



**INFORME ANUAL N°4**

**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, 2, 3 y 4.**



**Región de Antofagasta**

**Septiembre de 2020**

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>ANÁLISIS DE VEGETACIÓN Y FLORA EN TRANSECTAS .....</b>	<b>8</b>
2.1	Variación de la cobertura vegetal en transectas .....	8
2.2	Análisis de la estructura comunitaria (composición de especies) .....	9
2.2.1	Sistema La Punta - La Brava .....	11
2.2.2	Sistema Peine .....	15
2.3	Variación de la salinidad en transectas .....	17
2.3.1	Sistema La Punta – La Brava .....	19
2.3.2	Sistema Peine .....	20
<b>3</b>	<b>ANÁLISIS DE LA COBERTURA ACTIVA .....</b>	<b>22</b>
3.1	Comparación de la cobertura activa con línea de base .....	22
3.2	Análisis de recurrencia de la cobertura activa .....	23
3.2.1	Sistema La Punta y La Brava .....	29
3.2.2	Sistema Peine .....	31
3.3	Comparación del NDVI Landsat con línea de base .....	32
3.4	Comparación de la tendencia interanual del NDVI Landsat .....	33
3.4.1	Obtención de registros NDVI Landsat.....	34
3.4.2	Evaluación estadística de tendencias .....	37
3.5	Comparación estacional del NDVI Landsat.....	37
3.5.1	Sistema La Punta - La Brava .....	38
3.5.2	Sistema Peine .....	39
3.6	Análisis de correlaciones con el NDVI .....	39
3.6.1	Relación del NDVI con variables hidroclimáticas .....	40
<b>4</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>43</b>

## TABLAS

Tabla N° 2-1. Relación de sitios de muestreo de la componente suelos con transectas de vegetación, para evaluación de la condición del sustrato salino durante los monitoreos del proyecto. ....	18
Tabla N° 2-2. Coeficientes de correlación lineal entre parámetros de evaluación del sustrato salino: Coberturas de afloramiento salino y vegetal (Cs y Cv) medidas en transectas de vegetación, con Salinidad y Conductividad Eléctrica tomados por la componente suelo según las formaciones azonales en seguimiento del sector Tilopozo – La Punta y La Brava. ....	20
Tabla N° 2-3. Coeficientes de correlación lineal entre parámetros de evaluación del sustrato salino: Coberturas de afloramiento salino y vegetal (Cs y Cv) medidas en transectas de vegetación, con Salinidad y Conductividad Eléctrica tomados por la componente suelo según las formaciones azonales en seguimiento del sector Peine. ....	21
Tabla N° 3-1. Registros históricos de superficies de vegetación activa obtenidos con el NDVI de imágenes de alta resolución. ....	22
Tabla N°3-2. Homologación de formaciones vegetales de seguimiento, según monitoreos de Transectas y COT- NDVI. ....	25
Tabla N° 3-3. Superficies y porcentajes de cobertura de vegetación activa según nivel de recurrencia entre el Año 1 (2017) y Año 4 (2020) 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. ....	29
Tabla N° 3-4. Superficies y porcentajes de cobertura de vegetación activa según nivel de recurrencia entre el Año 1 (2017) y Año 4 (2020) obtenidos con el NDVI de imágenes satelitales de alta resolución para monitoreos anuales de verano en las formaciones de seguimiento en el sector Peine. ....	31
Tabla N° 3-5. Registros históricos del NDVI de probabilidad de excedencia de 75% propuestos para monitoreo de vegetación con imágenes Landsat de media resolución. ....	33
Tabla N°3-6. Características de los sensores utilizados en el análisis NDVI. ....	34
Tabla N°3-7. Tamaño muestral de registros del NDVI Landsat 2009-2020, determinado por estratos según nivel de recurrencia de la cobertura vegetal activa obtenida	

---

desde el NDVI de imágenes de alta resolución de los monitoreos de verano 2017-2020..... 36

Tabla N°3-8. Coeficientes de correlación lineal del NDVI promedio por estación, obtenidos desde imágenes Landsat 2009-2020 con la precipitación anual (estación meteorológica Peine) en formaciones de herbazales y matorrales monitoreadas. .... 41

## FIGURAS

---

Figura N° 2-1. Comparación de la cobertura absoluta de vegetación por tipo de formación y estación, para los sectores La Punta-La Brava – Tilopozo y Peine. .... 9

Figura N° 2-2. 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 M7)..... 13

Figura N° 2-3. 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 M7). .... 14

Figura N° 2-4. 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 M7)..... 16

Figura N°3-1. Variación anual en formaciones azonales en seguimiento del sector Tilopozo – La Punta y La Brava, caso herbazal de *D. spicata* en subsector Tilopozo. .... 26

Figura N°3-2. 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) 2017-2020. .... 27

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. .... 28

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 2017-2020 en los subsectores de Tilopozo y La Punta- La Brava. ....	30
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 2017-2020 en el sector Peine. ....	32
Figura N°3-6. Comparación estacional de intervalos de confianza del NDVI Landsat promedio en el periodo histórico previo al proyecto (2009-2016) y durante operación (2016-2020) por estación y tipo de formación vegetal en las superficies de monitoreo del sector Tilopozo- La Punta y La Brava.....	38
Figura N°3-7. Comparación estacional de intervalos de confianza del NDVI Landsat promedio en el periodo histórico previo al proyecto (2009-2016) y durante operación (2016-2020) por estación y tipo de formación vegetal en las superficies de monitoreo del sector Peine. ....	39
Figura N° 3-8. Correlación multitemporal del NDVI Landsat promedio con variables hidroclimáticas (anuales en mm): precipitación, evaporación y balance precipitación-evaporación. ....	42

## ANEXO I. INFORME DE ESTADO ECOLÓGICO DEL SISTEMA

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

#### 1 INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde a uno de los Anexos del Informe Anual N°4, con la descripción de metodologías y análisis de tendencias de la Vegetación, incluyendo seguimiento del año 1, 2, 3 y 4, 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 la variable Vegetación y Flora, que constituye uno de los tres indicadores de estado para el análisis del Estado Ecológico del Sistema.

En relación con el monitoreo y caracterización de la flora y vegetación del área de estudio, para el desarrollo del Informe Anual N°4 PMB, se señala que no fue posible llevar a cabo el seguimiento de la variable “Flora y Vegetación” en sus acápite: seguimiento a la carta ocupación de tierras (COT), y el seguimiento de transectas de vegetación con el método de intercepto de puntos, correspondiente al monitoreo verano post - lluvias 2020, dadas las condiciones excepcionales del presente año, en el marco de la Pandemia Covid-19. En consecuencia, se entregan las actualizaciones de ambos acápite basados en la última actualización de la carta de ocupación de tierras (COT) de agosto 2019 y la información de transectas del mismo periodo, correspondiente a M7.

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, entendiéndose 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 análisis de tendencias se realiza sobre los últimos tres años consecutivos de seguimiento (2018-2019-2020) en relación a registros de transectas del Monitoreo Base (MBO) realizado en invierno (julio 2016), la cual corresponde a la línea de base para esta variable de estado, en los siguientes aspectos:

- Variación de la cobertura vegetal en transectas.
- Análisis de la estructura comunitaria (composición de especies).
- Variación de la salinidad en transectas.

**(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 2017-2020.
- Análisis del nivel de recurrencia<sup>1</sup> de la cobertura activa, obtenida con el índice NDVI de imágenes de alta resolución durante el periodo 2017-2020, también complementario a lo exigido por el PMB, para determinar las áreas de superposición resultantes, que representan el nivel variabilidad o estabilidad espacial de la actividad vegetal en las formaciones de seguimiento.
- Comparación con línea de base del NDVI de imágenes Landsat con probabilidad de excedencia de 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 (2016-2020), 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.
- Comparación estacional del NDVI de imágenes Landsat para el periodo pre-operacional (2009-2016) y operacional (2016-2020), este análisis complementario se realizó con el propósito de evaluar estadísticamente un posible cambio en el valor estacional del NDVI, lo cual puede sugerir variaciones en la actividad de la vegetación.
- 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.

---

<sup>1</sup> **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.

## 2 ANÁLISIS DE VEGETACIÓN Y FLORA EN TRANSECTAS

### 2.1 Variación de la cobertura vegetal en transectas

Este análisis consiste en la evolución por sector, de la cobertura promedio de la vegetación, junto a las coberturas del rastrojo, la cobertura de otros recubrimientos y la riqueza en los monitoreos de cuatro años de seguimiento, en referencia al Monitoreo “0” de transectas de vegetación azonal realizado en Julio de 2016 (MB0).

Posteriormente, se analiza la evolución de las coberturas de vegetación absolutas por transecta de monitoreo, para determinar las variaciones en los cuatro años de monitoreo (2016-2019, M7) en referencia al MB0.

Los resultados y discusión obtenidos por sector y transectas se presentan directamente en el **Capítulo 12.8 - Estado Ecológico del Sistema, secciones 1.2.1.1.1.a. para el Sistema La Punta – La Brava y 1.2.2.1.1.a para el Sistema Peine.**

De **forma complementaria a lo exigido por el PMB**, se realiza un análisis general (ambos sectores del PMB incluidos, (1) Sector La Punta-La Brava – Tilopozo; (2) Peine) sobre **la estacionalidad en los tipos de formaciones de seguimiento**, con la finalidad de determinar un posible comportamiento de las variaciones en la cobertura vegetal de las transectas, se analiza la variación estacional de la cobertura vegetal entre los tipos de formaciones en seguimiento (herbazales/vegas con matorrales).

Para este análisis se utilizaron diagramas de caja (*boxplot*)<sup>2</sup>, con las coberturas absolutas de las transectas en cada estación (invierno y verano, post-lluvia) y por tipo de formación de seguimiento en los sectores de interés. Como se observa en la **Figura N° 2-1**, las coberturas absolutas de vegetación registradas en los herbazales tienen un mayor rango de variación entre las transectas de estudio, aunque entre estación (invierno-verano), esta diferencia se acorta. En los herbazales, el rango de las coberturas en las campañas de invierno es entre 11,6% y 117,1% y de 7,3 y 122,1%, en verano; mientras que en los matorrales, las coberturas se concentran entre 11,6 y 31,0% en invierno, y descienden a un rango entre 7,2 y 25,4% en verano. Además, como se observa para ambas estaciones, existe una alta variación entre coberturas mínimas y máximas, donde el 50% de las coberturas absolutas registradas se presentan bajo un 24,8% en invierno y bajo un 19,5% en verano.

