

Anexo 7. Análisis de la dinámica vegetacional en el Borde Este del Salar de Atacama en el periodo 2006-2022

Proyecto Cambios y Mejoras en la Operación Minera del Salar de Atacama

Región de Antofagasta

Anexo 7. Análisis de la dinámica vegetacional en el Borde Este del Salar de Atacama en el periodo 2006-2022
SQMSL667_2.INF1.ANX7.REVB. Proyecto Cambios y Mejoras en la Operación Minera del Salar de Atacama

Rev.	Id	Ejecutor	Revisor	Aprueba	Descripción
B	Nombre	CI	IZ	IZ	Anexo 7. Rev. (B)
	Fecha	28.03.2023	06.04.2023	06.04.2023	
0	Nombre	IZ	IZ	IZ	Anexo 7. Rev. (0)
	Fecha	14.04.2023	14.04.2023	14.04.2023	

Contenido

1	Introducción	5
2	Metodología.....	5
2.1	Descripción del área de estudio	5
2.2	Procesamiento de imágenes satelitales.....	7
2.2.1	Re-escalamiento para uso científico	8
2.2.2	Cálculo de índice espectral (NDVI)	9
2.2.3	Corrección de bandeo en escenas Landsat 7.....	12
2.2.4	Asignación de valores NDVI	1
2.3	Análisis de tendencia de la actividad vegetal.....	2
2.4	Análisis de la relación de actividad vegetal con el nivel freático	3
3	Resultados	5
3.1	Análisis de tendencia de la actividad vegetal.....	5
3.2	Análisis de la relación de actividad vegetal con el nivel freático	9
4	Conclusiones.....	11
5	Referencias	12

Tablas

Tabla 2-1.	Coordenadas de los vértices área de estudio	7
Tabla 2-1.	Rango del espectro electromagnético de la serie Landsat	7
Tabla 2-2.	Imágenes utilizadas para los análisis Landsat SR (nivel 2)	8
Tabla 2-3.	Escenas Landsat SR (nivel 2) sometidas a relleno y set de imágenes complementarios para reemplazo	13
Tabla 3-1.	Superficie y participación porcentual de los tipos vegetacionales estables o con tendencia positiva o negativa en el Periodo Operacional (2006 - 2021).	8
Tabla 3-2.	Indicadores estadísticos de los análisis de relación profundidad de la napa - NDVI en unidades con tendencia a la baja en el periodo 2006-2021.....	10

Figuras

Figura 2-1.	Ubicación del área de estudio y sus vértices.	6
-------------	--	---

Figura 2-2. Relación de porcentaje de cobertura de vegetal obtenida en terreno mediante transectos y valores medios de NDVI obtenidos del análisis de imágenes. Borde Este del Salar de Atacama.....	10
Figura 2-3. Ejemplo de corrección del bandeo en el NDVI 2019 mediante el reemplazo de pixeles de escena próxima.....	1
Figura 2-4. Ejemplo de Sobreposición de unidades vegetacionales con la imagen falso color convencional.....	2
Figura 2-5. Ejemplo gráfico de relaciones profundidad-NDVI con y sin sentido biológico.....	5
Figura 3-1. Promedio de los valores NDVI del área cubierta con vegetación en el Borde Este del Salar de Atacama en el periodo operacional (2006 – 2021)	6
Figura 3-2. Valores promedios NDVI de unidades con tendencia a la baja para cada tipo vegetacional en el periodo operacional (2006-2021).....	6
Figura 3-3. Valores promedios NDVI de unidades con tendencia al alza para cada tipo vegetacional en el Periodo Operacional (2006-2021)	7
Figura 3-4. Distribución de área con tendencia en el Periodo 2006-2021.....	9

Apéndices

Apéndice 1. Coeficientes estadísticos de los análisis de tendencia

1 Introducción

El presente informe tiene por objetivo analizar la evolución temporal de la vegetación entre los años 2006 al 2022, correspondiente al periodo operacional del Proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera del Salar de Atacama”, aprobado por RCA 226/2006.

La evaluación de la dinámica de la vegetación se realizó mediante el análisis de tendencia de los valores NDVI de cada una de las unidades vegetacionales que componen el Borde Este del Salar de Atacama. El índice NDVI es reconocido como uno de los indicadores más útiles para el estudio de la dinámica de la vegetación, siendo una medida cuantitativa de la actividad fotosintética de las plantas. En efecto, la utilización del índice NDVI se debe a la buena relación con la cobertura, y a que es un indicador válido y usado universalmente para el monitoreo de vegetación en diversas situaciones y ambientes (SMA, 2020, Soto et al., 2019; Li et al., 2018; Wilson y Norman, 2018, Meneses-Tovar, 2011, Aguilar et al., 2010). Los valores NDVI se calcularon a partir de Imágenes Landsat con reflectividad de superficie (Landsat nivel 2) capturadas en abril, aplicando las mismas exigencias establecidas en la RCA 226/2006.

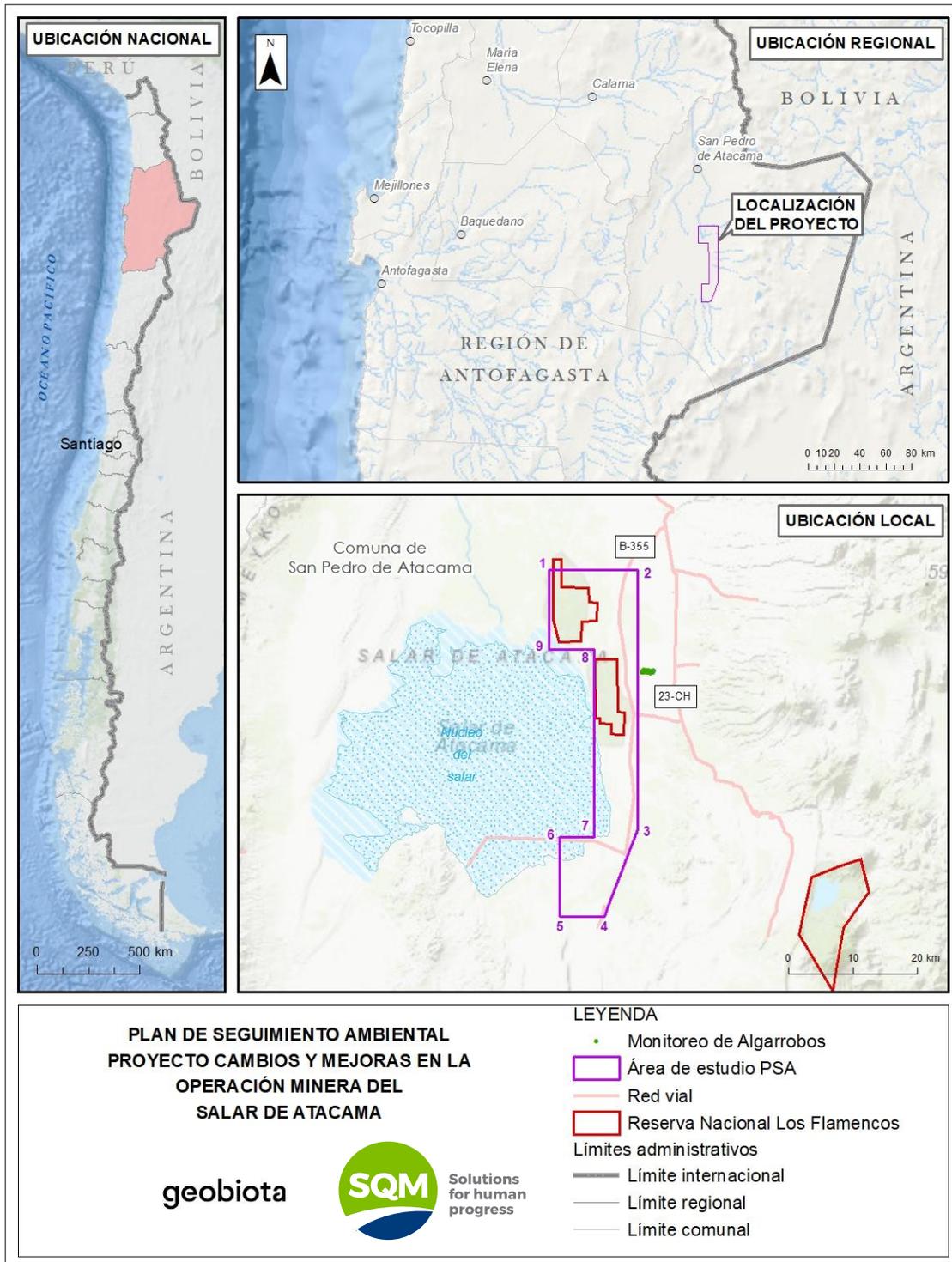
2 Metodología

El análisis y evaluación de la dinámica temporal de la vegetación en el periodo operacional se efectuó mediante técnicas estadísticas de regresión lineal y análisis de imágenes satelitales, cuyos procedimientos se detallan a continuación.

