



## **INFORME ANUAL N°9**

### **Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH)**

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

##### **Superficie Cubierta por Lagunas** **Invierno – Verano 2024**



**Región de Antofagasta**

**Marzo de 2024**

## ÍNDICE

|          |                                                                                                |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>RESUMEN.....</b>                                                                            | <b>8</b>  |
| <b>2</b> | <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                                                      | <b>11</b> |
| <b>3</b> | <b>OBJETIVOS .....</b>                                                                         | <b>14</b> |
| <b>4</b> | <b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>                                                               | <b>15</b> |
| 4.1      | Descripción del área de estudio.....                                                           | 15        |
| 4.2      | Parámetros utilizados para caracterizar el estado y seguimiento de los cuerpos de agua .....   | 17        |
| 4.3      | Ubicación de los puntos de muestreo para validación de cuerpos de agua .....                   | 17        |
| 4.4      | Materiales y equipos utilizados .....                                                          | 19        |
| 4.5      | Metodología de muestreo y/o medición.....                                                      | 22        |
| 4.6      | Metodología de análisis de las imágenes satelitales para delimitación de cuerpos de agua ..... | 23        |
| 4.6.1    | Imágenes de alta resolución – Pleiades 1-A.....                                                | 23        |
| 4.6.2    | Imagen de resolución media – LANDSAT 8 .....                                                   | 26        |
| 4.6.3    | Procesamiento de las imágenes satelitales .....                                                | 27        |
| 4.6.4    | Descripción del modelo de clasificación supervisada de cuerpos de agua .....                   | 28        |
| 4.6.5    | Parámetros espectrales del modelo de clasificación.....                                        | 29        |
| 4.6.6    | Umrales y validación del modelo de clasificación .....                                         | 31        |
| 4.6.7    | Depuración cartográfica de cuerpos de agua .....                                               | 34        |
| 4.7      | Análisis comparativo para seguimiento de la cobertura de cuerpos de agua .....                 | 35        |
| 4.8      | Fechas de medición .....                                                                       | 35        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                                                                        | <b>36</b> |
| 5.1      | Validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua .....                | 36        |
| 5.2      | Resultados Superficies de cuerpos de agua por sistema lagunar.....                             | 42        |
| 5.2.1    | La Punta - La Brava.....                                                                       | 44        |
| 5.2.2    | Peine.....                                                                                     | 51        |
| 5.2.3    | Aguas de Quelana .....                                                                         | 58        |
| 5.2.4    | Soncor.....                                                                                    | 65        |
| 5.3      | Límites considerados en el seguimiento de los cuerpos de agua .....                            | 72        |
| <b>6</b> | <b>DISCUSION.....</b>                                                                          | <b>72</b> |
| 6.1      | Análisis de la validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua ..... | 72        |
| 6.2      | Análisis de comparación con registros históricos .....                                         | 75        |

|          |                                                                                                                                        |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2.1    | Sistema Lagunas La Punta - La Brava .....                                                                                              | 78         |
| 6.2.2    | Sistema Lagunas Peine .....                                                                                                            | 86         |
| 6.2.3    | Sistema Aguas de Quelana.....                                                                                                          | 94         |
| 6.2.4    | Sistema Soncor .....                                                                                                                   | 100        |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSIONES .....</b>                                                                                                              | <b>106</b> |
| <b>8</b> | <b>REFERENCIAS .....</b>                                                                                                               | <b>110</b> |
| <b>9</b> | <b>ANEXOS.....</b>                                                                                                                     | <b>115</b> |
|          | ANEXO 9-1. Distribución de puntos de validación para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, invierno 2024.....               | 115        |
|          | ANEXO 9-2. Distribución de puntos de validación para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, verano 2024-2025. ....           | 116        |
|          | ANEXO 9-3. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector sur, invierno 2024. ....     | 117        |
|          | ANEXO 9-4. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, verano 2024-2025..... | 118        |
|          | ANEXO 9-5. Coordenadas de puntos de validación en terreno .....                                                                        | 119        |
|          | ANEXO 9-6. Cuadro comparativo de diferencias implementadas en el estudio actual respecto a Adenda 5 RWL (2015).....                    | 119        |
|          | ANEXO 9-7. Metadata de Imágenes de alta resolución – Pleiades 1-A.....                                                                 | 120        |
|          | ANEXO 9-8. Metadata de Imágenes de media resolución – Landsat .....                                                                    | 120        |
|          | ANEXO 9-9. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Landsat 8, invierno 2024. ....                 | 121        |
|          | ANEXO 9-10. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2024.....              | 122        |
|          | ANEXO 9-11. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Landsat 8, invierno 2024.....                               | 123        |
|          | ANEXO 9-12. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2024.....                            | 124        |
|          | ANEXO 9-13. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Landsat 8, invierno 2024. ....                   | 125        |
|          | ANEXO 9-14. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2024.....                 | 126        |
|          | ANEXO 9-15. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Landsat 8, invierno 2024.....                              | 127        |
|          | ANEXO 9-16. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2024.....                           | 128        |
|          | ANEXO 9-17. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Landsat 8, verano 2024-2025. ....             | 129        |

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ANEXO 9-18. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Pleiades 1-A, verano 2024-2025..... | 130 |
| ANEXO 9-19. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Landsat 8, verano 2024-2025. ....                 | 131 |
| ANEXO 9-20. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Pleiades 1-A, verano 2024-2025. ....              | 132 |
| ANEXO 9-21. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Landsat 8, verano 2024-2025. ....      | 133 |
| ANEXO 9-22. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A, verano 2024-2025.....    | 134 |
| ANEXO 9-23. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Landsat 8, verano 2024-2025. ....                | 135 |
| ANEXO 9-24. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Pleiades 1-A, verano 2024-2025. ....             | 136 |
| ANEXO 9-25. Imágenes Landsat 2016 – 2024 – Análisis NDWI. ....                                                               | 137 |
| ANEXO 9-26. Cartas de notificación de restricciones de acceso.....                                                           | 143 |

## FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura N°4-1. Ubicación sistemas lagunares que conforman el área de estudio para monitoreo y seguimiento de la cobertura de cuerpos de agua por parte del Proyecto en el Salar de Atacama. ....                  | 16 |
| Figura N° 4-2. Imagen UVA/dron usado para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama, sector La Punta y La Brava, invierno 2024. ....                        | 20 |
| Figura N° 4-3. Imagen UVA/dron usado para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama, sector Peine, invierno 2024. ....                                      | 21 |
| Figura N°4-4. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades 1-A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama, invierno 2024. ....   | 24 |
| Figura N°4-5. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades 1-A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama verano 2024-2025. .... | 25 |
| Figura N°4-6. Imagen Landsat 8 correspondiente al cuadrante que incluye el área de estudio en invierno 2024 (izquierda – RGB) y verano 2024-2025 (derecha - RGB). ....                                           | 26 |
| Figura N°4-7. Modelo conceptual de árbol de decisiones usado para la clasificación supervisada de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales.....                                                          | 28 |
| Figura N°4-8. Diagrama del proceso de transformación y depuración de imágenes formato de cobertura continua ( <i>raster</i> ) a polígonos ( <i>shape</i> ). ....                                                 | 34 |
| Figura N°5-1. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar La Punta - La Brava. ....                                                                                                | 44 |
| Figura N°5-2. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar La Punta - La Brava, agosto – diciembre 2024. ....                        | 46 |

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura N°5-3. Registros de superficies lagunares de seguimiento (inviernos 2016 a 2024), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1-A.....                             | 47 |
| Figura N°5-4. Registros de superficies lagunares de seguimiento (inviernos 2016 a 2024), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Landsat 8. ....                               | 48 |
| Figura N°5-5. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1-A.....                     | 49 |
| Figura N°5-6. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Landsat 8. ....                       | 50 |
| Figura N°5-7. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar Peine. ....                                                                                     | 51 |
| Figura N°5-8. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Peine, agosto – diciembre 2024. ....             | 53 |
| Figura N°5-9. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1-A. ....                                   | 54 |
| Figura N°5-10. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8. ....                                     | 55 |
| Figura N°5-11. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1-A.....                                  | 56 |
| Figura N°5-12. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8. ....                                    | 57 |
| Figura N°5-13. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua sistema lagunar Aguas de Quelana.....                                                                           | 58 |
| Figura N°5-14. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Aguas de Quelana, agosto – diciembre 2024. .... | 60 |
| Figura N°5-15. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Aguas de Quelana, a partir de Pleiades 1-A.....                                 | 61 |
| Figura N°5-16. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Aguas de Quelana, de imágenes Landsat 8. ....                                   | 62 |
| Figura N°5-17. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A.....                                          | 63 |
| Figura N°5-18. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector Aguas de Quelana, Landsat 8.....                                               | 64 |
| Figura N°5-19. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar Soncor. ....                                                                                   | 65 |
| Figura N°5-20. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Soncor, agosto – diciembre 2024.....            | 67 |
| Figura N°5-21. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1-A. ....                                 | 68 |
| Figura N°5-22. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8. ....                                    | 69 |
| Figura N°5-23. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1-A. ....                                | 70 |
| Figura N°5-24. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8. ....                                   | 71 |

|                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura N°6-1. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector La Punta - La Brava. ....                                    | 79  |
| Figura N°6-2. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector La Punta - La Brava. .... | 80  |
| Figura N°6-3. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector La Punta - La Brava. ....                                     | 82  |
| Figura N°6-4. Variación histórica Sistema Lagunar La Punta-La Brava, Landsat NDWI (1985-2024)..                                                                          | 84  |
| Figura N°6-5. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar La Punta - La Brava.....                                 | 85  |
| Figura N°6-6. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Peine. ....                                                  | 87  |
| Figura N°6-7. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Peine. ....               | 88  |
| Figura N°6-8. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Peine. ....                                                   | 90  |
| Figura N°6-9. Variación histórica Sistema Lagunar Peine, Landsat NDWI (1985-2024).....                                                                                   | 92  |
| Figura N°6-10. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Peine.....                                              | 93  |
| Figura N°6-11. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Aguas de Quelana. ....                                      | 95  |
| Figura N°6-12. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Aguas de Quelana. ....   | 96  |
| Figura N°6-13. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Aguas de Quelana. ....                                       | 98  |
| Figura N°6-14. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Aguas de Quelana.....                                   | 99  |
| Figura N°6-15. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor. ....                                                | 101 |
| Figura N°6-16. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Soncor. ....             | 102 |
| Figura N°6-17. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor. ....                                                 | 104 |
| Figura N°6-18. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Soncor. ....                                            | 105 |

## TABLAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla N°2-1. Resumen de Componentes y Variables .....                                                                                                                                                                                                                               | 12  |
| Tabla N°2-2. Identificación de instituciones y/o equipos de trabajo encargados de realizar el muestreo, medición, análisis y/o control.....                                                                                                                                         | 12  |
| Tabla N°4-1. Número de puntos de monitoreo catastrados en la campaña de invierno 2024, para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama. ....               | 18  |
| Tabla N°4-2. Número de puntos de muestreo catastrados en la campaña de verano 2024-2025 (diciembre), para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama. .... | 19  |
| Tabla N°4-3. Características técnicas del sensor Pleiades 1-A. ....                                                                                                                                                                                                                 | 23  |
| Tabla N°4-4. Características técnicas de las bandas espectrales de la imagen Landsat 8 .....                                                                                                                                                                                        | 26  |
| Tabla N°4-5. Valores de los umbrales de clasificación de los parámetros espectrales usados, según Pleiades 1-A y Landsat 8, para la delimitación de cuerpos de agua en los sistemas lagunares del Salar de Atacama, agosto y diciembre de 2024. ....                                | 32  |
| Tabla N°5-1. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1-A: Matriz de confusión y el índice <i>Kappa</i> por sistema lagunar. Agosto, 2024.....                                                                             | 38  |
| Tabla N°5-2. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Landsat 8: Matriz de confusión y el índice <i>Kappa</i> por sistema lagunar. Agosto, 2024. ....                                                                               | 39  |
| Tabla N°5-3. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1-A: Matriz de confusión y el índice <i>Kappa</i> por sistema lagunar. Diciembre de 2024. ....                                                                       | 40  |
| Tabla N°5-4. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Landsat 8: Matriz de confusión y el índice <i>Kappa</i> por sistema lagunar. Diciembre de 2024.....                                                                           | 41  |
| Tabla N°5-5. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y datos obtenidos en el monitoreo 2024 (invierno y verano), respecto de los registros históricos (Adenda 5 RWL, 2015).....                                       | 42  |
| Tabla N°5-6. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales Landsat 8 y datos obtenidos en el monitoreo 2024 (invierno y verano), respecto de los registros de la Adenda 5 RWL (2015).....                                                | 43  |
| Tabla N°6-1. Consolidado de índices <i>Kappa</i> de validación del modelo de clasificación para imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8. ....                                                                                                                                             | 73  |
| Tabla N°7-1. Superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales (alta y media resolución) y datos obtenidos en el monitoreo 2024 (invierno y verano), respecto de los registros de históricos (Adenda 5 RWL, 2015).....                                      | 106 |

## 1 RESUMEN

Este análisis se desarrolla en cumplimiento a los compromisos ambientales y procedimientos asumidos en el marco del Plan de Seguimiento Ambiental y Plan de Alerta Temprana de los Recursos Hídricos (PSAH), en adelante Plan de Seguimiento Hídrico o PSAH, 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) (ALB), para el monitoreo de “Superficie Cubierta por Lagunas”.

El propósito es realizar el seguimiento de la cobertura de los cuerpos de agua, a través de imágenes satelitales, en cuatro sistemas lagunares del Salar de Atacama que conforman el área de estudio: (1) La Punta - La Brava, (2) Peine, (3) Aguas de Quelana y (4) Soncor. Para tal fin, se utilizan imágenes de alta resolución del sensor Pleiades 1-A y de mediana resolución de acceso público del sensor Landsat 8, obtenidas en invierno y verano de 2024.

Las etapas metodológicas empleadas durante la campaña y análisis correspondieron a:

- i) Trabajo en terreno/fotointerpretación para revalidación estacional de puntos de monitoreo registrados en las campañas 2024 y anteriores, clasificando el recubrimiento de suelo en dichos puntos como *“cuerpos de agua”* u *“otros recubrimientos”*;
- ii) Obtención y procesamiento de las imágenes satelitales en forma paralela a las campañas de terreno;
- iii) Desarrollo y validación del modelo de clasificación supervisada, para determinar umbrales de clasificación de los parámetros espectrales NDWI, NDVI, NIR, Transformada *Tasseled Cap* *“Wetness”* y Algebra de bandas espectrales en alta resolución; seguido por una depuración cartográfica, obteniendo de esta forma las coberturas de lagunas por sector.

Durante la campaña de invierno de 2024 no fue posible realizar en su totalidad la validación *in situ* programada, ya que se presentaron por parte de la Comunidad de Peine medidas de restricción de movilidad que no permitieron el traslado y acceso al sector de lagunas de Peine (Salada y Saladita). En cuanto a la campaña de verano de 2024-2025 (diciembre), estas restricciones limitaron el acceso a los sectores de las lagunas de Peine (Interna, Salada y Saladita); asimismo, en el sector Soncor, la validación se vio restringida por disposiciones de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) debido al período de nidificación de flamencos. En ninguno de los sectores, durante el verano 2024-2025, se realiza levantamiento aerofotogramétrico debido a la falta de permisos pertinentes. En ambas temporadas se recurre a la fotointerpretación – validación en gabinete utilizando imágenes de alta resolución.

**Los valores de ajuste se obtuvieron mediante el índice *Kappa*<sup>1</sup>**, este índice tuvo una variación entre 0,99 y 0,46 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y desde 0,98 y 0,41 para imágenes de

<sup>1</sup> El Índice *Kappa* corresponde a una medida estadística que ajusta el efecto del azar en la proporción de la concordancia observada para elementos cualitativos (variables categóricas). Valores cercanos a 1,00 indican una mayor concordancia inter-observador. Los rangos de valores son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

resolución media Landsat 8 en agosto de 2024. Respecto de diciembre de 2024, este índice tuvo una variación entre 0,95 y 0,41 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y desde 0,93 a 0,37 para imágenes de resolución media Landsat 8. Todos los valores antes indicados muestran una alta precisión del modelo de clasificación supervisada aplicado, que según el índice *Kappa* muestra un nivel de concordancia *moderado a casi perfecta*<sup>2</sup>.

**Las superficies lagunares estimadas en el año 2024, desde imágenes de alta resolución**, en invierno de 2024 correspondieron a: (1) 40,7 ha en La Punta - La Brava, (2) 31,4 ha en Peine, (3) 70,9 ha en Aguas de Quelana, y (4) 155,5 ha Soncor. Para la condición de verano 2024 las superficies obtenidas son: (1) 24,4 ha en La Punta - La Brava, (2) 27,5 ha en Peine, (3) 3,0 ha en Aguas de Quelana y (4) 125,8 ha Soncor.

**Las superficies lagunares estimadas en el 2024, desde imágenes de media resolución**, en invierno de 2024 correspondieron a: (1) 40,0 ha en La Punta - La Brava, (2) 42,4 ha en Peine, (3) 59,8 ha en Aguas de Quelana, y (4) 154,0 ha Soncor; y para verano de 2024 las superficies son: (1) 34,0 ha en La Punta - La Brava, (2) 22,8 ha en Peine, (3) 6,2 ha en Aguas de Quelana y (4) 141,2 ha Soncor.

**En relación con el análisis comparativo entre las imágenes satelitales**, La correlación entre las superficies calculadas a partir de imágenes de alta resolución (Pleiades 1-A) y de media resolución (Landsat), evaluada mediante el coeficiente de correlación de Pearson, revela una relación positiva en todos los sectores. Los valores de *p* indican que hay evidencia estadística significativa de la asociación entre las superficies asociadas a Pleiades y Landsat. Este análisis indica que en la mayoría de los sectores existe una conexión entre los resultados obtenidos de imágenes de alta resolución y media resolución. Las principales disparidades se atribuyen a la resolución espacial de las imágenes de media resolución. Estas generan modelos con bordes menos definidos en comparación con los modelos de alta resolución, que presentan una mayor nitidez en los contornos de los recubrimientos debido a la mejora del contraste y la respuesta espectral. A pesar de las diferencias en la magnitud de los valores, se observa una relación directa, es decir, valores altos en una variable se corresponden con valores altos en la otra, y viceversa para valores bajos.

**En relación con la evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie semestral PSAH), superficies históricas serie Adenda 5 RWL (1972 – 2014) y serie complementaria 2016 – 2024**, se tiene que las superficies calculadas con imágenes de media resolución Landsat (de frecuencia semestral) durante el monitoreo 2016 a 2024, como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI, en todos los sectores de estudio, tanto en las superficies de invierno y verano. En todos los sectores de estudio se observa que la máxima extensión de la superficie de los cuerpos de agua se presenta en los meses de invierno, con registros más bajos en verano. Las variaciones entre las superficies de inviernos y veranos son variables, siendo en el sector de Aguas de Quelana donde se registran las mayores diferencias entre periodos, las que pueden alcanzar una reducción de un 98%. En general, se observa una tendencia al descenso de las superficies lagunares, tanto para la condición de invierno como de verano, siendo más marcada la de invierno.

<sup>2</sup> Valores cercanos a 1,00 indican una mayor concordancia inter-observador. Los rangos de valores son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

Las principales diferencias entre la serie histórica NDWI - Landsat y los resultados obtenidos en los informes semestrales, con imágenes de media resolución en el contexto del PSAH se atribuyen a diversos factores. Entre ellos, destaca el fortalecimiento de la metodología de procesamiento de imágenes, la incorporación de otros índices espectrales para abordar zonas con combinación de recubrimientos, como la intersección entre vegetación y agua. Además, la validación en terreno y el análisis visual desempeñan un papel importante al contribuir a la depuración precisa de los límites de los cuerpos de agua y a la calibración efectiva del modelo de clasificación, basándose en las observaciones de campo.

En particular, la validación en terreno implementada en el marco del PSAH ha permitido, por ejemplo, mejorar la delimitación en el subsector Laguna Interna, un proceso que no fue considerado en la metodología NDWI-Landsat histórica, lo que podría implicar, en este caso específico, una subestimación del área total en comparación con la metodología del PSAH. En el caso de Aguas de Quelana, la metodología aplicada en el PSAH posibilita la inclusión de áreas de vegetación inundada en la superficie total de ocupación de las lagunas, identificadas mediante índices como el NDVI y la banda NIR. Esto explica la detección de áreas de transición que no son captadas en su totalidad por la metodología NDWI-Landsat, generando discrepancias en las superficies entre ambos métodos.

***En relación con la variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución,*** se observan cambios importantes en las superficies lagunares, especialmente durante los meses de verano, donde hasta diciembre de 2019 las superficies superaron los valores históricos, pero a partir de 2020, se han situado por debajo.

Las superficies semestrales obtenidas en el PSAH en Aguas de Quelana superan el mínimo histórico en invierno pero quedan por debajo en verano. Desde diciembre 2020, los valores de superficie lagunar alta resolución han estado por debajo de los valores de alta resolución tomados de referencia. En Soncor, desde diciembre 2019 las superficies de verano y de invierno presentan tendencia a la baja. Para este último año, diciembre 2024 estuvo un poco superior a la superficie alta resolución de diciembre 2023.

En general, la variabilidad estacional de las lagunas se ve influida por múltiples factores, y la relación entre precipitaciones y superficies es puntual con respuesta inmediata, para posterior a ello, volver a su variación anterior, más marcada en algunos sistemas que en otros. La evapotranspiración es un factor importante que controla la dinámica de estos sistemas lagunares.

## 2 INTRODUCCIÓN

El Salar de Atacama, se encuentra ubicado en una cuenca endorreica tectónica, delimitada por la Cordillera de Los Andes (6.000 m s.n.m) al este, y por la Cordillera de Domeyko (3.000 m s.n.m) al oeste (Ortiz, C. *et al*, 2014). Además, presenta la característica que la dinámica natural de humedales está controlada fundamentalmente por el aporte de agua subterránea y condiciones climáticas regionales, esto los hace particularmente frágiles (MMA, 2011).

Este informe se desarrolla en cumplimiento a los compromisos ambientales y procedimientos asumidos en marco del **Plan de Seguimiento Ambiental y Plan de Alerta Temprana de los Recursos Hídricos (PSAH)**, en adelante Plan de Seguimiento Hídrico o PSAH, correspondiente 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 (ALB), para el componente físico hidrología, monitoreo de “Superficie cubierta por lagunas”.

El propósito es realizar el seguimiento para determinar la cobertura de los cuerpos de agua, a través de imágenes satelitales, en cuatro sistemas lagunares del Salar de Atacama que conforman el área de estudio: (1) La Punta y La Brava, (2) Peine, (3) Aguas de Quelana y (4) Soncor. Para tal fin, se utilizan imágenes satelitales multiespectrales con un píxel máximo de 4 metros, es decir de alta resolución, utilizando el sensor Pleiades 1-A (2 m) y de mediana resolución de acceso público del sensor Landsat 8 (30 m), obtenidas en **agosto y diciembre de 2024**.

Este informe corresponde al monitoreo y seguimiento ambiental de las “Superficies Cubierta por Lagunas”, mediciones de invierno y verano de 2024, durante la Fase de Operación, período establecido, en Anexo 3 - Adenda 5 RWL (2015), numeral 3.2.6 Superficie cubierta por lagunas, Tabla 3-1 Variables de monitoreo del PSAH.

El parámetro ambiental asociado a este monitoreo, corresponde a la superficie cubierta por lagunas, en metros cuadrados ( $m^2$ ), proveniente de la medición de las áreas de los cuerpos de aguas de los sistemas lagunares mencionados, realizado a través del análisis de imágenes satelitales de alta resolución, según el “Índice Normalizado de diferencias de agua (NDWI)<sup>3</sup>”, especificado en el Anexo 2, Adenda 5 EIA, *Apéndice B. Determinación espacio temporal de la vegetación azonal y cuerpos de agua*; RWL, 2015 (en adelante, Adenda 5 RWL, 2015). En la **Tabla N°2-1** se presenta un resumen del componente y la variable ambiental objeto de monitoreo, asociada al análisis de imágenes satelitales.

---

<sup>3</sup> El índice modificado MNDWI es adecuado para realzar el agua en contraste con terrenos construidos y puede revelar mayores detalles en aguas abiertas (Xu, 2006). En este contexto, el NDWI es más eficiente en contraste con suelos desnudos con costra salina y aguas más someras.

**Tabla N°2-1. Resumen de Componentes y Variables**

| Componente Ambiental         | Monitoreo                              | Variable o Parámetro                | Metodología                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>FÍSICO<br/>Hidrología</b> | <b>Superficie cubierta por lagunas</b> | Superficie o Área (m <sup>2</sup> ) | <p><b>3.2.6 Superficie Cubierta por Lagunas</b>, pág. 22. Adenda 5 RWL (2015).</p> <p>Análisis de imágenes satelitales de alta resolución, multiespectrales con un píxel máx. de 4 metros, <b>que incluirán los cuatro sistemas lagunares</b>. Metodología Índice Normalizado de diferencias de agua (NDWI). <b>Anexo 3 PSAH</b>.</p> <p>Además, con el objetivo de generar una correlación de estas imágenes de alta resolución con la serie histórica disponible de imágenes satelitales LANDSAT, de menor resolución, se realizará en forma simultánea un análisis y correlación con una imagen de baja resolución disponible del satélite LANDSAT8 o similar, de la fecha más próxima a las de las imágenes de alta definición.</p> |

Fuente: Elaboración propia en base a lo especificado en el Anexo 2, Adenda 5 RWL EIA, Apéndice B. Determinación espacio temporal de la vegetación azonal y cuerpos de agua; RWL, 2015.

Para el logro del objetivo propuesto se implementó un muestreo para revalidación estacional *in situ* (dependiendo de las restricciones de acceso) y fotointerpretativo, correspondiente a las réplicas de puntos de campañas anteriores. Posteriormente se desarrolló la etapa en gabinete relacionada con el procesamiento de las imágenes satelitales, seguido por la implementación de un modelo de clasificación supervisada de los cuerpos agua, en base al “Índice Normalizado de Diferencia de Agua” (NDWI, por sus siglas en inglés). Los responsables de las actividades de muestreo y medición en terreno, así como los análisis en gabinete se identifican en **Tabla N°2-2**.

**Tabla N°2-2. Identificación de instituciones y/o equipos de trabajo encargados de realizar el muestreo, medición, análisis y/o control.**

| Empresa / Equipo de Trabajo | Actividades realizadas                                                                                                                                                                                            | Encargado                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cedrem Consultores          | <u>Medición:</u> Revalidación estacional de puntos en terreno y levantamiento de puntos de posicionamiento en tiempo real de alta precisión; Revalidación estacional de puntos en terreno por fotointerpretación. | <u>Especialista:</u><br>Jessica Labarca (Fotointerpretación)<br>Tomás Lizama (Especialista en Terreno; UVA/Dron - GNSS)<br>Zvonimir Marjanovic (Apoyo en terreno)<br>Pedro Pablo Barahona (Jefe de Terreno)<br>Osvaldo Jiménez (Apoyo en Terreno) |
|                             | <u>Trabajo en gabinete:</u> Aplicación del modelo de clasificación supervisada y análisis de resultados.                                                                                                          | <u>Jefe de Proyecto:</u><br>Jorge Ramos<br><u>Especialistas en gabinete:</u><br>Jessica Labarca<br>Tomás Lizama                                                                                                                                   |

| Empresa / Equipo de Trabajo | Actividades realizadas                                                                             | Encargado                        |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Apogeos                     | <u>Trabajo en gabinete:</u> Correcciones y adquisición de imágenes satelitales de alta resolución. | Lorena Bustamante (Especialista) |

Fuente: Cedrem Consultores

El presente informe describe los alcances metodológicos, resultados y discusión del estudio, partiendo con el modelo de clasificación supervisada de los cuerpos de agua, el cual fue implementado en base a imágenes de alta resolución, Pleiades 1-A, y de media resolución, Landsat 8, obtenidas durante agosto y diciembre de 2024. Posteriormente, se presentan de manera detallada los resultados obtenidos en cuanto a la cobertura de los cuerpos de agua, clasificada por sistema lagunar, utilizando imágenes de alta resolución. Estos resultados se comparan con los registros históricos de la Adenda 5 RWL (2015) y con la superficie determinada a partir de las imágenes de Landsat 8. El objetivo de esta comparación es realizar un análisis detallado entre los monitoreos realizados durante el invierno y verano de 2024, contrastándolos con los resultados obtenidos desde el inicio del monitoreo en el año 2016, así como con los datos históricos presentados en la Adenda 5 RWL (2015).

