



## **INFORME ANUAL N°3**

### **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 II**

### **Estado Ecológico del Sistema**

**METODOLOGÍAS Y ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS DE TENDENCIAS DE SUPERFICIE CUBIERTA POR LAGUNAS**



**Región de Antofagasta**

**Agosto de 2019**

## TABLA DE CONTENIDOS

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>METODOLOGÍA .....</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1      | Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2018.....         | 5         |
| 2.2      | Obtención de registros NDWI y NDVI de imágenes Landsat 2009-2019.....   | 6         |
| 2.3      | Análisis de tendencias 2009-2019.....                                   | 8         |
| 2.4      | Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI ..... | 9         |
| 2.5      | Análisis de variación espacial 2009-2019.....                           | 10        |
| <b>3</b> | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>                                     | <b>12</b> |
| 3.1      | La Punta y La Brava .....   | 12        |
| 3.1.1    | Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2018.....         | 12        |
| 3.1.2    | Análisis de tendencias 2009 - 2019.....                                 | 14        |
| 3.1.3    | Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI ..... | 18        |
| 3.1.4    | Análisis de variación espacial 2009 - 2019 .....                        | 18        |
| 3.2      | Peine.....  | 21        |
| 3.2.1    | Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2018.....         | 21        |
| 3.2.2    | Análisis de tendencias 2009 - 2019.....                                 | 23        |
| 3.2.3    | Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI ..... | 26        |
| 3.2.4    | Análisis de variación espacial 2009 - 2019 .....                        | 26        |
| <b>4</b> | <b>CONCLUSIONES .....</b>   | <b>29</b> |
| <b>5</b> | <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>   | <b>30</b> |

## FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura N°3-1. Semivariogramas del coeficiente de variación de los índices NDWI y NDVI obtenidos desde imágenes Landsat 2009-2019 para el sector de la Punta y La Brava. .... | 11 |
| Figura N°3-2. Semivariogramas del coeficiente de variación de los índices NDWI y NDVI obtenidos desde imágenes Landsat 2009-2019 para el sector de Peine.....                | 11 |
| Figura N°4-1. Superficies permanentes y no permanentes, sector La Punta y La Brava. ....   | 12 |
| Figura N°4-2. Estratos según clasificación de recurrencia, Sector La Punta y La Brava.....   | 13 |
| Figura N°4-3. Diagrama de caja de NDWI y NDVI, por tipos de estratos (permanente – no permanente – otros recubrimientos), en el sector La Punta y La Brava.....              | 14 |
| Figura N°4-4. Tendencias de medianas de los índices NDWI y NDVI, en serie de tiempo 2009/2019.....   | 16 |
| Figura N°4-5. Correlación de <i>Pearson</i> entre índice espectrales (NDWI y NDVI) por estrato, sector La Punta y La Brava. ....   | 17 |
| Figura N°4-6. Interpolación de la variación de NDWI, sector la Punta y La Brava.....   | 19 |
| Figura N°4-7. Interpolación de la variación de NDVI, sector la Punta y La Brava.....   | 20 |

|  |    |
|--|----|
| Figura N°4-8. Superficies permanentes y no permanentes, sector Peine.....  | 21 |
| Figura N°4-9. Estratos según clasificación de recurrencia, sector Peine.....   | 22 |
| Figura N°4-10. Diagrama de caja de NDWI y NDVI, por tipos de estratos (permanente – no permanente – otros recubrimientos), en el sector Peine..... | 23 |
| Figura N°4-11. Tendencias de medianas de los índices NDWI y NDVI, en serie de tiempo 2009/2019, sector Peine.....                                  | 25 |
| Figura N°4-12. Interpolación de la variación de NDWI, sector Peine.....  | 27 |
| Figura N°4-13. Interpolación de la variación de NDVI, Peine.....   | 28 |

## TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla N°3-1. Características de los sensores Landsat utilizados en el análisis NDWI y NDVI 2009-2019.....  | 6  |
| Tabla N°3-2. Tamaño muestral usado en las extracciones de registros NDWI y NDVI, por estratos según nivel de recurrencia de cuerpos de agua obtenido desde imágenes de alta resolución durante los monitoreos 2016-2018..... | 8  |
| Tabla N°4-1. Análisis exploratorio de datos, índices espectrales NDWI y NDVI, sector La Punta y La Brava.....  | 14 |
| Tabla N°4-2. Prueba Mann- Kendall de tendencias, índices NDWI/NDVI (previo al proyecto y con operación del proyecto).....  | 15 |
| Tabla N°4-3. Prueba <i>Kruskal – Wallis</i> : NDWI vs. NDWI por estrato, y NDVI vs. NDVI por estrato, sector La Punta y La Brava.....  | 16 |
| Tabla N°4-4. Correlación Pearson de índices NDWI/NDVI vs superficies históricas y de seguimiento PMB.....  | 18 |
| Tabla N°4-5. Análisis exploratorio de datos, índices espectrales NDWI y NDVI, sector Peine.....  | 23 |
| Tabla N°4-6. Prueba Mann- Kendall de tendencias, índices NDWI/NDVI (previo al proyecto y con operación del proyecto).....  | 24 |
| Tabla N°4-7. Prueba <i>Kruskal – Wallis</i> : NDWI vs. NDWI por estrato, y NDVI vs. NDVI por estrato, sector Peine.....  | 25 |
| Tabla N°4-8. Correlación Pearson de índices NDWI/NDVI vs. superficies históricas y de seguimiento PMB.....   | 26 |

## METODOLOGÍAS Y ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS DE TENDENCIAS DE SUPERFICIE CUBIERTA POR LAGUNAS - AÑO N°3 -

### 1 INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde a la descripción de **metodologías y análisis de tendencias de superficie cubierta por lagunas del Año N°3 de monitoreo, para la evaluación de estado ecológico del sistema, presentado en el capítulo 12.8 del Informe Anual**. Dicho análisis se basa en lo definido en el Plan de Manejo Biótico<sup>1</sup>, según numeral 4.2.5 Frecuencia de Medición, Tabla 4.2.6 del Anexo 2 (Plan de Manejo Biótico de la Adenda 5 del proyecto).

La variable “superficie cubierta por lagunas” corresponde a uno de los 3 indicadores de estado para el análisis del estado ecológico, establecida en el PMB y se quedó comprometida para los sistemas lagunares de los sectores La Punta y La Brava, y Sistema lagunar Peine.

En base a lo requerido por Albemarle, este Anexo presenta la información anexa o complementaria al capítulo 12.8, que contiene el análisis multitemporal y de tendencias que se subdivide en tres tipos de evaluaciones:

- **Análisis de recurrencia**<sup>2</sup> de la superficie cubierta por lagunas, obtenida desde imágenes de alta resolución durante monitoreos de invierno (agosto) y verano (diciembre) entre el 2016 y 2018; con la finalidad de evaluar su comportamiento multitemporal en los cuerpos de agua.
- **Análisis de tendencias**<sup>3</sup> en los sistemas lagunares, para describir el patrón multitemporal para un periodo de 10 años entre 2009 y 2019 (en las cuatro temporadas del año), a través de imágenes Landsat (media resolución, píxel de 30m).

El propósito de analizar un periodo de estudio superior al de seguimiento del proyecto (tres años), es determinar si existen cambios en la tendencia histórica previo y posterior a la construcción y operación del proyecto (julio 2016).

Dado que la determinación de la superficie de lagunas se realiza con la implementación de un modelo de clasificación supervisada, en base a la metodología “Índice Normalizado de Diferencia de Agua” (NDWI por sus siglas en inglés), se utilizarán los índices espectrales

---

<sup>1</sup> Plan de Manejo Biótico, en adelante PMB, correspondientes a la RCA N°21/2016 que aprueba el Proyecto “**Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama, Región de Antofagasta – Rockwood Lithium**” (en adelante Albemarle o ALB), para el monitoreo de “Superficie Cubierta por Lagunas”.

<sup>2</sup> **Análisis 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 superficie cubierta por lagunas obtenida desde imágenes de alta resolución para los años de monitoreo 2016-2018.

<sup>3</sup> **Análisis de tendencias**, se refiere a evaluar la existencia de cambios direccionales del comportamiento de una variable en el tiempo (aumento o descenso), y poner en un contexto más amplio el seguimiento producto del Plan de Manejo Biótico, a modo de contextualizar a través de estos datos el estado actual del área de estudio.

que han mostrado mejor ajuste en el modelo, para dar continuidad a la metodología propuesta para ese estudio según el PMB<sup>4</sup>; así los índices usados son:

- **NDWI** (*Normalized Difference Water Index*), el cual varía entre -1 y 1, asociando los valores positivos para las superficies con agua o húmedas y cero o negativo para el suelo y la vegetación terrestre estresada.
- El **NDVI** (*Normalized Difference Vegetation Index*), el cual en valores negativos de 0 a -1, detecta proporcionalmente suelos secos y/o desnudos, y presencia de cuerpos de agua; es decir valores cercanos a -1 reflejan mayor contenido de humedad típico de un suelo saturado a sobresaturado. Además este índice, en el rango positivo 0 a 1, diferencia la detección de vegetación.
- **Análisis de variación espacial**, a partir de la interpolación del coeficiente de variación de los índices espectrales de estudio en el periodo 2009-2019, para cuantificar la variabilidad espacial y así señalar dónde se presentan las mayores y menores variaciones en los parámetros espectrales dentro de los sectores de monitoreo.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2018

Se realizó un **análisis de recurrencia** de la superficie cubierta por lagunas, obtenida desde imágenes de alta resolución durante monitoreos de invierno (agosto) y verano (diciembre) entre el 2016 y 2018; con la finalidad de evaluar su comportamiento multitemporal; siendo la superficie, una de las variables de evaluación del estado, según lo establecido por el PMB.

Para la determinación de las áreas y sus niveles de recurrencia, se procedió a la delimitación por superposición de las superficies lagunares en formato *shape*. Estas son las resultantes del seguimiento de las coberturas de los cuerpos de agua a través del uso de imágenes satelitales de alta resolución (Pleiades - 1A), registradas semestralmente desde agosto 2016 a diciembre de 2018<sup>5</sup>.

Estas superficies lagunares según su recurrencia 2016- 2018 fueron clasificadas en estratos para caracterizar lo que corresponde a recubrimientos con presencia continua, parcial o nula de cuerpos de agua. Para la clasificación, se seleccionaron aquellas superficies poligonales de igual criterio, que coinciden en la superposición de cuatro o más veces (siendo seis el número mayor de repeticiones, equivalente al total de monitoreos). El resultado fueron tres estratos temáticos de recurrencia de los cuerpos de agua:

- (i) **Permanentes**: presencia de lámina de agua entre cuatro (4) a seis (6) de los seguimientos efectuados, equivalente a una recurrencia mayor al 50%.

<sup>4</sup> Metodología descrita en la sección 4.6 del Informe anual N°3 de Área de Lagunas del Plan de Manejo Biótico (desarrollada desde el inicio de la etapa de monitoreo).

<sup>5</sup> Además de los polígonos resultantes del modelo de clasificación supervisada de los cuerpos de agua (Plan de Manejo Biótico, en adelante PMB, correspondientes a la RCA N°21/2016), se utilizaron los puntos de muestreo GPS GNSS que también entregan información de recurrencia de los cuerpos de agua, y que sostienen con datos en terreno el criterio de determinación de recurrencia por superposición de áreas.

- (ii) No permanentes: presencia de lámina agua entre 1 y 3 de los 6 monitoreos efectuados, lo que equivale a recurrencia de 1/6 a 3/6, es decir de 17% a 50% (incluido).
- (iii) Otros recubrimientos: presencia nula de agua durante los 6 monitoreos, equivalente a una recurrencia de 0%.

## 2.2 Obtención de registros NDWI y NDVI de imágenes Landsat 2009-2019

Las evaluaciones del **análisis de tendencias y de variación espacial de los cuerpos de agua** para un periodo de 10 años (superior al de seguimiento del proyecto, tres años), se realizaron con los índices espectrales NDWI y NDVI, los cuales han mostrado mejor ajuste en el modelo de determinación de la superficie de lagunas, para dar continuidad a la metodología propuesta según el PMB.

Para la obtención de los registros de los índices NDWI y NDVI, se obtuvieron 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 10 años de estudio (2009 – 2019) y considerando una imagen por estación (marzo-abril, agosto, octubre, diciembre). La **Tabla N°2-1** presenta el detalle de los sensores usados en el análisis con NDWI y NDVI.