Comparando entre estaciones, las coberturas de los herbazales varían menos entre monitoreos; mientras que los matorrales, presentan una mayor variación de las coberturas

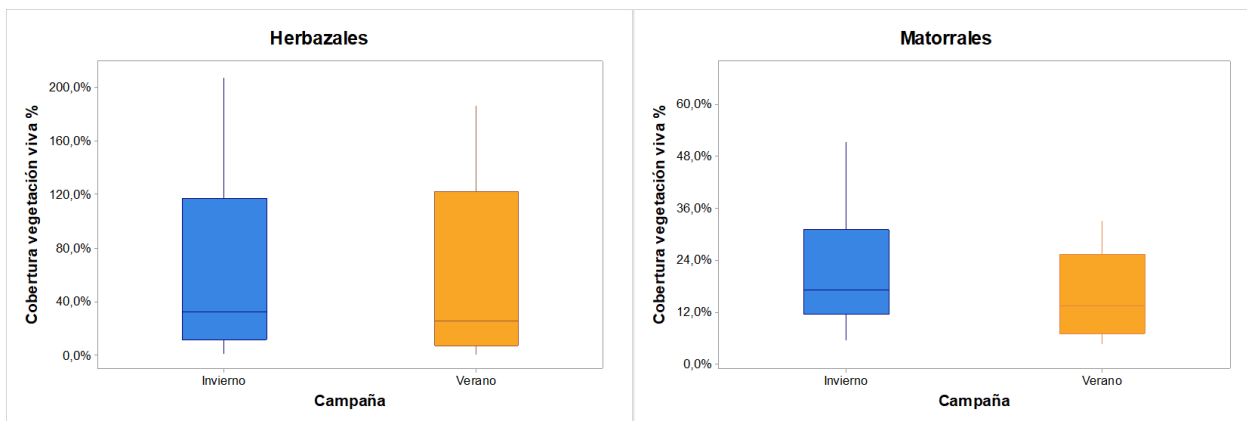
---

<sup>2</sup> Diagramas de caja- box-plot. Es un método estandarizado para representar gráficamente una serie de datos numéricos a través de sus cuartiles. De esta manera, el diagrama de caja muestra la mediana y los cuartiles de los datos, pudiendo también representar los valores atípicos.



registradas en invierno, a diferencia de los monitoreos de verano, donde las coberturas tienen una menor dispersión (**Figura N° 2-1**).

**Figura N° 2-1. Comparación de la cobertura absoluta de vegetación por tipo de formación y estación, para los sectores La Punta-La Brava – Tilopozo y Peine.**



Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 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 por Sector y 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 tres 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 M7), además de analizar su importancia estadística con un nivel de significancia del 0,05.

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/M7) 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  $\alpha$  o alfa) usados fueron de 0,05. Un  $\alpha$  menor o igual a 0,05 indica, con un riesgo del 5%, que existe una variación significativa entre las variables analizadas.

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).

Posteriormente, 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  $\alpha$  o alfa) usados fueron de 0,05. Un  $\alpha$  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, para determinar aquellos cambios con variaciones significativas, considerando un  $\alpha$  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 **Capítulo 12.5 - Estado Ecológico del Sistema, secciones 1.2.1.1.1.b. para el Sistema La Punta – La Brava y 1.2.2.1.1.b para el Sistema Peine.**

Respecto al **análisis estadístico de la variación de las coberturas vegetales** de las especies por transecta en los cuatro años de seguimiento, en relación a la cobertura basal de invierno 2016 (MB0-M1), se presentan a continuación los resultados y discusión por sector. Estos resultados corresponden a la comparación de la diferencia porcentual de las coberturas absolutas por transecta de cada especie, de dos periodos (MB0-M1) contra (M2-M7); por lo tanto, no constituyen comparativa con los resultados de coberturas absolutas basadas solo en la comparación con la condición basal MB0.

### **2.2.1 Sistema La Punta - La Brava**

En el subsector Tilopozo, que abarca tanto zona al Noroeste como la parte Sur dentro del sistema La Punta- La Brava, en **Figura N° 2-2 y Figura N° 2-3 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) por especie y según transecta observada:

- Para *D. spicata* aumentó en la transecta T21 de Tilopozo, con una variación del 79,1%, disminución de 100%, 32% y 63,7% en las transectas T18, T22 y T26, respectivamente. La variación registrada en T18 se debe a la observación de la especie en la condición base, sin registros previos en los seguimientos posteriores, lo que no se asocia directamente a una pérdida de la especie en la transecta; además de ser observarse con una cobertura absoluta muy baja (0,4%) .
- Para *S. californicus* aumentó del 100% en transecta T22, sector Tilopozo; este porcentaje corresponde a la incorporación de la especie en los registros posterior a la condición base MB0-M1.

- Para *T. absinthioides* se observa una disminución de -49,4%, -44,2% y -27% en las transectas T23, T24, T25, respectivamente, del sector Tilopozo. Estos valores son similares a los reportados, suponiendo un aumento de la cobertura para T24 y T25 con la incorporación de datos desde M1-M7, pero manteniendo su variación con respecto a MB0-M1.
- Para *J. balticus* se aprecia una disminución en las transectas T18, T30, T31 y T22 con -62,9%, -26,3%, -68,3%, y -100%, respectivamente; estos son valores similares a los reportados para el periodo M1-M6, y en comparación con el cuarto año (M1-M7) se observa un aumento de las coberturas absolutas de las especies en las transectas descritas, pero manteniendo la variación bajo la condición base MB0-M1.

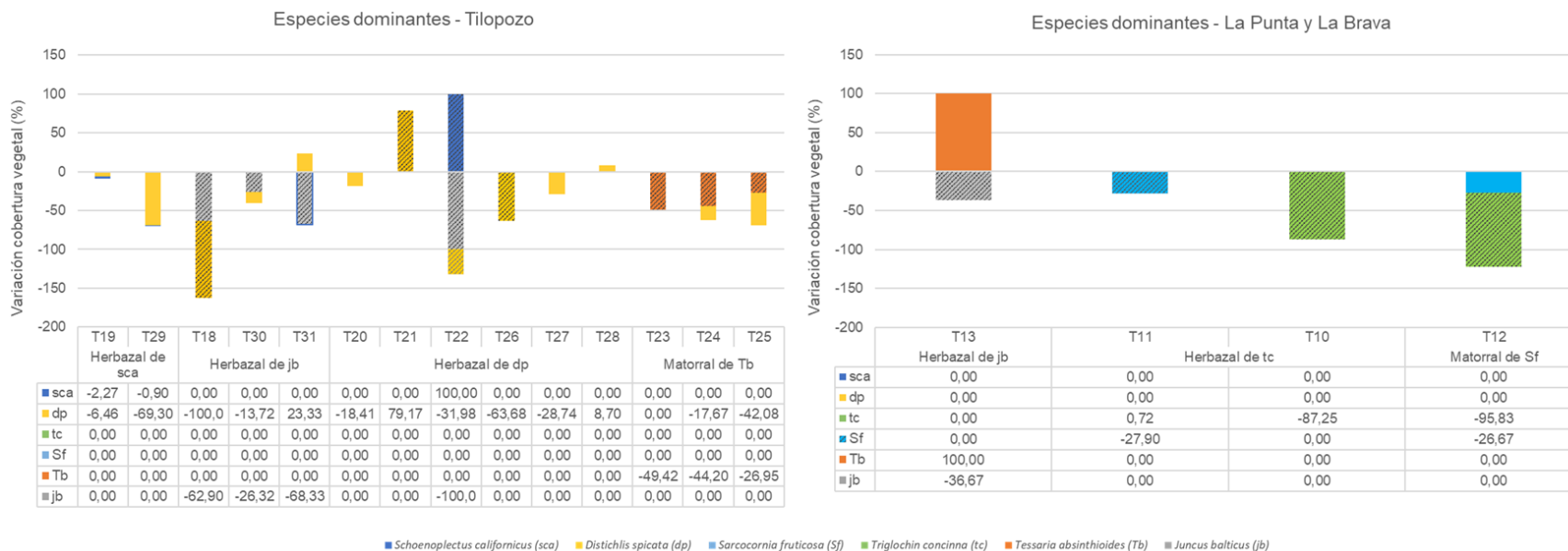
Entre las especies acompañantes, las variaciones tienen un rango entre -59,3% a 100% y un aumento con significancia estadística de *Lycium humile* en T18, el cual se debe a que en M1 no se registra y en MB0 su cobertura es muy baja, resaltando así el aumento de cobertura en los siguientes monitoreos, aunque no sobrepasa el 5% de cobertura absoluta en los cuatro años de seguimiento (ver detalles en **Anexo I de Vegetación y Flora**).

En el subsector La Punta- La Brava (**Figura N° 2-2** y **Figura N° 2-3**), **entre las especies dominantes** el rango de variación va desde -95,8% a 100%, con las siguientes diferencias significativas (estadísticamente):

- Para *S. fruticosa* se observa una variación de -27,9% en T11 (manteniendo el valor reportado en M1-M6 para M1-M7).
- Para *T. concinna* se observan variación de -87,3% y -95,8%, para las transectas T10 y T12 respectivamente, valores muy similares a los reportados en M1-M6 con un ligero descenso de la cobertura de la especie en T10 en M1-M7.
- Para *J. balticus* se aprecia una disminución en la transecta T13 con -36,7%, valor similar al reportado para M1-M6, pero en comparación se observa un aumento de la cobertura absoluta de la especie para M1-M7.

Entre las especies acompañantes del subsector La Punta y La Brava, *Puccinellia frigida* registra variaciones significativas (estadísticamente) al descenso en las tres transectas, probablemente por la baja cobertura que presenta (<5% cobertura absoluta), acentuándose en su caso cualquier descenso.

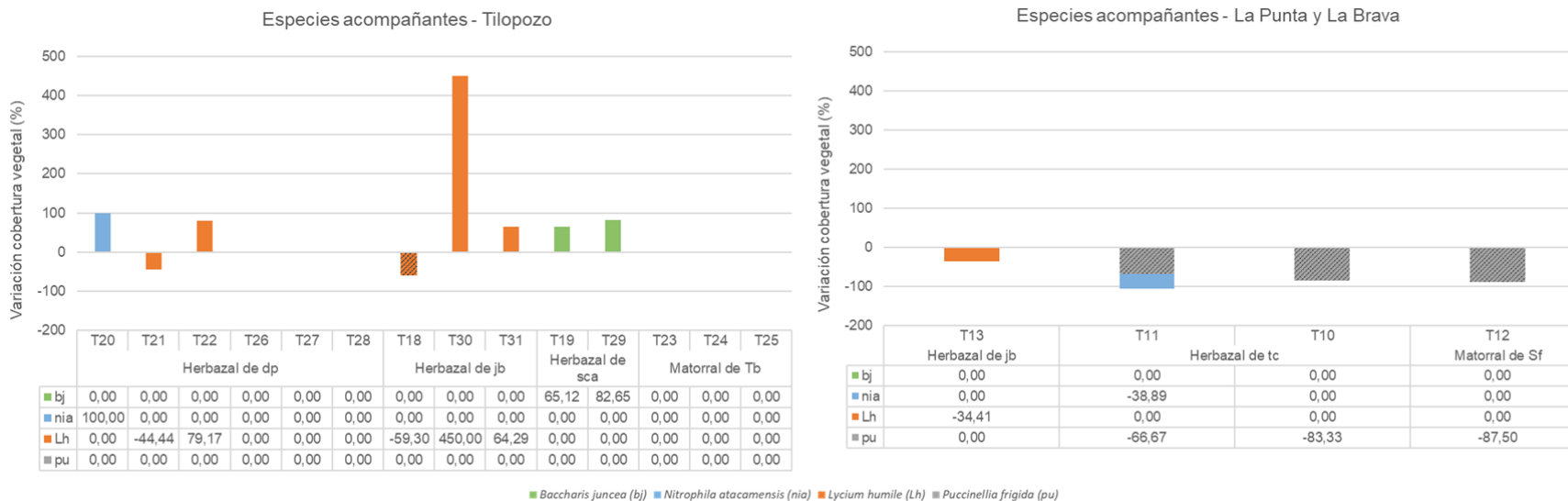
**Figura N° 2-2. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies dominantes en las formaciones del sector Tilopozo y La Punta y La Brava, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M7).**



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

Fuente: Elaboración propia.