En relación con la campaña de invierno de 2024, esta se llevó a cabo entre el 4 y el 10 de agosto de dicho año. Durante esta campaña no fue posible llevar a cabo la validación *in situ* debido a las medidas de restricción de movilidad aplicadas por la Comunidad de Peine; estas medidas limitaron el traslado y acceso a los sectores de Peine (Salada y Saladita, solo con acceso a laguna Interna). En cuanto a la campaña de verano de 2024-2025, la validación *in situ* programada entre el 15 y el 21 de diciembre no pudo llevarse cabo en los sectores de Peine y Soncor. Las medidas de restricción de movilidad implementadas por la comunidad impidieron el traslado y acceso a las lagunas Interna, Salada y Saladita; además, en el sector Soncor, las autoridades restringieron el acceso en el área de la Reserva Nacional Los Flamencos debido a la anidación de flamencos (ANEXO 9-26. Cartas de notificación de restricciones de acceso). En ambas campañas las posibilidades de revalidación de los puntos de muestreo en los sectores restringidos, fue realizada mediante fotointerpretación en gabinete con imagen de alta resolución.

### 3 OBJETIVOS

El objetivo general es monitorear la cobertura (superficie) de las lagunas (cuerpos de agua), con el fin de hacer el seguimiento a la evolución de estas y detectar cambios en su superficie de ocupación.

Como se ha señalado previamente, la medición se lleva a cabo mediante el análisis de imágenes satelitales de alta resolución y de mediana resolución. Estas mediciones se comparan con los datos históricos de la Adenda 5 RWL (2015) en los cuatro sistemas lagunares ubicados en el Salar de Atacama. Cabe destacar que este análisis se realiza en concordancia con los alcances y procedimientos comprometidos en el PSAH, sirviendo como base para la evaluación.

En función de esto, se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- Definir la cobertura de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales de alta resolución, en base a datos de validación (*in situ* o fotointerpretativas<sup>4</sup>) y al “Índice Normalizado de Diferencia de Agua” (NDWI por su sigla en inglés), en cuatro sistemas lagunares del Salar de Atacama (La Punta - La Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor).
- Comparar las coberturas de los sistemas lagunares, obtenidas a partir de los registros históricos determinados en la Adenda 5 RWL(2015), y establecidos por el PSAH, con las superficies obtenidas de imágenes satelitales de alta resolución durante el monitoreo de la fase de operación del proyecto.
- Determinar las coberturas de cuerpos de agua desde una imagen satelital de mediana resolución disponible, Landsat 8, para la fase de operación y comparar éstas con los registros de las coberturas obtenidas en los registros históricos en cada sistema lagunar.
- Comparar y correlacionar<sup>5</sup> las coberturas de los sistemas lagunares definidas para la fase de construcción con las coberturas de los sistemas lagunares definidas para la fase de operación, obtenidas desde imágenes satelitales de alta resolución y Landsat 8<sup>6</sup>.

---

<sup>4</sup> Según condiciones de acceso a los subsectores de estudio, que incluyen permisos y condiciones de seguridad.

<sup>5</sup> Medida de la fuerza y la dirección de la asociación entre las variables superficies Landsat y las superficies de alta resolución, llevada a cabo con el coeficiente de correlación de Pearson. 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. Para la correlación de Pearson, un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

<sup>6</sup> De acuerdo con lo establecido por el PSAH, este análisis se realiza con el fin de establecer correlaciones multitemporales 1:1 con los registros de alta resolución.

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Descripción del área de estudio

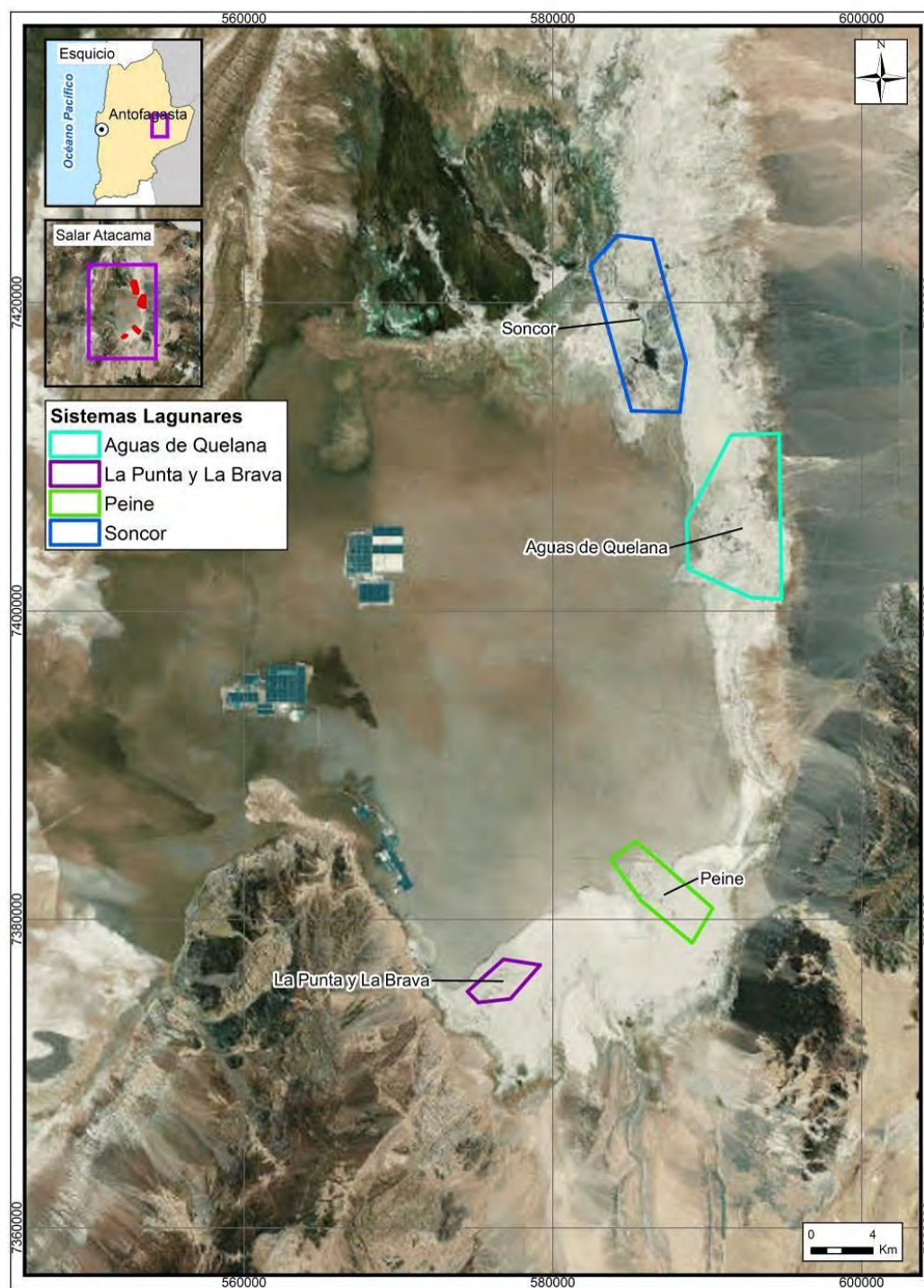
El área de estudio se sitúa en el Salar de Atacama, en la comuna de San Pedro de Atacama, Provincia de El Loa, extremo oriente de la II Región de Antofagasta y se encuentra a una altura geográfica aproximada de 2.300 m s.n.m

El área de estudio corresponde a los Sistemas Lagunares establecidos en el Plan de Seguimiento Ambiental y Plan de Alerta Temprana de los Recursos Hídricos (PSAH). Esta red de superficies lagunares corresponden a las indicadas en Anexo 3 – Adenda 5 RWL (2015), la que conforma un área de estudio total de 12.348,41 ha y comprende cuatro sistemas lagunares del Salar de Atacama (**Figura N°4-1**):

- i) *La Punta - La Brava*; se ubica en el sector sur del salar y abarca una superficie de 726,0 ha (5,9%).
- ii) *Lagunas de Peine*, ubicado al sur del salar, comprende las lagunas Salada, Interna y Saladita. Este sistema cubre un total 1.769,1 ha (14,3%).
- iii) *Aguas de Quelana*, se localiza en el centro-este del salar y abarca una superficie de 5.220,9 ha (42,3%).
- iv) *Soncor*, se ubica en el sector norte del salar, a unos 30 km de las instalaciones de Albemarle – Planta Salar y cubre 4.632,5 ha (37,5%).

Los cuatro sistemas lagunares se ubican específicamente en la interfase salina al sur de la cuenca endorreica del Salar de Atacama. Esta zona de interfase supone una separación hidráulica subterránea, de tal manera que el flujo procedente de los acuíferos y, por tanto, desde las subcuencas aportantes, se ve forzado a ascender, alcanzando la superficie donde se forman estos sistemas lagunares permanentes. Una vez en superficie, las aguas que alimentan estos sistemas lagunares, comienzan a sufrir procesos de evaporación, presentando la máxima tasa de evaporación en la franja que rodea al núcleo salino por los márgenes N y E, coincidiendo con la presencia de una cuña salina (Cornellà, O. *et al*, 2009). A medida que estas aguas avanzan sub-superficialmente hacia el núcleo del Salar, se enriquecen progresivamente en sales disueltas. En el resto de la zona marginal, en torno al núcleo del salar, las aguas del acuífero se sitúan muy próximas a la superficie del terreno, sin llegar a aflorar, y sufren una evaporación muy intensa, con una oscilación estacional, la cual provoca que los niveles asciendan en los meses de invierno, y desciendan en verano, cuando se favorecen flujos de evaporación mayores (Adenda 5 RWL, 2015).

**Figura N°4-1. Ubicación sistemas lagunares que conforman el área de estudio para monitoreo y seguimiento de la cobertura de cuerpos de agua por parte del Proyecto en el Salar de Atacama.**



Fuente: Cedrem Consultores en base al Plan de Manejo Biótico (RWL, 2015); y el estudio "Determinación Espacio Temporal de la Vegetación Azonal y Cuerpos de Agua (Adenda 5 RWL, 2015)".

## 4.2 Parámetros utilizados para caracterizar el estado y seguimiento de los cuerpos de agua

El parámetro de seguimiento utilizado en el presente análisis corresponde a las superficies de agua estimadas por sistema lagunar a través de imágenes satelitales. Esto en cumplimiento a lo dispuesto en la Adenda 5 RWL (2015), Anexo 3 (PSA) y la RCA que aprueba al proyecto, donde se establece que: *“La superficie cubierta por las lagunas (área inundada) es una variable asociada al comportamiento de los objetos de protección y relacionada con los niveles piezométricos del área de alimentación de las lagunas. Se medirá en los sistemas de Peine, y La Punta-La Brava, y en los sistemas de Soncor y Quelana donde esta variable se considera además de referencia ubicada en sectores vecinos no influenciados”*

De forma complementaria, en los resultados por sector, y siendo consistente con lo analizado en el documento antes mencionado, en relación con *“...se realizará una correlación con una imagen de baja resolución disponible del satélite LANDSAT 8 o similar, de la fecha más próxima a las de las imágenes de alta definición, de menor resolución”*; en el presente estudio se realiza una comparación entre las superficies determinadas en base a las imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y Landsat 8.

## 4.3 Ubicación de los puntos de muestreo para validación de cuerpos de agua

Esta etapa del estudio conllevó el trabajo en terreno, el cual se realizó con la finalidad de coleccionar los datos que revalidan el modelo de clasificación supervisada usado para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales; en los casos donde no sea posible el acceso para la colecta de datos, se reemplazará por el análisis fotointerpretativo. La técnica de interpretación visual o fotointerpretación se realiza en base a las imágenes satelitales e/o imágenes de dron, proceso en el que se les asigna a estos puntos el tipo de recubrimiento de suelo que presentan. El método fotointerpretativo para el seguimiento lagunar se realiza en base a la imagen de alta resolución (Pleiades 1-A, 8bits), con variación en la composición de colores para la mejor visualización del cambio de coberturas (método de empleo de falso color). La fotointerpretación o clasificación visual es parte de los procesos de reconocimiento, identificación y delimitación de los recubrimientos detectados en una zona de estudio que, en base a diferentes criterios visuales (color, tono, brillo, textura, formas y aspectos temporales), son parte de las técnicas de muestreo para la metodología de clasificación supervisada.

El muestreo ejecutado, consistió en la validación del tipo de recubrimiento de suelo existente, como *“cuerpo de agua”* u *“otro recubrimiento”*, para cada punto de monitoreo y por sistema lagunar en estudio.

El propósito del muestreo 2024 es revalidar el recubrimiento de suelo, mediante réplicas de los puntos levantados desde el primer año de monitoreo, desde agosto y diciembre de 2016 hasta agosto y diciembre de 2023, en zonas representativas de cuerpos de agua permanentes y zonas que presentan diferencias intra e interanuales, a lo que se suma el criterio de accesibilidad.

La captura de las imágenes satelitales de alta resolución para todos los sectores (Pleiades 1-A) y la descarga de la imagen de media resolución (Landsat 8), se realizó en paralelo a las campañas de terreno en las fechas propuestas para el seguimiento lagunar. Complementariamente, se utilizaron

imágenes de dron DJI modelo *Mavic Pro* con cámara de 12 mega pixeles en los sectores donde no se presentaron restricciones de movilidad, tanto en invierno 2024 como en verano 2024-2025 (diciembre).

El diseño de muestreo implementado para el trabajo en terreno – *in situ*, corresponde al tipo *aleatorio – estratificado y estratificado- dirigido* mediante transectos, en los cuatro sistemas lagunares, criterio que se aplica en base a las condiciones de seguridad por el limitado acceso y al conocimiento adquirido en campañas anteriores sobre estos sistemas.

El tamaño de muestra se calculó a partir de la superficie mínima de cuerpos de agua registrada para el componente en la Adenda 5 RWL (2015) y los valores del índice NDWI de imágenes satelitales de alta resolución disponibles.

La **Tabla N°4-1** y **Tabla N°4-2** presentan el detalle del muestreo aplicado en cada sistema lagunar en estudio. Las diferencias en la ubicación y el número de puntos considerados para validación entre imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8, se debe a las diferencias de resolución espacial entre ellas (2 m y 30 m, respectivamente), lo que se grafica en el **ANEXO 9-1, ANEXO 9-2, ANEXO 9-3 y ANEXO 9-4**. En el desglose se puede apreciar aquellos puntos validados en terreno – *in situ* – y aquellos provenientes de la fotointerpretación de la imagen satelital.

**Tabla N°4-1. Número de puntos de monitoreo catastrados en la campaña de invierno 2024, para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama.**

| SISTEMA LAGUNAR      | RECUBRIMIENTO                | PUNTOS DE VALIDACIÓN |           |            |            | PUNTOS DE VALIDACIÓN MODELO |            |
|----------------------|------------------------------|----------------------|-----------|------------|------------|-----------------------------|------------|
|                      |                              | PLEIADES 1A          |           | LANDSAT 8  |            | PLEIADES 1A***              | LANDSAT 8  |
|                      |                              | TERRENO              | FOTOINT*  | TERRENO    | FOTOINT*   |                             |            |
| La Punta y La Brava  | Otros recubrimientos         | 177                  | -         | 56         | -          | 249                         | 76         |
|                      | Cuerpos de agua              | 128                  | -         | 41         | -          | 56                          | 21         |
|                      | <b>Total sistema lagunar</b> | <b>305</b>           | <b>-</b>  | <b>97</b>  | <b>-</b>   | <b>305</b>                  | <b>97</b>  |
| Peine                | Otros recubrimientos         | 19                   | 45        | 45         | 18         | 111                         | 79         |
|                      | Cuerpos de agua              | 113                  | 14        | 15         | 104        | 80                          | 103        |
|                      | <b>Total sistema lagunar</b> | <b>132</b>           | <b>59</b> | <b>60</b>  | <b>122</b> | <b>191</b>                  | <b>182</b> |
| Aguas de Quelana     | Otros recubrimientos         | 39                   | -         | 40         | -          | 51                          | 52         |
|                      | Cuerpos de agua              | 45                   | -         | 44         | -          | 33                          | 32         |
|                      | <b>Total sistema lagunar</b> | <b>84</b>            | <b>-</b>  | <b>84</b>  | <b>-</b>   | <b>84</b>                   | <b>84</b>  |
| Soncor               | Otros recubrimientos         | 155                  | -         | 141        | -          | 154                         | 141        |
|                      | Cuerpos de agua              | 101                  | -         | 92         | -          | 102                         | 92         |
|                      | <b>Total sistema lagunar</b> | <b>256</b>           | <b>-</b>  | <b>233</b> | <b>-</b>   | <b>256</b>                  | <b>233</b> |
| <b>TOTAL GENERAL</b> |                              | <b>836</b>           |           | <b>596</b> |            | <b>836</b>                  | <b>596</b> |

Fuente: Cedrem Consultores. \*Fotointerpretación en base a imagen satelital AR (en falso color) e/o imagen UVA – dron;  
 \*\*Terreno – *in situ*–: recorrido pedestre con marcación de puntos con dispositivo GPS; \*\*\* se realiza corrección de valores en Tabla, respecto a la entrega del semestral invierno 2024.

**Tabla N°4-2. Número de puntos de muestreo catastrados en la campaña de verano 2024-2025 (diciembre), para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama.**

| SISTEMA LAGUNAR      | RECUBRIMIENTO                | PUNTOS DE VALIDACIÓN |            |           |            | PUNTOS DE VALIDACIÓN MODELO |            |
|----------------------|------------------------------|----------------------|------------|-----------|------------|-----------------------------|------------|
|                      |                              | PLEIADES 1A          |            | LANDSAT 8 |            | PLEIADES 1A                 | LANDSAT 8  |
|                      |                              | TERRENO              | FOTOINT*   | TERRENO   | FOTOINT*   |                             |            |
| La Punta y La Brava  | Otros recubrimientos         | 221                  | -          | 79        | -          | 278                         | 86         |
|                      | Cuerpos de agua              | 84                   | -          | 18        | -          | 27                          | 11         |
|                      | <b>Total sistema lagunar</b> | <b>305</b>           |            | <b>97</b> | -          | <b>305</b>                  | <b>97</b>  |
| Peine                | Otros recubrimientos         | -                    | 72         | -         | 66         | 92                          | 99         |
|                      | Cuerpos de agua              | -                    | 119        | -         | 116        | 99                          | 83         |
|                      | <b>Total sistema lagunar</b> |                      | <b>191</b> |           | <b>182</b> | <b>191</b>                  | <b>182</b> |
| Aguas de Quelana     | Otros recubrimientos         | 70                   | -          | 70        | -          | 79                          | 79         |
|                      | Cuerpos de agua              | 14                   | -          | 14        | -          | 5                           | 5          |
|                      | <b>Total sistema lagunar</b> | <b>84</b>            |            | <b>84</b> |            | <b>84</b>                   | <b>84</b>  |
| Soncor               | Otros recubrimientos         | -                    | 158        | -         | 144        | 164                         | 142        |
|                      | Cuerpos de agua              | -                    | 98         | -         | 89         | 92                          | 91         |
|                      | <b>Total sistema lagunar</b> |                      | <b>256</b> |           | <b>233</b> | <b>256</b>                  | <b>233</b> |
| <b>TOTAL GENERAL</b> |                              |                      | <b>836</b> |           | <b>596</b> | <b>836</b>                  | <b>596</b> |

Fuente: Cedrem Consultores. \*Fotointerpretación en base a imagen satelital AR (en falso color) e/o imagen UVA – dron \*\* Terreno – *in situ*: recorrido pedestre con marcación de puntos con dispositivo GPS.

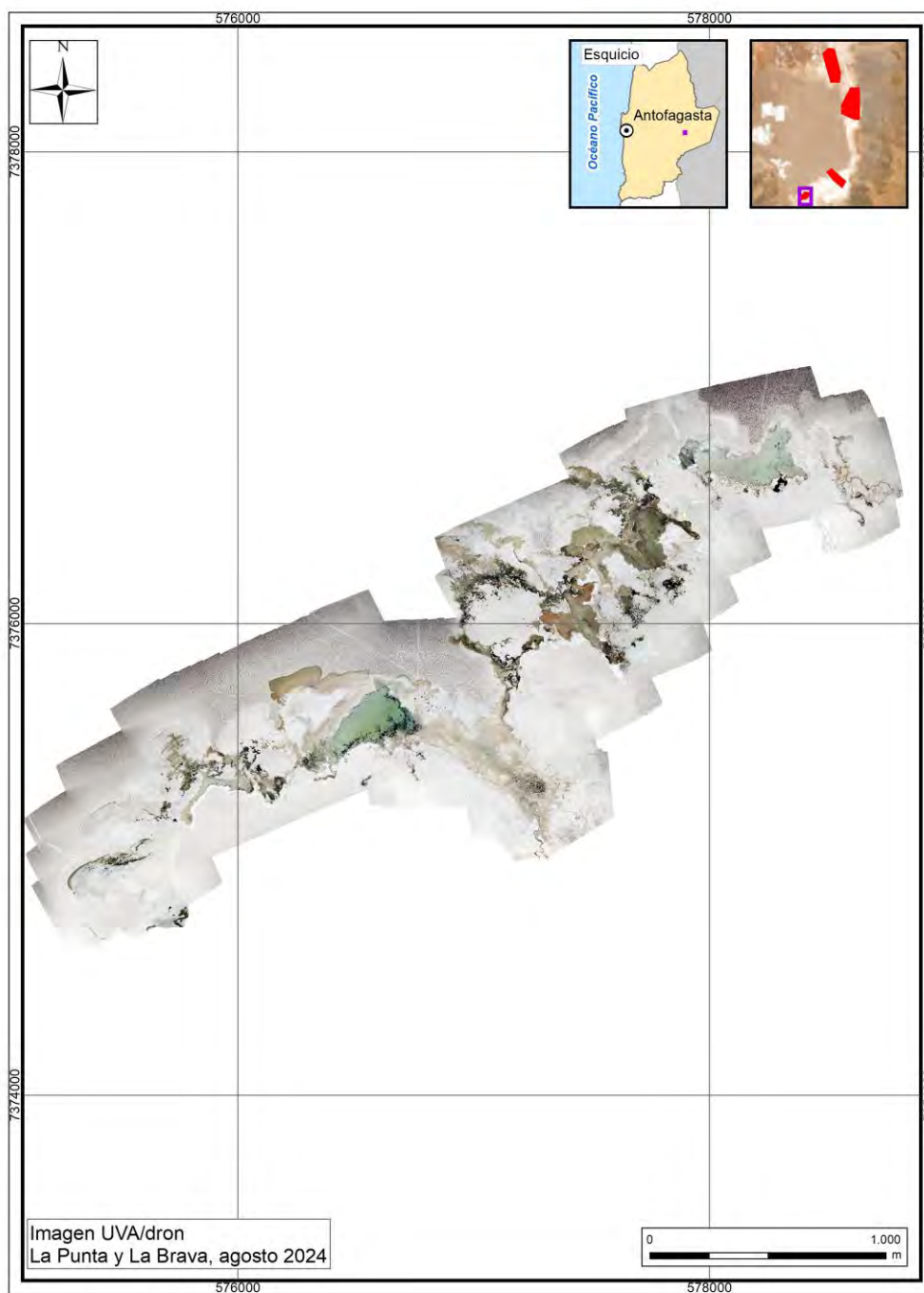
#### 4.4 Materiales y equipos utilizados

El equipo empleado durante la campaña de invierno de 2024 para el levantamiento de puntos de información de sistemas lagunares consistió en un receptor FULL GNSS/GPS, el Navcom SF-3040, equipado con el sistema Starfire de geoposicionamiento. Este receptor proporciona datos en coordenadas UTM 19S WGS84. Además, se incorporó un dron DJI modelo Mavic Pro con una cámara de 12 megapíxeles, ejecutando vuelos programados a una altura de 200 metros. En la campaña de invierno de 2024, no se pudo llevar a cabo la validación en terreno en el área de Peine (Salada y Saladita). Esto se debió a medidas restrictivas de movilidad implementadas por la Comunidad de Peine. Estas restricciones redujeron las opciones de validación a la fotointerpretación en el gabinete utilizando imágenes de alta resolución (ANEXO 9-26. Cartas de notificación de restricciones de acceso).

En tanto, el equipo empleado durante la campaña de verano 2024-2025 (diciembre) para el levantamiento de puntos de información de sistemas lagunares consistió en un receptor móvil GPS/GNSS SATLAB SL900, rastreo múltiple constelación con software SGS (SATLAB GEOBIZ SOLUTION). Este receptor proporciona datos en coordenadas UTM 19S WGS84. En la campaña de verano de 2024-2025, no se pudo llevar a cabo la validación en terreno en el área de Peine (Salada y Saladita e Interna). Esto se debió a medidas restrictivas de movilidad (ANEXO 9-26. Cartas de notificación de restricciones de acceso) implementadas por la Comunidad de Peine. Estas restricciones redujeron las opciones de validación a la fotointerpretación en el gabinete utilizando imágenes de alta

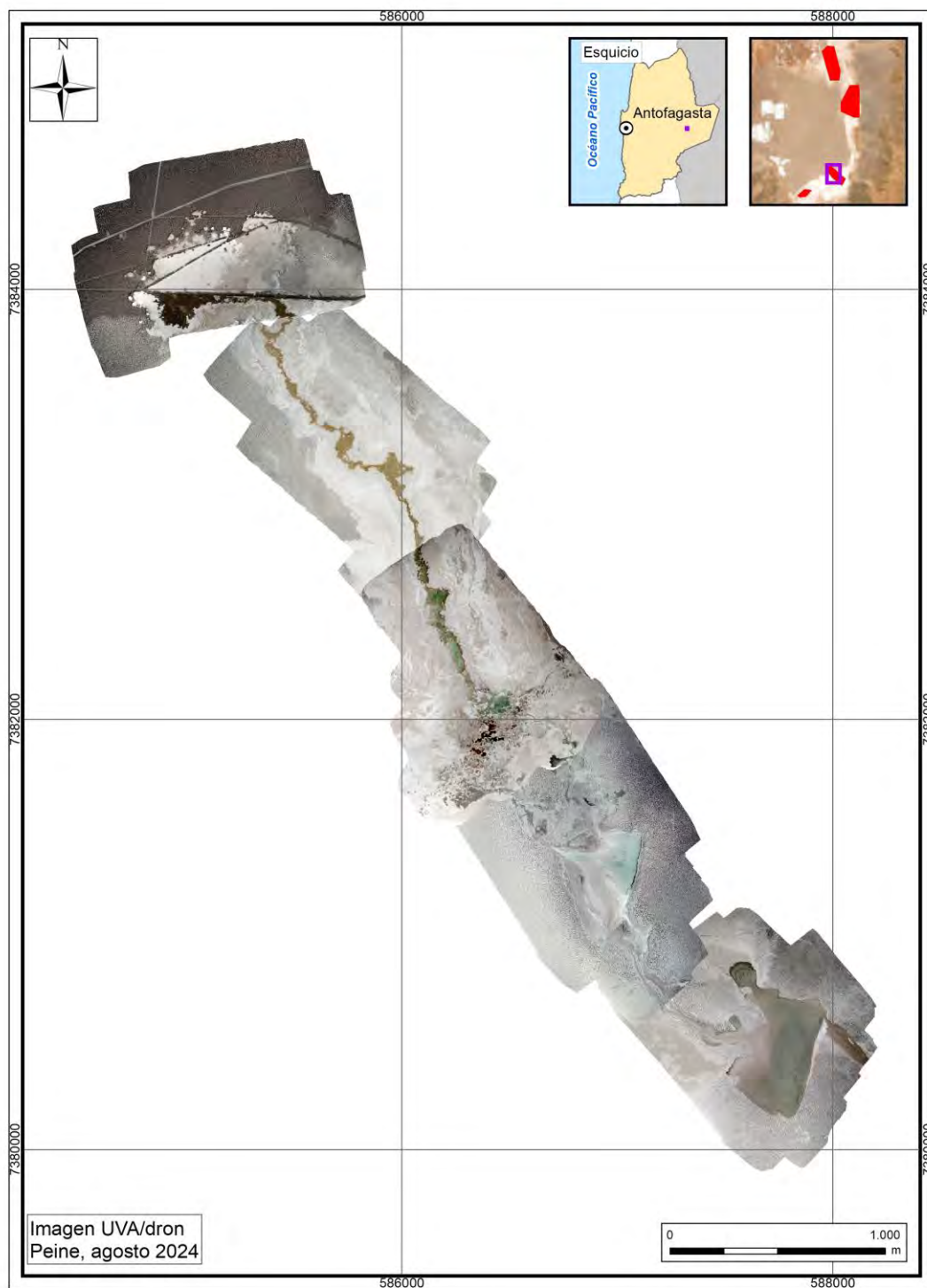
resolución sin apoyo de vuelo dron. La **Figura N° 4-2** y **Figura N° 4-3**, muestran los resultados de los vuelos autorizados en la campaña de invierno 2024.