**Tabla N°2-1. Características de los sensores Landsat utilizados en el análisis NDWI y NDVI 2009-2019.**

| Sensor  | Características            | Detalle bandas utilizadas   | Fechas de análisis   |
|---|----------------------------|---|--|
| LANDSAT 5, TM<br>(Thematic Mapper)            | <b>Bandas Sensor</b>       | 3 rojo: 0,630–0,690 $\mu\text{m}$<br>4 NIR: 0,77–0,90 $\mu\text{m}$   | 2009 (abril, agosto, octubre, diciembre)   |
|   | <b>Resolución espacial</b> | Multiespectral: 30 mts  | 2010 (marzo, agosto, octubre, diciembre)<br>2011 (marzo, agosto)   |
| LANDSAT 7, ETM+<br>(Enhanced Thematic Mapper) | <b>Bandas Sensor</b>       | 3: Rojo: 0,630–0,692 $\mu\text{m}$<br>4: NIR: 0,772–0,898 $\mu\text{m}$<br>8: Pancromática: 0,515–0,896 $\mu\text{m}$   | 2011 (octubre, noviembre)<br>2012 <sup>6</sup> (agosto, octubre, diciembre)  |
|   | <b>Resolución espacial</b> | Pancromática: 15mts<br>Multiespectral: 30 mts   | 2013 (octubre)   |
| LANDSAT 8, OLI<br>(Operational Land Imager)   | <b>Bandas Sensor</b>       | 4: Rojo: 0,630–0,680 $\mu\text{m}$<br>5: NIR: 0,845–0,885 $\mu\text{m}$<br>8: Pancromática: 0,500–0,680 $\mu\text{m}$<br>9: Cirrus: 1,360–1,390 $\mu\text{m}$ | 2013 (abril, agosto, diciembre)<br>2014 (marzo, agosto, octubre, diciembre)  |
|   | <b>Resolución espacial</b> | Pancromática: 15mts<br>Multiespectral: 30 mts   | 2015 (abril, agosto, octubre, diciembre)<br>2016 (abril, agosto, octubre, diciembre)<br>2017 (marzo, agosto, octubre, diciembre)<br>2018 (marzo, agosto, |

<sup>6</sup> Se excluye de la serie de tiempo las imágenes Landsat 7 de abril de 2012, por presentar problemas en los valores por banda espectral, lo que influyó en los resultados del índice NDWI generando datos erróneos fuera del rango de este índice.

| Sensor | Características | Detalle bandas utilizadas | Fechas de análisis                  |
|--------|-----------------|---------------------------|-------------------------------------|
|        |                 |                           | octubre, diciembre)<br>2019 (marzo) |

Elaboración propia

Las imágenes Landsat (5 (TM), 7 (ETM+), 8 (OLI)) 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 considerando cuatro imágenes anuales correspondientes a una por estación, desde el año 2009 a 2018, además incluido marzo de 2019. 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 preprocesamiento, para cada imagen Landsat (y para cada una de sus bandas espectrales), se realizó la 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. 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.

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) para realizar la interpolación de datos. 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 10 años de análisis.

Para todas las imágenes, 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) 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 considero la obtención de los índices espectrales utilizados (NDVI, NDWI), además de la proyección y corte de áreas de estudio.

Para optimizar los procesos de análisis de tendencias y de la variabilidad espacial, se definieron muestras para el proceso de extracción de valores de los índices NDWI y NDVI. En la determinación del tamaño de la muestra, se tuvo en cuenta los estratos de recurrencia de los cuerpos de agua (permanentes – no permanentes – otros recubrimientos; detalle en **sección 2.1**), y el grado de confianza con se requería evaluar. El tamaño de muestra total se calculó a partir de la ecuación (Chuvieco, 2002):



$$n = (z^2 s^2)/(L^2 + (s^2 z^2)/N)$$

Donde: L: intervalo de error tolerable (0,05 (5%));  $s^2$  varianza muestral<sup>7</sup>; z: rango de probabilidad (para nivel de confianza 95%,  $z = 1,96$ ); N: tamaño de la población<sup>8</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 según estratos de recurrencia de los cuerpos de agua y el número estimado para cada uno de ellos. La **Tabla N°2-2** muestra el tamaño de la muestra para cada sector; se utiliza el mismo número de puntos tanto en la extracción de valores de NDWI como de NDVI<sup>9</sup>.

**Tabla N°2-2. Tamaño muestral usado en las extracciones de registros NDWI y NDVI, por estratos según nivel de recurrencia de cuerpos de agua obtenido desde imágenes de alta resolución durante los monitoreos 2016-2018.**

| Sector              | Estratos de muestreo según nivel de recurrencia de cuerpos de agua  | Tamaño muestral (n)* |
|---------------------|---|----------------------|
| La Punta y La Brava | (1) <b>Permanente:</b> recurrencia entre cuatro a seis de los seis seguimientos (>50%)                            | 104                  |
|                     | (2) <b>No Permanente:</b> recurrencia entre uno a tres de los seis seguimientos (17% a 50%)                       | 108                  |
|                     | (3) <b>Otros Recubrimientos:</b> presencia nula de agua durante los seis monitoreos, equivalente a recurrencia 0% | 129                  |
|                     | <i>Total</i>  | 341                  |
| Peine               | <b>Permanente:</b> recurrencia entre cuatro a seis de los seis seguimientos (>50%)                                | 62                   |
|                     | <b>No Permanente:</b> recurrencia entre uno a tres de los seis seguimientos (17% a 50%)                           | 66                   |
|                     | <b>Otros Recubrimientos:</b> presencia nula de agua durante los seis monitoreos, equivalente a recurrencia 0%     | 82                   |
|                     | <i>Total</i>  | 210                  |

\* Corresponde al número de píxeles de imágenes Landsat de los cuales se extrajeron los valores de NDWI y NDVI por estrato y sector de monitoreo, para evaluación de análisis de tendencias y variabilidad espacial de los cuerpos de agua 2009-2019.

Elaboración propia

### 2.3 Análisis de tendencias 2009-2019

Este tipo de análisis permite identificar patrones temporales con una secuencia mayor a la de seguimiento del proyecto (3 años) y tiene la ventaja de detectar procesos existentes, frente a análisis basado en la comparación de los estratos de recurrencia de los cuerpos de agua, con periodicidad estacional e interanual en un periodo de 10 años (2009-2019). De esta forma, a partir del análisis de tendencias se puede obtener la identificación temprana de procesos que puedan

<sup>7</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>8</sup> En este caso el tamaño de la población corresponde a las superficies por estratos y su proporción en píxeles.

<sup>9</sup> Para ambos índices, se verificó el mismo rango de valores y en base a la misma superficie, se determina el mismo tamaño de muestra.



afectar a los sistemas lagunares, o bien contextualizar los procesos de variación dentro de un ciclo más amplio.

Se realizó un análisis exploratorio de los datos con diagramas de caja (*boxplot*)<sup>10</sup> de la totalidad de los datos de los índices espectrales NDWI y NDVI según estrato de recurrencia.

Seguidamente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA<sup>11</sup>) con el programa estadístico MINITAB<sup>®</sup>, para establecer las diferencias/ similitud (estadísticamente significativas) de los registros de los índices NDWI y NDVI entre los estratos de recurrencia de los cuerpos de agua. Es decir, evaluar la representatividad del valor de los índices en cada uno de los estratos de análisis.

Para el análisis ANOVA se realizó la prueba de Kruskal-Wallis (no paramétrica, Kruskal & Wallis, 1952) por índice y por estrato temático. La prueba supone que las varianzas de los grupos son iguales y que los residuos o errores son aleatorios, independientes e idénticamente distribuidos siguiendo una ley normal con media 0 y desviación constante. El valor del parámetro F de esta prueba, se acompaña del valor p para cuantificar estadísticamente la importancia de la variación. El *valor p* se comparó 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 variación significativa, cuando en realidad no es así, es 5%.

Además, se evaluó la tendencia a escala anual del periodo 2009 – 2019 (anual previo y con operación del proyecto) mediante la prueba no paramétrica Mann – Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1962). Esta prueba proporciona el parámetro S el cual es un indicador de una tendencia ascendente, y un valor negativo muy bajo indica una tendencia a la baja. El valor de este parámetro, se acompaña de la probabilidad asociada y el tamaño de la muestra, n, para cuantificar estadísticamente la importancia de la tendencia. Un valor de significancia, *p-value*, inferior a 0,05 – 0,1 garantiza que la hipótesis adoptada tiene 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).

Los cálculos de tendencia se realizaron con el software R, empleándose para su cálculo las librerías *Kendall* y *Stats*.

## 2.4 Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI

El análisis de correlación se realizó con la finalidad de preestablecer la confiabilidad de la extrapolación de la evaluación de tendencias y de variabilidad espacial de los cuerpos de agua para un periodo de 10 años (superior al de seguimiento del proyecto, tres años), con los *proxys* de NDWI y NDVI.

Se utilizaron los coeficientes de Pearson (paramétrico) y Rho Spearman (no paramétrico) para examinar la fuerza y la dirección de la relación lineal de las superficies de los cuerpos de agua

<sup>10</sup> Diagramas de caja- *boxplot*: 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.

<sup>11</sup> ANOVA por su sigla en inglés, *Analysis of Variance*.

(determinadas desde imágenes de alta resolución, durante monitoreos 2016-2018) con el NDWI y el NDVI obtenidos desde imágenes Landsat.

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.

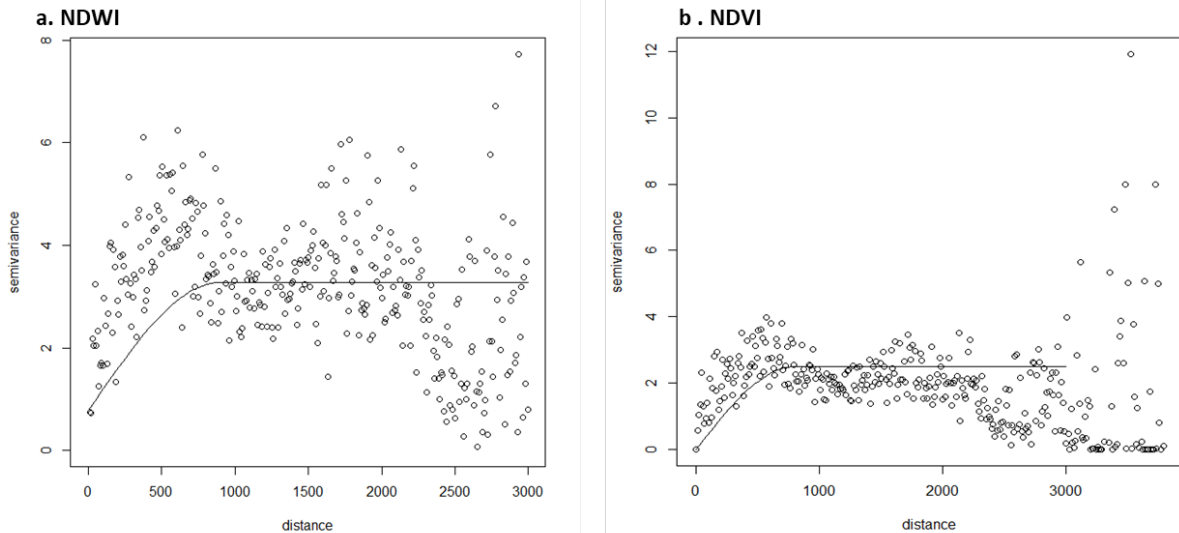
Para determinar si la correlación entre las variables es significativa, se comparó el valor  $p$  con su nivel de significancia. Los niveles de significancia (denotado como  $\alpha$  o alfa) usados fueron  $0,05$  y  $0,1$ . Un  $\alpha$  de  $0,05$  indica que el riesgo de concluir que existe una correlación, 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).

## 2.5 Análisis de variación espacial 2009-2019

Se generó una interpolación espacial (imagen ráster) estimada a partir del conjunto de puntos dispersos del coeficiente de variación<sup>12</sup> de los índices NDWI y NDVI 2009-2019, respectivamente (detalles de obtención de registros en **sección 2.2**). La interpolación se obtuvo mediante el método *Kriging* (comportamiento espacial) el cual responde a la noción de dependencia espacial en la cual las muestras cercanas tienen mayor similitud entre sí que las dispuestas apartadamente, con esta información el método estima las variables en los puntos no muestrales basándose en estas muestras conocidas (Niño, 2008); para ello se debe llevar un proceso de análisis estadístico de semivariogramas, seguido por la creación de la imagen ráster de las superficies continuas de la variable de análisis (coeficiente de variación del NDWI y NDVI, respectivamente). La **Figura N°2-1** y **Figura N°2-2** muestra los semivariogramas ajustados al modelo esférico de ambos índices por sector.