2.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio del presente informe corresponde al área definida en el Plan de Seguimiento Ambiental Biótico (PSAB) del Borde Este del Salar de Atacama según lo establecido en la RCA 226/2006. Este sector se encuentra delimitado por los vértices que se muestran en la Figura 2-1 y Tabla 2-1.

Figura 2-1. Ubicación del área de estudio y sus vértices.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-1. Coordenadas de los vértices área de estudio

Vértice	Coordenadas UTM Huso 19 (WGS84)	
	Este	Norte
1	582.808	7.425.804
2	596.515	7.425.821
3	596.515	7.385.560
4	591.414	7.372.165
5	584.453	7.372.165
6	584.459	7.384.418
7	589.807	7.384.416
8	589.811	7.413.519
9	582.811	7.413.519

Fuente: Elaboración propia

En vista que se pretende evaluar la evolución temporal de la vegetación, se utilizó como unidad de análisis las 1.639 unidades vegetacionales identificadas en el área de estudio según el mapa elaborado en el marco del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) del Proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” (RCA N° 226/2006) correspondiente al año 2022 a una representación escala 1:50.000. Es necesario indicar que se descartaron las unidades que no posean elementos vegetales, como el Núcleo del Salar, la Zona Marginal de Salar y los cuerpos de aguas, por no ser parte de los objetivos de este análisis.

2.2 Procesamiento de imágenes satelitales

Con el propósito de analizar la dinámica de la vegetación entre el 2006 y 2022, se utilizaron imágenes multiespectrales Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM dentro de ese periodo. Las imágenes utilizadas fueron obtenidas durante el mes de abril de cada año, tal como se estableció en el RCA 226/2006.

Se obtuvieron 17 imágenes satelitales multiespectrales Landsat 5 TM o Landsat 7 ETM nivel 2 (con reflectividad en superficie) de acuerdo con su disponibilidad. Cabe que indicar que el área de estudio se cubrió por una sola escena, correspondiente al path-row: 233-076.

Todos estos sensores poseen una resolución de 30 m en el espectro visible y en el infrarrojo cercano, cuyo rango de distribución del espectro electromagnético para cada satélite se presenta en la siguiente Tabla:

Tabla 2-2. Rango del espectro electromagnético de la serie Landsat

Banda	Landsat 5 (TM)	Landsat 7 (ETM)
Banda 1 (Azul)	0,45 – 0,52	0,45 – 0,52
Banda 2 (Verde)	0,52 – 0,6	0,52 – 0,60
Banda 3 (Rojo)	0,63 – 0,69	0,63 – 0,69

Tabla 2-2. Rango del espectro electromagnético de la serie Landsat

Banda	Landsat 5 (TM)	Landsat 7 (ETM)
Banda 4 (Infrarrojo)	0,76 - 0,90	0,77 - 0,90

Fuente: USGS, 2020

Los sensores e ID de cada escena utilizada en el set de imagen Landsat Nivel 2 (SR), se presenta a continuación:

Tabla 2-3. Imágenes utilizadas para los análisis Landsat SR (nivel 2)

Año	Imágenes Landsat SR - nivel 2		
	ID	Sensor	Fecha de adquisición
2006	LT05_L2SP_233076_20060409_20200901_02_T1_SR	Landsat 5	09-04-2006
2007	LT05_L2SP_233076_20070428_20200830_02_T1_SR	Landsat 5	28-04-2007
2008	LT05_L2SP_233076_20080414_20200829_02_T1_SR	Landsat 5	14-04-2008
2009	LT05_L2SP_233076_20090417_20200828_02_T1_SR	Landsat 5	17-04-2009
2010	LE07_L2SP_233076_20100412_20200911_02_T1_SR	Landsat 7	12-04-2010
2011	LT05_L2SP_233076_20110423_20200822_02_T1_SR	Landsat 5	23-04-2011
2012	LE07_L2SP_233076_20120401_20200909_02_T1_SR	Landsat 7	01-04-2012
2013	LE07_L2SP_233076_20130404_20200907_02_T1_SR	Landsat 7	04-04-2013
2014	LE07_L2SP_233076_20140423_20200906_02_T1_SR	Landsat 7	23-04-2014
2015	LE07_L2SP_233076_20150426_20200904_02_T1_SR	Landsat 7	26-04-2015
2016	LE07_L2SP_233076_20160412_20200902_02_T1_SR	Landsat 7	12-04-2016
2017	LE07_L2SP_233076_20170415_20200831_02_T1_SR	Landsat 7	15-04-2017
2018	LE07_L2SP_233076_20180402_20200829_02_T1_SR	Landsat 7	02-04-2018
2019	LE07_L2SP_233076_20190421_20200825_02_T1_SR	Landsat 7	21-04-2019
2020	LE07_L2SP_233076_20200407_20200822_02_T1_SR	Landsat 7	07-04-2020
2021	LE07_L2SP_233076_20210410_20210506_02_T1_SR	Landsat 7	10-04-2021
2022	LE07_L2SP_233076_20220328_20220423_02_T1_SR	Landsat 7	28-04-2022

Fuente: Elaboración propia

2.2.1 Re-escalamiento para uso científico

La característica técnica de la serie Landsat nivel 2 es que cuenta con escenas multiespectrales con información de reflectancia en superficie (USGS, 2021), al incorporar la corrección de los efectos de la dispersión y absorción temporal de los gases atmosféricos, aerosoles y vapor de agua. Esta corrección es realizada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), mediante la aplicación del algoritmo LaSRC versión 1.5.0

sobre imágenes Landsat 8 (OLI) y el algoritmo Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS) (Versión 3.4.0) sobre imágenes Landsat 4-5 (TM) y Landsat 7 (ETM+) (USGS, 2021).

De acuerdo con las indicaciones de la USGS, para el efectivo uso científico de las imágenes Landsat Nivel-2, a las imágenes se debe aplicar un factor de escala y un desplazamiento adicional, cuyos valores corresponden a 0,000275 y -0,2 por cada píxel, respectivamente. Con este re-escalamiento los valores de reflectancia de las imágenes variarán entre -1 y 1.

2.2.2 Cálculo de índice espectral (NDVI)

Los índices de vegetación son combinaciones de bandas que permiten realzar y representar de manera precisa la cobertura vegetal. Estos índices se calculan a partir de valores de reflectividad a distintas longitudes de onda, pero debido al particular comportamiento radiométrico, comúnmente se utilizan las zonas espectrales del rojo (0,6 a 0,7 micras) e infrarrojo cercano (0,7 a 0,9 micras). Cuanto mayor sea el contraste entre la banda infrarroja (IR) y roja (R), mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada. Bajos valores de contraste indicarían una vegetación enferma o senescente, hasta llegar a las cubiertas sin vegetación, que ofrecen un contraste muy pequeño (Chuvienco, 2002).

En este principio físico se apoya una amplia gama de Índices de vegetación, entre los cuales, para esta parte del estudio es de especial interés el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Este índice permitió, por un lado, identificar a priori la actividad fotosintética de la vegetación.