**Figura N° 4-2. Imagen UVA/dron usado para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama, sector La Punta y La Brava, invierno 2024.**



Fuente: Elaboración Propia en base a mosaico imagen UVA/dron sector La Punta y La Brava.

**Figura N° 4-3. Imagen UVA/dron usado para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama, sector Peine, invierno 2024.**



Fuente: Elaboración Propia en base a mosaico imagen UVA/dron sector La Punta y La Brava.

#### 4.5 Metodología de muestreo y/o medición

El muestreo en terreno se llevó a cabo mediante el levantamiento de puntos de monitoreo con receptores Full GNSS/GPS, que consistió en el marcaje del tipo de recubrimiento de suelo directamente en terreno para cada punto de medición, en coordenadas UTM 19S WGS84. Complementariamente, se utilizaron imágenes de dron en los sectores que no presentaban restricciones de movilidad.

Posteriormente, en el software GIS ArcMap 10.8 se validan los puntos a los que no se pudo acceder en terreno, mediante la técnica de interpretación visual o fotointerpretación en base a las imágenes satelitales e imágenes de dron, proceso en el que se les asignó a estos puntos el tipo de recubrimiento de suelo (cuerpo de agua / otro recubrimiento). El método fotointerpretativo se realiza en base a la imagen de alta resolución (Pleiades 1-A, 8bits), con variación en la composición de colores para la mejor visualización del cambio de coberturas (método de empleo de falso color). La fotointerpretación o clasificación visual es parte de los procesos de reconocimiento, identificación y delimitación de los recubrimientos detectados en una zona de estudio que, en base a diferentes criterios visuales (color, tono, brillo, textura, formas y aspectos temporales), son parte de las técnicas de muestreo para la metodología de clasificación supervisada.

En las campañas de invierno y verano 2024-2025 (diciembre), este muestreo se implementó en los puntos de réplicas estacionales de las campañas de invierno y verano de 2016 a 2023, en zonas representativas de lagunas recurrentes y donde se determinaron las principales diferencias entre la medición de terreno y el modelo de clasificación supervisada, en períodos intra e interanuales, resguardando las condiciones de accesibilidad, seguridad y permisos respectivos en zonas de acceso restringido. El **ANEXO 9-1**, **ANEXO 9-2**, **ANEXO 9-3**, **ANEXO 9-4** muestran la distribución de los puntos de validación en cada sistema lagunar de estudio y el detalle de sus coordenadas se encuentra en el **ANEXO 9-5**.

## 4.6 Metodología de análisis de las imágenes satelitales para delimitación de cuerpos de agua

### 4.6.1 Imágenes de alta resolución – Pleiades 1-A

Las imágenes multiespectrales de alta resolución usadas en el presente estudio provienen del sensor Pleiades 1-A, y en su conjunto conforman dos mosaicos, el primero en el sector sur que corresponde a los sistemas de Peine y La Punta - La Brava; y el segundo en el sector norte, que comprende los sistemas lagunares de Soncor y Aguas de Quelana (**Figura N°4-4**). En la campaña de invierno 2024, se obtuvieron las imágenes Pleiades 1-A, el **6 de agosto de 2024** y en verano 2024-2025 el **17 de diciembre de 2024**. La selección de este tipo de imágenes se debe a que sus características permiten contar con la resolución espacial adecuada para la cartografía detallada y de precisión (Pancromática, 50 cm; Multiespectral, 2 m), y permite mayor flexibilidad en cuanto a la periodicidad de captura, ya que su intervalo de revisita es de 24 h.

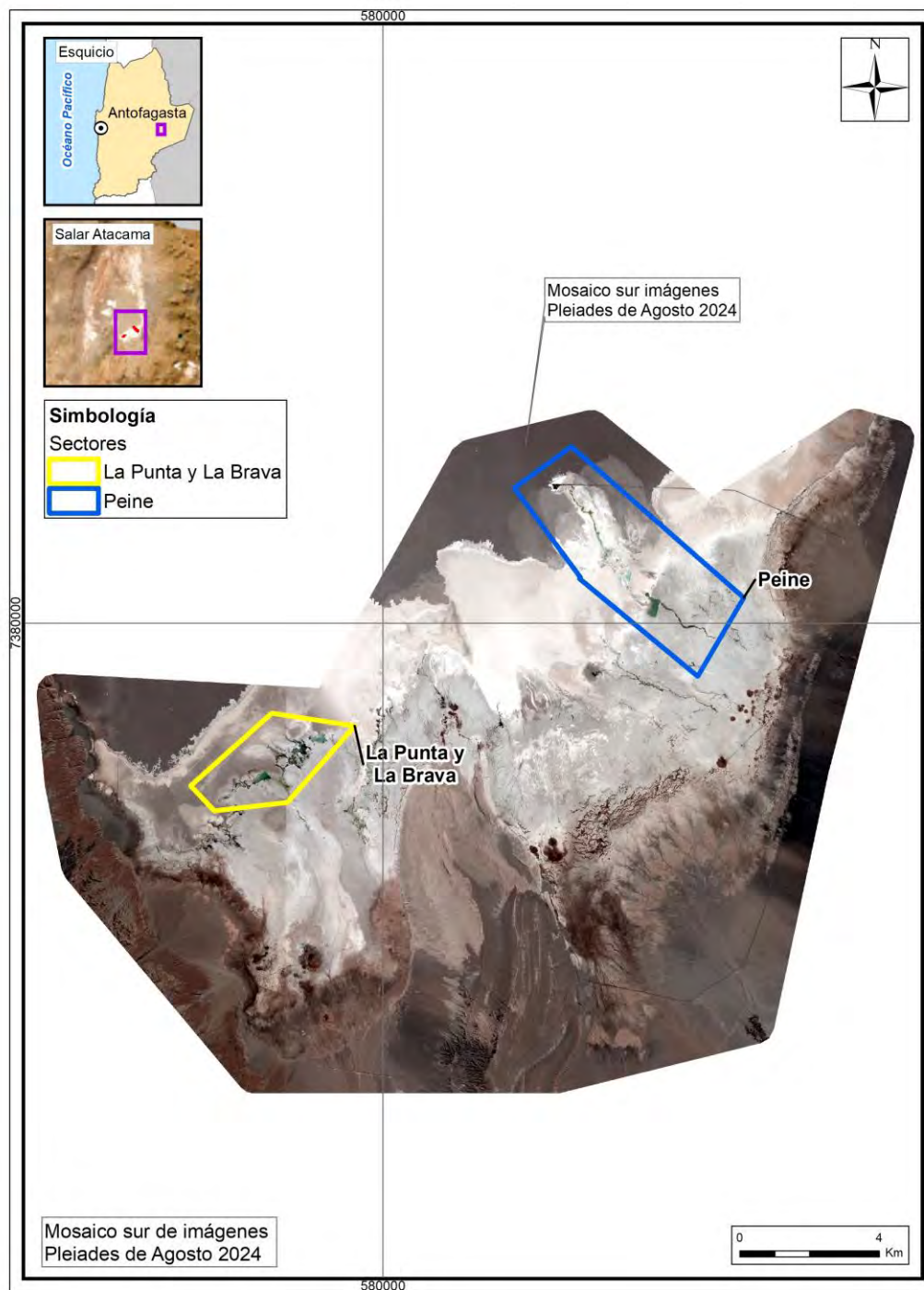
El satélite Pleiades está constituido de una banda pancromática con resolución de 0,5 m en visual nadir y 4 bandas espectrales (blue - azul, green - verde, red - rojo y near infrared - infrarrojo cercano). La precisión de corrección por ortorectificación puede encontrarse dentro 1m y 10m respectivamente. Las principales características del sensor se describen en la **Tabla N°4-3**, el **ANEXO 9-7** se presenta el *metadata* de las imágenes analizadas.

**Tabla N°4-3. Características técnicas del sensor Pleiades 1-A.**

| CARACTERÍSTICAS       | DETALLE                          |                          |
|-----------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Órbita                | Altitud: 695 km                  |                          |
|                       | Tipo: Tipo sincrónica con el sol |                          |
| Bandas Sensor         | Pancromáticas: 480 - 830 nm      |                          |
|                       | Multiespectrales                 |                          |
|                       | Azul: 430 - 550 nm               | Rojo: 600 - 720 nm       |
|                       | Verde: 490 - 610 nm              | Infrarrojo: 750 - 950 nm |
| Resolución del sensor | Pancromática: 50 cm              |                          |
|                       | Multiespectral: 2 m              |                          |

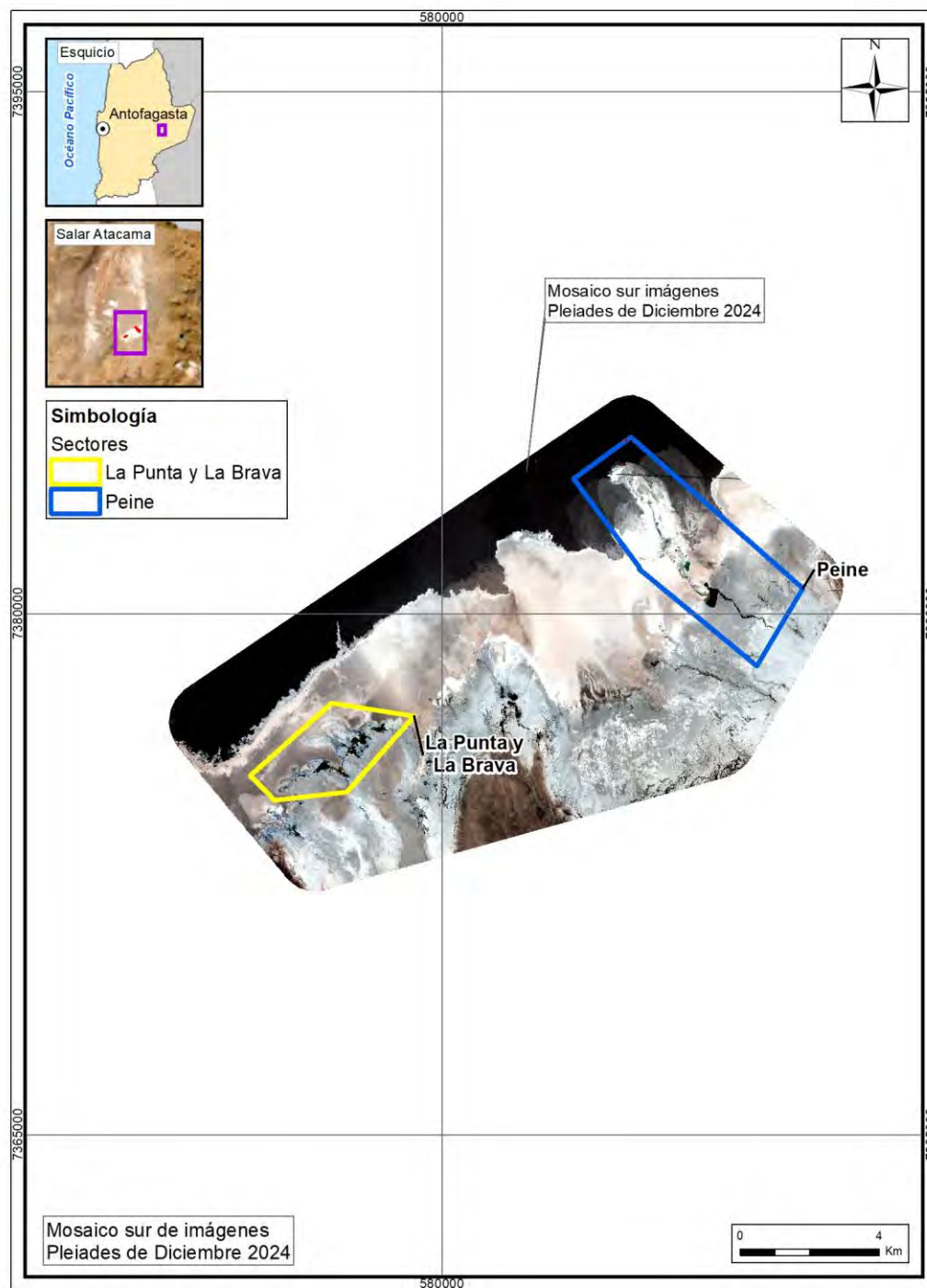
Fuente: Airbus Defense and Space. [https://storage.googleapis.com/p-oaf-ibe-back-00e-strapi-uploads/pleiades\\_brochure\\_2019\\_8883d573da/pleiades\\_brochure\\_2019\\_8883d573da.pdf](https://storage.googleapis.com/p-oaf-ibe-back-00e-strapi-uploads/pleiades_brochure_2019_8883d573da/pleiades_brochure_2019_8883d573da.pdf). Revisada en enero de 2025.

**Figura N°4-4. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades 1-A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama, invierno 2024.**



Fuente: Cedrem Consultores en base a imágenes alta resolución Pleiades 1-A (invierno 2024).

**Figura N°4-5. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades 1-A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama verano 2024-2025.**



Fuente: Cedrem Consultores en base a imágenes alta resolución Pleiades 1-A (verano 2024-2025).

#### 4.6.2 Imagen de resolución media – LANDSAT 8

Las imágenes usadas cubren por completo el área de estudio y las fechas de captura corresponden al **31 de julio y 22 de diciembre de 2024**. La descarga se realiza en forma gratuita desde <http://earthexplorer.usgs.gov/>, sitio web de *United States Geological Survey* (USGS; **Figura N°4-6**). El sensor Landsat 8 dispone de 11 bandas espectrales, con una resolución (tamaño del píxel) de 30 x 30 m. De éstas, se utilizaron cinco bandas en el proceso de delimitación de los cuerpos de agua del área de estudio. Las características de las bandas espectrales del sensor Landsat 8 se describen en **Tabla N°4-4** y el **ANEXO 9-8** presenta la *metadata* de la imagen descargada.

**Figura N°4-6. Imagen Landsat 8 correspondiente al cuadrante que incluye el área de estudio en invierno 2024 (izquierda – RGB) y verano 2024-2025 (derecha - RGB).**



Fuente: United States Geological Survey USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Revisitada en agosto y diciembre de 2024.

**Tabla N°4-4. Características técnicas de las bandas espectrales de la imagen Landsat 8**

| Banda                                        | Ancho (µm)   | Resolución (m) |
|----------------------------------------------|--------------|----------------|
| Band 1 Costera                               | 0,43 – 0,45  | 30             |
| Band 2 Azul                                  | 0,45 – 0,51  | 30             |
| Band 3 Verde                                 | 0,53 – 0,59  | 30             |
| Band 4 Rojo                                  | 0,64 – 0,67  | 30             |
| Band 5 Infrarrojo Cercano (NIR)              | 0,85 – 0,88  | 30             |
| Band 6 Infrarrojo de Onda Corta 1 (SWIR 1)   | 1,57 – 1,65  | 30             |
| Band 7 Infrarrojo de Onda Corta 2 (SWIR 2)   | 2,11 – 2,29  | 30             |
| Band 8 Pancromática (Pan)                    | 0,50 – 0,68  | 15             |
| Band 9 Cirros (Cirrus)                       | 1,36 – 1,38  | 30             |
| Band 10 Sensor Térmico Infrarrojo 1 (TIRS 1) | 10,6 – 11,19 | 100            |
| Band 11 Sensor Térmico Infrarrojo 2 (TIRS 2) | 11,5 – 12,51 | 100            |

Fuente: United States Geological Survey USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Visitada en agosto y diciembre 2024.

### 4.6.3 Procesamiento de las imágenes satelitales

Tanto las imágenes Landsat 8, como las Pleiades 1-A de alta resolución, fueron sometidas a procesamiento digital de correcciones radiométricas y atmosféricas, con el fin de reducir errores provenientes de interferencias, las cuales pueden ser producto del ángulo de captura y alteraciones en el movimiento del satélite, o bien el efecto de las partículas presentes en la atmósfera, entre otros.

Inicialmente, a cada imagen se le 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 ( $W / (m^2 * sr * \mu m)$ )<sup>7</sup>. Este proceso 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 el plano focal de éste, 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, aerosoles, 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. Para este fin, se utilizó el modelo de corrección espectral de reflectancia a nivel de superficie de *Airbus*, realizado por el mismo proveedor, en las imágenes de alta resolución (Pleiades). Este modelo permite ejecutar correcciones de reflectancia provenientes de la parte alta de la atmósfera, la eliminación de neblina y el enmascaramiento de nubes, así como correcciones de la atmósfera baja y a nivel de suelo y las correcciones atmosféricas de la temperatura superficial. En el caso de las imágenes de resolución media, las imágenes Landsat 8 Level-2 Surface Reflectance (L2SP) son productos procesados por el proveedor para corregir diversos efectos atmosféricos y de iluminación. Las correcciones atmosféricas incluyen la eliminación o reducción de efectos causados por la presencia de gases, aerosoles y nubes en la atmósfera.

Es importante mencionar que estos métodos en comparación al método IARR (por su sigla en inglés) y que corresponde al *promedio interno de reflectancia relativa* aplicado en la Adenda 5 RWL (2015), constituye un mejoramiento en el modelo actual, producto del refinamiento en el proceso de remoción del error atmosférico proporcionado por el modelo de *Airbus* (Chuvieco, 2006) y el modelo L2SP. Esta diferencia metodológica, puede variar la respuesta espectral de los parámetros espectrales utilizados (ej. NDVI, NDWI; Lamolda, 2008), conduciendo a la mejor detección de cuerpos de agua con el modelo actual (el **ANEXO 9-6** detalla los ajustes metodológicos aplicados y sus implicancias en la estimación de los cuerpos de agua).

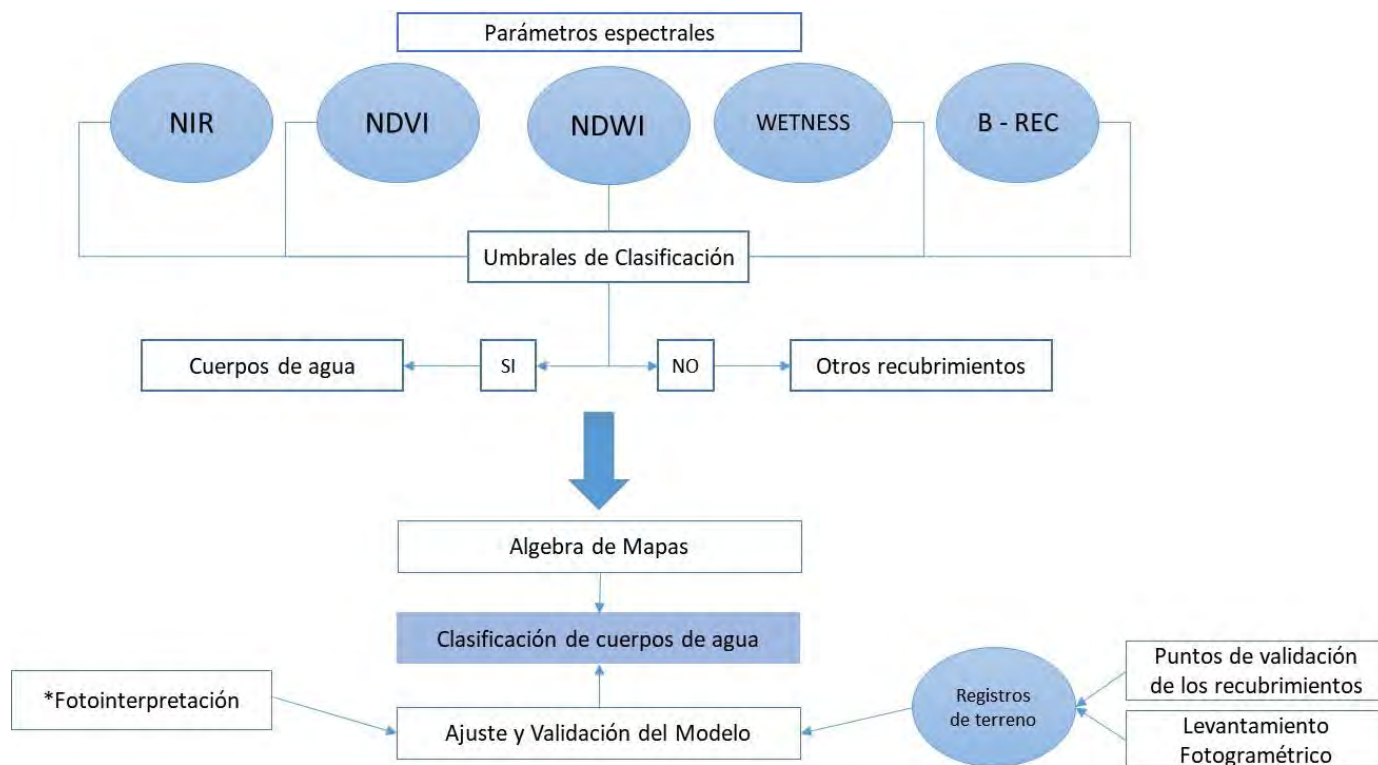
Posteriormente, las imágenes fueron ortorrectificadas para eliminar las distorsiones geométricas, producto de imperfecciones del sensor, la curvatura de la tierra y los efectos locales del relieve. Finalmente, en el caso de las imágenes de alta resolución Pleiades 1-A, fueron unidas conformando dos mosaicos dentro del área de estudio (polígono norte y sur en la **Figura N°4-4** y **Figura N°4-5**).

<sup>7</sup> Dónde: W: Watts; m<sup>2</sup>: metro cuadrado; sr: estereorradián;  $\mu m$ : micrómetro.

#### 4.6.4 Descripción del modelo de clasificación supervisada de cuerpos de agua

El modelo usado durante este análisis se desarrolló en base a la metodología “Índice Normalizado de Diferencia de Agua” (NDWI por su sigla en inglés), la cual fue empleada en el estudio desarrollado en la Adenda 5 RWL (2015); y que fue establecido como base para este componente.

**Figura N°4-7. Modelo conceptual de árbol de decisiones usado para la clasificación supervisada de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales.**



**Índices Multiespectrales:** NIR= Banda del infrarrojo cercano, NDVI= Índice de vegetación normalizado; NDWI= Índice diferencial de agua normalizado, WETNESS= Índice de Humedad derivado de transformación *Tasseled Cap* con bandas de imágenes Landsat 8; B - REC= reclasificación de bandas espectrales azul, verde, rojo e infrarrojo cercano. \*El levantamiento fotogramétrico se realiza complementario a los puntos de validación; en caso de no contar con acceso a las áreas se utiliza el método de \*Fotointerpretación. Fuente: Elaboración Propia en base a metodología “Modificada del Índice Normalizado de Diferencia de Agua” (MNDWI) en Adenda 5 RWL (2015).

La clasificación supervisada de imágenes satelitales se empleó para la identificación y delimitación de los cuerpos de agua. El método se inicia con el establecimiento de los umbrales de clasificación para cada uno de los parámetros espectrales en evaluación y que tienen una respuesta determinada ante la presencia de un cuerpo de agua. Posteriormente, en un modelo de árbol de decisiones, se estiman los cuerpos de agua utilizando la combinación de los criterios definidos en cada parámetro, y se evalúa el ajuste y la precisión del modelo mediante la comparación con los datos validados en terreno o por fotointerpretación (Figura N°4-7).

Los parámetros evaluados durante la clasificación supervisada en el presente estudio fueron cinco:

- i) Banda infrarroja (NIR),
- ii) Índice NDWI;
- iii) Índice NDVI;
- iv) Reclasificación de bandas espectrales (B1<B2) y (B3 > B4), usada en el modelo de imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y
- v) Transformación “*Tasseled Cap*” (*Wetness*; Kauth & Thomas, 1976), la cual se utilizó para el caso Landsat 8, dado el mayor número de bandas que ofrece este sensor.

El **acápito 4.6.5** describe en detalle cada uno de estos parámetros.

Comparativamente entre la metodología de la Adenda 5 RWL (2015) y la actual, cabe destacar que en esta última se incorporan dos parámetros espectrales adicionales, correspondientes a NDVI y a la transformación “*Tasseled Cap*” (*Wetness*). Esta modificación, se realizó con el fin de robustecer el modelo ya desarrollado, considerando que los suelos salinos usualmente presentan distintos tipos y concentraciones de sales, afectando la reflectancia del suelo en distintos grados y puede conducir a errores significativos durante interpretaciones espectrales (Wang *et al.*, 2012). El **ANEXO 9-6** detalla en un cuadro comparativo los ajustes metodológicos aplicados con relación a la Adenda 5 RWL (2015).

#### 4.6.5 Parámetros espectrales del modelo de clasificación

##### a. Índice de Diferencia Normalizada de Agua – NDWI

En la Adenda 5 RWL (2015) (Anexo 3 PSAH, apartado 3.2.6 de “Superficie cubierta por lagunas”), se indica que: “*Para la determinación de la superficie cubierta por lagunas, en la imagen de alta resolución se utilizará metodología “Modificación del Índice Normalizado de diferencias de agua (MNDWI)”, que determina la presencia de agua mediante la respuesta espectral del infrarrojo medio, con la siguiente expresión:*

$$MNDWI = \frac{G - MIR}{G + MIR} \quad (1)$$

Donde G es la banda espectral correspondiente al color verde y el MIR es la banda del Infrarrojo medio”. La fórmula corresponde a la desarrollada por Xu, 2006.

Sin embargo, en el mismo acápite, en algunos párrafos previo a la fórmula se indica textual: “Se utilizarán imágenes de satelitales multiespectrales con un tamaño de píxel de **máximo 4 metros** que incluirán los sistemas lagunares de La Punta-La Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor” (énfasis es propio). Lo anterior, y según las condiciones técnicas, lleva a un ajuste en la metodología dado que la existencia de imágenes que cuenten con la banda MIR es limitada y en general cuentan con menor resolución espacial (ej. satélites Spot con una banda MIR con resolución espacial de 20m, muy superior a los 4 m máximos).

Además, es importante señalar, que la variable Superficies Lagunares, es también compromiso del seguimiento biótico (PMB) y por lo tanto, se debe compatibilizar ambos compromisos, es decir, también debe cumplir con la metodología especificada en el Anexo 2, Adenda 5 EIA, apéndice b), 2015

“Determinación espacio temporal de la vegetación azonal y cuerpos de agua. Estudio de Impacto Ambiental”, que indica que:

“Para la delimitación de las superficies cubiertas por aguas existe el cálculo del Índice de Diferencia Normalizada de Agua o NDWI (Normalized Difference Water Index). La fórmula utilizada para el cálculo de este índice es la siguiente (Gao, 1995; McFeeters, 1996):

$$NDWI = \frac{\rho_i V - \rho_i IRC}{\rho_i V + \rho_i IRC} \quad (2)$$

dónde:  $V$  es la reflectancia en el verde (visible) (Banda 2);  $IRC$  = reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (Banda 4)”.

Finalmente, la selección de la fórmula de McFeeters (2), responde a la necesidad de ajustar imágenes de alta resolución (ya sea imágenes de archivo o programadas) manteniendo todos los objetivos propuestos en la Adenda 5 RWL (2015) y la base de la fórmula propuesta, tanto para el PSAH como para el PMB, siendo esta última la utilizada en el presente informe con el fin de estandarizar los métodos.

El índice NDWI 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 cálculo de este parámetro se realizó tanto en las imágenes Landsat 8 como en las imágenes de alta resolución Pleiades-1A.

#### **b. Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación - NDVI**

El Índice NDVI (por su sigla en inglés, *Normalized Difference Vegetation Index*), consiste en la comparación entre las bandas roja e infrarroja cercana, mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

El NDVI varía entre -1 y 1 y resalta en valores positivos las áreas con presencia de vegetación basándose en la reflectancia diferencial de la clorofila entre la banda infrarroja cercana (**NIR**) y la banda roja (**R**) del espectro visible. Adicionalmente, en el rango de los valores negativos este índice detecta superficies que generalmente corresponden a nubes o cuerpos de agua.

El cálculo de este parámetro se realizó tanto en las imágenes Landsat 8 como en las imágenes de alta resolución Pleiades 1-A.

#### **c. NIR - Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano**

La Banda NIR (Banda 5 en Landsat 8 y Banda 4 en Pleiades 1-A), posee características espectrales útiles para la detección de cuerpos de agua. Dadas las propiedades del agua de absorción de la radiación electromagnética; esta baja reflectividad en el infrarrojo resulta útil en la distinción de áreas de tierra o suelos desnudos y agua.

