



INFORME ANUAL N°5

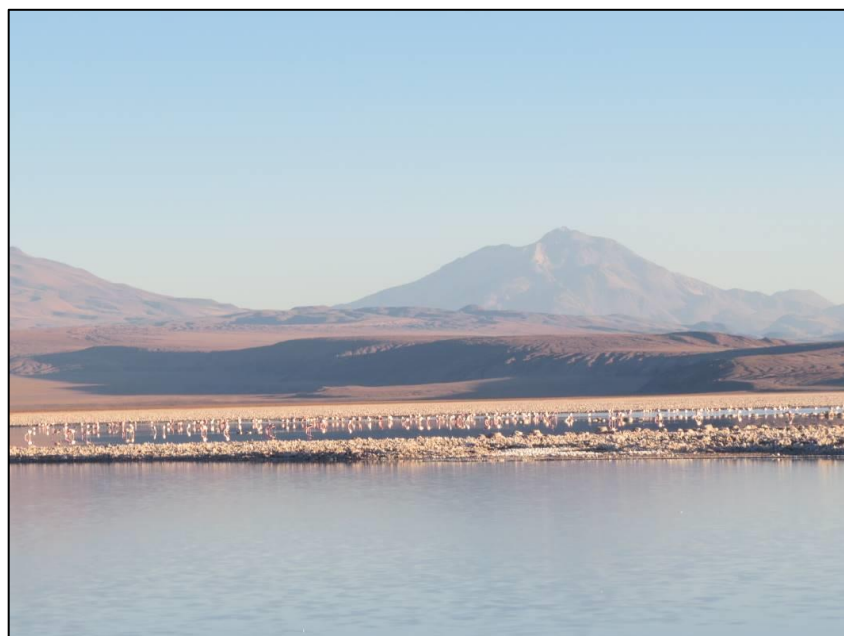
Plan de Manejo Biótico

Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016)”

ANEXO I

Estado Ecológico del Sistema

ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN VARIABLES DE SEGUIMIENTO DE VEGETACIÓN - AÑO N°1 a N°5.



Región de Antofagasta

Agosto de 2021

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	5
2. ANÁLISIS DE VEGETACIÓN Y FLORA EN TRANSECTAS	7
2.1. Análisis de la estructura comunitaria (composición de especies)	7
3. ANÁLISIS DE LA COBERTURA ACTIVA	15
3.1. Comparación de la cobertura activa con línea de base	15
3.2. Análisis de recurrencia de la cobertura activa	16
3.3. Comparación del NDVI Landsat con línea de base	25
3.4. Comparación de la tendencia interanual del NDVI Landsat	26
3.4.1. Obtención de registros NDVI Landsat.....	27
3.5. Análisis de correlaciones con el NDVI	29
3.5.1. Validación del NDVI con las coberturas en transectas.....	30
3.5.2. Relación del NDVI con variables hidroclimáticas	31
4. REFERENCIAS	33

TABLAS

Tabla N° 3-1. Registros históricos de superficies de vegetación activa obtenidos con el NDVI de imágenes de alta resolución.	15
Tabla N°3-2. Homologación de formaciones vegetales de seguimiento, según monitoreos de Transectas y COT- NDVI	18
Tabla N° 3-3. Superficies y porcentajes de cobertura de vegetación activa según nivel de recurrencia entre el Año 1 (2017) y Año 5 (2021) obtenidos con el NDVI de imágenes satelitales de alta resolución para monitoreos anuales de verano en las formaciones en seguimiento por subsector Tilopozo y La Punta-La Brava.	22
Tabla N° 3-4. Superficies y porcentajes de cobertura de vegetación activa según nivel de recurrencia entre el Año 1 (2017) y Año 5 (2021) obtenidos con el NDVI de imágenes satelitales de alta resolución para monitoreos anuales de verano en las formaciones de seguimiento en el sector Peine.....	24
Tabla N° 3-5. Registros históricos del NDVI de percentil 75 propuestos para monitoreo de vegetación con imágenes Landsat de media resolución.	26
Tabla N°3-6. Características de los sensores utilizados en el análisis NDVI.....	27

Tabla N°3-8. Coeficientes de correlación lineal del NDVI promedio por estación, obtenidos desde imágenes Landsat 2009-2021 con la precipitación anual (estación EM - SCL) en formaciones de herbazales y matorrales monitoreadas. 31

FIGURAS

Figura N° 2-1. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies dominantes en las formaciones del sector Tilopozo y La Punta y La Brava, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M10).....	11
Figura N° 2-2. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies acompañantes en las formaciones del sector Tilopozo y La Punta y La Brava, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M10).....	12
Figura N° 2-3. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies dominantes y acompañantes en las formaciones del sector Peine, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M10).....	14
Figura N°3-1. Proceso metodológico de determinación del nivel de recurrencia de la cobertura de vegetación activa obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución para el periodo de verano (post - lluvia) 2017-2021.	19
Figura N°3-2. Variación anual en formaciones azonales en seguimiento del sector Tilopozo – La Punta y La Brava, caso herbazal de <i>D. spicata</i> en subsector Tilopozo.	20
Figura N° 3-3. Nivel de recurrencia en formaciones azonales en seguimiento del sector Tilopozo – La Punta y La Brava, caso herbazal de <i>D. spicata</i> en subsector Tilopozo.	21
Figura N°3-4. Evaluación de la recurrencia de la cobertura vegetal activa en las formaciones de monitoreo, obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución en monitoreos anuales de verano 2017-2021 en los subsectores de Tilopozo y La Punta- La Brava.	23
Figura N°3-5. Evaluación de la recurrencia de la cobertura vegetal activa en las formaciones de monitoreo, obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución en monitoreos anuales de verano 2017-2021 en el sector Peine.	25
Figura N° 3-6. Correlaciones lineales entre el NDVI (obtenidos de imágenes de Alta Resolución- AR <i>izquierda</i> y Landsat - <i>derecha</i>) y las coberturas vegetales	

en transectas de los tipos de vegetación de monitoreo (2016-2021):
matorrales (*arriba*) y herbazales (*abajo*)..... 30

Figura N° 3-7. Correlación multitemporal del NDVI Landsat promedio con variables
hidroclimáticas (anuales en mm): precipitación, evaporación y balance
precipitación-evaporación. 32

ANEXO I. INFORME DE ESTADO ECOLÓGICO DEL SISTEMA

ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN VARIABLES DE SEGUIMIENTO DE VEGETACIÓN - AÑO N°2, 3, 4 y 5.

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde a uno de los Anexos del Informe Anual N°5, con la descripción de metodologías y análisis de tendencias de la Vegetación, incluyendo seguimiento del año 1 al año 5, comprometida en el Plan de Manejo Biótico (PMB, Anexo 2 de la Adenda 5 y Apéndice B - Anexo 2 Adenda 5 del proyecto). Esta componente corresponde a uno de los tres indicadores de estado para el análisis del Estado Ecológico del Sistema.

Los análisis que se describen a continuación se subdividen según los dos indicadores establecidos para esta variable de estado:

(1) Transectos de Vegetación: Para análisis de estado en la vegetación, el primer indicador que quedó establecido es la de transectos de vegetación, entendiendo como un cambio de tendencia lo siguiente: *“si después de 3 años consecutivos (periodos) se observa una disminución sostenida de la cobertura de especies, aumento de sustrato salino (medición obtenida en el monitoreo de suelo) o cambios en la estructura comunitaria (composición de especies)”*.

Por lo anterior, el siguiente análisis se realiza sobre los cinco años de seguimiento (2016-2017-2018) en relación a registros de transectas del Monitoreo Base (MB0) realizado en invierno (julio 2016), la cual corresponde a la línea de base para esta variable de estado, en los siguientes aspectos:

- Análisis de la estructura comunitaria (composición de especies).

(2) Coberturas de Vegetación Activa: análisis multitemporal de la vegetación activa, en las formaciones azonales sujetas a seguimiento, para ello se realiza lo siguiente:

- Comparación con los registros de línea de base de la cobertura vegetal activa obtenida con el NDVI de imágenes alta resolución de verano 2017-2021.
- Análisis del nivel de recurrencia¹ de la cobertura activa, obtenida con el índice NDVI de imágenes de alta resolución durante el periodo 2017-2021, también complementario a lo exigido por el PMB, para determinar las áreas de

¹ **Nivel de recurrencia** se refiere al número de superposiciones de una misma condición de análisis, es decir, la presencia en seguimientos sucesivos, en este caso de la cobertura vegetal activa obtenida desde el índice NDVI para los años de monitoreo 2017-2019.

superposición resultantes, que representan el nivel variabilidad o estabilidad espacial de la actividad vegetal en las formaciones de seguimiento. El análisis de recurrencia está determinado por el tamaño de la muestra; por lo que los resultados de las superficies de vegetación activa por percentiles, aumentará o disminuirá en la medida que se adicionen nuevos datos.

- Comparación de la línea de base con el NDVI de imágenes Landsat en su percentil 75, de manera complementaria a lo exigido al PMB, pero que permite detectar si el sistema presenta una vigorosidad relativamente baja respecto a su comportamiento histórico.
- Comparación de la tendencia del NDVI de imágenes Landsat para el periodo pre - operacional (2009-2016) y operacional (2016-2021), este análisis complementario se realizó con el propósito de analizar un periodo de estudio superior al de seguimiento del proyecto (tres años) y poder evaluar con veracidad estadística los cambios de estado en la componente.
- Análisis de relaciones del NDVI con variables de interés, el cual se realiza de forma complementaria a lo exigido por el PMB, con el fin de reducir la incertidumbre asociada en los factores posibles que indiquen el estado de la componente y robustecer la discusión de los resultados obtenidos en las transectas y la cobertura activa. Para esto, las variables consideradas en la correlación con el NDVI, fueron la cobertura de vegetación obtenida en las transectas y variables hidroclimáticas.

2. ANÁLISIS DE VEGETACIÓN Y FLORA EN TRANSECTAS

2.1. Análisis de la estructura comunitaria (composición de especies)

Para evaluar un cambio en el estado ecológico, se consideró lo indicado por el PMB establecido según Anexo 2 de la Adenda 5 del proyecto, respecto a evaluar entre otros parámetros en la vegetación: *una disminución sostenida de la cobertura de especies o cambios en la estructura comunitaria.*

El análisis de estos parámetros se realiza a partir de la **variación de la cobertura vegetal de las especies y la variación en la composición de las especies** en referencia al número de intercepciones en la transecta (frecuencia), para determinar cambios en la estructura comunitaria de la vegetación azonal.

Respecto a la **variación de la cobertura vegetal de las especies**, se realiza por sector considerando la evolución de estas coberturas en dos escalas de análisis:

- El promedio anual de las coberturas de las especies por formación vegetal y se relaciona con el promedio de las coberturas del periodo inicial asociado a la condición basal del proyecto, correspondiente a MB0. Esta relación, nos permite observar si las variaciones en el tiempo son sostenidas a través de los cinco años de seguimiento o bien se enmarcan en una variabilidad interanual.
- La variación de la cobertura de las especies por transecta, determinada por la diferencia porcentual de las coberturas absolutas por transecta entre el promedio del primer semestre de monitoreo, dado que ambos muestreos presentaban un mes de diferencia (julio y agosto 2016, MB0/M1), con respecto al promedio de los monitoreos del período total de seguimiento (M2 a M10; 2017-2021), además de analizar su importancia estadística con un nivel de significancia del 0,05.

