2011. En un tercer periodo, desde 2011 en adelante, se observa una tendencia decreciente del NDVI, alcanzando un valor mínimo del orden de 0,4. En el siguiente Capítulo se analiza con mayor detalle la dinámica indicada.

Respecto al humedal TL3_5, se distinguen tres períodos. En el primero se alcanzó un valor máximo de NDVI el año 1991, indicador que posteriormente, entre 1992 y 2002, presentó una tendencia decreciente, variando los valores máximos anuales desde valores del orden de 0,6 hasta 0,4. En dicho período se produjo gran parte del descenso del NDVI máximo del humedal para el período de análisis. Este último valor (0,4) se mantuvo con relativa estabilidad en el período 2003 - 2012. Con posterioridad al 2012, los registros máximos anuales del NDVI han mostrado una mayor irregularidad, con valores inferiores a 0,4 y una tendencia levemente decreciente en los valores mínimos. En el siguiente Capítulo se analiza con mayor detalle la dinámica indicada.

En resumen, para el período 1990-2020, de la evolución de largo plazo de los valores máximos del NDVI en las unidades de mayor vigor en los 3 humedales, se puede decir en general que: TL1 se presenta estable, TL2 muestra una tendencia a la baja desde 2011 a la fecha, y TL3 presenta dos periodos en que se observa tendencia a la baja de los NDVI máximos (1991-2002 y 2012-2020). Así, para las zonas de mayor vigor es posible decir que, en términos generales, en 2 de los 3 humedales se evidencia una tendencia al descenso.

Figura 5-22. Variación temporal de NDVI en humedales TL1_5 (superior), TL2_5 (centro) y TL3_5 (inferior). Cuadrantes de color indican distintos periodos con diferentes tendencias observadas.



Fuente: Elaboración propia a partir de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

6 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS INTEGRADO

Considerando los análisis previos desarrollados, en particular la información de las extracciones existentes en el área y su entorno (Capítulo 3), el análisis de las variables hídricas (Capítulo 4) y la caracterización de la vegetación existente en el humedal de Tilopozo (Capítulo 5), en donde se incluye análisis de NDVI e información de transectas (riqueza y cobertura), en la presente sección, se desarrolla el análisis integrado de la información descrita y estudiada en las secciones previas. Este análisis abarca los cambios temporales de la vigorosidad de la vegetación, a través del índice NDVI, en distintas escalas de tiempo (corto – mediano y largo plazo) y su relación con variables externas que se pudieran relacionar con esta, correspondientes a prácticas culturales y cambios en la disponibilidad hídrica. Esto último, se desarrolla principalmente a través de relaciones y regresiones entre las variables y el NDVI y considerando la experiencia del equipo consultor en otros sistemas azonales a lo largo del país.

6.1 Aspectos Generales

De acuerdo a Ahumada y Faúndez (2009), el funcionamiento de los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres (SVAHT) depende de la interacción de variables bióticas y abióticas, según se muestra en la Figura 6-1. En el esquema propuesto, destaca como principal componente la presencia de un acuífero cercano a la superficie del terreno, el que determina la presencia de vegetación azonal hídrica y que manifiesta variaciones inter e intra anuales producto de las variaciones climáticas propias de los cambios de estación y de los ciclos climáticos que se presentan en un período de años. Esta variabilidad se expresa en diferencias de humedad en el perfil de suelo y en los niveles de déficit hídrico, lo que condiciona un balance hídrico negativo en ciertos períodos del año que se expresa como afloramiento salino.

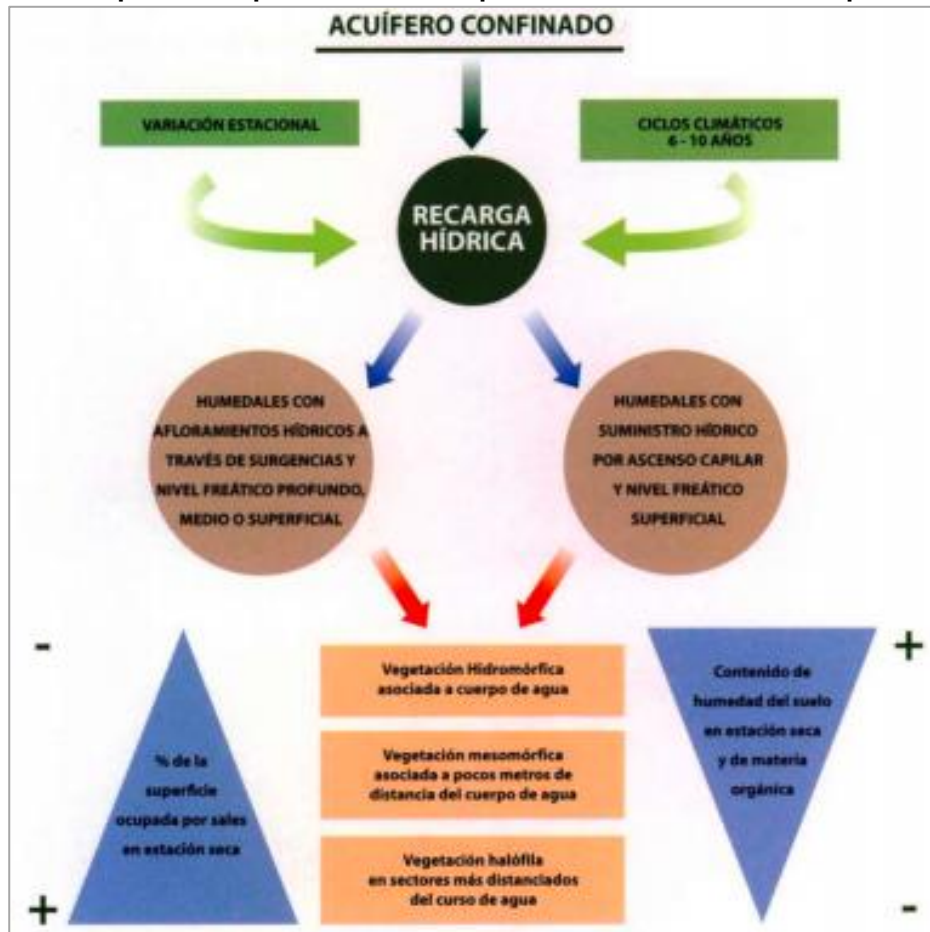
De acuerdo a Ahumada y Faúndez (2009), es necesario destacar que los SVAHT son sistemas muy dependientes de los niveles freáticos y de los aportes de precipitaciones, que funcionan dentro de un nivel de equilibrio relativo. Esto se refleja en el hecho de que en años lluviosos estos sistemas se recuperan para luego mantener los niveles basales y óptimos de funcionamiento en aquellos años con índices de aridez extrema, debido a la existencia de mecanismos de regulación interna, es decir, una capacidad de resiliencia que permite mantener el sistema activo, pese a condiciones extremas.

En el contexto de la extracción de recursos hídricos subterráneos, uno de los efectos esperables es la disminución del nivel freático en el entorno inmediato de los pozos de extracción, así como la propagación del cono de depresión hacia sectores más alejados. Desde el punto de vista de la vegetación, este efecto puede comprometer a los SVAHT, los cuales dependen de la disponibilidad de aguas subterráneas para su subsistencia.

Soto y colaboradores (2019) generaron un modelo predictivo de la cobertura anual de la vegetación en Tilopozo. Los principales factores forzantes identificados en dicho estudio correspondieron a la precipitación, profundidad del nivel freático en pozos ubicados en el entorno de los humedales (TP-2 y TPZ-2C) y a la EVT.

Es importante tener presente que, aunque la cobertura y el NDVI pueden ser utilizados como indicadores de la evolución de la vegetación, estos no son términos equivalentes. Dado que el NDVI da cuenta del vigor de la vegetación, es posible tener variaciones de este, sin cambios en la cobertura. Incluso, podría darse el caso de una disminución del NDVI y un aumento de la cobertura en la vegetación.

Figura 6-1. Componentes que determinan la presencia de los diferentes tipos de SVAHT.



Fuente: Ahumada y Faúndez, 2009.

Otros factores que podrían condicionar el estado de la vegetación, no indicados en Soto y col. (2019), corresponden a las características del suelo (estructura, salinidad, contenido de nutrientes, entre otros), y la calidad del agua, en particular la concentración de sales disueltas, por cuanto esta puede afectar directamente a la vegetación, o alterar las características del suelo.

Por otra parte, las prácticas culturales que desarrollan las comunidades locales en humedales, corresponden a distintas técnicas de manejo de los mismos. De acuerdo a lo señalado por MEL en la Línea de Base de Medio Humano del Proyecto Monturaqui (2019), la agricultura y la ganadería son reconocidas como prácticas productivas históricas realizadas por la comunidad de Peine, donde se ha reconocido a Tilopozo como centro forrajero. Dicho estudio señala que la tenencia de ganado en Tilopozo disminuyó progresivamente debido a la escasez de pastos en el territorio. Al respecto, en los humedales de Tilopozo se desarrollan quemados en los humedales, posterior a las cuales se ha verificado que existe un rápido rebrote de la vegetación, la cual presenta un mayor vigor respecto a la situación previa a la quema, lo que se discute en el acápite 6.2. De esta forma, podría inferirse que las quemados detectadas mediante el análisis de imágenes satelitales, serían realizadas para inducir una renovación del forraje utilizado para el pastoreo.

Para efectos de este informe, se ha evaluado la dinámica de la vegetación en los últimos 30 años, considerando los factores que tienen relación/efectos sobre la vegetación, los cuales pueden ser de origen

antrópico, tales como las quemas, las extracciones de agua, o de origen natural, tales como la precipitación o las condiciones climáticas.

Para el análisis de la dinámica de la vegetación, y de acuerdo a la extensión del análisis, se ha considerado como principal indicador su vigorosidad, caracterizada por el NDVI, ya que corresponde al indicador con la mayor disponibilidad temporal de información existente, lográndose abarcar el periodo previo a la explotación del acuífero MNT. Adicionalmente, y en función de la información disponible, se han incluido los registros de riqueza y cobertura de las transectas ubicadas en el humedal de Tilopozo. El análisis de los cambios en la vegetación ha sido diferenciado entre el corto y el largo plazo. En relación al análisis de los factores externos y su potencial influencia en la vegetación del humedal, en primer lugar (acápite 6.2) se evalúa el efecto de las prácticas culturales, en particular las quemas, y con posterioridad (acápite 6.3) se analiza el efecto de la disponibilidad hídrica. Para este caso, de acuerdo a la información disponible y en concordancia con Ahumada y Faúndez (2009), se han considerado para la evaluación las variables precipitación y nivel freático (profundidad del agua y cota piezométrica).

De acuerdo a lo señalado, existen variables hídricas no consideradas para el análisis. Se destacan las siguientes, indicándose la razón de su no uso:

- La evapotranspiración (EVT), si bien se cuenta con puntos de medición en la zona marginal, éstos no resultan representativos del proceso dentro de los humedales y, además, los registros disponibles son acotados en el tiempo (2013-2019), lo que no permiten realizar análisis de largo plazo.
- En cuanto a la calidad del agua, en particular la salinidad, sólo se cuenta con una serie de tiempo en un punto de monitoreo superficial en el humedal de Tilopozo, el cual fue presentado en el numeral 4.3 de este documento. La información de este punto, no muestra cambios significativos en el período 1996-2016, por lo que no es una variable que aporte información para el análisis que se lleva a cabo.

Finalmente, y de acuerdo a lo descrito en el acápite 5.4.3, se debe destacar que para el análisis se han considerado los polígonos de mayor vigorosidad (TL1_5, TL2_5 y TL3_5), como representativos y característicos del humedal de Tilopozo, para el estudio de la respuesta que ha presentado la vegetación, frente a cambios en los factores externos analizados (prácticas culturales y disponibilidad hídrica).

6.2 Prácticas Culturales: Quemadas de la Vegetación

Como antecedente, se tiene que las vegas altoandinas son manejadas por las culturas andinas con el fin de incrementar su extensión y producción forrajera. Si bien los pueblos andinos han manejado las vegas por milenios, regulando su humectación y promoviendo la ampliación de sus parches y su productividad, la Puna seca y desértica del Norte de Chile y noroeste de Argentina, ha sufrido un drástico despoblamiento, muy acentuado en las últimas décadas. Este proceso también ha tenido su impacto sobre los humedales ancestralmente manejados dado que la suspensión de este manejo ha generado desecamiento y pérdida de superficies de vegas (Amaya y col., 2019).

En el caso particular de la quema de vegas y bofedales altoandinos, se trata de una práctica cultural que está documentada en la literatura, particularmente en Perú, como parte de las técnicas de manejo que las comunidades locales aplican sobre la vegetación. En el caso de Chile, Villagrán y col. (2003), reportan en las quebradas altas del Loa superior la existencia de quemadas en vegas, las que probablemente constituyan una

técnica para la renovación de la vegetación y mejoramiento de la visibilidad. Otros autores indican que las quemas corresponden a una técnica para el control de malezas (ICMM, 2006).

6.2.1 Identificación de Incendios Mediante Imágenes Satelitales

Del análisis de series de tiempo de NDVI y la supervisión de las imágenes satelitales, se pudo observar la existencia de eventos de incendios y/o quemas de la vegetación (ver Figura 6-5, en acápite 6.2.2). En las imágenes de falso color infrarrojo, la pérdida abrupta de vegetación se identifica por el cambio de color de vegetación activa (color rojo) a biomasa combustionada (color negro). En el período de estudio, se contabilizaron al menos 22 incendios de diversa extensión ocurridos en los humedales Tilopozo N°1 (TL1), Tilopozo N°2 (TL2) y Tilopozo N°3 (TL3), los que están identificados en la Tabla 6-1. De manera complementaria, desde la Figura 6-2 a la Figura 6-4, se muestran imágenes en color infrarrojo de los 10 eventos más severos (destacados en gris en la Tabla 6-1), en las cuales se vio afectada un área significativa de cada humedal. Cabe señalar que en los humedales Tilopozo N°4 (TL4) y Tilopozo N°5 (TL5) no se observaron incendios y/o quemas.

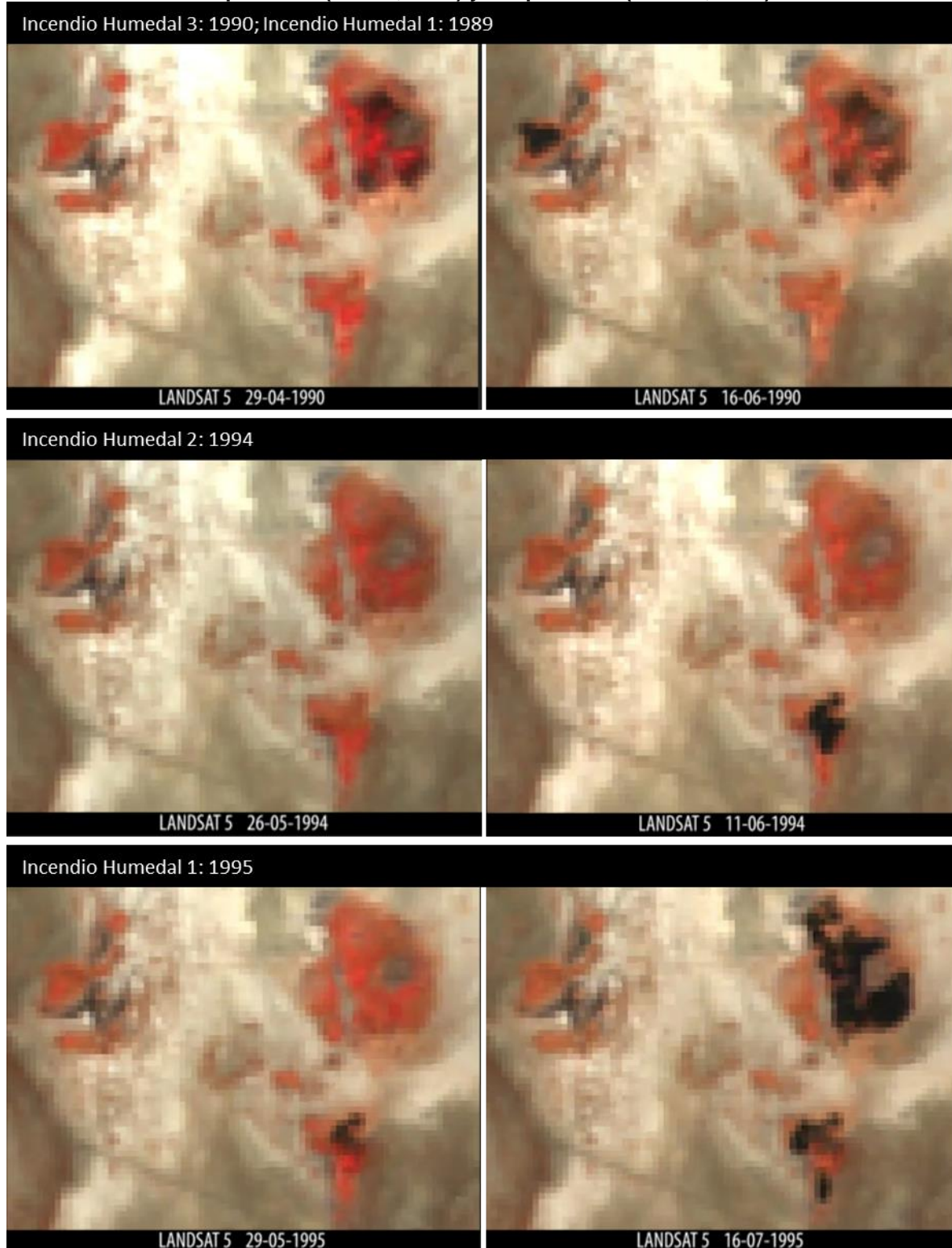
Tabla 6-1 Resumen de incendios identificados en Humedal Tilopozo entre 1990 y 2020

Año	Tilopozo N°1 (TL1)	Tilopozo N°2 (TL2)	Tilopozo N°3 (TL3)
1990	*presenta quema 1989		16-06-90
1991	21-07-91	21-07-91	
1994		11-06-94	
1995	16-07-95	16-07-95	
1996		03-08-96	
1997	21-07-97		
1998		08-07-98 / 10-09-98	
1999	11-07-99	11-07-99 / 27-07-99	
2000		01-07-00	
2001		24-07-01	
2002	27-07-02		
2003		22-07-03	
2004	16-07-04		
2009	07-08-09		
2017	22-09-17		
2018	09-09-18		

Fuente: Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

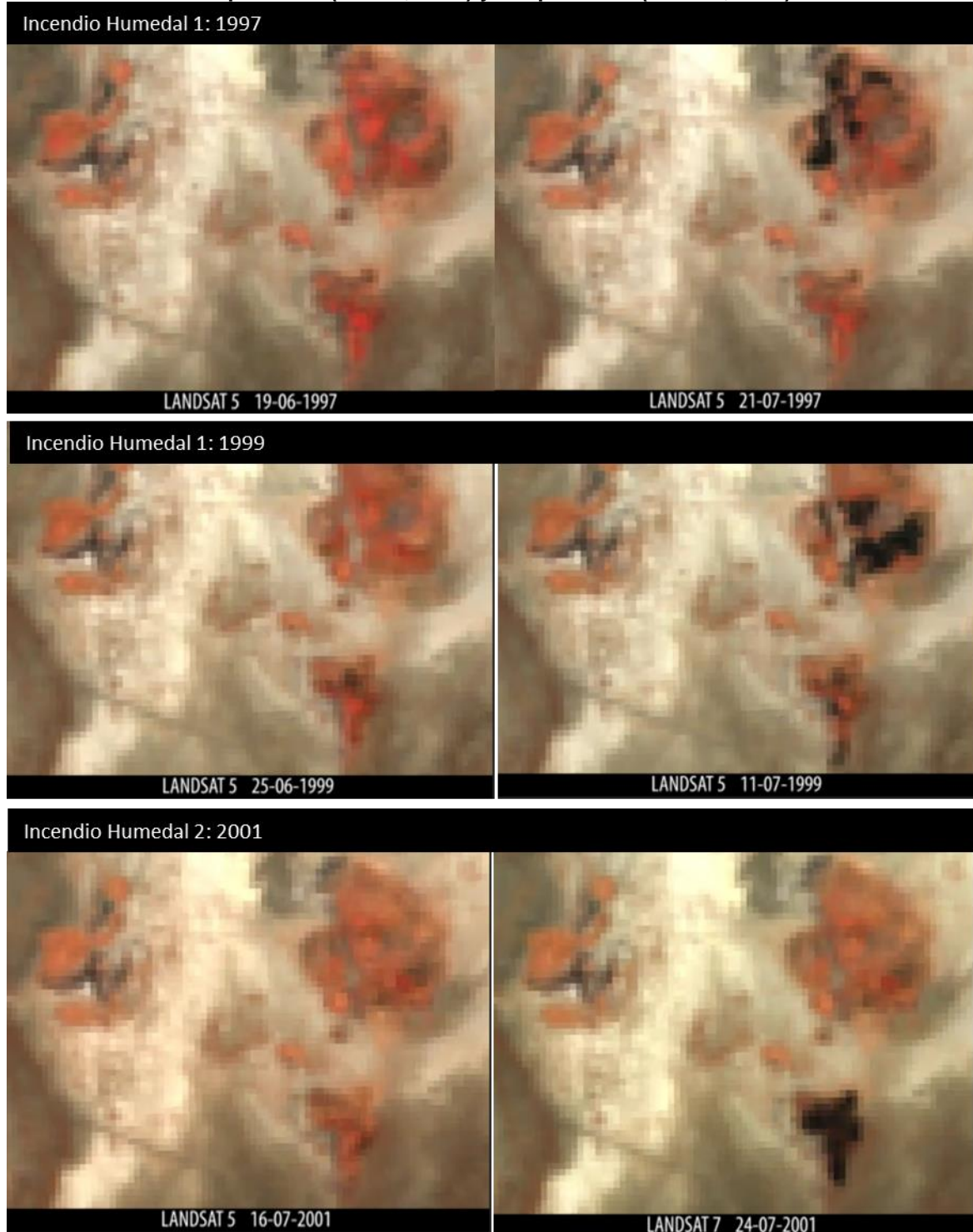
De las fechas indicadas en la Tabla 6-1, se puede afirmar que las quemas normalmente son realizadas en el período invernal, aunque se ha verificado que en los últimos eventos (2009, 2017 y 2018) se han desplazado desde junio – julio, a agosto – septiembre.

Figura 6-2. Comparación antes y después de incendio, Humedal Tilopozo N°3 (superior, 1990), Tilopozo N°2 (centro, 1994) y Tilopozo N°1 (inferior, 1995).