Para el cálculo de este parámetro, se realiza la reclasificación de este parámetro tanto en las imágenes Landsat 8 como en las imágenes de alta resolución Pleiades 1-A.

**d. Reclasificación de bandas espectrales a partir de la condición de bandas de la imagen de alta resolución**

Este parámetro consistió en un procedimiento de clasificación binaria de los píxeles en las imágenes espectrales Pleiades 1-A, en que los píxeles de las bandas espectrales de las imágenes se enfrentaron a la condición lógica de la presencia de cuerpos de agua versus otros recubrimientos, en base al segmento de longitud de onda que refleja cada banda. Para este caso se procedió el cumplimiento de la condición:  $(B1 < B2)$  y  $(B3 > B4)$ . Donde las bandas corresponden a: B1 azul, B2 verde, B3 rojo y B4 infrarrojo cercano.

**e. Transformación “Tasseled Cap”**

La transformación “Tasseled Cap” (TCT) fue desarrollada para optimizar la visualización de la vegetación en imágenes multiespectrales (Hernández, 2005). Esta transformación produce tres nuevas bandas a partir de las originales de la imagen: Brillo (Brightness), Verdor (Greenness) y Humedad (Wetness).

El índice de humedad es un contraste entre la reflectancia en el infrarrojo de onda corta (SWIR) y el visible/infrarrojo cercano (VNIR), proporcionando una medida del contenido de humedad del suelo. En estas bandas, el agua absorbe la radiación (con coeficientes de ponderación negativos) respecto al resto de las bandas menos afectadas por la humedad (coeficiente bajo y positivo) (Crist & Cicone, 1984; Crist, *et al.*, 1986).

Este parámetro se utilizó sólo en el caso de Landsat 8 y para su cálculo se utilizaron coeficientes que derivan estadísticamente a partir de estas imágenes y de observaciones empíricas que son específicos para cada sensor (Crist, *et al.* 1986).

#### 4.6.6 Umbrales y validación del modelo de clasificación

Durante el proceso de clasificación supervisada, se establecieron umbrales de clasificación de cada parámetro del modelo, los cuales representaron el valor límite de clasificación como cuerpo de agua u otro recubrimiento. Estos umbrales fueron definidos para cada sector, según el parámetro, para cada tipo de imagen satelital y para cada temporada (mes – año). La búsqueda de umbrales realiza en cada monitoreo, en consideración a las diferencias en la percepción del sensor de los recubrimientos del suelo, en otros, por el ángulo de iluminación del sol y la temporada del año en que se dé la captura; esta variación se traduce en el valor de los datos a analizar y por ende de valor de corte o umbral.

La definición de cada umbral se realizó mediante inspección visual fotointerpretativa, controlada por el conocimiento de las características de los objetos a catalogar; su respuesta espectral; y los umbrales determinados en campañas anteriores. Cabe destacar que las variaciones de estos valores respecto a los registros históricos de la Adenda 5 RWL (2015) son atribuibles al cambio del tipo de imágenes satelitales usadas; a las variaciones atmosféricas; las diferencias en el procesamiento de estas; y a

cambios en los valores del conjunto de datos de cada imagen, correspondientes a la metodología detallada en el **ANEXO 9-6**.

**Tabla N°4-5. Valores de los umbrales de clasificación de los parámetros espectrales usados, según Pleiades 1-A y Landsat 8, para la delimitación de cuerpos de agua en los sistemas lagunares del Salar de Atacama, agosto y diciembre de 2024.**

| TIPO DE IMAGEN            | ÍNDICE             | SISTEMA LAGUNAR          |                          |                          |                          |
|---------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                           |                    | LA PUNTA Y LA BRAVA      | PEINE                    | AGUAS DE QUELANA         | SONCOR                   |
| Invierno 2024             |                    |                          |                          |                          |                          |
| Parámetros AR<br>PLEIADES | NDWI               | NB 12/32 >= -0,030745752 | NB 12/32 >= -0,032625456 | NB 19/32 >= 0,021181715  | NB 13/32 >= 0,0126228    |
|                           | NDVI               | NB 21/32<= -0,009230325  | NB 19/32 <= -0,056716628 | NB 14/32 <= -0,012287284 | NB 19/32 <=-0,005668798  |
|                           | NIR - B4           | NB 12/32 <= 0,222696344  | NB 10/32 <= 0,237542415  | NB 8/32 <= 0,200075041   | NB 10/32<= 0,217041183   |
|                           | (B1<B2) Y (B3> B4) | SI                       | SI                       | NO                       | SI                       |
| Parámetros<br>LANDSAT 8   | NDWI               | NB 10/32 >= 0,016474143  | NB 9/32 >= -0,017115659  | NB 24/32 >= -0,084196037 | NB 9/32 >= -0,00174859   |
|                           | NDVI               | NB 24/32 <= -0,036347575 | NB 26/32<= -0,000522385  | NB 10/32 <= 0,018316724  | NB 24/32 <= -0,04519749  |
|                           | NIR - B5           | NB 13/32<= 0,404508645   | NB 12/32 <= 0,393277968  | NB 6/32 <= 0,22579363    | NB 9/32 <= 0,294117647   |
|                           | WETNESS            | NO                       | NO                       | NO                       | NO                       |
| Verano 2024-2025          |                    |                          |                          |                          |                          |
| Parámetros AR<br>PLEIADES | NDWI               | P95 >= 0,010147916       | NB 15/32 >= -0,036517164 | NB 23/32 >= 0,007658814  | NB 15/32 >= 0,055051968  |
|                           | NDVI               | NB 20/32 <= -0,007212789 | NB 19/32 <= -0,040652084 | NB 10/32 <= -0,01417847  | NB 18/32 <= -0,006642612 |
|                           | NIR - B4           | P5 <= 0,40522675         | NB 14/32 <= 0,412465393  | NB 4/32 <= 0,211794577   | NB 13/32 <= 0,348527914  |
|                           | (B1<B2) Y (B3> B4) | SI                       | SI                       | NO                       | NO                       |
| Parámetros<br>LANDSAT 8   | NDWI               | NB 8/32>= -0,053685009   | NB 10/20 >= -0,000846695 | NB 29/32 >= -0,075309201 | NB 7/32 >= -0,08819905   |
|                           | NDVI               | NB 25/32 <= 0,004100533  | NB 26/32 <= 0,007306146  | NB 5/32 <= 0,016978798   | NB 26/32 <= 0,002131695  |
|                           | NIR - B5           | P5 <= 0,376367066        | P10 <= 0,355874506       | NB 3/32 <= 0,249769798   | NB 12/32 <= 0,257096084  |
|                           | WETNESS            | NO                       | NB 24/32 >= 0,314502413  | NO                       | NO                       |

Dónde: Métodos de clasificación de datos: R: Intervalo equivalente (*Equal Interval*), NB: Quiebres naturales (*Natural breaks*), P: Percentiles (*Quantile*). Umbrales definidos cada temporada de monitoreo, de acuerdo con las variaciones temporales del sensor y la naturaleza de los sustratos; NO: el índice presenta homogeneidad en los datos y su clasificación no aporta al modelo, por lo que no se utiliza. Fuente: Elaboración Propia.

Debido a la complejidad de las áreas de estudio, fue preciso considerar diferentes intervalos en las distribuciones de las variables. Para ello, se utilizaron los métodos de clasificación de datos por percentiles y quiebres naturales; esto con el objeto de encontrar el mejor ajuste en el modelo de clasificación. Este proceso se realizó en el software ArcGIS 10.8. Los métodos de clasificación de datos permiten visualmente agrupar valores similares, y bajo ese análisis determinar cuál es la agrupación de datos (desde que valor o umbral) se expresa con mejor ajuste los tipos de recubrimientos (agua, otros recubrimientos).

Una vez fijado cada umbral de clasificación, se extrae el conjunto de píxeles espectralmente similares que formaron grupos o clases, a las que luego se les asigno el tipo de recubrimiento de suelo que representaban (cuerpos de agua u otros recubrimientos).

El cálculo final del modelo por sector se realiza mediante la unión de los parámetros reclasificados según el umbral definido y se determinó la cobertura de agua cuando al menos dos de los cuatro parámetros coincidían en clasificar el píxel como “cuerpo de agua”, de lo contrario quedó asignado como “otro recubrimiento”; esto para ambos tipos de imágenes. El criterio de decisión en la cantidad de parámetros

usados para asignar la categoría se relaciona con la complejidad del patrón espacial de cada sistema lagunar y de su variabilidad estacional (Ortiz, C. *et al*, 2014; DGA, 2014; Cornellà, O. *et al*, 2009).

Posteriormente, se procede con la validación del modelo de clasificación la cual se realiza a través de una matriz de confusión, que permite evaluar la exactitud del modelo. Fundamentalmente consiste en estimar el número de puntos correctamente cartografiados dentro de un conjunto de datos. En este caso, la matriz se construyó con la información del tipo de recubrimiento establecido en los puntos de validación de terreno/fotointerpretación y fueron comparados con los resultados del modelo. En esta matriz, la diagonal principal indica que las muestras fueron coincidentes o correctamente interpretadas (ITC, 1999 en Flores, 2002).

El interés del uso de esta tabla de confusión proviene de su capacidad para plasmar conflictos entre categorías. De esta forma no sólo se conoce la fiabilidad global de la clasificación, sino también la exactitud conseguida para cada una de las clases, así como los principales conflictos entre ellas (Chuvieco, 2006).

A partir de la matriz de confusión se realiza el cálculo del índice *Kappa*<sup>8</sup>, el cual es una medida ajuste en términos de la exactitud del modelo de clasificación. Este mide la diferencia entre los datos de validación de terreno/fotointerpretación y la clasificación según el modelo, e intenta delimitar el grado de ajuste de los datos, prescindiendo de los factores aleatorios (Congalton, 1991). El coeficiente *Kappa* fue calculado de la siguiente manera:

$$\kappa = \frac{[(\Sigma \text{ concordancias observadas}) - (\Sigma \text{ concordancias atribuibles al azar})]}{[(\text{total de observaciones}) - (\Sigma \text{ concordancias atribuibles al azar})]}$$

El índice *Kappa* tiene un rango entre 0 y 1 el cual representa proporcionalmente la exactitud en el ajuste del modelo. Valores de *K* cercanos a 1 revelan una muy buena concordancia entre la realidad observada y la cobertura obtenida. Contrariamente, valores próximos a 0 sugieren que la concordancia observada es sólo debido al azar. Según Landis y Koch (1977), valores  $K > 0,4$  indican un modelo de clasificación *aceptable* en término de exactitud, mayores a 0,6 sugieren un modelo *considerable* en la clasificación del recubrimiento de suelo obtenida.

Con los datos de la revalidación en terreno/fotointerpretación y la clasificación finalizada por sistema lagunar, se procede a evaluar su ajuste mediante la utilización de la matriz de confusión y el Índice de *Kappa*, con la finalidad de determinar el nivel de ajuste obtenido.

Complementario a lo anterior, a partir de la matriz de confusión también se obtuvo el índice de precisión global (*overall accuracy* u OA) que define la cantidad de puntos correctamente clasificados midiendo así la calidad de una clasificación expresada en porcentaje (0 a 100%), en que, si todos los puntos de la imagen son clasificados al grupo que le corresponde según la información se terreno/fotointerpretación, vale decir, un 100% de coincidencias, se puede hablar de una clasificación perfecta (Li, Y., 2014).

<sup>8</sup> Los rangos de valores para *Kappa* son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

#### 4.6.7 Depuración cartográfica de cuerpos de agua

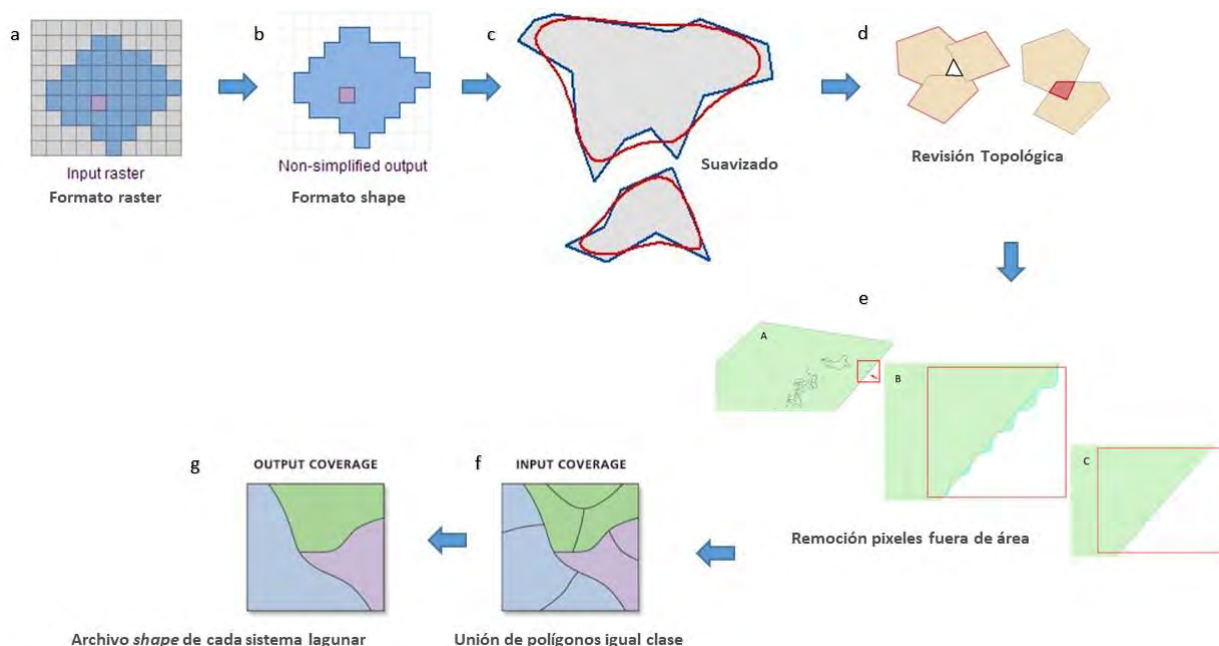
Posterior a obtener las coberturas de clasificación de los cuerpos de agua según el tipo de imagen satelital usada (Pleiades 1-A y Landsat 8) y por sistema lagunar, se procedió con la depuración de las coberturas. Este proceso consistió primero en la transformación de los datos desde formato *raster* a entidades de polígonos en formato *shape* (**Figura N°4-8, a y b**). El resultado se sometió a un proceso de suavizado, por la presencia de ángulos cerrados en sus contornos, para mejorar la calidad estética de la cartografía y su aproximación al contexto real (**Figura N°4-8, c**).

Adicionalmente, se realizó una depuración final en los *shapes*, la cual busca reducir errores de clasificación aleatorios siguiendo dos criterios:

- i) Revisión topológica de las coberturas, ante la presencia de espacios entre los bordes de los polígonos o bordes de polígonos superpuestos (**Figura N°4-8, d**) y,
- ii) Remoción de polígonos clasificados como cuerpos de agua con tamaño inferior al equivalente de un píxel (0,0004 ha en Pleiades - 1A y 0,09 ha en Landsat 8) y que surgen de la intersección con el área de estudio (**Figura N°4-8, e**).

Producto de estas operaciones se origina una clasificación binaria (cuerpos de agua / otros recubrimientos), que son fusionados con parámetros con igual codificación y ajustados a los polígonos que delimitan las áreas de estudio. El resultado final corresponde a un archivo en formato *shape* de cada sistema lagunar (La Punta - La Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor) (**Figura N°4-8, f y g**).

**Figura N°4-8. Diagrama del proceso de transformación y depuración de imágenes formato de cobertura continua (*raster*) a polígonos (*shape*).**



Dónde: **a:** Ingreso Raster; **b:** transformación a formato shape; **c:** suavizado de polígonos; **d:** corrección de errores topológicos; **e:** generación de entidades poligonales; **f:** fusión de polígonos. Fuente: Cedrem Consultores en base a imágenes ESRI.

#### 4.7 Análisis comparativo para seguimiento de la cobertura de cuerpos de agua

De acuerdo con lo expresado en la sección 4.2. *Parámetros utilizados para caracterizar el estado y seguimiento de los cuerpos de agua*, esta etapa dio cumplimiento a lo dispuesto por el PSAH, numeral 3.2.6 Superficie cubierta por lagunas (Anexo 3, Adenda 5 RWL, 2015 y a la RCA N°21/2016).

En base a estos documentos, el análisis comparativo de las superficies se realizó por sistema lagunar, de acuerdo con las siguientes tipologías:

- *Comparación con registros históricos de la Adenda 5 RWL (2015)*: se realizó entre el resultado de las superficies de lagunas registradas en los monitoreos de agosto y diciembre 2024, y las variaciones en relación con el mínimo histórico de la Adenda 5 RWL (2015).
- *Comparación entre imágenes satelitales*: se realizó una comparación entre las superficies determinadas en el monitoreo 2024 desde las imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y Landsat 8.
- *Comparación entre monitoreos anuales*: se realizó una comparación entre los resultados de las superficies lagunares en el monitoreo 2024, con respecto a los resultados de los monitoreos entre 2016 y 2023.

Cabe destacar que el actual monitoreo, describe los cuerpos de agua en condiciones de operación del proyecto.

#### 4.8 Fechas de medición

Respecto a la campaña de invierno, ésta se realizó los días **04 y 10 de agosto de 2024**. En forma paralela a la campaña de terreno se obtuvieron las imágenes Pleiades 1A, el **6 de agosto de 2024** (mosaico norte y sur), y la captura de la imagen de media resolución (Landsat 8) corresponde al **31 de julio de 2024**.

La campaña de verano 2024-2025, se realizó los días **15 y 21 de diciembre de 2024**. En forma paralela a la campaña de terreno se obtuvieron las imágenes Pleiades 1A, el **17 de diciembre de 2024** (mosaico norte y sur), y la captura de la imagen de media resolución (Landsat 8) corresponde al **22 de diciembre de 2024**.

Durante la campaña de invierno de 2024 no fue posible realizar en su totalidad la validación *in situ* programada, ya que se presentaron por parte de la Comunidad de Peine medidas de restricción que no permitieron el acceso al sector de lagunas de Peine (Salada y Saladita). En cuanto a la campaña de verano 2024-2025, estas restricciones limitaron el acceso a los sectores de las lagunas de Peine (Interna, Salada y Saladita); asimismo, en el sector Soncor, la validación se vio restringida por disposiciones de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) debido al período de nidificación de flamencos (ANEXO 9-26. Cartas de notificación de restricciones de acceso). En ninguno de los sectores, durante el verano 2024-2025 (diciembre), se realiza levantamiento aerofotogramétrico debido a la falta

de permisos pertinentes. En ambas temporadas se recurre a la fotointerpretación – validación en gabinete utilizando imágenes de alta resolución.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua

La validación del ajuste de las coberturas determinadas, con relación a los datos de terreno recabados y fotointerpretados, se realizó mediante el índice *Kappa*. Este índice tuvo una variación entre 0,99 y 0,46 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A (**Tabla N°5-1**) y desde 0,98 y 0,41 para imágenes de resolución media Landsat 8 (**Tabla N°5-2**) en agosto de 2024. Respecto de diciembre de 2024, este índice tuvo una variación entre 0,95 y 0,41 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A (**Tabla N°5-3**) y desde 0,93 a 0,37 para imágenes de resolución media Landsat 8 (**Tabla N°5-4**). Todos los valores antes indicados muestran una alta precisión del modelo de clasificación supervisada aplicado, que según el índice *Kappa* muestra un nivel de concordancia *aceptable a casi perfecta*<sup>9</sup>.

En relación con la precisión global, los valores tuvieron una variación entre 100% y 75% para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A (**Tabla N°5-1**) y entre 99% y 73% para imágenes de resolución media Landsat 8 (**Tabla N°5-2**) en agosto de 2024. Respecto de diciembre de 2024, la precisión global del modelo tuvo una variación entre 98% y 81% para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A (**Tabla N°5-3**) y desde 97% a 81% para imágenes de resolución media Landsat 8 (**Tabla N°5-4**). La precisión global expresa que proporción de puntos de validación coincidió correctamente con el modelo generado, expresado como un porcentaje, siendo la precisión del 100% una clasificación perfecta. Valores promedio sobre el 80% muestran una alta concordancia de lo observado, con el resultado del método de clasificación supervisada.

El sistema lagunar que muestra mayor ajuste en agosto de 2024 desde imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8, es el sector Soncor con 0,99 y 0,98, respectivamente. En el caso del sistema Soncor, la definición de los bordes lagunares y el confinamiento de los cuerpos de agua en áreas definidas con alto contraste en los recubrimiento, permite al modelo delimitar mejor las áreas de ocupación resultando en *kappa casi perfecto*. El menor ajuste para agosto 2024 se observa en el sector La Punta y La Brava, con 0,46 en Pleiades 1-A y 0,41 en Landsat 8, respectivamente; esto se debe principalmente a la fisonomía de los cuerpos de agua con poca definición de bordes, y discontinuidad de las áreas inundadas con otros recubrimientos poco definidos.

En relación con el mayor ajuste registrado en diciembre de 2024, se destaca el sistema lagunar de Soncor con un valor del índice *kappa* de 0,95 para Pleiades 1-A y 0,93 para Landsat 8. Por otro lado, el menor ajuste se observa en el sector La Punta - La Brava y Aguas de Quelana, registrando valores del índice *kappa* de 0,41 y 0,37 para Pleiades 1-A y Landsat 8, respectivamente.

De lo anterior, se señala que los mayores ajustes corresponden a los sectores que muestran una mayor definición de los cuerpos de agua, por sus características de topografía y tipo de sustrato, ya que se

<sup>9</sup> Valores cercanos a 1,00 indican una mayor concordancia inter-observador. Los rangos de valores son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

encuentran total o parcialmente delimitados por una diferencia de nivel de costra salina; por lo tanto, las respuestas espectrales son más claras, facilitando la determinación de umbrales de los parámetros del modelo y la clasificación final es mayormente coincidente con los determinados en terreno o por fotointerpretación visual (generalmente asociado a los sectores Peine y Soncor). Asimismo, los valores más bajos en el ajuste del modelo se reportan principalmente en sectores que muestran un gradiente de vegetación en los bordes lagunares, conformando un ecotono de vegetación, el cual conduce a una estimación menos precisa de los límites de la superficie de agua (proveniente principalmente de los parámetros NDVI y NIR). También ocurre con el retroceso de zonas inundadas con la exposición del sustrato que muchas veces está asociado a otros componentes, como microorganismos; o ante la discontinuidad de las inundaciones, generando parches que no son captados como unidades independientes, aumentando el error en sitios de transición seca – húmeda. De acuerdo con lo anterior, en los sectores La Punta – La Brava y Aguas de Quelana en el seguimiento 2024, se obtiene una baja de los cuerpos lagunares, y por ello la generación de cuerpos de agua discontinuos (de pequeña magnitud) y la exposición de recubrimientos mixtos (sal – microorganismos), que generan una discordancia entre lo “captado” por el sensor y lo corroborado por especialistas en terreno, repercutiendo en un menor índice *kappa* en dichos sectores.

**Tabla N°5-1. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1-A: Matriz de confusión y el índice Kappa por sistema lagunar. Agosto, 2024.**

| Sistema lagunar     | Recubrimiento del modelo de clasificación | * Número de Puntos de validación de terreno/fotointerpretación |                      |            | **Exactitud del muestreo (%) | ****Error de comisión (%) |      |
|---------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|------------|------------------------------|---------------------------|------|
|                     |                                           | Cuerpos de agua                                                | Otros Recubrimientos | Total      |                              |                           |      |
| La Punta y La Brava | Cuerpos de agua                           | 55                                                             | 73                   | 128        | 43,0                         | 57,0                      |      |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 1                                                              | 176                  | 177        | 99,4                         | 0,6                       |      |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>56</b>                                                      | <b>249</b>           | <b>305</b> | -                            | -                         |      |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 98,2                                                           | 70,7                 | -          | -                            | -                         |      |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 1,8                                                            | 29,3                 | -          | -                            | Índice Kappa:             | 0,46 |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 76%  |
| Peine               | Cuerpos de agua                           | 80                                                             | 47                   | 127        | 63,0                         | 37,0                      |      |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 0                                                              | 64                   | 64         | 100,0                        | 0,0                       |      |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>80</b>                                                      | <b>111</b>           | <b>191</b> | -                            | -                         |      |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 100,0                                                          | 57,7                 | -          | -                            | -                         |      |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 0,0                                                            | 42,3                 | -          | -                            | Índice Kappa:             | 0,53 |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 75%  |
| Aguas de Quelana    | Cuerpos de agua                           | 31                                                             | 14                   | 45         | 68,9                         | 31,1                      |      |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 2                                                              | 37                   | 39         | 94,9                         | 5,1                       |      |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>33</b>                                                      | <b>51</b>            | <b>84</b>  | -                            | -                         |      |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 93,9                                                           | 72,5                 | -          | -                            | -                         |      |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 6,1                                                            | 27,5                 | -          | -                            | Índice Kappa:             | 0,62 |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 81%  |
| Soncor              | Cuerpos de agua                           | 101                                                            | 0                    | 101        | 100,0                        | 0,0                       |      |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 1                                                              | 154                  | 155        | 99,4                         | 0,6                       |      |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>102</b>                                                     | <b>154</b>           | <b>256</b> | -                            | -                         |      |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 99,0                                                           | 100,0                | -          | -                            | -                         |      |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 1,0                                                            | 0,0                  | -          | -                            | Índice Kappa:             | 0,99 |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 100% |

Dónde: \* número de puntos verificados en terreno – *in situ* – o fotointerpretados, en donde hubo coincidencia con la información del modelo \*\*Exactitud del muestreo: relación entre el número de puntos asignados correctamente y el total de los puntos por cobertura; \*\*\*El error de omisión lo conforman los residuales de las columnas ubicados en la parte inferior de la matriz, estos indican la cobertura que no se incluyó en el modelo; \*\*\*\*El error de comisión explica los puntos del mapa que no coincidieron con la realidad (Chuvieco, 2006). Exactitud de campo, en referencia al conocimiento previo recopilado de terreno *in situ* o la observación indirecta del territorio por medio de fuentes digitales (imagen satelital – imagen fuente UVA/dron) (Chuvieco, 2006).  
Elaboración propia.

**Tabla N°5-2. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Landsat 8: Matriz de confusión y el índice Kappa por sistema lagunar. Agosto, 2024.**

| Sistema lagunar     | Recubrimiento del modelo de clasificación | * Número de Puntos de validación de terreno/fotointerpretación |                      |            | **Exactitud del muestreo (%) | ****Error de comisión (%) |      |
|---------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|------------|------------------------------|---------------------------|------|
|                     |                                           | Cuerpos de agua                                                | Otros Recubrimientos | Total      |                              |                           |      |
| La Punta y La Brava | Cuerpos de agua                           | 18                                                             | 23                   | 41         | 43,9                         | 56,1                      |      |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 3                                                              | 53                   | 56         | 94,6                         | 5,4                       |      |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>21</b>                                                      | <b>76</b>            | <b>97</b>  | -                            | -                         |      |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 85,7                                                           | 69,7                 | -          | -                            | -                         |      |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 14,3                                                           | 30,3                 | -          | -                            | Índice Kappa:             | 0,41 |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 73%  |
| Peine               | Cuerpos de agua                           | 100                                                            | 19                   | 119        | 84,0                         | 16,0                      |      |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 3                                                              | 60                   | 63         | 95,2                         | 4,8                       |      |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>103</b>                                                     | <b>79</b>            | <b>182</b> | -                            | -                         |      |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 97,1                                                           | 75,9                 | -          | -                            | -                         |      |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 2,9                                                            | 24,1                 | -          | -                            | Índice Kappa:             | 0,75 |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 88%  |
| Aguas de Quelana    | Cuerpos de agua                           | 29                                                             | 15                   | 44         | 65,9                         | 34,1                      |      |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 3                                                              | 37                   | 40         | 92,5                         | 7,5                       |      |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>32</b>                                                      | <b>52</b>            | <b>84</b>  | -                            | -                         |      |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 90,6                                                           | 71,2                 | -          | -                            | -                         |      |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 9,4                                                            | 28,8                 | -          | -                            | Índice Kappa:             | 0,58 |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 79%  |
| Soncor              | Cuerpos de agua                           | 91                                                             | 1                    | 92         | 98,9                         | 1,1                       |      |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 1                                                              | 140                  | 141        | 99,3                         | 0,7                       |      |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>92</b>                                                      | <b>141</b>           | <b>233</b> | -                            | -                         |      |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 98,9                                                           | 99,3                 | -          | -                            | -                         |      |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 1,1                                                            | 0,7                  | -          | -                            | Índice Kappa:             | 0,98 |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 99%  |

Dónde: \* número de puntos verificados en terreno – *in situ* – o fotointerpretados, en donde hubo coincidencia con la información del modelo \*\*Exactitud del muestreo: relación entre el número de puntos asignados correctamente y el total de los puntos por cobertura; \*\*\*El error de omisión lo conforman los residuales de las columnas ubicados en la parte inferior de la matriz, estos indican la cobertura que no se incluyó en el modelo; \*\*\*\*El error de comisión explica los puntos del mapa que no coincidieron con la realidad (Chuvieco, 2006). Exactitud de campo, en referencia al conocimiento previo recopilado de terreno *in situ* o la observación indirecta del territorio por medio de fuentes digitales (imagen satelital – imagen fuente UVA/dron) (Chuvieco, 2006).