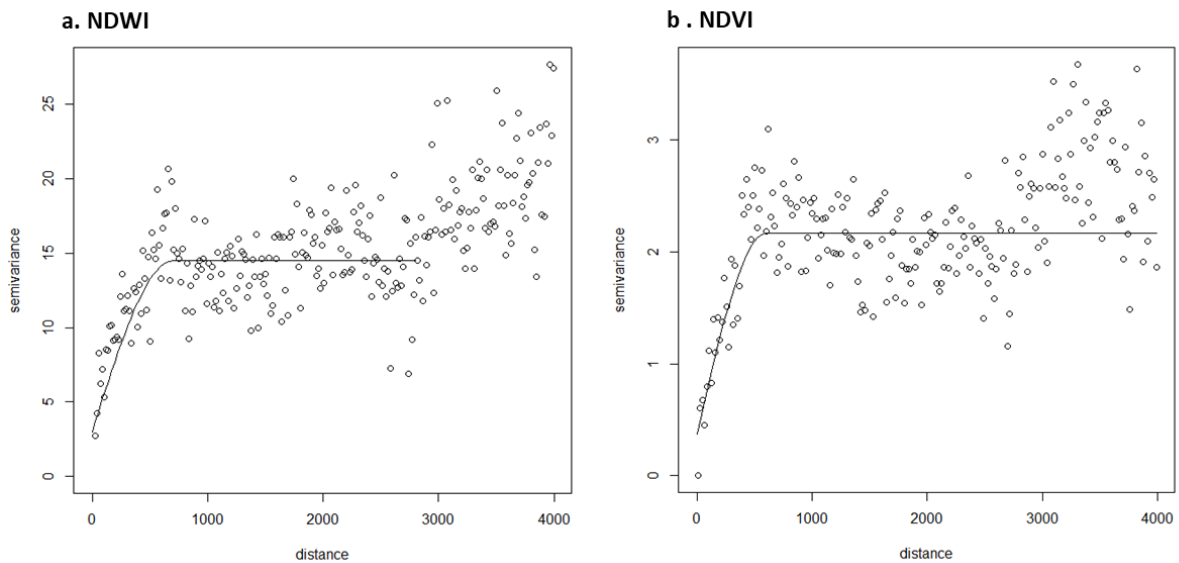
<sup>12</sup> El coeficiente de variación (CV) es una medida aplicada, que relaciona la desviación estándar y la media aritmética de un conjunto de datos definiendo la dispersión relativa de la muestra en estudio. Esta medida es la unidad interpolada en el método *Kriging* y fue calculada por la fórmula  $CV = \sigma/\mu$ , donde  $\sigma$ : desviación estándar (por punto de muestreo) y  $\mu$ : media aritmética de los valores por estrato temático.

**Figura N°2-1. Semivariogramas del coeficiente de variación de los índices NDWI y NDVI obtenidos desde imágenes Landsat 2009-2019 para el sector de la Punta y La Brava.**



Elaboración propia

**Figura N°2-2. Semivariogramas del coeficiente de variación de los índices NDWI y NDVI obtenidos desde imágenes Landsat 2009-2019 para el sector de Peine.**



Elaboración propia

Las imágenes *ráster* del coeficiente de variación del NDWI y NDVI, fueron clasificadas según los rangos de variación, siguiendo el método de rupturas naturales de Jenks (Jenks y Caspall, 1971). Las clases de cortes naturales se basan en las agrupaciones naturales inherentes a los datos. Los cortes de clase se caracterizan porque agrupan mejor los valores similares y maximizan las diferencias entre clases. Las entidades se dividen en clases cuyos límites quedan establecidos dónde hay diferencias considerables entre los valores de los datos.

En este caso fueron cinco rangos o quiebres naturales seleccionados, y que fueron reclasificados en un rango cualitativo, de acuerdo con el valor interpolado del coeficiente de variación<sup>13</sup>, los rangos son: (a) Muy alto (8,9 – 4,9), (b) Alto (4,9 – 3,2), (c) Medio (3,2 – 2,03), (d) Bajo (2,03 – 1,22)<sup>14</sup>.

### 3 RESULTADOS y DISCUSIÓN

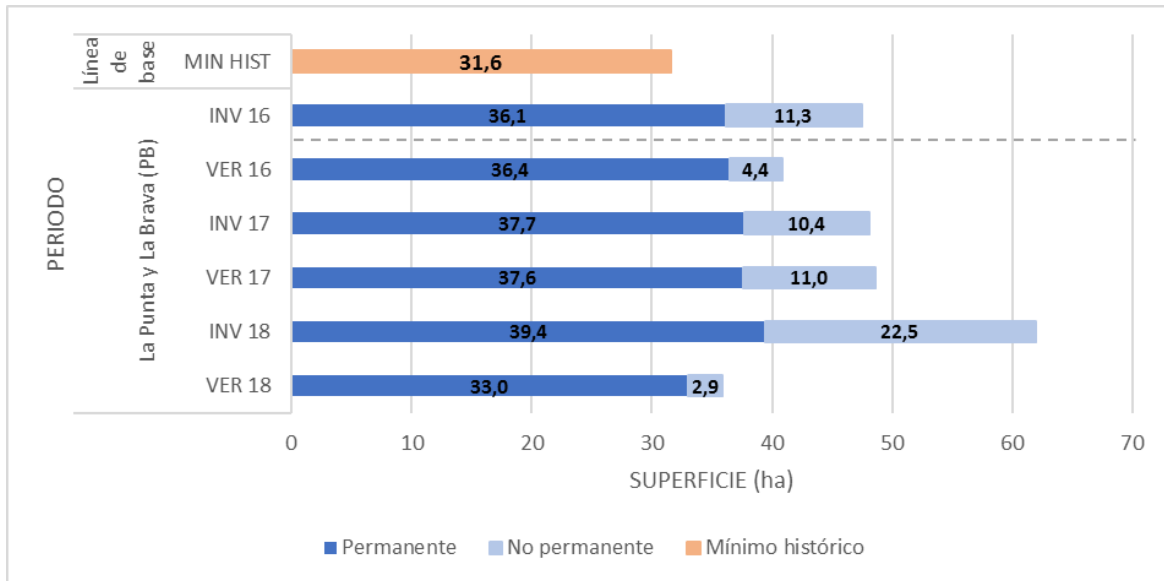
#### 3.1 La Punta y La Brava

##### 3.1.1 Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2018

A partir del análisis de recurrencia, la

**Figura N°3-1**, muestra la relación entre las superficies reportadas producto del seguimiento del PMB, y los estratos temáticos; además de la relación de las lagunas permanentes con la superficie histórica.

**Figura N°3-1. Superficies permanentes y no permanentes, sector La Punta y La Brava.**



Fuente: Elaboración Propia

Semestralmente, los valores de superficies cubiertas por lagunas reportados corresponden a la suma de los estratos “permanente” y “no permanente” de cada temporada. Así, el mínimo histórico para este sector (31,6 ha), calculado en febrero de 2014, se mantiene bajo el promedio de los valores totales calculados durante el monitoreo, equivalente a 47,1 ha, con una diferencia mínima de +4,3 ha (verano de 2018) y una diferencia máxima de +30,3 ha (invierno de 2018). Las mayores variaciones se presentan en las superficies de lagunas “no permanentes”, presentando un rango

<sup>13</sup> **Coefficiente de variación:** se utiliza cuando se desea hacer referencia a la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de un parámetro. A mayor valor del coeficiente de variación, mayor heterogeneidad de los valores.

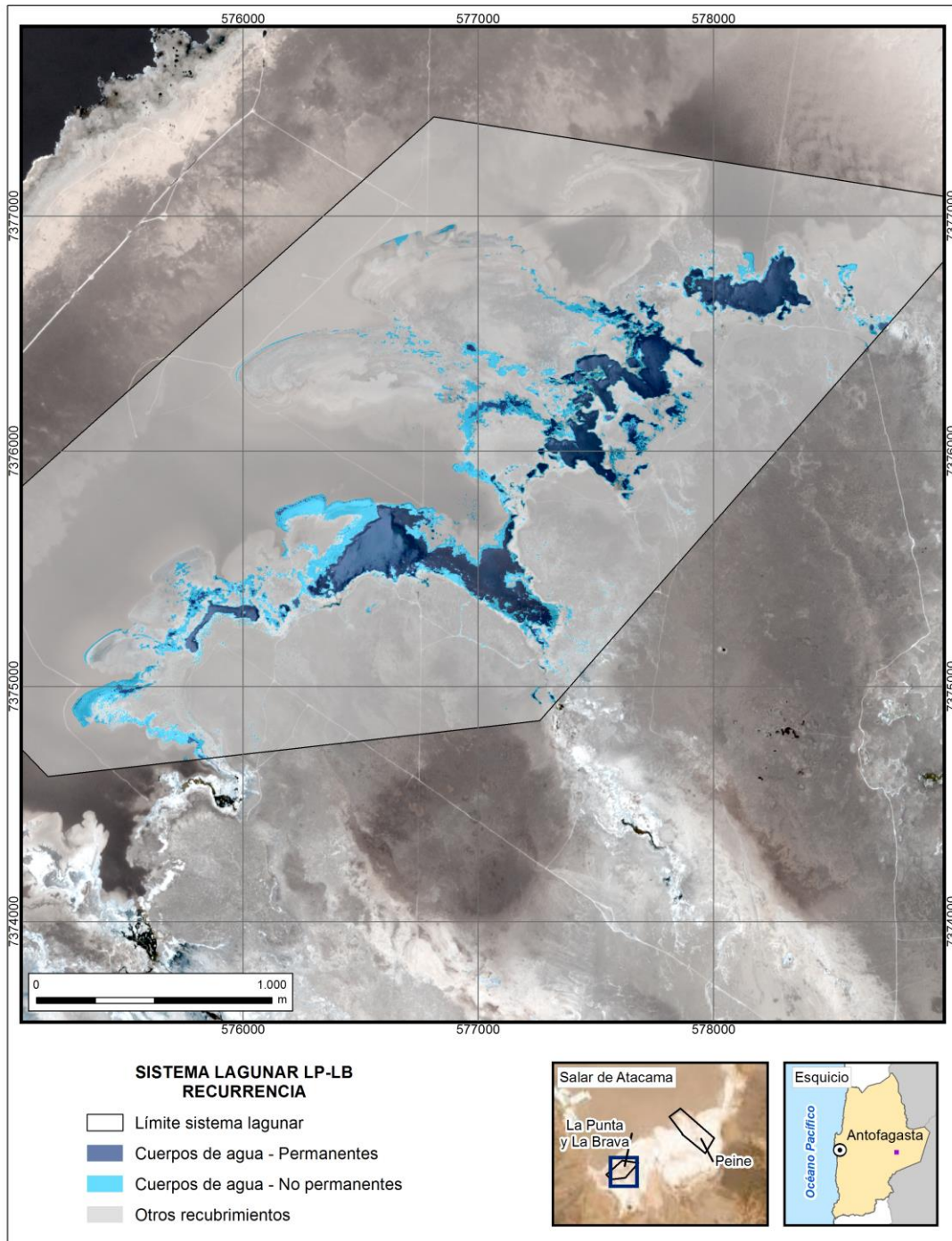
<sup>14</sup> Los valores menores a 1,22 se consideran valores sin variación y no se expresaron gráficamente.

---

de superficies de 26,6 ha. La variación de las superficies lagunares “permanentes” es menor, presentando un rango de 3,7 ha (**Figura N°3-1**).

La **Figura N°3-2** muestra los estratos clasificados en recurrencia para los sectores de La Punta y La Brava.

**Figura N°3-2. Estratos según clasificación de recurrencia, Sector La Punta y La Brava.**



Elaboración propia

### 3.1.2 Análisis de tendencias 2009 - 2019

La **Tabla N°3-1** muestra el análisis exploratorio de los datos de los índices NDWI y NDVI, del periodo 2009 - 2019. El promedio del índice NDWI para los cuerpos de agua permanente, se encuentran alrededor de 0,184, un valor mínimo de -0,360 y máximo de 0,990; mientras que para los valores de NDWI se encuentran entorno a los -0,201, con valores mínimos de -0,986 y máximos 0,331.