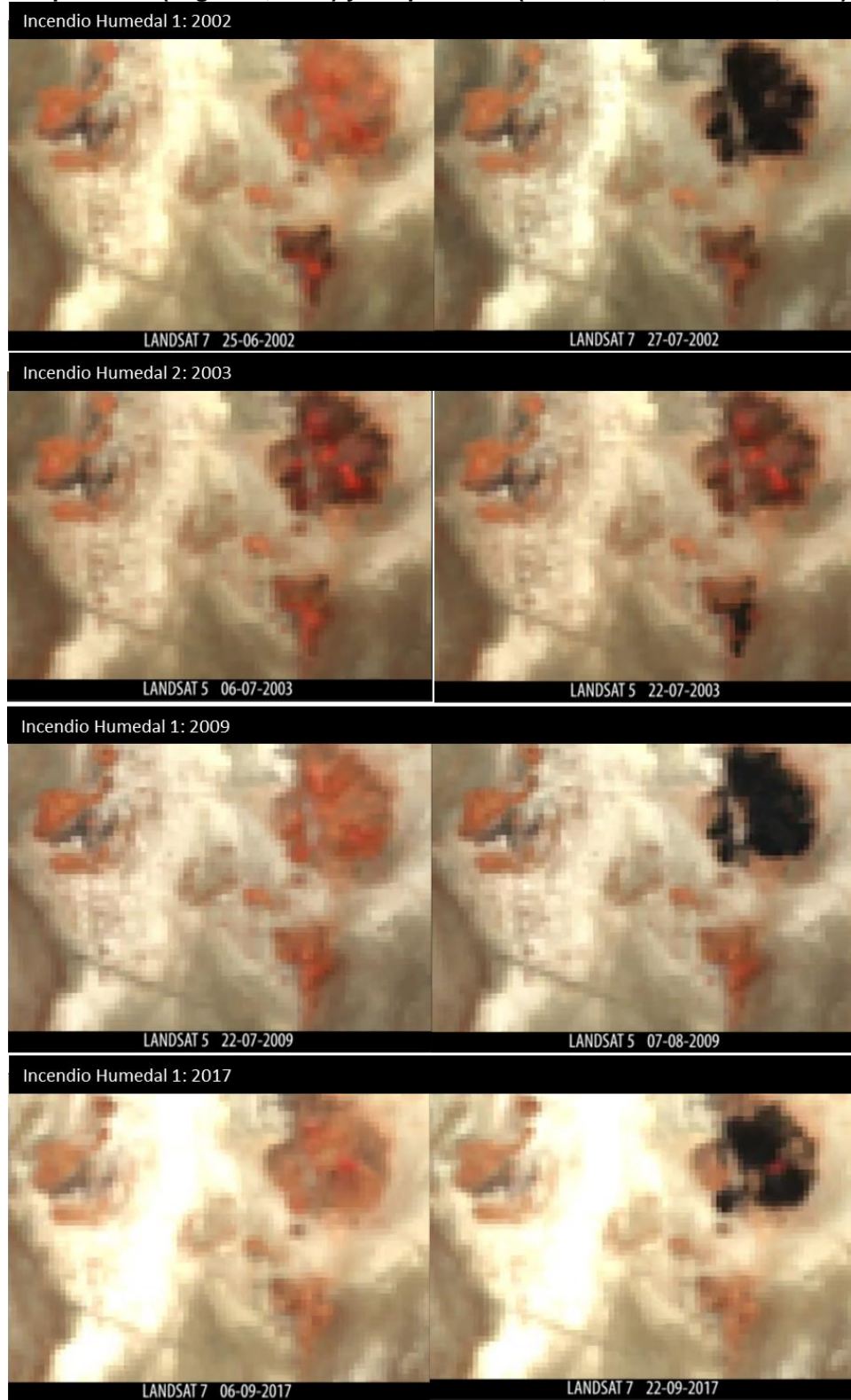
Fuente: Modificado de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 6-3. Comparación antes y después de incendio, Humedal Tilopozo N°1 (superior, 1997), Tilopozo N°1 (centro, 1999) y Tilopozo N°2 (inferior, 2001).



Fuente: Modificado de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 6-4. Comparación antes y después de incendio, Humedal Tilopozo N°1 (superior, 2002), Tilopozo N°2 (segunda, 2003) y Tilopozo N°1 (tercera, 2009 e inferior, 2017).



Fuente: Modificado de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

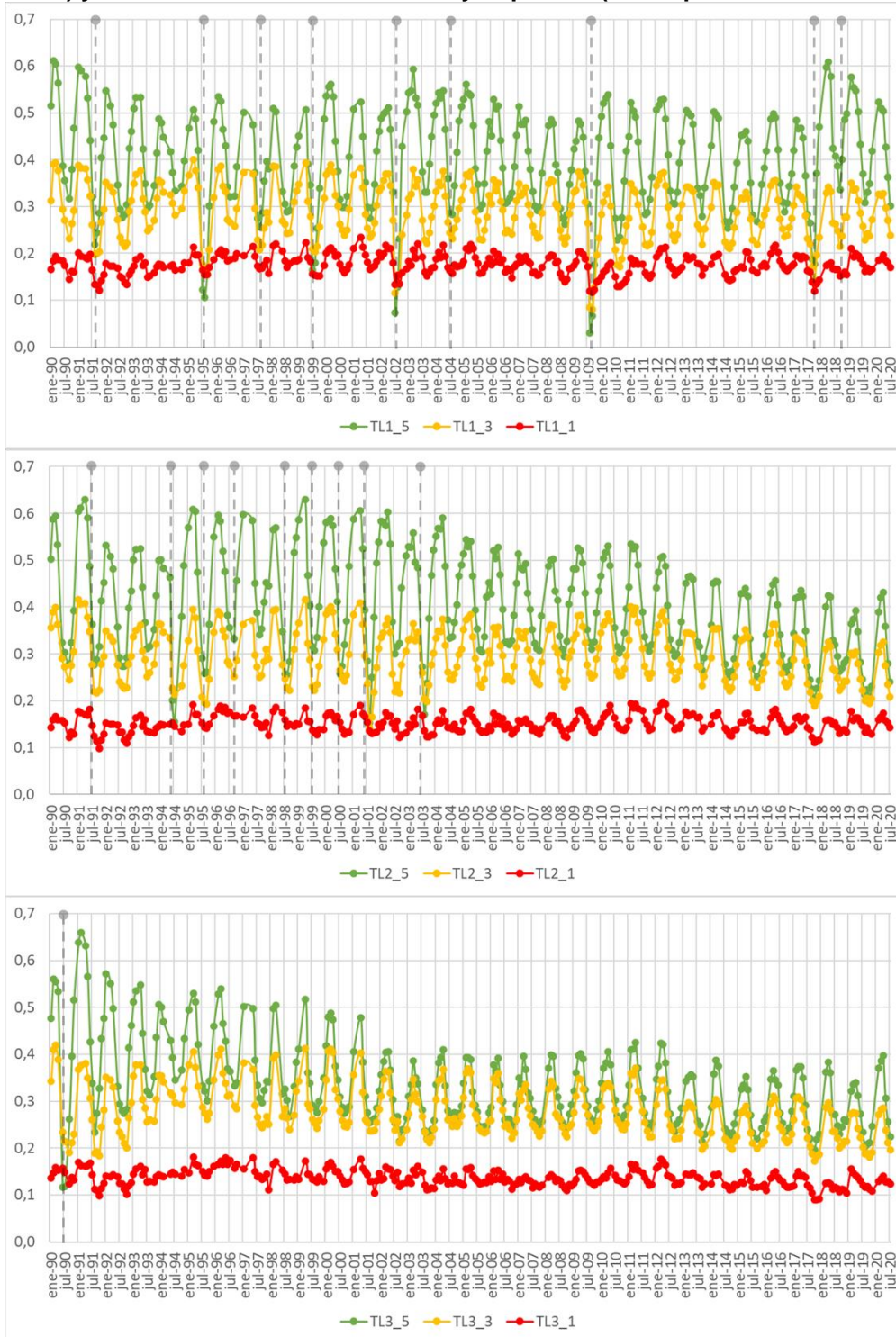
6.2.2 Análisis Detallado de Eventos de Incendios y/o Quemados en Humedales y Relación con NDVI

La Figura 6-5 muestra la variación del NDVI en los humedales Tilopozo N° 1 (TL1), Tilopozo N° 2 (TL2) y Tilopozo N° 3 (TL3), incorporando los eventos de quema identificados en la Tabla 6-1, mediante líneas grises verticales. Se puede observar que los eventos de incendio y/o quemados ocurrieron en distintos períodos y con diferentes frecuencias en los tres humedales. En particular, Tilopozo N°1 (TL1) tuvo 9 incendios entre 1991 y 2018, Tilopozo N°2 (TL2) tuvo también 9 incendios, pero concentrados entre 1991 y 2003, en tanto que Tilopozo N°3 (TL3) sólo mostró un evento en 1990. De acuerdo al análisis de los gráficos se observa que en general, tras los eventos de quemados se genera un aumento del índice NDVI post-incendio, lo que puede estar relacionado al rebrote y crecimiento de biomasa vegetal. Análisis en detalle de algunos eventos de quema para los tres humedales se muestran en la Figura 6-6 a la Figura 6-8.

En términos generales, se observa que inmediatamente luego de los eventos de quema, que normalmente han sido realizadas en el período de invierno, las zonas del humedal afectadas por incendios presentan valores promedio de NDVI muy bajos (entre 0,1 y 0,2) que se asocian a la quema de vegetación. Sin embargo, en el verano/otoño siguiente estos valores se recuperan de manera considerable, alcanzando valores máximos que en general son superiores a los del período previo. En algunos casos, la quema de vegetación puede afectar a las zonas de vigor en forma diferencial. Como ejemplo de esto, se observa en la Figura 6-8 que el índice NDVI de la Zona 5 de mayor vigor del Humedal TL3, toma valores incluso por debajo de las otras dos zonas (Zona 1 y Zona 3), mostrando en ese caso que el incendio tuvo mayor impacto en la zona de alta vigorosidad.

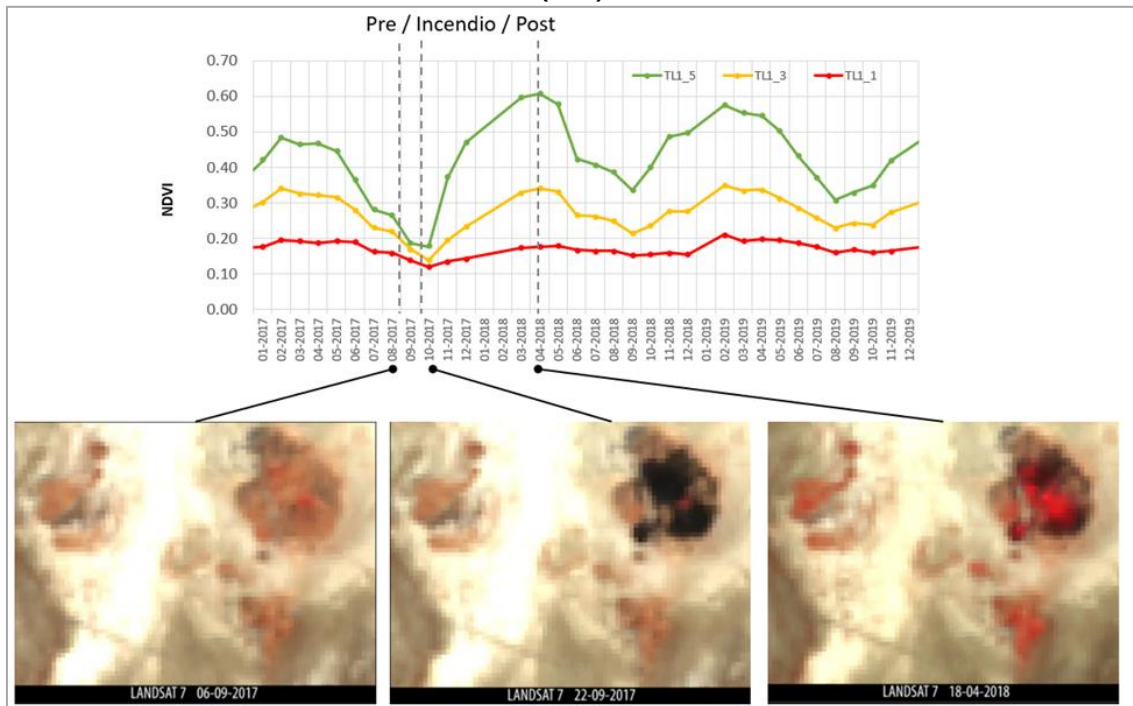
En general, la zona de mayor recuperación de vigorosidad post-incendio se observa en áreas asociadas a los polígonos de Zona 5, y en menor medida en las zonas periféricas (Zona 1). Se aprecia que la dinámica de incendio y recuperación, tiene un grado importante de sincronización con la variabilidad estacional del humedal. Por un lado, los incendios se dan en invierno (preferentemente en el mes de julio) que corresponde a época de menor vigor, y, por otro lado, el máximo de recuperación se da en términos generales, entre 6 a 9 meses más tarde, durante la época de máximo vigor a fines de verano y/o principio de otoño.

Figura 6-5. Serie de tiempo NDVI para Humedales en Tilopozo TL1 (superior), TL2 (centro) y TL3 (inferior) y eventos asociados a incendios y/o quemas (líneas punteadas verticales).



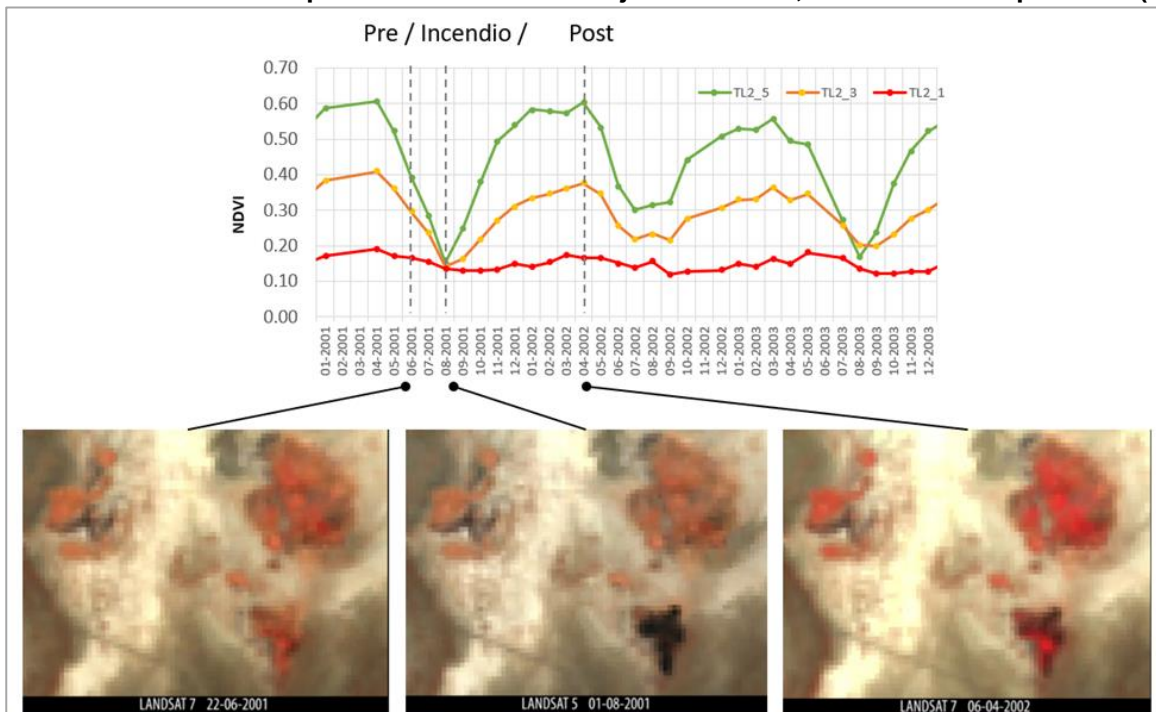
Fuente: Modificado de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 6-6. Detalle de NDVI para evento de incendio septiembre año 2017, en Humedal Tilopozo N°1 (TL1).

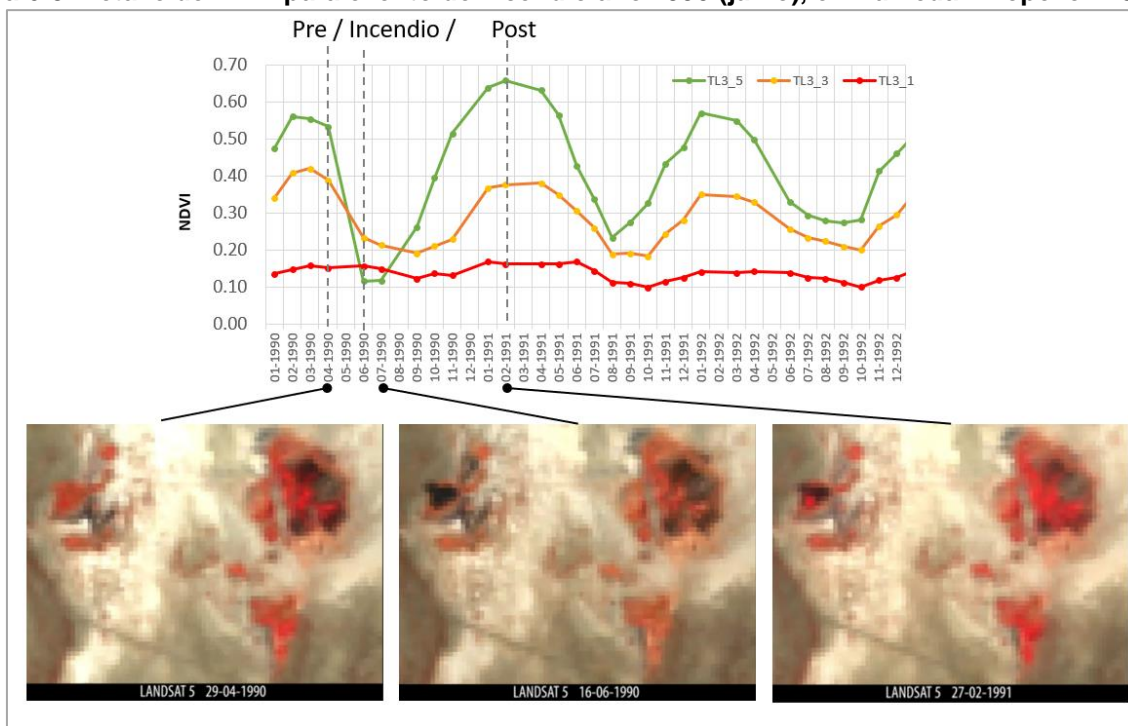


Fuente: Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 6-7. Detalle de NDVI para evento de incendio julio año 2001, en Humedal Tilopozo N°2 (TL2).



Fuente: Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Figura 6-8. Detalle de NDVI para evento de incendio año 1990 (junio), en Humedal Tilopozo N°3 (TL3).

Fuente: Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1).

Con el objeto de analizar la respuesta de un sistema vegetacional del humedal de Tilopozo frente a una quema, se ha optado por diferenciar entre la respuesta en el corto y mediano plazo, entendiendo por corto plazo el año siguiente al evento de quema y por mediano plazo los siguientes 2-5 años, que en algunos casos ha correspondido al tiempo existente entre quemas. En cuanto al largo plazo, se entiende por este un período superior a 10 años.

En el acápite 6.2.2.1 se analizan los efectos de corto y mediano plazo. En el acápite 6.2.2.2 se describe la variación de la serie de NDVI en el largo plazo y su relación con las quemas.

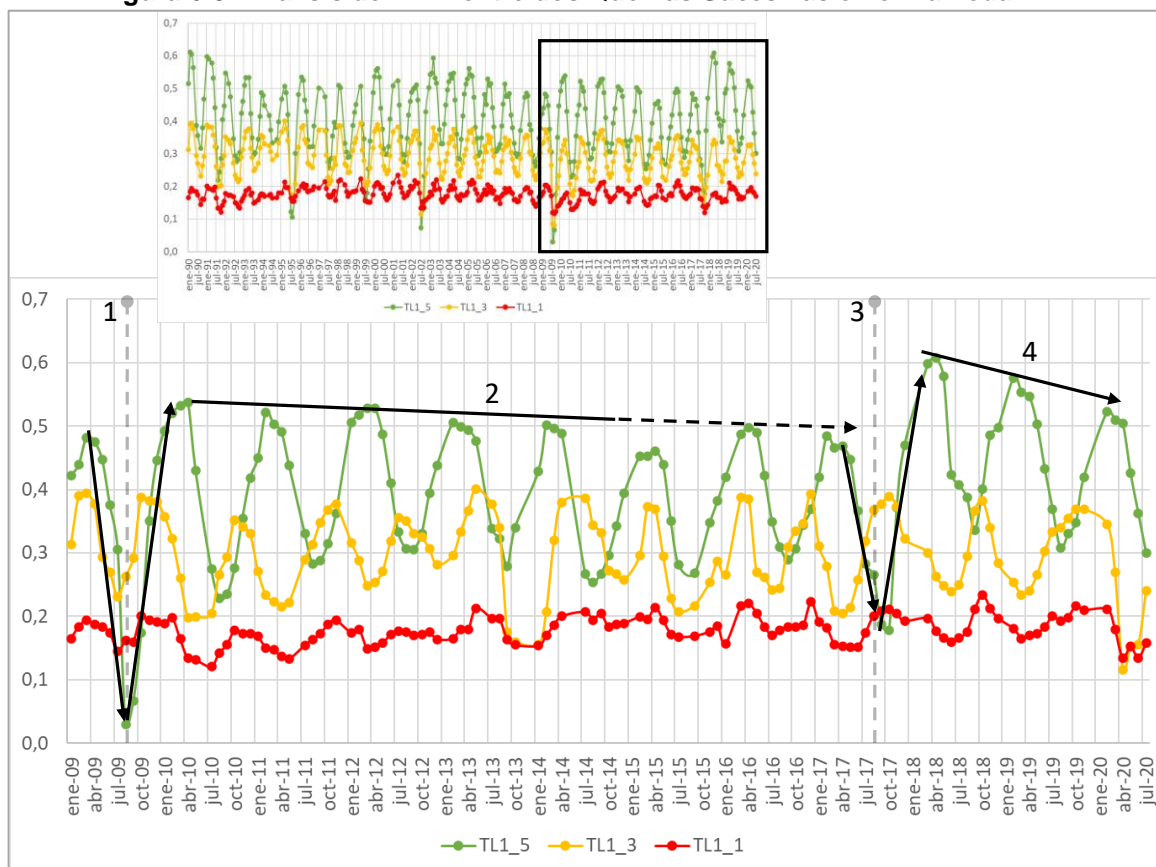
6.2.2.1 Análisis de Corto y Mediano Plazo

Para desarrollar el análisis de corto y mediano plazo, se han considerado dos enfoques complementarios, los cuales permiten evaluar la evolución de la vegetación en las diferentes escalas temporales.

- Se describe y detalla la evolución del NDVI del humedal TL1 para un período de tiempo acotado (enero 2009 a julio de 2020), que incluye dos eventos de quema, en agosto de 2009 y julio de 2017 (Figura 6-9).
- Se analiza el comportamiento que ha tenido la vegetación frente a eventos de quema en los humedales de Tilopozo, en base a registros de terreno. Estos registros provienen del seguimiento ambiental llevado a cabo por Albemarle en el marco de la RCA N°21/2016, el cual considera 10 transectas de vegetación en el sector Tilopozo, las que se muestran en la Figura 5-9. En particular, dos de estas transectas se ubican en el Humedal N°1 (TL1), y corresponden a T19 y T29, en las cuales se registra la riqueza y cobertura de especies, además de registros fotográficos de cada

campaña. El seguimiento iniciado desde el año 2016, permitió captar registros del incendio que afectó al Humedal N°1 (TL1) en julio del año 2017.