Elaboración propia.

**Tabla N°5-3. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1-A: Matriz de confusión y el índice *Kappa* por sistema lagunar. Diciembre de 2024.**

| Sistema lagunar     | Recubrimiento del modelo de clasificación | * Número de Puntos de validación de terreno/fotointerpretación |                      |            | **Exactitud del muestreo (%) | ****Error de comisión (%) |     |
|---------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|------------|------------------------------|---------------------------|-----|
|                     |                                           | Cuerpos de agua                                                | Otros Recubrimientos | Total      |                              |                           |     |
| La Punta y La Brava | Cuerpos de agua                           | 27                                                             | 57                   | 84         | 32,1                         | 67,9                      |     |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 0                                                              | 221                  | 221        | 100,0                        | 0,0                       |     |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>27</b>                                                      | <b>278</b>           | <b>305</b> | -                            | -                         |     |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 100,0                                                          | 79,5                 | -          | -                            | -                         |     |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 0,0                                                            | 20,5                 | -          | -                            | Índice Kappa: 0,41        |     |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 81% |
| Peine               | Cuerpos de agua                           | 99                                                             | 20                   | 119        | 83,2                         | 16,8                      |     |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 0                                                              | 72                   | 72         | 100,0                        | 0,0                       |     |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>99</b>                                                      | <b>92</b>            | <b>191</b> | -                            | -                         |     |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 100,0                                                          | 78,3                 | -          | -                            | -                         |     |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 0,0                                                            | 21,7                 | -          | -                            | Índice Kappa: 0,79        |     |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 90% |
| Aguas de Quelana    | Cuerpos de agua                           | 5                                                              | 9                    | 14         | 35,7                         | 64,3                      |     |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 0                                                              | 70                   | 70         | 100,0                        | 0,0                       |     |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>5</b>                                                       | <b>79</b>            | <b>84</b>  | -                            | -                         |     |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 100,0                                                          | 88,6                 | -          | -                            | -                         |     |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 0,0                                                            | 11,4                 | -          | -                            | Índice Kappa: 0,48        |     |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 89% |
| Soncor              | Cuerpos de agua                           | 92                                                             | 6                    | 98         | 93,9                         | 6,1                       |     |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 0                                                              | 158                  | 158        | 100,0                        | 0,0                       |     |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>92</b>                                                      | <b>164</b>           | <b>256</b> | -                            | -                         |     |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 100,0                                                          | 96,3                 | -          | -                            | -                         |     |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 0,0                                                            | 3,7                  | -          | -                            | Índice Kappa: 0,95        |     |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 98% |

Dónde: \* número de puntos verificados en terreno – *in situ* – o fotointerpretados, en donde hubo coincidencia con la información del modelo \*\*Exactitud del muestreo: relación entre el número de puntos asignados correctamente y el total de los puntos por cobertura; \*\*\*El error de omisión lo conforman los residuales de las columnas ubicados en la parte inferior de la matriz, estos indican la cobertura que no se incluyó en el modelo; \*\*\*\*El error de comisión explica los puntos del mapa que no coincidieron con la realidad (Chuvieco, 2006). Exactitud de campo, en referencia al conocimiento previo recopilado de terreno *in situ* o la observación indirecta del territorio por medio de fuentes digitales (imagen satelital – imagen fuente UVA/dron) (Chuvieco, 2006).  
Elaboración propia.

**Tabla N°5-4. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Landsat 8: Matriz de confusión y el índice Kappa por sistema lagunar. Diciembre de 2024.**

| Sistema lagunar     | Recubrimiento del modelo de clasificación | * Número de Puntos de validación de terreno/fotointerpretación |                      |            | **Exactitud del muestreo (%) | ****Error de comisión (%) |     |
|---------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|------------|------------------------------|---------------------------|-----|
|                     |                                           | Cuerpos de agua                                                | Otros Recubrimientos | Total      |                              |                           |     |
| La Punta y La Brava | Cuerpos de agua                           | 9                                                              | 9                    | 18         | 50,0                         | 50,0                      |     |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 2                                                              | 77                   | 79         | 97,5                         | 2,5                       |     |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>11</b>                                                      | <b>86</b>            | <b>97</b>  | -                            | -                         |     |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 81,8                                                           | 89,5                 | -          | -                            | -                         |     |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 18,2                                                           | 10,5                 | -          | -                            | Índice Kappa: 0,56        |     |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 89% |
| Peine               | Cuerpos de agua                           | 82                                                             | 34                   | 116        | 70,7                         | 29,3                      |     |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 1                                                              | 65                   | 66         | 98,5                         | 1,5                       |     |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>83</b>                                                      | <b>99</b>            | <b>182</b> | -                            | -                         |     |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 98,8                                                           | 65,7                 | -          | -                            | -                         |     |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 1,2                                                            | 34,3                 | -          | -                            | Índice Kappa: 0,62        |     |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 81% |
| Aguas de Quelana    | Cuerpos de agua                           | 4                                                              | 10                   | 14         | 28,6                         | 71,4                      |     |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 1                                                              | 69                   | 70         | 98,6                         | 1,4                       |     |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>5</b>                                                       | <b>79</b>            | <b>84</b>  | -                            | -                         |     |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 80,0                                                           | 87,3                 | -          | -                            | -                         |     |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 20,0                                                           | 12,7                 | -          | -                            | Índice Kappa: 0,37        |     |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 87% |
| Soncor              | Cuerpos de agua                           | 86                                                             | 3                    | 89         | 96,6                         | 3,4                       |     |
|                     | Otros Recubrimientos                      | 5                                                              | 139                  | 144        | 96,5                         | 3,5                       |     |
|                     | <b>Total</b>                              | <b>91</b>                                                      | <b>142</b>           | <b>233</b> | -                            | -                         |     |
|                     | Exactitud de Campo (%)                    | 94,5                                                           | 97,9                 | -          | -                            | -                         |     |
|                     | ***Error omisión (%)                      | 5,5                                                            | 2,1                  | -          | -                            | Índice Kappa: 0,93        |     |
|                     |                                           |                                                                |                      |            |                              | Precisión global (OA):    | 97% |

Dónde: \* número de puntos verificados en terreno – *in situ* – o fotointerpretados, en donde hubo coincidencia con la información del modelo \*\*Exactitud del muestreo: relación entre el número de puntos asignados correctamente y el total de los puntos por cobertura; \*\*\*El error de omisión lo conforman los residuales de las columnas ubicados en la parte inferior de la matriz, estos indican la cobertura que no se incluyó en el modelo; \*\*\*\*El error de comisión explica los puntos del mapa que no coincidieron con la realidad (Chuvieco, 2006). Exactitud de campo, en referencia al conocimiento previo recopilado de terreno *in situ* o la observación indirecta del territorio por medio de fuentes digitales (imagen satelital – imagen fuente UVA/dron) (Chuvieco, 2006).  
Elaboración propia.

## 5.2 Resultados Superficies de cuerpos de agua por sistema lagunar

En términos generales, la **Tabla N°5-5** y **Tabla N°5-6** presentan las superficies de los cuerpos de agua que fueron determinadas a partir del modelo de clasificación supervisada. Al contrastar los resultados anuales de los cuatro sistemas en 2024, se observa que la mayor cobertura tanto en invierno como en verano, son para el sector Soncor con 155,3 ha y 125,8 ha desde Pleiades 1-A; y de 154,0 y 141,2 desde Landsat 8. En tanto, las menores superficies observadas desde el análisis con Landsat 8 y Pleiades 1-A, se presentaron en el sector Aguas de Quelana, en invierno 2023 y verano 2024-2025.

A continuación, en la **Tabla N°5-5**, se describe el detalle por sistema lagunar, de las coberturas determinadas desde la imagen de alta resolución (Pleiades 1-A) y la comparación tanto con los registros históricos de la Adenda 5 RWL (2015), como con las superficies desde Landsat 8 (**Tabla N°5-6**).

**Tabla N°5-5. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y datos obtenidos en el monitoreo 2024 (invierno y verano), respecto de los registros históricos (Adenda 5 RWL, 2015).**

| Sistema Lagunar            | Superficie Mínima Histórica Adenda 5<br>(ha) Quickbird/Worldview/Geoeye** |           | Superficies lagunares (ha) Monitoreo Fase Operación* |             |                         |             |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
|                            |                                                                           |           | Invierno 2024 (agosto)                               |             | Verano 2024 (diciembre) |             |
|                            | ha                                                                        | m²        | ha                                                   | m²          | ha                      | m²          |
| <b>La Punta y La Brava</b> | 31,6<br>feb-14                                                            | 316.000   | 40,7                                                 | 407.332,2   | 24,4                    | 243.682,9   |
| <b>Peine</b>               | 48,9<br>mar-06                                                            | 489.000   | 31,4                                                 | 313.749,3   | 27,5                    | 275.083,5   |
| <b>Aguas de Quelana</b>    | 11,3<br>mar-07                                                            | 113.000   | 70,9                                                 | 708.985,1   | 3,0                     | 30.007,6    |
| <b>Soncor</b>              | 192,4<br>mar-07                                                           | 1.924.000 | ***155,5                                             | 1.555.486,6 | 125,8                   | 1.257.816,2 |

Dónde: \*Superficies a partir de modelo de clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre y agosto 2024. (\*\*):

Las fechas en que se obtuvieron los registros históricos, corresponden a las que se presentaron en el “*Apéndice B*.”

*Determinación Espacio Temporal de la Vegetación Azonal y Cuerpos de agua* del “*Anexo 2 Plan de Manejo Biótico*” y que se enmarcan en las áreas definidas por los polígonos indicados en la RCA N°21/2016 (Considerando N°7), “*Polígonos en Tabla de 3-4 del Anexo 3*” del PSAH del proyecto.\*\*\*Se rectifica el valor de superficie de agosto, que había sido reportada a la SMA a través de Comprobante N°1056989, de fecha 08/10/2024; al detectar un error en la transcripción del valor original).

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla N°5-6. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales Landsat 8 y datos obtenidos en el monitoreo 2024 (invierno y verano), respecto de los registros de la Adenda 5 RWL (2015).**

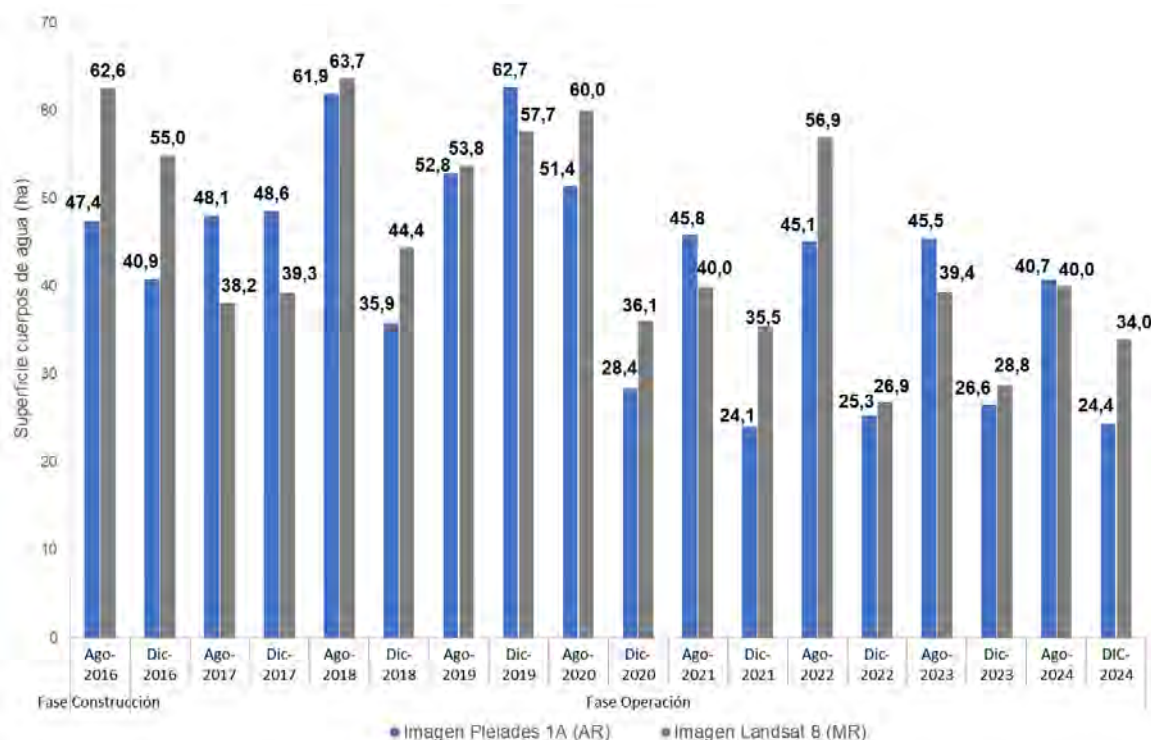
| Sistema Lagunar            | Superficie Mínima Histórica (ha)<br>Adenda 5 Landsat Histórico |           | Superficies lagunares (ha) Monitoreo Fase Operación |             |                         |             |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
|                            |                                                                |           | Invierno 2024 (agosto)                              |             | Verano 2024 (diciembre) |             |
|                            | ha                                                             | m²        | ha                                                  | m²          | ha                      | m²          |
| <b>La Punta y La Brava</b> | 19,2<br>mar-73                                                 | 192.000   | 40,0                                                | 400.103,0   | 34,0                    | 340.036,7   |
| <b>Peine</b>               | 25,4<br>nov-75                                                 | 254.000   | 42,4                                                | 424.333,4   | 22,8                    | 227.885,9   |
| <b>Aguas de Quelana</b>    | 0,2<br>(nov 1975, feb - mar 1976)                              | 2.000     | 59,8                                                | 598.204,1   | 6,2                     | 62.437,8    |
| <b>Soncor</b>              | 143,3<br>feb-76                                                | 1.433.000 | 154,0                                               | 1.540.142,5 | 141,2                   | 1.411.927,4 |

Dónde: \*Superficies a partir de modelo de clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre y agosto 2024. (\*\*): Superficies de mediana resolución (LANDSAT), que se presentaron para el PSAH en el “*Apéndice L. Monitoreo de dinámica espaciotemporal de lagunas de la Zona Marginal del Salar de Atacama a través de imágenes satelitales LANDSAT*” y que se enmarcan en las áreas definidas por los polígonos indicados en la RCA N°21/2016 (Considerando N°7), “*Polígonos en Tabla de 3-4 del Anexo 3*” del PSAH del proyecto. Fuente: Elaboración Propia

### 5.2.1 La Punta - La Brava

En el sistema lagunar La Punta - La Brava, la cobertura de cuerpos de agua estimada a partir de imágenes satelitales de alta resolución Pleiades 1-A en agosto de 2024 es de 40,7 ha y en diciembre 2024 abarca una superficie de 24,4 ha (**Tabla N°5-5**). La **Figura N°5-1** muestra los resultados gráficos y numéricos de las superficies monitoreadas entre 2016 a 2024, desde que se aprobó la RCA 021/2016. La Figura 5-2 muestra las imágenes para el año 2024.

**Figura N°5-1. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar La Punta - La Brava.**



Dónde; **MR**: Imagen de Mediana Resolución (píxel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (píxel menor a 4m). Fuente: Cedrem Consultores a partir de modelo de clasificación supervisada.

En este sistema lagunar, desde las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 40,0 ha en agosto de 2024, y en diciembre 2024 se calculó que la superficie de estos cuerpos es de 34,0 ha. Los valores de agosto 2024, en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Pleiades sobre Landsat de un +1,8% (+0,7 ha) para este periodo. En diciembre de 2024, la comparativa entre imágenes, muestra una diferencia de Landsat sobre Pleiades de un +39,5% (+9,6 ha) para este periodo. Las variaciones de resultados entre los sensores (Landsat - Pleiades) se deben principalmente a las diferencias en la resolución espacial, es decir, al tamaño de píxel. Esto se traduce en un mayor grosor de los resultados generados por el modelo de resolución media en comparación con un modelo de alta resolución, que proporciona un mayor nivel de detalle. Este incremento en la definición de los bordes o contornos del recubrimiento se logra gracias a la mejora en el contraste y la respuesta espectral ofrecida por las imágenes de alta resolución.

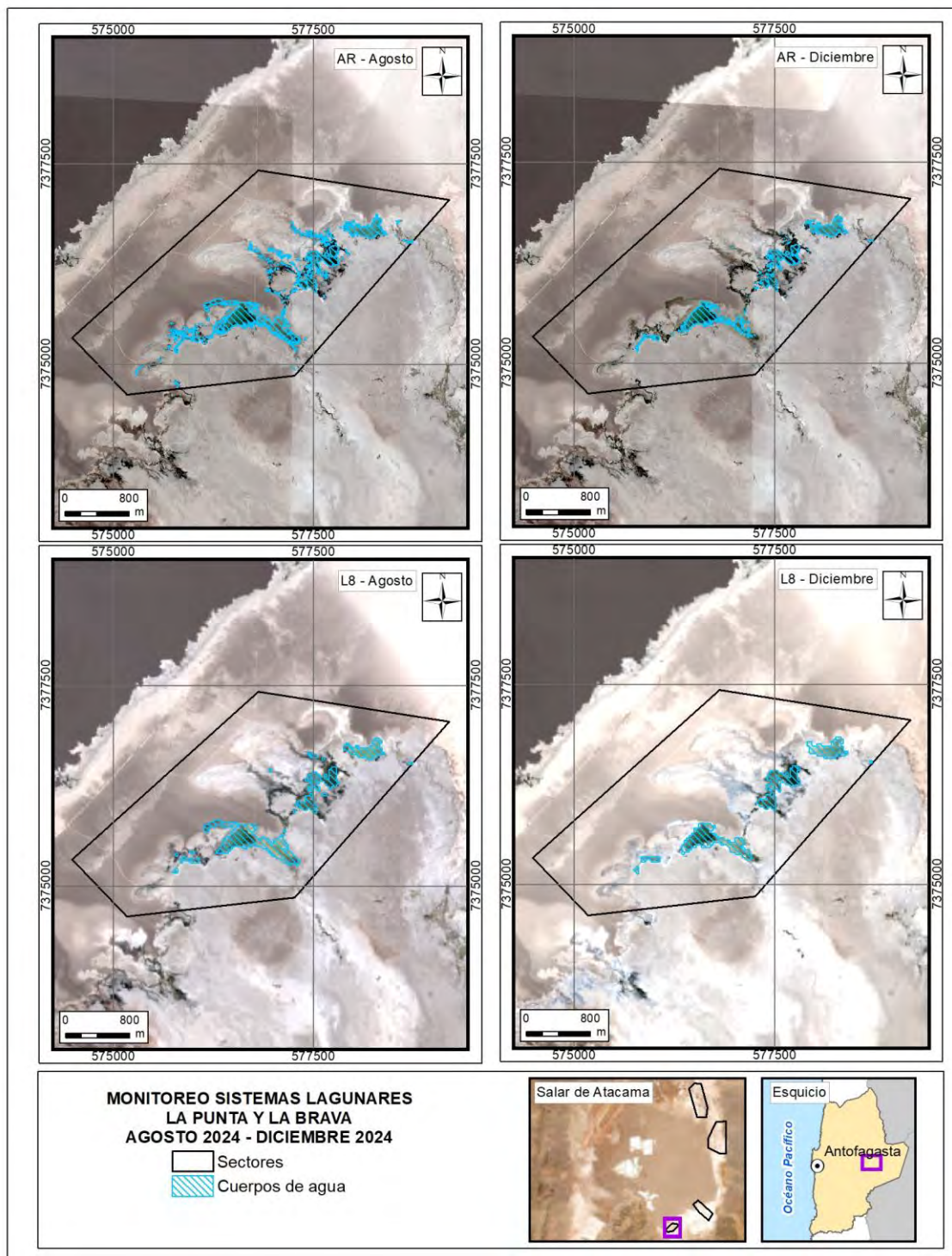
La correlación entre las superficies desde 2016 a 2024 en el sector La Punta - La Brava, calculadas desde de alta resolución (Pleiades) y desde media resolución (Landsat), y según el coeficiente de correlación de Pearson, muestra que las variables tienen una correlación de 0,776<sup>10</sup> lo que indica una relación positiva moderada entre variables ( $r^2 = 60,2\%$ ); mientras que el valor  $p$  es de 0,0001 lo que indica que existe significancia estadística de la asociación entre las variables Pleiades y Landsat.

Las **Figura N°5-3** a la **Figura N°5-6**, muestran las superficies de los cuerpos de agua según tipo de imagen por año de monitoreo, desde 2016 a la fecha y su representación espacial respectivamente. Para el sector de La Punta - La Brava, la comparación de la superficie calculada en este sistema revela patrones cíclicos. En los **registros de invierno** la superficie de cuerpos de agua del sistema lagunar entre agosto 2016 y agosto 2024, utilizando imágenes satelitales de alta resolución (Pleiades 1A) y media resolución (Landsat 8), muestra 2 periodos. Entre agosto 2016 y agosto 2020, se observa un periodo cíclico de variación con valores mayores en agosto 2018 y agosto 2020, cuando ambas fuentes reportan valores cercanos a las 60 hectáreas. Posterior a este periodo, entre diciembre 2020 hasta la actualidad diciembre 2024, en general se tienen superficies lagunares menores, a partir de agosto 2021 comienza un periodo de disminución de las superficies de invierno. En este último año 2024, las superficies de invierno son similares a las del invierno 2023.

Por otra parte, el análisis de la superficie de cuerpos de agua en los **registros de verano** entre 2016 y 2024, muestra que entre 2016 y 2019 existe un aumento en la superficie de los cuerpos de agua, con el valor más alto registrado en diciembre 2019, con ambas fuentes reportan más de 57 hectáreas. Durante el periodo de 2020 a 2024, la superficie en general muestra una disminución de la condición de verano, reduciéndose a valores inferiores a 28 hectáreas para AR. Landsat 8 presenta un leve incremento en 2024, mientras que Pleiades 1A mantiene valores similares a los de los años anteriores. Las diferencias entre las mediciones de Pleiades y Landsat coinciden en la tendencia general: un crecimiento inicial, seguido de una fase de reducción y mantención. En este último año 2024, las superficies de verano son muy similares a las de verano 2023.

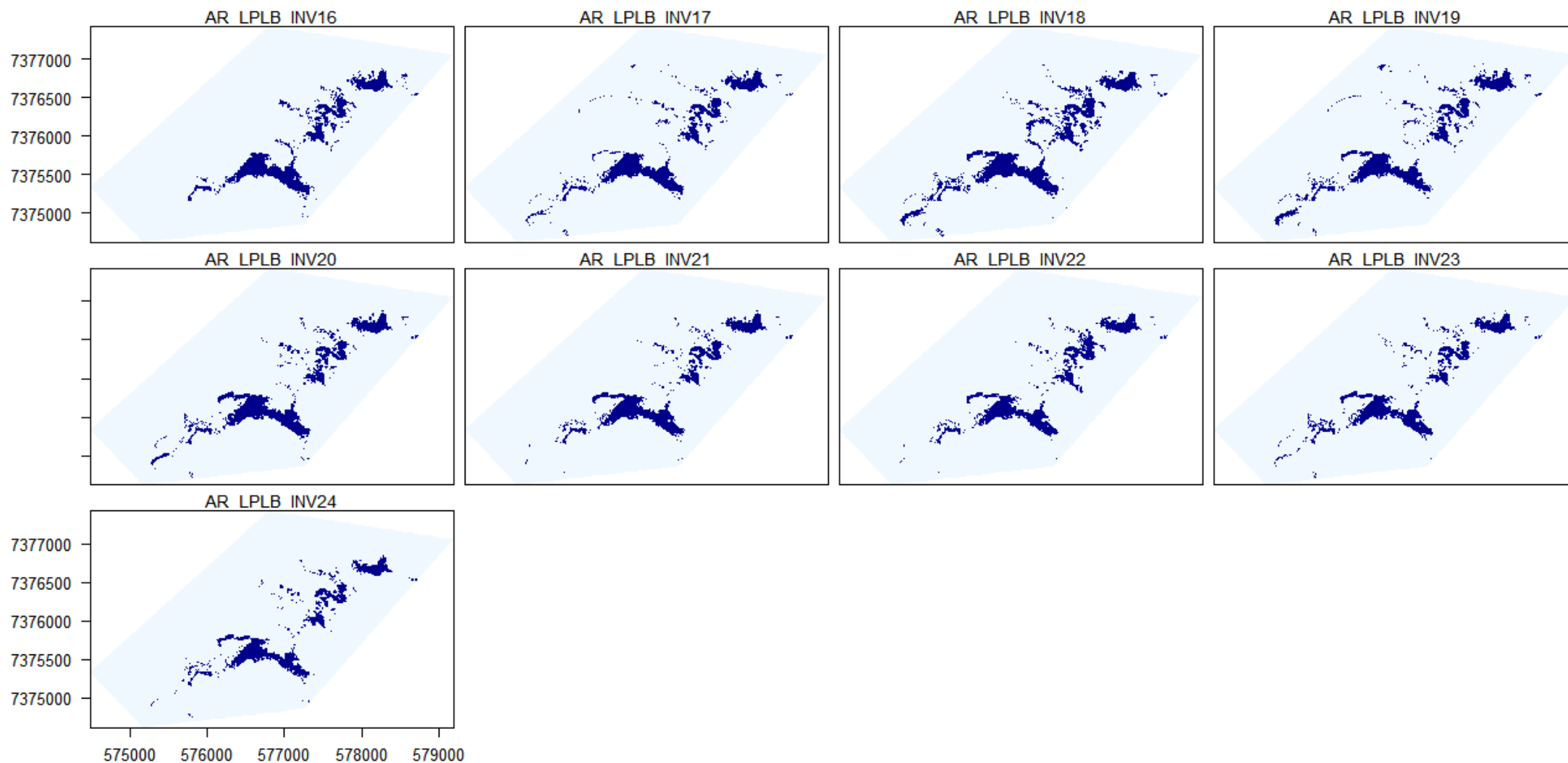
<sup>10</sup> El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a +1. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

**Figura N°5-2. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar La Punta - La Brava, agosto – diciembre 2024.**



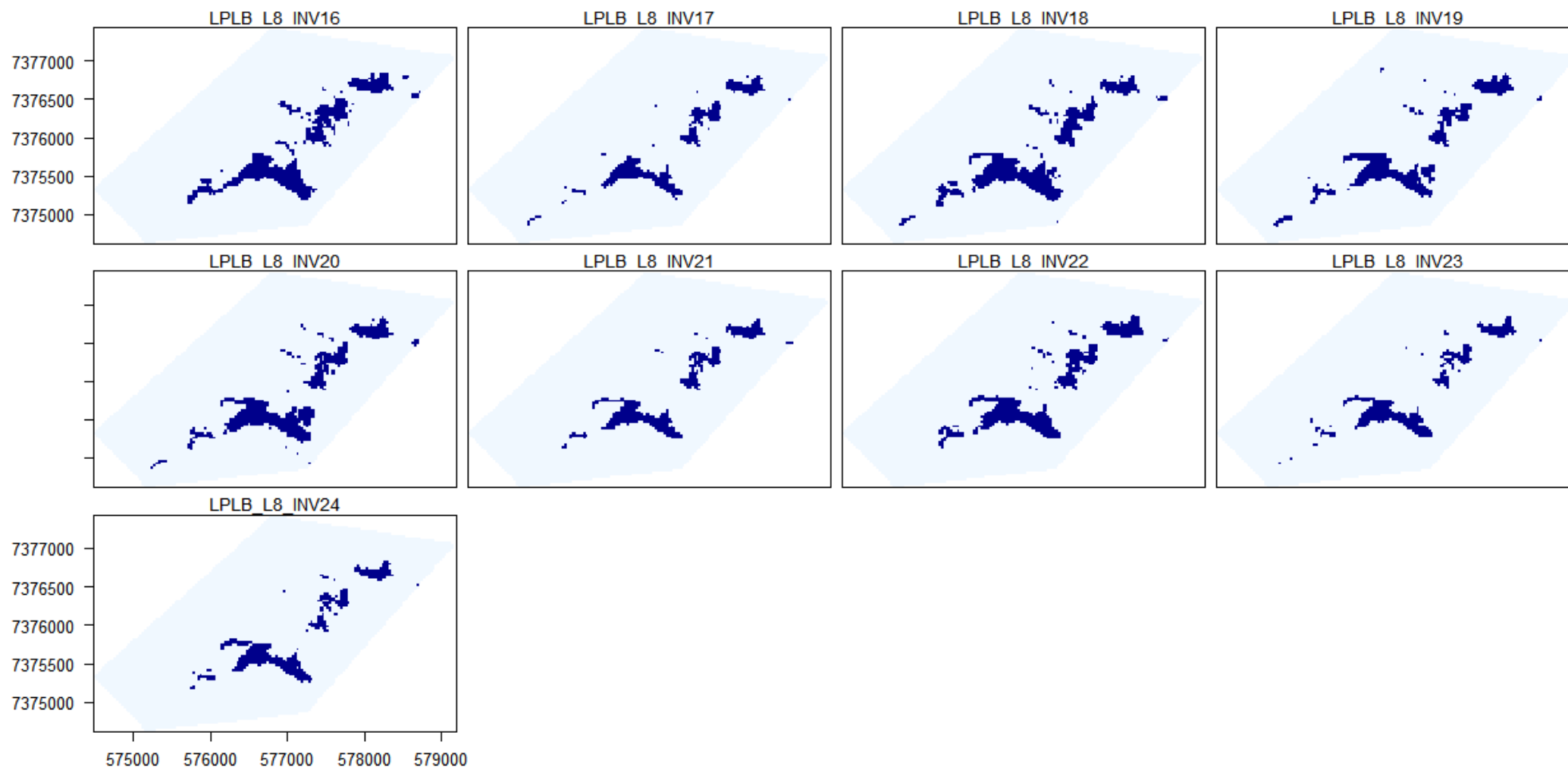
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto y diciembre de 2024.