**Figura N° 2-3. 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 M7).**



Donde: Achurado en columnas representan variaciones significativas considerando un valor de  $p < 0,05$ , correspondientes a: Lh-T18/T13, pu – T11/T10/T12.

Fuente: Elaboración propia.

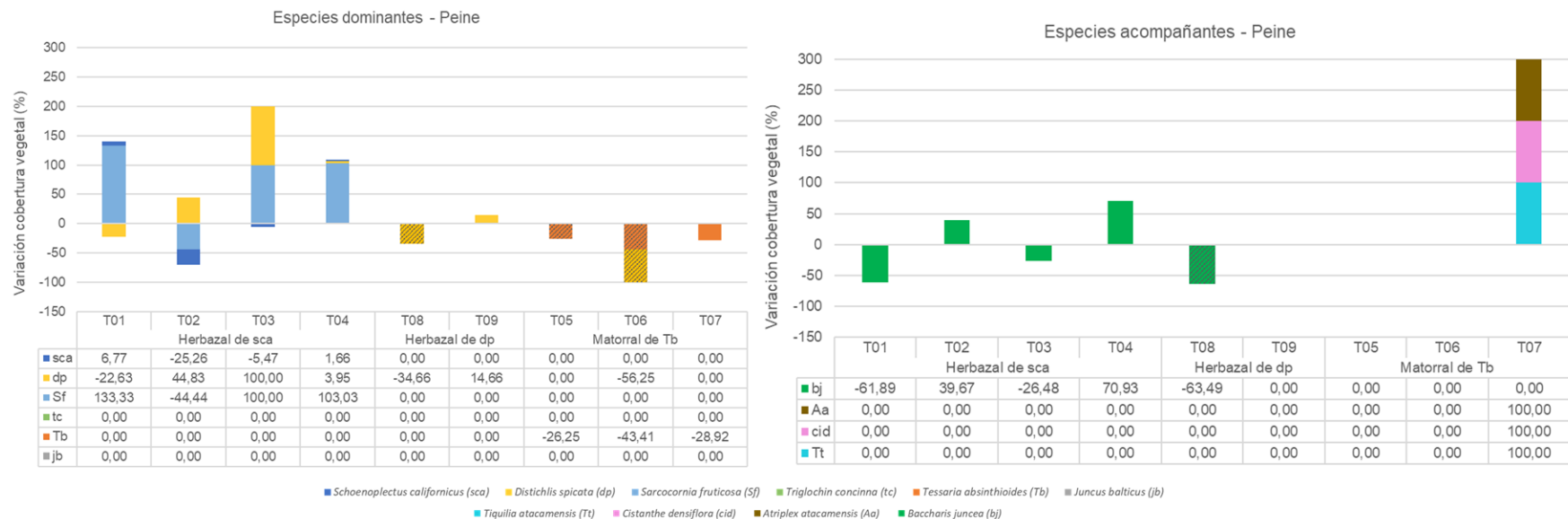
### 2.2.2 Sistema Peine

En este sector, la variación de las coberturas de las especies por transecta registra una amplia variabilidad con un rango entre -56,3% a 133,3% entre las dominantes y de -63,5% a 100% entre las acompañantes (**Figura N° 2-4**).

**Entre las especies dominantes**, se observan disminuciones **significativas (estadísticamente)** en las transectas T08 para la especie *D. spicata* (con un aumento de la cobertura de la especie y una disminución en el rango de variación con respecto al periodo anterior); se observa además disminuciones en la transecta T06, para la misma especie, manteniendo una condición similar a la del periodo M1-M6 con la incorporación de M7. Para la especie *T. absinthioides* se observa disminuciones estadísticamente significativas en las transectas T05 y T06 con valores similares a los reportados para en el periodo anterior (**Figura N° 2-4 izquierda**).

**Entre las especies acompañantes**, se observa una disminución significativa (estadísticamente) de -63,49%, para la especie *B. juncea* en T08, esto probablemente por las disminuciones de cobertura de la especie desde M2 a M7; aunque se encuentra en baja proporción en la formación, donde tiene coberturas menores a 5% (**Figura N° 2-4 derecha**; detalles en **Anexo I de Vegetación y Flora**).

**Figura N° 2-4. 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 M7).**



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

Fuente: Elaboración propia.



### 2.3 Variación de la salinidad en transectas

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 de los transectos de vegetación: *un aumento de sustrato salino (medición adquirida en el monitoreo de suelo)*.

La evaluación de la condición del estado ecológico en el sustrato salino 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, se evaluó este punto en específico del PMB. Para esto, en cada transecta se promediaron las coberturas salinas por año de monitoreo, es decir el Año 1 corresponde al promedio registrado en M1 y M2; Año 2 a M3 y M4, Año 3 a M5 y M6 y Año 4 a M7. Estos valores se compararon con el valor del primer registro existente (M1), considerado con la condición histórica correspondiente el inicio de operaciones del proyecto. Para este anexo, y debido a que no se desarrolla la campaña post – lluvias 2020 y con ello la obtención de datos *in situ* para transectas, se utilizan sin promediar los valores de coberturas absolutas del seguimiento M7, correspondientes al cuarto año de seguimiento.

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 comparó el M1 con los valores promedio anuales y se determinaron aquellos cambios con variaciones de  $\pm 10\%$  en la cobertura salina durante los 4 años de monitoreo.

De forma complementaria a lo exigido por el PMB y con el objetivo de conocer la relación de los factores posibles que inciden en el estado del sustrato salino, se relacionaron los parámetros de las coberturas salina y vegetal (transectas) con la concentración salina del suelo (componente suelo).

Para esto, se relacionaron espacialmente los valores obtenidos de la cobertura de afloramientos salinos y de la cobertura vegetal durante los monitoreos M1 a M7 en aquellas transectas cercanas y en la misma unidad muestral, a calicatas de monitoreo de la componente suelo, a partir de los registros de los parámetros Salinidad y Conductividad Eléctrica (ambos medidos en el componente suelos). La **Tabla N° 2-1** registra los 14 sitios evaluados en los sectores de estudio.

**Tabla N° 2-1. Relación de sitios de muestreo de la componente suelos con transectas de vegetación, para evaluación de la condición del sustrato salino durante los monitoreos del proyecto.**

Sector	Subsector	Formación vegetal	Códigos de muestreo		DISTANCIA ENTRE SITIOS DE MUESTRO (m)	
			Punto Suelo	Transecta Vegetación		
Peine		<i>Herbazal de Distichlis spicata</i>	S-14	T09	130	
			S-10	T28	100	
		<i>Herbazal de Schoenoplectus californicus</i>	S-11	T04	10	
			<i>Matorral de Tessaria absinthioides</i>	S-12	T07	30
Tilopozo – La Punta y La Brava	La Brava	<i>Herbazal de Triglochin concinna</i>	S-6	T10	100	
	La Punta	<i>Herbazal de Juncus balticus</i>	S-3	T13	25	
		<i>Herbazal de Triglochin concinna</i>	S-5	T11	50	
		<i>Matorral de Sarcocornia fruticosa</i>	S-4	T12	25	
	Tilopozo		<i>Herbazal de Distichlis spicata</i>	S-07	T20	10
				S-09	T21	20
				S-2	T26	20
			<i>Herbazal de Schoenoplectus californicus</i>	S-1	T27	15
			<i>Matorral de Tessaria absinthioides</i>	S-08	T19/T29	30
		<i>Matorral de Tessaria absinthioides</i>	S-13	T24	90	

Fuente: Elaboración propia.

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 las coberturas de las transectas (vegetal y costra salina) y los parámetros de suelo (Salinidad y Conductividad Eléctrica).

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, siendo este valor el que indica si el coeficiente de correlación es significativamente diferente de 0 (un coeficiente de 0 indica que no existe una relación lineal). El nivel de significancia (denotado como  $\alpha$  o alfa) usado fue 0,1. Un  $\alpha$  de 0,1 indica que el riesgo de concluir que existe una correlación, cuando en realidad no es así, es 10%.

Los resultados y discusión obtenidos por sector de la variación del promedio anual de las coberturas absolutas de afloramientos salinos, se presentan directamente en el **Capítulo 12.8 - Estado Ecológico del Sistema, secciones 1.2.1.1.1.c para el Sistema La Punta – La Brava y 1.2.2.1.1.c para el Sistema Peine.**

Respecto a **las correlaciones de la salinidad en transectas** en los cuatro años de seguimiento, a continuación se presentan los resultados por sector de evaluación:

### **2.3.1 Sistema La Punta – La Brava**

En este sistema que abarca los subsectores Tilopozo y La Punta- La Brava, la **Tabla N° 2-2** muestra los valores de los coeficientes de correlación entre los parámetros de evaluación del sustrato salino: coberturas en las transectas (de vegetación y afloramiento salino) con la Salinidad y Conductividad Eléctrica medida en la componente suelo (calicatas) para los dos estratos de registro (S-1 y S-2).

En base a este análisis, se determinan en términos de su magnitud y significancia, distintas relaciones existentes entre los recubrimientos en las transectas y los parámetros de salinidad del suelo. Los casos de correlaciones con significancia estadística se registran en 8 de las 11 transectas evaluadas; se observa que en tres de ellas existe relación proporcional de la cobertura vegetal (Cv) con la salinidad y la conductividad eléctrica del suelo, donde en la mayoría de los casos se registran relaciones inversas entre parámetros. Se destaca en este sector, la transecta T12 (matorral *S. fruticosa*) donde se verifica la relación inversa de cobertura vegetal con conductividad eléctrica y la salinidad, en ambos coeficientes para el primer estrato de suelo (**Tabla N° 2-2**).