El NDVI varía entre -1 y 1, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC}(x, y) - \rho_R(x, y)}{\rho_{IRC}(x, y) + \rho_R(x, y)} \quad (\text{Chuvienco, 2002}).$$

Donde:

ρ_R : Reflectancia en la banda del rojo

ρ_{IRC} : Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

En el análisis píxel a píxel, los valores del NDVI varían entre -1 y 1. En términos prácticos, se considera que valores sobre 0,1 podrían considerarse como vegetación (Chuvienco, 2002). Sin embargo, este valor es meramente referencial, por cuanto depende directamente a la influencia del suelo de fondo, el cual depende principalmente de la arquitectura del dosel, cobertura vegetal, estado fenológico y estado fitosanitario (Aguilar et al, 2010; Chuvienco, 2002).

En líneas generales, el NDVI se considera un buen estimador de la biomasa, usándose constantemente en la evaluación del contenido de clorofila en la hoja, contenido de humedad en la hoja, productividad neta de la vegetación e índices de área foliar, fenología y la cobertura de la vegetación, entre otras (SMA, 2020, Soto et al., 2019; Li et al., 2018; Wilson y Norman, 2018, Meneses-Tovar, 2011, Aguilar et al., 2010, Chuvienco, 2002).

Es así como en estudios de cobertura de la vegetación, se han identificado altas correlaciones entre el valor NDVI y el porcentaje de cubierta verde, lo que resulta lógico dado que ambas variables se vinculan a través de los mecanismos típicos de las plantas (Chuvienco, 2002).

Esta afirmación se ratifica al contrastar valores NDVI de la serie Landsat con la cobertura vegetal medida en terreno en el Borde Este del Salar de Atacama en el contexto del Monitoreo de Indicadores de Estado Biótico. Al respecto, se verifica una relación estadísticamente significativa entre las variables ($p < 0.05$) y con niveles de ajuste (R^2) que varían entre los 0,7 y 0,87, lo que evidencia la estrecha relación entre la cobertura vegetal y los valores de NDVI, conforme a lo expuesto en la Figura 2-2.

El Monitoreo de Indicadores de Estado Biótico consiste en la medición de cobertura vegetal a partir de 22 conglomerados en terreno, cada uno de las cuales está compuesta por tres transectos de 100 m (66 transectos en total) en los cuales se realizaron registros cada 10 cm (Point Quadrat). Esto permite determinar de manera precisa, tanto la cobertura de la vegetación como la composición de especies vegetales presentes. En este sentido, la cobertura de la vegetación expresada de manera porcentual (%) se determinó en base al total de registros con presencia de plantas, respecto del total de observaciones efectuadas en el transecto. Cabe señalar que estas muestras se distribuyen en zonas cubiertas por matorral de brea y el pajonal de Junquillo - Totora - Suncho (vegetación hidromorfa) del borde este del Salar.

Figura 2-2. Relación de porcentaje de cobertura de vegetal obtenida en terreno mediante transectos y valores medios de NDVI obtenidos del análisis de imágenes. Borde Este del Salar de Atacama.

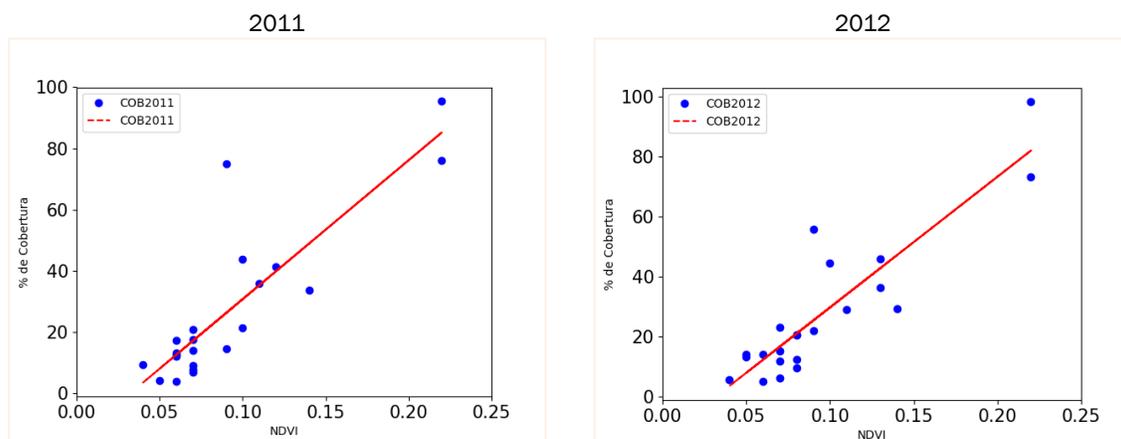


Figura 2-2. Relación de porcentaje de cobertura de vegetal obtenida en terreno mediante transectos y valores medios de NDVI obtenidos del análisis de imágenes. Borde Este del Salar de Atacama.

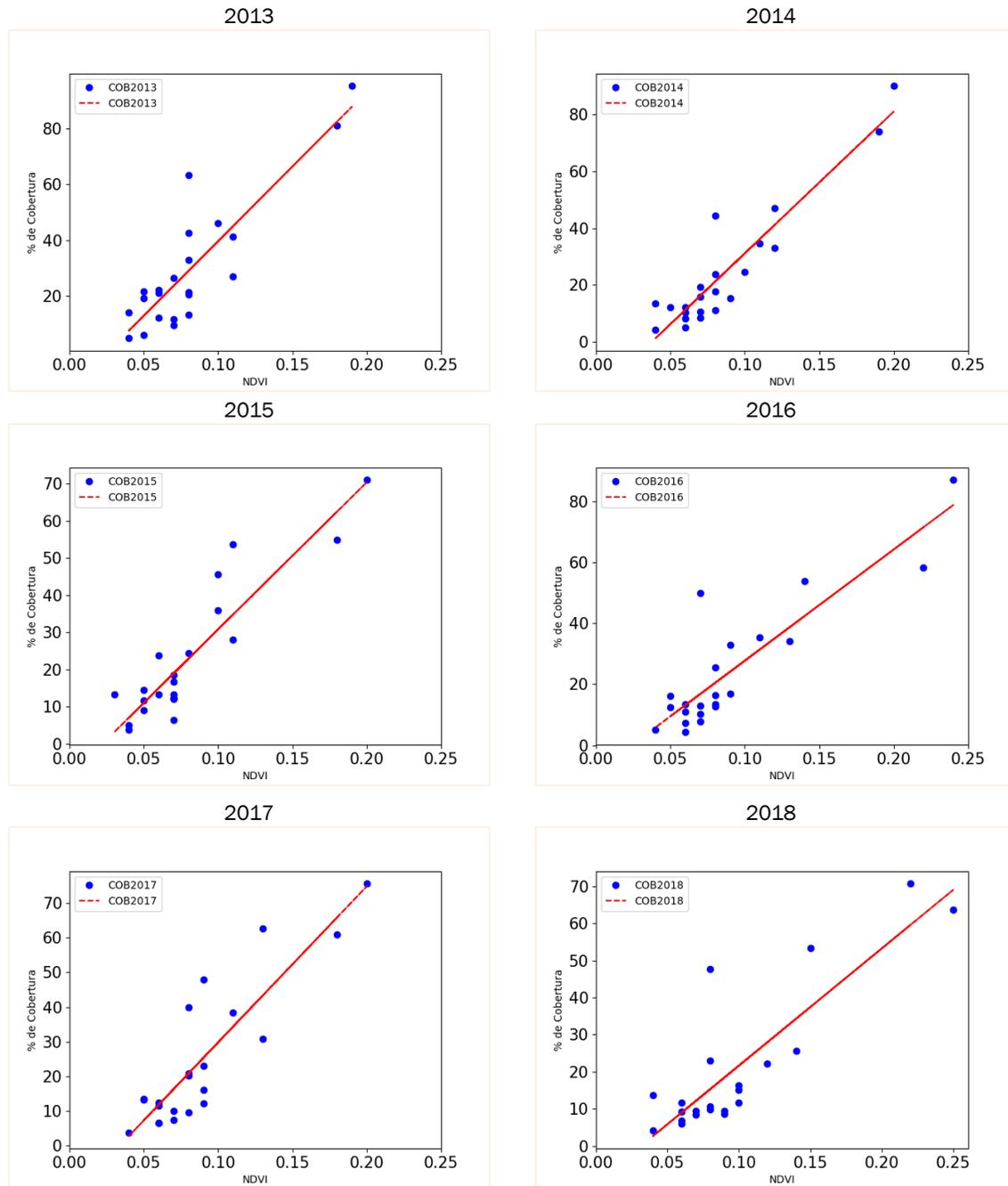
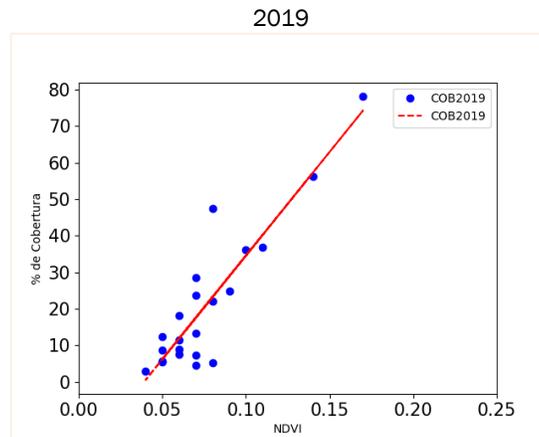