Figura 6-9. Análisis de NDVI entre dos Quemas Sucesivas en el Humedal TL1.



Fuente: Elaboración propia a partir de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1)

En la Figura 6-9 se identifican cuatro hitos/periodos en la zona TL1_5 (NDVI alto), que se describen a continuación:

(1) La ocurrencia de las quemas de agosto del año 2009, inciden en una baja significativa e inmediata del valor de NDVI, pasando de un valor de 0,48 en marzo 2009 a 0,03 en agosto de 2009. En este período se produce además una baja en la cobertura de la vegetación, al encontrarse esta quemada. Esta baja, producto del incendio, se recupera a un valor de NDVI de 0,54 en abril de 2010 (recuperación en 8 meses), valor que supera al registro máximo de NDVI del verano anterior (**efecto de corto plazo**).

(2) En el periodo entre ambos incendios identificados (2009-2017), se observa una tendencia a la baja progresiva del valor máximo anual del NDVI. Sin embargo esta baja del NDVI no se da de manera homogénea en todo el período, concentrándose principalmente hasta los años 2013-2015 (esto es representado por una flecha continua en la Figura 6-9, que luego presenta una línea segmentada), luego de lo cual parecen tender a estabilizarse los valores máximos. Al respecto, se considera que se debe desarrollar un estudio particular de la vegetación existente en el humedal, para cuantificar la extensión temporal de este efecto como causa de la quema. Los NDVI mínimos por su parte, se mantienen en un rango relativamente estable, no mostrando la tendencia al descenso que presentan los valores máximos (**efecto de mediano plazo**).

(3) El incendio de julio 2017 tiene un efecto similar al observado en el año 2009, es decir, una baja significativa del NDVI, pasando de 0,48 en febrero de 2017 (pre incendio) a 0,18 en octubre de 2017 (incendio), y luego aumentando a 0,61 en abril de 2018 (post incendio), lo cual representa nuevamente una recuperación de la vigorosidad, en un espacio de tiempo reducido, de 6 meses (**corto plazo**).

(4) Finalmente, para el periodo posterior al incendio en el que se cuenta con registros de imágenes satelitales, se observa nuevamente una tendencia a la baja progresiva del vigor máximo de la vegetación y no así de los valores mínimos (**mediano plazo**).

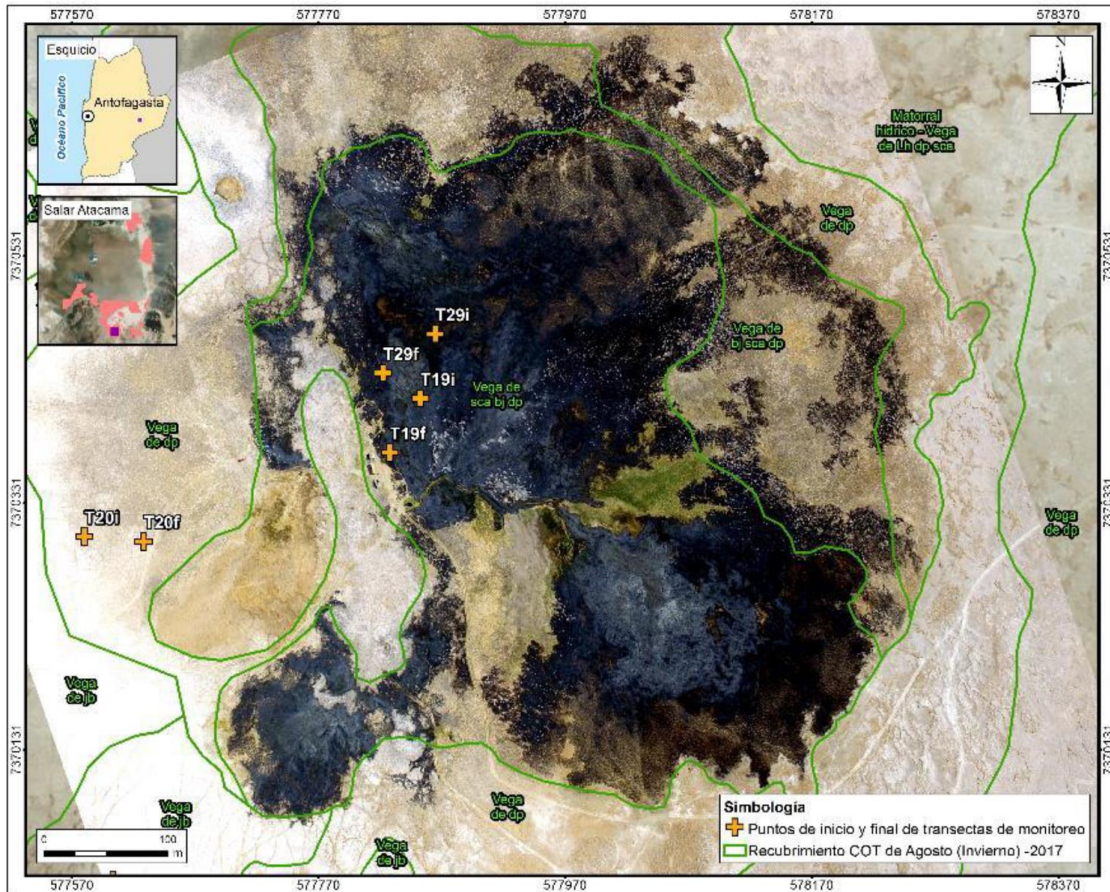
Es importante destacar que esta evolución característica del NDVI asociado a los eventos de quema, con los cuatro hitos/periodos indicados, se repite en la mayoría de los incendios indicados en la Tabla 6-1, en los tres humedales (TL1, TL2 y TL3).

En lo que respecta al análisis de los registros de campo, los días 27 y 28 de septiembre de 2017, Albemarle a través de la empresa Cedrem Consultores, realizó un recorrido de terreno para evaluar los efectos del incendio ocurrido en días previos. Producto de dicha actividad y de acuerdo con el grado de daño visible, se estimó una afectación de 6,73 ha de “vegetación parcialmente afectada” y 16,8 ha de “vegetación severamente afectada”, que en total corresponde a una superficie de 23,53 ha. Cabe indicar que, de las áreas con distintos grados de afectación, la formación vegetacional de *Schoenoplectus californicus*, *Baccharis juncea* y *Distichlis spicata* se afectaron 14,27 ha severamente y 3,26 ha parcialmente, correspondiendo a 70,76% y 16,17% del polígono correspondiente a esta formación vegetacional respectivamente. En tanto la formación de Vega de *Baccharis juncea*, *Schoenoplectus californicus* y *Distichlis spicata*, corresponde a la mayor afectación parcial en términos porcentuales 27,14%.

En la Figura 6-10 se muestra una imagen captada mediante dron, que permite visualizar la magnitud del incendio. Cabe destacar que a partir de la actividad de terreno indicada (ALB-Cedrem, 2017), se constataron los siguientes hallazgos:

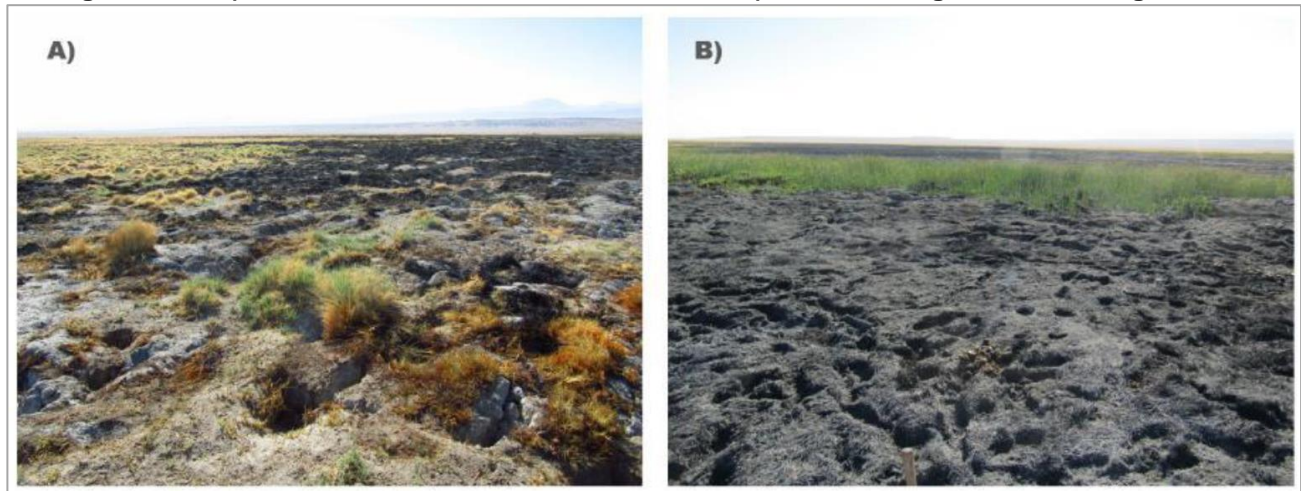
- Se detectó el avance del fuego en forma subterránea (Figura 6-11 A).
- Se observa la aparición de numerosos individuos nuevos de *Schoenoplectus californicus*, *Baccharis juncea* y *Distichlis spicata* en la superficie severamente afectada (Figura 6-11 B).
- Dadas las características observadas del sitio, la existencia de ganado en el sector (burros) y a la infraestructura de crianceros, es muy probable que este incendio corresponda a una técnica de manejo de recursos con el fin de preservar la flora, ya que la práctica de quema de vegas se utiliza para su renovación y mejoramiento de la visibilidad (Villagrán, C. y col., 2003).

Figura 6-10. Imagen RGB obtenida desde Dron a una altura de 500 m, septiembre 2017.



Fuente: ALB-Cedrem, 2017

Figura 6-11. A) Avance subterráneo del incendio T19, B) Renovación general de la vegetación



Fuente: ALB-Cedrem, 2017

Las observaciones de terreno señaladas previamente pueden ser complementadas con los registros fotográficos ahí obtenidos, producto del Plan de Monitoreo Biótico (PMB), el cual cuenta con monitoreos semestrales, en agosto y marzo de cada año, entre 2016 y 2019. En particular, se ha elegido la transecta T19, la cual está ubicada sobre el polígono TL1_5, correspondiente a la zona de mayor NDVI del Humedal N°1. En la Figura 6-12 se muestra la evolución entre 2016 y 2020 del NDVI en TL1_5, junto con los registros fotográficos semestrales en la transecta T19, todos ellos obtenidos en el mismo lugar y orientados en la misma dirección (hacia la majada de Tilopozo). Se ha agregado también un registro de la vegetación quemada en septiembre 2017, obtenido también en la transecta T19.

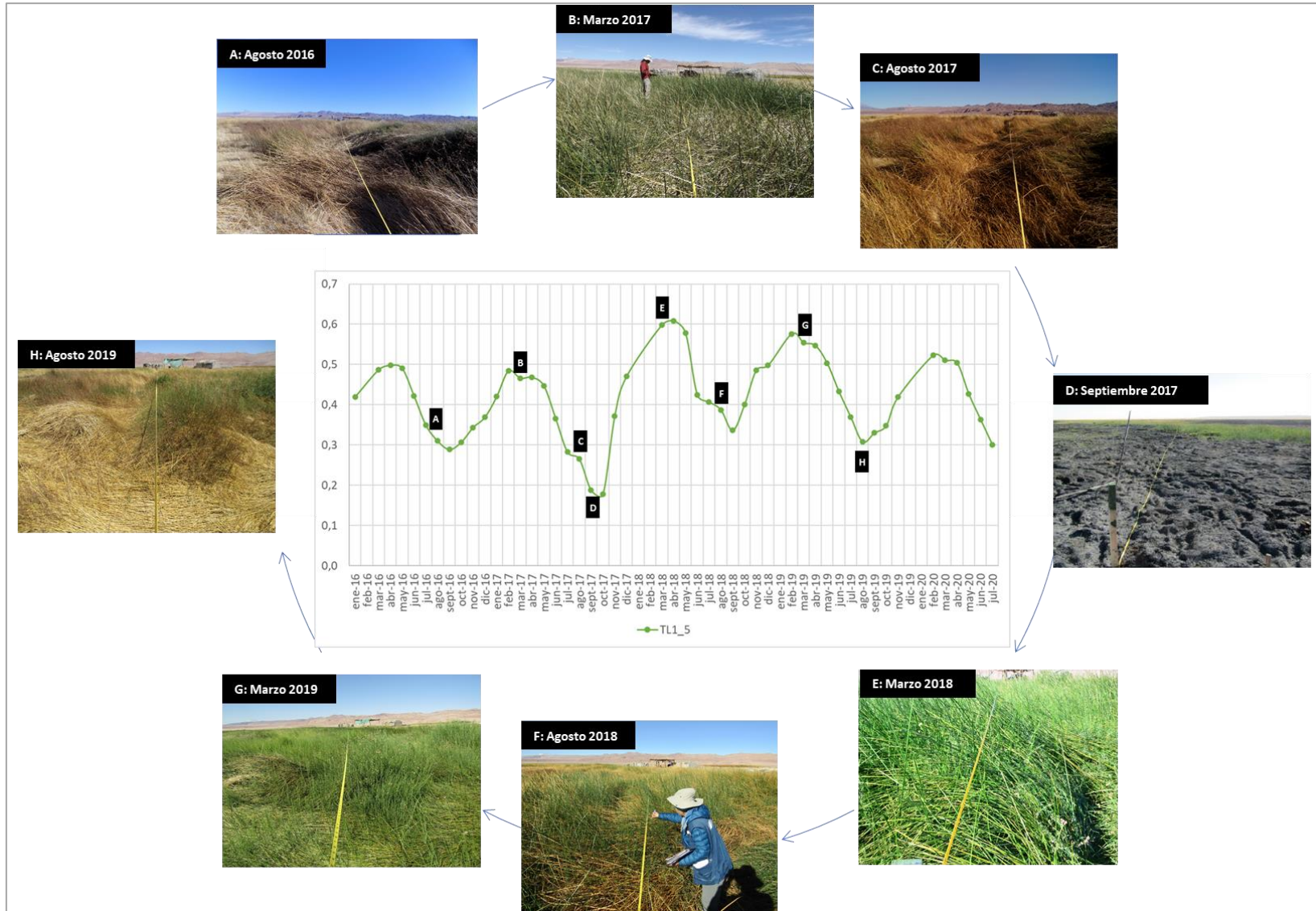
En las fotografías de la Figura 6-12 se observa la evolución de la fisonomía de *Schoenoplectus californicus*, donde se distingue lo siguiente:

- En la campaña de agosto 2016 (Figura 6-12-A), donde se visualiza vegetación densa, de color café e inclinada, posiblemente por efectos del pastoreo.
- En la campaña siguiente, en marzo de 2017 (Figura 6-12-B), se visualiza que la vegetación recupera su verdor, aunque se observa también la existencia de vegetación café en la base de la formación.
- En el siguiente invierno (agosto 2017, Figura 6-12-C), nuevamente se repite el ciclo de baja de vigor de la vegetación, caracterizado por vegetación densa de color café.
- En septiembre de 2017, la quema de la vegetación produce la desaparición de los individuos que antes poblaban con alta densidad la formación vegetacional. Sin embargo, al fondo de la fotografía del 22 de septiembre 2017 (Figura 6-12-D), se aprecia el rápido rebrote de individuos, tan sólo unos días después de ocurrida la quema.
- En el verano siguiente de ocurrido el incendio (marzo 2018, Figura 6-12-E), la vegetación recupera su cobertura, creciendo con un vigor mayor al de los veranos anteriores, lo que se manifiesta en el intenso verdor de su coloración, el que a su vez repercute en un NDVI mayor al de los veranos previos.
- En el siguiente invierno (agosto 2018, Figura 6-12-F), nuevamente se ve una decoloración en la vegetación, propia de su ciclo natural, pero a diferencia de los inviernos previos, se observa que prevalecen varios individuos de coloración verde, lo cual probablemente esté influenciado por el rebrote previo. Este efecto, también se observa en el NDVI de agosto 2018, el cual fue superior al de los inviernos previos. Lo descrito en los últimos puntos dan cuenta de un efecto de **corto plazo** de la quema sobre la vegetación.
- Finalmente, en el último ciclo observado (marzo y agosto 2019, Figura 6-12 G y H respectivamente), se observa una dinámica similar a la de los veranos e inviernos ya descritos.

A partir de lo anterior, es posible indicar que en la zona 5 del Humedal N°1 (TL1_5), se observa una dinámica que está influenciada por el propio ciclo de vida de *Schoenoplectus californicus*, la cual corresponde a la especie dominante de la formación correspondiente, caracterizado por una coloración verde en verano y café en invierno (asociable a mayor NDVI y menor NDVI respectivamente). Como se aprecia en la Figura 6-12, luego de la quema, la renovación de la vegetación por medio de la aparición de nuevos brotes generaría condiciones en los que el NDVI presentaría registros máximos. Posteriormente, existiría un proceso natural de declive de la vegetación, que en las imágenes se puede observar en una

disminución del verdor en veranos consecutivos y que también es captado por la tendencia a la baja del NDVI máximos en los años posteriores a la quema (efecto de **mediano plazo**, Figura 6-9). Esto, se estima, estaría asociado a un proceso natural de la vegetación. Este efecto de declive, luego de alcanzar su máximo vigor debido al rebrote, aparentemente se extendería por algunos años, hasta alcanzarse una condición de estabilidad o equilibrio. Para evaluar y cuantificar la evolución y extensión temporal de este proceso de la vegetación posterior a la quema, se requiere del desarrollo de estudios particulares y específicos asociados a las especies existentes en el humedal de Tilopozo.

Figura 6-12. Registro Fotográfico Transecta TL19, en Humedal TL1_5



Fuente: Elaboración propia

6.2.2.2 Análisis de Largo Plazo

De acuerdo a lo descrito, los eventos de quema han generado efectos de corto y mediano plazo en la vigorosidad de la vegetación. Aunque se entiende por mediano plazo un período del orden de 5 años, la cuantificación de dicho tiempo para cada quema particular no es posible determinarla con la información disponible, siendo requerido de un estudio particular para esto.

Existen diferencias significativas entre las series de NDVI de TL1_5 y las de TL2_5 y TL3_5, lo que se manifiesta en que, en el caso de las dos últimas, existe una tendencia estadísticamente significativa al descenso del NDVI, que no se observa en la primera. Adicionalmente, se puede apreciar que los valores máximos anuales de NDVI en TL1_5 han variado entre 0,5 y 0,6 en casi todo el período analizado (1990-2020), mientras que TL2_5 y TL3_5, que tuvieron valores máximos de NDVI en ese mismo rango en el período en que presentaron quemadas, actualmente muestran registros máximos del orden de 0,4. Se estima que parte de estas diferencias, en escala de largo plazo, estarían asociadas a la quemadas, en particular a la periodicidad de estas en el humedal TL1_5.

El humedal TL3_5 presentó su última quema el año 1990, mientras que el humedal TL2_5 fue quemado por última vez el año 2003. En cambio, la última quema del humedal TL1_5 correspondió al año 2018 y ha presentado este tipo de eventos con cierta regularidad en todo el período analizado. Así, aunque el efecto de cada incendio particular sobre la vegetación se ha limitado al mediano plazo, la serie consecutiva de 9 eventos de quema entre 1991 y 2018 en este humedal habría generado un efecto de **largo plazo** sobre la vigorosidad de la vegetación (entendido como una suma de diversos eventos con efecto de **mediano plazo**), el que se observa en los diversos peaks del NDVI en dicho período, con registros máximos anuales normalmente superiores a 0,5 y que se ha extendido por cerca de 30 años (Figura 6-5).

Finalmente, y aunque excede el alcance de este estudio, se debe tener presente que en el **largo plazo** existe la posibilidad que esta práctica traiga consigo una degradación del suelo, como ha sido verificado en otras prácticas que se podrían asemejar. Al respecto, Amaya y col., 2019 reportan que la extracción de champá desde los primeros centímetros de suelo, genera la pérdida de porciones muy fértiles de suelo superficial (top soil), junto con el banco de semillas y otros propágulos como raíces, rizomas, tallos gemíferos y bulbos.

6.2.3 Análisis de Eventos de Quemadas en Riqueza y Cobertura de la Vegetación

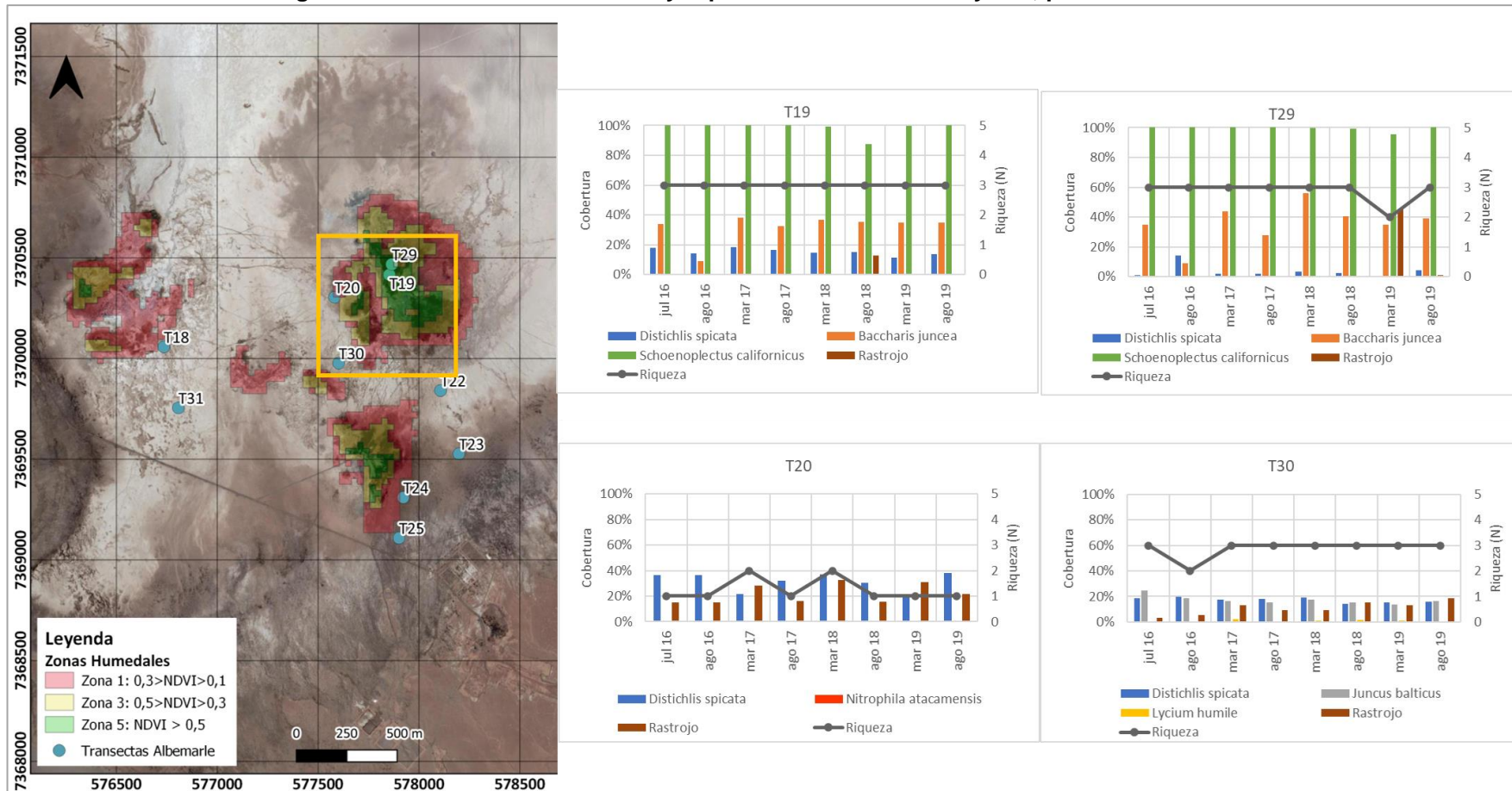
En el acápite 6.2.2.1 se detalla el proceso de quema y rebrote posterior de la vegetación, para un evento particular desarrollado en el humedal TL1 el año 2017 (ver Figura 6-12). De acuerdo a lo descrito, el efecto inmediato de la quema estudiada correspondió a la disminución en la cobertura de la vegetación, como causa de los individuos quemados, existiendo con posterioridad un rebrote de la misma.