Como se menciona en informes anteriores, y vigente hasta M7, las formaciones con relación inversa (significativa) entre la cobertura vegetal y la salinidad del suelo en el subsector La Punta, sugieren posiblemente una menor resiliencia de la actividad y cobertura vegetal a la concentración salina del suelo en éste subsector, el cual además posee una baja salinidad, según parámetros de conductividad eléctrica registrados en el rango ligeramente salino (2.000 - 4.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y salinidad inferior a 10.000 mg/kg. En base a esto, se debe considerar mayor atención ante una posible variación de la salinidad, lo cual podría afectar prioritariamente la actividad y/o cobertura de estas formaciones.

Respecto a las correlaciones entre la cobertura de afloramientos salinos (Cs), la concentración del suelo y la conductividad eléctrica, se registran casos significativos en cuatro de las 11 transectas evaluadas, de estos en las transectas T20 y T21 (herbazal de *D. spicata* en subsector Tilopozo; **Tabla N° 2-2**) se observan correlaciones inversas significativas; por otro lado, la transecta T10 (herbazal de *T. concinna* en subsector La Brava) muestra una relación proporcional en el primer estrato (**Tabla N° 2-2**).

Según estos resultados, las variaciones de descenso de la cobertura vegetal del herbazal de *T. concinna* (Transecta T10, sector La Brava), pueden explicarse en parte por la amplia variación en la salinidad del suelo, según registros de la conductividad eléctrica en un rango

de Ligeramente a Extremadamente salino (3.490 a 18.890  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo cual puede afectar el sustento de la actividad y cobertura en esta formación.

**Tabla N° 2-2. Coeficientes de correlación lineal entre parámetros de evaluación del sustrato salino: Coberturas de afloramiento salino y vegetal (Cs y Cv) medidas en transectas de vegetación, con Salinidad y Conductividad Eléctrica tomados por la componente suelo según las formaciones azonales en seguimiento del sector Tilopozo – La Punta y La Brava.**

Formación vegetal	Códigos de monitoreo	Variable Cobertura	Correlación con Conductividad eléctrica				Correlación con Salinidad				
			Coef. Pearson		Coef. Spearman		Coef. Pearson		Coef. Spearman		
			S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2	
Herbazal	sca	Cs	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Cv	0,60	-0,06	<b>0,61 *</b>	-0,29	0,46	-0,14	0,43	0,00	
	S8 - T19	Cs	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Cv	0,21	0,10	0,39	-0,07	0,07	0,22	0,07	0,32	
	jb	S3 - T13	Cs	0,02	0,08	0,29	0,11	-0,35	-0,27	-0,36	-0,32
		Cv	0,60	0,58	0,11	0,36	0,24	<b>-0,77 *</b>	0,18	<b>-0,86 *</b>	
	tc	S6 - T10	Cs	0,48	0,30	0,43	-0,14	0,39	0,31	<b>0,64 *</b>	0,25
			Cv	-0,12	0,35	-0,04	0,29	-0,26	-0,12	-0,29	-0,18
		S5 - T11	Cs	-0,19	-0,02	0,04	0,07	0,22	0,22	0,31	0,18
			Cv	-0,09	0,28	-0,29	0,29	-0,13	-0,11	-0,46	-0,04
	dp	S1 - T27	Cs	0,50	-0,40	0,26	-0,22	-0,27	-0,37	0,04	-0,12
			Cv	<b>0,68 *</b>	0,26	0,54	0,11	0,39	0,08	0,32	-0,04
		S2 - T26	Cs	-0,17	0,11	-0,39	-0,21	-0,45	0,03	<b>-0,64 *</b>	-0,43
			Cv	-0,40	0,05	-0,21	0,46	-0,30	-0,14	-0,36	-0,04
		S7 - T20	Cs	-0,31	<b>-0,63 *</b>	<b>-0,61 *</b>	<b>-0,61 *</b>	-0,35	-0,49	<b>-0,86 *</b>	-0,57
			Cv	0,29	0,59	<b>0,68 *</b>	<b>0,61 *</b>	0,23	0,39	0,21	0,29
S9 - T21	Cs	0,47	-0,50	0,43	<b>-0,61 *</b>	0,48	<b>-0,63 *</b>	0,25	-0,46		
	Cv	<b>-0,61 *</b>	0,47	-0,52	<b>0,60 *</b>	-0,57	<b>0,82 *</b>	-0,23	0,70		
Matorral	Tb	S13 - T24	Cs	0,09	-0,59	-0,16	-0,58	-0,26	-0,10	-0,34	-0,20
		Cv	0,22	0,32	0,14	-0,71	-0,25	-0,52	-0,25	-0,57	
	Sf	S4 - T12	Cs	0,21	-0,47	0,52	-0,07	0,03	0,32	0,09	0,41
			Cv	<b>-0,79 *</b>	-0,56	<b>-1,00 *</b>	-0,46	<b>-0,84 *</b>	<b>-0,76 *</b>	<b>-0,75 *</b>	-0,54

§ **Cobertura absoluta en transectas:** Cs: Cobertura afloramientos salinos; Cv: Cobertura vegetal. Estratos de muestreo de suelo en cm: S-1 primer estrato y S-2 segundo estrato. Especies dominantes en formaciones monitoreadas: sca: *Schoenoplectus californicus*; dp: *Distichlis spicata*; jb: *Juncus balticus*.; tc: *Triglochin concinna*; Tb: *Tessaria absinthioides*. Sf: *Sarcocornia fruticosa*. **Coeficientes de correlación Pearson (paramétrico) y Spearman (no paramétrico):** Valores positivos cercanos a 1, significan relación proporcional de alta intensidad entre variables. **Nivel de Significancia de correlación en negrita:** \* 90% - 95%. Sin asterisco, correlación no significativa.

### 2.3.2 Sistema Peine

En el sector Peine, la **Tabla N° 2-3** muestra los valores de los coeficientes de correlación entre los parámetros de evaluación del sustrato salino: coberturas en las transectas (de vegetación y afloramiento salino) con la Salinidad y Conductividad Eléctrica medida en la componente suelo (calicatas) para los dos estratos de registro (S-1 y S-2).

En base a este análisis, se determinan en términos de su magnitud y significancia, distintas relaciones existentes entre los recubrimientos en las transectas y los parámetros de salinidad del suelo. El caso de correlación con significancia estadística se registra en el herbazal de *S. californicus* (T04), señalando una relación proporcional entre la cobertura

vegetal y la conductividad eléctrica en el estrato más profundo S-2 del suelo; mientras que registra una relación significativa e inversa con la salinidad en el suelo en el estrato S-1.

**Tabla N° 2-3. Coeficientes de correlación lineal entre parámetros de evaluación del sustrato salino: Coberturas de afloramiento salino y vegetal (Cs y Cv) medidas en transectas de vegetación, con Salinidad y Conductividad Eléctrica tomados por la componente suelo según las formaciones azonales en seguimiento del sector Peine.**

Formación vegetal	Códigos de monitoreo	Variable Cobertura	Correlación con Conductividad eléctrica				Correlación con Salinidad			
			Coef. Pearson		Coef. Spearman		Coef. Pearson		Coef. Spearman	
			S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2
Herbazal	S10 - T28	Cs	0,04	0,12	-0,14	-0,05	0,02	0,12	-0,14	0,07
		Cv	0,54	-0,08	0,32	-0,14	0,54	0,11	0,32	-0,07
	S14 - T09	Cs	-0,09	-0,03	-0,11	-0,04	0,26	-0,60	0,18	-0,36
		Cv	0,21	-0,04	0,61	0,46	0,14	0,33	0,61	0,43
sca	S 11 - T04	Cs	-0,17	-0,46	-0,27	-0,27	-0,44	-0,73	<b>-0,76 *</b>	-0,40
		Cv	0,12	<b>0,74 *</b>	0,18	<b>0,64 *</b>	0,51	0,71	0,64	0,43
Matorral Tb	S12 - T07	Cs	-	-	-	-	-	-	-	-
		Cv	-0,11	-0,05	0,07	0,04	-0,10	-0,31	0,07	-0,39

§ **Cobertura absoluta en transectas:** **Cs:** Cobertura afloramientos salinos; **Cv:** Cobertura vegetal. Estratos de muestreo de suelo: S-1 primer estrato y S-2 segundo estrato. . **Especies dominantes en formaciones monitoreadas:** **dp** *Distichlis spicata*, **sca** *Schoenoplectus californicus*, **Tb** *Tessaria absinthioides*. Coeficientes de correlación Pearson (paramétrico) y Spearman (no paramétrico): Valores positivos cercanos a 1, significan relación proporcional de alta intensidad entre variables. Nivel de Significancia de correlación en **negrita:** \* 90% - 95%. Sin asterisco, correlación no significativa.

### 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 2017-2020, 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 2018-2020 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> <sup>§</sup>	26,0	59,2
Peine/ Polígono de vegetación COT	157,7	242,8
Peine/ Polígono Peine Herbazal de <i>Schoenoplectus</i> <sup>§</sup>	23,0	22,6

<sup>§</sup>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 2.1.1.2 para el Sistema La Punta – La Brava y 2.2.1.2 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 2017-2020**, se analiza el comportamiento multitemporal de esta cobertura, utilizando las superficies obtenidas para los 4 años de monitoreo en el periodo marzo – abril<sup>3</sup>.

Este análisis complementario se realiza con el fin de evaluar la variabilidad espacial de la cobertura activa mediante un análisis del **nivel de recurrencia**<sup>4</sup> entre el año 2017 a 2020, 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 satelitales<sup>5</sup>, que representan la cobertura vegetal de mayor grado de vigorosidad para el periodo de verano en los años 2017, 2018, 2019 y 2020 (**Figura N°3-1**). Las capas de entidades fueron interceptadas en formato *shape* entre ellas y luego con las unidades de formaciones de monitoreo, según los límites de la Carta de Ocupación de Tierras en su última actualización disponible (el uso de esta versión COT, según se explica en el capítulo introductorio, se debe a que no se cuenta con los datos correspondientes a post – lluvias 2020, y por lo tanto, de la COT para ese periodo; por ende, se utiliza la última carta de ocupación de tierras validada *in situ* y que corresponde a la fechada en agosto 2019).

<sup>3</sup> 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, 2009-2020 (Agosto 2020).

<sup>4</sup> 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 2017-2020.

<sup>5</sup> Metodología desarrollada, en Informes Anuales del Plan de Manejo Biótico: Albemarle (2017 – 2018 – 2019 – 2020).

Estas coberturas de vegetación activa superpuestas, fueron clasificadas según el porcentaje presencia entre seguimientos 2017 – 2018 – 2019 – 2020, considerando **cuatro estratos según el nivel recurrencia entre el año 1 y año 4 de monitoreo:**

- (1) no recurrente o presencia en uno de cuatro seguimientos (1/4; 25%),
- (2) recurrencia en dos de cuatro seguimientos (2/4; 50%),
- (3) recurrencia en tres de cuatro seguimientos (3/4; 75%),
- (4) recurrencia en cuatro de cuatro seguimientos (4/4; 100%) y
- (5) inactividad o recurrencia nula (0/4; 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°3-2**. 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°3, **Anexo I de Estado Ecológico del Sistema año N°3**, se debe a un ajuste de valores para la generación de un mapeo de cuantiles, que pueda ser asociado a otras comparaciones estadísticas, como la probabilidad de excedencia del 75% en histórico de NDVI desde imágenes Landsat. 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.