De manera adicional y complementaria, y para determinar estadísticamente si las variaciones de cobertura por transectas son significativas, es decir, si la variación de las coberturas presentaría una validez estadística al relacionar las variaciones de las coberturas durante el periodo de seguimiento, se utilizaron los valores promedio anuales para cada especie (M1-M2/M3-M4/M5-M6/M7²/M9-M10) y se compararon con MB0 y M1. Para esto se realizó la prueba estadística Kruskal-Wallis donde el valor del parámetro F de este test, se acompaña del valor p para cuantificar estadísticamente la importancia de la variación. Los niveles de significancia (denotado como α o alfa) usados fueron de 0,05. Un α menor o igual a 0,05 indica, con un riesgo del 5%, que existe una variación significativa entre las variables analizadas.

² No se incluye Monitoreo 8 de verano 2020, debido a que no fue posible realizar la campaña dadas las condiciones excepcionales del presente año, en el marco de la Pandemia Covid-19. Sin embargo, se logró ejecutar el monitoreo de NDVI.

Respecto a **la variación en la composición de las especies**, se determina la variación de la composición de especies a través de su frecuencia, a partir de los registros de especies en las transectas evaluando su posición, es decir el n° de intercepciones de cada especie en la transecta. La transecta que es de 50 metros lineales, lo que consiste en 500 intercepciones posibles, se divide en tres tramos: los extremos con menor cantidad de intercepciones (Tramo 1 y 3) y el centro de la transecta que representa la mayor cantidad de intercepciones (Tramo 2).

- Tramo 1: 0-10 m, que representa 100 intercepciones posibles
- Tramo 2: 10,1 – 40 m. que representa 300 intercepciones posibles, y
- Tramo 3: 40,1 – 50 m, que representa 100 intercepciones posibles.

En esta división por tramos, se suman los registros (frecuencia) de cada especie por tramo y de todas las transectas asociadas a una formación vegetal en un sector determinado, y en cada monitoreo. A partir de estos datos, se obtiene el promedio del N° de intercepciones de cada especie en los monitoreos, pudiendo comparar la evolución de estos registros con el registro inicial de MB0 (monitoreo basal en invierno 2016).

Adicionalmente, para determinar si las variaciones de cobertura de las especies son significativas, es decir, si la variación de las coberturas presentaría una validez estadística al relacionar ambos periodos, se realizó la prueba estadística Kruskal-Wallis donde el valor del parámetro F de este test, se acompaña del valor p para cuantificar estadísticamente la importancia de la variación. Los niveles de significancia (denotado como α o alfa) usados fueron de 0,05. Un α menor o igual a 0,05 indica, con un riesgo del 5%, que existe una variación significativa entre las variables analizadas.

La evaluación de cambios en el estado ecológico se realizó de acuerdo a lo señalado en el PMB, que señala “*se entenderá como un cambio en tendencia según la evaluación realizada después de 3 años consecutivos (periodos), respecto su comportamiento previo de línea de base o registros históricos*”. De acuerdo a esto, se analizó la variación de la composición de las especies a través de su posición, medida a través del número de intercepciones de cada especie en las transectas. Esta variación se realiza a través del promedio de intercepciones por especie y por tramo, comparando los valores promedio de cada monitoreo con los registros de MB0. Además adicionalmente, para determinar aquellos cambios con variaciones significativas estadísticamente, considerando un α menor o igual a 0,05, se determinaron las variaciones de cada especie por transecta.

Los resultados y discusión obtenidos por sector de: el promedio anual de las coberturas de las especies y la variación en la composición de las especies, se presentan directamente en el **Informe de Estado Ecológico del Sistema, secciones 2.1.1.1.b. para el Sistema La Punta – La Brava y 2.2.1.1.b para el Sistema Peine.**

Respecto al **análisis estadístico de la variación de las coberturas vegetales** de las especies por transecta en los cinco años de seguimiento, en relación a la cobertura basal de invierno 2016 (MB0-M1) se presentan a continuación los resultados y discusión por sector:

a) Sistema La Punta - La Brava

En el subsector **Tilopozo**, localizado al Noroeste dentro del sistema La Punta- La Brava, en **Figura N° 2-1** y **Figura N° 2-2 izquierda**, se observan las variaciones de las coberturas para las especies dominantes y acompañantes, respectivamente. **Entre las especies dominantes** el rango de variación es de $\pm 100\%$, con algunas diferencias significativas (estadísticamente):

- Aumento de *D. spicata* en la transecta T21 de Tilopozo, con una variación del 79%.
- Aumento de *S. californicus* en T22, ya que el 100% de su variación es porque no se registraba en MB0 y M1 y en los siguientes monitoreos aparece con una baja cobertura absoluta (<5%).
- Descenso de *J. balticus* en T18, T30 y T31 en la formación donde domina esta especie, con variaciones de cobertura entre un 34% y 72%.
- Descenso de *D. spicata* en T18, ya que el 100% de su variación es porque solo se registraba en MB0 y M1 con una baja cobertura absoluta (<1%) y en los siguientes monitoreos no aparece.
- Descenso de *D. spicata* en T22 y T26 en la formación donde domina esta especie, con variaciones de cobertura entre un 32% y 70%.
- Descenso de *T. absinthioides* en T23, T24 y T25 en la formación donde domina esta especie, con variaciones de cobertura entre un 34% y 51%.

En relación a las diferencias significativas, el aumento y descenso de *D. spicata* ocurre en transectas donde la cobertura siempre ha sido baja, destacando de esta forma cualquier descenso de su cobertura. No obstante, la transecta que ha disminuido la cobertura a valores absolutos mínimos es T26, la cual presentaba una cobertura de 7,8% en MB0 y M1, disminuyendo su cobertura con fluctuaciones entre monitoreos, a menos de un 1% en M9 y M10. Asimismo, destacar que esta transecta se localiza más cerca de los faldeos de los cerros al noroeste del área de Tilopozo, más alejada del núcleo del salar.

Con respecto a los descensos significativos de *J. balticus*, éstos presentaron en M2 la principal disminución para todas sus transectas, no obstante, desde M3 en adelante esta cobertura fue menos variable, presentando inclusive una mayor recuperación en M7 (invierno 2019), aunque en el último año de seguimiento (2020-2021) presentó nuevamente una disminución tanto en M9 y M10.

Sobre el descenso significativo de *T. absinthioides*, se puede mencionar que en M2, también se registró la mayor diferencia de cobertura en las transectas T23 y T24, con un descenso de la cobertura absoluta con respecto a MB0 y M1, sin embargo, esta cobertura fue variando en monitoreos posteriores, aumentando generalmente en los monitoreos de invierno, alcanzando máximos muy distintos a los de verano. En T25, probablemente la significancia en la disminución de la cobertura corresponda a que siempre ha presentado baja cobertura (menos del 10%), y cualquier disminución refleja una variación importante.

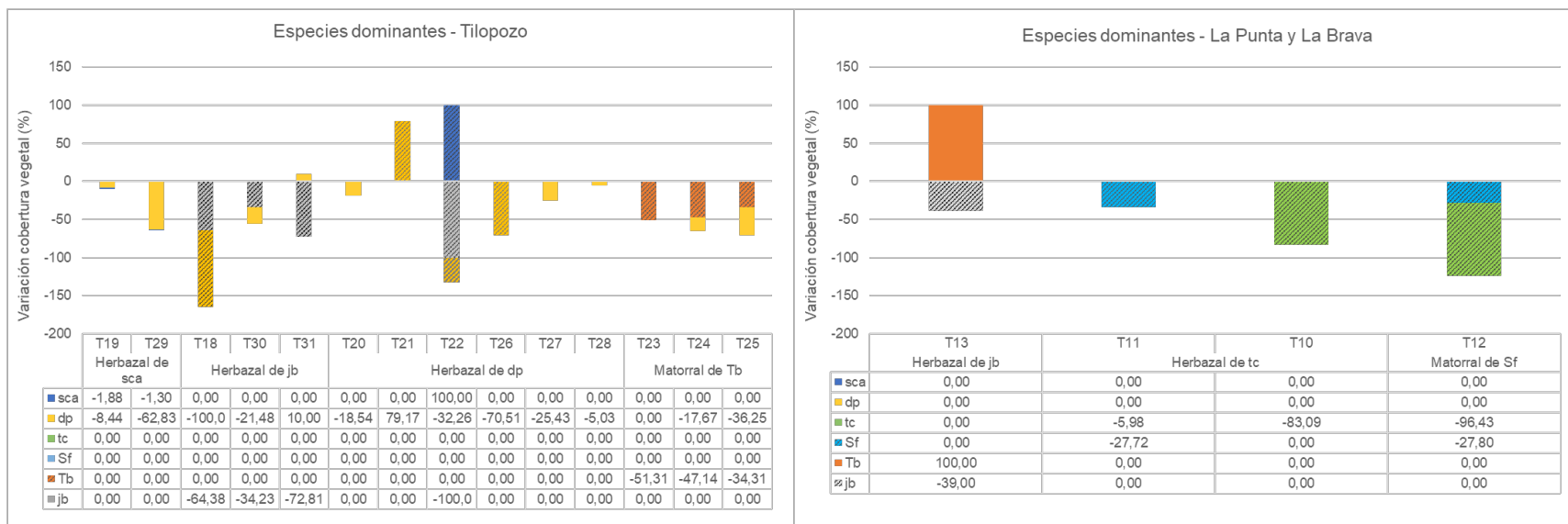
Entre las especies acompañantes, las variaciones tienen un rango entre -54% a 112% y un descenso con significancia estadística de *Lycium humile* en T18, resaltando su disminución al tener baja cobertura absoluta desde MB0 y M1 (8,6%), y una disminución con fluctuaciones entre M2 a M10, con mínimas de 2,2% (M3) y 2,6%(M7), aunque con un aumento en el último año de seguimiento, alcanzando una cobertura de 6,0% en M10 (ver detalles en **Anexo I de Vegetación y Flora**).

En el subsector La Punta- La Brava (Figura N° 2-1 y Figura N° 2-2 derecha), entre las especies dominantes el rango de variación va desde -96% a 100%, con las siguientes diferencias significativas (estadísticamente):

- La especie *T. concinna* en T10 y en T12 con descensos del 83% y 96% respectivamente, debido a una disminución paulatina de la cobertura en la formación de la T10 y la desaparición de la presencia desde M3 en T12.
- La especie *S. fruticosa*, disminuye en 28% en T11 y T12, probablemente por un descenso paulatino, aunque no representa las mayores variaciones en ambas transectas.
- La especie *J. balticus*, disminuye un 39% en T13, probablemente por los mayores descensos de la cobertura absoluta registrada en M2, M6 y M9, ya que en los otros monitoreos muestra una recuperación de la cobertura aunque no se ha alcanzado a registrar la cobertura inicial de MB0 o M1.

Entre las especies acompañantes del subsector, *Puccinellia frigida* registra variaciones significativas al descenso en T11 y T10, probablemente por la baja cobertura que presenta (<2% cobertura absoluta), acentuándose cualquier descenso en su caso, además que en M10 ya no se registra su presencia en ambas transectas (**Figura N° 2-2**).