Respecto a qué especies corresponden a estos rebrotes, que se manifiestan luego de los eventos de quema, y cuál es la cobertura que alcanzan, la información con la que se cuenta es limitada y acotada a situaciones particulares, por lo que no es posible generalizar los resultados. Hay registros obtenidos de transectas de Albemarle en el humedal TL1_5 (T19 y T29), que han sido generados entre los años 2016 a 2020 (ver Figura 6-13). De acuerdo a la información existente, luego de la quema hubo un rápido rebrote *Schoenoplectus californicus*, el cual, al cabo de 6 meses, presentó una cobertura cercana al 100%. También se verificó que no hubo cambios en la riqueza respecto a la condición previa al incendio.

Es importante tener presente, respecto al seguimiento de flora y vegetación de Albemarle, que este se desarrolla con frecuencia semestral. En el caso particular de los incendios ocurridos en el período 2016-2020, la vegetación se ha recuperado en un plazo en términos de riqueza y cobertura en plazos inferiores a 6 meses, por lo que la frecuencia del monitoreo no permite evaluar este proceso de recuperación.

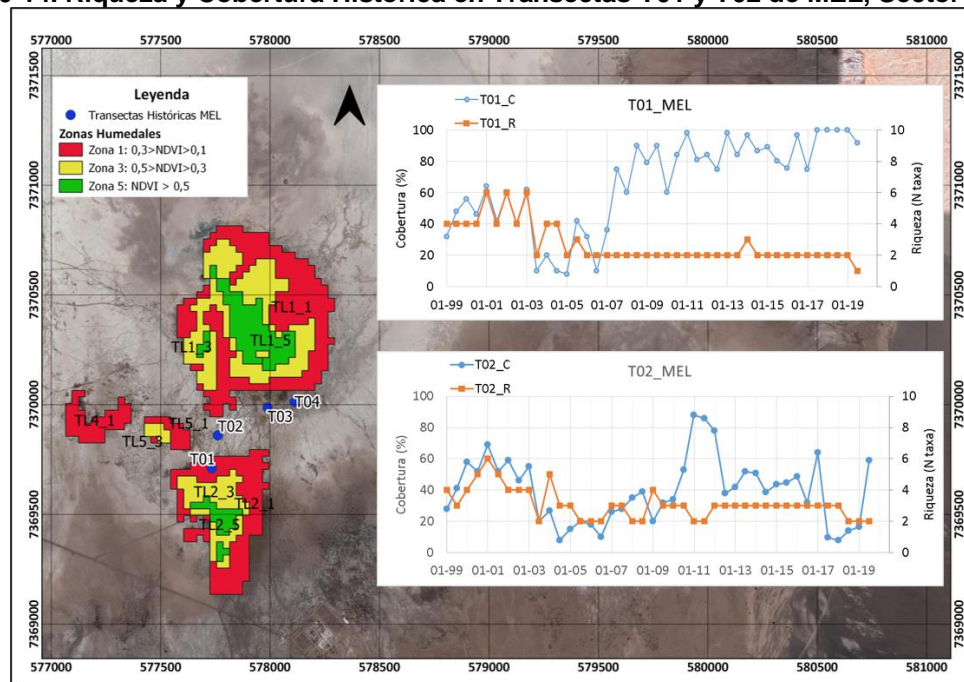
Adicionalmente, se cuenta con registros de la transecta T01 de MEL para el período 1999-2019 (Figura 6-14), la que se encuentra ubicada en el borde del humedal TL2. En dicho humedal ocurrieron diferentes eventos de quema entre los años 1999 y 2003 (1999, 2000, 2001 y 2003), aunque no se tiene certeza respecto a una eventual afectación de la vegetación ubicada en las transectas por dichas quemas, al no ubicarse en la zona central del humedal. El período de las quemas coincide con los valores máximos de riqueza medidos en la transecta (1999-2004), aunque en otras transectas ubicadas fuera del humedal y que no debieran haber sido afectadas por las quemas, también hubo una condición de máxima riqueza en dicho período (ver por ejemplo transecta T02 en Figura 6-14). En lo que respecta a la cobertura en T01, esta varió entre 40% y 60% durante 1999-2003. Luego de registrar valores mínimos entre 2005 y 2006 (inferior a 10%), actualmente es cercana a 100%. Estos registros de largo plazo no permiten desarrollar conclusiones en relación a los efectos de las quemas en la riqueza y cobertura de la transecta, ya que no se cuenta con validación de terreno respecto a la extensión de los incendios y a si efectivamente afectaron a la vegetación ubicada en la transecta.

Figura 6-13. Variación de cobertura y riqueza en transectos T19 y T29, período 2016-2020



Fuente: Elaboración propia a partir de ALB-Cedrem, 2020

Figura 6-14. Riqueza y Cobertura Histórica en Transectas T01 y T02 de MEL, Sector Tilopozo



6.2.4 Síntesis

El análisis desarrollado muestra que los eventos de quema han presentado sobre la vigorosidad de la vegetación efectos **locales**, acotados al sector del humedal en el que se extiende el incendio, de **corto y mediano plazo**. Este es el caso de los humedales TL3 y TL2, cuyas últimas quemadas datan de los años 1990 y 2003, respectivamente. En cuanto al humedal TL1, aunque el efecto de cada incendio particular sobre la vigorosidad de la vegetación también se ha limitado al **mediano plazo**, la serie consecutiva de 9 eventos de quema entre 1991 y 2007 ha generado un efecto de **mediano-largo plazo**, que se observa en los diversos peaks que ha registrado el NDVI en dicho período, con registros máximos anuales normalmente superiores a 0,5 y que se ha extendido por cerca de 30 años (Figura 6-5).

El efecto inmediato de la quema ha sido la disminución abrupta del NDVI, como consecuencia de la vegetación quemada. Sin embargo, el análisis del NDVI de los humedales TL1, TL2 y TL3 ha mostrado una recuperación de la vigorosidad en el verano siguiente a la quema. En particular, la información de terreno en transectas y los registros fotográficos de vegetación en períodos previos y posteriores a una quema particular (invierno de 2017), mostraron que el efecto inmediato de dicho incendio sobre la vegetación fue reversible, lo que se manifestó en los rebrotes de la vegetación y en la recuperación de la cobertura y riqueza previa al evento de quema. Aunque se ha observado de la serie de tiempo de NDVI una recuperación de la vigorosidad luego de diferentes quemadas, no es posible generalizar esta respuesta en términos de la riqueza y cobertura, ya que solamente fue evaluada para un evento. Respecto a lo anterior, es importante hacer notar que los rebrotes de la vegetación solamente son posibles si otras variables que tienen efecto sobre la vegetación, se encuentran dentro de rangos en los cuales es posible el desarrollo de esta. En particular esto es válido para la disponibilidad hídrica, especialmente para la profundidad del nivel freático, de acuerdo a lo señalado por Ahumada y Faúndez (2009). El análisis del efecto que ha tenido la variación del nivel freático en el período 1990-2020 sobre la vegetación, se discute en la siguiente sección del informe.

6.3 Disponibilidad Hídrica y Vegetación

En la presente sección, se evalúan los efectos de los cambios de la disponibilidad hídrica en la vegetación existente en el humedal Tilopozo, para el período 1990-2020, considerando sólo las variables de precipitación y profundidad del nivel freático. No han sido incluidas otras variables como la EVT, cuya data es limitada, y la salinidad del agua superficial o la ubicación de la interfase salina, que no han presentado cambios en la zona de evaluación para el período con registros.

En primer lugar, se da cuenta de relaciones empíricas entre el nivel freático y las principales especies existentes en el humedal, y con posterioridad se analizan los cambios identificados en el período especificado.

Considerando el efecto descrito que producen los eventos de quema en el NDVI, analizados en la sección previa del informe, para estudiar el efecto de la precipitación y de los cambios en el nivel freático en la vegetación, se ha considerado centrar el análisis en los períodos sin quema, de modo de poder estudiar de manera aislada los potenciales cambios que presenta la vegetación (el NDVI, en el caso de este análisis), como causa de la precipitación. De este modo, aunque en el análisis también ha sido incluido el humedal TL1_5, el foco de este se centra en los humedales TL2_5 y TL3_5.

6.3.1 Profundidad del nivel freático y su relación con la vegetación

De acuerdo a Ahumada y Faúndez (2009), una de las características más importantes que establece la diferencia de formaciones vegetacionales y de cobertura, está relacionada con el contenido de agua del suelo en la zona de arraigamiento de las comunidades herbáceas. De lo anterior se infiere que mientras más superficial es el nivel freático o mientras más cercano se está del afloramiento de agua o de las lagunas con renovación de agua en forma permanente, la vegetación presente es de tipo hidrófila. En este tipo de vegetación, es posible encontrar especies de ciperáceas y juncáceas y como especies acompañantes gramíneas, las que también pueden estar presentes en condiciones menos hidromórficas.

La Figura 6-15 muestra valores promedios característicos de la profundidad del nivel freático en diferentes sectores del humedal de Tilopozo, para el período 2011-2014, incluyendo además las principales formaciones vegetacionales como referencia (también presentadas en Figura 4-63 y Figura 5-2, respectivamente). Estos valores deben ser considerados solamente como registros referenciales, toda vez que no fueron todos medidos en un mismo período (ya se ha mostrado la existencia de variaciones interanuales en la profundidad del nivel freático), y que al ser valores promedio no consideran la variabilidad estacional del nivel freático, que en algunos casos puede ser del orden de 40 cm, como es el caso del pozo Til-P03, por ejemplo. Los registros muestran que existe información limitada en los humedales, que se concentra en TL1 y TL2. En el caso de los humedales TL4 y TL5 no existen datos de la profundidad del nivel freático, mientras que en humedal TL3 solamente se cuenta con datos de un pozo somero (pozo P16 en Tabla 4-6. Profundidad del nivel freático igual a 32,4 cm).

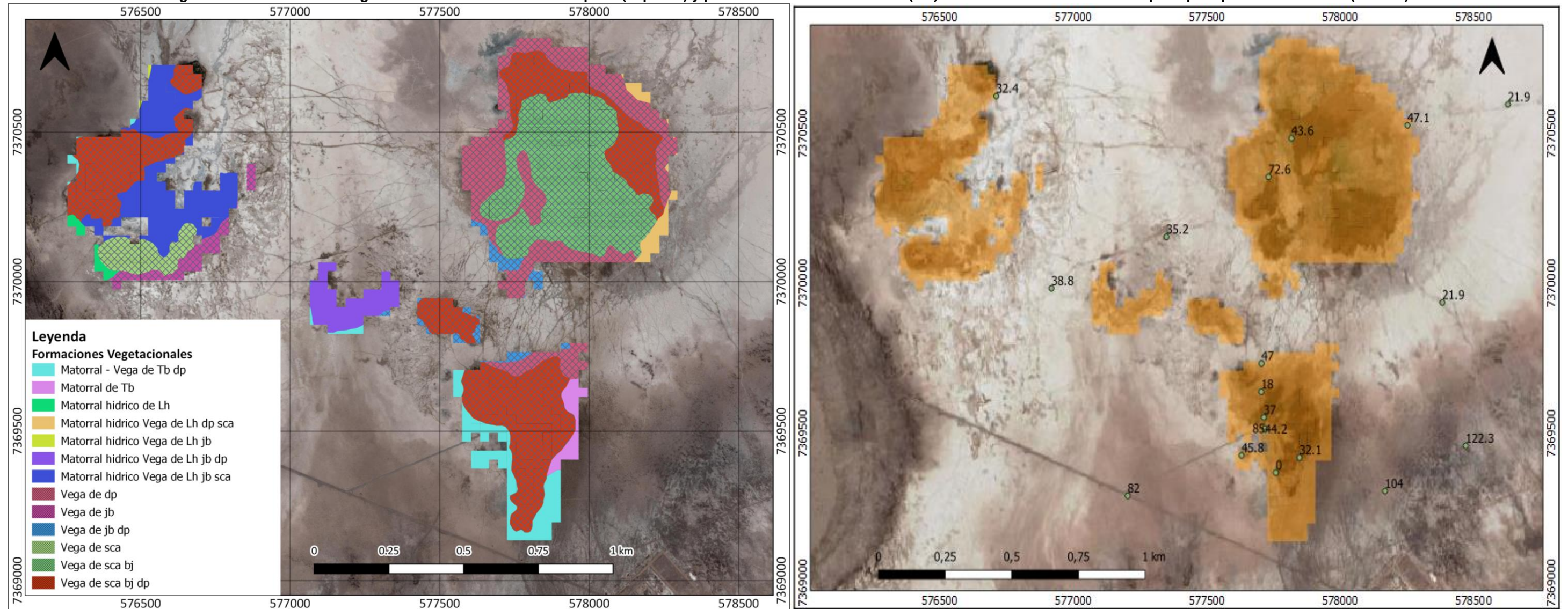
Las principales especies vegetacionales existentes en los humedales de estudio corresponden a: *S.californicus*, *D.spicata*, *L.humile*, *J.balticus*, *B.junceae* y *T. absinthioides* (descritas en acápite 5.2.3).

En la Figura 6-16 se presentan relaciones empíricas entre la presencia de estas especies (utilizando como indicadores su cobertura y la altura de los individuos), y la profundidad del nivel freático, generadas a partir de información levantada en el Sector Tilopozo durante el año 2011. De acuerdo a la información presentada en estas gráficas, se observa que las especies (b) *S.californicus* y (d) *J.balticus* son las que se ubican de manera exclusiva en las zonas más someras, en rangos de profundidad del nivel freático más acotados

(hasta 50 y 60 cm en su mayoría); mientras que (a) *D.spicata* y (e) *T. absinthioides* están presentes en sectores en los que el nivel freático presenta las mayores profundidades registradas, de hasta 180 cm e incluso superiores en el caso de la segunda.

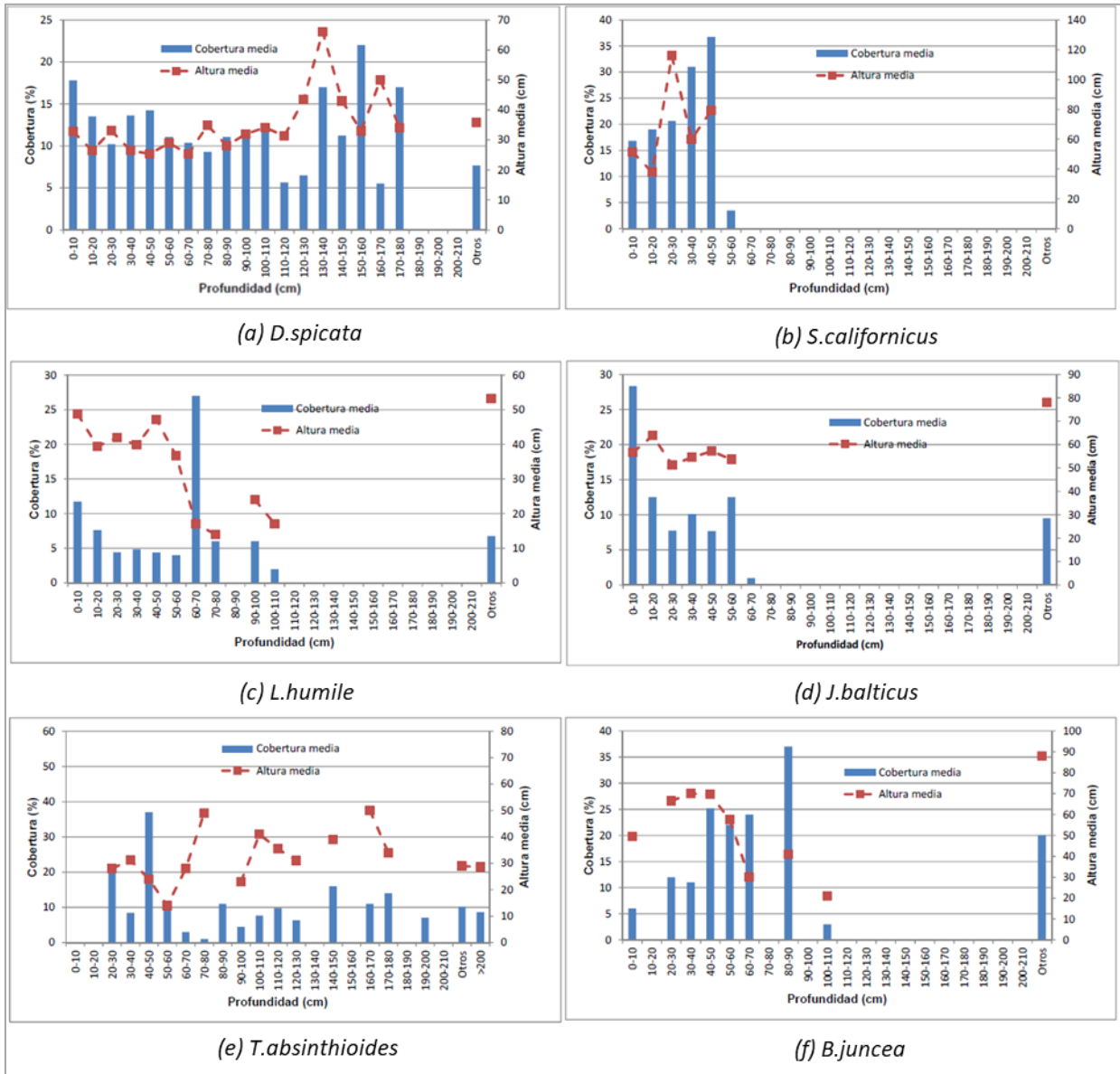
Cabe señalar que *S.californicus* corresponde a la especie dominante de los 3 humedales de alto vigor, de acuerdo a su NDVI (TL1_5, TL2_5 y TL3_5, ver Capítulo 5). Adicionalmente es importante mencionar que, dadas las características mencionadas, el herbazal de *S.californicus*, junto con el herbazal de *J.balticus*, quedaron definidos como “*indicadores de formaciones vegetacionales sensibles a la alteración del suministro hídrico*” en el PMB de Albemarle, por efecto de su estrecha relación con la profundidad del nivel freático.

Figura 6-15. Formaciones vegetacionales del humedal de Tilopozo (superior) y profundidad del nivel freático (cm) en el entorno del humedal Tilopozo para período 2011-2014 (inferior)



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-16. Cobertura y Altura Media de Distintas Especies del Sector Tilopozo, en Función de la Profundidad del Nivel Freático (registros de 2011-2012)



Fuente: Modificado de MEL-CEA, 2012.

6.3.2 Precipitación

De acuerdo a lo presentado en secciones previas del informe, los cambios en el tiempo del NDVI de los distintos humedales es diferente, por lo que respondería, al menos en parte, a condiciones o forzantes locales. Esto se puede ver, por ejemplo, en el efecto de los eventos de quema, discutido en la sección previa (acápite 6.2).

La precipitación, desde el punto de vista de su relación con las condiciones de vigorosidad de la vegetación, puede llegar directamente como agua caída o de recarga local y tener efectos inmediatos locales y de corto plazo en el nivel freático y la vegetación (desde días a meses), o bien llegar como recarga en la zona más alta del acuífero, principalmente desde el sur hasta Tilopozo, cuestión analizada en los capítulos previos y que tomaría años si se considera la zona principal de recarga del acuífero (ver acápite 4.2.1). Desde el punto de vista de la condición base del acuífero, la vegetación actualmente se desarrolla gracias a los flujos de entrada subterránea, producto de la recarga que produce la precipitación caída a una escala de tiempo superior a la analizada en este estudio (30 años). Por lo tanto, la evaluación de la respuesta de la vegetación al agua precipitada desarrollada en este acápite, se relaciona con la precipitación local, caída directamente o en el entorno del Sector Tilopozo.

De acuerdo a lo indicado en el acápite 4.2.1 (ver además Figura 6-17, que muestra serie mensual de precipitación), se han verificado dos períodos extensos de baja precipitación, correspondientes a 1988-1996 y 2004-2010; mientras que los períodos 2001-2002 y 2012-2015 se caracterizaron por ser húmedos, con eventos de alta precipitación, en relación a la precipitación media anual, del orden de 20 mm. Asimismo, en los años 1997, 2017, 2019 y 2020 también se verificaron eventos de alta precipitación, presentando todos una precipitación anual superior a la del año promedio. Adicionalmente, se debe destacar que, aunque en general la precipitación se concentra en los meses de enero, febrero y marzo, los años 2002, 2011, 2013 y 2020 hubo eventos de precipitación con agua caída superior a 10 mm entre mayo y agosto.

Respecto a la relación entre la precipitación y los cambios en el nivel del acuífero, es importante destacar que en general los eventos de lluvia del período de análisis (1990-2020) no modificaron la tendencia previa de variación del nivel freático y produjeron en su mayoría cambios en la profundidad del agua que se extendieron por pocos meses. La excepción a lo anterior correspondió a la lluvia de enero – febrero de 2019, que se caracterizó por extenderse por alrededor de dos semanas, y que produjo cambios en el nivel freático que se prolongaron por varios meses, en algunos casos más de un año, de acuerdo a los registros de diferentes pozos.

La Figura 6-17 muestra la evolución temporal del NDVI en los humedales TL1_5, TL2_5 y TL3_5 entre 1990 y 2020, en comparación con la precipitación del período, medida en la estación meteorológica Rockwood. Para los años 1990-1996 en que no se cuenta con información de dicha estación, fueron considerados los registros de la estación meteorológica Chaxa.