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 25%, 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° 3-3)**.

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



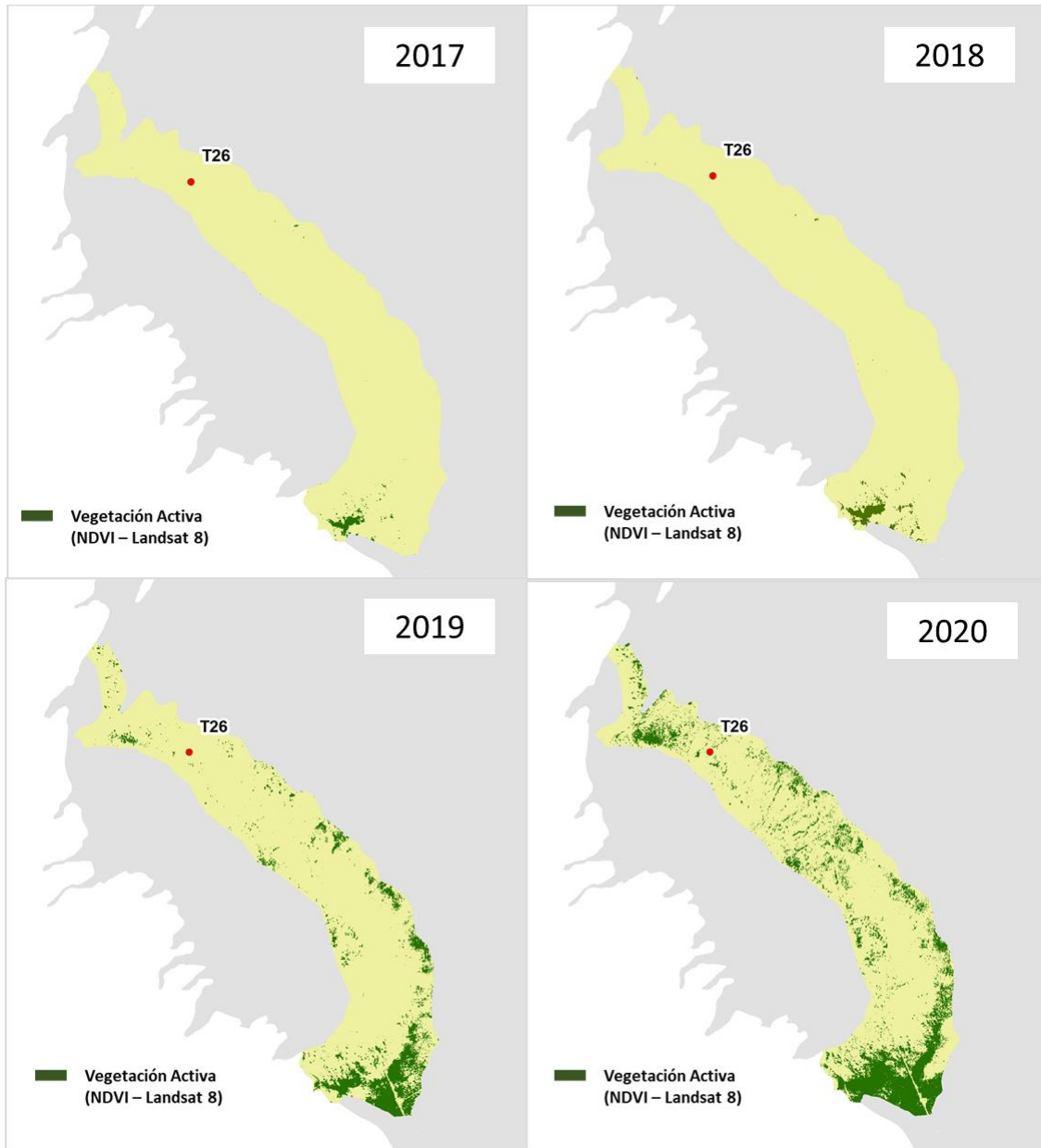
**Tabla N°3-2. Homologación de formaciones vegetales de seguimiento, según monitoreos de Transectas y COT- NDVI**

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; T22; T26; T27; T28	Vega de dp	Vega con dominancia de dp
		T08	Vega de dp bj	
		-	Matorral hídrico - Vega de Lh dp bj; Matorral hídrico - Vega de Lh dp; Matorral hídrico - Vega de Lh dp sca.	Matorral hídrico - Vega con dominancia de Lh
	<i>Herbazal de Juncus balticus</i>	T13	Matorral hídrico - Vega de Lh jb	Matorral hídrico - Vega con dominancia de Lh
		-	Matorral hídrico - Vega de Lh jb dp; Matorral hídrico - Vega de Lh jb sca	
		T18; T31	Vega de jb	Vega con dominancia de jb
	<i>Herbazal de Schoenoplectus californicus</i>	T30	Vega de jb dp	
		T01; T02; T03; T19; T29	Vega de sca bj	Vega con dominancia de sca
		-	Vega de sca	
	<i>Herbazal de Triglochin concinna</i>	T04	Vega de sca bj dp	
T11		Vega de tc	Vega con dominancia de tc	
T10		Vega de nia tc	Vega de nia tc	
T15		Matorral hídrico - Vega de Sf nia		
Matorrales	<i>Matorral de Sarcocornia fruticosa</i>	T12; T17	Matorral hídrico - Vega de Sf pu	Matorral hídrico - Vega con dominancia de Sf
		-	Matorral hídrico - Vega de Sf dp; Matorral hídrico - Vega de Sf dp bj sca; Matorral hídrico - Vega de Sf dp bj; Matorral hídrico - Vega de Sf tc nia	
		T16	Matorral hídrico de Sf	
		T24; T25	Matorral - Vega de Tb dp	Matorral - Vega de Tb dp
	<i>Matorral de Tessaria absinthioides</i>	T23	Matorral de Tb	Matorral con dominancia de Tb
		T05; T06; T07	Matorral de Tb Aa	
		-	Matorral de Tb Lh; Matorral hídrico - Vega de Tb Lh dp	Matorral hídrico - Vega de Tb Lh dp
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.

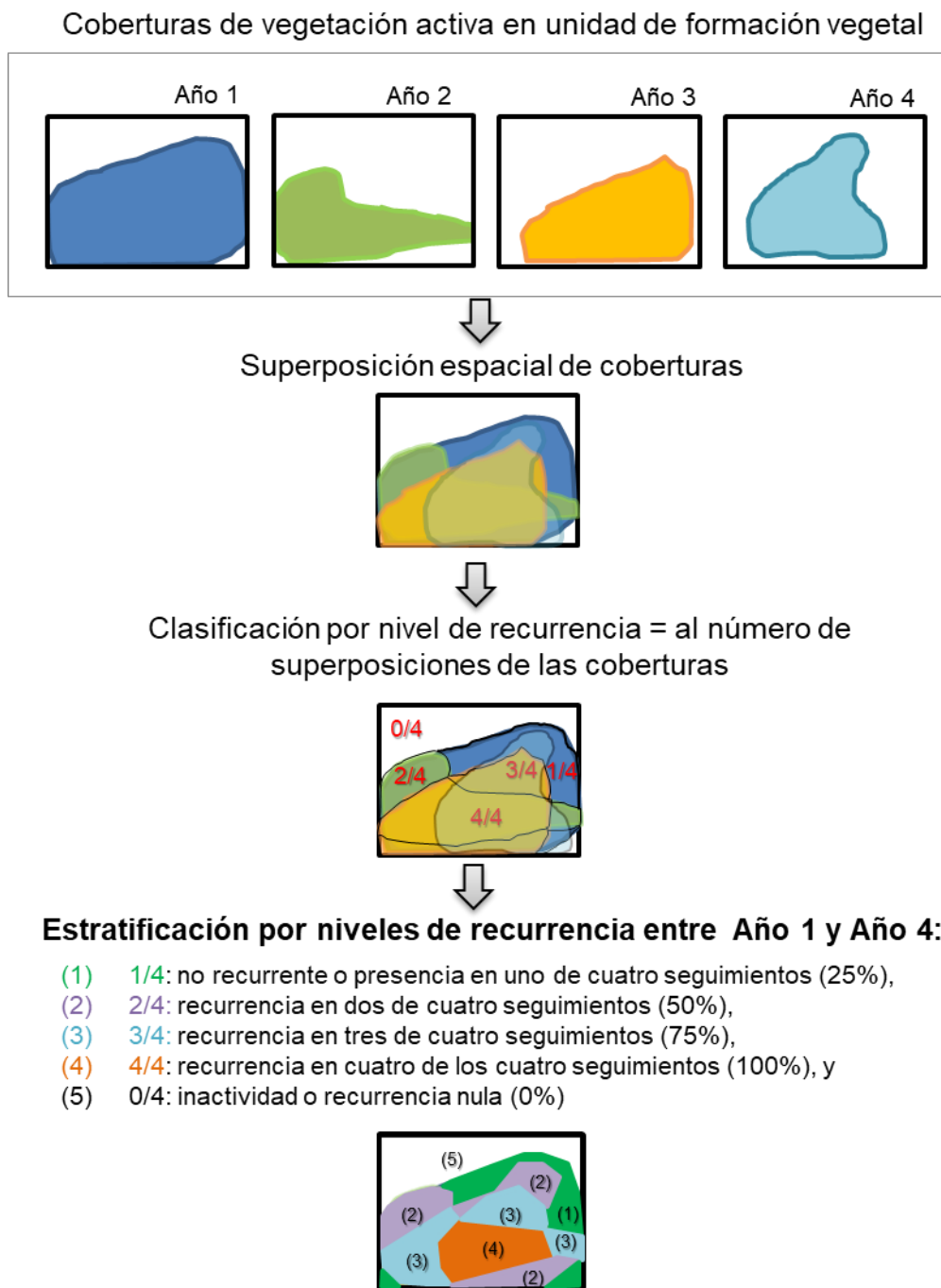
**Figura N°3-1. Variación anual en formaciones azonales en seguimiento del sector Tilopozo – La Punta y La Brava, caso herbazal de *D. spicata* en subsector Tilopozo.**



\* Formación vegetal de seguimiento, imágenes desde izquierda – arriba, variación de vegetación activa en seguimientos 2017-2018-2019-2020.