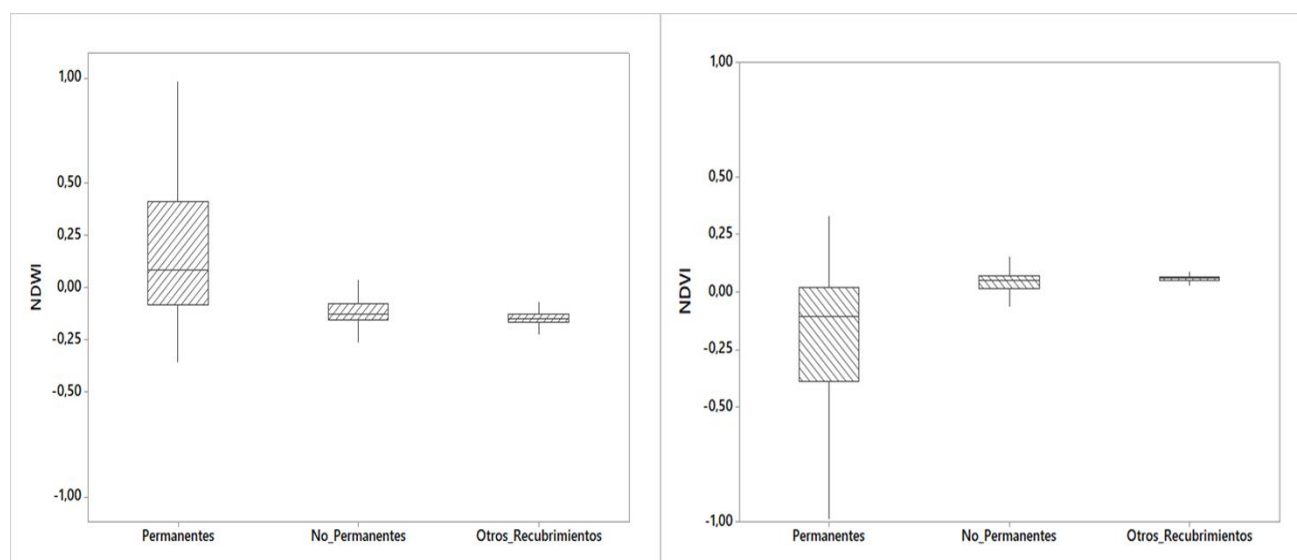
**Tabla N°3-1. Análisis exploratorio de datos, índices espectrales NDWI y NDVI, sector La Punta y La Brava.**

| Parámetro | Recubrimiento             | Media  | Mínimo | Mediana | Máximo |
|-----------|---------------------------|--------|--------|---------|--------|
| NDWI      | E1 – C.A. Permanente      | 0,184  | -0,360 | 0,087   | 0,990  |
|           | E2 – C.A. No Permanente   | -0,083 | -0,336 | -0,123  | 0,691  |
|           | E3 – Otros Recubrimientos | -0,143 | -0,336 | -0,144  | 0,004  |
| NDVI      | E1 – C.A. Permanente      | -0,201 | -0,986 | -0,108  | 0,331  |
|           | E2 – C.A. No Permanente   | 0,021  | -0,664 | 0,052   | 0,231  |
|           | E3 – Otros Recubrimientos | 0,059  | -0,078 | 0,059   | 0,311  |

Elaboración propia

En general, los valores de NDWI y NDVI de los cuerpos de agua permanentes presentan gran variabilidad, según se ve en la **Figura N°3-3**, con datos asimétricos (tendientes a valores (-) en NDVI y (+) en NDWI), sin presencia de valores atípicos. Sin embargo, los valores de los estratos no permanentes y otros recubrimientos presentan poca variabilidad, con mayor cantidad de valores atípicos en la serie de tiempo, y con un comportamiento similar entre ambos estratos.

**Figura N°3-3. Diagrama de caja de NDWI y NDVI, por tipos de estratos (permanente – no permanente – otros recubrimientos), en el sector La Punta y La Brava.**



Elaboración propia

La serie temporal de los valores de imágenes NDWI y NDVI se evaluó mediante la prueba Mann – Kendall para obtener la tendencia de ambos índices en cada una de las cuatro temporadas del



año, en el periodo 2009 -2019 (en dos conjuntos: previo al proyecto y rango completo con operación de proyecto). La **Tabla N°3-2** muestra los resultados de la prueba para el sector La Punta y La Brava.

**Tabla N°3-2. Prueba Mann- Kendall de tendencias, índices NDWI/NDVI (previo al proyecto y con operación del proyecto).**

| Parámetro             | Recubrimiento             | z      | p- value | S     | tau    |
|-----------------------|---------------------------|--------|----------|-------|--------|
| NDWI (2009/ abr 2016) | E1 – C.A. Permanente      | -3,655 | *0,000   | ↓-186 | -0,492 |
|                       | E2 – C. A. No Permanente  | -0,533 | 0,594    | -28   | -0,074 |
|                       | E3 - Otros Recubrimientos | -4,840 | *0,000   | ↓-246 | -0,651 |
| NDWI (2009/ 2019)     | E1 – C.A. Permanente      | -3,996 | *0,000   | ↓-344 | -0,441 |
|                       | E2 – C.A. No Permanente   | -0,851 | 0,395    | -74   | -0,095 |
|                       | E3 - Otros Recubrimientos | -4,439 | *0,000   | ↓-382 | -0,490 |
| Parámetro             | Recubrimiento             | z      | p-value  | S     | tau    |
| NDVI (2009/ abr 2016) | E1 – C.A. Permanente      | 0,094  | 0,925    | 6     | 0,015  |
|                       | E2 – C.A. No Permanente   | 2,382  | *0,017   | ↑128  | 0,315  |
|                       | E3 - Otros Recubrimientos | 3,583  | *0,000   | ↑192  | 0,473  |
| NDVI (2009/ 2019)     | E1 – C.A. Permanente      | 0,461  | 0,645    | 42    | 0,051  |
|                       | E2 – C.A. No Permanente   | 2,593  | *0,009   | ↑232  | 0,283  |
|                       | E3 - Otros Recubrimientos | 2,325  | *0,020   | ↑208  | 0,254  |

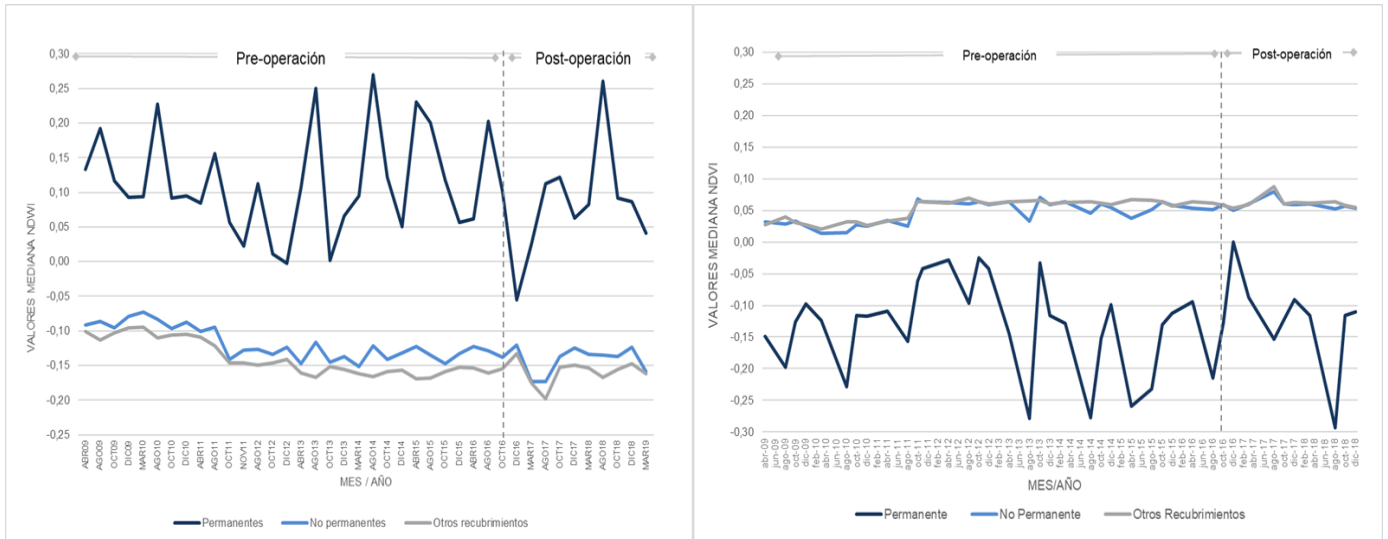
Donde: **Rango previo al proyecto:** 2009/ abr 2016; **Rango completo con operación del proyecto:** 2009/2019; \*: estadísticamente significativo; ↑: alza en tendencia; ↓: baja en tendencia. Elaboración propia

El análisis de las tendencias de NDWI y NDVI previo y posterior al proyecto, muestra una baja en la tendencia de los valores de NDWI (aumento de valores negativos de NDWI) en el estrato otros recubrimientos y permanentes. Por otro lado, se evidencia una tendencia al alza (aumento de valores positivos de NDVI) en los estratos otros recubrimientos y no permanentes, previo y posterior al proyecto. En el primer caso, la variación temporal del índice NDWI a la baja (aumento de valores negativos de NDWI), en el caso del estrato otros recubrimientos, puede explicarse por suelos desnudos o vegetación escasa más definida en sus valores de reflectancia, y baja en la tasa de humedad; situación sostenida previo y posterior al proyecto; en el caso de los valores permanentes el aumento del índice NDWI podría estar definido por las variaciones de profundidad y aumento de sedimentación.

Para el segundo caso, el aumento de valores positivos de NDVI, acentúan la presencia de suelos desnudos y vegetación escasa (como los que compone el estrato de otros recubrimientos); y describen un aumento parcial de áreas con menor humedad contenida, como se evidencia con los resultados del estrato no permanente.

Los valores permanentes, previo al proyecto, no presentaban una tendencia monótona en la serie (valor *p – value* cercano a 1). La **Figura N°3-4** muestra las tendencias de las medianas de los valores de NDWI y NDVI en la serie de tiempo 2009 - 2019, en ella es posible apreciar que las tendencias descritas por la prueba Mann – Kendall tienen una correspondencia gráfica, en donde se verifican que los valores de NDWI de los estratos no permanentes y otros recubrimientos tienen una leve tendencia a la baja, y los valores de NDVI de los estratos permanentes una leve tendencia al alza.

**Figura N°3-4. Tendencias de medianas de los índices NDWI y NDVI, en serie de tiempo 2009/2019.**



Elaboración propia

Asumiendo estas tendencias por estratos, se establecerá mediante la prueba de *Kruskal – Wallis*, si son grupos con medianas distintas, y por lo tanto si existen diferencias estadísticamente significativas entre cada estrato. Esto permitirá establecer la existencia de grupos diferentes, por lo tanto, áreas bien definidas por el conjunto de datos que la describe, y con tendencias por índices particulares. La **Tabla N°3-3** muestra los resultados de la prueba y señala que cada estrato es definido por grupo de valores característico. Además, cada índice presenta una relación entre sí, como lo muestra los resultados de la prueba de *Pearson* en la **Figura N°3-5**; lo que indica una relación negativa fuerte entre las variables, es decir, que en la medida que una variable aumenta, la otra disminuye.

**Tabla N°3-3. Prueba *Kruskal – Wallis*: NDWI vs. NDWI por estrato, y NDVI vs. NDVI por estrato, sector La Punta y La Brava.**

| <i>Estadísticos descriptivos</i> |      |           |                         |         |
|----------------------------------|------|-----------|-------------------------|---------|
| NDWI / Estrato                   | N    | Mediana   | Clasificación de medias | Valor Z |
| E1 – C.A. Permanente             | 4320 | -0,122544 | 6463,2                  | -7,21   |
| E2 – C.A. No Permanente          | 5160 | -0,147222 | 4463,7                  | -54,53  |
| E3 – Otros Recubrimientos        | 4160 | 0,086927  | 10114,8                 | 64,73   |

| <i>Estadísticos descriptivos</i> |      |           |                         |         |
|----------------------------------|------|-----------|-------------------------|---------|
| NDVI / Estrato                   | N    | Mediana   | Clasificación de medias | Valor Z |
| E1 – C.A. Permanente             | 4428 | 0,052267  | 7755,5                  | 15,25   |
| E2 – C.A. No Permanente          | 5289 | 0,059333  | 8844,8                  | 42,36   |
| E3 – Otros Recubrimientos        | 4264 | -0,108180 | 3897,7                  | -60,03  |