En el caso del humedal TL1_5, hubo coincidencia entre los períodos secos y los años sin quemas, verificándose un descenso del NDVI tanto entre 1990-1996, como en 2004-2010. Aunque estos descensos podrían relacionarse con la reducción de la precipitación, podrían también estar asociados con la baja que se aprecia en el NDVI, luego del peak que este alcanza de manera posterior a las quemas (ver acápite 6.2). Por este motivo, no es posible afirmar que el descenso del NDVI se debió a la menor precipitación. Adicionalmente, en los períodos húmedos no hubo cambios significativos al alza en el NDVI, como en 2001-2002, o en 2012-2015. De acuerdo a lo anterior, no es posible asegurar que los cambios en el NDVI de este

humedal (TL1_5), para el período 1990-2020, estén relacionados con el agua precipitada, al menos de forma local y directa.

Respecto al humedal TL2_5, se considera para el análisis el período 2005-2020, de manera de aislar el efecto de corto y mediano plazo que provocan las quemadas. En dicho período, mientras el NDVI muestra entre 2005 y 2011 una baja variabilidad, las precipitaciones fueron mínimas, en tanto que entre 2012 y 2020, período en el que se evidencia una tendencia al descenso del NDVI, hubo diversos años con eventos de precipitación superior al promedio anual (2012, 2013, 2015, 2017 y 2019). De lo anterior, para el período evaluado, se estima que no habría un efecto directo de la precipitación en el NDVI y los cambios en su tendencia en el humedal TL2_5.

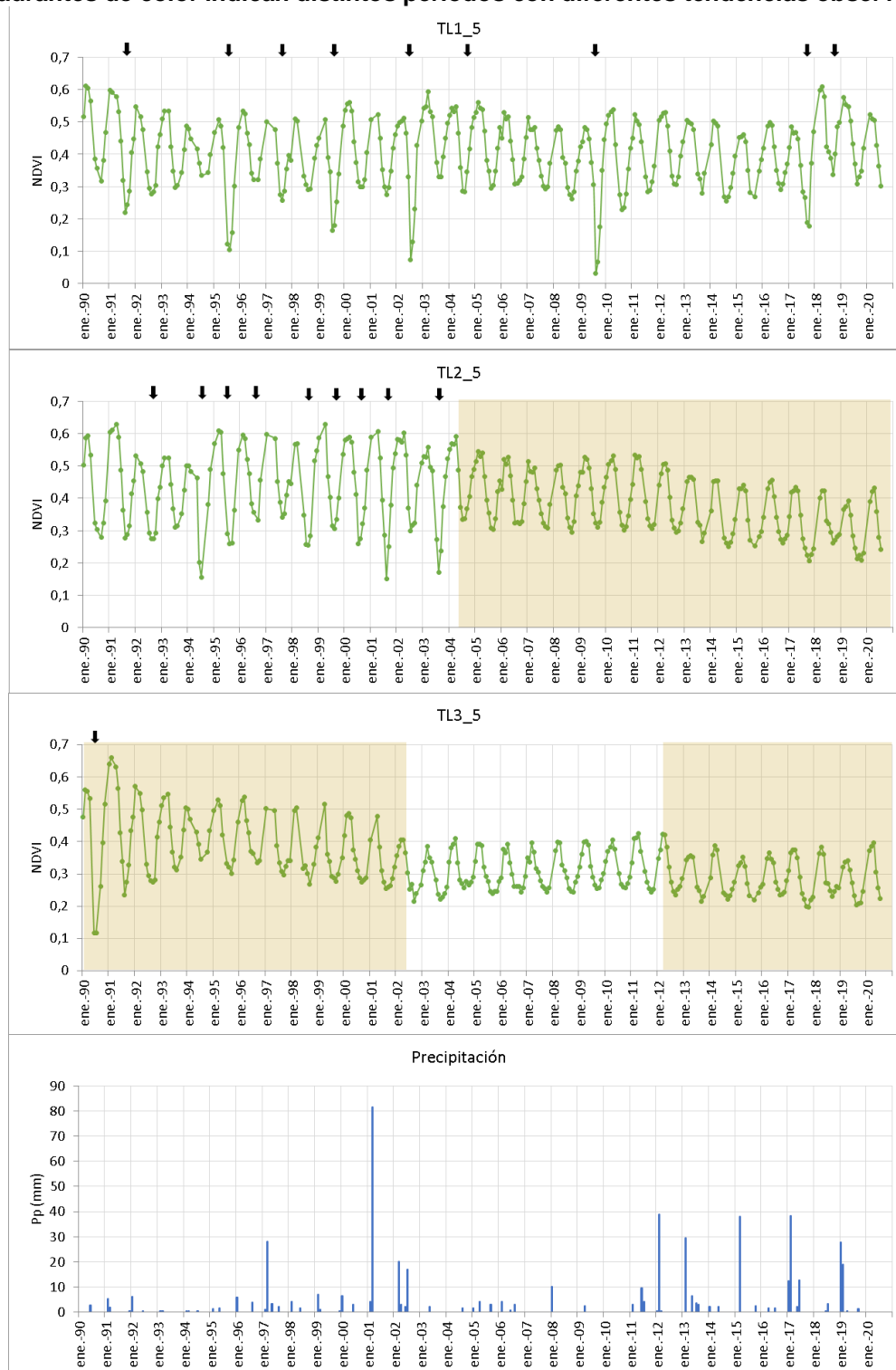
En el caso del humedal TL3_5, el período sin eventos de quema se extiende entre 1991 y 2020. Aunque hubo un descenso del NDVI entre 1991 y 1996, coincidente con un período de baja precipitación, también hubo una caída abrupta del NDVI entre 2001 y 2002, año el primero en el que la precipitación anual fue la máxima del período. Adicionalmente, en el período “seco” de 2004-2010, no hubo cambios significativos en los valores máximos anuales del NDVI. De este modo, no parece existir correspondencia entre la variación del NDVI en el humedal y la precipitación.

No obstante lo indicado en los párrafos previos, existe una coincidencia en el incremento leve del NDVI máximo del año 2020 en los humedales TL2_5 y TL3_5 y las precipitaciones del año 2019. Tal como se mencionó de manera previa, estas lluvias produjeron cambios en la profundidad del nivel freático, que en diferentes sectores del área estudiada se extendieron por varios meses, siendo en general los niveles mínimos del verano de 2020 más someros que los de 2019. Aunque en vista de los antecedentes no se aprecia correspondencia entre cambios verificados en el NDVI entre 1990 y 2020 y la precipitación en el área de estudio, no se descarta que existan efectos menores, de **corto plazo**, para eventos de lluvia puntuales, en particular el señalado del año 2019.

Finalmente, se debe tener presente que es posible que el efecto de cambios en la precipitación sobre la vegetación ocurra en una escala de tiempo que excede el alcance de este informe, que evalúa la variación de los últimos 30 años. A modo de ejemplo, Amaya y col. (2019) hacen referencia a estudios dendrocronológicos realizados sobre la “queñoa” *Polylepis tarapacana*, uno de los árboles que forman bosques en las tierras más elevadas del planeta, donde se reporta que el bioma de Puna viene sufriendo un proceso de descenso de las precipitaciones. Las evidencias indican que las últimas tres a cuatro décadas han sido las más secas en los últimos 700 años. Esta tendencia climática se traduce en la reducción de la disponibilidad de agua, desde los glaciares hasta las cuencas aguas abajo que éstos alimentan, lo cual es una afectación directa sobre las fuentes de agua para las vegas altoandinas.

Por otro lado, los mismos estudios indican que las precipitaciones medias anuales que alimentan ambientes puneños, que provienen fundamentalmente del océano Atlántico, no mostrarían cambios en este siglo y en algunos casos, hasta se incrementarían de acuerdo con los modelos climáticos. Sin embargo, se pronostica mayor frecuencia de eventos de precipitaciones extremas muy concentradas y distanciadas por períodos de sequía más largos. Además, todos los estudios coinciden en que la Puna del noroeste de Argentina, norte de Chile y suroeste de Bolivia sufrirán los mayores incrementos de temperaturas medias anuales, lo cual resultará en un aumento del déficit hídrico de estas regiones (Morales et al. 2012 en Amaya y col., 2019).

Figura 6-17. Variación temporal de NDVI en humedales TL1_5 (primera), TL2_5 (segunda) y TL3_5 (tercera) y precipitación anual en estación Rockwood (datos de 1990-1996 de estación Chaxa) (cuarta). Flechas negras en gráficos de NDVI identifican la fecha de ocurrencia de incendios, cuadrantes de color indican distintos periodos con diferentes tendencias observadas



Fuente: Elaboración propia a partir de Izumi Consultores, 2020 (presentado en Anexo 1)

6.3.3 Cambios en la Profundidad del Nivel Freático (1990-2020)

Como fue expuesto en los capítulos y análisis previos, el cono de descenso del nivel freático proveniente desde el sur (acuifero MNT), como consecuencia de las extracciones de agua desde los campos de pozos ubicados en esta zona, habría alcanzado el pozo TP-3 en el año 2000 (Figura 4-36). Ya en el año 2004, el nivel en el pozo TPZ-2C, ubicado en el borde sur del humedal TL2_5, se profundizó entre 5 cm y 10 cm, respecto a los registros del año 2000 (ver Figura 4-38 y Figura 4-64). Esta situación también se produjo en otros pozos ubicados en el entorno de los humedales. Posteriormente se ha verificado una tendencia a la baja de los niveles, principalmente en el período de invierno, pero también durante el verano en donde se ha producido una profundización de los niveles, pero menos marcada que en el invierno. Esto último, posiblemente como resultado de los eventos de precipitación, que normalmente se concentran entre los meses de enero y marzo.

De manera adicional al bombeo existente en el acuifero MNT (al sur de Tilopozo), actualmente se extrae agua desde el borde oeste de la zona central del humedal TL2 por medio del pozo Tilopozo, extracción que presenta un radio de influencia que se extiende por 700 m para las condiciones definidas en la prueba de bombeo realizada por Rockwood Lithium en agosto de 2014 (RWL – SGA, 2015), que consideró una tasa de bombeo igual a 8 l/s. Así, el radio de influencia abarca en toda su extensión o en parte de ésta, los humedales TL1, TL2, TL4 y TL5. Sin embargo, los principales efectos del bombeo se concentran en el humedal TL2, siendo inferior a 5 cm el descenso del nivel freático en los humedales restantes, para las condiciones definidas para la prueba de bombeo.

El análisis desarrollado para la variación de la profundidad del nivel freático en el pozo Tilopozo, muestra que aparentemente existiría un desfase de entre 2 a 3 años entre esta y la variación del nivel freático en pozos ubicados en el entorno del humedal de Tilopozo, considerando una media móvil de 12 meses de los registros. Se desconoce cómo se extiende este aparente desfase en el humedal TL2 y se estima podría estar relacionado con las surgencias existentes en este y/o con la capacidad de regulación hidrológica del humedal, dando cuenta de la complejidad del sistema y de relacionar la variación del nivel freático en el entorno del humedal, con la respuesta de la vegetación. En ese sentido, es importante destacar que considerando los cinco humedales que componen el humedal de Tilopozo (TL1 a TL5), solamente en el humedal TL2 se cuenta con registros del nivel freático (pozo Tilopozo). En los humedales restantes no existen pozos someros o barrenos instalados que sean monitoreados (solo hay en sectores aledaños o cercanos), por lo que no se tiene información que permita evaluar un eventual desfase en la variación del nivel freático en estos.

Por otra parte, se debe tener presente que, para el desarrollo de las especies de vegetación, la profundidad del nivel de agua es un factor condicionante o limitante, pero no suficiente, debido a que estas responden a una mayor diversidad de factores, como ha sido indicado en este informe. Es decir, por ejemplo, si en un lugar determinado el nivel freático se encuentra más profundo que lo que una especie particular normalmente requiere que se ubique, es probable que la especie no sobreviva o no se desarrolle en dicho lugar. No obstante, también puede darse el caso de que, aunque el nivel freático sea el adecuado para una especie determinada, al existir limitación por otras variables la vegetación podría no desarrollarse o desarrollarse, pero con una vigorosidad “limitada”. Dichos factores incluyen variables climáticas, tipo de sustrato, concentración de sales disueltas y de nutrientes en el agua y/o suelo, entre otros.

Para caracterizar la relación entre el nivel de agua y el NDVI, se han evaluado cada uno de los tres humedales identificados como de vigorosidad máxima (TL1_5, TL2_5 y TL3_5). En estos se ha desarrollado

la comparación entre el NDVI máximo anual, dado que representa la condición de máximo vigor de la vegetación, alcanzada durante el verano, y un parámetro característico de la profundidad del nivel de agua.

Considerando el ciclo intranual de la vegetación, que presenta condiciones de menor vigorosidad (NDVI mínimo) en invierno y máxima vigorosidad en el verano (NDVI máximo), se evaluaron como parámetros característicos de la profundidad de agua, el nivel de invierno (nivel más somero), representativo de una condición base del nivel freático, y el nivel de verano (nivel más profundo), que da cuenta de una condición de mayor stress para la vegetación.

El análisis se desarrolló para los pozos ubicados en el entorno de los humedales TL1, TL2 y TL3. Se observó que el NDVI máximo anual presentó una mejor correlación con el nivel del invierno del año anterior (nivel más somero), que con el nivel del verano (nivel más profundo), por lo que se presentan los resultados para el nivel más somero. Complementariamente, para algunos pozos se incluyen de manera referencial los resultados de este análisis considerando el nivel mínimo de verano.

Los resultados se presentan a continuación, de manera diferenciada para cada humedal.

6.3.3.1 Humedal TL1_5

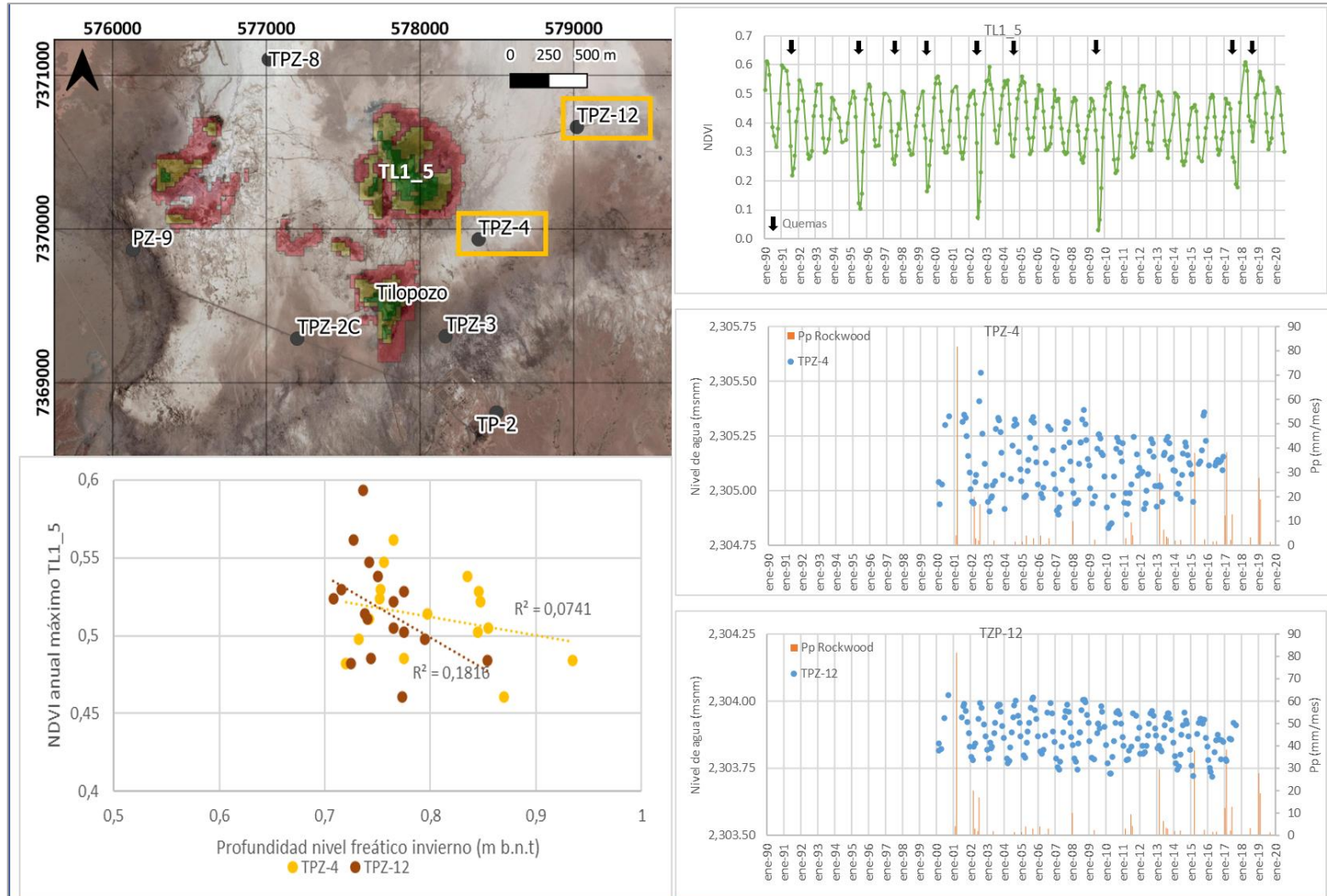
Como ha sido descrito en las secciones previas, en el humedal TL1_5 los registros de NDVI han estado influenciados por diversos eventos de quema, que generan incrementos del NDVI máximo respecto a la condición previa a la quema, cambios que se han producido de manera independiente de la profundidad del nivel freático. Así, aunque existen períodos con tendencias de NDVI decrecientes entre 2000 y 2020, los registros se encuentran influenciados por los efectos de los eventos de quema, no observándose una relación directa entre el NDVI y los cambios de nivel verificados en pozos ubicados en el entorno del humedal. De este modo, los eventos de quema “enmascaran” la posible influencia de la variación del nivel de agua en los cambios verificados en el NDVI.

La Figura 6-18 muestra la relación entre el NDVI máximo anual del humedal TL1_5 y el nivel del invierno anterior, medido en los pozos TPZ-4 y TPZ-12 ubicados entre 200 m y 1000 m del borde del humedal, en conjunto con las series de tiempo de NDVI (1990-2020) y de la profundidad del nivel freático en ambos pozos. En el caso del pozo TPZ-4, se verificó correspondencia entre la profundización del nivel freático y la reducción del NDVI, pero con un coeficiente de correlación $r^2=0,07$. Respecto al pozo TPZ-12, el coeficiente de correlación fue levemente superior, $r^2=0,18$.

La relación del NDVI máximo con el nivel de verano presentó resultados similares a los descritos para los niveles de invierno, siendo la correlación levemente superior en el caso de TPZ-12 ($r^2=0,23$) y menor en el de TPZ-4 ($r^2=0,026$).

En relación al análisis de la variación temporal del NDVI y la profundidad del nivel freático para el período 2000-2017, se puede apreciar que existe baja correspondencia en la temporalidad de los cambios, lo que explica los valores obtenidos para el coeficiente de correlación.

Figura 6-18. Relación entre NDVI en TL1_5 y nivel freático en pozos TPZ-4 y TPZ-12. Flechas indicar quemas



Fuente: Elaboración propia

6.3.3.2 Humedal TL2_5

Para el humedal TL2_5, se cuenta con información diversa para analizar la relación entre la variación de la profundidad del nivel freático y de la vigorosidad de la vegetación. En particular, es de interés el período 2007-2020, dado que el último evento de quema en el humedal fue en el invierno de 2003. Se consideran los registros de NDVI a partir de 2007, de modo de reducir el potencial efecto de la quema de 2003 en los registros de NDVI (efecto de mediano plazo). Para evaluar la relación, se cuenta con registros de larga data de pozos ubicados al sur o en el borde sur del humedal TL2, pozos TP-2, TPZ-2C y TPZ-3, en el humedal mismo (pozo Tilopozo) o en su entorno (pozo TPZ-4) y al norte del humedal (TPZ-8, TPZ-12). Considerando la dirección del flujo subterráneo, que es principalmente de sur a norte, el análisis se desarrolla en dicha dirección. La ubicación de todos los puntos se puede apreciar en la Figura 6-19.

La Figura 6-19 muestra la relación entre el NDVI máximo anual del humedal TL2_5 y el nivel del invierno anterior, medido en los pozos TP-2, TPZ-2C y TPZ-3. Adicionalmente, da cuenta de las series de tiempo de NDVI (1990-2020) y de la profundidad del nivel freático en los mismos pozos. La Figura 6-20 presenta las mismas relaciones y series de tiempo, considerando los registros de los pozos Tilopozo y TPZ-4, mientras que la Figura 6-21 presenta los registros de los pozos TPZ-12 y TPZ-8.

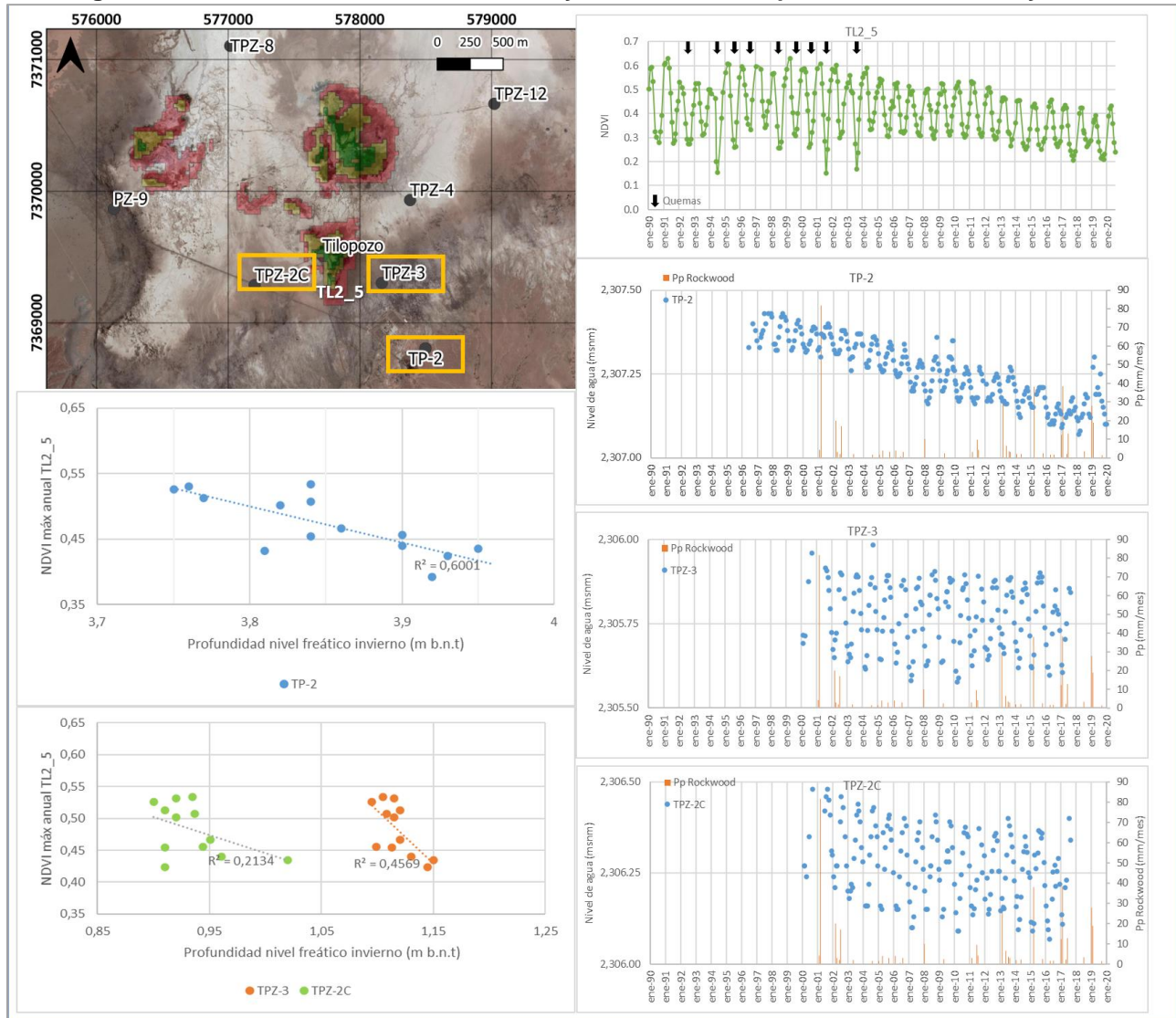
Respecto a los pozos ubicados al sur del humedal de Tilopozo, TP-2, TPZ-2C y TPZ-3 (Figura 6-19), al considerar los datos del período 2007-2020, se aprecia una correspondencia entre la profundización del nivel en el pozo TP-2 y la disminución del NDVI máximo anual en TL2_5, considerando una relación lineal entre ambos ($r^2=0,6$). Al desarrollar la evaluación con pozos más cercanos al humedal (TPZ-3 y TPZ-2C), se esperaría que mejorase la relación. Sin embargo, en el pozo TPZ-3, aunque la tendencia se mantiene, disminuye la bondad del ajuste ($r^2=0,46$), mientras que en TPZ-2C el coeficiente de correlación es aún inferior ($r^2=0,21$). En ambos pozos las relaciones están influenciadas por el registro más profundo, no mostrando todas las mediciones una tendencia similar. Por ejemplo, en el caso de TPZ-3, de no incluirse en la correlación los dos registros más profundos, el coeficiente de correlación se reduce de manera significativa ($r^2=0,16$).