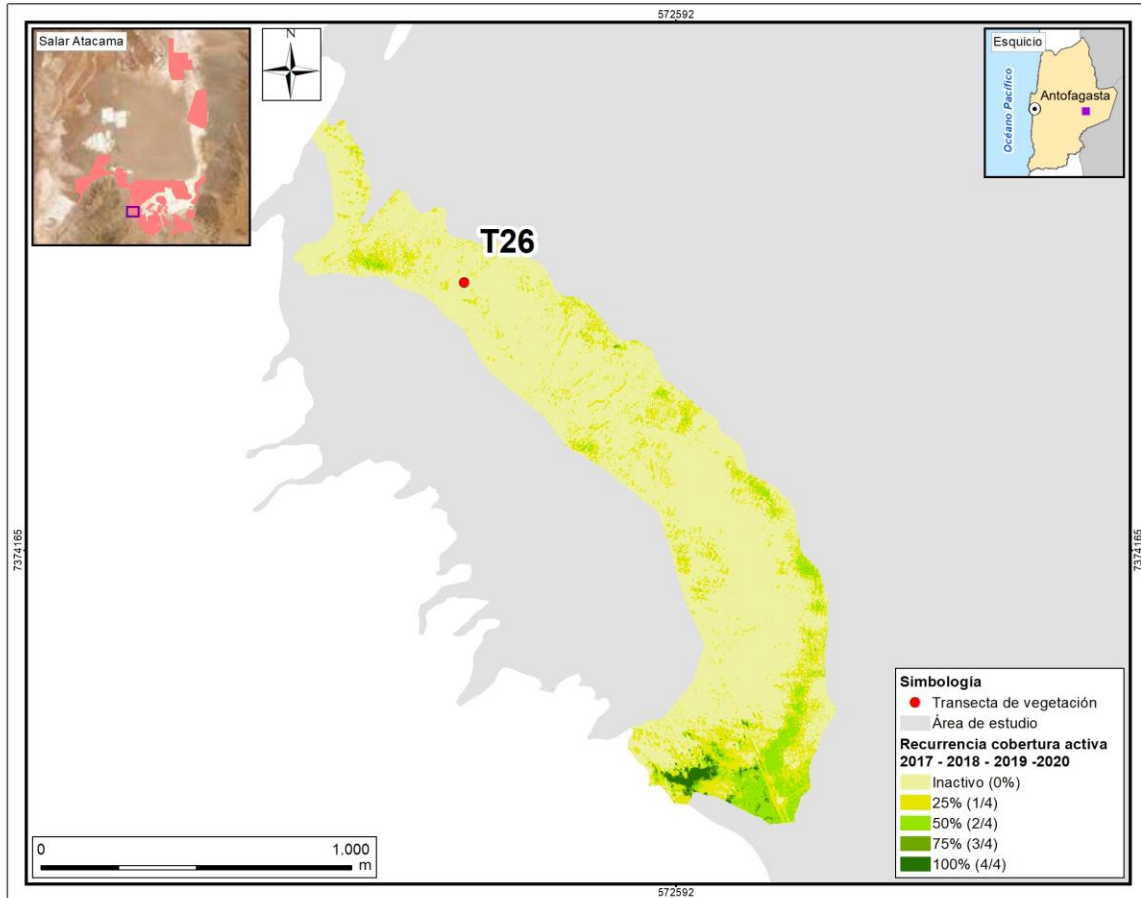
Fuente: Elaboración propia.

**Figura N°3-2. 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) 2017-2020.**



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.

### 3.2.1 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 cuatro años de monitoreo anual (veranos post - lluvia, 2017-2020), 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 2.123,1 hectáreas según monitoreos 2017-2020; de ésta 788,2 hectáreas, equivalente a un 37,1%, 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 62,9% del total (1.334,9 hectáreas; **Tabla N° 3-3**).

Dentro de la cobertura activa del sector (788,2 hectáreas), 139,5 hectáreas (6,6%) presentan mayor nivel de recurrencia en 4 de los 4 monitoreos realizados (recurrencia 100%), lo que equivale a las superficies más estables dentro del sector. En el otro sentido, una superficie de 337,1 hectáreas (15,9%), corresponde a la de menor nivel de recurrencia de 25%, 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 143,0 y 97,6 hectáreas con bajo nivel de recurrencia de 25% (**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 4 (2020) 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.**

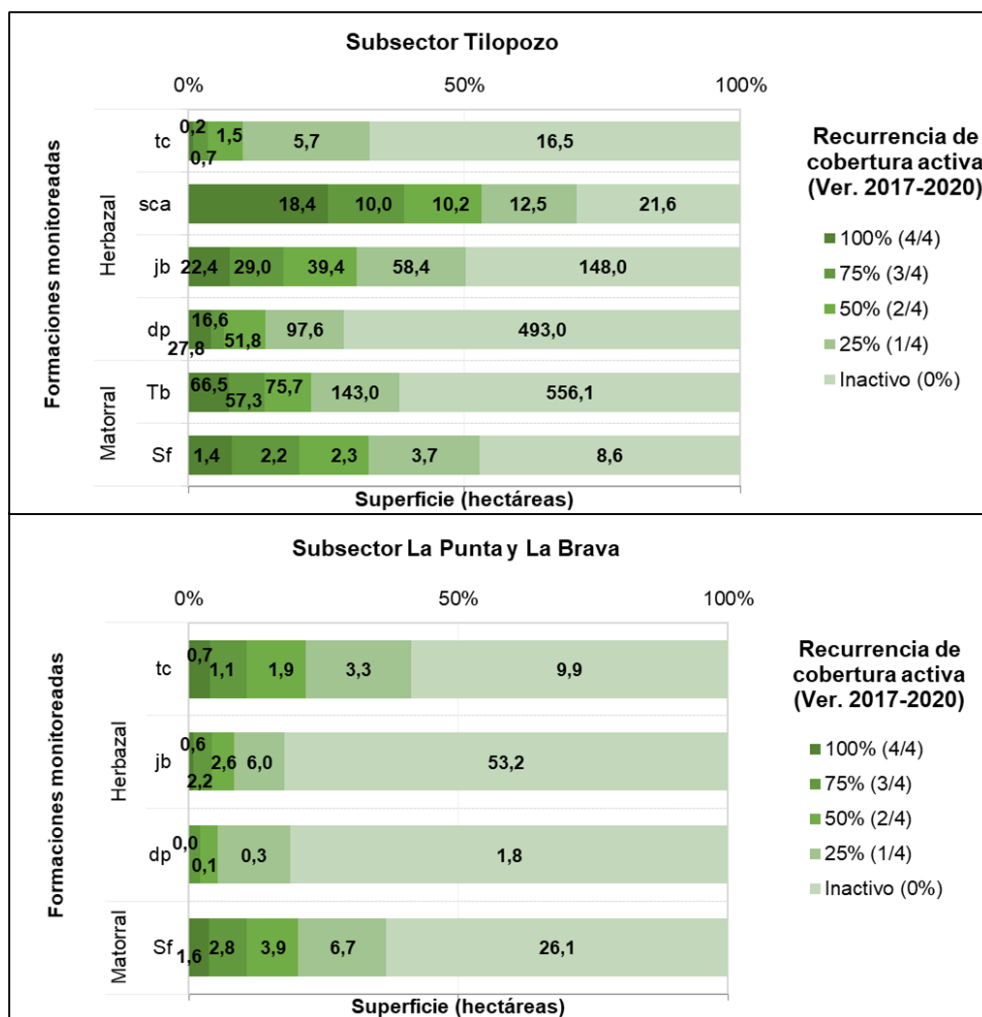
SUBSECTOR	Cobertura de vegetación activa por estrato según nivel de recurrencia Año 1 - Año 4										
	100% (4/4)		75% (3/4)		50% (2/4)		25% (1/4)		Inactivo (0%)		Total general**
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha
Tilopozo	136,7	6,8	115,8	5,8	180,9	9,1	320,8	16,1	1.243,9	62,3	1.998,2
La Punta y La Brava	2,8	2,2	6,3	5,0	8,5	6,8	16,3	13,0	91,0	72,9	124,9
<b>Total en formaciones de seguimiento*</b>	<b>139,5</b>	<b>6,6</b>	<b>122,1</b>	<b>5,8</b>	<b>189,5</b>	<b>8,9</b>	<b>337,1</b>	<b>15,9</b>	<b>1.334,9</b>	<b>62,9</b>	<b>2.123,1</b>

\* 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 y 2019 de las formaciones vegetales de seguimiento.

Fuente: Elaboración propia.

La Punta y La Brava registra una cobertura activa acumulada entre 2017 y 2020 de 33,9 hectáreas en las formaciones en seguimiento (27,1% 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 72,9% del total en seguimiento del sector (91,0 hectáreas; **Tabla N° 3-3**). Este subsector presenta dos formaciones monitoreadas, herbazal de *Juncus balticus* y el matorral de *Sarcocornia fruticosa*, las cuales presentan baja actividad/vigor, según la alta proporción de su superficie con 42,63% y 20,9%, 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 2017-2020 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 754,3 hectáreas de cobertura activa acumulada entre 2017 y 2020, aunque es superior la inactiva con 1.243,9 hectáreas (62,3% 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 27,8%; 556,1 hectáreas de su superficie) con cobertura inactiva en la formación de matorral de *Tessaria absinthioides* (**Figura N°3-4**).

### 3.2.2 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 cuatro años de monitoreo anual (veranos post - lluvia, 2017 - 2020) 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 847,6 hectáreas, lo cual equivale a un 53,2% de la superficie total activa de las formaciones en seguimiento del sector (1.685,8 hectáreas). Por otra parte, la cobertura inactiva abarca 1.330,6 hectáreas lo que equivale a un 59,7% 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 (897,6 hectáreas), 99,2 hectáreas presentan mayor nivel de recurrencia en 4 de los 4 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% (84,3 hectáreas, 6,3% de la superficie total del sector).

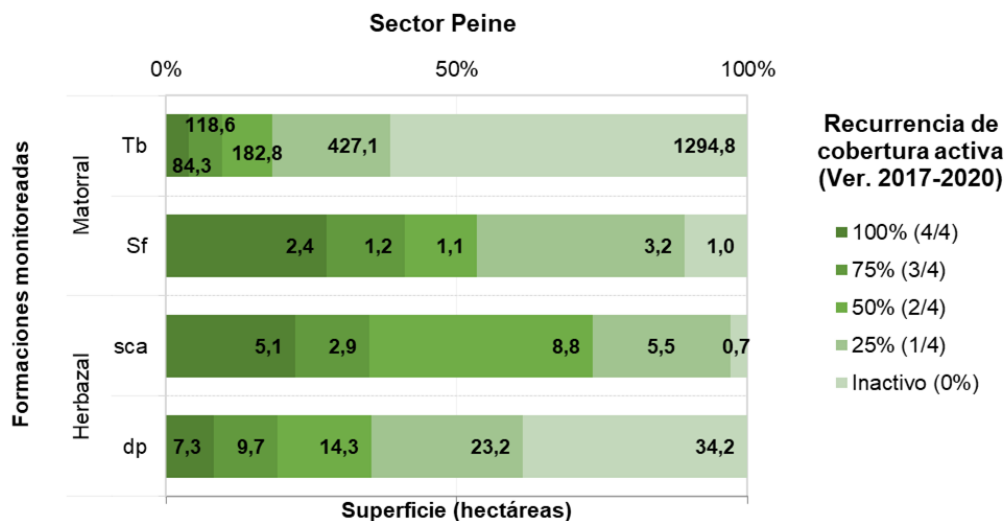
**Tabla N° 3-4. Superficies y porcentajes de cobertura de vegetación activa según nivel de recurrencia entre el Año 1 (2017) y Año 4 (2020) obtenidos con el NDVI de imágenes satelitales de alta resolución para monitoreos anuales de verano en las formaciones de seguimiento en el sector Peine.**

SECTOR PEINE	Cobertura de vegetación activa por estrato según nivel de recurrencia Año 1 - Año 4										
	100% (4/4)		75% (3/4)		50% (2/4)		25% (1/4)		Inactivo (0%)		Total general**
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha
Formaciones de seguimiento	99,2	4,5	132,4	5,9	207,0	9,3	458,9	20,6	1.330,6	59,7	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 y 2019 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 2017-2020 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 la probabilidad de excedencia de 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 de la probabilidad de excedencia de 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 agosto 2020. 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, la probabilidad de excedencia de 75% del NDVI de 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 probabilidad de excedencia de 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 (Probabilidad exc. 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> <sup>§</sup> 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> <sup>§</sup> de cobertura muy densa	0,244

<sup>§</sup>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.