**Figura N°5-3. Registros de superficies lagunares de seguimiento (inviernos 2016 a 2024), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1-A.**



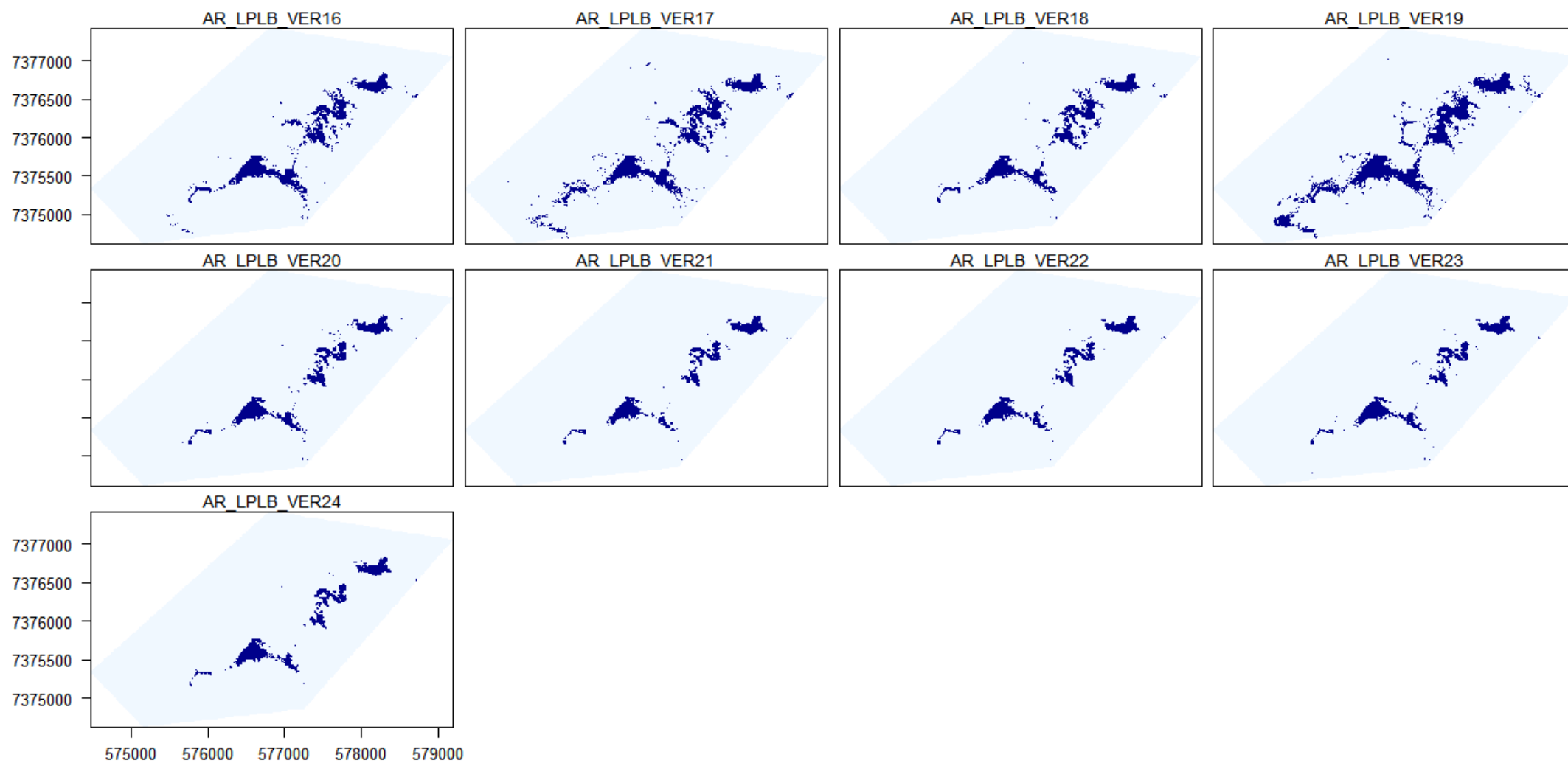
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2024

**Figura N°5-4. Registros de superficies lagunares de seguimiento (inviernos 2016 a 2024), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Landsat 8.**



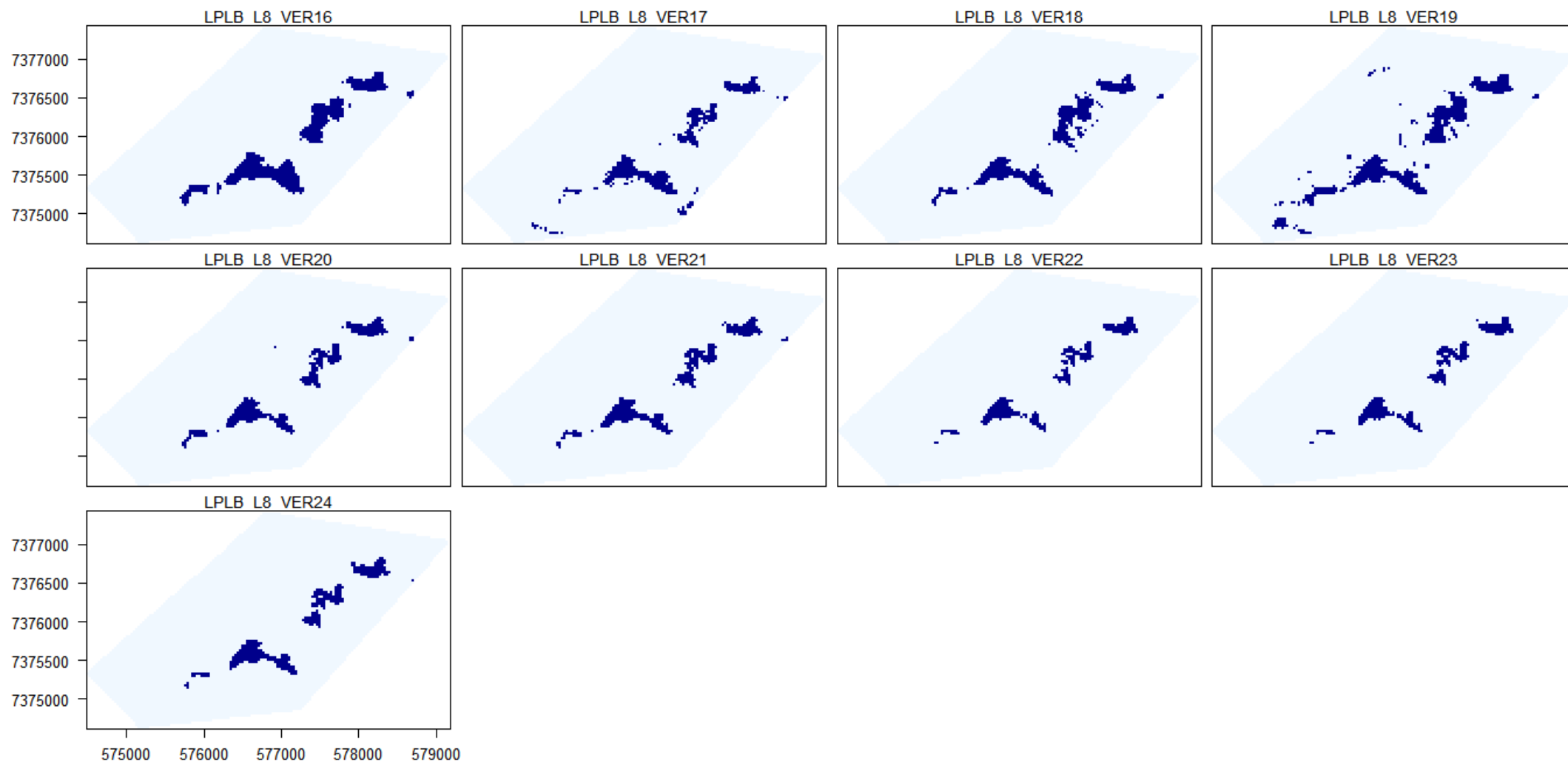
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2024

**Figura N°5-5. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1-A.**



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2024

**Figura N°5-6. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Landsat 8.**

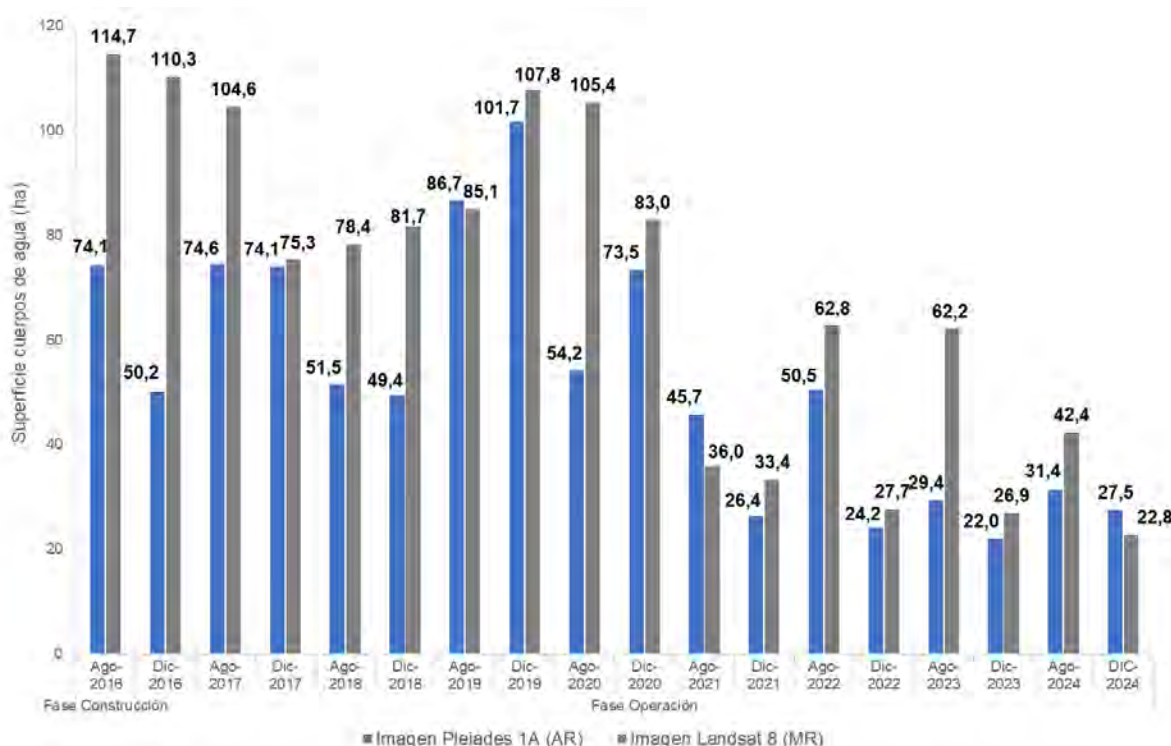


Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2024

## 5.2.2 Peine

En el sistema lagunar Peine, la cobertura de cuerpos de agua estimada a partir de imágenes satelitales de alta resolución Pleiades 1-A en agosto de 2024 es de 31,4 ha y en diciembre 2024 abarca una superficie de 27,5 ha (**Tabla N°5-5**). La **Figura N°5-7**, muestran los resultados gráficos y numéricos de las superficies monitoreadas entre 2016 a 2024, desde que se aprobó la RCA 021/2016. La **Figura N°5-8** muestra las imágenes para el año 2024.

**Figura N°5-7. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar Peine.**



Dónde; **MR**: Imagen de Mediana Resolución (píxel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (píxel menor a 4m).

Fuente: Cedrem Consultores a partir de modelo de clasificación supervisada.

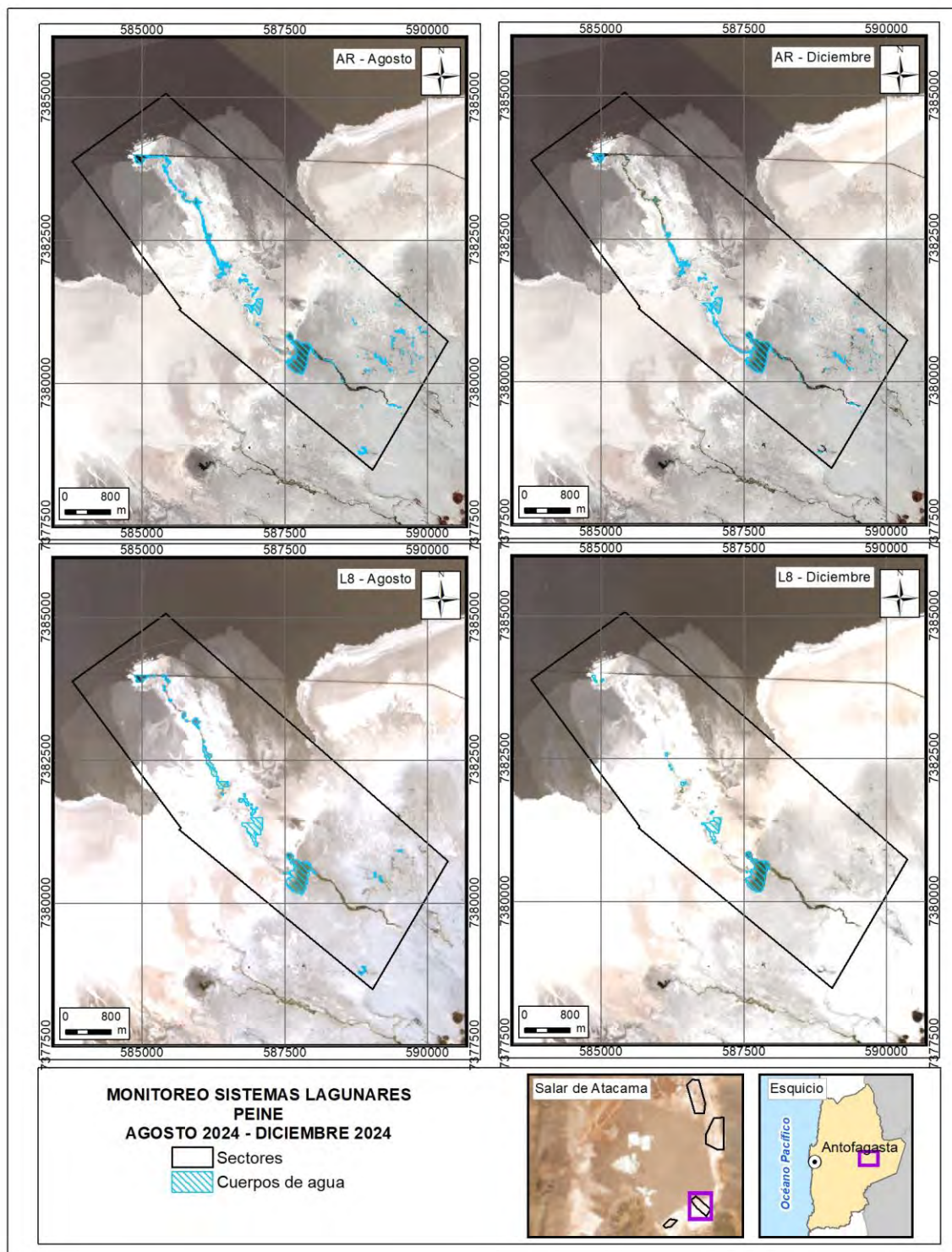
En el sistema lagunar Peine, desde las imágenes Landsat 8 se calculó una cobertura de cuerpos de agua que abarca una superficie 42,4 ha en agosto de 2024; estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat sobre Pleiades de un +35,2% (+11,1 ha) para este periodo. Para las imágenes de diciembre 2024 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua en mediana resolución abarca una superficie de 22,8 ha, estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Pleiades sobre Landsat de un +20,7% (+4,7 ha) para este periodo. Estas diferencias son atribuibles principalmente a la resolución espacial de las imágenes de media resolución, que entrega un modelo con bordes menos definidos en comparación al modelo de alta resolución que presenta una mayor definición de los bordes o contorno del recubrimiento agua, por la mejora del contraste y respuesta espectral que otorga las imágenes de alta resolución.

La correlación entre las superficies del sector Peine desde 2016 a 2024, calculadas desde de alta resolución (Pleiades) y desde media resolución (Landsat), y según el coeficiente de correlación de Pearson, muestra que las variables tienen una correlación de 0,783<sup>11</sup> lo que indica una relación positiva moderada entre variables ( $r^2 = 61,2\%$ ); mientras que el valor  $p$  es de 0,0001 lo que indica que existe significancia estadística de la asociación entre las variables Pleiades y Landsat.

La **Figura N°5-9** a la **Figura N°5-12**, muestran el análisis de las superficies de lagunas en el sector Peine, evidenciando variaciones significativas en su extensión a lo largo de los años. Se observa un menor crecimiento en los inviernos de 2016 y 2017, seguido por una disminución en 2018. En el invierno de 2019, se registra un aumento considerable debido a las precipitaciones. Estas fluctuaciones indican la influencia de condiciones climáticas y otros factores en la dinámica de las lagunas. La Laguna Interna destaca como una parte significativa de los cambios, mostrando variaciones notables en su zona de inundación. En el verano de 2024, persiste la disminución en las zonas de interconexión entre la Laguna Interna y la Laguna Salada. Además, el análisis de imágenes de alta resolución revela una reducción en las coberturas de cuerpos de agua desde el verano de 2021, especialmente en las áreas de Laguna Interna y Saladita, debido a variaciones en la inundación.

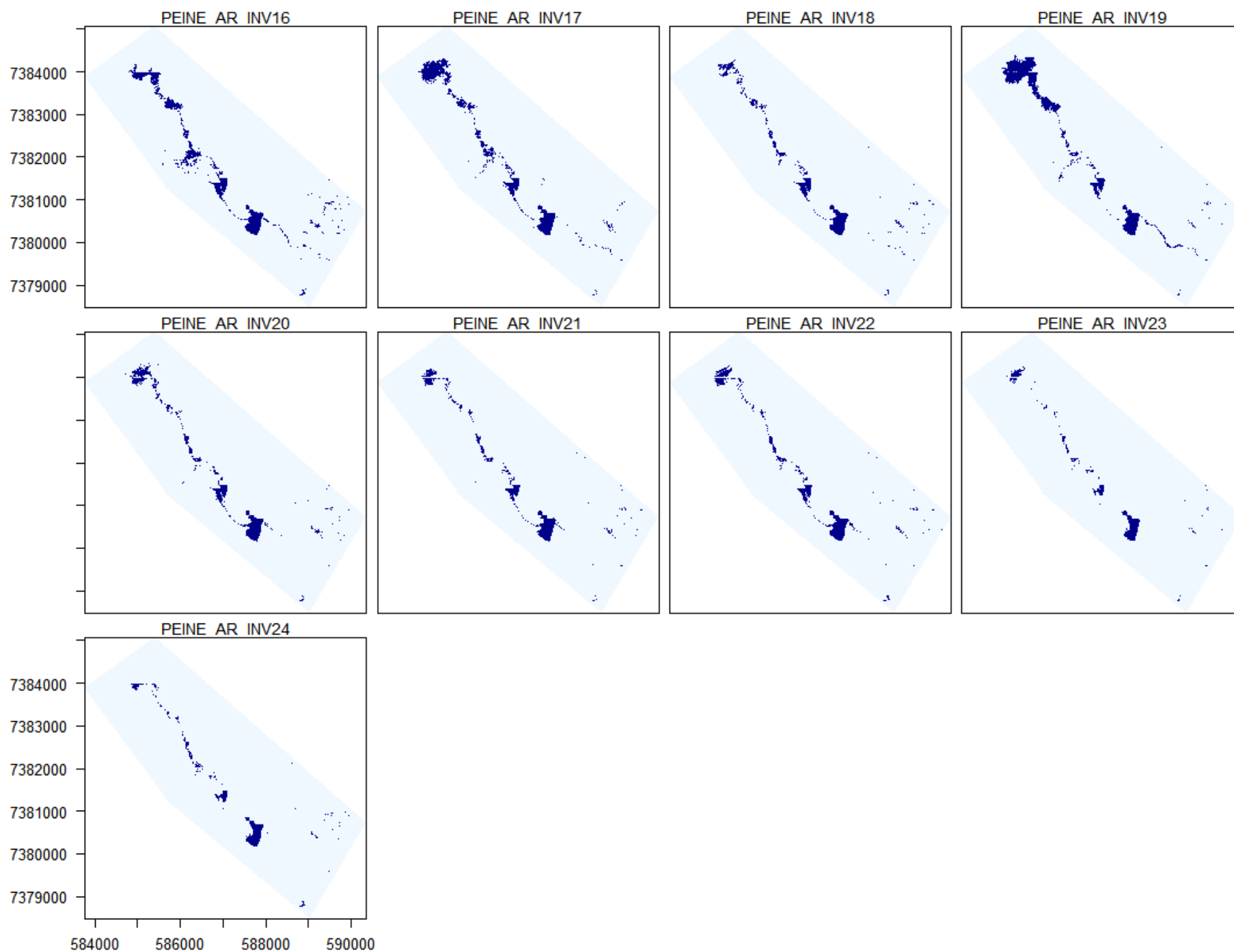
<sup>11</sup> El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a +1. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

**Figura N°5-8. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Peine, agosto – diciembre 2024.**



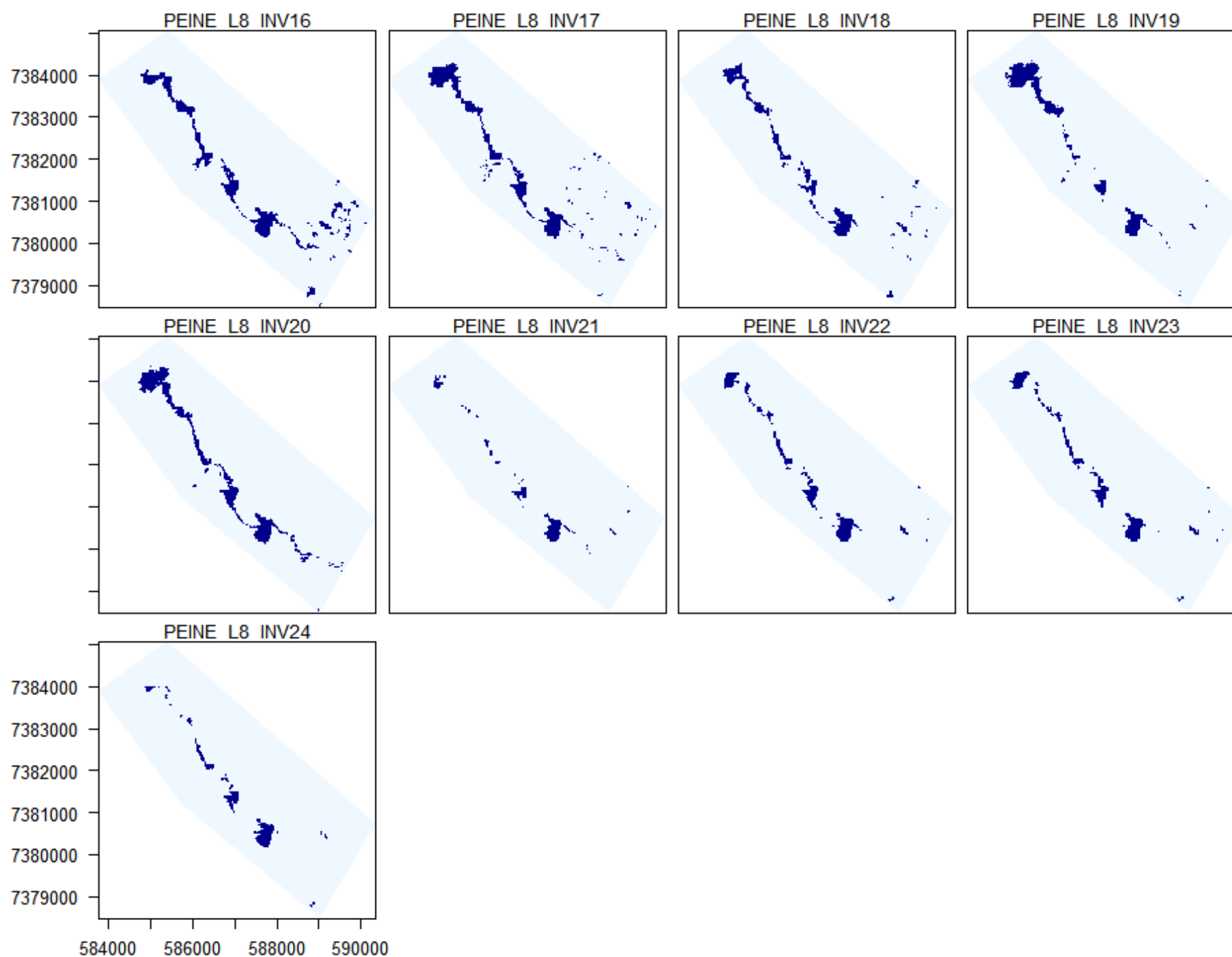
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto y diciembre 2024.