Figura N° 2-1. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies dominantes en las formaciones del sector Tilopozo y La Punta y La Brava, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M10).

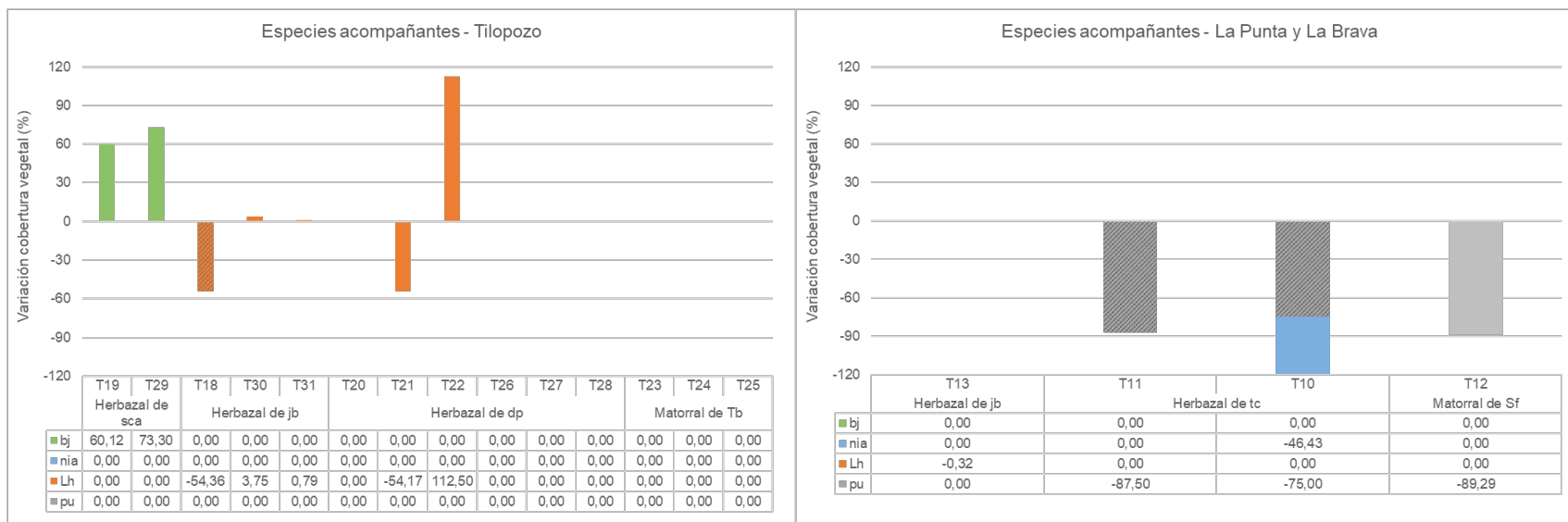


Donde: Achurado en columnas representan variaciones significativas estadísticamente considerando un valor de $p < 0,05$, correspondientes a: dp-T18; jb-T18; jb-T30; jb-T31; dp-T21, jb-T22, dp-T22; sca-T22, dp-T26; Tb-T23; Tb-T24; Tb-T25; jb-T13; Sf-T11, tc-T10, tc-T12; Sf-T12.

Especies: sca: *Schoenoplectus californicus*, dp: *Distichlis spicata*, tc: *Triglochin concinna*, Sf: *Sarcocornia fruticosa*, Tb: *Tessaria absinthioides*, jb: *Juncus balticus*.

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 2-2. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies acompañantes en las formaciones del sector Tilipozo y La Punta y La Brava, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M10).



Donde: Achurado en columnas representan variaciones significativas estadísticamente considerando un valor de $p < 0,05$, correspondientes a: Lh-T18, pu-T11, pu-T10.

Especies: bj: *Baccharis juncea*, nia: *Nitrophila atacamensis*, Lh: *Lycium humile*, pu: *Puccinellia frigida*.

Fuente: Elaboración propia.

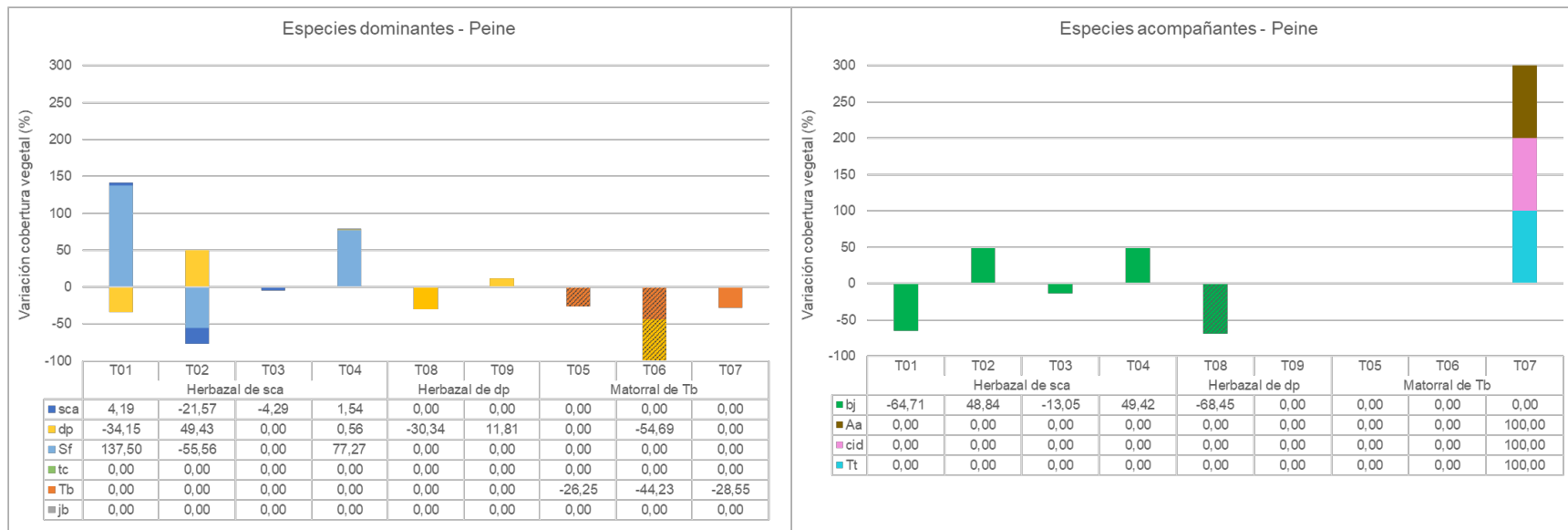
b) Sistema Peine

En este sector, la variación de las coberturas de las especies por transecta registra una amplia variabilidad con un rango entre -55% a 137% entre las dominantes y de -68% a 100% entre las acompañantes (Figura N° 2-3).

Entre las especies dominantes, se observan varios aumentos principalmente en las transectas del herbazal de *S. californicus* sin presentar diferencias significativas entre pestos, mientras que en las variaciones de cobertura al descenso se presentan diferencias significativas en dos transectas, para dos especies; la especie *T. absinthioides* presenta una variación de 26% y 44% en T05 y T06, respectivamente, y un descenso de 55% para *D. spicata* en la transecta T06 (Figura N° 2-3 **izquierda**).

Entre las especies acompañantes, se observan aumentos y descensos entre las cuatro especies representantes, siendo particular la variación de las especies *Atriplex atacamensis*, *Cistanthe densiflora* y *Tiquilia atacamensis* con un aumento del 100% en T07, ya que estas tres especies no habían sido registradas en MB0 o M1 y solo aparecen en los monitoreos M6 y M7. La única variación significativa (estadísticamente) se registra para la especie *B. juncea* en T08, con un descenso de un 68%, probablemente por un descenso sostenido, aunque es una especie que presenta una baja cobertura en la formación, en todos los monitoreos <5% de cobertura absoluta (Figura N° 2-3 **derecha**; detalles en **Anexo I de Vegetación y Flora**).

Figura N° 2-3. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies dominantes y acompañantes en las formaciones del sector Peine, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M10).



Donde: Achurado en columnas representan variaciones significativas estadísticamente considerando un valor de $p < 0,05$, correspondientes a: Tb-T05; Tb-T06; dp-T06; bj-T08.

Especies: sca: *Schoenoplectus californicus*, dp: *Distichlis spicata*, Sf: *Sarcocornia fruticosa*, tc: *Triglochin concinna*, Tb: *Tessaria absinthioides*, jb: *Juncus balticus*; bj: *Baccharis juncea*, Aa: *Atriplex atacamensis*, cid: *Cistanthe densiflora*, Tt: *Tiquilia atacamensis*

Fuente: Elaboración propia.

3. ANÁLISIS DE LA COBERTURA ACTIVA

3.1. Comparación de la cobertura activa con línea de base

La evaluación de la condición del estado ecológico en la cobertura activa obtenida a partir del NDVI de imágenes de alta resolución 2017-2021, se realiza por sector en consideración a lo señalado en el PMB, referente a que *“se establece como criterio de mantención del estado ecológico, que las variables de estado se mantengan dentro del registro de línea de base, esto es que los valores medidos anualmente en promedio, se mantengan en el rango de los valores registrados históricamente por sector.”*

Al respecto, en este acápite se evalúa por sector este punto en específico del PMB. Para esto, se compararon las superficies de 2017-2021 con las áreas máximas y mínimas propuestas para el seguimiento de polígonos de vegetación mediante imágenes de alta resolución según el Apéndice B del Anexo 2 de la Adenda 5 del Proyecto (**Tabla N° 3-1**).

La evaluación de cambios en el estado ecológico, se realizó de acuerdo a lo señalado en el PMB, que señala *“se entenderá como un cambio en tendencia según la evaluación realizada después de 3 años consecutivos (periodos), respecto su comportamiento previo de línea de base o registros históricos”*. De acuerdo con esto, se comparó la mantención de las coberturas anuales de monitoreo para el periodo posterior de operación del proyecto dentro del rango de superficies históricas por sector (**Tabla N° 3-1**).

Tabla N° 3-1. Registros históricos de superficies de vegetación activa obtenidos con el NDVI de imágenes de alta resolución.

VALORES HISTÓRICOS DESDE ALTA RESOLUCIÓN		
Sector / Objeto de seguimiento	Superficie min. (ha)	Superficie máx. (ha)
Tilopozo - La Punta y La Brava/ Polígono de vegetación COT	113,6	343,3
Tilopozo - La Punta y La Brava/ Polígono Herbazal de <i>Schoenoplectus</i> [§]	26,0	59,2
Peine/ Polígono de vegetación COT	157,7	242,8
Peine/ Polígono Peine Herbazal de <i>Schoenoplectus</i> [§]	23,0	22,6

[§]La formación Herbazal de *Schoenoplectus* se evalúa en unidades de Vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus* según homologación de las formaciones en seguimiento con la COT presentada en la Tabla N°3-2. Polígono de vegetación COT = superficie total del sector con vegetación. Fuente: Tabla 5.3 “Resumen de registros máximos y mínimos propuestos para monitoreo de vegetación y cuerpos acuáticos, mediante herramientas de teledetección para sectores Tilopozo, Peine, Soncor y Quelana”, del Apéndice B, Anexo N°2 (Adenda N°5 – RWL, 2015).