### 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 (cuatro 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 2017-2020, 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 última actualización agosto 2019).

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 2.1.1.2 para el Sistema La Punta – La Brava y 2.2.1.2 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 11 años de estudio (2009 – 2020) 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)	<b>Bandas Sensor</b>	3 rojo: 0.630–0.690 $\mu\text{m}$ 4 NIR: 0.77–0.90 $\mu\text{m}$	2009 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2010 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2011 (marzo, agosto)
	<b>Resolución espacial</b>	Multiespectral: 30 mts	
LANDSAT 7, ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)	<b>Bandas Sensor</b>	3: Rojo: 0.630–0.692 $\mu\text{m}$ 4: NIR: 0.772–0.898 $\mu\text{m}$ 8: Pancromática: 0.515–0.896 $\mu\text{m}$	2011 (octubre, noviembre**) 2012 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2013 (octubre)
	<b>Resolución espacial</b>	Pancromática: 15mts Multiespectral: 30 mts	
LANDSAT 8, OLI (Operational Land Imager)	<b>Bandas Sensor</b>	4: Rojo: 0.630–0.680 $\mu\text{m}$	2013 (abril, agosto, diciembre) 2014 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2015 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2016 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2017 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2018 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2019 (marzo, septiembre**, octubre, diciembre) 2020 (marzo, agosto)
		5: NIR: 0.845–0.885 $\mu\text{m}$	
		8: Pancromática: 0.500–0.680 $\mu\text{m}$	
	9: Cirrus: 1.360–1.390 $\mu\text{m}$		
<b>Resolución espacial</b>	Pancromática: 15mts Multiespectral: 30 mts		

\*\*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 2020 (agosto 2020). 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 11 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 definición del tamaño de la muestra para el proceso de extracción de datos NDVI, tuvo en cuenta los estratos temáticos (**sección 3.2 Análisis de recurrencia de la cobertura activa**), según superficies de las formaciones de seguimiento por nivel de recurrencia de vegetación activa, las cuales fueron determinadas previamente a partir de los monitoreos con el NDVI de alta resolución 2017-2020 (detalle de este proceso en

**sección 3.2)** y el grado de confianza que se requería evaluar. El tamaño de muestra total se calculó a partir de la ecuación (Chuvieco, 2002):

$$n = \frac{z^2 s^2}{L^2 + \frac{s^2 z^2}{N}}$$

Donde: L: intervalo de error tolerable (0.05 (5%)); s<sup>2</sup> varianza muestral<sup>6</sup>; z: rango de probabilidad (para nivel de confianza 95%, z = 1,96); N: tamaño de la población<sup>7</sup>

A partir de este cálculo se generó una malla de puntos aleatorios utilizando una herramienta de generación automática de ArcGis®, en base a la ubicación espacial de los estratos y el número estimado para cada uno de ellos.

La **Tabla N°3-7** presenta el tamaño de la muestra, proporcional con la superficie por estrato según nivel de recurrencia de la cobertura vegetal activa obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución durante monitoreos 2017-2020 en las formaciones de monitoreo por sector (detalle de éste proceso previo, en **sección 3.2**).

**Tabla N°3-7. Tamaño muestral de registros del NDVI Landsat 2009-2020, determinado por estratos según nivel de recurrencia de la cobertura vegetal activa obtenida desde el NDVI de imágenes de alta resolución de los monitoreos de verano 2017-2020.**

Sistema	Sector	Estratos de muestreo según nivel de recurrencia*	Tamaño muestral (n)
Tilopozo - La Punta y La Brava	Tilopozo	(1) no recurrente o presencia en uno de cuatro seguimientos (25%)	24
		(2) recurrencia en dos de cuatro seguimientos (50%)	76
		(3) recurrencia en tres de cuatro seguimientos (75%)	75
		(4) recurrencia en cuatro de cuatro seguimientos (100%)	73
		(5) inactividad o recurrencia nula (0%).	74
	La Punta y La Brava	(1) no recurrente o presencia en uno de cuatro seguimientos (25%)	23
		(2) recurrencia en dos de cuatro seguimientos (50%)	54
		(3) recurrencia en tres de cuatro seguimientos (75%)	43
		(4) recurrencia en cuatro de cuatro seguimientos (100%)	37
		(5) inactividad o recurrencia nula (0%).	22
Peine	(1) no recurrente o presencia en uno de cuatro seguimientos (25%)	24	
	(2) recurrencia en dos de cuatro seguimientos (50%)	77	
	(3) recurrencia en tres de cuatro seguimientos (75%)	76	
	(4) recurrencia en cuatro de cuatro seguimientos (100%)	75	
	(5) inactividad o recurrencia nula (0%).	74	

\* Detalle de **determinación de estratos de niveles de recurrencia en sección 3.1**. La mayor cantidad de puntos en el estrato de inactividad o recurrencia nula, se asocia a las mayores superficies para este estrato, existentes en las distintas formaciones de monitoreo en los sectores de estudio. Fuente: Cedrem Consultores.

<sup>6</sup> La varianza muestral en este caso se conocerá previo a la extracción de datos, por ende, se realiza una estimación *a priori* obteniendo un estimado de la desviación estándar de acuerdo a la “regla práctica del intervalo”, utilizando la ecuación:  $s \approx \frac{\text{rango}}{4}$ , donde el rango = valor máximo – valor mínimo.

<sup>7</sup> En este caso el tamaño de la población corresponde a las superficies por estratos y su proporción en píxeles.

### 3.4.2 Evaluación estadística de tendencias

Para evaluar estadísticamente un cambio en el valor interanual, es decir entre años, del NDVI Landsat para el periodo pre - operacional (2009-2016) y pos - operacional (2016-2020), se comparó la tendencia a escala interanual entre estos dos periodos.

La determinación de la tendencia interanual en cada periodo, se realizó mediante la prueba no paramétrica Mann – Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1962). Esta prueba proporciona un valor de significancia, *p-value*, cuyo valor inferior a 0,05 - 0,1 garantiza que la hipótesis adoptada tiene unas altas garantías de veracidad; a medida que este valor se hace más grande, las probabilidades van disminuyendo; hasta que, llegando a un valor de 1, la probabilidad es nula (Muñoz Marín, 2008). Además, un valor positivo del parámetro “S” es un indicador de una tendencia ascendente, y un valor negativo bajo indica una tendencia a la baja. El valor de este parámetro se acompaña del tamaño de la muestra, *n*, para cuantificar estadísticamente la importancia de la tendencia. Los cálculos de tendencia se realizaron con el software *R*, empleándose para su cálculo las librerías *Kendall* y *Stats*.

La evaluación de un cambio de 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, se analizó que la tendencia del NDVI durante el periodo pos - operación del proyecto 2017-2020, sea equivalente con la condición histórica pre - operacional. Este análisis enfocado principalmente, en descartar una tendencia al descenso del NDVI en el periodo pos - operacional, lo cual indicaría una baja en la actividad/vigor de las formaciones en seguimiento por sector.

### 3.5 Comparación estacional del NDVI Landsat

De forma complementaria a lo exigido por el PMB y con el propósito de evaluar estadísticamente un cambio en el valor estacional del NDVI Landsat entre el periodo pre - operacional (2009-2016) y pos - operacional (2016-2020), se calculó para cada periodo y estación, el valor promedio y rango según intervalo de confianza del 95%, es decir, aquel que bajo una distribución normal permite que cualquier valor del NDVI se determine dentro de este rango con una probabilidad de 95%.

Dado que se reconocen diferencias en la respuesta fenológica estacional entre las formaciones de herbazales y matorrales en seguimiento, la evaluación de este punto específico, se realizó diferenciando por tipo de formación vegetal.

La evaluación de un posible cambio de estado ecológico, se realizó considerando que los valores promedio por estación del periodo pos - operacional 2016 - 2020, se mantuvieran dentro del rango del NDVI histórico (en todas las estaciones del año).

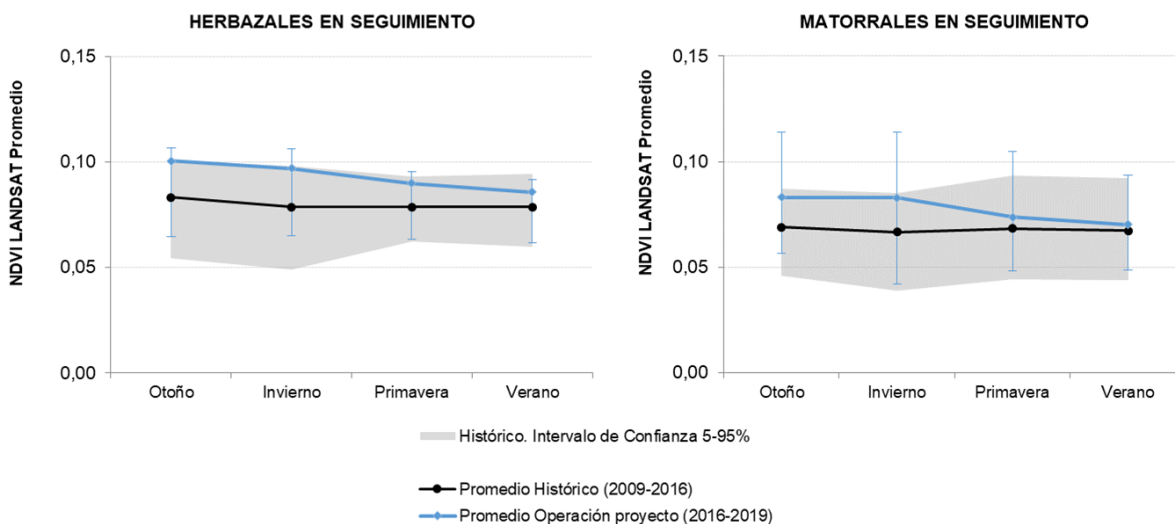
Los resultados y discusión de la comparación del NDVI Landsat por sector y tipo de formación vegetal, se presentan a continuación.