**Figura N°5-9. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1-A.**



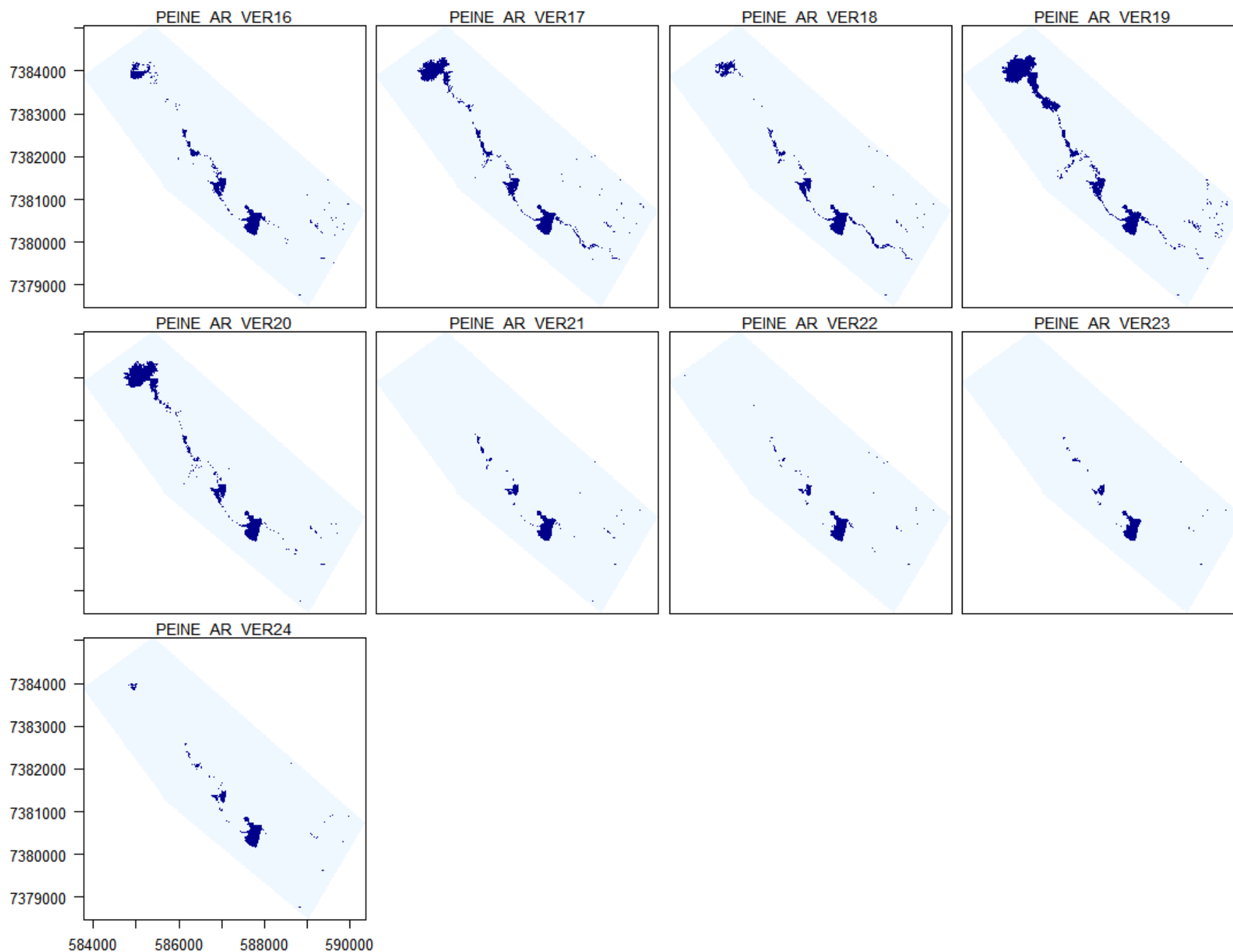
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2024.

**Figura N°5-10. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.**



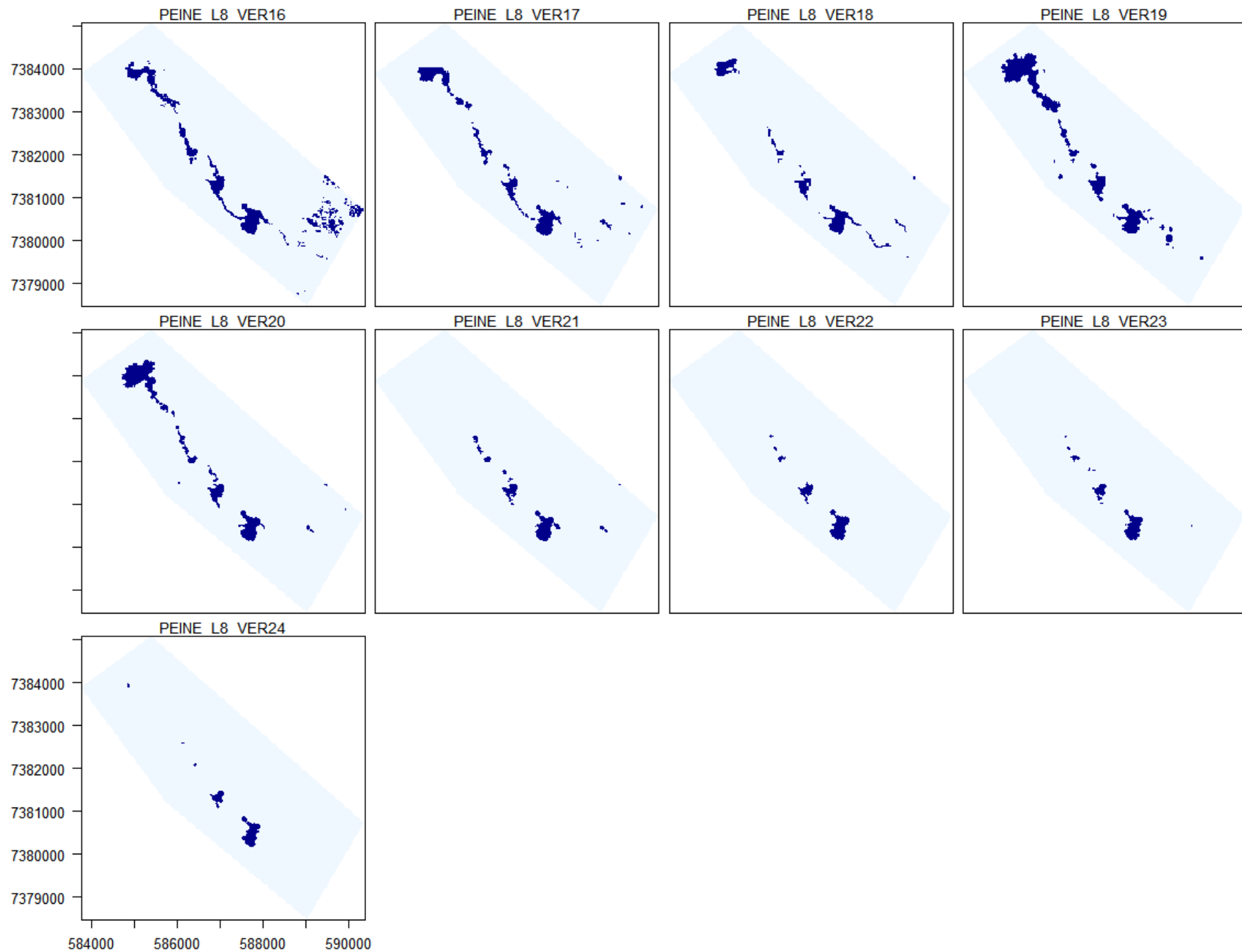
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2024.

**Figura N°5-11. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1-A.**



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2024.

**Figura N°5-12. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.**

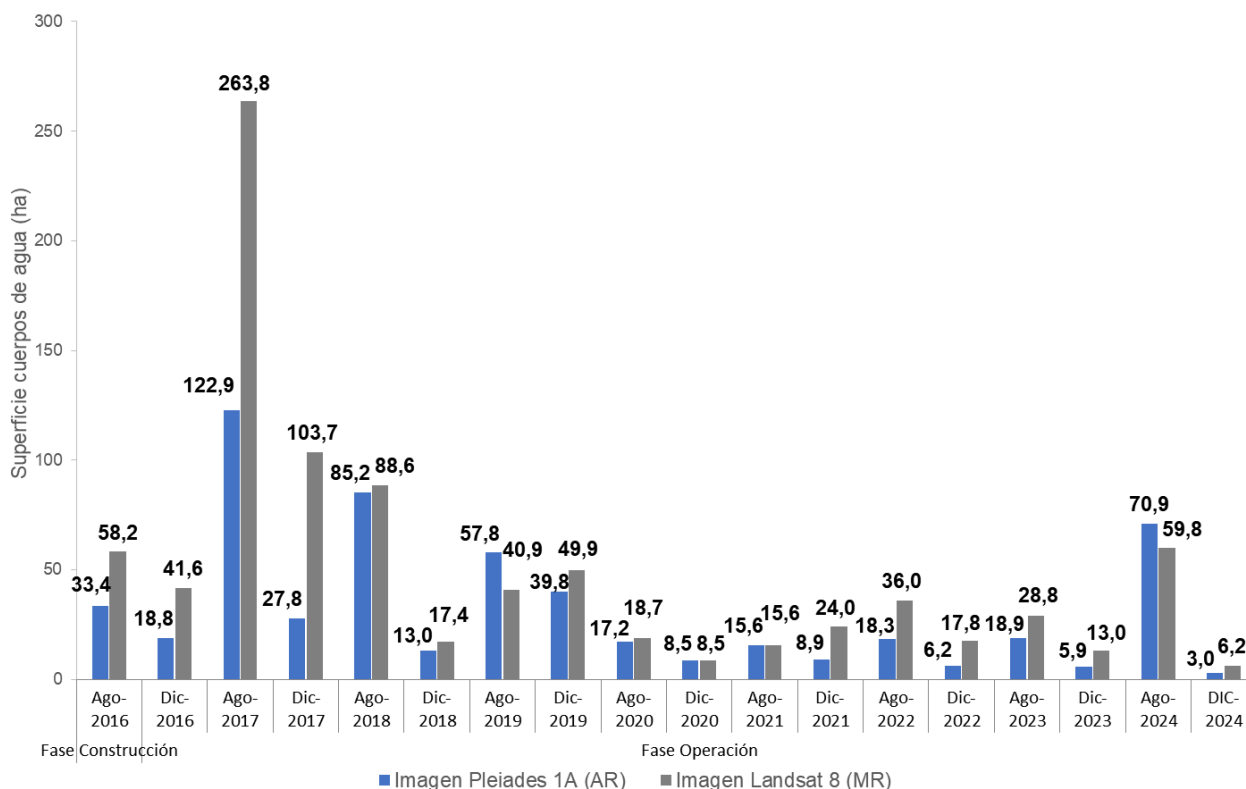


Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2024.

### 5.2.3 Aguas de Quelana

En el sistema lagunar Aguas de Quelana, la cobertura de cuerpos de agua estimada a partir de imágenes satelitales de alta resolución Pleiades 1-A en agosto de 2024 es de 70,9 ha y en diciembre 2024 abarca una superficie de 3,0 ha (**Tabla N°5-5**). La **Figura N°5-13** muestra los resultados gráficos y numéricos de las superficies monitoreadas entre 2016 a 2024, desde la aprobación de la RCA 021/2016. La **Figura N°5-14** muestra las imágenes para el año 2024.

**Figura N°5-13. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua sistema lagunar Aguas de Quelana**



Dónde; **MR**: Imagen de Mediana Resolución (píxel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (píxel menor a 4m).

Fuente: Cedrem Consultores a partir de modelo de clasificación supervisada.

En el sistema lagunar Aguas de Quelana, desde las imágenes Landsat 8 se calculó una cobertura de cuerpos de agua que abarca una superficie de 59,8 ha en agosto de 2024; estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de +11,1 ha (+18,5%) de Pleiades sobre Landsat. Para las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 6,2 ha en diciembre de 2024, estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat 8 sobre Pleiades 1-A de +3,2 ha (108,1%) para este periodo. Según los resultados observados por tipo de imagen, se observa que también en este sector las principales diferencias son atribuibles a la resolución espacial de las imágenes de media resolución.

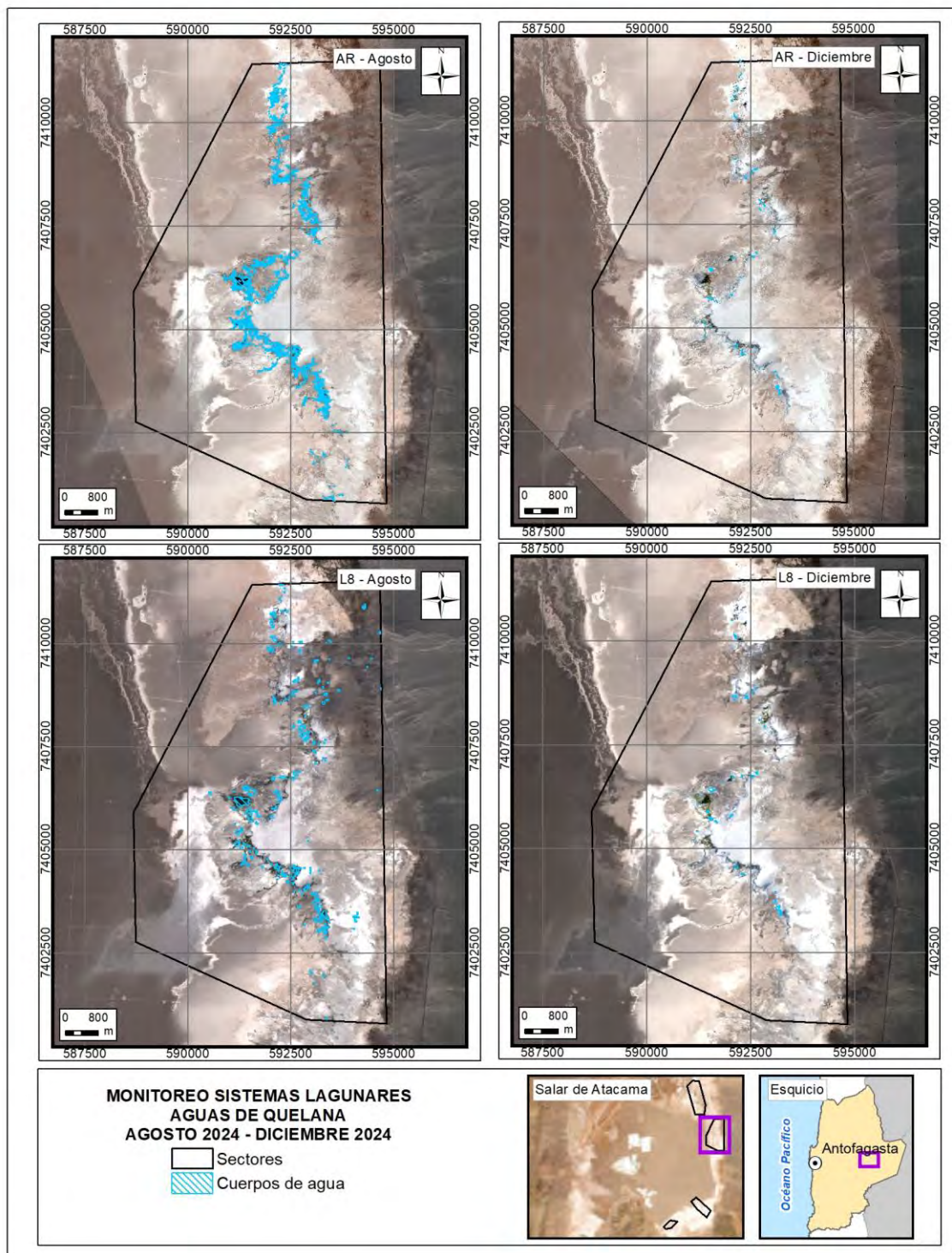
La correlación entre las superficies del sector Aguas de Quelana desde 2016 a 2024, calculadas desde de alta resolución (Pleiades) y desde media resolución (Landsat), y según el coeficiente de correlación de Pearson, muestra que las variables tienen una correlación de 0,854<sup>12</sup> lo que indica una relación positiva alta entre variables ( $r^2 = 72,9\%$ ); mientras que el *valor p* es de 0,000004, lo que indica que existe significancia estadística de la asociación entre las variables Pleiades y Landsat.

Desde la **Figura N°5-15** a la **Figura N°5-18**, muestran los cambios en las superficies de los cuerpos de agua, desde 2016 a 2024, y su representación espacial respectivamente. El análisis de la superficie de cuerpos de agua en el **periodo de invierno** en el sector Aguas de Quelana, entre 2016 y 2024, utilizando imágenes satelitales de alta resolución (Pleiades 1A) y media resolución (Landsat 8), muestra que las máximas de invierno se tuvieron en agosto 2017 y que los años previos y posteriores tuvieron menos superficie. El invierno (agosto) 2024 si bien aumenta su condición, se observa que cubre áreas dispersas del polígono estudiado.

En el análisis de la superficie de cuerpos de agua en el **periodo de verano** en el sector Aguas de Quelana, entre 2016 y 2017, los registros y las imágenes muestran bajas magnitudes y superficies, siendo las mayores en diciembre 2017 y diciembre 2019. El año 2024 se presenta en superficies mínimas del seguimiento.

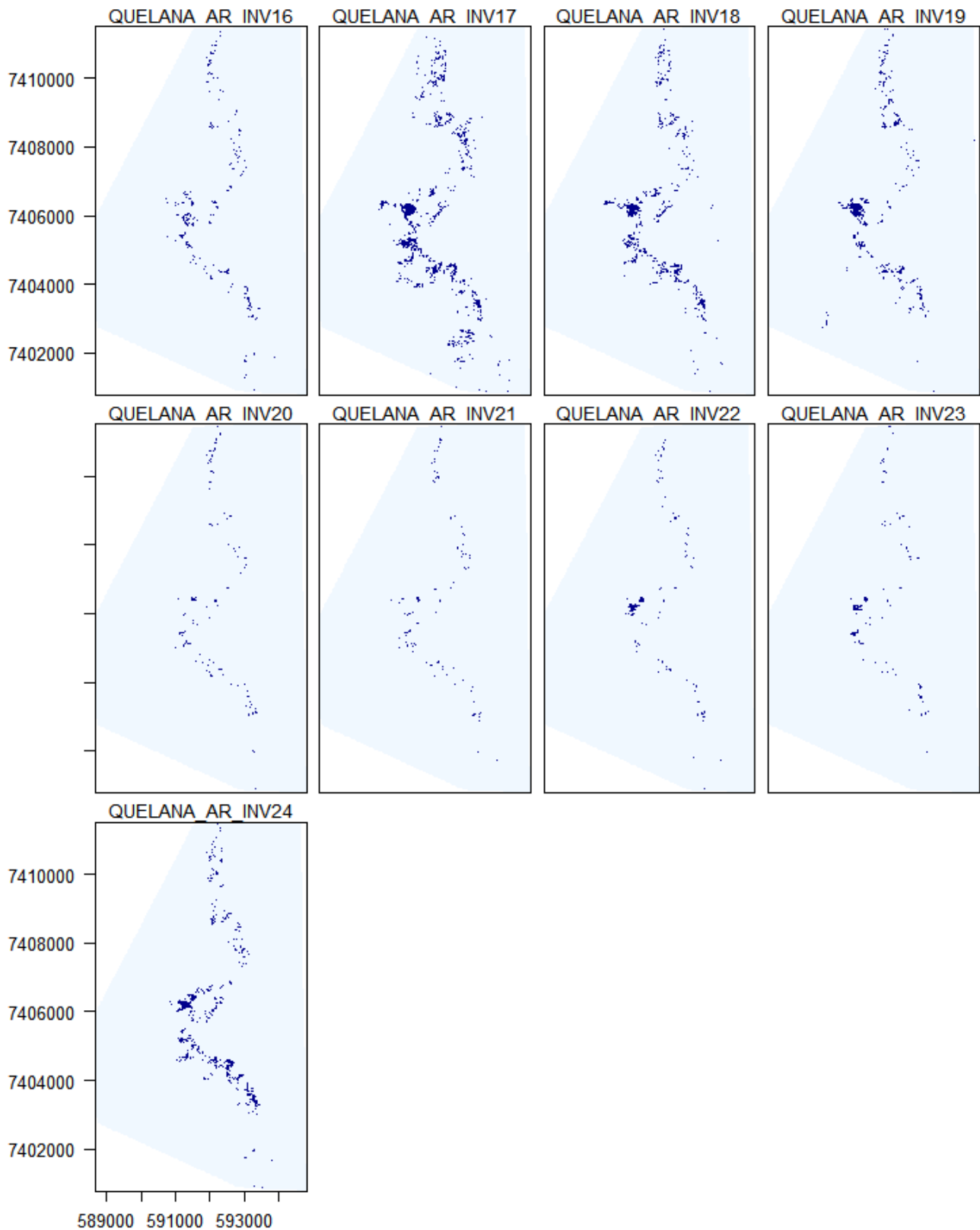
<sup>12</sup> El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a +1. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

**Figura N°5-14. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Aguas de Quelana, agosto – diciembre 2024.**



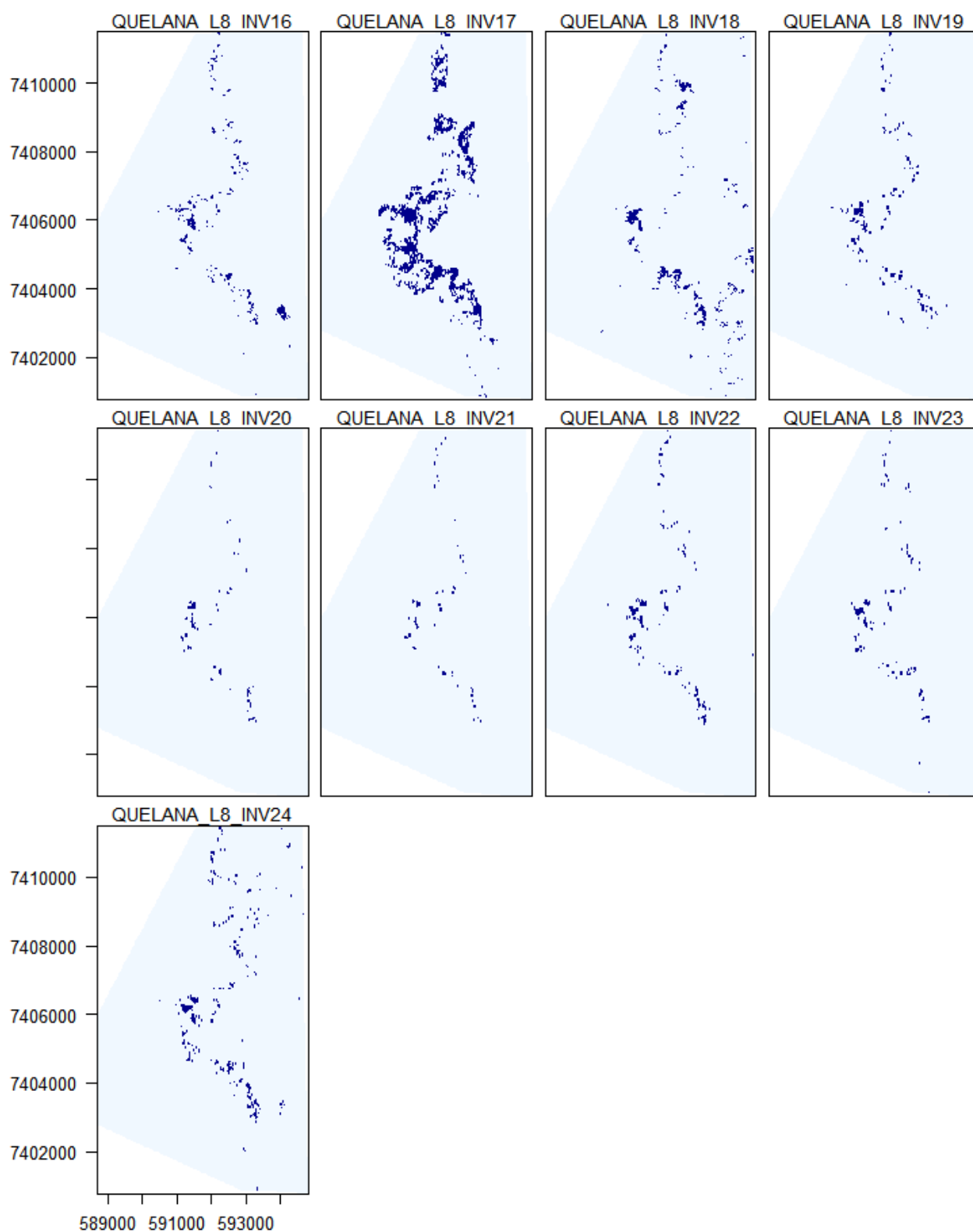
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto y diciembre 2024.

**Figura N°5-15. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Aguas de Quelana, a partir de Pleiades 1-A.**



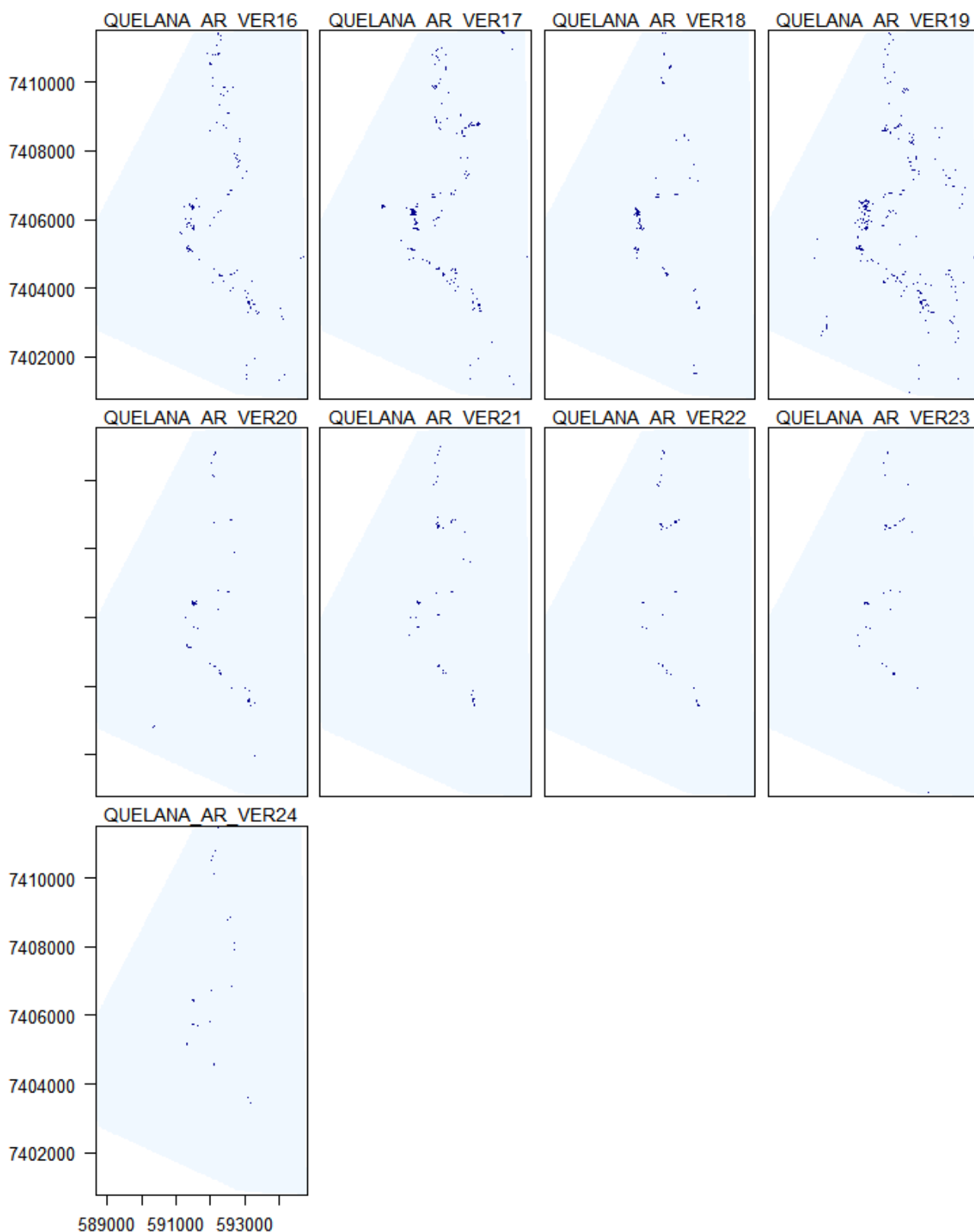
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2024.