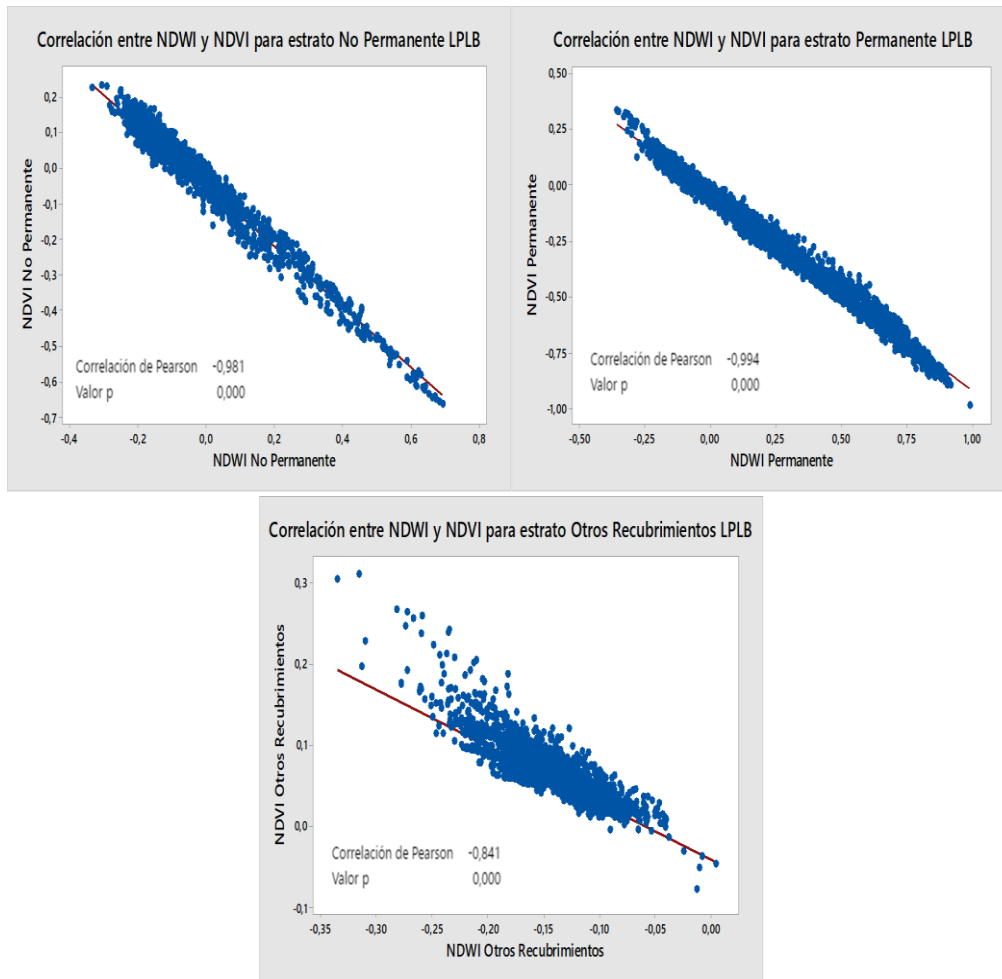
Prueba: Ho: Hipótesis nula: todas las medianas son iguales

H1: Hipótesis alterna: al menos una mediana es diferente ( $p < 0,05$ )

| NDWI - Método            | GL | Valor H | Valor p |
|--------------------------|----|---------|---------|
| No ajustado para empates | 2  | 4795,69 | 0,000   |
| Ajustado para empates    | 2  | 4795,69 | 0,000   |
| NDVI - Método            | GL | Valor H | Valor p |
| No ajustado para empates | 2  | 3779,29 | 0,000   |
| Ajustado para empates    | 2  | 3779,29 | 0,000   |

Elaboración propia

**Figura N°3-5. Correlación de *Pearson* entre índice espectrales (NDWI y NDVI) por estrato, sector La Punta y La Brava.**



Elaboración propia

### 3.1.3 Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI

Una vez determinado que existe relación entre los estratos de recurrencia y los valores por índice espectral (NDWI y NDVI); es posible especificar si existe relación entre la tendencia de estos valores y las superficies de los cuerpos de agua. Es así, que la prueba de correlación de *Pearson*, de las superficies resultantes de datos históricos, y seguimiento del PMB, versus el total de los

cuerpos de agua (no permanentes + permanentes); muestra que existe solo correlación con los valores de NDVI (ver **Tabla N°3-4**). Esto posibilita establecer una correspondencia entre índices y las superficies de los cuerpos de agua a través de este índice, y examinar la dinámica del sistema dentro de un contexto temporal más amplio, aun cuando no existan todos los datos de superficie para la serie.

**Tabla N°3-4. Correlación Pearson de índices NDWI/NDVI vs superficies históricas y de seguimiento PMB.**

| Valores correlación superficies vs. NDWI (permanente + no permanente) |       |
|---|-------|
| <i>Pearson</i>  | 0,64  |
| <i>Valor-p</i>  | 0,07  |
| Valores correlación superficies vs. NDVI (permanente + no permanente) |       |
| <i>Pearson</i>  | -0,76 |
| <i>Valor-p</i>  | 0,02  |

Elaboración propia

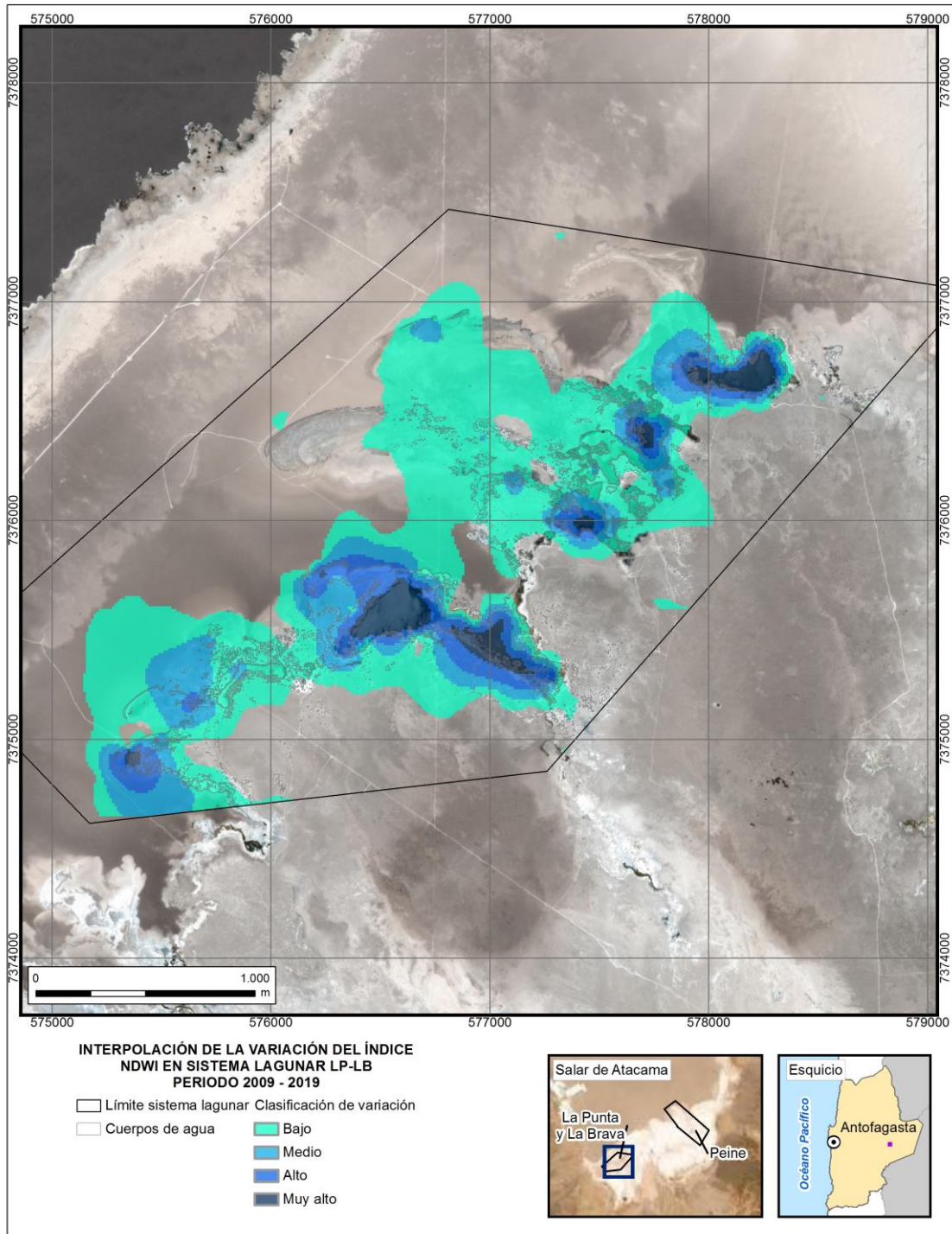
#### 3.1.4 Análisis de variación espacial 2009 - 2019

La imagen raster generada a partir del conjunto de valores de coeficiente de variación de los índices NDWI y NDVI muestra la interpolación mediante el método *Kriging*. Estas áreas son aquellas en que la interpolación del coeficiente de correlación determina como zonas de alta variabilidad del índice, y donde la gestión puede asociar a zonas de análisis. Los resultados se muestran, para cada índice, en la **Figura N°3-6** y **Figura N°3-7**.

Los resultados del método *Kriging*, en ambos índices, señala la existencia de zonas de alta variación asociadas al estrato permanente, variaciones alta y media a los estratos no permanentes y bajas a otros recubrimientos. En el primer caso, y dada la alta correlación de los datos de NDVI con los estratos permanentes, y la utilidad del NDVI en discriminar sedimentos y otras variables asociadas a cuerpos de agua someros<sup>15</sup>; esta variación podría ser una medida de profundidad y/o aumento de sedimentación o turbiedad de las aguas. En el caso de los estratos no permanentes la variabilidad alta y media de sus valores, lo da la propia naturaleza del estrato, que asume periodos de aumento/baja de humedad contenida, movimientos de aguas someras, y aumento/disminución del vigor en la escasa vegetación ribereña. Finalmente, la baja o nula variabilidad corresponde al estrato más estable en valores de índices, ya que describe suelos desnudos cubiertos de sal muy estables temporalmente.

**Figura N°3-6. Interpolación de la variación de NDWI, sector la Punta y La Brava.**

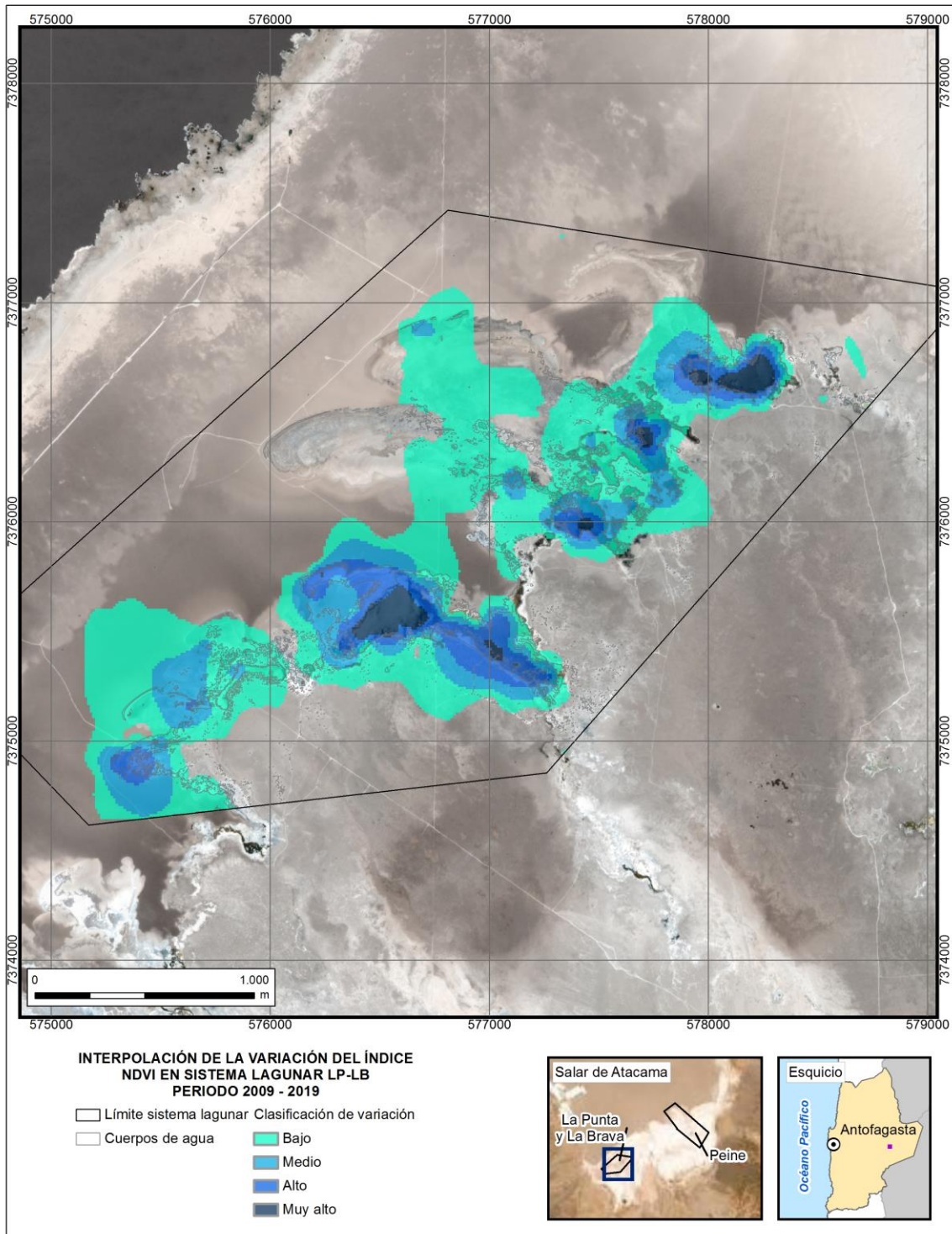
<sup>15</sup> (Li, L. *et al*, 2015).