Los resultados y discusión obtenidos por sector de la comparación con la línea de base de la cobertura activa obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución, se presentan

directamente en el **Informe de Estado Ecológico del Sistema, secciones 2.1.1.1.2 para el Sistema La Punta – La Brava y 2.1.2.1.2 para el Sistema Peine.**

3.2. Análisis de recurrencia de la cobertura activa

De forma complementaria a lo exigido en el PMB, con las coberturas de vegetación activa obtenidas con el índice **NDVI de imágenes de alta resolución durante el periodo 2017-2021**, se analiza el comportamiento multitemporal de esta cobertura, utilizando las superficies obtenidas para los 5 años de monitoreo en el periodo marzo – abril³.

Este análisis complementario se realiza con el fin de evaluar la variabilidad espacial de la cobertura activa mediante un análisis del **nivel de recurrencia**⁴ entre los años 2017 a 2021, de la cobertura activa en las formaciones de seguimiento, donde las áreas de superposición resultantes representan el nivel variabilidad o estabilidad espacial en seguimientos sucesivos. El resultado determina el grado de estabilidad de la vegetación, que se encuentra sujeta a diversos procesos dinámicos, mapeando las etapas sucesionales y proporcionando información de la dinámica vegetacional.

Las **áreas de evaluación de la recurrencia** corresponden a las formaciones de seguimiento por sector. Este análisis se realiza con el fin de poder relacionar los resultados de las coberturas vegetales medidas *in situ* (transectas), con la cobertura de vegetación activa registrada con el NDVI de imágenes de alta resolución y según unidades vegetales de la Carta de Ocupación de Tierras (COT). Para esto, previamente se realizó una selección y homologación de la denominación de las formaciones vegetales monitoreadas, según se presenta en la **Tabla N°3-2**.

Para la determinación de las áreas y sus niveles de recurrencia se consideraron aquellas superficies de vegetación activa que fueron el resultado de los cálculos obtenidos a partir del método COT- NDVI de imágenes satelitales⁵, que representan la cobertura vegetal de mayor grado de vigorosidad para el periodo de verano en los años 2017 a 2021 (Figura N°3-2). Las capas de entidades fueron interceptadas entre ellas en formato *shape* y luego con las unidades de formaciones de monitoreo, según los límites de la Carta de Ocupación de Tierras en su última actualización disponible (verano 2021).

Estas coberturas de vegetación activa superpuestas, fueron clasificadas según el porcentaje presencia entre los seguimientos 2017 a 2021, considerando **cuatro estratos según el nivel recurrencia entre el año 1 y año 5 de monitoreo:**

³ Se refiere como comportamiento multitemporal a las variaciones espaciales y temporales entre los cuatro monitoreos, ya que para evaluar una tendencia estadística se requieren de mayor cantidad de datos. Por lo mismo, esto último se analiza posteriormente con los datos provenientes de imágenes Landsat para un periodo de 11 años, 2009-2021 (abril 2021).

⁴ Nivel de recurrencia se refiere al número de superposiciones de una misma condición de análisis, es decir la presencia en seguimientos sucesivos, en este caso de la cobertura vegetal activa obtenida desde el índice NDVI para los años de monitoreo 2017-2021.

⁵ Metodología desarrollada, en Informes Anuales del Plan de Manejo Biótico: Albemarle (2017 a 2021).

- (1) no recurrente o presencia en uno de cinco seguimientos (1/5; 20%),
- (2) recurrencia en dos de cinco seguimientos (2/5; 40%),
- (3) recurrencia en tres y cuatro de cinco seguimientos (3/5 – 4/5; 60% a 80%),
- (4) recurrencia en cinco de cinco seguimientos (5/5; 100%) y
- (5) inactividad o recurrencia nula (0/5; 0%).

El ajuste en la clasificación de los niveles de recurrencia responde a una calibración del modelo para seguimientos posteriores, en respuesta a la mejor estimación de la dinámica natural de las formaciones vegetales en seguimiento de cada y al robustecimiento del modelo.

El proceso de determinación de los niveles de recurrencia se describe en la **Figura N°3-1**. La reasignación de los porcentajes por estrato utilizada en el presente informe, y en comparación con lo utilizado el año anterior y que se describió en el Informe Anual N°4, **Anexo I de Estado Ecológico del Sistema año N°4**, se debe a un ajuste de valores para la generación de un mapeo de percentiles, que pueda ser asociado a otras comparaciones estadísticas. Además corresponde a un ajuste para la determinación de un porcentaje de variabilidad temporal, que evite la sobrestimación/subestimación de áreas de alta o baja variabilidad al proceder con la agregación de años posteriores, manteniendo un rango porcentual que explica la dinámica de ocupación de vegetación activa en las unidades de cada formación vegetal. Menor cantidad de rangos podría generalizar áreas y dificultar la comprensión de la dinámica vegetacional, o incorporar áreas con mayor variabilidad en zonas más estables generando alertas no consecuentes con el estado ecológico, sino de nivel metodológico. Estos rangos serán los usados de aquí en adelante en informes posteriores.

El análisis de recurrencia está determinado por el tamaño de la muestra; por lo que los resultados de las superficies de vegetación activa por percentiles, aumentará o disminuirá en la medida que se adicionen nuevos datos.

La evaluación del cambio en la condición de la cobertura de vegetación activa, se realiza según las superficies determinadas para cada uno de los niveles de recurrencia en las formaciones vegetales en seguimiento por sector. Según esto, mayores superficies con nivel de recurrencia de 0% a 20%, sugieren una alta variabilidad/inestabilidad en la cobertura vegetal activa de la(s) formación(es) de seguimiento. Lo contrario se refleja en superficies con recurrencia de 100%, mostrando mayor estabilidad de la cobertura activa (**Figura N°3-2 y Figura N° 3-3**).

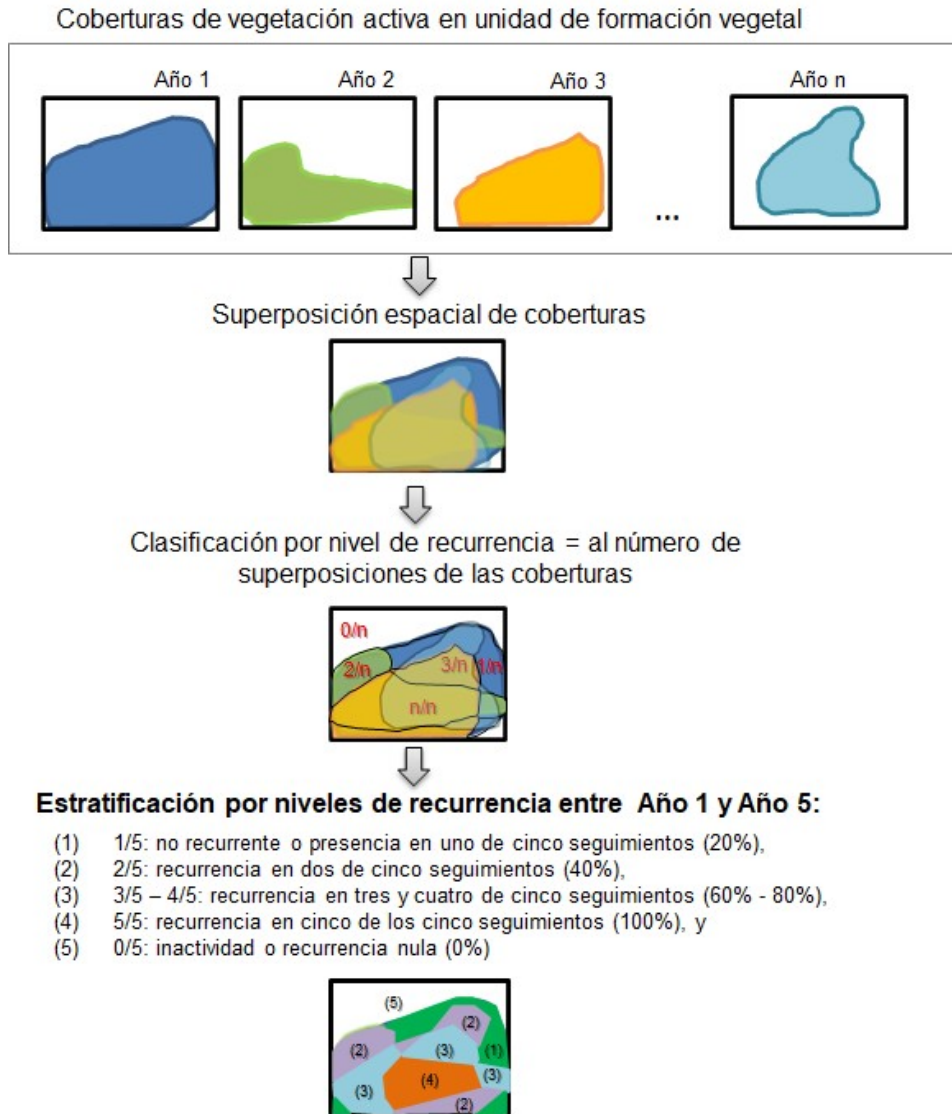
Los resultados y discusión del análisis de recurrencia de la cobertura activa por sector se presentan a continuación.

Tabla N°3-2. Homologación de formaciones vegetales de seguimiento, según monitoreos de Transectas y COT- NDVI

Formaciones vegetales de seguimiento en Transectas		Denominación de formaciones vegetales seguimiento en la COT y Vegetación activa- NDVI		
Formaciones monitoreadas	Transecta(s)	Formación Vegetal	Dominancia COT	
Herbazales	<i>Herbazal de Distichlis spicata</i>	T09; T20; T21; T26; T27; T28	Vega de dp	Vega con dominancia de dp
		T08	Vega de bj dp	
		T22	Matorral hídrico - Vega de Lh dp	Matorral hídrico - Vega con dominancia de Lh
	<i>Herbazal de Juncus balticus</i>	-	Matorral hídrico - Vega de Lh dp sca	
		T13; T18	Matorral hídrico - Vega de Lh jb	Matorral hídrico - Vega con dominancia de Lh
		T30; T31	Matorral hídrico - Vega de Lh dp jb	
		-	Vega de jb	Vega con dominancia de jb
	<i>Herbazal de Schoenoplectus californicus</i>	T01; T02; T03	Vega de sca bj	
		-	Vega de sca	Vega con dominancia de sca
		T19; T29	Vega de sca bj dp	
		T04	Vega de sca dp	
	<i>Herbazal de Triglochin concinna</i>	-	Matorral hídrico - Vega de Lh jb dp; Matorral hídrico - Vega de Lh jb sca	Matorral hídrico - Vega con dominancia de Lh
T11		Vega de tc	Vega con dominancia de tc	
T10		Vega de nia tc	Vega de nia tc	
Matorrales	<i>Matorral de Sarcocornia fruticosa</i>	T15	Matorral hídrico - Vega de Sf nia	
		-	Matorral hídrico - Vega de Sf dp; Matorral hídrico - Vega de Sf dp bj; Matorral hídrico - Vega de Sf bj dp; Matorral hídrico - Vega de Sf tc dp	Matorral hídrico - Vega con dominancia de Sf
		T12; T16; T17	Matorral hídrico de Sf	Matorral hídrico con dominancia de Sf
	<i>Matorral de Tessaria absinthioides</i>	T24; T25	Matorral - Vega de Tb dp	Matorral - Vega de Tb dp
		T23	Matorral de Tb	
		T05; T07	Matorral - Vega de Tb Aa dp	Matorral con dominancia de Tb
		T06	Matorral de Tb Aa	
-	Matorral de Tb Lh; Matorral hídrico - Vega de Tb Lh dp	Matorral hídrico - Vega de Tb Lh		
Otros recubrimientos	T14	-	-	