### 3.5.1 Sistema La Punta - La Brava

La comparación estacional del NDVI Landsat promedio pre - operacional (2009-2016) y operacional (2016-2020), refleja que éste último se mantiene dentro del rango mínimo del NDVI histórico (en todas las estaciones del año). Además, durante las estaciones de otoño (marzo – abril) e invierno (agosto) se registra un ascenso del NDVI durante el periodo de operación, mostrando valores mayores respecto al rango histórico, tanto en los herbazales, como matorrales de monitoreo. Este efecto se relaciona principalmente con las variaciones hidroclimáticas existentes en el sistema, las cuales determinan la disponibilidad de agua para la actividad vegetal (**Figura N°3-6**).

No se realizan para este informe comparaciones estacionales de NDVI con resultados *in situ* de transectas, ya que las condiciones excepcionales en el marco de la Pandemia Covid-19, no permitieron determinar el comportamiento de las coberturas medidas para la estación post – lluvias, y con ello establecer si existe correlación entre la estacionalidad y el comportamiento histórico del índice NDVI para el área.

**Figura N°3-6. Comparación estacional de intervalos de confianza del NDVI Landsat promedio en el periodo histórico previo al proyecto (2009-2016) y durante operación (2016-2020) por estación y tipo de formación vegetal en las superficies de monitoreo del sector Tilopozo- La Punta y La Brava**



**Nota:** barras azules y área gris corresponde a intervalos de confianza del NDVI con nivel de significancia de 95% en el periodo de operación y previo al proyecto, respectivamente.

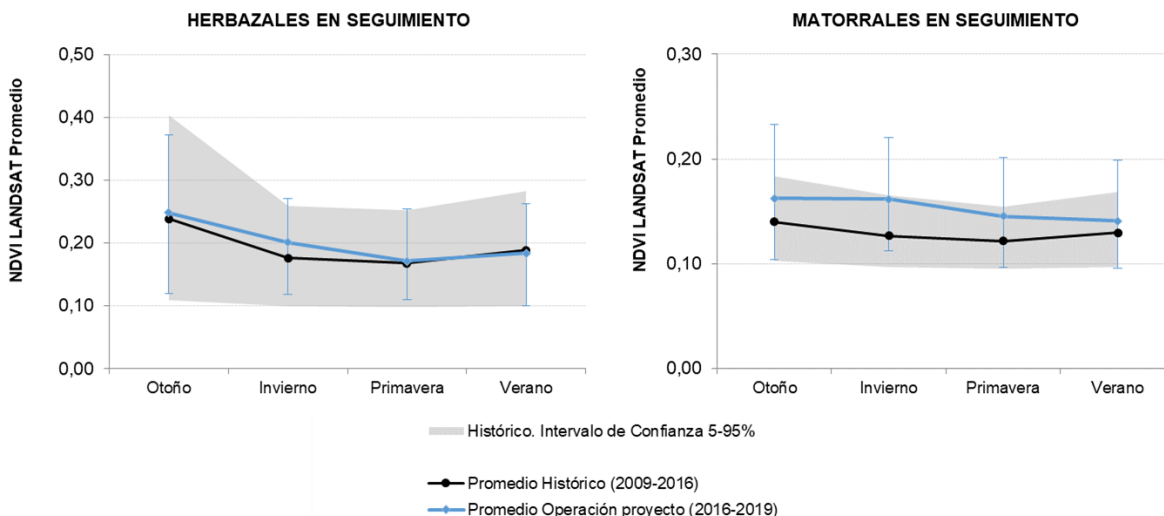
Formaciones vegetales en seguimiento según homologación de la COT (actualización post – lluvias 2019) en base a monitoreos de transectas. Fuente: Elaboración propia.



### 3.5.2 Sistema Peine

La comparación estacional del NDVI Landsat promedio pre - operacional (2009-2016) y operacional (2016-2019), refleja que éste último se mantiene dentro del rango mínimo del NDVI histórico (en todas las estaciones del año). Además, durante la estación de invierno (agosto) se registra un ascenso del NDVI durante el periodo de operación, principalmente en las formaciones matorrales de monitoreo. Este efecto sugiere una respuesta tardía a los eventos de lluvia (en otoño, marzo-abril) del mismo año en los matorrales por sobre los herbazales del sector (**Figura N°3-7**).

**Figura N°3-7. Comparación estacional de intervalos de confianza del NDVI Landsat promedio en el periodo histórico previo al proyecto (2009-2016) y durante operación (2016-2020) por estación y tipo de formación vegetal en las superficies de monitoreo del sector Peine.**



**Nota:** barras azules y área gris corresponde a intervalos de confianza del NDVI con nivel de significancia de 95% en el periodo de operación y previo al proyecto, respectivamente.

Formaciones vegetales en seguimiento según homologación de la COT (actualización post – llluvias 2019) en base a monitoreos de transectas. Fuente: Elaboración propia.

### 3.6 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 variables hidroclimáticas. La determinación de 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, no se llevará a cabo en el presente informe, debido a que no se logró realizar la actualización de las coberturas

de vegetación medida en las transectas por monitoreo *in situ*; dadas las condiciones sanitarias existentes que impidieron el traslado a las áreas de estudio.

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 de Atacama.

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  $\alpha$  o alfa) usados fueron 0,05 y 0,1. Un  $\alpha$  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 para la variable de evaluación:

### **3.6.1 Relación del NDVI con variables hidroclimáticas**

Las correlaciones estimadas, muestran una relación significativa del NDVI con las variables hidroclimáticas y de mayor fuerza con la precipitación comparativamente con la evaporación (anuales), según promedio de los coeficientes de Spearman y Pearson  $-0,45$  y  $0,51$  (en el caso de la precipitación), y  $-0,399$  y  $-0,464$  (en el caso de la evaporación), respectivamente. Entre estas variables, es de mayor importancia para la actividad vegetal con el *proxy* NDVI, la precipitación anual (**Figura N° 3-8**).

Las relaciones del NDVI con la precipitación son significativas para los promedios anuales en el total de las formaciones de monitoreo y en los herbazales; mientras que los matorrales muestran menor relación e incluso sin significancia estadística (**Figura N° 3-8**). Este resultado, se puede asociar a la mayor relación con la disponibilidad hídrica superficial y subsuperficial en el caso de los herbazales por su composición de especies más hidrófilas en comparación con los matorrales del salar.



Además, la dirección de la correlación del NDVI con la precipitación y la evaporación es proporcional e inversa, respectivamente; así mayor actividad vegetal mediante aumentos del NDVI, se asocian con mayores montos de precipitación y una menor evaporación anual (**Figura N° 3-8**).

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 tanto para herbazales como matorrales y con coeficientes altos entre 0,46 y 0,43. 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 0,58. Para los herbazales, esto ocurre durante el invierno y le sigue la estación de verano con coeficientes de Rho Spearman de 0,58 y 0,43, respectivamente (**Tabla N°3-8**).

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°3-8**).

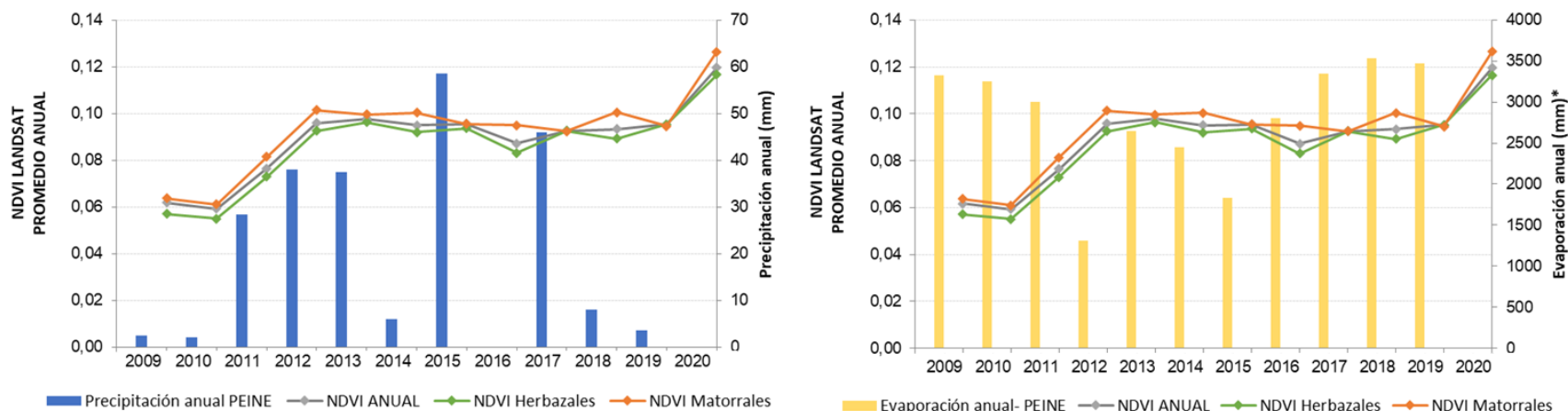
**Tabla N°3-8. Coeficientes de correlación lineal del NDVI promedio por estación, obtenidos desde imágenes Landsat 2009-2020 con la precipitación anual (estación meteorológica Peine) en formaciones de herbazales y matorrales monitoreadas.**

Periodo de NDVI promedio (2009-2019)	HERBAZALES		MATORRALES	
	Pearson	Rho Spearman	Pearson	Rho Spearman
Otoño- Lag+1	0,117	0,018	0,438	0,582 *
Invierno- Lag+1	0,104	0,145	0,243	0,182
Invierno	0,344	0,582 **	0,200	0,227
Primavera	0,301	0,082	0,296	0,018
Verano	0,464 *	0,436 *	0,445 *	0,445 *

**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° 3-8. 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	0,453 *	0,609 **	0,475 *	0,609 **	0,363	0,40
Evaporación anual	-0,399	-0,464 *	-0,369	-0,19	-0,419 *	-0,4

Dónde: \* Correlación significativa. Sin asterisco, correlación no significativa. **Los valores para Estación Peine en valor 0, para precipitaciones y evaporación acumuladas 2020 a la fecha sin datos en Estación Peine-DGA** Fuente: Elaboración propia a partir de datos meteorológicos de estación Peine.

#### 4 REFERENCIAS

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.

KENDALL, M.G., Rank correlation methods. 3 ed. Ed. Hafner Publishing Company. New York, 1962.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand: By DG Krige (Doctoral dissertation, University of the Witwatersrand). 1951.

MANN. H.B., Non-parametric tests against trend, *Econometría*, 13, pp. 245–259, 1945. [22]

MUÑOZ Marín, C. M. Análisis de la variabilidad en series hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del Río Segura. 2008.