Figura 2-2. Relación de porcentaje de cobertura de vegetal obtenida en terreno mediante transectos y valores medios de NDVI obtenidos del análisis de imágenes. Borde Este del Salar de Atacama.



Fuente: Elaboración propia

2.2.3 Corrección de bandeo en escenas Landsat 7

Desde el año 2003, el sensor de Landsat 7 sufrió un daño en el sistema del sensor ETM, el que genera un bandeo o gaps en la imagen, generándose líneas sin información. Para corregir este fenómeno, los valores ausentes producto del bandeo son reemplazados por pixeles de escenas temporalmente próximas. Es así como, de las 11 escenas con bandeados, en 9 periodos fueron reemplazadas por escenas capturadas en el mes de abril (mes de los análisis) y en dos periodos, con escenas de marzo.

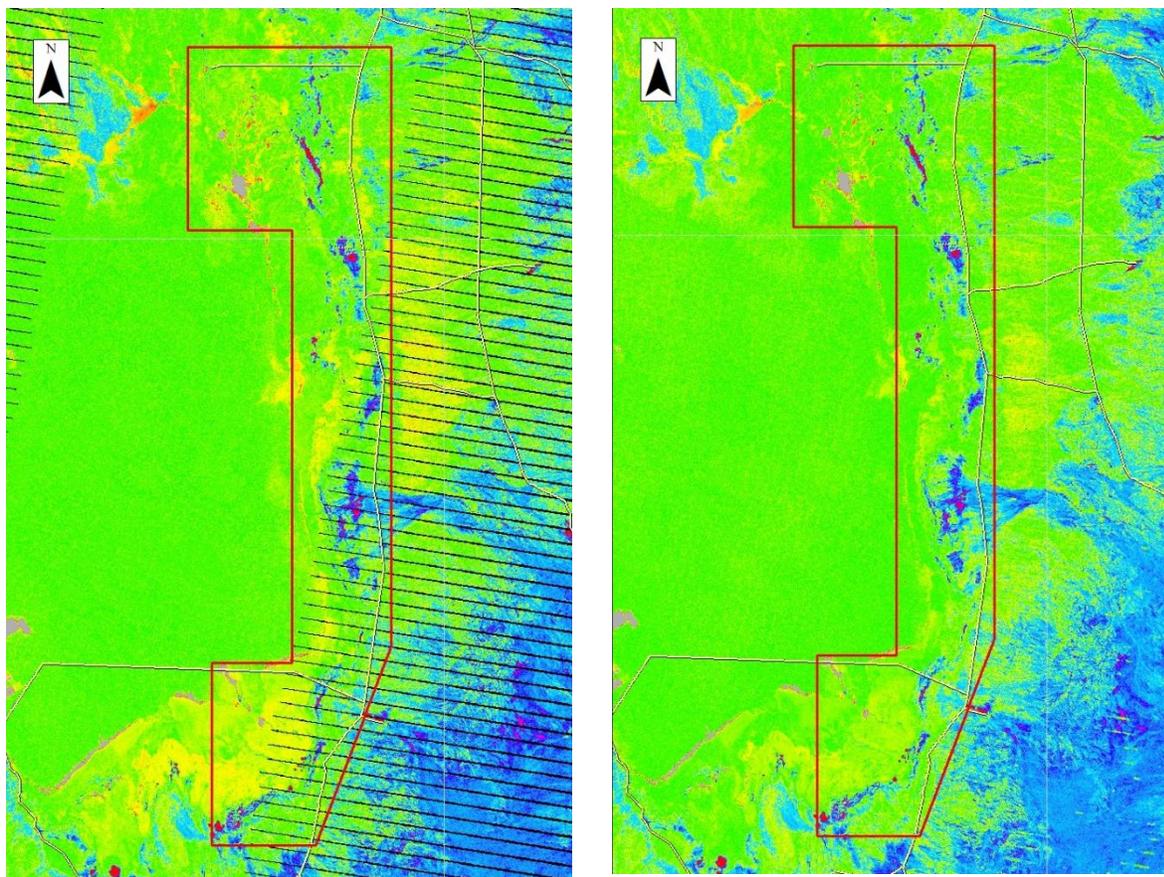
Tabla 2-4. Escenas Landsat SR (nivel 2) sometidas a relleno y set de imágenes complementarios para reemplazo

Año	Imágenes Landsat SR (nivel 2)		Imágenes Landsat SR (nivel 2) [para relleno]	
	ID	Fecha de captura	ID	Fecha de captura
2010	LE07_L2SP_233076_20100412_20200911_02_T1_SR	12-04-2010	LE07_L2SP_233076_20100428_20200911_02_T1_SR	28-04-2010
2012	LE07_L2SP_233076_20120401_20200909_02_T1_SR	01-04-2012	LE07_L2SP_233076_20120417_20200909_02_T1_SR	17-04-2012
2013	LE07_L2SP_233076_20130404_20200907_02_T1_SR	04-04-2013	LE07_L2SP_233076_20130420_20200907_02_T1_SR	20-04-2013
2014	LE07_L2SP_233076_20140423_20200906_02_T1_SR	23-04-2014	LE07_L2SP_233076_20140322_20200906_02_T1_SR	22-03-2014
2015	LE07_L2SP_233076_20150426_20200904_02_T1_SR	26-04-2015	LE07_L2SP_233076_20150410_20200904_02_T1_SR	10-04-2015
2016	LE07_L2SP_233076_20160412_20200902_02_T1_SR	12-04-2016	LE07_L2SP_233076_20160428_20200902_02_T1_SR	28-04-2016
2017	LE07_L2SP_233076_20170415_20200831_02_T1_SR	15-04-2017	LE07_L2SP_233076_20170330_20200831_02_T1_SR	30-03-2017
2018	LE07_L2SP_233076_20180402_20200829_02_T1_SR	02-04-2018	LE07_L2SP_233076_20180418_20200829_02_T1_SR	18-04-2018
2019	LE07_L2SP_233076_20190421_20200825_02_T1_SR	21-04-2019	LE07_L2SP_233076_20190405_20200827_02_T1_SR	5-04-2019
2020	LE07_L2SP_233076_20200407_20200822_02_T1_SR	07-04-2020	LE07_L2SP_233076_20200423_20200820_02_T1_SR	23-04-2020
2021	LE07_L2SP_233076_20210410_20210506_02_T1_SR	10-04-2021	LE07_L2SP_233076_20210426_20210522_02_T1_SR	26-04-2021
2022	LE07_L2SP_233076_20220328_20220423_02_T1_SR	28-04-2022	LE07_L2SP_233076_20220312_20220407_02_T1_SR	12-03-2022

Fuente: Elaboración propia

Dado que la variable de interés es el NDVI, el reemplazo de los píxeles se realizó sobre dicho ráster. Como ejemplo, se presentan los resultados del proceso en la Figura 2-3.