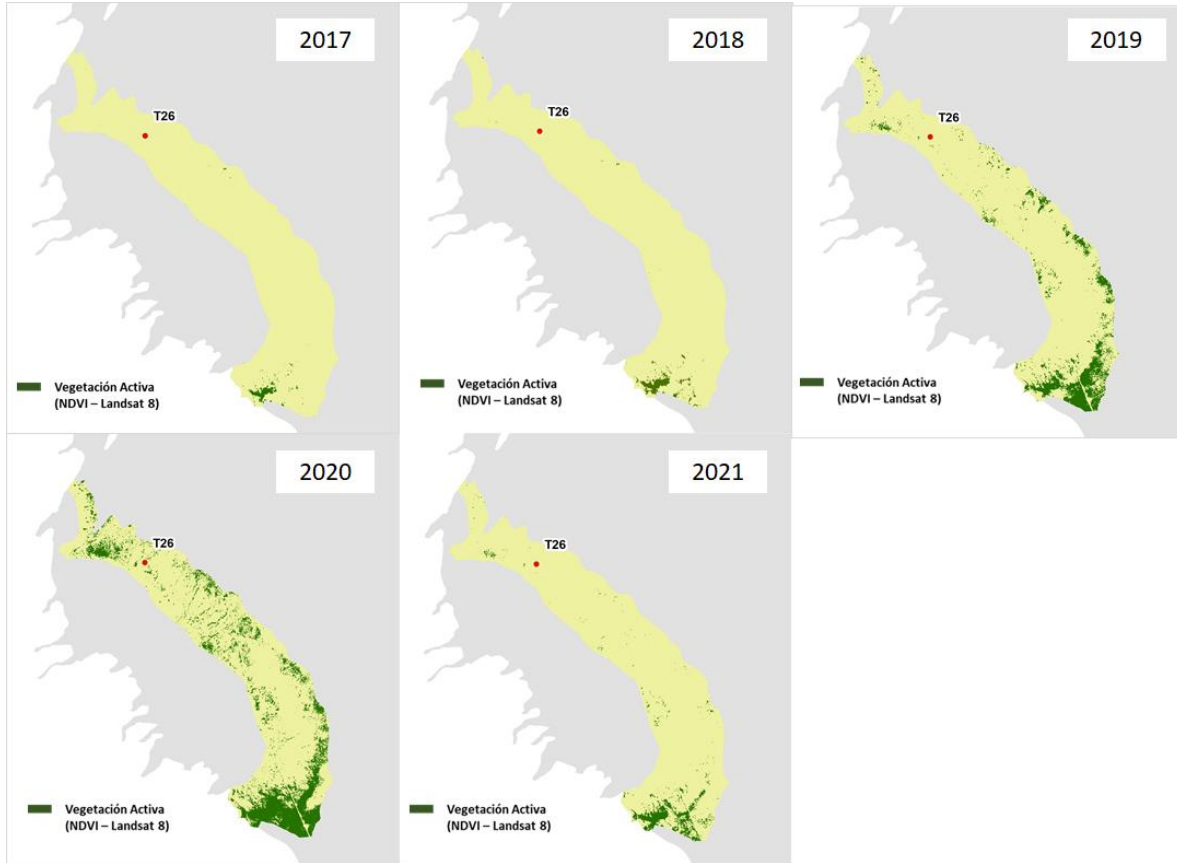
Códigos especies arbustivas: Aa: *Atriplex atacamensis*, Lh: *Lycium humile*, Sf: *Sarcocornia fruticosa*, Tb: *Tessaria absinthioides*; Especies herbáceas: bj: *Baccharis juncea*, dp: *Distichlis spicata*, jb: *Juncus balticus*, nia: *Nitrophila atacamensis*, sca: *Schoenoplectus californicus*, tc: *Triglochin concinna*. Fuente: Elaboración propia.

Figura N°3-1. Proceso metodológico de determinación del nivel de recurrencia de la cobertura de vegetación activa obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución para el periodo de verano (post - lluvia) 2017-2021.



Fuente: Elaboración propia

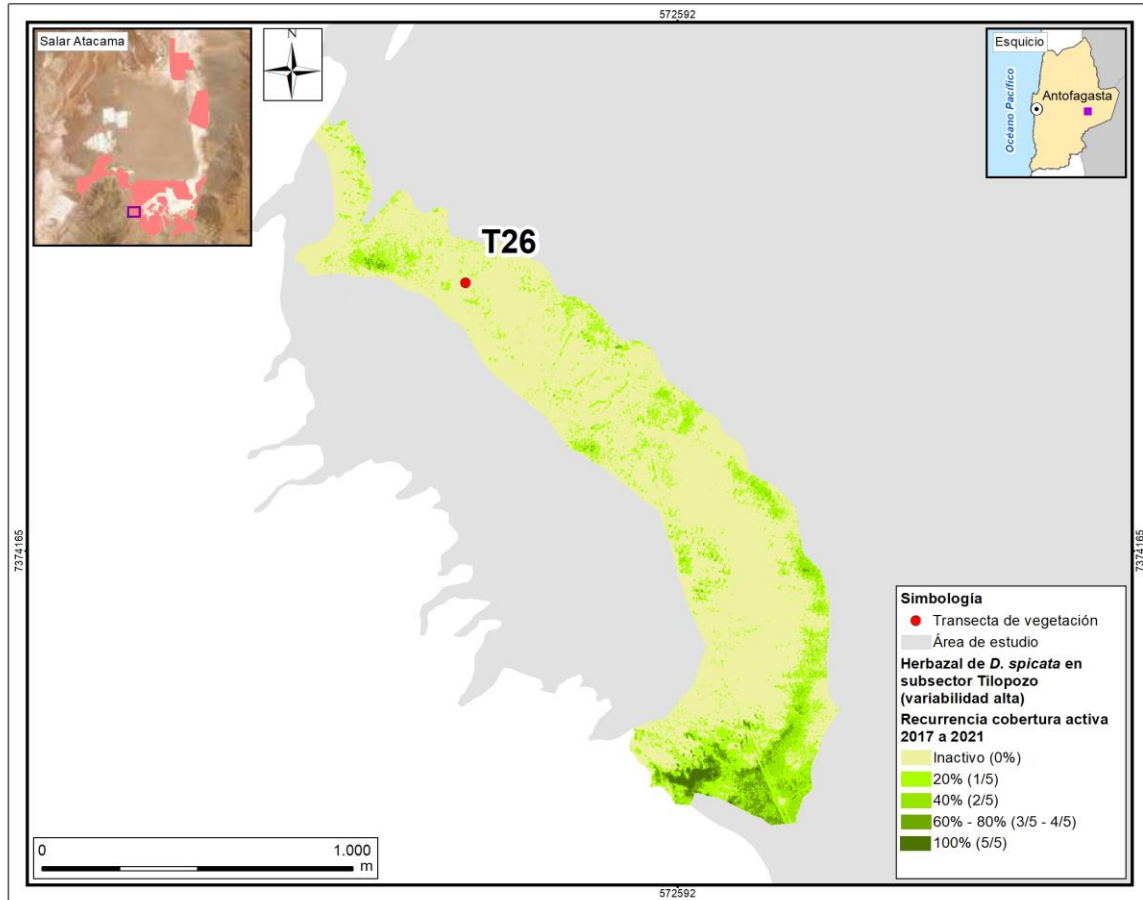
Figura N°3-2. Variación anual en formaciones azonales en seguimiento del sector Tilopozo – La Punta y La Brava, caso herbazal de *D. spicata* en subsector Tilopozo.



* Formación vegetal de seguimiento, imágenes desde izquierda – arriba, variación de vegetación activa en seguimientos 2017 a 2021.

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 3-3. Nivel de recurrencia en formaciones azonales en seguimiento del sector Tilopozo – La Punta y La Brava, caso herbazal de *D. spicata* en subsector Tilopozo.



Fuente: Elaboración propia.

a) Sistema La Punta y La Brava

La **Tabla N° 3-3** y la **Figura N°3-4** presentan las superficies y los porcentajes de la cobertura vegetal activa según el nivel de recurrencia para los cinco años de monitoreo anual (veranos post - lluvia, 2017-2021), el total por subsector y en las formaciones vegetales de estudio, respectivamente.

Para el sector Tilopozo – La Punta y la Brava, las formaciones en seguimiento (**Tabla N°3-2**) abarcan una superficie COT total de 2.103,8 hectáreas según monitoreos 2017-2021; de ésta 823,5 hectáreas, equivalente a un 39,1%, corresponden a lo que ha reflejado actividad según el NDVI en alguno de los monitoreos (actividad acumulada). En contraparte domina la baja actividad o menor cobertura de la vegetación según el alto porcentaje inactivo en el sector con un 60,9% del total (1.280,3 hectáreas; **Tabla N° 3-3**).

Dentro de la cobertura activa del sector (823,4 hectáreas), 130,1 hectáreas (6,2%) presentan mayor nivel de recurrencia en 5 de los 5 monitoreos realizados (recurrencia 100%), lo que equivale a las superficies más estables dentro del sector. En el otro sentido, una superficie de 303,4 hectáreas (14,4%), corresponde a la de menor nivel de recurrencia de 20%, reflejando esto una mayor inestabilidad de su actividad vegetal (**Tabla N° 3-3**). Esto último ocurre principalmente en el matorral de *Tessaria absinthioides* y el herbazal de *Distichlis spicata* del subsector Tilopozo con 127,4 y 90,9 hectáreas con nivel de recurrencia de 20% (**Figura N°3-4**).

Tabla N° 3-3. Superficies y porcentajes de cobertura de vegetación activa según nivel de recurrencia entre el Año 1 (2017) y Año 5 (2021) obtenidos con el NDVI de imágenes satelitales de alta resolución para monitoreos anuales de verano en las formaciones en seguimiento por subsector Tilopozo y La Punta-La Brava.