A modo referencial, se debe destacar que la correlación entre el NDVI máximo anual y el nivel de verano para los pozos indicados es levemente superior en TP-2 ($r^2=0,67$), levemente inferior en TPZ-2C ($r^2=0,14$) y significativamente menor en TPZ-3 ($r^2=0,0084$), no existiendo relación entre las variables en este último caso.

De este modo, aunque existe una correspondencia entre la profundización del nivel freático al sur del humedal y el descenso del NDVI, la correlación es significativa solamente para el pozo TP-2, que de los tres pozos evaluados es el que se ubica más lejos del humedal (500 m al sur), pero no se verifica la misma significancia para los pozos someros ubicados junto al humedal.

Por otra parte, de acuerdo al desfase que aparentemente presenta el nivel en el pozo Tilopozo, ubicado dentro del humedal, respecto al de los pozos del entorno, se evaluó la relación entre el nivel de invierno y el NDVI máximo considerando un desfase de 2 a 3 años en los registros. Por ejemplo, el nivel de invierno del año 2010 se comparó con el NDVI máximo del verano de 2013. En este caso, se observan incrementos significativos en la correlación en el caso de los pozos TP-2 ($r^2=0,84$) y TPZ-2C ($r^2=0,57$). Estos resultados se presentan en la Figura 6-22.

Figura 6-19. Relación entre NDVI en TL2_5 y nivel freático en pozos TPZ-2, TPZ-2C y TPZ-3



Fuente: Elaboración propia.

Los registros de los pozos Tilopozo y TPZ-4 dan cuenta de la variación del nivel freático en el humedal o junto a este (borde norte). En la Figura 6-20 se compara la variación del NDVI en el humedal TL2_5 y la profundidad del nivel en dichos pozos. Se puede apreciar que no hay correspondencia entre estas variables y que incluso se observa una leve tendencia al incremento del NDVI con la profundización del nivel freático ($r^2=0,08$). Esto se da en oposición a lo indicado para el pozo TP-2, por ejemplo, y no es consistente con la limitación que genera el nivel freático en el desarrollo de la vegetación en humedales altoandinos. Así, es indicador de la necesidad de mantener un monitoreo local de la profundidad del nivel en el humedal y muestra además que, aunque la profundidad del nivel de agua es el principal factor condicionante de la vegetación (Ahumada y Faúndez, 2009), existirían otros factores que podrían estar condicionando la vegetación (como por ejemplo, la concentración de sales o nutrientes en el suelo), que deben ser considerados para su análisis y estudio.

Adicionalmente, en el humedal TL2 existen puntos de monitoreo superficial de Albemarle (LM-16), MEL (H) y SQM (reglilla Tilopozo). La información de estos puntos da cuenta de la existencia de flujos surgentes, no existiendo una profundización del nivel superficial desde los años 90 (ver acápite 4.3 y Figura 4-65). De este modo, no existe relación entre la tendencia del NDVI máximo anual en el período (al descenso) y la variación del nivel superficial en el humedal (sin cambios sustantivos).

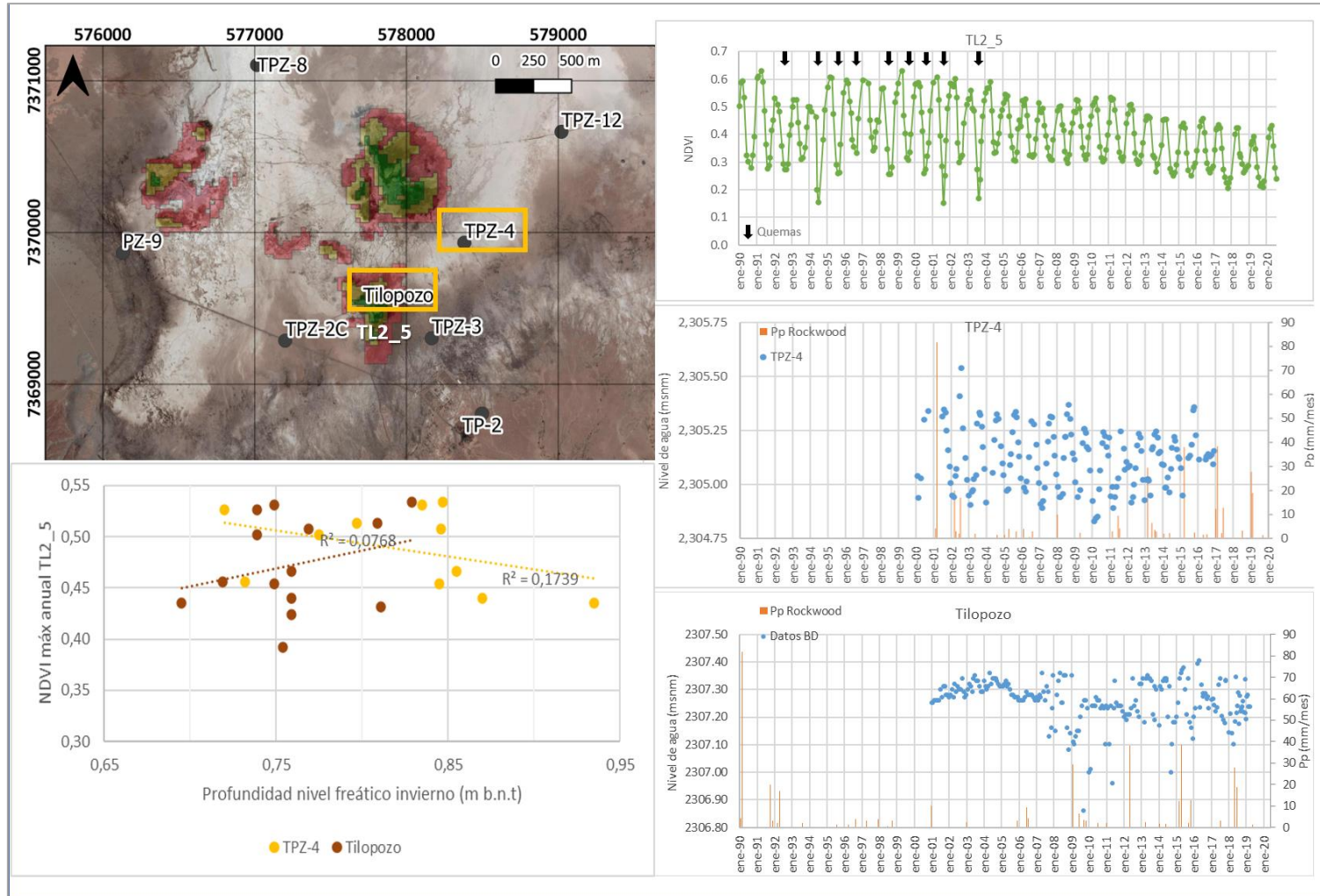
Es importante también señalar que no existe información que permita inferir o definir como se extiende en el humedal esta condición de surgencia, ni evidencia respecto a un eventual proceso de cambio en el tiempo en la presión con que surge el agua (cota piezométrica), salvo los registros del pozo Tilopozo. Una eventual disminución de dicha presión podría reducir la superficie en que el agua aflora o se produce la surgencia en el humedal o favorecer una acumulación de sales en el suelo, ambas situaciones desfavorables para la vegetación.

Respecto a la relación entre el NDVI máximo del humedal TL2_5 y la profundidad del nivel freático de invierno en pozos ubicados al norte del humedal (TPZ-8 y TPZ-12), la Figura 6-21 muestra la existencia de una correspondencia entre ambas variables, similar a la descrita para los pozos ubicados al sur del humedal, en que existe una disminución del NDVI, con la profundización del nivel freático. Para los dos pozos se observa un coeficiente de correlación (r^2) en el rango 0,5 – 0,6. Al respecto, cabe destacar que la correlación entre el NDVI máximo anual y la profundidad de verano en ambos pozos es prácticamente nula, correspondiendo el coeficiente de correlación r^2 a 0,0985 y 0,0021 para los pozos TPZ-12 y TPZ-8, respectivamente.

Al considerar un potencial desfase de dos años entre la variación del nivel freático y el NDVI, se observa en ambos pozos un incremento en la correlación entre NDVI y la profundidad del nivel freático de invierno, aumentando el valor de r^2 a valores superiores a 0,7 en ambos casos (Figura 6-22, inferior). Se debe destacar que, considerando la dirección del flujo subterráneo del acuífero MNT (sur-norte), estos pozos se ubican aguas abajo de TL2, a más de un kilómetro de distancia, siendo además, de los evaluados en esta sección, los más alejados del humedal.

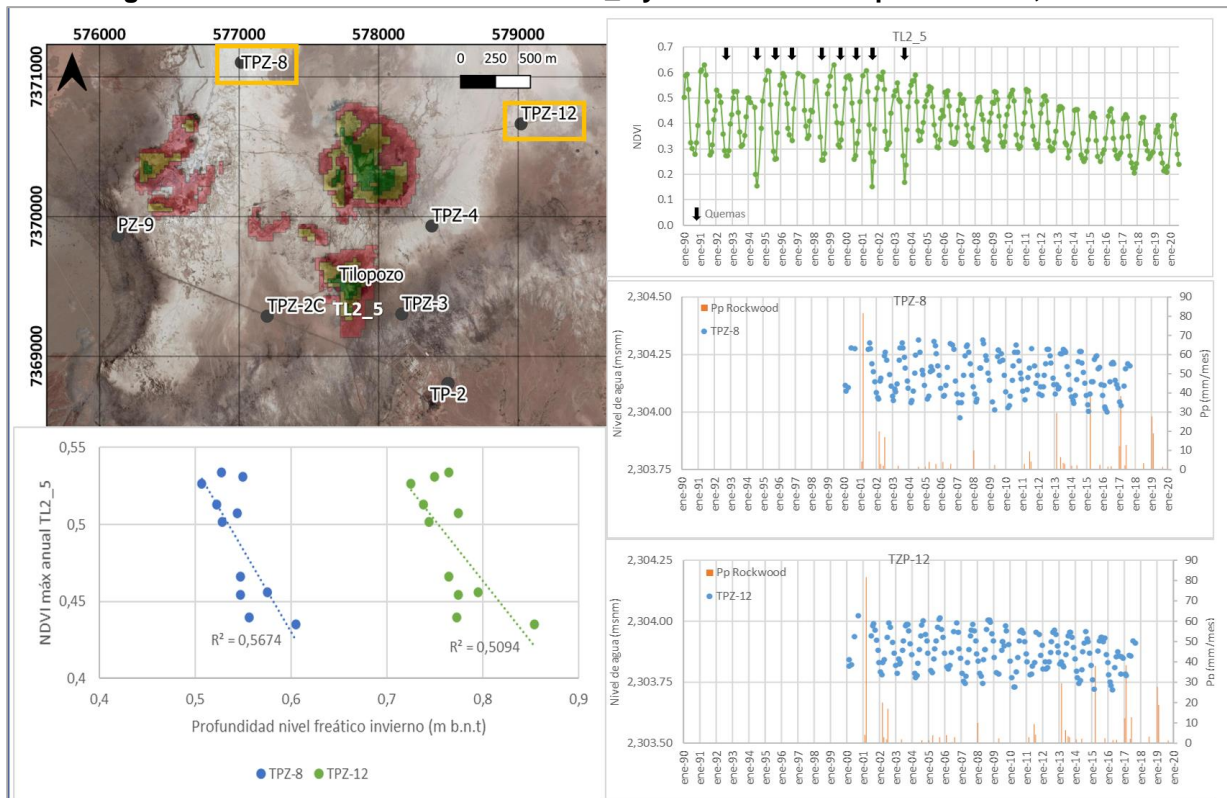
Registros de otros pozos ubicados en el entorno del humedal (Til-P03, MP-04A) también mostraron tendencia a la profundización del nivel freático, al menos hasta 2019, pero se estima que es muy acotada la extensión de sus registros para considerarlos en un análisis de correlación con el NDVI.

Figura 6-20. Relación entre NDVI en TL2_5 y nivel freático en pozos Tilopozo y TPZ-4



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-21. Relación entre NDVI en TL2_5 y nivel freático en pozos TPZ-8, TPZ-12



Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a las series de tiempo de variación de NDVI en el humedal TL2_5, en conjunto con la variación de la profundidad del nivel freático en los diferentes pozos evaluados, esta comparación permite visualizar no solo la correlación, sino también la temporalidad de los cambios. Se aprecia que la tendencia general del nivel freático es a la baja, lo que es concordante con la tendencia del NDVI. Sin embargo, es notorio que no hay necesariamente coincidencia en el tiempo en el que se producen los cambios en el NDVI y en el nivel de diferentes pozos. Así, por ejemplo, en los pozos TPZ-2C y TPZ-3 (Figura 6-19) la tendencia al descenso del nivel freático se concentró principalmente entre los años 2000 y 2010, disminuyendo la tasa de descenso posteriormente. En cambio, en el caso del NDVI, entre 2004 y 2010 los valores máximos anuales presentaron una baja variación, manteniéndose en torno a 0,5, alcanzando una condición de estabilización, mientras que, de manera posterior, entre 2010 y 2020, disminuyeron de forma consistente, correspondiendo los valores máximos al final de este período a 0,4.

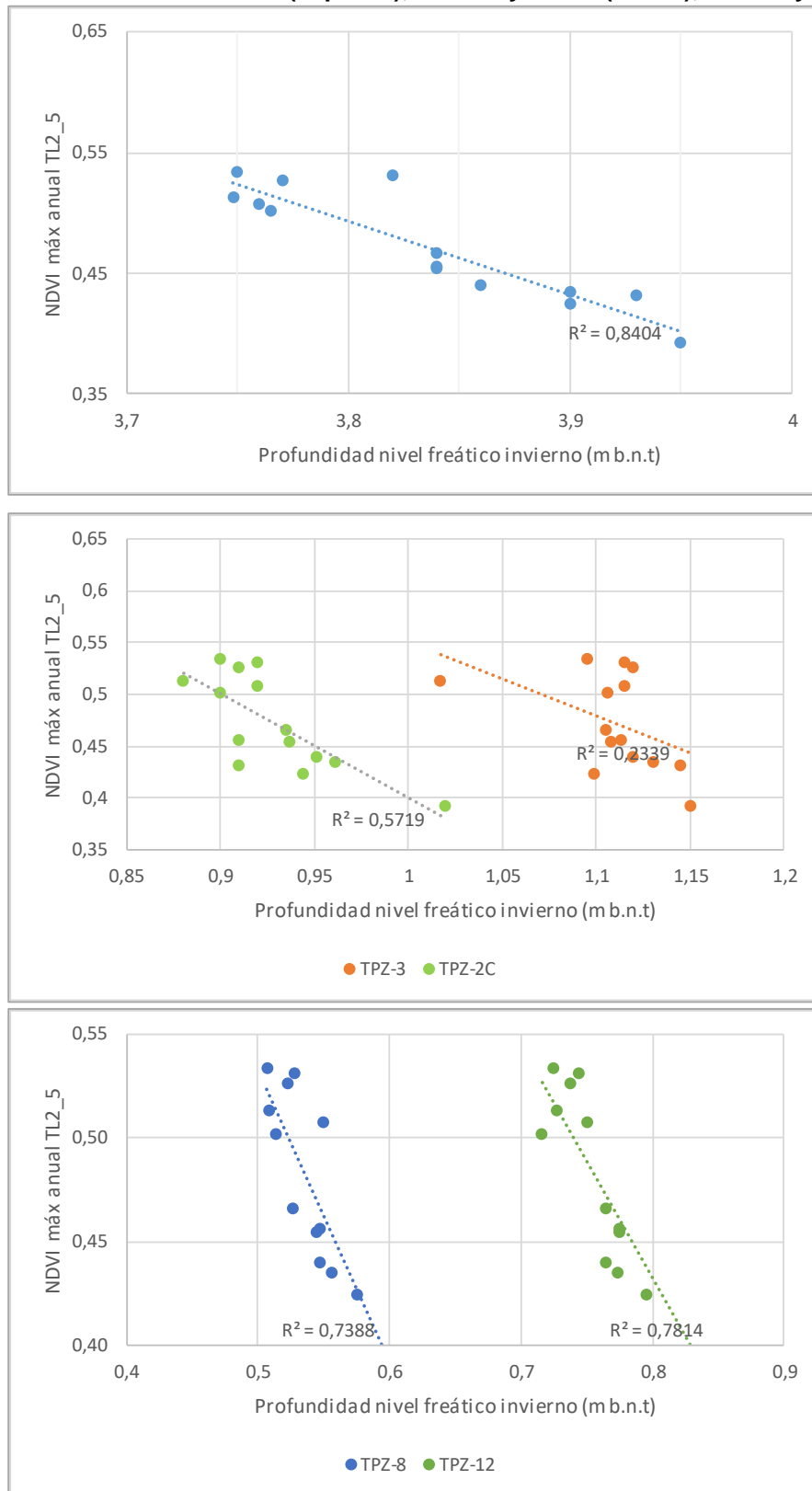
En el caso del pozo TPZ-4 se verifica una situación similar (Figura 6-20), observándose por ejemplo que en el período 2009-2015 hubo una baja variación del nivel de invierno y un ascenso de la profundidad del verano (el nivel de verano fue cada vez menos profundo), mientras que la tendencia del NDVI máximo anual entre 2011 y 2015 fue decreciente.

Lo anterior explica la razón de que en el caso de los pozos TPZ-3, TPZ-2C y TPZ-4, aunque exista correspondencia en los cambios de NDVI y profundidad del nivel freático en el período 2000-2017, la correlación entre estas sea inferior o del orden de 0,4.

En cuanto a los pozos TPZ-8 y TPZ-12 (Figura 6-21), ambos presentan una tendencia decreciente del nivel máximo de invierno y del nivel mínimo de verano entre 2000 y 2017, la que se corresponde con la tendencia

al descenso del NDVI. Sin embargo, en el caso de la relación entre NDVI y profundidad del nivel de invierno se verificaron coeficientes de correlación superiores a 0,5, mientras que, en el caso del nivel de verano, estos coeficientes fueron inferiores a 0,1. El origen de estas diferencias está relacionado con la sincronía de los cambios. Por ejemplo, se puede apreciar que entre 2009 y 2015 existió una correspondencia entre el descenso del nivel de invierno y el NDVI máximo anual, mientras que dentro de ese mismo período, el nivel de verano tuvo una tendencia al ascenso entre 2010 y 2013.

Figura 6-22. Relación entre NDVI máximo anual y nivel de invierno en TL2_5, considerando desfase de 2 años entre variables. Pozos TP-2 (superior), TPZ-2C y TPZ-3 (medio), TPZ-12 y TPZ-8 (inferior)



Fuente: Elaboración propia.

6.3.3.3 Humedal TL3_5

En el caso del humedal TL3_5, para el análisis se ha considerado la información del nivel de agua medida en el pozo PZ-9, ubicado en las cercanías del humedal. Dado que este solo cuenta con registros a partir del año 2009, dicha información se ha complementado utilizando las mediciones de los pozos TPZ-2C y TPZ-8, ubicados al noreste y sureste del humedal, respectivamente. Debido a que la última quema realizada en el humedal data del año 1990, es posible utilizar toda la serie de tiempo de NDVI de TL3_5 para realizar el análisis. La ubicación de los pozos y la comparación entre el NDVI y la profundidad del nivel freático se presenta en la Figura 6-23, incluyendo el coeficiente de correlación (r^2) de la regresión lineal entre las variables. Adicionalmente, esta figura presenta la comparación entre las series de tiempo de los pozos y del NDVI.

Respecto a la relación entre el NDVI máximo anual del humedal TL3_5 y el nivel freático del invierno anterior medido en los pozos TPZ-2C y TPZ-8, se debe señalar que no se consideraron los registros del año 2000 (NDVI = 0,488), ya que dicho valor particular genera un incremento del coeficiente de correlación, que no se condice con la tendencia de los datos restantes. Los valores del coeficiente de correlación (r^2) para los registros de los pozos TPZ-2C y TPZ-8 corresponden a 0,17 y 0,27, respectivamente, no siendo clara la correspondencia entre NDVI y nivel freático. Cabe señalar que en el caso de los registros de nivel freático de verano, existe una menor correspondencia entre la profundización del nivel de agua y el NDVI, disminuyendo el coeficiente de correlación en los registros del pozo TPZ-8 ($r^2=0,05$).

En el caso del pozo PZ-9, este se ubica más cercano al humedal y en su nivel freático existiría influencia no solo del flujo proveniente desde el sur, sino que posiblemente también de flujos provenientes desde el oeste (sector Cordón de Lila). Al ubicarse más cerca del humedal, debiera reflejar de menor forma la variación del nivel de agua dentro del mismo. Esto se verifica dado que la correlación entre el NDVI máximo anual y el nivel freático del invierno anterior es superior a la de los pozos TPZ-2C y TPZ-8 ($r^2=0,44$), la que disminuye si se considera el nivel freático de verano ($r^2=0,27$).