Figura 2-3. Ejemplo de corrección del bandeo en el NDVI 2019 mediante el reemplazo de píxeles de escena próxima

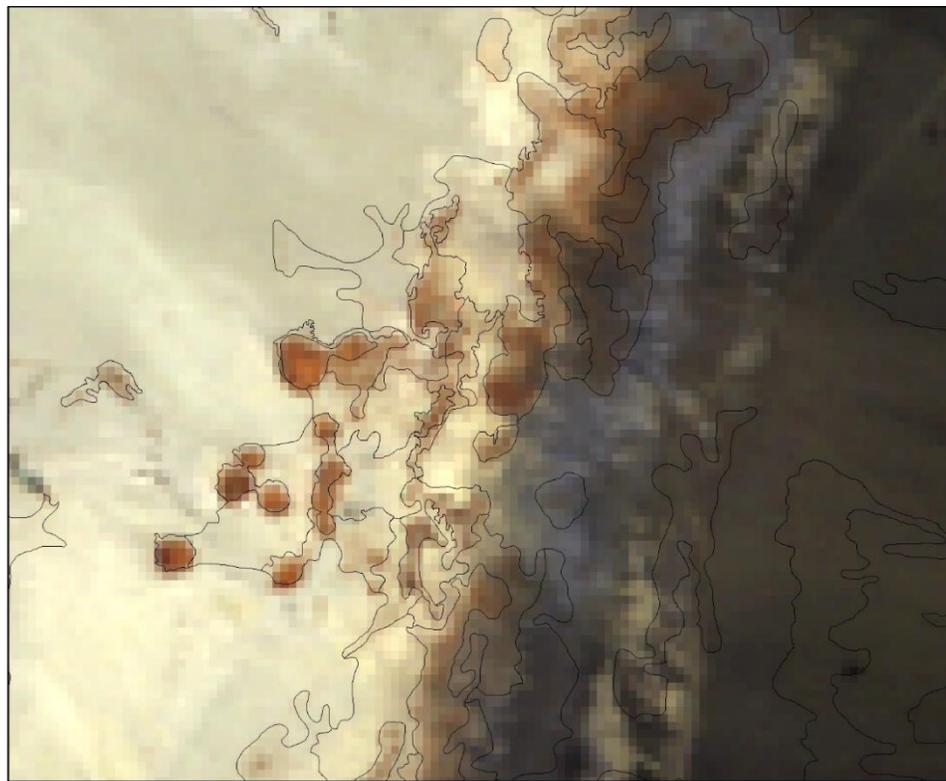


Fuente: Elaboración propia

2.2.4 Asignación de valores NDVI

Con el objeto de obtener un valor lo más representativo de su cobertura y su actividad fotosintética, es que a cada unidad vegetacional (polígono) se calculó el valor promedio de los NDVI (Figura 2-2) para cada año, mediante un SIG, a partir de estadísticas zonales. Todo esto, dado que el valor del índice de vegetación NDVI puede presentar importantes variaciones al recorrer la matriz de píxeles que componen cada unidad,

Figura 2-4. Ejemplo de Sobreposición de unidades vegetacionales con la imagen falso color convencional



Fuente: Elaboración propia

2.3 Análisis de tendencia de la actividad vegetal

Para evaluar la existencia del comportamiento temporal de la actividad vegetativa medida como NDVI, se utilizó el método de regresión lineal simple entre la variable y los años que componen cada periodo y con ello, determinar la existencia de estabilidad, aumento o disminución dentro del periodo de análisis.

El procedimiento ejecutado consistió en la generación de modelos de regresión lineal, cuya expresión matemática corresponde a:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

Donde:

Y: variable dependiente analizada (NDVI)

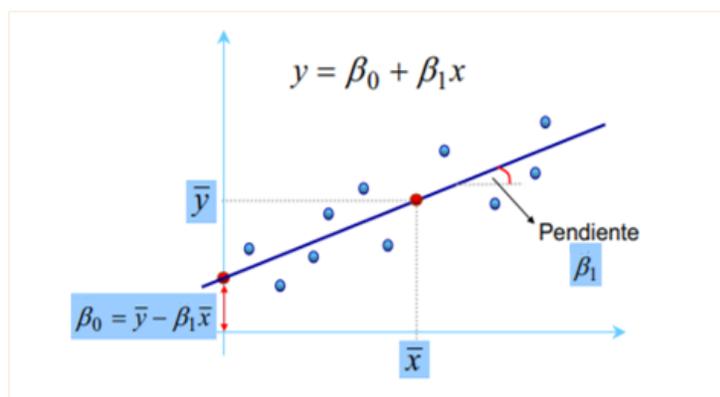
β_0 : Intercepción

X: variable independiente (Tiempo)

β_1 : pendiente de la regresión (tasa de cambio)

ε : Error aleatorio o residual

Figura 2 3. Representación gráfica del modelo de regresión lineal y sus parámetros de cálculo.



Fuente: Elaboración propia

Para determinar la relación entre las variables, el análisis establece que la hipótesis de trabajo corresponde a $H_0: \beta_1=0$. Con ello se pretende verificar estadísticamente que, de existir correlación entre las variables, el valor de la pendiente del modelo (parámetro β_1) debe ser significativamente distinto de cero, de manera que la variación en una de las variables esté relacionada con la variación observada en la otra.

La significancia estadística de la correlación entre las variables se determinó por medio del valor-p obtenido para cada modelo de regresión elaborado. Como nivel de significancia se estableció $\alpha= 0,05$, dicho de otro modo, se estableció un nivel de confianza de 95% para determinar la existencia de correlaciones estadísticamente significantes.

Para determinar la existencia de correlaciones estadísticamente significantes, se utilizó como criterio de decisión el valor-p $< 0,05$. Cuando el valor-p resulta mayor a 0,05, se acepta la hipótesis H_0 , por lo cual no existe evidencia estadística que permita sustentar la relación entre las variables analizadas.

El grado de relación (fuerza de asociación) entre las variables analizadas en función del tiempo, se expresó por medio del coeficiente de correlación de Pearson (R^2). Este índice mide la proporción de variación de la variable dependiente (Y) que es explicada por la variable independiente (X) y puede tomar valores que van desde -1 a +1. El signo de R^2 , representa la dirección de la correlación (aumento o descenso) y su valor numérico, la magnitud de la correlación entre las variables.

2.4 Análisis de la relación de actividad vegetal con el nivel freático

El objeto de este análisis es determinar si la causa de los detrimentos de la vegetación determinados en los análisis de tendencia, tienen alguna relación con las variaciones observadas en la profundidad de la napa, y que podría ser vinculada con la operación del Proyecto. Lo anterior, se fundamenta en el modelo conceptual de la vegetación que considera que, la principal fuente de abastecimiento de agua de la vegetación del Borde Este es el acuífero, el que, a su vez, es recargado por las precipitaciones que recibe de manera directamente, además de las precipitaciones indirectas que ocurren en las partes más altas de la cuenca.

Para establecer las relaciones entre el agua (profundidad de la napa) y la cobertura de la vegetación (NDVI) se utilizó el método del análisis de regresión lineal. Este análisis permitió determinar la significancia de la

pendiente de la recta de cada modelo y, de haber relación, el grado entre ambas variables, expresado por medio del coeficiente de correlación (R^2) con una significancia estadística de 95% ($\alpha=0,05$; valor de probabilidad $p < 0,05$).

De acuerdo con los objetivos de este proceso, las unidades de análisis fueron aquellas unidades vegetacionales que presentaron tendencia a la baja en el periodo 2006-2022. Es necesario indicar que, debido a que no toda el área cuenta con información de profundidad, finalmente las unidades evaluadas fueron aquellas que cuentan con algún pozo de monitoreo del Plan de Seguimiento Hidrogeológico (PSAH) representativo.