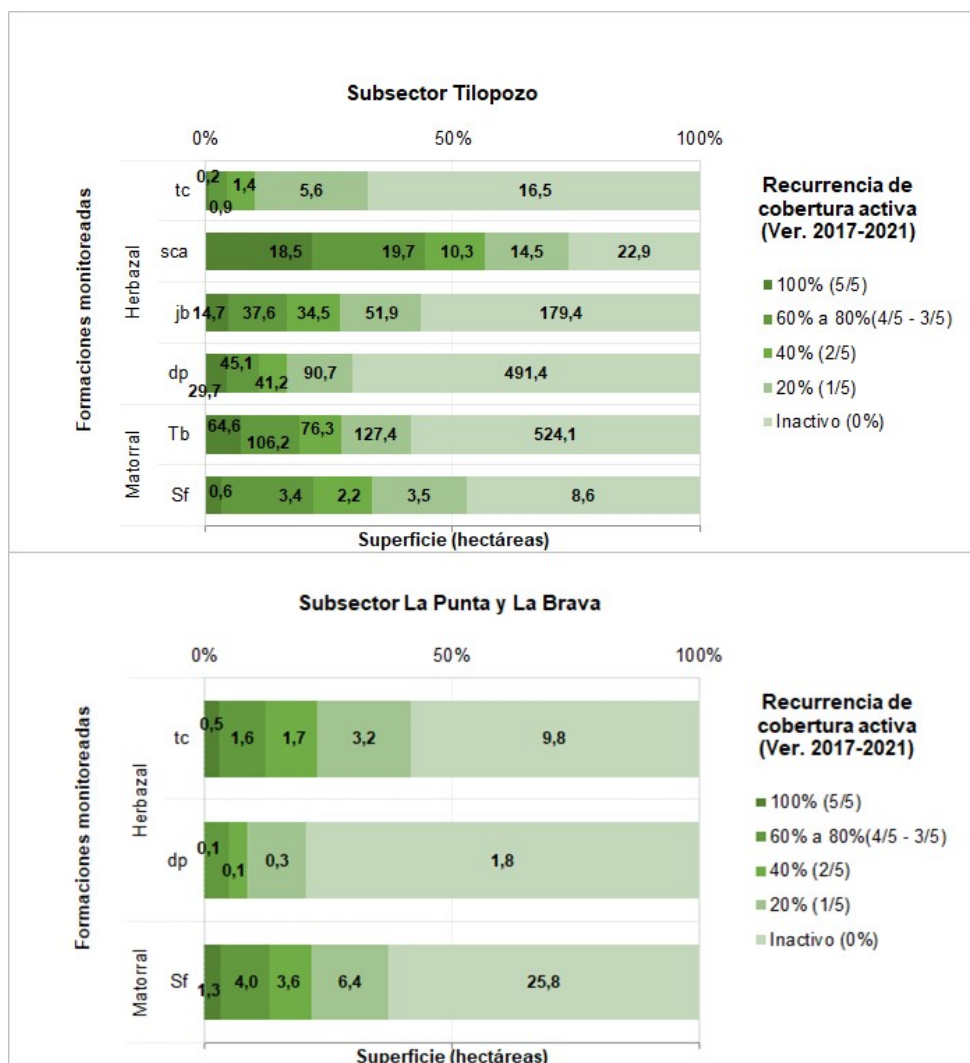
SUBSECTOR	Cobertura de vegetación activa por estrato según nivel de recurrencia Año 1 - Año 5										
	100% (5/5)		60% al 80% (3/5 - 4/5)		40% (2/5)		20% (1/5)		Inactivo (0%)		Total general**
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha
Tilopozo	128,3	6,3	212,9	10,4	165,9	8,1	293,6	14,4	1.242,8	60,8	2.043,5
La Punta y La Brava	1,8	3,0	5,7	9,5	5,4	9,0	9,8	16,3	37,5	62,2	60,3
Total en formaciones de seguimiento*	130,1	6,2	218,6	10,4	171,3	8,1	303,4	14,4	1.280,3	60,9	2.103,8

* Formaciones vegetales de seguimiento según homologación entre la COT y monitoreos de transectas (detalle en Tabla N°2-2). ** Unión de unidades COT 2017, 2018, 2019 y 2021 de las formaciones vegetales de seguimiento.

Fuente: Elaboración propia.

La Punta y La Brava registra una cobertura activa acumulada entre 2017 y 2021 de 22,7 hectáreas en las formaciones en seguimiento (37,6% del total de cobertura vegetal para el sector); no obstante, prevalece una baja actividad/cobertura de la vegetación, según el mayor porcentaje de superficie inactiva con 62,2% del total en seguimiento del sector (37,5 hectáreas; **Tabla N° 3-3**). Este subsector presenta dos formaciones monitoreadas, herbazal de *Triglochin concinna* y el matorral de *Sarcocornia fruticosa*, las cuales presentan baja actividad/vigor, según la proporción de su superficie con 42,8% (25,8 ha.) y 16,3% (9,8 ha.), clasificada como inactiva en base al análisis NDVI (**Figura N°3-4**).

Figura N°3-4. Evaluación de la recurrencia de la cobertura vegetal activa en las formaciones de monitoreo, obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución en monitoreos anuales de verano 2017-2021 en los subsectores de Tilopozo y La Punta- La Brava.



Donde Especies dominantes en formaciones monitoreadas: Tb: *Tessaria absinthioides*; Sf: *Sarcocornia fruticosa*; dp: *Distichlis spicata*; tc: *Triglochin concinna*; sca: *Schoenoplectus californicus*; jb: *Juncus balticus*. Fuente: Elaboración propia.

El subsector **Tilopozo**, presenta 800,7 hectáreas de cobertura activa acumulada entre 2017 y 2021, aunque es superior la inactiva con 1.242,8 hectáreas (60,8% de la superficie de las formaciones en seguimiento del sector; **Tabla N° 3-3**). Este resultado, se explica principalmente por la alta proporción (de un 25,6%; 524,1 hectáreas de su superficie) con cobertura inactiva en la formación de matorral de *Tessaria absinthioides* (**Figura N°3-4**).

b) Sistema Peine

La **Tabla N° 3-4** y **Figura N°3-5** presentan las superficies y los porcentajes de la cobertura vegetal activa según el nivel de recurrencia para los cinco años de monitoreo anual (veranos post - lluvia, 2017 a 2021) en las formaciones vegetales en seguimiento del sector.

Este sector, destaca por la mayor cobertura activa acumulada entre los sectores de monitoreo, con un total de 932,7 hectáreas, lo cual equivale a un 41,9% de la superficie total activa de las formaciones en seguimiento del sector (2.228,2 hectáreas). Por otra parte, la cobertura inactiva abarca 1.295,5 hectáreas lo que equivale a un 58,1% de la superficie total en seguimiento para este sector (2.228,2 hectáreas) (**Tabla N° 3-4**).

Dentro de la cobertura activa acumulada del sector (932,7 hectáreas), 96,6 hectáreas presentan mayor nivel de recurrencia en 5 de los 5 monitoreos realizados (recurrencia 100%), lo que equivale a las superficies más estables dentro del sector (**Tabla N° 3-4**). La formación que refleja la mejor condición de estabilidad es el matorral de *T. absinthioides*, el cual presentan la mayor proporción de superficie con nivel de recurrencia de 100% (82,4 hectáreas, 3,7% de la superficie total del sector).

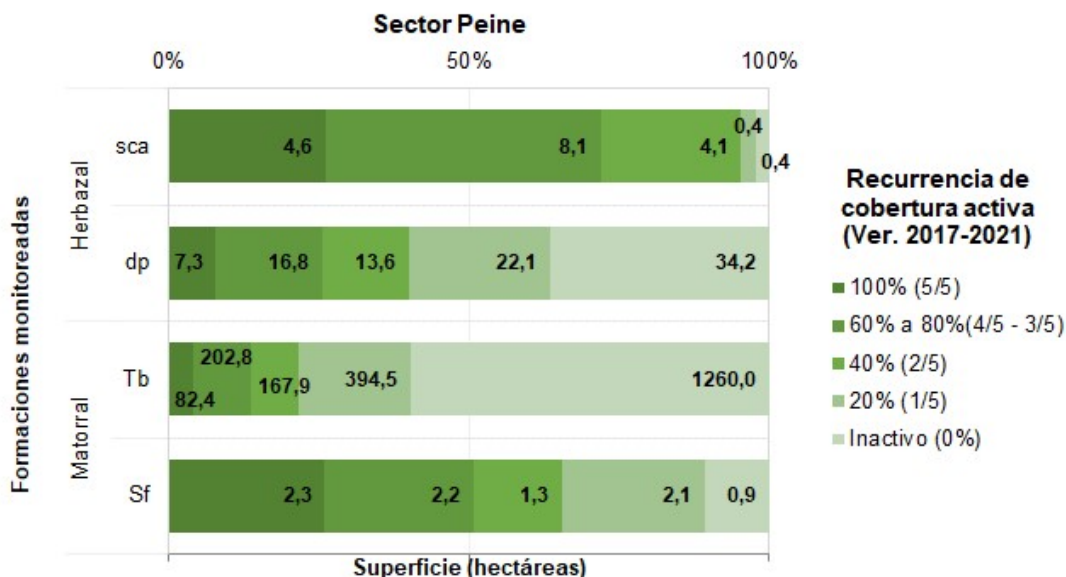
Tabla N° 3-4. Superficies y porcentajes de cobertura de vegetación activa según nivel de recurrencia entre el Año 1 (2017) y Año 5 (2021) obtenidos con el NDVI de imágenes satelitales de alta resolución para monitoreos anuales de verano en las formaciones de seguimiento en el sector Peine.

SECTOR PEINE	Cobertura de vegetación activa por estrato según nivel de recurrencia Año 1 - Año 5										
	100% (5/5)		60% al 80% (3/5 - 4/5)		40% (2/5)		20% (1/5)		Inactivo (0%)		Total general**
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha
Formaciones de seguimiento	96,6	4,3	229,9	10,3	187,0	8,4	419,2	18,8	1.295,5	58,1	2.228,2

Formaciones vegetales de seguimiento según homologación entre la COT y monitoreos de transectas (detalle en Tabla N°2-2). ** Unión de unidades COT 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 de las formaciones vegetales de seguimiento. Fuente:

Cedrem Consultores.

Figura N°3-5. Evaluación de la recurrencia de la cobertura vegetal activa en las formaciones de monitoreo, obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución en monitoreos anuales de verano 2017-2021 en el sector Peine.



Donde Especies dominantes en formaciones monitoreadas: Tb: *Tessaria absinthioides*; Sf: *Sarcocornia fruticosa*; dp: *Distichlis spicata*; tc: *Triglochin concinna*; sca: *Schoenoplectus californicus*; jb: *Juncus balticus*.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Comparación del NDVI Landsat con línea de base

Este análisis se realiza de forma complementaria a lo exigido por el PMB, para comparar los valores del NDVI de imágenes Landsat en el periodo posterior a la operación del proyecto (julio, 2016), con los registros propuestos para el monitoreo de vegetación mediante imágenes Landsat según el Apéndice B del Anexo 2 de la Adenda 5 del Proyecto (**Tabla N° 3-5**).

El análisis comparativo, se realiza de acuerdo a dicho Apéndice, que señala que el percentil 75 del NDVI, es decir, valor que es superado un 75% de las veces, como el límite para detectar si el sistema presenta una vigorosidad relativamente baja respecto a su comportamiento histórico.

Para hacer homólogo el cálculo del percentil 75 del NDVI, con los registros de línea de base (1985 - 2015), se utilizaron los valores de las imágenes de la temporada estival (desde diciembre hasta abril) en cada año posterior a la fecha de operación del proyecto, es decir el periodo diciembre 2016 a abril 2021. El proceso de obtención de los registros del NDVI Landsat, se describe en la **sección 3.4.1**.