Elaboración propia

Figura N°3-7. Interpolación de la variación de NDVI, sector la Punta y La Brava.





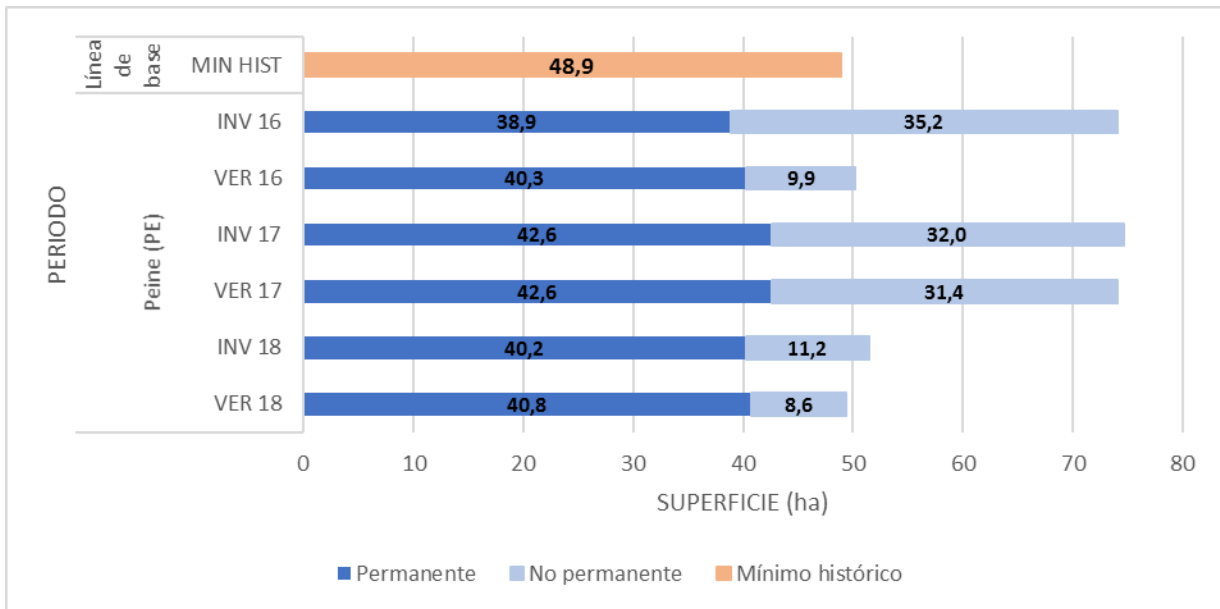
Elaboración propia

### 3.2 Peine

#### 3.2.1 Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2018

Del análisis de recurrencia, la **Figura N°3-8**, muestra la relación entre las superficies mínimas históricas y las reportadas producto del seguimiento del PMB, y los estratos temáticos permanentes y no permanentes.

**Figura N°3-8. Superficies permanentes y no permanentes, sector Peine.**



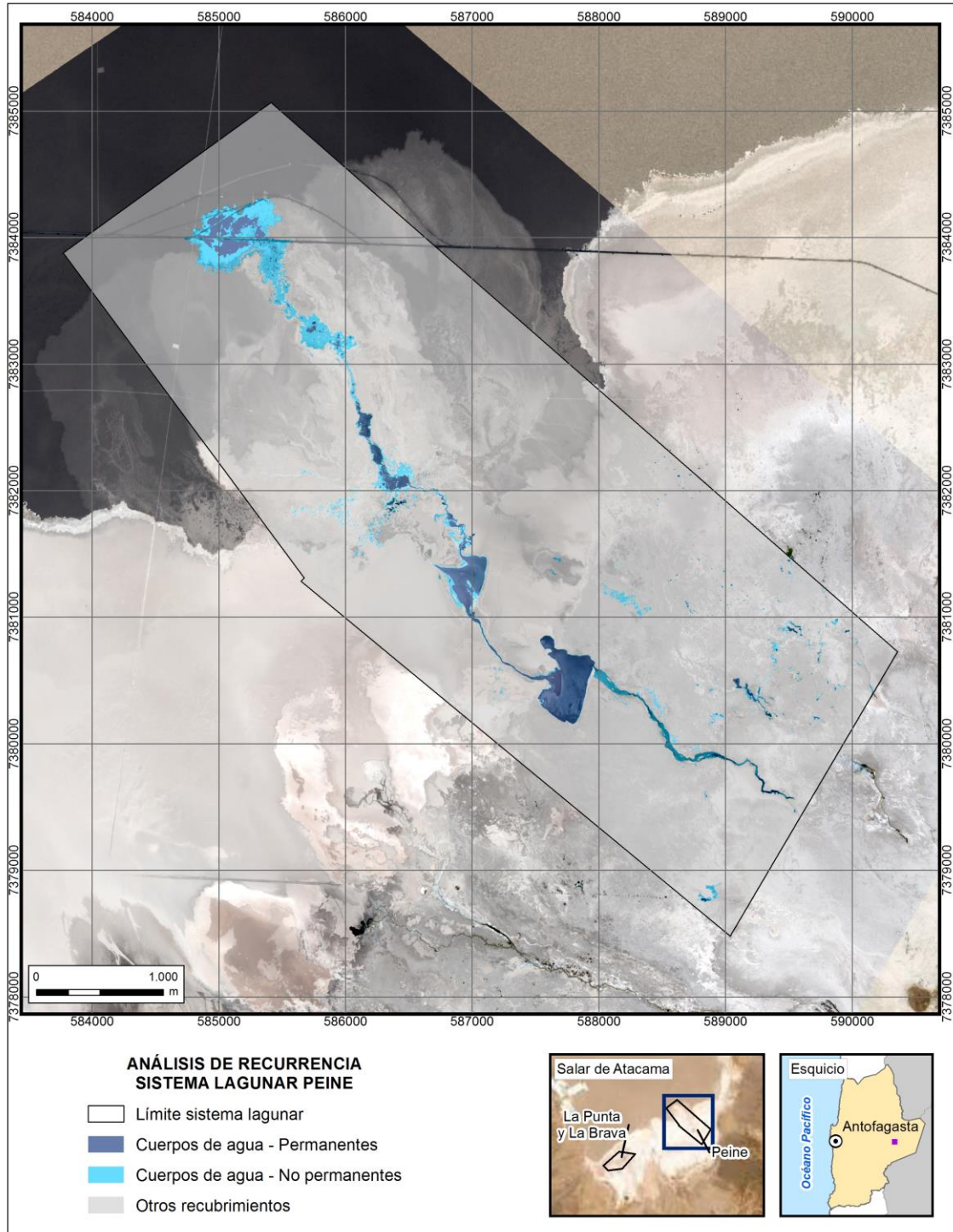
Fuente: Elaboración Propia

Los valores de superficies cubiertas por lagunas reportados corresponden a la suma de los estratos “permanente” y “no permanente” calculados para este sector en cada temporada. Así, el mínimo histórico para este sector (48,9 ha), calculado en marzo de 2006, se mantiene bajo el promedio de los valores totales calculados durante el monitoreo, equivalente a 62,3 ha, con una diferencia mínima de +0,5 ha (verano de 2018) y una diferencia máxima de +30,3 ha (invierno de 2017). Las mayores variaciones se presentan en las superficies de lagunas “no permanentes”, presentando un rango de superficies de 19,7 ha. La variación de las superficies lagunares “permanentes” es menor, presentando un rango de 6,4 ha (**Figura N°3-2**).

La **Figura N°3-9** muestra los estratos clasificados en recurrencia para el sector Peine.



**Figura N°3-9. Estratos según clasificación de recurrencia, sector Peine.**



Elaboración propia

**3.2.2 Análisis de tendencias 2009 - 2019**

La **Tabla N°3-5** muestra el análisis exploratorio de los datos de los índices NDWI y NDVI, del periodo 2009 – 2019 para el sector Peine. El promedio del índice NDWI para los cuerpos de agua permanente, se encuentran alrededor de 0,184, un valor mínimo de -0,360 y máximo de 0,990; mientras que para los valores de NDWI se encuentran entorno a los -0,201, con valores mínimos de -0,986 y máximos 0,331.

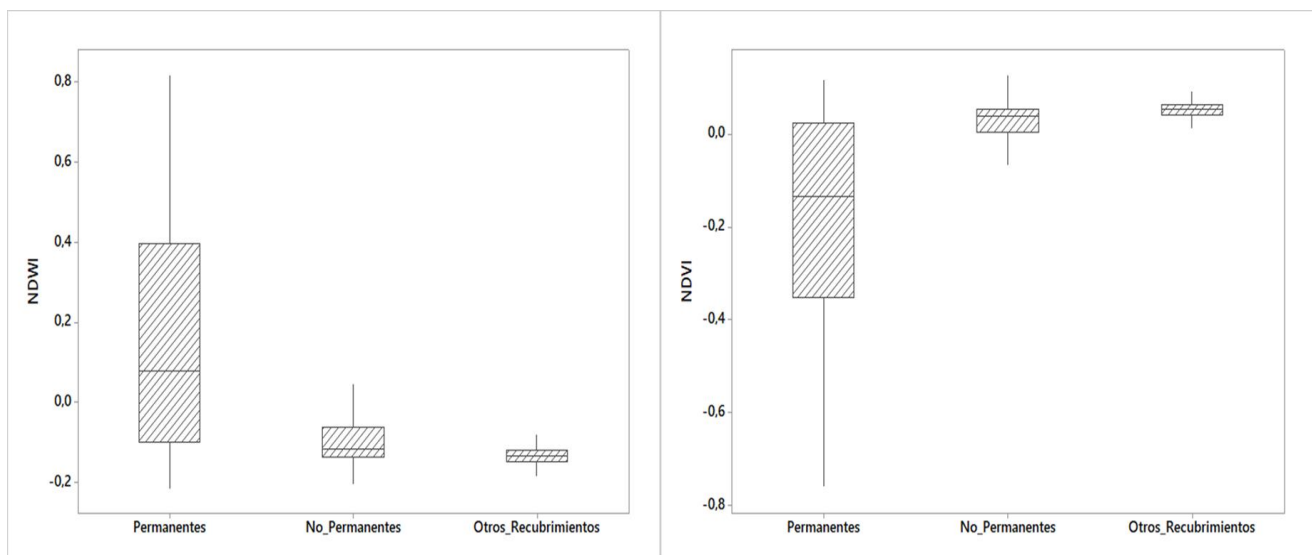
**Tabla N°3-5. Análisis exploratorio de datos, índices espectrales NDWI y NDVI, sector Peine.**

| Parámetro | Recubrimiento             | Media  | Mínimo | Mediana | Máximo |
|-----------|---------------------------|--------|--------|---------|--------|
| NDWI      | E1 – C.A. Permanente      | 0,162  | -0,216 | 0,080   | 0,819  |
|           | E2 – C.A. No Permanente   | -0,050 | -0,205 | -0,137  | 0,832  |
|           | E3 – Otros Recubrimientos | -0,131 | -0,190 | -0,133  | 0,062  |
| NDVI      | E1 – C.A. Permanente      | 0,144  | -0,262 | 0,021   | 0,819  |
|           | E2 – C.A. No Permanente   | -0,050 | -0,250 | -0,118  | 0,832  |
|           | E3 – Otros Recubrimientos | -0,130 | -0,226 | -0,130  | -0,022 |

Elaboración propia

Los valores de NDWI y NDVI de los cuerpos de agua permanentes muestra variabilidad en sus datos, según se ve en la **Figura N°3-10**, con datos asimétricos (tendientes a valores (-) en NDVI y (+) en NDWI), sin presencia de valores atípicos. Sin embargo, los valores de los estratos no permanentes y otros recubrimientos presentan menor variabilidad, con mayor cantidad de valores atípicos en el caso del estrato permanente y en menor cuantía en el estrato otros recubrimientos, presentando además un comportamiento similar entre ambos.

**Figura N°3-10. Diagrama de caja de NDWI y NDVI, por tipos de estratos (permanente – no permanente – otros recubrimientos), en el sector Peine.**



Elaboración propia

La serie temporal de los valores de imágenes NDWI y NDVI se evaluó mediante la prueba Mann – Kendall para obtener la tendencia de ambos índices en cada una de las cuatro temporadas del año, en el periodo 2009 -2019 (en dos conjuntos: previo al proyecto y rango completo con operación de proyecto). La **Tabla N°3-6** muestra los resultados de la prueba para el sector Peine.