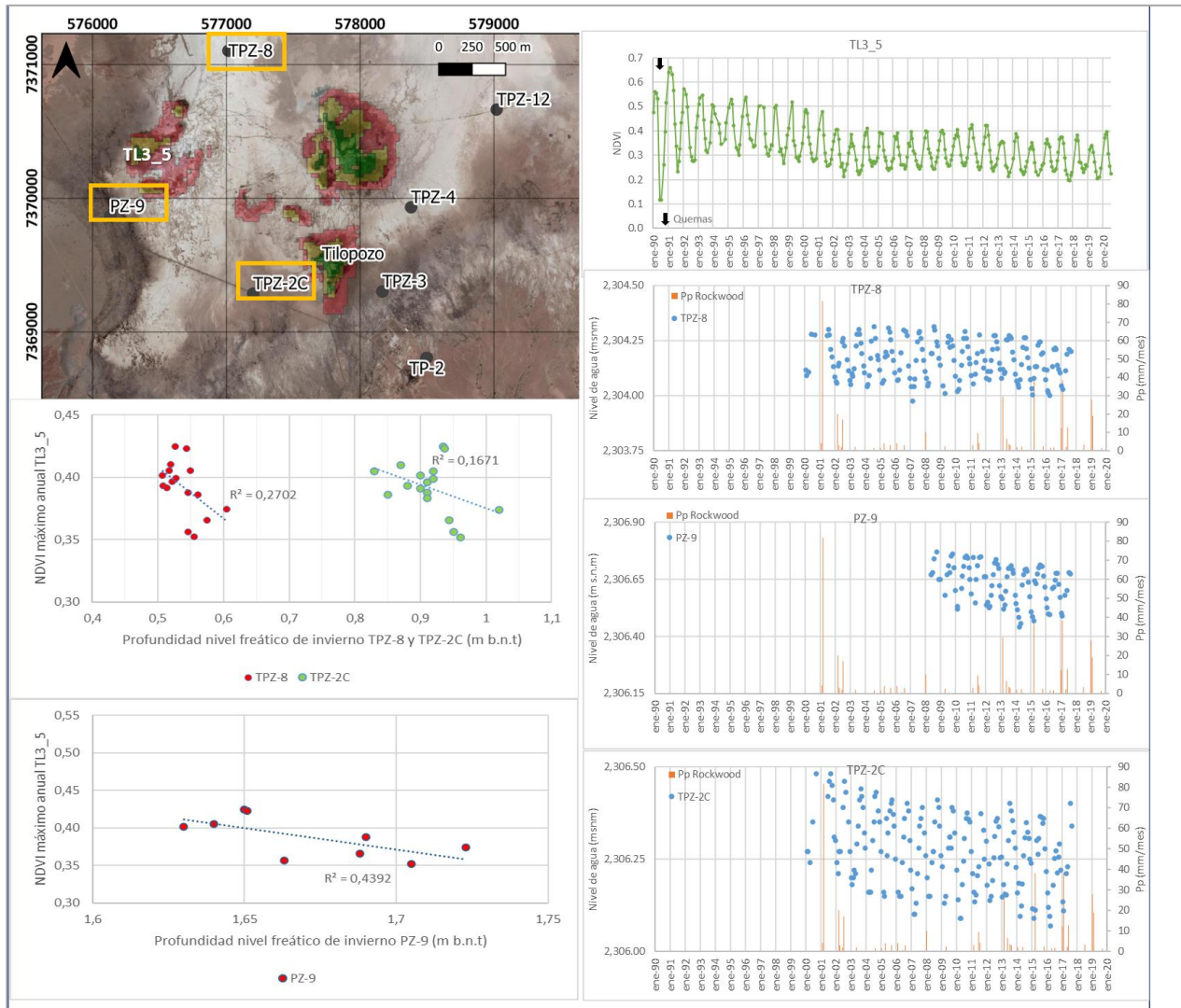
Respecto a lo indicado para el pozo PZ-9, se debe tener presente que se aprecia la existencia de un valor umbral por sobre el cual no se observan cambios del NDVI al profundizarse el nivel freático, que sería del orden de 1,65 m. Para los registros del nivel de invierno más profundos a este umbral, no se observan cambios en el NDVI máximo, al haber cambios en el nivel de agua. Por este motivo, se sugiere extender este análisis con nuevos registros, posteriores a 2017, para verificar la relación entre las variables.

En relación al análisis conjunto de la evolución temporal del NDVI y de la profundidad del nivel freático en los pozos del entorno, en primer lugar se destaca que el NDVI máximo anual en el humedal TL3_5, presentó un descenso entre los años 1991 y 2002, correspondiente al descenso principal del NDVI en el humedal, en todo el período de análisis. Al respecto, cabe tener presente que las extracciones tanto de CMZ (junio de 1995) como de MEL (1998), comenzaron con posterioridad al comienzo del descenso del NDVI y que de acuerdo a registros de pozos ubicados al sur de Tilopozo, el efecto de los bombeos comenzó a manifestarse en el año 2000 (Figura 4-36), aguas arriba de Tilopozo (pozo TP-3, ubicado a 2 km de Tilopozo).

En relación al período 2000-2010, entre los años 2000 y 2008, el pozo TPZ-2C presentó una tendencia decreciente de los niveles, los que bajaron en promedio 10 cm, mientras que en el pozo TPZ-8 hubo un descenso de 7 cm en los niveles mínimos, correspondientes a la época de verano, en la que el NDVI es máximo. En cambio, el NDVI máximo anual del humedal TL3_5 luego de disminuir entre 2000 y 2002, se mantuvo relativamente estable hasta el año 2010. En cuanto al período posterior a 2010, mientras el NDVI presentó una muy leve tendencia decreciente, manteniéndose los valores máximos cercanos a 0,4, el nivel

freático en el pozo PZ-9 mostró una tendencia consistente al descenso hasta 2017, profundizándose el nivel de agua alrededor de 7 cm - 10 cm. Estas diferencias en la temporalidad entre la variación de la profundidad del nivel freático de los pozos analizados y los cambios en el NDVI explican que, aunque se hayan verificado correspondencias entre el NDVI y el nivel freático (entre 2000 y 2020, ambos disminuyen), los coeficientes de correlación r^2 son inferiores a 0,3 para TPZ-2C y TPZ-8 y del orden de 0,4 en PZ-9.

Figura 6-23. Relación entre NDVI en TL3_5 y profundidad del nivel freático en pozos TPZ-8, TPZ-2C y PZ-9.



Fuente: Elaboración propia.

6.3.3.4 Síntesis

De acuerdo a los resultados presentados en los puntos previos, existe una correspondencia entre la profundización generalizada del nivel freático en el entorno de los humedales TL1_5, TL2_5 y TL3_5 y la disminución del NDVI de la vegetación existente en dichos humedales, considerando el período 1990-2020. Sin embargo, al mismo tiempo se observa una baja correlación entre la mayoría de los registros de profundidad y de NDVI. Al respecto, se debe destacar que, para el caso en el que se observa una mejor correlación entre las variables (pozos TP-2, TPZ-8 y TPZ-12, NDVI de humedal TL2_5), la relación desmejora al considerar pozos más cercanos al humedal (TPZ-2C, TPZ-3, TPZ-4) o incluso un pozo ubicado dentro del humedal (Tilopozo), aunque este último presenta una mayor variabilidad en sus registros de profundidad de nivel freático, al estar influenciado por el desarrollo de un bombeo continuo en el tiempo y variable en magnitud.

Situaciones similares a las descritas en el párrafo anterior se obtuvieron en la caracterización de la variación del NDVI en los otros humedales (TL2_1 y TL3_5) y su relación con la profundización del nivel freático en el entorno. En estos además la correlación de los registros fue inferior a la del humedal TL2_5. Cabe destacar que esto no es indicativo de ausencia de relación entre el nivel freático y el NDVI (tal como se señaló, existe una correspondencia en el largo plazo entre la profundización del nivel y la disminución del NDVI), pero da cuenta de que no es del todo claro el efecto que ha tenido a la fecha la reducción de nivel en la pérdida de vigor de la vegetación.

Lo anterior se ve reforzado por la existencia de un aparente desfase de dos a tres años entre los cambios en el nivel freático en el acuífero y en el pozo Tilopozo, que se desconoce cómo se extendería en todo el humedal TL2. Esto coincide con una mejora en la correlación entre la profundidad del nivel freático de invierno y el NDVI máximo anual al considerar este desfase temporal. Cabe señalar que no existe información que permita tener certezas respecto a si esta condición se replica en alguno de los humedales restantes.

Lo señalado da cuenta de que podrían existir condiciones particulares de la dinámica hídrica de este humedal (y posiblemente de algunos de los otros evaluados), las cuales no son posibles de identificar o definir con la información disponible. Dichas condiciones podrían explicar algunos de los resultados obtenidos, como, por ejemplo, que los cambios de NDVI del humedal TL2_5 estén mejor correlacionados con los niveles del pozo TP-2, que con los de los pozos someros TPZ-2C y TPZ-3, ubicados junto al humedal. Así, es de alta relevancia generar información dentro de los humedales que permitan clarificar su dinámica interna, describir la variación en el tiempo de su disponibilidad hídrica y compararla con el estado de la vegetación.

Cabe destacar que la existencia de bajas correlaciones entre el nivel freático en diferentes pozos y el NDVI no solamente tiene relación con la información hídrica disponible, sino que en parte se debe a que el estado de la vegetación y en particular su vigor responde también a otras condicionantes.

Finalmente, es importante destacar la existencia del cono de descenso del nivel freático, que actualmente está avanzando desde el sur (acuífero MNT) hacia la zona de Tilopozo y que ya ha generado descensos del nivel freático en la Zona Marginal. Esto posiblemente genere que la correspondencia identificada entre la profundización del nivel freático y la disminución del NDVI se acentúe en el tiempo, desarrollándose un efecto de causalidad entre la profundización y un desmejoramiento del estado de la vegetación.

En este sentido, se estima que un potencial efecto de la profundización del nivel freático sobre la vegetación sería de **largo plazo**. Esto, considerando que los bombeos en el acuífero MNT comenzaron hace más de 20 años, por lo que, dada la inercia del sistema acuífero, aunque estos se detuvieran, se mantendrá el efecto sobre el nivel freático por un tiempo prolongado, lo que ha sido indicado por ejemplo en el modelo hidrogeológico presentado por MEL en su EIA de 2017. Por este mismo motivo, la prolongación de este efecto sobre la vegetación también se daría en el largo plazo, debido a la imposibilidad de recuperar el nivel base en el corto, mediano y probablemente largo plazo. Por lo mismo, se considera que un efecto de este tipo del nivel freático sobre la vegetación será posiblemente **irreversible** y se extienda por todo el humedal de Tilopozo, afectando en primer lugar a las especies más sensibles (como *Schoenoplectus californicus*).

En este sentido, se debe señalar que en nuestro país existen diferentes casos de humedales altoandinos que se han visto afectados producto de extracciones de agua subterránea y la consecuente profundización del nivel de agua local, como es el caso de los SVAHT de Michincha, Lagunillas, Jachucoposa y Pantanillo, entre otros. A modo de ejemplo, en el caso del humedal Pantanillo, la SMA destaca en su Informe de Fiscalización Ambiental al Proyecto Minero Refugio, en el año 2015 (DFZ-2015-8-III-RCA-IA), que “*el nivel freático se encuentra a una profundidad tal, que no permite que se produzcan afloramientos de agua en el humedal, constatándose una pérdida en la superficie de este del 85%, la cual aumenta progresivamente conforme pasa el tiempo*”. Lo anterior, ha sido calificado como un daño ambiental de carácter irreversible.

7 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las principales conclusiones, haciendo alusión a las temáticas abordadas en cada capítulo, incluyendo el análisis integrado.

7.1 Sobre las variables hídricas

El análisis realizado en este estudio, se focaliza en el humedal de Tilopozo, el cual recibe sus aportes hídricos desde el acuífero MNT. Las principales forzantes que definen la dinámica del acuífero en la zona de Tilopozo y sus cambios en el tiempo corresponden a: evapotranspiración, precipitación (local), presencia de la salmuera que lo subyace y las extracciones de agua dulce-salobre.

En relación con el funcionamiento en Tilopozo:

- El humedal de Tilopozo se alimenta de las aguas provenientes del acuífero MNT, que se extiende hacia el sur por más de 50 km, y cuya recarga se da fundamentalmente en la zona sur, escurriendo de manera subterránea, en dirección S-N hacia el Salar de Atacama. En el Sector del humedal de Tilopozo, el acuífero dulce/salobre se ubica por sobre la salmuera, estando limitado por una interfase salina a través de la cual la mezcla es prácticamente nula, debido a las diferencias de densidad entre los fluidos. En el entorno del humedal de Tilopozo, dicha interfase se encuentra a unos 50 m debajo de la cota de terreno. La salmuera se extiende desde el Núcleo del Salar de Atacama y por debajo del acuífero dulce/salobre hacia el sur.
- La evapotranspiración (EVT), define la dinámica estacional de los niveles freáticos. Los niveles se registran más profundos en verano y más someros en invierno, lo que estaría vinculado a la acción reguladora de la EVT.
- La precipitación regularmente se produce durante el verano. Se ha verificado un incremento en los eventos de alta precipitación (superior a la precipitación promedio anual) en los últimos 10 años, en comparación con los 20 años anteriores. Con respecto a su relación con el nivel freático, la precipitación tiene un efecto local y acotado en el tiempo. Se ha verificado que el efecto en el nivel freático no depende solamente de la magnitud, sino que también de la duración de la precipitación. En particular, y a modo de ejemplo, se observó que una lluvia de 13 mm no generó efecto alguno en el nivel de un pozo somero, mientras que un segundo evento de precipitación, ocurrido 5 días después, de 14 mm, generó un cambio significativo en éste.

En relación con el comportamiento y variación estacional de los niveles:

- En relación a los cambios intranuales en el acuífero de agua dulce-salobre, se tiene que el nivel freático, en los pozos ubicados en el entorno del humedal, presentan variación estacional, con diferencias superiores a 40 cm entre los niveles medidos en invierno y verano, en algunos de los pozos. En comparación con el resto de la Zona Marginal, sin considerar las lagunas, en este sector es donde se genera la mayor variabilidad estacional del nivel freático.
- Desde el punto de vista de la caracterización de los flujos, el humedal de Tilopozo y los sectores adyacentes corresponden a un sistema heterogéneo. Esto, considerando que existen zonas en las que se produce flujos verticales ascendentes, otras cercanas en que existirían infiltraciones, mientras que en otros sectores predominan la componente horizontal de los flujos, siendo la vertical casi nula. Esta diversidad de flujos, condicionan de alguna manera la variabilidad de la profundidad del agua que se evidencia en distintas zonas de los humedales. De acuerdo a una recopilación de registros

puntuales, o de extensión acotada en el tiempo en su mayoría (2011-2014), que se concentran en los humedales TL1 y TL2, la profundidad promedio del nivel freático en diferentes puntos del humedal de Tilopozo varió entre 0 cm y 80 cm.

El humedal TL2, junto al cual se encuentra el pozo Tilopozo, presenta zonas de surgencia, que se pueden apreciar en los puntos de medición superficiales existentes en el humedal, LM-16. De acuerdo a los registros medidos, se estima que el pozo Tilopozo se ubicaría en una zona de flujo vertical ascendente (surgente). La extensión superficial de la zona de surgencia en el humedal se desconoce.

En el pozo Tilopozo, la baja variabilidad estacional reportada para el período 1989 – 1997 (previo al inicio del bombeo), es un indicio de que también podría presentar un flujo vertical ascendente.

En relación con los indicadores de calidad en el humedal (pH y CE):

- Respecto a los registros de CE medidos en el humedal en puntos de agua superficial H (MEL) y LM-16 (Albemarle), ubicados en un mismo sector, sus registros son consistentes, mostrando una muy baja variabilidad (interanual e intranual), estando normalmente en el rango 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Registros de pH en el humedal de Tilopozo (MEL- Golder, 2017) muestran que sus aguas son neutras y que no presentaron una variación temporal significativa en el período 1996-2016. Estos valores son consistentes con los registrados en el punto LM-16, en el cual el pH varió entre 6,8 UpH y 8,0 UpH entre 2016 y 2019.

En relación a los descensos desde el Sur:

- La extracción de aguas desde los campos de pozos Monturaqui y Negrillar ha generado un cono de descenso del nivel freático que avanza desde el sur hacia la Zona Marginal, evidenciado por los descensos detectados en los pozos ubicados en el entorno de las vegas (aguas arriba y aguas abajo de las mismas). Cinco años después del comienzo de la operación de CMZ (1995) y dos años después de la MEL (1998), coincidiendo con un incremento en su extracción de agua desde Monturaqui, se manifestó un descenso en la profundidad del nivel freático en el borde sur del sector Tilopozo, a 2 km del humedal (pozo TP-3).

En los pozos TP-1, TP, 2 y TP-3, ubicados al sur del humedal de Tilopozo, se ha verificado un descenso de los niveles máximo de invierno y mínimo de verano, superior a 20 cm entre 2000 y 2020. En la zona delimitada por los piezómetros TPZ-3 y TPZ-12 (zona humedal Tilopozo), se ha verificado una tendencia de profundización del nivel freático entre los años 2000 y 2017, fundamentalmente en el período de invierno, en donde los descensos variaron entre 10 cm y 20 cm. y en el verano entre 6 y 16 cm. Para la zona intermedia en dirección hacia las lagunas La Punta-La Brava, se verificaron descensos menores a 8 cm. Esta profundización del nivel freático sería una consecuencia del avance del cono de descenso asociado a la extracción de agua desde el sur del acuífero MNT.

Respecto al pozo Tilopozo, los registros de profundidad del nivel freático son concordantes con el caudal extraído en el pozo. Sin embargo, los datos de media móvil de 12 meses del pozo Tilopozo muestran una aparente señal sincrónica con los niveles de los pozos TPZ-2C, TPZ-12 y PZ-9, que se ubican en el entorno a las vegas, pero con un desfase de 2 a 3 años. De lo anterior, se infiere que en la zona de vegas (donde se ubica el pozo Tilopozo), la señal proveniente desde el sur se percibiría más tardíamente. Así, la variación del nivel freático en el pozo Tilopozo respondería tanto al bombeo de Albemarle, como a la variación del nivel en el acuífero, en este caso, con un desfase de algunos

años. La información con la que se cuenta no permite establecer si este desfase se extiende a otros sectores del humedal TL2 y a los otros humedales (TL1, TL3, TL4 y TL5).

También se tiene información de pozo ubicado al norte de pozo Tilopozo, Til-P03, en el borde del humedal TL2, en donde se observa que la dinámica y la tendencia mostrada por su nivel de agua estarían dominadas más por el avance del cono de descenso desde el sur, que por el bombeo desde Tilopozo.

- De las isopiezas o curvas equipotenciales, elaboradas con la información analizada para diferentes años (2000, 2009 y 2016), considerando la máxima cota piezométrica medida en el invierno de cada año respectivo se puede apreciar el descenso en la profundidad del nivel freático en el tiempo, a través del desplazamiento hacia el sur de las isopiezas, que en la zona media del humedal es de un desplazamiento aproximado de 100 m – 200 m entre los años 2000 y 2016.

7.2 Sobre la vegetación

Respecto a los SVAHT del Sector Tilopozo, se delimitaron cinco humedales principales, denominados TL1, TL2, TL3, TL4 y TL5, basado en la metodología implementada por SMA (2020b) y concordante con dichos resultados, logrando identificar tres zonas de distinto vigor al interior de cada humedal, de acuerdo a rangos del índice NDVI (indicador con la mayor disponibilidad temporal de información existente), logrando abarcar el mayor periodo posible 1990-2019), caracterizando así la condición que habría tenido el área de estudio de forma previa a los bombeos en el Salar de Atacama.

- Respecto a la información proveniente desde imágenes satelitales, se obtuvieron 12 series de NDVI históricas para distintas zonas de los Humedales TL1, TL2, TL3, TL4 y TL5, mediante los registros capturados por el sensor Landsat entre los años 1990 y 2020 (así, se incluye el período previo a la explotación del acuífero MNT). De acuerdo a ellas, se obtuvo que en 11 de 12 zonas analizadas, el índice NDVI muestra tendencia al descenso, siendo en 9 de las 12 zonas estadísticamente significativa dicha tendencia. Lo anterior indica una tendencia en el largo plazo a una menor **vigorosidad**.
- De las 12 zonas analizadas, las que han presentado mayor variabilidad (tanto de corto, como de largo plazo) en el NDVI corresponden a las asociadas a la vegetación con mayor vigor (TL1_5, TL2_5 y TL3_5). La vegetación dominante en esas zonas coincide con la de mayor sensibilidad a cambios en la disponibilidad hídrica de las aguas.
- De acuerdo a la información levantada por MEL en cuatro transectas ubicadas entre los bordes de los humedales TL1 y TL2 desde la década de los noventa, se ha observado disminución de la **riqueza** y un comportamiento variado de la **cobertura**. Destaca el caso de la transecta T01, ubicada en el borde norte del Humedal TL2, donde se ha constatado una disminución histórica desde 6 especies como máximo histórico hasta 1 especie como mínimo, pero con un aumento de la cobertura que ha llegado incluso al 100%, lo que sugiere cambios donde algunas especies habrían impuesto su dominancia respecto a otras, o bien que fueron las únicas en adaptarse a las condiciones de habitabilidad existentes.

- Respecto a la distribución espacial de la vegetación, la COT¹⁹ más reciente disponible muestra que los humedales tienen principalmente una fisonomía de vega, que va perdiendo densidad desde el centro de los humedales hasta sus bordes, encontrándose ahí acompañadas en algunos casos de matorrales abiertos. Respecto a las especies, destaca la presencia de *Distichlis Spicata* como una especie que se desarrolla mayoritariamente en los bordes de los humedales, pero que también habita hacia el centro de los mismos, así como de *Baccharis juncea*, *Schoenoplectus californicus*, *Juncus balticus*, como las especies con mayor presencia. En los humedales que cuentan con más información de transectas, se pudo constatar que las especies más hidrófilas, y por ende más sensibles a los cambios de nivel, tienden a ubicarse más hacia el centro de los humedales, lugares donde también se registran los mayores valores de NDVI.
- Se observan dentro de las series de tiempo de NDVI en los humedales TL1, TL2 y TL3, eventos puntuales de baja y posterior alza de NDVI, por fuera de los rangos observados históricamente. Mediante la revisión de detalle de las imágenes que dan origen a estos valores, se constató la presencia de múltiples incendios ocurridos en distintos sectores de los Humedales, lo cual explica el comportamiento observado del índice NDVI. El efecto de las quemaduras pudo ser validado con información de terreno levantada por Albemarle para una de las quemaduras, en el año 2017, para el Humedal TL1, constatándose la pérdida de cobertura producto de la quema, pero el rápido rebrote de vegetación de intenso verdor, la cual al cabo de 6 meses presentó una cobertura del 100% en las transectas registradas.
- Respecto a los antecedentes de riqueza y cobertura de las especies existentes, si bien se cuenta con información propia y de terceros, levantadas mediante el método de las transectas, ésta es limitada espacial y temporalmente. En el caso particular de la información levantada por Albemarle, si bien posee información en la zona de interés (dentro de la zona de mayor vigorosidad), ésta es sólo para un período acotado, desde el 2016 a 2020. En el caso de MEL, que cuenta con información desde la década de los noventa, sus transectas se ubican en su mayoría en las periferias de los humedales. En definitiva, la información disponible no permite desarrollar análisis concluyentes.