La evaluación de cambios en el estado ecológico, se realizó de acuerdo a lo señalado en el PMB, que señala “se entenderá como un cambio en tendencia según la evaluación realizada después de 3 años consecutivos (periodos), respecto su comportamiento previo de línea de base o registros históricos”. De esta manera, el percentil 75 del NDVI en imágenes Landsat, para el periodo posterior a la operación del proyecto, se comparó con el registro histórico por sector según valores en la **Tabla N° 3-5**.

Tabla N° 3-5. Registros históricos del NDVI de percentil 75 propuestos para monitoreo de vegetación con imágenes Landsat de media resolución.

VALORES HISTÓRICOS MEDIANTE SATÉLITE LANDSAT DE MEDIA RESOLUCIÓN	
Sector / Objeto de seguimiento	NDVI (Percentil 75)
Tilopozo - La Punta y La Brava/ Polígono de vegetación COT	0,057
Tilopozo - La Punta y La Brava/ Polígonos de Herbazal de <i>Schoenoplectus</i> [§] de coberturas clara a muy densa	0,042 - 0,397
Peine/ Polígono de vegetación COT	0,058
Peine/ Polígono Peine Herbazal de <i>Schoenoplectus</i> [§] de cobertura muy densa	0,244

[§]La formación Herbazal de *Schoenoplectus* se evalúa en unidades de Vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus* según homologación de las formaciones en seguimiento con la COT presentada en la **Tabla N°3-2**.

Nota: Valores según Tabla 5.1 “Resumen de registros NDVI de probabilidad de excedencia de 75% propuestos para monitoreo de Vegetación mediante herramientas de teledetección para sectores Tilopozo, Peine, Soncor y Quelana”, del Apéndice B, Anexo N°2 (Adenda N°5 – RWL, 2015). Fuente: Elaboración propia.

Los resultados y discusión obtenidos por sector de la comparación con la línea de base de la cobertura activa obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución, se presentan directamente en el **Informe de Estado Ecológico del Sistema, secciones 2.1.1.1.2 para el Sistema La Punta – La Brava y 2.1.2.1.2 para el Sistema Peine**.

3.4. Comparación de la tendencia interanual del NDVI Landsat

De forma complementaria a lo exigido por el PMB y para poder evaluar estadísticamente cambios en la tendencia del NDVI, siendo éste el índice a partir del cual se determinan las coberturas de vegetación activa (como indicador de evaluación del estado ecológico), se analizó un periodo de estudio de 11 años superior al de seguimiento del proyecto (cinco años) y con frecuencia estacional, dado que las imágenes Landsat, aunque de menor resolución espacial (pixel de 30x30m), se encuentran disponibles con una alta frecuencia temporal (16 días) y para un amplio periodo histórico comparado con las imágenes de alta resolución.

Cabe mencionar que las áreas para las cuales se realiza el análisis del NDVI con imágenes Landsat son las mismas del análisis del NDVI de imágenes de alta resolución

2017-2021, correspondientes a las formaciones vegetales en seguimiento por sector (según homologación en la **Tabla N°3-2** con unidades vegetales de la Carta de Ocupación de Tierras, COT verano 2021).

A continuación, se describe la metodología empleada para el análisis de comparación de la tendencia con el NDVI de imágenes Landsat, mientras que los resultados y la discusión se presentan directamente en el **Informe Estado Ecológico del Sistema, secciones 2.1.1.1.2 para el Sistema La Punta – La Brava y 2.1.2.1.2 para el Sistema Peine.**

3.4.1. Obtención de registros NDVI Landsat

Para la obtención de los registros de NDVI, se descargaron y procesaron imágenes Landsat de resolución media, de tres tipos de sensores: 5 (TM), 7 (ETM+), y 8 (OLI), a modo de completar la serie temporal superior a 12 años de estudio (2009 – 2021 marzo) y considerando una imagen por estación (marzo-abril, agosto, octubre, diciembre). La **Tabla N°3-6** presenta el detalle de los sensores usados en el análisis del NDVI.

Tabla N°3-6. Características de los sensores utilizados en el análisis NDVI.

Sensor	Características	Detalle bandas utilizadas	Fechas de análisis
LANDSAT 5, TM (Thematic Mapper)	Bandas Sensor	3 rojo: 0.630–0.690 μm 4 NIR: 0.77–0.90 μm	2009 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2010 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2011 (marzo, agosto)
	Resolución espacial	Multiespectral: 30 mts	
LANDSAT 7, ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)	Bandas Sensor	3: Rojo: 0.630–0.692 μm 4: NIR: 0.772–0.898 μm 8: Pancromática: 0.515–0.896 μm	2011 (octubre, noviembre**) 2012 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2013 (octubre)
	Resolución espacial	Pancromática: 15mts Multiespectral: 30 mts	
LANDSAT 8, OLI (Operational Land Imager)	Bandas Sensor	4: Rojo: 0.630–0.680 μm	2013 (abril, agosto, diciembre) 2014 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2015 (abril, agosto, octubre, diciembre)
		5: NIR: 0.845–0.885 μm	
		8: Pancromática: 0.500–0.680 μm	
	Resolución espacial	9: Cirrus: 1.360–1.390 μm Pancromática: 15mts Multiespectral: 30 mts	2016 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2017 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2018 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2019 (marzo, septiembre**, octubre, diciembre) 2020 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2021 (marzo)

**La utilización de imágenes fuera de rango, dentro de lo considerado por estacionalidad, se debe a la utilización de un producto cuyas características técnicas sean las óptimas para la obtención de datos, descartando productos con baja visibilidad (cobertura de nubes) o valores numéricos; en este caso se reemplaza con imagen siguiente en disposición.

Fuente: Cedrem Consultores.

Las imágenes fueron adquiridas a través de la plataforma Earth Explorer del Servicio Geológico de Estados Unidos – United States Geological Survey USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Estas imágenes fueron obtenidas y procesadas considerando cuatro imágenes anuales correspondientes a una por estación, desde el año 2009 a 2021 (marzo 2021). Este conjunto de datos espaciales fue georreferenciado en Sistema de Referencia WGS84 (World Geodetic System 1984) y proyección cartográfica UTM zona 19S.

En la etapa de pre procesamiento, para cada imagen Landsat (y para cada una de sus bandas espectrales), se realizó una corrección radiométrica, la cual consiste en la conversión de los valores de píxeles desde números digitales (ND) a unidades de radiancia espectral absoluta [$W / (m^2 * sr * \mu m)$]; en este proceso los valores desde ND se transformaron a valores de reflectancia *Top-Atmospheric* (TOA).

El proceso de corrección radiométrica se utiliza como medio de calibración para disminuir la falta de uniformidad en los valores digitales debido a efectos producidos por errores sistemáticos en el sensor, tales como la contaminación de partículas en su plano focal, las que pueden manifestarse en forma de manchas y bandas en las imágenes. Esta conversión proporciona una base para la comparación de datos en una sola escena o entre imágenes adquiridas en fechas diferentes o por diferentes sensores (Chander *et al.*, 2009).

Posteriormente, se realizó la corrección atmosférica de cada imagen. Esta corrección busca reducir el efecto de la interacción de las moléculas y partículas de la atmósfera (vapor de agua, polvo en suspensión, entre otras) en la radiación electromagnética captada por los sensores de un satélite. La eliminación de los efectos atmosféricos y del terreno, recuperan los parámetros físicos de la superficie incluyendo la reflectancia, visibilidad del suelo y temperatura.

En el caso particular de las imágenes del sensor Landsat 7, además se corrigió el bandeo proveniente de un fallo en el Corrector de Escaneo Lineal (SLC) del satélite. En cada imagen se usó una del mismo sensor y con posición del bandeo diferente (los archivos originales de la imagen traen la información que debe ser reconstituida). En total, se utilizaron siete imágenes de este sensor y fueron usadas a modo de lograr completar la serie de tiempo estacional y multianual superior a 12 años de análisis.

Para todas las imágenes Landsat, la automatización del proceso de correcciones radiométrica y atmosférica; así como el relleno del bandeo en el caso de imágenes del sensor Landsat 7, se realizó mediante la plataforma de análisis “R”, que se encuentra bajo la Licencia Pública General (GPL por sus siglas en inglés) del proyecto colaborativo de software libre GNU. La secuencia de operaciones se ejecutó en un *script*, basados en los paquetes *RStoolbox*, *Landsat*, *Landsat8*, *Rgdal* (*gdal_fillnodata*), *Rgeos*, y *Raster*; este *script* también consideró la obtención del índice espectral NDVI. El proceso de extracción

de datos NDVI, tuvo en cuenta los estratos temáticos según su nivel de recurrencia y las superficies de las formaciones de seguimiento (**detalle sección 3.2**).

3.5. Análisis de correlaciones con el NDVI

De forma complementaria a lo exigido por el PMB y con el propósito de robustecer la discusión y conclusiones de los posibles factores que indiquen en la condición o el estado ecológico de la vegetación del salar, a continuación se presenta un **análisis de relaciones del NDVI** con la cobertura de vegetación medida *in situ* mediante transectas (sección 1) y variables hidroclimáticas.

Para este fin, se determinaron las relaciones lineales entre el NDVI obtenido de imágenes tanto de alta resolución como Landsat con las coberturas absolutas de vegetación determinadas en las transectas de monitoreo, distinguiendo entre los tipos de formaciones vegetales, dado que se sabe de diferencias en la respuesta fenológica de actividad vegetal y por ende en la variación de los valores del NDVI.

También, las variables hidroclimáticas usadas para correlación con el NDVI de imágenes Landsat (por su mayor data multitemporal) fueron: la precipitación y evaporación de la estación Peine en el Salar.

Las correlaciones lineales entre variables se determinaron con los coeficientes de Pearson (paramétrico) y Rho Spearman (no paramétrico) para examinar la fuerza y la dirección de la relación lineal entre el NDVI con las coberturas y variables hidroclimáticas.

El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a $+1$. Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más fuerte será la relación entre las variables. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

El signo del coeficiente indica la dirección de la relación. Si ambas variables tienden a aumentar o disminuir a la vez, el coeficiente es positivo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia arriba. Si una variable tiende a incrementarse mientras la otra disminuye, el coeficiente es negativo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia abajo.

Para determinar si la correlación entre las variables es significativa, se comparó el *valor p* con su nivel de significancia. Los niveles de significancia (denotado como α o alfa) usados fueron 0,05. Un α de 0,05 indica que el riesgo de concluir que existe una correlación, cuando en realidad no es así, es 5%. El *valor p* indica si el coeficiente de correlación es significativamente diferente de 0 (un coeficiente de 0 indica que no existe una relación lineal).