**Tabla N°3-6. Prueba Mann- Kendall de tendencias, índices NDWI/NDVI (previo al proyecto y con operación del proyecto).**

| Parámetro             | Recubrimiento             | z      | p- value | S     | tau    |
|-----------------------|---------------------------|--------|----------|-------|--------|
| NDWI (2009/ abr 2016) | E1 – C.A. Permanente      | 1,837  | 0,066    | 94    | 0,249  |
|                       | E2 – C. A. No Permanente  | -2,312 | *0,021   | ↓-118 | -0,312 |
|                       | E3 - Otros Recubrimientos | -3,655 | *0,000   | ↓-186 | 0,492  |
| NDWI (2009/ 2019)     | E1 – C.A. Permanente      | 2,249  | *0,025   | ↑194  | 0,249  |
|                       | E2 – C.A. No Permanente   | -0,384 | 0,701    | -34   | -0,044 |
|                       | E3 - Otros Recubrimientos | 2,249  | *0,025   | ↑194  | 0,249  |
| Parámetro             | Recubrimiento             | z      | p-value  | S     | tau    |
| NDVI (2009/ abr 2016) | E1 – C.A. Permanente      | -1,857 | 0,063    | -100  | -0,246 |
|                       | E2 – C.A. No Permanente   | 1,745  | 0,081    | 94    | 0,232  |
|                       | E3 - Otros Recubrimientos | 1,782  | 0,075    | 96    | 0,236  |
| NDVI (2009/ 2019)     | E1 – C.A. Permanente      | -2,977 | *0,003   | ↓-266 | -0,324 |
|                       | E2 – C.A. No Permanente   | 0,393  | 0,694    | 36    | 0,044  |
|                       | E3 - Otros Recubrimientos | 1,157  | 0,247    | 104   | 0,127  |

Donde: **Rango previo al proyecto:** 2009/ abr 2016; **Rango completo con operación del proyecto:** 2009/2019; \*: estadísticamente significativo; ↑: alza en tendencia; ↓: baja en tendencia. Elaboración propia

El análisis de las tendencias de NDWI y NDVI previo y posterior al proyecto, muestra una baja en la tendencia de los valores de NDWI (aumento de valores negativos de NDWI) en el estrato no permanente y otros recubrimientos, en el periodo previo a la operación del proyecto; y un aumento de valores posterior a la operación del proyecto (disminución de valores negativos de NDWI).

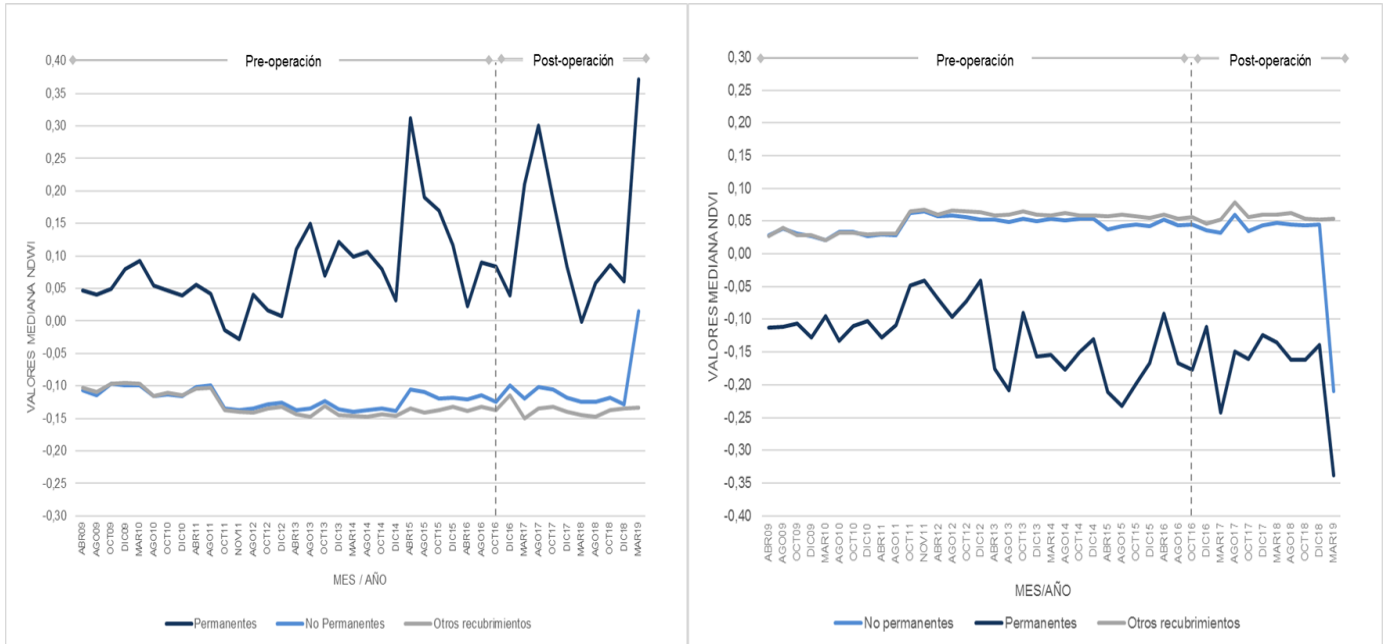
Por otro lado, se evidencia una tendencia a la baja (aumento de valores negativos de NDVI) en el estrato permanente, posterior a la operación del proyecto.

En el primer caso, la variación temporal del índice NDWI a la baja (aumento de valores negativos de NDWI), y en el caso del estrato otros recubrimientos, puede explicarse por zonas más definidas de suelos desnudos con baja tasa de humedad; que inciden de igual manera en estratos no permanentes. Sin embargo, existe un aumento de estos valores (aumento de valores positivos NDWI), que señala un aumento de zonas de alta humedad contenida posterior a la operación del proyecto.

Para el segundo caso, la baja en los de valores de NDVI para el estrato permanente, describen un aumento parcial de áreas con mayor humedad contenida, incluso presencia de masas de agua no descritas en el periodo previo al proyecto, lo que constituye variaciones en la distribución de los recubrimientos del sector.

En la **Figura N°3-11** se puede apreciar las tendencias de las medianas de los valores de NDWI y NDVI en la serie de tiempo 2009 - 2019, en ella es posible evaluar las tendencias descritas por la prueba Mann – Kendall y verificar la correspondencia gráfica a los resultados de la prueba.

**Figura N°3-11. Tendencias de medianas de los índices NDWI y NDVI, en serie de tiempo 2009/2019, sector Peine.**



Elaboración propia

Asumiendo estas tendencias por estratos, se establecerá mediante la prueba de *Kruskal – Wallis*, si son grupos con medianas distintas, y por lo tanto si existen diferencias estadísticamente significativas entre cada estrato. Esto permitirá establecer la existencia de grupos diferentes, por lo tanto, áreas bien definidas por el conjunto de datos que la describe, y con tendencias por índices particulares. La **Tabla N°3-7** muestra los resultados de la prueba y señala que cada estrato es definido por grupo de valores característico.

**Tabla N°3-7. Prueba *Kruskal – Wallis*: NDWI vs. NDWI por estrato, y NDVI vs. NDVI por estrato, sector Peine.**

| <i>Estadísticos descriptivos</i> |      |           |                         |         |
|----------------------------------|------|-----------|-------------------------|---------|
| NDWI / Estrato                   | N    | Mediana   | Clasificación de medias | Valor Z |
| E1 – C.A. Permanente             | 2960 | 0,079729  | 7389,7                  | -1,81   |
| E2 – C.A. No Permanente          | 3160 | -0,116877 | 4963,1                  | -47,02  |
| E3 – Otros Recubrimientos        | 3960 | -0,133123 | 3346,4                  | 52,26   |

| <i>Estadísticos descriptivos</i> |      |           |                         |         |
|----------------------------------|------|-----------|-------------------------|---------|
| NDVI / Estrato                   | N    | Mediana   | Clasificación de medias | Valor Z |
| E1 – C.A. Permanente             | 2542 | -0,132346 | 2315,5                  | -48,08  |
| E2 – C.A. No Permanente          | 2706 | 0,039191  | 4273,2                  | -0,82   |

| <i>Estadísticos descriptivos</i> |          |                |                                |                |
|----------------------------------|----------|----------------|--------------------------------|----------------|
| <b>NDVI / Estrato</b>            | <b>N</b> | <b>Mediana</b> | <b>Clasificación de medias</b> | <b>Valor Z</b> |
| E3 – Otros Recubrimientos        | 3362     | 0,055138       | 5836,1                         | 45,73          |

Prueba: Ho: Hipótesis nula: todas las medianas son iguales

H1: Hipótesis alterna: al menos una mediana es diferente ( $p < 0,05$ )

| NDWI - Método            | GL | Valor H | Valor p |
|--------------------------|----|---------|---------|
| No ajustado para empates | 2  | 3273,45 | 0,000   |
| Ajustado para empates    | 2  | 3273,45 | 0,000   |
| NDVI - Método            | GL | Valor H | Valor p |
| No ajustado para empates | 2  | 2904,45 | 0,000   |
| Ajustado para empates    | 2  | 2904,45 | 0,000   |

Elaboración propia

No es posible determinar a través de la prueba de correlación de *Pearson*, la correspondencia entre los índices espectrales (NDWI y NDVI) por estrato temático, debido a la variación muestral entre índices y estratos en este sector (cantidad de valores no coincidentes según definición de tamaño muestral).

### 3.2.3 Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI

Para especificar si existe relación entre las tendencias de los estratos permanente, no permanentes y otros recubrimientos, y las superficies de los cuerpos de agua; se realizó la prueba de correlación de *Pearson*, de las superficies resultantes de datos históricos, y seguimiento del PMB, versus el total de los cuerpos de agua (no permanentes + permanentes). La **Tabla N°3-8** muestra la correlación entre estos valores; el resultado muestra que existe un valor de significancia débil del valor NDVI y las superficies, pero que posibilita establecer correspondencia entre índices y superficies de los cuerpos de agua y contextualizar el comportamiento temporal de estos últimos.

**Tabla N°3-8. Correlación Pearson de índices NDWI/NDVI vs. superficies históricas y de seguimiento PMB.**

| <b>Valores correlación superficies vs. NDWI (permanente + no permanente)</b> |       |
|--|-------|
| <i>Pearson</i>   | 0,46  |
| <i>Valor-p</i>   | 0,21  |
| <b>Valores correlación superficies vs. NDVI (permanente + no permanente)</b> |       |
| <i>Pearson</i>   | -0,63 |
| <i>Valor-p</i>   | 0,07  |

Elaboración propia

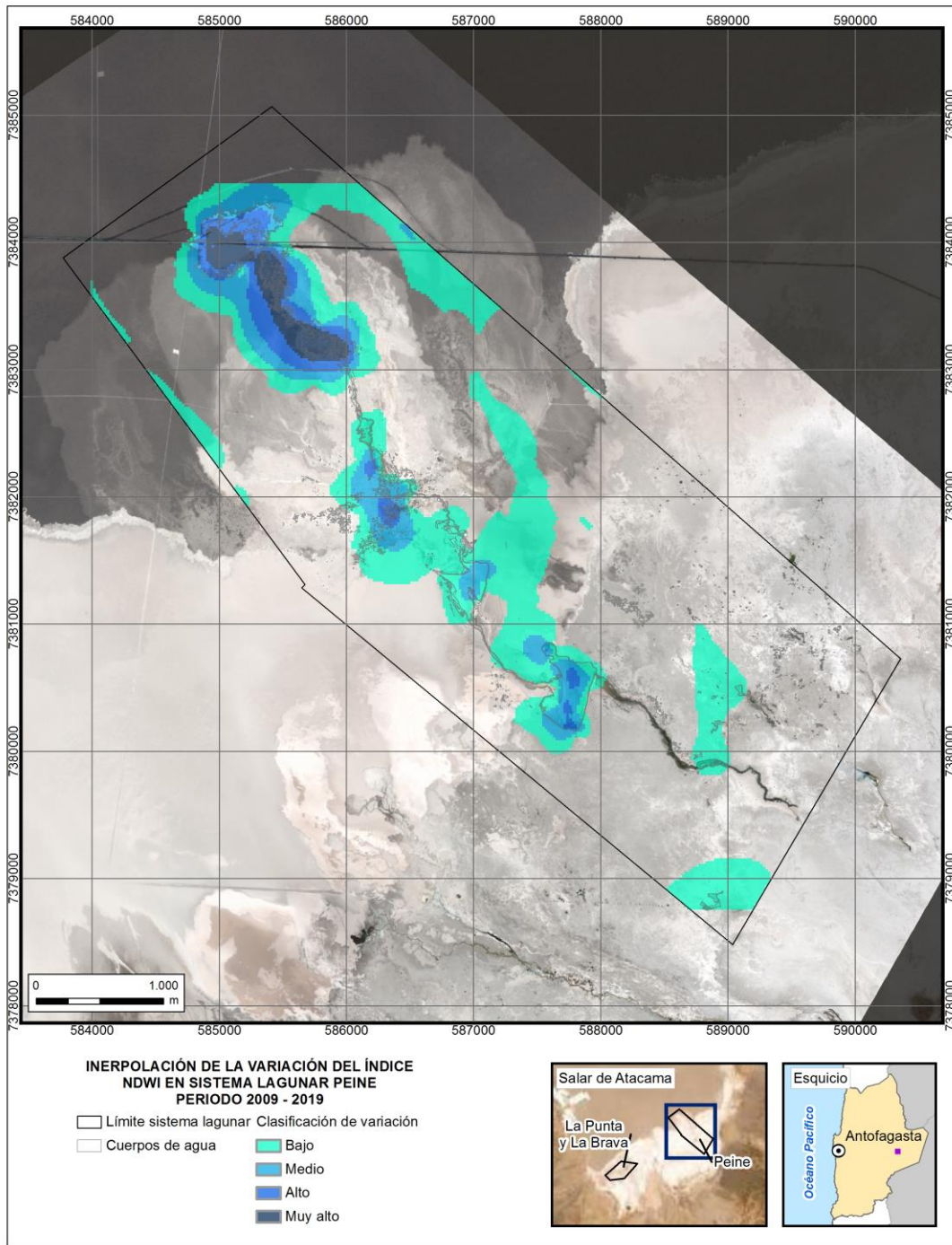
### 3.2.4 Análisis de variación espacial 2009 - 2019