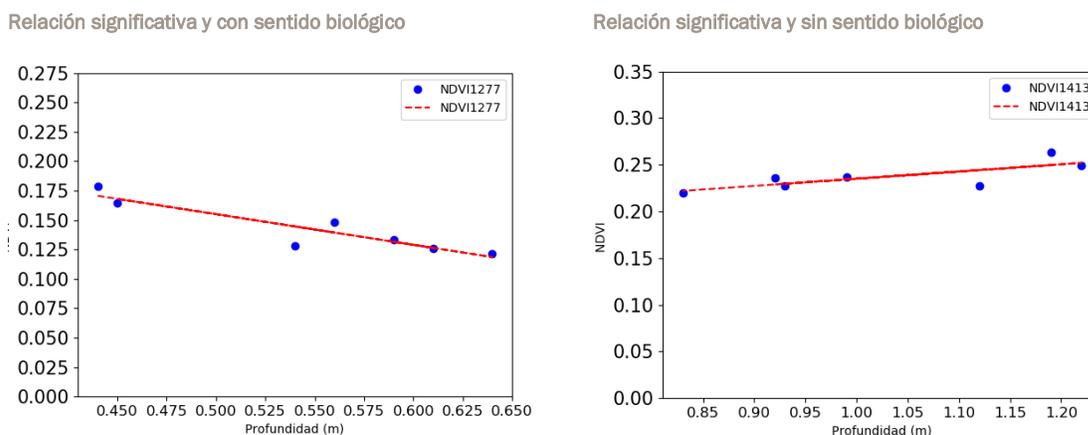
Metodológicamente, este análisis se realiza mediante regresión lineal y tal como se indica en la sección 0, la existencia de relación está definida por el valor p. Cuando el valor-p resulta mayor a 0,05, se acepta la hipótesis H_0 , por lo cual no existe evidencia estadística que permita sustentar la relación entre las variables analizadas, por lo que se asigna que no existe relación estadísticamente significativa.

En los casos que se determina la existencia de una relación estadística (valor $p < 0.05$), existen dos posibilidades para el análisis de la profundidad: Con sentido biológico y Sin sentido biológico.

- a) Unidades con relación significativa y con sentido biológico: En el caso de la profundidad-NDVI corresponden a relaciones negativas, apreciándose que conforme aumenta la profundidad del nivel freático, la actividad vegetal medida como NDVI disminuye, lo que estaría explicando estadísticamente la variación vegetativa.
- b) Unidades con relación significativa y sin sentido biológico: En el caso de la profundidad-NDVI corresponden a relaciones positivas. Se aprecia que la dispersión de los datos muestra que, conforme aumenta la profundidad de la napa, aumentan los valores de cobertura, lo que sugiere que, en este caso, el nivel del agua no estaría explicando las coberturas.

Un ejemplo de las relaciones significativas con y sin sentido biológico es presentado a continuación:

Figura 2-5. Ejemplo gráfico de relaciones profundidad-NDVI con y sin sentido biológico



Fuente: Elaboración propia

3 Resultados

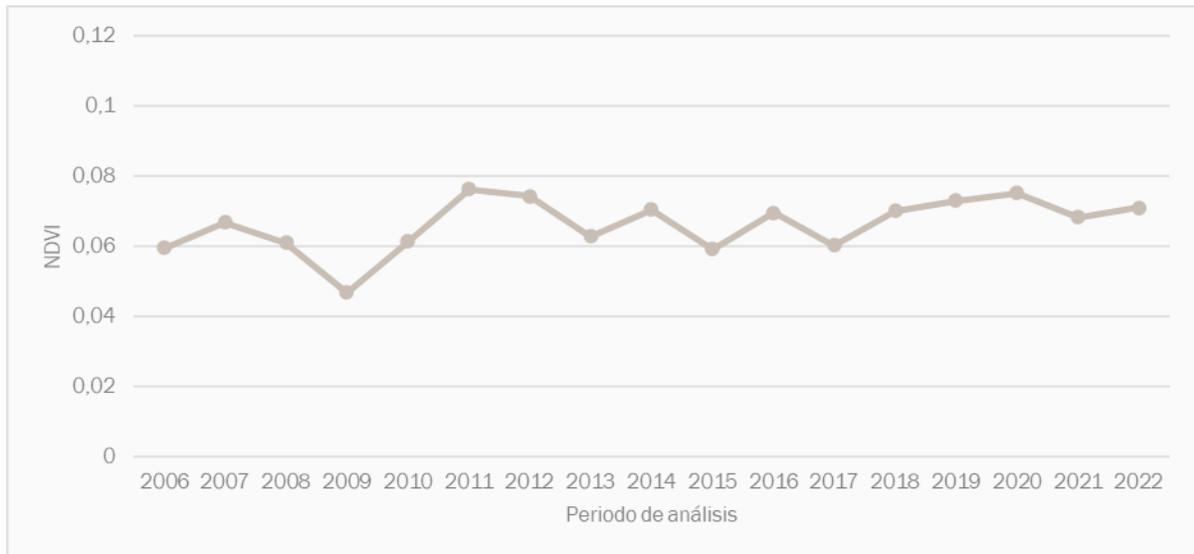
A continuación, se presentan los resultados del análisis de la tendencia de la vegetación medida como NDVI y su relación con la profundidad del nivel freático en el periodo Operacional del Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama, comprendido entre el 2006-2022.

3.1 Análisis de tendencia de la actividad vegetal

El análisis de tendencia permite identificar si aumentan, se mantiene o disminuye la actividad fotosintética en cada una de las unidades vegetacionales que componen el Borde Este del Salar de Atacama. Para fines prácticos, los resultados se expresan en superficie para cada tipo vegetacional.

Los valores de NDVI promedio de toda la superficie con vegetación del Borde Este, se muestran relativamente estables y dentro de los rangos anteriormente señalados (Figura 3-1). Adicionalmente, se verifica que tanto la vegetación del Borde Este del Salar de Atacama en el periodo de análisis, tiene baja cobertura y/o baja actividad fotosintética, lo que se condice con las condiciones de extrema aridez que dominan la zona de estudio.

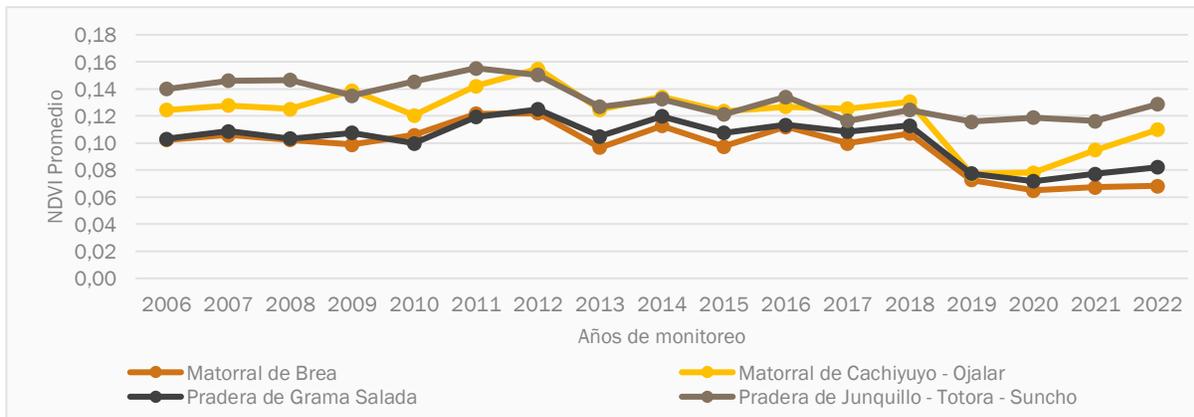
Figura 3-1. Promedio de los valores NDVI del área cubierta con vegetación en el Borde Este del Salar de Atacama en el periodo operacional (2006 – 2022)



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se analiza cada una de las tendencias identificadas sobre cada una de las unidades vegetacionales (polígonos) que componen el Borde Este. El análisis de la actividad fotosintética de la vegetación, expresada como valores NDVI para el Periodo operacional (2006 – 2022), muestra que, las unidades con tendencia a la baja representan una superficie de 201,29 ha, correspondientes a un 0,9% del área analizada. Esta tendencia se observó en el matorral de *Tessaria absinthioides*, Matorral de *Atriplex atacamensis* – *Atriplex imbricata*, pradera de *Distichlis spicata* y Pradera de *Juncus balticus* - *Schoenoplectus americanus* - *Baccharis juncea*, siendo este último donde se verifica la mayor superficie de vegetación a la baja (117,59 ha, correspondientes al 0,5% del total). El comportamiento promedio de los tipos vegetacionales a la baja puede observar en la Figura 3-2.