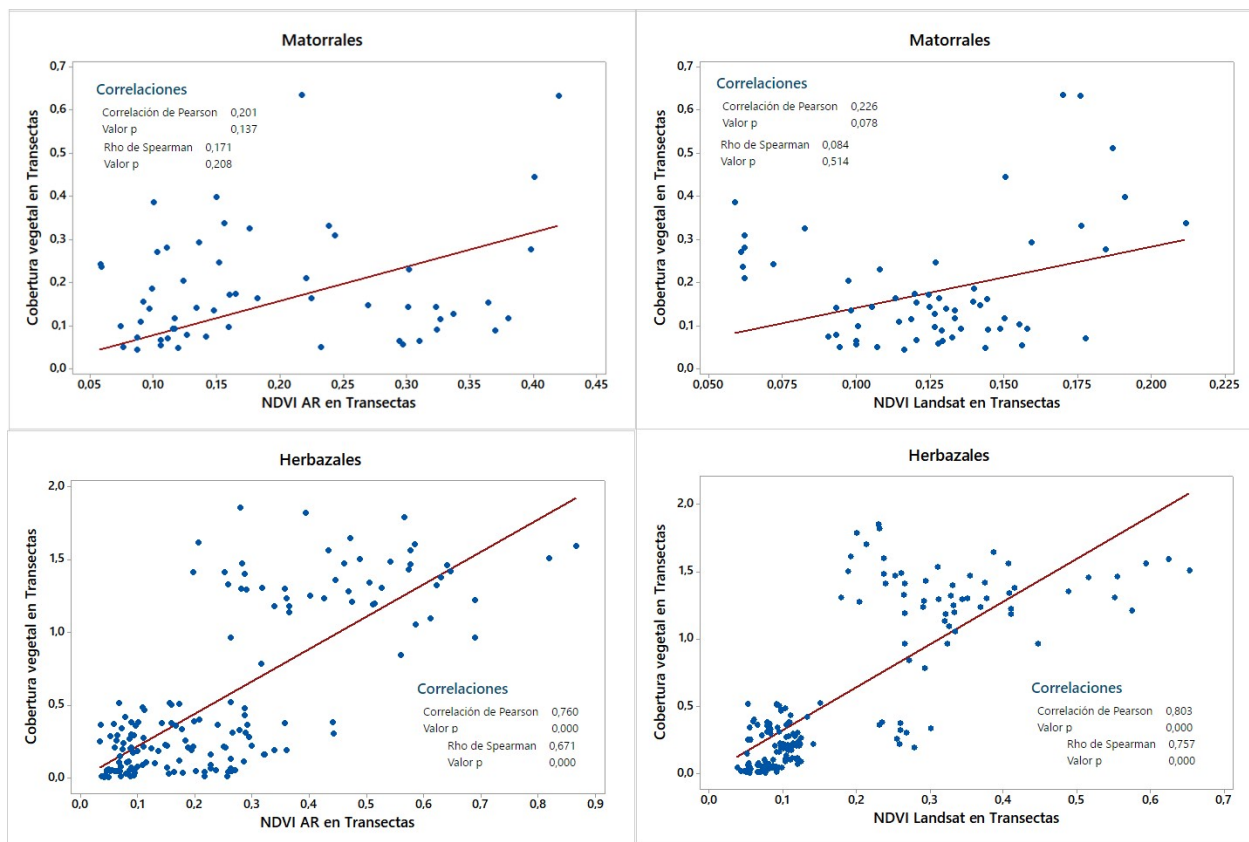
A continuación se describen los resultados de las correlaciones con el NDVI por variable de evaluación:

3.5.1. Validación del NDVI con las coberturas en transectas

Los resultados de correlaciones lineales entre la cobertura vegetal en transectas (según monitoreos 2016-2021) con el NDVI obtenido de imágenes de alta resolución y Landsat, muestran una relación proporcional entre estas variables, es decir mayor NDVI se refleja con valores más altos de cobertura. Además, esta relación es significativa para las formaciones de herbazales (**Figura N° 3-6**).

En base a las correlaciones determinadas entre el NDVI y las coberturas vegetales en las transectas de monitoreo, las tendencias del NDVI - Landsat y NDVI - AR se pueden extrapolar a las coberturas de herbazales (con correlaciones significativas; **Figura N° 3-6**). A partir de este ejercicio, se puede deducir una estabilidad en las coberturas vegetales para el periodo histórico 2009-2021 y las variaciones determinadas hacen parte de las transiciones generales en el sistema.

Figura N° 3-6. Correlaciones lineales entre el NDVI (obtenidos de imágenes de Alta Resolución- AR izquierda y Landsat - derecha) y las coberturas vegetales en transectas de los tipos de vegetación de monitoreo (2016-2021): matorrales (arriba) y herbazales (abajo).



Nota: Coeficientes de correlación Pearson (paramétrico) y Spearman (no paramétrico): Valores positivos cercanos a 1, significan relación proporcional de alta intensidad entre variables. El valor p < 0,05, refleja correlación significativa con nivel de confianza de 95%. Formaciones vegetales monitoreadas según homología de la COT en base a monitoreos de transectas (detalle en sección 1.5). Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Relación del NDVI con variables hidroclimáticas

Las correlaciones estimadas, no muestran una relación significativa (valor $p < 0,05$) del NDVI promedio anual (NDVI total, NDVI herbazales y NDVI matorrales) con las variables hidroclimáticas precipitación anual y evaporación anual (**Figura N° 3-7**).

Por otra parte, las correlaciones estacionales del NDVI con la precipitación anual sugieren diferencias según el tipo de formación vegetal. Durante el verano (diciembre) la relación es significativa para herbazales con valor de coeficiente 0,504. En los matorrales, la mayor relación lineal con el NDVI se determinó en el otoño del año siguiente al de las precipitaciones (*Lag* +1), con coeficiente significativo de hasta 0,645. Para los herbazales, esto ocurre durante el invierno y le sigue la estación de primavera y verano con coeficientes de Rho Spearman de 0,532, 0,522 y 0,504, respectivamente (**Tabla N°3-7**).

Las relaciones estacionales de la precipitación con el NDVI, muestran que los herbazales responden en más corto plazo a la escasez o superávit hídrico del Salar, principalmente en invierno y verano del mismo año; mientras que los matorrales (con especies menos hidrófilas), tienen una respuesta de mayor plazo, incluso durante el otoño del año siguiente (**Tabla N°3-7**).

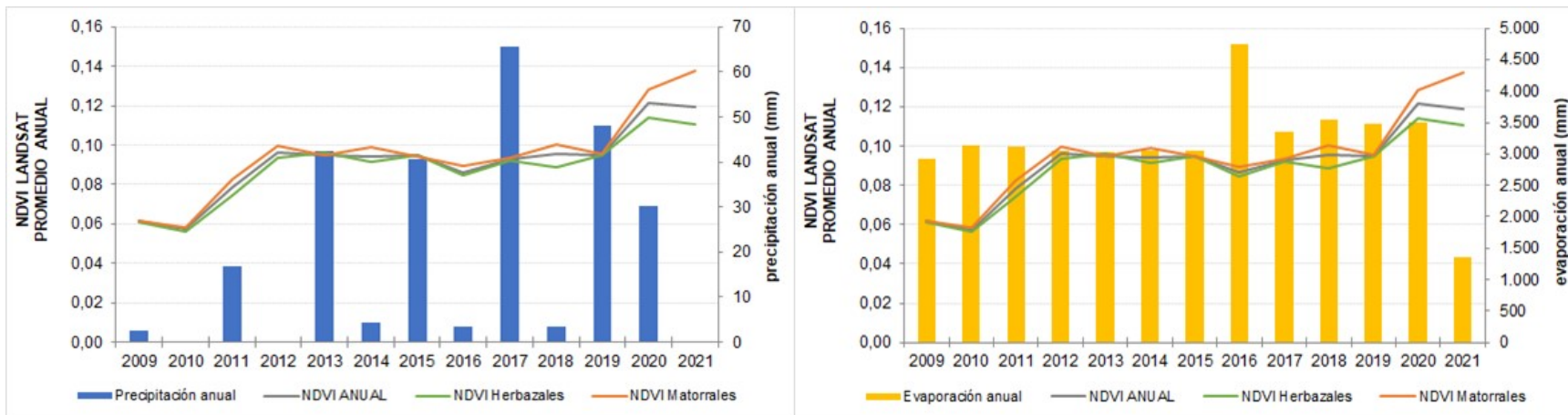
Tabla N°3-7. Coeficientes de correlación lineal del NDVI promedio por estación, obtenidos desde imágenes Landsat 2009-2021 con la precipitación anual (estación EM - SCL) en formaciones de herbazales y matorrales monitoreadas.

Periodo de NDVI promedio (2009-2021)	HERBAZALES		MATORRALES	
	Pearson	Rho Spearman	Pearson	Rho Spearman
Otoño- Lag+1	0,429	0,452	0,645 *	0,722 **
Invierno- Lag+1	0,347	0,196	0,422	0,497
Invierno	0,535 **	0,532 **	0,475	0,28
Primavera	0,312	0,522 **	0,212	-0,102
Verano	0,468	0,504 **	0,374	0,217

Nota: Coeficientes de correlación Pearson (paramétrico) y Spearman (no paramétrico): Valores positivos cercanos a 1, significan relación proporcional de alta intensidad entre variables. Lag+1 significa rezago del NDVI en un año posterior al de lluvias. Nivel de Significancia de correlación: *90% y ** 95%. Sin asterisco, correlación no significativa.

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 3-7. Correlación multitemporal del NDVI Landsat promedio con variables hidroclimáticas (anuales en mm): precipitación, evaporación y balance precipitación-evaporación.



VARIABLE HIDROCLIMÁTICA (mm)	NDVI TOTAL		NDVI HERBAZALES		NDVI MATORRALES	
	Pearson	Rho Spearman	Pearson	Rho Spearman	Pearson	Rho Spearman
Precipitación anual	0,240	0,066	0,338	0,365	0,106	-0,011
Evaporación anual	-0,238	0,005	-0,204	-0,159	-0,336	-0,044

Dónde: * Correlación significativa. Sin asterisco, correlación no significativa. Fuente: Elaboración propia a partir de datos meteorológicos de estación EM - SCL (ex. EM – Rockwood).

4. REFERENCIAS

- ANEXO 2, Adenda 5 EIA, Apéndice B, Proyecto Rockwood Lithium 2015. Determinación espacio temporal de la vegetación azonal y cuerpos de agua. Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Rockwood Lithium Limitada - CEA, Centro de Ecología Aplicada. Región de Antofagasta, 10-2015.
- ALBEMARLE. Informe Anual N°1 del Plan de Manejo Biótico: Monitoreo Invierno 2016 – Verano 2017 para el Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016)”, Antofagasta, Chile, 2017.
- ALBEMARLE. Informe Anual N°2 del Plan de Manejo Biótico: Monitoreo Invierno 2017 – Verano 2018 para el Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016)”, Antofagasta, Chile, 2018.
- ALBEMARLE. Informe Anual N°3 del Plan de Manejo Biótico: Monitoreo Invierno 2018 – Verano 2019 para el Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016)”, Antofagasta, Chile, 2019.
- ALBEMARLE. Informe Anual N°4 del Plan de Manejo Biótico: Monitoreo Invierno 2019 – Verano 2020 para el Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016)”, Antofagasta, Chile, 2020.
- ALBEMARLE. Informe Anual N°5 del Plan de Manejo Biótico: Monitoreo Invierno 2020 – Verano 2021 para el Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016)”, Antofagasta, Chile, 2021.
- CHANDER G., B. Markham, D. Helder, 2009. *Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, Remote Sensing of Environment*, Volume 113, Issue 5, 893-903 pp.