7.3 Sobre el análisis integrado

Teniendo en consideración que el informe tiene como objeto de interés los Sistemas Vegetacionales de Tilopozo, las variables consideradas y que pueden generar cambios en la vegetación fueron las prácticas culturales y la disponibilidad hídrica, caracterizada la primera por las quemaduras y la segunda por la precipitación local y el nivel freático. En base a esto, se puede señalar lo siguiente:

- En relación a las **prácticas culturales, referido a las de quemaduras** de la vegetación como manejo de los humedales, las quemaduras realizadas en tres de los humedales estudiados (TL1_5, TL2_5 y TL3_5) han generado un efecto inmediato, **de corto plazo**, de reducción abrupta del NDVI, a valores cercanos a 0 (valores promedio de NDVI muy bajos, entre 0,1 y 0,2). Sin embargo, en el verano siguiente a las quemaduras (corto plazo), en los tres humedales se han observado valores máximos que en general son superiores a los del período previo (máximos de NDVI del orden de 0,5 – 0,6), que se deberían a la aparición de rebrotes, de acuerdo a lo visto en imágenes posteriores al incendio de 2017 en el humedal TL2_5. Posterior a ello, en el **mediano plazo**, en los primeros años que siguen a la quema, se observa una baja progresiva del vigor máximo de la vegetación (no así de los valores

¹⁹ Carta de Ocupación de Tierras (COT) actualizada al año 2020, elaborada por Cedrem Consultores para Albemarle, en el marco del Plan de Manejo Biótico (PMB).

mínimos), que correspondería a un proceso natural de declive de la vegetación. Este efecto de mediano plazo de declive del vigor de la vegetación, luego de alcanzar su valor máximo en forma posterior a la quema, se extendería por algunos años hasta alcanzar una nueva condición de estabilidad o equilibrio o hasta una nueva quema.

- De acuerdo a lo anterior, en lo referente al vigor de la vegetación (NDVI), el efecto observado de la práctica cultural de quema es de corto y mediano plazo. Sin embargo, la ocurrencia regular de 9 eventos de quema en el período 1990-2020 en TL1, habría permitido que los valores máximos anuales de NDVI en TL1_5 se hayan mantenido en el orden o superiores a 0,5. En este caso, la acumulación de numerosos efectos de corto y mediano plazo asociados a cada quema particular, ha permitido mantener una condición del NDVI en el largo plazo (30 años), con un valor máximo superior al de los otros humedales ubicados en el área de estudio. En los humedales TL2_5 y TL3_5, en los que no ha habido quema en los últimos 15 años, actualmente el valor máximo anual de NDVI es del orden de 0,4.
- En relación a las quemaduras y a los efectos que éstas puedan tener en los indicadores de riqueza y cobertura de la vegetación, tal como fuera mencionado la información con la que se cuenta es limitada espacial y temporalmente, por lo que no es adecuado extrapolar una situación particular a toda la zona de un humedal, y no es adecuado sacar conclusiones generales al respecto.

En atención a lo particular, respecto a las dos transectas de Albemarle ubicadas en el humedal TL1 (2016-2020), éstas quedaron dentro de la extensión de la quema ocurrida en el invierno de 2017. De manera posterior al incendio se verificó la aparición de rebrotes, los que permitieron que en el monitoreo posterior al incendio (verano 2018) la cobertura y la riqueza de las transectas se recuperaran a los niveles existentes previos a las quemaduras. Esta situación particular, da cuenta de que es posible la recuperación de cobertura y riqueza luego de una quema, es decir, los efectos podrían ser reversibles. En relación a las transectas de MEL (1999-2019), solamente una se ubica en el borde de uno de los humedales (TL2) y no se cuenta con validación de terreno respecto a la extensión de los incendios y a si efectivamente afectaron a la vegetación ubicada en dicha transecta.

En el caso particular de los incendios ocurridos en el período 2016-2020, la vegetación se recupera, en términos de riqueza y cobertura, en un plazo inferiores a 6 meses, por lo que la frecuencia del monitoreo, respecto al seguimiento de flora y vegetación de Albemarle (PMB) que este se desarrolla con frecuencia semestral, no permite evaluar este proceso de recuperación.

Por lo tanto, los efectos de las quemaduras en riqueza y cobertura no logran ser registradas con la distribución que tienen las transectas y con la frecuencia y oportunidad de aquellas.

- Finalmente, es importante destacar que la posibilidad de rebrotes y recuperación de la vegetación en el humedal posterior a la quema, depende de que el nivel freático se mantenga por sobre una profundidad máxima que permita el desarrollo de las especies.
- En ese sentido, cabe destacar que en los humedales normalmente quemados, que corresponden a los de mayor vigor de acuerdo al NDVI (TL1_5, TL2_5 y TL3_5), la especie dominante corresponde a *S.californicus*., especie que se desarrolla en zonas con nivel freático somero.
- De la información de **profundidades** medidas en la zona de los humedales, se obtuvo un mapa de valores promedios en el periodo 2011-2014 característicos de la profundidad del nivel freático en

diferentes sectores del humedal Tilopozo. Los registros muestran que existe información más concentrada en TL1 y TL2 y en el caso de los humedales TL4 y TL5 no existen datos de la profundidad del nivel freático, mientras que en humedal TL3 solamente se cuenta con datos de un pozo somero (de profundidad 32,4 cm). El rango de profundidades es muy variable en la zona, obteniendo desde surgencias (0 cm) hasta profundidades de 85 cm en TL2, y de 72,6 cm en TL1.

Relacionado con la presencia de especies (utilizando como indicadores su cobertura y la altura de los individuos), y la profundidad del nivel freático de información del año 2011, generadas a partir de información levantada por MEL en el Sector Tilopozo, se observa que las especies *S.californicus* y *J.balticus* son las que se ubican de manera exclusiva en las zonas más someras, en rangos de profundidad del nivel freático más acotados (hasta 50 y 60 cm en su mayoría); mientras que *D.spicata* y *T. absinthioides* están presentes en sectores en los que el nivel freático presenta las mayores profundidades registradas, de hasta 180 cm e incluso superiores en el caso de la segunda.

- En lo que respecta a los efectos de la **precipitación** en el entorno de Tilopozo, sobre el NDVI medido en el humedal, estos serían principalmente de corto plazo. En ese sentido, cabe señalar que el período en el que se concentra la precipitación, normalmente coincide con el período en el que el NDVI es máximo (enero – marzo). Sin embargo, los registros de NDVI en años lluviosos no han mostrado incrementos del índice en estos años, ni tampoco es claro el efecto de la disminución de precipitación en el NDVI en períodos secos. Además, se estima que posiblemente las quemas frecuentes puedan “enmascarar” en parte los efectos de la precipitación sobre la vegetación. Por lo anterior, a la escala de análisis local y de mediano plazo, no se observa una relación directa entre la precipitación y su efecto sobre la NDVI.
- Respecto al **nivel freático y su relación con cambios en el NDVI**, la tendencia general de disminución del valor máximo anual del NDVI en la mayoría de los humedales analizados, en particular en los humedales TL2_5 y TL3_5, es coincidente con la tendencia a la profundización del nivel freático. Considerando como indicador de este último a la profundidad del nivel freático del período de invierno (cotas máximas anuales), en general existe correspondencia entre la disminución del NDVI máximo anual y la profundización del nivel freático. Sin embargo, al intentar establecer una relación numérica lineal entre ambas variables, el coeficiente de correlación r^2 en la mayoría de los casos es inferior a 0,2-0,4.
- En el caso particular del **humedal TL1_5**, al analizar la relación entre el NDVI y las profundidades en pozos aledaños, se tiene en el caso del pozo TPZ-4 y TPZ-12, se tiene para ambos pozos que la relación entre la profundidad del nivel freático y la variación del NDVI máxima anual en TL1_5 presenta un coeficiente de correlación r^2 inferior a 0,2. Considerando que en este humedal, en el periodo analizado hubieron eventos de quemas, se estima que posiblemente los efectos de las quemas en la vegetación pudieran “enmascarar” en parte los efectos de la variación del nivel freático.
- En el caso del **humedal TL2_5**, donde se ubica el pozo Tilopozo, se verificó que la mejor relación entre el NDVI máximo anual y la profundidad del nivel freático en invierno sería con el pozo TP-2 (coeficiente de correlación $r^2=0,6$), ubicado a unos 500 m al sur del borde sur del humedal. En cambio, pozos ubicados con mayor cercanía (TPZ-2, TPZ-3C) mostraron correlaciones menores, correspondiendo el coeficiente de correlación en el caso del pozo TPZ-2 a $r^2=0,2$. Asimismo, no se verificó una correspondencia entre el nivel del pozo Tilopozo y el NDVI del humedal.

En el mismo humedal, además se verificó que al considerar un desfase de dos años entre el nivel freático y el NDVI máximo anual, hubo una mejora en la correlación en algunos pozos (por ejemplo, TP-2, TPZ-2, TPZ-8, TPZ-12). Esto es coincidente con el desfase de 2-3 años que aparentemente existiría entre la variación de la media móvil de 12 meses del nivel del pozo Tilopozo y del nivel de pozos ubicados en el entorno del humedal de Tilopozo.

Lo anterior da cuenta de que los resultados podrían estar, al menos en parte, asociados a condiciones particulares de la dinámica hídrica del humedal de Tilopozo (en particular TL2), las que con la información disponible no son posibles de definir. Del mismo modo, se desconoce si estas condiciones particulares se replican en los otros humedales. Adicionalmente, los valores obtenidos del coeficiente de correlación (r^2), también darían muestra de que los cambios en la vegetación están asociados a la existencia de otros factores externos (o internos), además de la profundidad del nivel del agua, como efectos de mediano plazo de las quemas u otros no evaluados en este estudio (cambios en la concentración de nutrientes y salinización del suelo, cambios en la superficie de surgencia, entre otros).

Por lo tanto, para el humedal TL2_5, período 2007-2020, las correlaciones más altas se obtienen para los pozos más alejados, entre las profundidades de invierno y las NDVI máximas anuales, se presentaron para los pozos más alejados, TP-2, TPZ-8, TPZ-12. pero no se verifica el mismo comportamiento para los pozos más cercanos (TPZ-2C, TPZ-3, Tilopozo y TPZ-4). La tendencia general del nivel freático es a la baja, lo que es concordante con el NDVI, sin embargo, es notorio que no hay necesariamente coincidencia en el tiempo en el que se producen los cambios, en particular en los pozos más cercanos al humedal, por lo que, aunque existe correspondencia en los cambios de NDVI y profundidad del nivel freático, la correlación entre éstas es baja.

- Para el **humedal TL3_5**, en general, las diferencias en la temporalidad entre la variación de la profundidad del nivel freático de los pozos analizados y los cambios en el NDVI explican que, aunque se hayan verificado correspondencias entre ambas variables, considerando todo el período de análisis (2000-2020), los coeficientes de correlación r^2 son del orden o inferiores a 0,4.

Finalmente, cabe indicar que, a través del presente estudio se evidencia la existencia del cono de descenso del nivel freático, que actualmente está avanzando desde el sur (acuífero MNT) hacia la zona de Tilopozo y que ya ha generado descensos del nivel freático en la Zona Marginal. Esto posiblemente genere que la correspondencia identificada entre la profundización del nivel freático y la disminución del NDVI se acentúe en el tiempo, desarrollándose un desmejoramiento del estado de la vegetación.

En este sentido, se estima que un potencial efecto de la profundización del nivel freático sobre la vegetación sería de largo plazo. Esto, considerando que los bombeos en el acuífero MNT comenzaron hace más de 20 años, y dada la inercia del sistema acuífero, aunque estos se detuvieran, se estima que el efecto sobre el nivel freático se mantendría por un tiempo prolongado, lo que ha sido indicado en el modelo hidrogeológico presentado por MEL en su EIA de 2017. Por este mismo motivo, la prolongación de este efecto sobre la vegetación también se daría en el largo plazo, debido a la imposibilidad de recuperar el nivel base en el acuífero, en el corto, mediano y largo plazo. Por lo mismo, se considera que un efecto de este tipo del nivel

freático sobre la vegetación será posiblemente irreversible y afectaría a todo el humedal de Tilopozo, lo que se evidenciaría primero en las especies más sensibles, como *Schoenoplectus californicus*.

8 RECOMENDACIONES

En base a la información recopilada y analizada, se realizan las siguientes recomendaciones tendientes a mejorar el grado de conocimiento en el sector de Tilopozo, en particular en sus humedales.

- Respecto al estudio de la vegetación, los análisis realizados dan cuenta de la falta de información para representar en detalle los humedales TL1 a TL5, por lo que se sugiere incorporar transectas en cada uno de ellos, para capturar su riqueza y cobertura semestralmente. Adicionalmente, se recomienda implementar cuatro transectas que acompañen a las transectas T01, T02, T03 y T04 de MEL, de modo de contar con registros propios en los únicos sitios donde existe data histórica en Tilopozo.
- Respecto a los análisis de teledetección, los análisis realizados relevan la importancia de contar con validación en terreno. El uso de imágenes Landsat (Media Resolución), implica que, en formaciones de baja densidad, un pixel capte una mezcla entre suelo y vegetación, cuya respuesta espectral no necesariamente esté indicando una característica propia sólo de la vegetación. En ese sentido, la validación en terreno es fundamental, lo que queda de manifiesto, por ejemplo, en el análisis de quemas en el Humedal TL1, con respecto a los registros de vegetación. En este caso, se verificó que la quema produce inmediatamente una baja significativa del NDVI, valor que, de no ser contrastado con información de terreno, puede ser confundido con un outlier, y dejado fuera del análisis. Posterior a los incendios, se produce un rebrote muy rápido, que repercute en un crecimiento de vegetación de intenso verdor, característica que es captada por el sensor satelital, y que repercute en un alto valor de NDVI, muy por sobre el rango de variabilidad histórica, valor que podría también ser erróneamente asumido como un outlier.
- Se recomienda hacer un seguimiento de la evolución de un humedal, luego de producido una quema en el mismo, que incluya el levantamiento de información cualitativa y cuantitativa de vegetación y suelo (humedad, nutrientes, salinidad, entre otros). En este sentido, para el estudio y seguimiento del efecto de las quemas en la vegetación, se sugiere que el monitoreo de las transectas sea a lo menos estacional.
- En lo referente a la quema y a un potencial efecto de ésta, se debe tener presente que es posible que esta práctica traiga consigo una degradación del suelo, como ha sido verificado en otras prácticas que se podrían asemejar. Al respecto, Amaya y col., 2019 reportan que la extracción de champá desde los primeros centímetros de suelo, genera la pérdida de porciones muy fértiles de suelo superficial (top soil), junto con el banco de semillas y otros propágulos como raíces, rizomas, tallos gemíferos y bulbos. Se sugiere estudiar este potencial efecto, ya que actualmente no hay información que permita afirmar que esto se haya verificado, o no, en Tilopozo.
- Complementariamente, se sugiere incorporar nuevos puntos de observación del nivel freático dentro de los cinco Humedales, especialmente en el caso del Humedal TL2_5, donde se ubica el pozo de extracción Tilopozo. Esto permitirá verificar los potenciales efectos que el bombeo realizado en dicho pozo tiene sobre el nivel freático que alimenta el humedal y aumentar el grado de conocimiento respecto a la dinámica hídrica del sistema Humedal de Tilopozo. Al respecto, se sugiere ver la posibilidad de habilitar los pozos TIL-P01 y TIL-P02, utilizados en la prueba de bombeo del pozo Tilopozo.

- Considerando el avance de un cono de depresión desde el sur de Tilopozo, se recomienda la construcción de un pozo somero en el borde sur del humedal TL2_5, de modo que Albemarle genere información propia respecto a la evolución de dicho efecto en tiempo real. Se sugiere instalar un sensor para medir la variación de la profundidad del nivel freático en el mismo.
- Se sugiere realizar una campaña de monitoreo para identificar las zonas de surgencia que se producen en los humedales TL1_5, TL2_5 y TL3_5, definir su extensión y evaluar su variación en el tiempo.
- Con el objetivo de incrementar el conocimiento del estado de los humedales del Sector Tilopozo, se recomienda incorporar puntos de monitoreo de evapotranspiración en éstos.
- Se sugiere que, en el caso de realizar una prueba de bombeo, este sea en el período de verano, que incluya los pozos someros Til-P01, Til-P02, considerados en la prueba de bombeo original, pero actualmente no monitoreados e incluir al menos un pozo somero hacia el sur y el este del pozo de bombeo. La realización de la prueba de bombeo debe contemplar que en el comienzo los pozos utilizados estén en condiciones de no afectación de su nivel freático, como causa de la operación del pozo Tilopozo, es decir, el pozo debiera dejar de estar operativo al menos unos días previos a la prueba y debe extenderse hasta que todos los pozos alcancen una condición de equilibrio.
- Se sugiere verificar la información con la que se cuenta de profundidad del nivel freático en el pozo Tilopozo. En particular, en la Adenda 2 del EIA Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama se presentan registros desde el año 1989 para dicho pozo (no obstante el bombeo comenzó el año 1997), sin embargo la base de datos de Albemarle presenta registros desde 2001.

9 REFERENCIAS

- Ahumada, M. y Faúndez, L., 2009. Guía Descriptiva de los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres de la Ecorregión Altiplánica (SVAHT). Ministerio de Agricultura de Chile, Servicio Agrícola y Ganadero. Santiago. 118 p.
- Albemarle-Cedrem, 2020. Plan de Seguimiento Ambiental Biótico – PMB. Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama RCA N°21/2016”.
- Albemarle -Cedrem, 2017. Diagnóstico Área Afectada por Incendio, Sector de Tilopozo, en el contexto del “Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Estudio realizado por Cedrem Consultores para Albemarle.
- Albemarle -HIDROMAS, 2020a. Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama. Informe Anual N° 4, período Enero – Diciembre 2019. Estudio realizado por HIDROMAS para Albemarle.
- Albemarle -HIDROMAS, 2020b. Determinación de Evapotranspiración en Salar de Atacama, Campaña de Diciembre de 2019. Proyecto PSAH-2019. Minuta #1/2020. Estudio realizado por HIDROMAS para Albemarle.
- Albemarle -SGA, 2019. Primera Actualización del Modelo de Flujo de Agua Subterránea en el Salar de Atacama Según RCA 21/2016. Informe de Actualización a Septiembre de 2018. Estudio realizado por SGA para Albemarle.
- Amaya, N. E., D.E. Blanco, A. F. Chamorro Cuestas, J. M. Gonnet, C. Hegoburu y H. J. Sosa. 2019. Conservación y manejo de vegas altoandinas en Argentina y Perú. Dos estudios de caso. Fundación Humedales/Wetlands International. Buenos Aires, Argentina.
- CEA, 2017. Modelo de Respuesta Vegetacional. Anexo IV.2, Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Monturaqui. Preparado para Minera Escondida Limitada.
- CEA, 2012. Caracterización de la Vegetación y Análisis de su Relación con el Medio Físico, Sector Sur del Salar de Atacama – Sector Tilopozo. Anexo B, del Anexo IV.2: Modelo de Respuesta Vegetacional, Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Monturaqui. Preparado para Minera Escondida Limitada.
- CMZ-GAC, 2019. Estudio de Impacto Ambiental Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar. Adenda 1. Estudio realizado por GAC para Compañía Minera Zaldívar (CMZ).
- CMZ-SGA, 2018. Estudio de Impacto Ambiental Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar. Estudio realizado por SGA para Compañía Minera Zaldívar (CMZ).
- Cerrón, J,; Del Castillo, J., Mathez-Stiefel, S., Evert, T. Lecciones aprendidas de experiencias de restauración en el Perú. Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre de Perú (SERFOR), Biodiversity International y World Agroforestry Centre, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety, Germany.2017.

- DGA-HIDROMAS, 2014. Informe “Diagnostico y Sistematización de información de Planes de Alerta Temprana Vigentes con condicionamiento de derechos”. Informe Final Volumen I y Anexos. S.I.T. N°336, DGA-HIDROMAS CEF.Ltda. Abril 2014.
- DGA, 2001. Resolución DGA N° 1972/2001 que aprueba el Plan de alerta Temprana para el acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. II Región, Antofagasta. DGA julio 2001.
- Earle, L., Warner, B., Aravena, R. 2003. Rapid development of an unusual peat-accumulating ecosystem in the Chilean Altiplano. Quaternary Research 59. Pp 2-11.
- Gonnet, J., Lopez, C. Aranibar, D., Lictevoud, E. Manual introductorio al manejo de vegas y bofedales mediante prácticas tradicionales de culturas andinas en el norte de Chile. Corporación Norte Grande, 2016.
- HIDROMAS, 2017. Análisis de Zona de Prohibición para Acuífero Monturaqui Negrillar Tilopozo. Estudio realizado por HIDROMAS para Rockwood Lithium.
- ICMM, 2006. Guía de Buenas Prácticas para la Minería y la Biodiversidad. Consejo Internacional de Minería y Metales. ISBN: 978-0-9553591-6-3.
- MEL, 2020. Informe Anual Monitoreo Ambiental EIA “Lixiviación Óxidos de Cobre y Aumento de la Capacidad de Tratamiento de Mineral sulfurado”. Período Año 2019.
- MEL-Golder Associates, 2017. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Monturaqui. Estudio realizado por Golder Associates para Minera Escondida Limitada (MEL).
- MEL-CEA, 1996. Estudio de la Respuesta al Stress Hídrico de las Plantas del Sector Sur del Salar de Atacama”. Trabajo realizado por Centro de Ecología Aplicada (CEA) para Minera Escondida, septiembre 1996.
- MMA-CEA, 2015. Inventario Nacional de Humedales. Ministerio del Medio Ambiente, 2015.
- MMA-EDÁFICA, 2020. Inventario Nacional de Humedales. Ministerio del Medio Ambiente, 2020.
- RWL-SGA, 2015. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama, Adenda 5, Anexo 1. Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama. Estudio realizado por SGA para Rockwood Lithium.
- SCL-GAC, 2009. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama, Adenda 2. Trabajo realizado por GAC para SCL.
- SMA, 2015. Informe de Fiscalización Ambiental al Proyecto Minero Refugio, en el año 2015 (DFZ-2015-8-III-RCA-IA).
- SMA, 2020a. Res. Ex. 1312/2020. Requiere Información que Indica e Instruye la Forma y el Modo de Presentación de los Antecedentes Solicitados a Albemarle Ltda.

-
- SMA, 2020b. Informe Técnico de Fiscalización Ambiental DFZ-2019-309-II-RCA. Fiscalización Ambiental Minera Escondida. Superintendencia del Medio Ambiente, abril de 2020.
- Soto, J., Román-Figueroa, C., and Paneque, M. 2019. A Model for Estimating the Vegetation Cover in the High-Altitude Wetlands of the Andes (HAWA). Land 2019, 8, 20.
- SQM, 2020. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama.
- Villagrán, C., Romo, M., & Castro, V., 2003. Etnobotánica del sur de Los Andes de la primera región de Chile: un enlace entre las culturas altiplánicas y las de quebradas altas del Loa superior. Chungará, Arica, Vol. 35(1). Pág: 73-124.