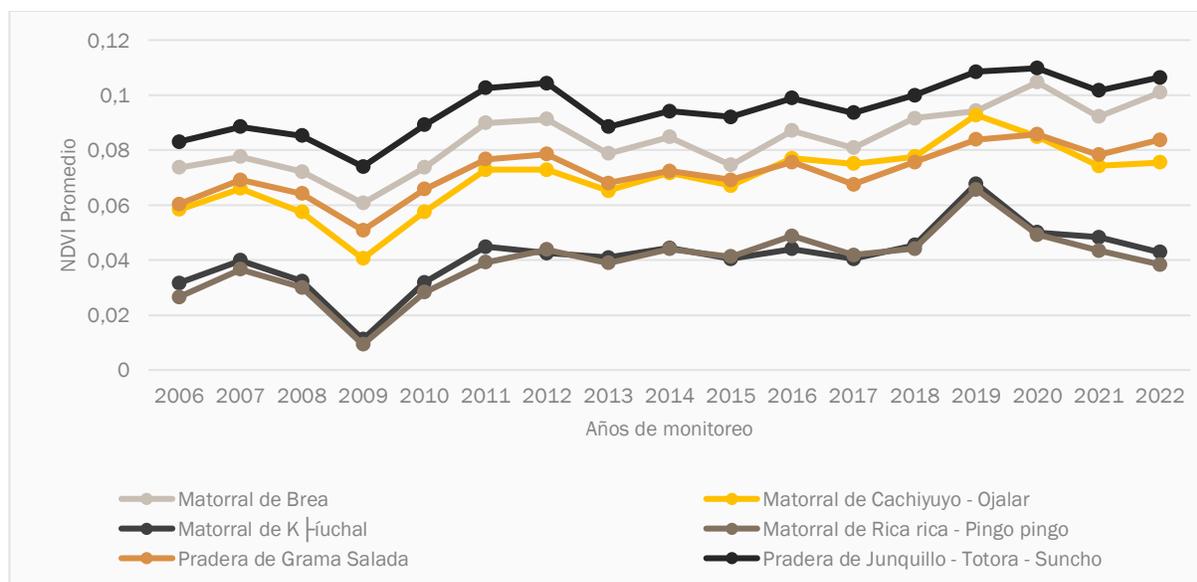
Figura 3-2. Valores promedios NDVI de unidades con tendencia a la baja para cada tipo vegetacional en el periodo operacional (2006-2022)



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, 4.322,69 ha presentaron un comportamiento al alza de la actividad vegetal (valores crecientes de NDVI), lo que representa un 19,1% de total del área analizada. Esta tendencia se aprecia en todos los tipos vegetacionales presentes en el Borde Este del Salar de Atacama, siendo el matorral de *Tessaria absinthioides* el tipo con mayor superficie al alza (1.541,43 ha), seguido del Matorral de *Atriplex atacamensis* - *Atriplex imbricata* (911,75 ha) y el Matorral de *Tiquilia atacamensis* (858,53 ha).

Figura 3-3. Valores promedio NDVI de unidades con tendencia al alza para cada tipo vegetacional en el Periodo Operacional (2006-2021)



Fuente: Elaboración propia

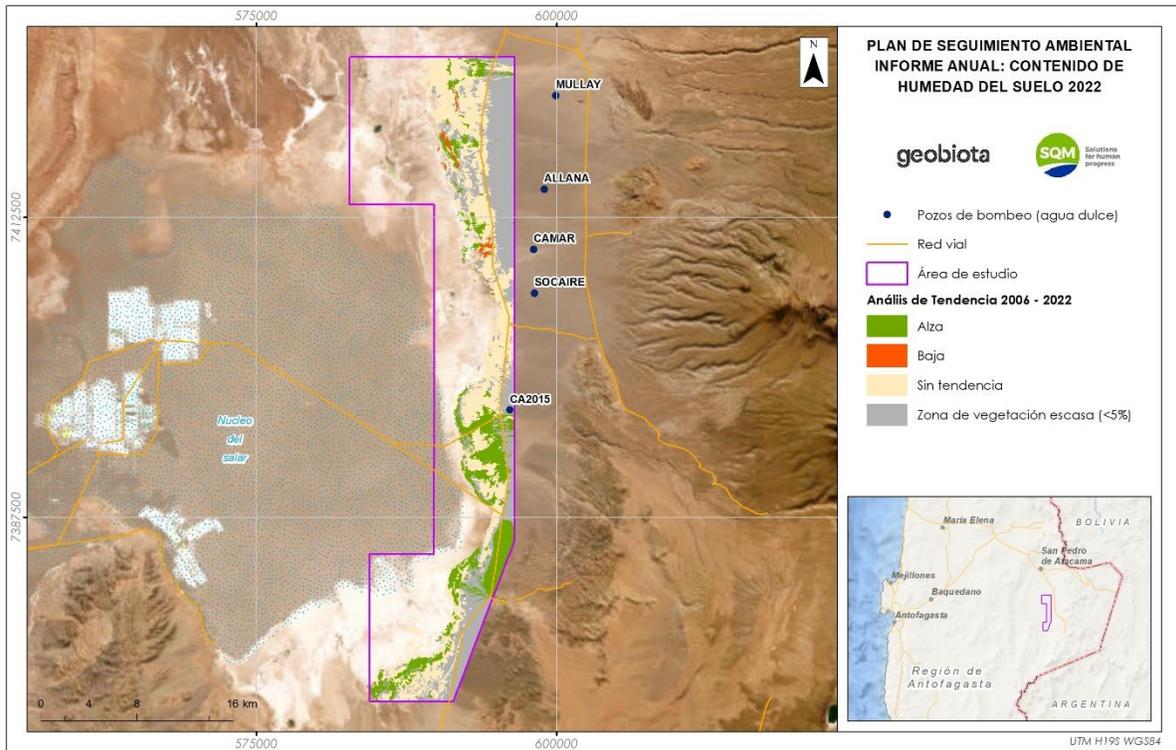
El 42,3% restantes de la vegetación (9.552,21ha) permanecieron estadísticamente estables, al no presentar cambios en el periodo analizado. Además, en el área se identificaron zonas de vegetación escasa (<5% de cobertura) los que presentan una superficie de 8.521,25ha.

En el Apéndice 1, se presentan los estadígrafos de los análisis de tendencia para cada una de las unidades vegetacionales analizadas para periodo operacional (2006 - 2022). La distribución de las unidades vegetacionales con tendencias al alza o baja o sin tendencia para el periodo 2006 - 2022 se presentan en la Figura 3-4.

Tabla 3-1. Superficie y participación porcentual de los tipos vegetacionales estables o con tendencia positiva o negativa en el Periodo Operacional (2006 - 2022).