Los resultados del método *Kriging*, en ambos índices, señala la existencia de zonas de alta variación asociadas al estrato permanente, variaciones alta y media a los estratos no permanentes y bajas a otros recubrimientos. En el primer caso, esta variación podría ser una medida de profundidad y/o aumento de sedimentación o turbiedad de las aguas. En el caso de los estratos no permanentes la variabilidad alta y media de sus valores, se produce por el aumento progresivo de



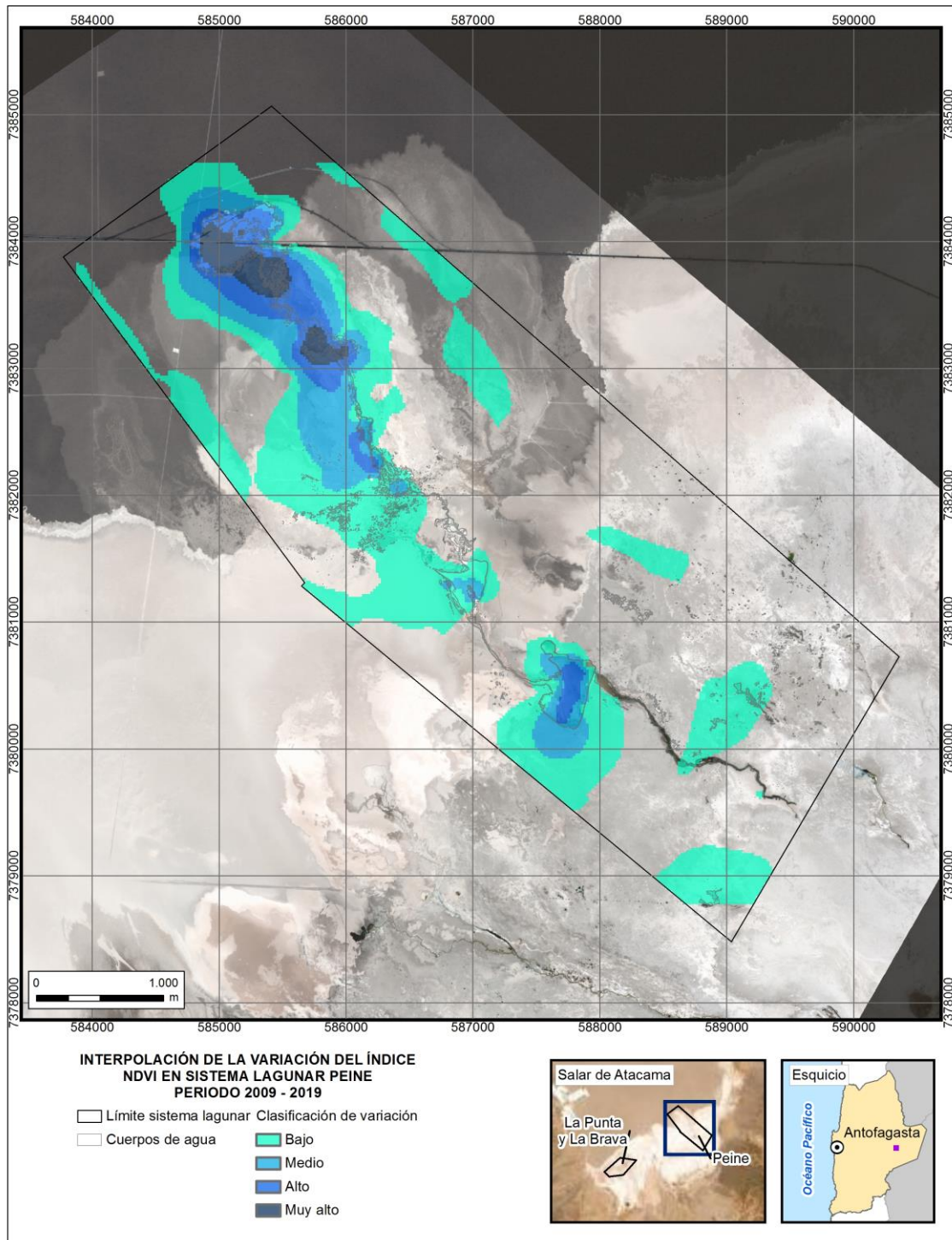
zonas de otros recubrimientos con superficies de agua (zona "la interna"). Finalmente, la baja o nula variabilidad corresponde al estrato más estable en valores de índices, ya que describe suelos desnudos cubiertos de sal estables. Los resultados en la **Figura N°3-12** y **Figura N°3-13**.

**Figura N°3-12. Interpolación de la variación de NDWI, sector Peine.**



Elaboración propia

**Figura N°3-13. Interpolación de la variación de NDVI, Peine.**



Elaboración propia



## 4 CONCLUSIONES

**De acuerdo al análisis de recurrencia** realizado, se puede señalar que, el comportamiento multitemporal de los cuerpos de agua durante el monitoreo en el sector de La Punta y La Brava se presenta como un incremento de las superficies “no permanentes” en invierno en comparación con las mismas en verano. En el sector de Peine, si bien se observa un comportamiento similar, la variación de las superficies “no permanentes” muestra una fuerte influencia en base a la dinámica de laguna Interna, cuyo comportamiento es diferente al resto del sistema, lo que determina también la diferencia del estrato no permanente entre el invierno y el verano. Se destaca que en ambos sectores las superficies “permanentes” sumadas a las “no permanentes” calculadas durante la etapa de monitoreo están por sobre el mínimo histórico.

**De acuerdo al análisis con los índices espectrales NDWI y NDVI**, realizado para un periodo pre operación (2009 – 2016) y post operación del proyecto (2009 – 2019), se indica que en ambos sectores los valores de NDWI y NDVI de los cuerpos de agua permanentes presentan una alta variación, con datos asimétricos (de valores positivos en NDWI y negativos en NDVI), sin presencia de valores atípicos; mientras que los valores de los estratos “no permanentes” y “otros recubrimientos” presentan una baja variabilidad, con mayor cantidad de valores atípicos en la serie de tiempo, y con un comportamiento similar entre ambos estratos.

El análisis de tendencias en el sector La Punta y La Brava de los NDWI y NDVI previo y posterior a la operación del proyecto, muestra una variación temporal del índice NDWI a la baja (aumento de valores negativos de NDWI), que en el caso del estrato “otros recubrimientos”, puede explicarse por suelos desnudos, vegetación escasa y zonas con humedad; situación sostenida previo y posterior al proyecto; en el caso del estrato “permanente” el aumento de los valores del índice NDWI podría estar definido por las variaciones en profundidad y aumento de sedimentación. El aumento de valores positivos de NDVI describe la presencia de suelos desnudos y vegetación escasa, como es el caso del estrato “otros recubrimientos”, y describen un aumento parcial de áreas con menor humedad contenida, como se evidencia con los resultados del estrato “no permanente”. Los valores del estrato “permanente”, previo al proyecto, no presentan una tendencia significativa en la serie.

El análisis de las tendencias del sector Peine, previo y posterior a la operación del proyecto, muestra la variación temporal del índice NDWI a la baja, es decir, un aumento de valores negativos de NDWI, y en el caso del estrato “otros recubrimientos” puede explicarse por zonas correspondientes a suelos desnudos con baja tasa de humedad, que se relacionan en términos de superficie con el estrato “no permanente”. Sin embargo, existe un aumento de estos valores positivos de NDWI, lo que señala un aumento de zonas con alta humedad contendida posterior a la operación del proyecto. La baja en los de valores de NDVI para el estrato “permanente”, describen un aumento parcial de áreas con mayor humedad contenida, incluso presencia de masas de agua no observadas en el periodo previo al proyecto durante la etapa de monitoreo, lo que sugiere variaciones en la distribución de los recubrimientos del sector.

**Las mayores variaciones espaciales en la serie de tiempo total (2009 – 2019) para el sector de La Punta y La Brava** desde el índice NDWI se presentan al interior de los estratos permanentes de los cuerpos lagunares, principalmente en las lagunas de La Punta y otros sectores de La Brava, esto se debe a que el NDWI muestra una muy buena correlación con valores de

profundidad y otras variables en cuerpos de agua más consolidados. Las áreas de bordes lagunares presentan variaciones que configuran un gradiente decreciente de variaciones desde el estrato “no permanente” hacia el estrato “otros recubrimientos”, Respecto del índice NDVI para este mismo sector, las mayores variaciones se presentan en las mismas áreas señaladas para el índice NDWI, salvo que las magnitudes y superficies de éstas son menores y el efecto de gradiente es mayor, lo que está relacionado a que el NDVI expresa una muy buena correlación con valores de profundidad y otras variables en cuerpos de agua.

**En cuanto a las mayores variaciones espaciales del NDWI para el sector de Peine**, estas se presentan al interior de los estratos permanentes de los cuerpos lagunares, principalmente en laguna Interna, que presenta una gran variación mostrando una dinámica similar a presencia/ausencia; y lagunas Salada y Saladita, esto se debe a que el NDWI muestra una buena correlación con valores de profundidad y otras variables en cuerpos de agua más consolidados. Sobre el índice NDVI para este mismo sector, las mayores variaciones se presentan en las mismas áreas señaladas para el índice NDWI, salvo que las magnitudes y superficies de éstas son menores y el efecto de gradiente es mayor, mostrando inclusiones de zonas húmedas dentro del gradiente, lo que está relacionado a que el NDVI expresa una muy buena correlación con valores de profundidad y otras variables en cuerpos de agua someros.

## 5 BIBLIOGRAFIA

Mann. H.B., Non-parametric tests against trend, *Econometrical*, 13, pp. 245–259, 1945.

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

Muñoz Marín, Carmen María, *et al.* Análisis de la variabilidad en series hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del Río Segura. 2008.

Shapiro, S. S.; Wilk, M. B. (1965). «An analysis of variance test for normality (complete samples) ». *Biometrika* 52 (3-4): 591-611. doi:10.1093/biomet/52.3-4.591. JSTOR 2333709 MR 205384.

William H. Kruskal and W. Allen Wallis. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47 (260): 583–621, 1952.

Pearson, K. 1896. Mathematical contributions to the theory of evolution, III. Regression, heredity and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 187:253-318.

Spearman, C. (1987). The proof and measurement of association between two things. *The American journal of psychology*, 100(3/4), 441-471.

Niño, L. (2008). Uso de la función semivariograma y estimación kriging en el análisis espacial de un indicador entomológico de *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Biomédica*, 28(4), 578-586.

---

Kennedy, R. E., Townsend, P. A., Gross, J. E., Cohen, W. B., Bolstad, P., Wang, Y. Q., & Adams, P. (2009). Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. *Remote sensing of environment*, 113(7), 1382-1396.

Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Lourenço, P., & Reyes, A. (2012). Guía para la incorporación de la teledetección al seguimiento de la Red de Parques Nacionales. Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

Li, L., Vrieling, A., Skidmore, A., Wang, T., Muñoz, A. R., & Turak, E. (2015). Evaluation of MODIS spectral indices for monitoring hydrological dynamics of a small, seasonally - flooded wetland in southern Spain. *Wetlands*, 35(5), 851-864.