Tendencia	Tipo	Total	% participación
Alza	Matorral de <i>Tessaria absinthioides</i>	1.541,43	6,8%
	Matorral de <i>Atriplex atacamensis</i> - <i>Atriplex imbricata</i>	911,75	4,0%
	Matorral de <i>Tiquilia atacamensis</i>	858,53	3,8%
	Matorral de <i>Aloysia deserticola</i> - <i>Ephedra multiflora</i>	81,17	0,4%
	Pradera de <i>Distichlis spicata</i>	736,84	3,3%
	Pradera de <i>Juncus balticus</i> - <i>Schoenoplectus americanus</i> - <i>Baccharis juncea</i>	192,97	0,9%
Total Alza		4.322,69	19,1%
Baja	Matorral de <i>Tessaria absinthioides</i>	74,75	0,3%
	Matorral de <i>Atriplex atacamensis</i> - <i>Atriplex imbricata</i>	1,67	0,0%
	Pradera de <i>Distichlis spicata</i>	7,28	0,0%
	Pradera de <i>Juncus balticus</i> - <i>Schoenoplectus americanus</i> - <i>Baccharis juncea</i>	117,59	0,5%
Total Baja		201,29	0,9%
Sin tendencia	Matorral de <i>Tessaria absinthioides</i>	5.743,77	25,4%
	Matorral de <i>Atriplex atacamensis</i> - <i>Atriplex imbricata</i>	867,45	3,8%
	Matorral de <i>Aloysia deserticola</i> - <i>Ephedra multiflora</i>	355,25	1,6%
	Pradera de <i>Distichlis spicata</i>	1.492,84	6,6%
	Pradera de <i>Juncus balticus</i> - <i>Schoenoplectus americanus</i> - <i>Baccharis juncea</i>	1.092,9	4,8%
Total Sin tendencia		9.552,21	42,3%
Zona de vegetación escasa		8.521,25	37,7%
Total Zona de vegetación escasa		8.521,25	37,7%
TOTAL		22.597,44	100,0%

Figura 3-4. Distribución de área con tendencia en el Periodo 2006-2022



Fuente: Elaboración propia

3.2 Análisis de la relación de actividad vegetal con el nivel freático

Se analiza la relación de la profundidad del nivel freático con la actividad vegetal medida como NDVI en las unidades con tendencia a la baja en el periodo operacional 2006-2022.

En el periodo analizado, se identificaron 28 unidades vegetacionales con tendencia a la baja, las que suman una superficie de 201,29 ha y representan el 0,9% de la superficie con vegetación, las que se distribuyen principalmente en la sección norte y centro del Borde Este del Salar de Atacama. De estas unidades, 193,80 ha son representadas por algún pozo de la red de monitoreo del Plan de Seguimiento Hidrogeológico. Esta superficie representa al 96,3% de las unidades con tendencia a la baja.

Los pozos utilizados para la caracterización hidrogeológica de las unidades con tendencia a la baja corresponden a: L3-5, L1-17, L7-3 y L2-28.

Los resultados del análisis de la relación entre la profundidad y la actividad vegetal mostraron dos categorías: Sin relación estadísticamente significativa y con relación, pero que no estaría explicado por la profundidad al no tener un sentido biológico.

Al respecto, 16 unidades (176,76 ha) evidenciaron que no existía una relación estadísticamente entre la profundidad de la napa y el índice NDVI. Mientras que, 7 unidades (17,04 ha) presentaron relación positiva, lo que biológicamente no explicaría el descenso de los valores NDVI, ya que específicamente el pozo evaluado

ha mostrado una tendencia a disminuir su profundidad. Esta última opción, indica que otro(s) factor(es) estaría(n) incidiendo en el estado de la vegetación, dado que la profundidad presenta menores magnitudes en el tiempo y, por ende, una mayor disponibilidad de agua, lo que favorecería el aumento o el desarrollo de la actividad vegetal y no su detrimento.

A continuación, se presentan los estadígrafos de la relación de cada una de las unidades analizadas.

Tabla 3-2. Indicadores estadísticos de los análisis de relación profundidad de la napa – NDVI en unidades con tendencia a la baja en el periodo 2006-2021.

Unidad vegetacional	Pozo de referencia	Pendiente	Intercepto	R2	Valor P	Conclusión
1419	L7-3	-0,049	0,132	0,035	0,240	Sin relación estadística
1477	L7-3	-0,055	0,180	0,064	0,185	Sin relación estadística
1749	L7-3	-0,049	0,122	0,138	0,095	Sin relación estadística
1473	L1-17	-0,014	0,089	0,025	0,430	Sin relación estadística
1474	L1-17	-0,018	0,206	0,044	0,451	Sin relación estadística
1680	L1-17	-0,014	0,082	0,029	0,541	Sin relación estadística
1744	L1-17	-0,010	0,097	0,027	0,558	Sin relación estadística
979	L2-28	-0,019	0,078	0,222	0,077	Sin relación estadística
217	L3-5	0,830	0,109	0,322	0,027	Significativa, pero sin sentido biológico
303	L3-5	2,189	0,139	0,365	0,017	Significativa, pero sin sentido biológico
306	L3-5	0,231	0,080	0,062	0,369	Significativa, pero sin sentido biológico
309	L3-5	0,274	0,086	0,062	0,370	Sin relación estadística
596	L3-5	0,165	0,077	0,052	0,414	Sin relación estadística
597	L3-5	0,411	0,078	0,193	0,102	Sin relación estadística
598	L3-5	0,903	0,097	0,252	0,057	Sin relación estadística
600	L3-5	0,270	0,061	0,085	0,292	Sin relación estadística
608	L3-5	0,239	0,081	0,067	0,351	Sin relación estadística
957	L3-5	0,867	0,075	0,302	0,034	Significativa, pero sin sentido biológico
958	L3-5	1,401	0,092	0,284	0,041	Significativa, pero sin sentido biológico
961	L3-5	0,365	0,080	0,181	0,114	Sin relación estadística
963	L3-5	0,550	0,109	0,209	0,086	Sin relación estadística
1097	L3-5	0,990	0,115	0,314	0,030	Significativa, pero sin sentido biológico
1613	L3-5	0,594	0,094	0,278	0,043	Significativa, pero sin sentido biológico

Fuente: Elaboración propia

4 Conclusiones

- El análisis de tendencia permitió identificar estadísticamente la existencia de aumento, disminución y sin tendencia de la actividad vegetacional medida como NDVI.
- Gran parte de las unidades analizadas no presentan tendencia estadísticamente. En efecto, esta categoría abarca una superficie de 9.552,21 ha, lo que representa una superficie 42,3% de las unidades analizadas. Mientras que el 37,7% corresponden a Zonas de vegetación escasa.
- Se verifica unidades con tendencia. En efecto, 4.322,69 ha presentaron tendencia al alza (19,1% del total), representados principalmente por Matorral de *Tessaria absinthioides*, Matorral de *Atriplex atacamensis* - *Atriplex imbricata* y Matorral de *Tiquilia atacamensis*. Mientras que, 201,29 ha presentaron tendencia a la baja (0,9% del total).
- De las 28 unidades con tendencia a la baja (201,29 ha), 23 unidades (193,80 ha) fueron posibles relacionarlas con la profundidad del nivel freático, al contar con pozos de referencia del PSAH.
- Al respecto, 16 unidades (176,76 ha) evidenciaron que no existía una relación estadística entre la profundidad de la napa y el índice NDVI. Mientras que, 7 unidades (17,04 ha) presentaron relación positiva, lo que biológicamente no explicaría el descenso de los valores NDVI, ya que específicamente el pozo evaluado (Pozo L3-5) ha mostrado una tendencia a disminuir su profundidad, por lo que no se verificarían efectos del Proyecto sobre la vegetación en el periodo de Operación.

5 Referencias

Aguilar, N., Galindo, G.; Fortanelli, J. y Contreras, C (2010). Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. 18 pp.

Chuvieco, E. (2002). Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Ediciones Ariel. 578p.

Li, D., D. Lu, M. Wu, X. Shao Y J. Wei. (2018). Examining land cover and greenness dynamics in Hangzhou bay in 1985–2016 using Landsat time-series data. *Remote Sens.* 10. 32. 22 PP.

C. L. Meneses-Tovar, (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del Bosque. *UNASYLVA* 238, VOL. 62, 2011/2

SMA (2020). Informe técnico: reporte humedal Tilopozo. 15 p.

Soto, J, C Román-Figueroa & M Paneque (2019). NDVI A Model for Estimating the Vegetation Cover in the High-Altitude Wetlands of the Andes (HAWA). 17 p.

USGS, 2020. EN LÍNEA: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>. Página visitada el 01 de octubre 2020

N. Wilson & L. Norman (2018). Analysis of vegetation recovery surrounding a restored wetland using the normalized difference infrared index (NDII) and normalized difference vegetation index (NDVI). *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 39, No. 10, 3243-3274