**Figura N°5-16. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Aguas de Quelana, de imágenes Landsat 8.**



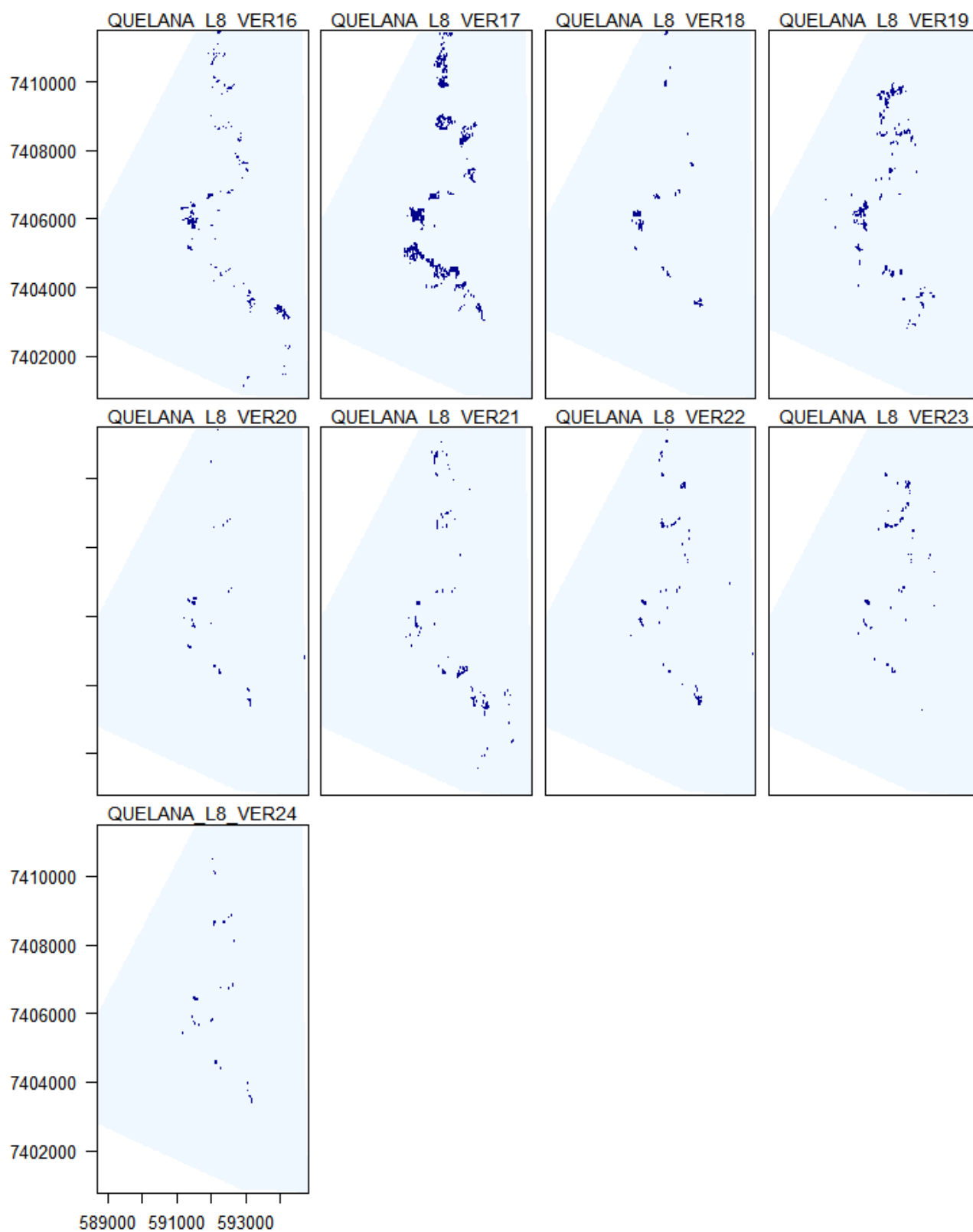
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a 2024.

**Figura N°5-17. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A.**



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2024.

**Figura N°5-18. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector Aguas de Quelana, Landsat 8.**

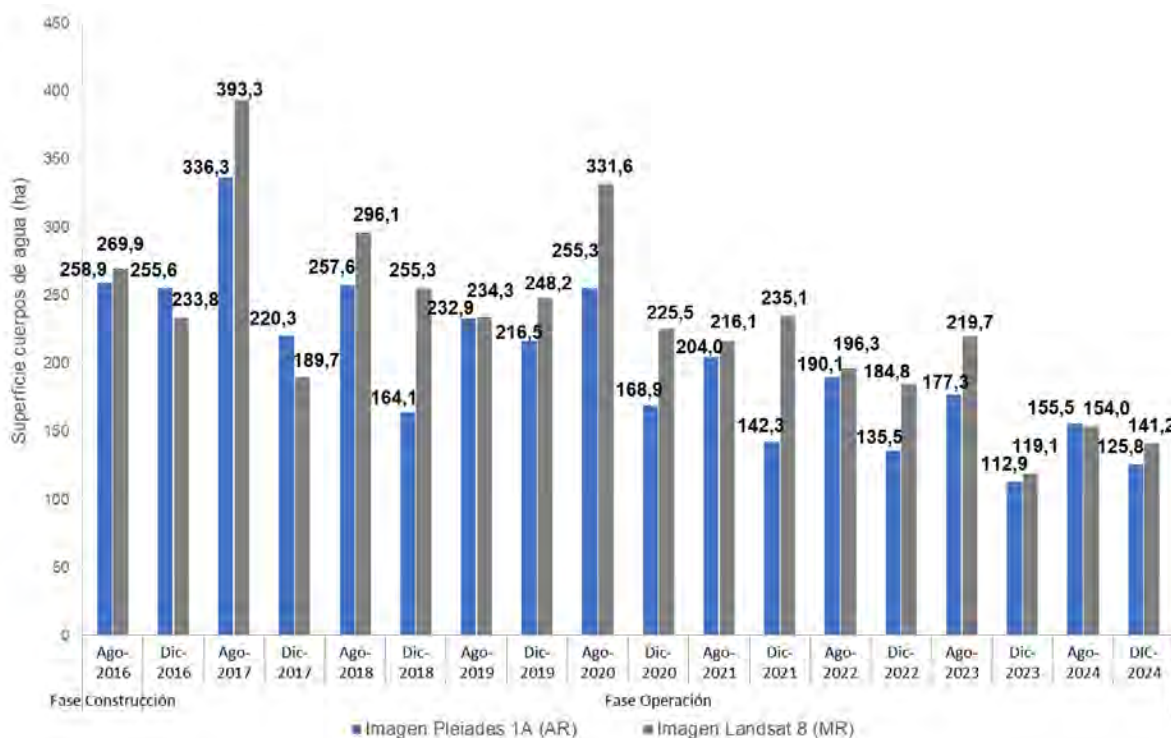


Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2024.

## 5.2.4 Soncor

En el sistema lagunar Soncor, la cobertura de cuerpos de agua estimada a partir de imágenes satelitales de alta resolución Pleiades 1-A en agosto de 2024 es de 155,5 ha y en diciembre 2024 abarca una superficie de 125,8 ha (**Tabla N°5-5**). La **Figura N°5-19** muestra los resultados gráficos y en imagen satelital de las superficies monitoreadas 2024. La **Figura N°5-14** muestra las imágenes para el año 2024.

**Figura N°5-19. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar Soncor.**



Dónde; **MR**: Imagen de Mediana Resolución (píxel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (píxel menor a 4m).

Fuente: Cedrem Consultores a partir de modelo de clasificación supervisada.

En este sistema lagunar, desde las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 154,0 ha en agosto de 2024 y 141,2 ha en diciembre de 2024. Estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Pleiades sobre Landsat de +1,5 ha (1,0%) para agosto de 2024 y de +15,4 ha para verano de 2024 con Landsat sobre Pleiades (+12,3%). Según los resultados observados por tipo de imagen, se observa que las principales diferencias son atribuibles principalmente a la resolución espacial de las imágenes Landsat 8, que entrega un modelo con bordes menos definidos en comparación al modelo de alta resolución; sin embargo estas diferencias son menores en comparación a otros sistemas lagunares, dada la fisonomía del sector (cuerpo de agua confinado en una costra salina muy diferenciable como recubrimiento y sin sectores de combinación agua – vegetación o similares) por lo que los resultados desde los parámetros están mejor ajustados.

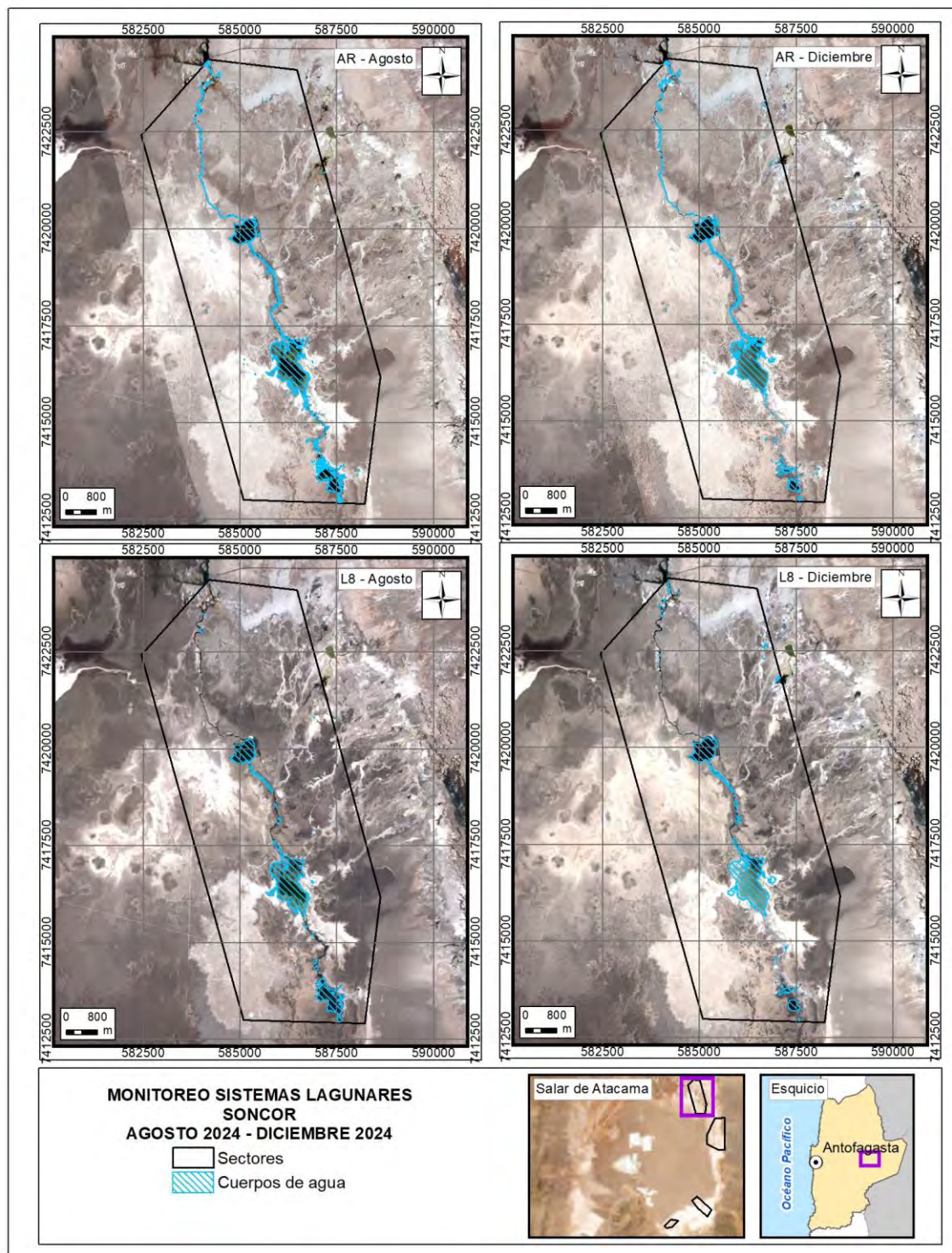
La correlación entre las superficies del sector Soncor desde 2016 a 2024, calculadas desde de alta resolución (Pleiades 1-A) y desde media resolución (Landsat 8), y según el coeficiente de correlación de Pearson, muestra que las variables tienen una correlación de 0,841<sup>13</sup> lo que indica una relación positiva entre variables ( $r^2 = 70,8\%$ ); mientras que el valor  $p$  es de 0,00001 lo que indica que existe significancia estadística de la asociación entre las variables Pleiades y Landsat.

Las **Figura N°5-21** a la **Figura N°5-24** muestran los cambios en las superficies de los cuerpos de agua, desde 2016 a 2024, y su representación espacial respectivamente. Para el sector de Soncor, las principales diferencias entre monitoreos se observan en la zona sur del sistema y por derrames de la laguna Barros Negros al sector de entrada oeste, cuyas variaciones contribuyen aumentando o disminuyendo las superficies calculadas para los cuerpos de agua.

---

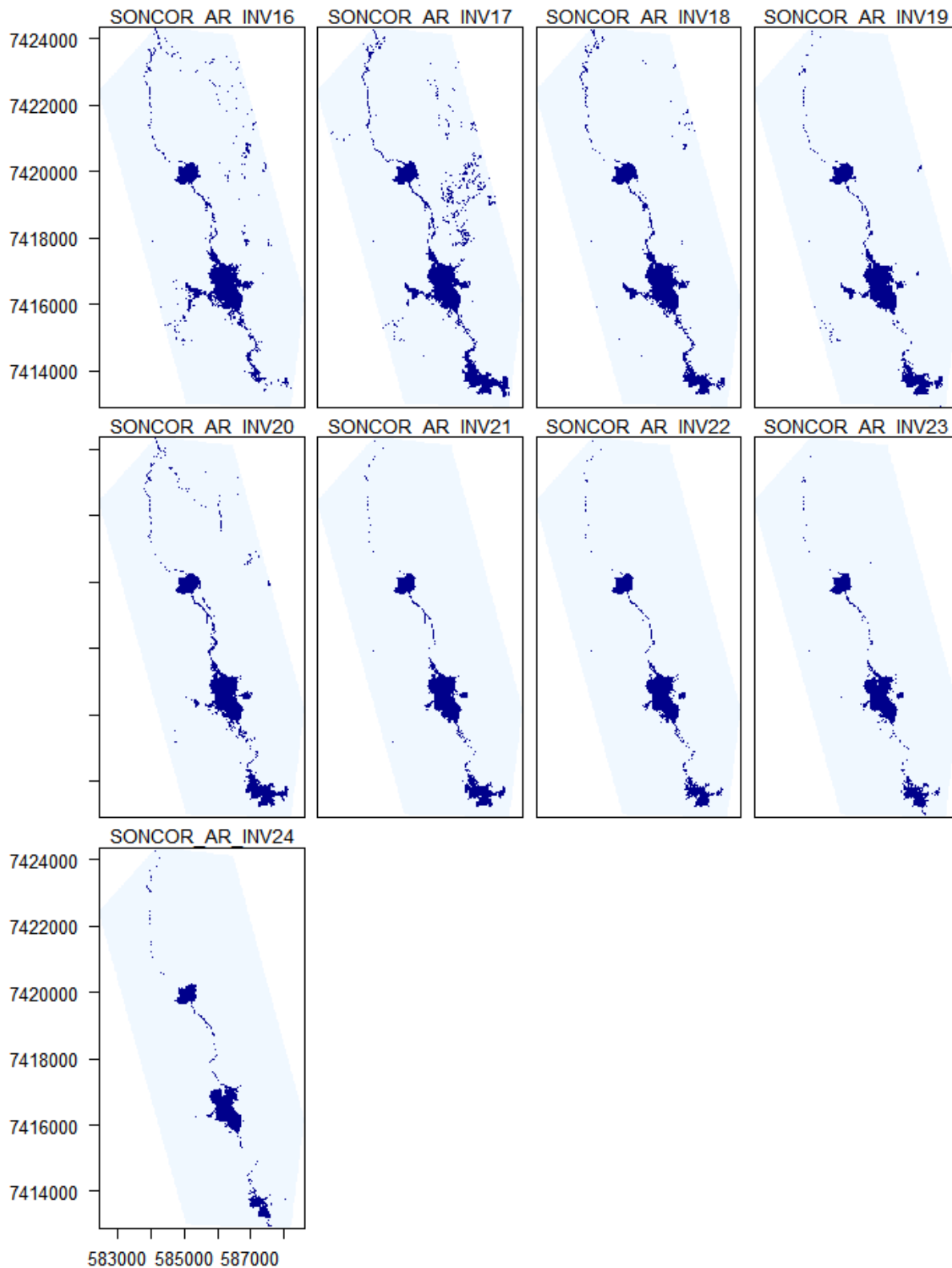
<sup>13</sup> El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a +1. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

**Figura N°5-20. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Soncor, agosto – diciembre 2024**



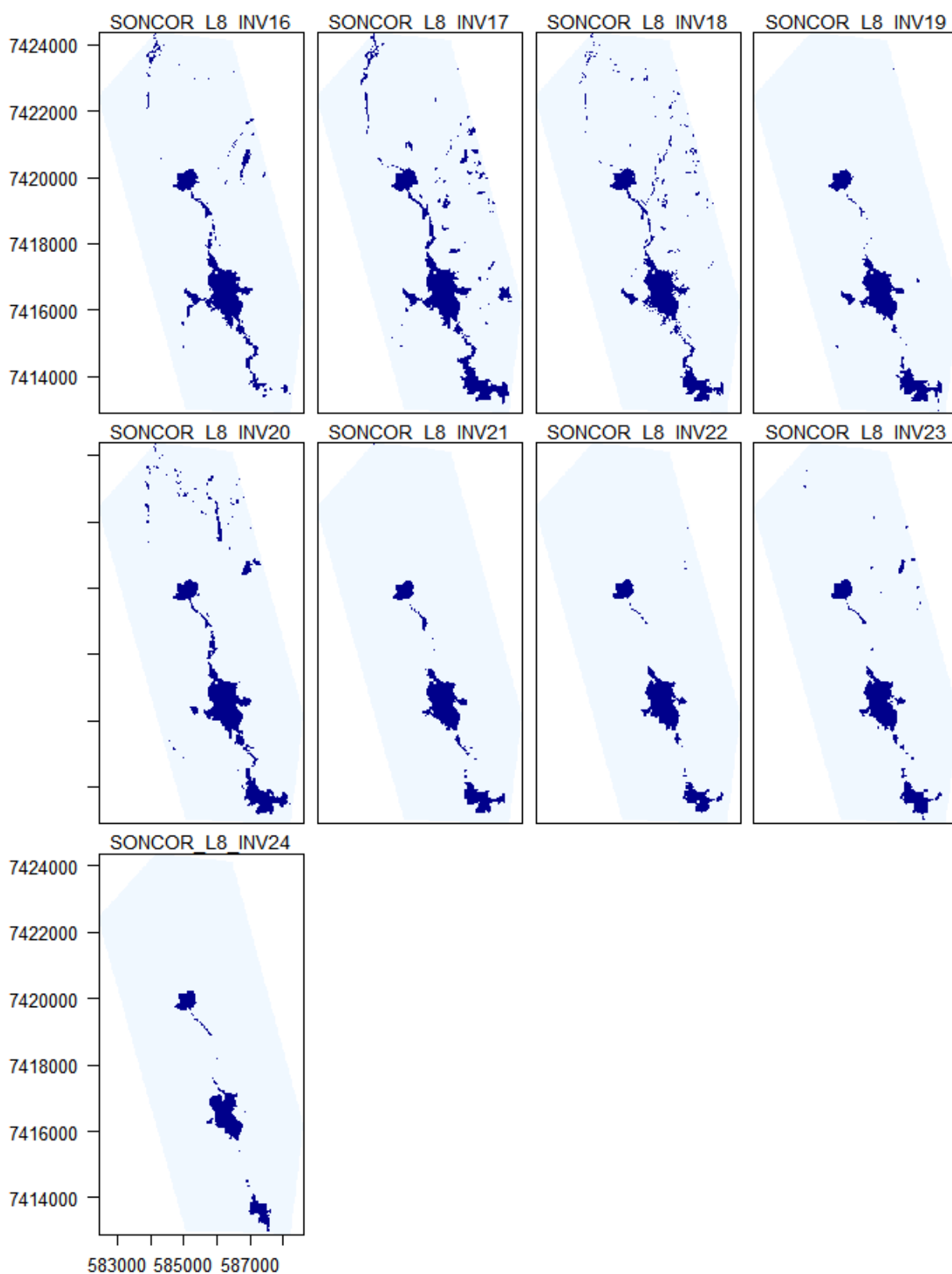
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto y diciembre 2024.

**Figura N°5-21. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1-A.**



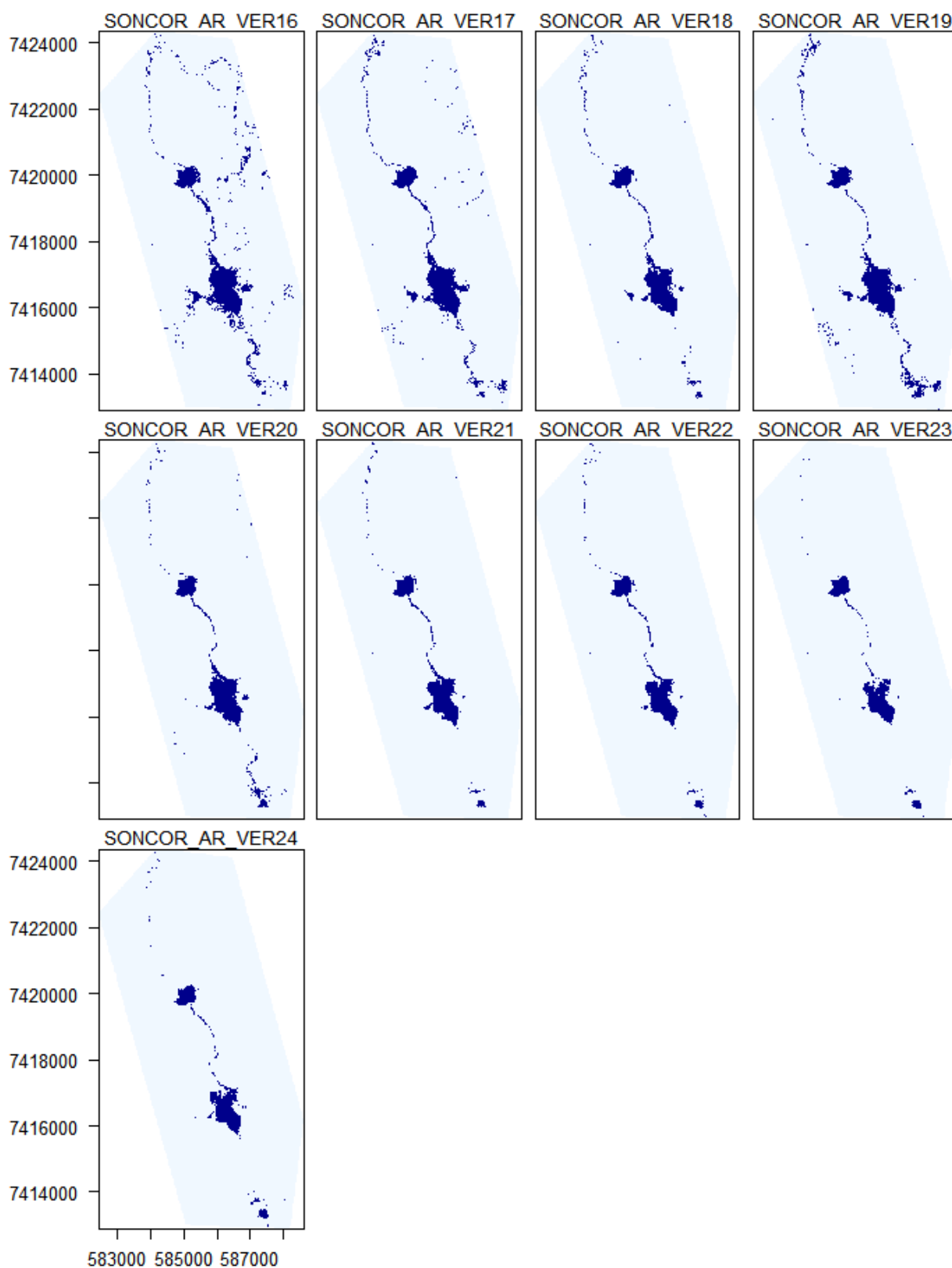
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2024.

**Figura N°5-22. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2024), sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8.**



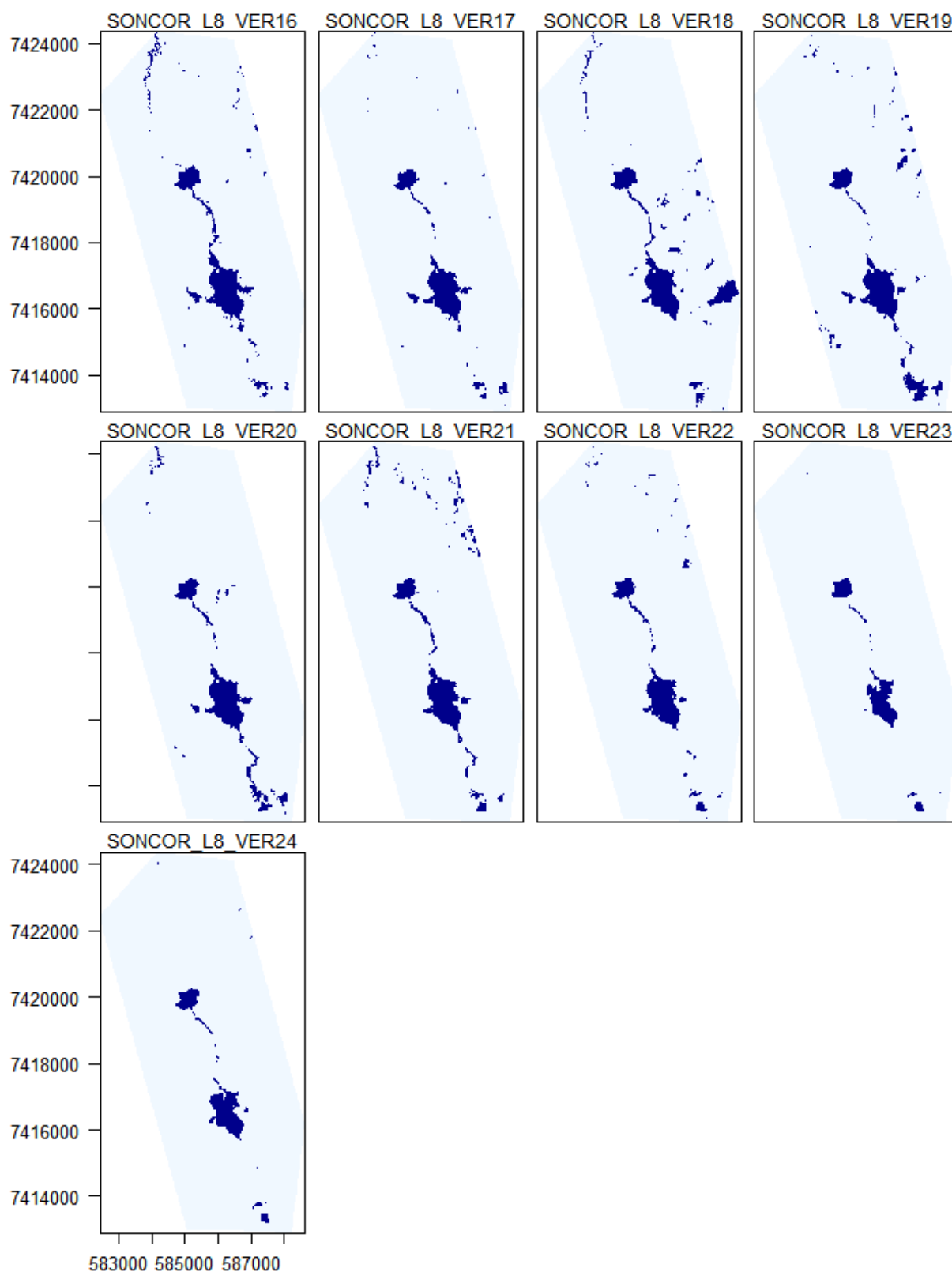
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2024.

**Figura N°5-23. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1-A.**



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2024.

**Figura N°5-24. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2024), sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8.**



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2024.

### 5.3 Límites considerados en el seguimiento de los cuerpos de agua

Considerando el criterio indicado en la RCA N°21/2016, se tiene que “*durante la fase de operación y cierre del proyecto la superficie cubierta por lagunas debe mantener sus límites sobre el mínimo histórico*”, lo que se analiza en detalle en capítulo siguiente.

## 6 DISCUSION

### 6.1 Análisis de la validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua

En general, el modelo de clasificación presenta ajustes que van de *aceptable a casi perfecto*<sup>14</sup> para todos los sistemas lagunares (**Tabla N°6-1**), con valores promedio del índice *Kappa* para el periodo 2016 – 2024 que van entre 0,91 (Soncor) y 0,62 (Aguas de Quelana) desde imágenes de alta resolución; con un valor mínimo *aceptable* de 0,37 en Aguas de Quelana para diciembre del 2020 y un valor máximo *casi perfecto* de 0,99 para Soncor en agosto 2024. Respecto de Landsat 8, los valores promedio del índice *Kappa* observados en el periodo 2016 – 2024 van entre 0,85 (Soncor) y 0,56 (La Punta - La Brava), presentando un valor mínimo de 0,37 en Aguas de Quelana para diciembre de 2024 y un valor máximo de 0,98 para Soncor en agosto 2024.

De lo anterior, se señala que los mayores ajustes corresponden a los sectores que muestran una mayor definición de los cuerpos de agua, por sus características de topografía y tipo de sustrato, ya que se encuentran total o parcialmente delimitados por una diferencia de nivel de costra salina; por lo tanto, las respuestas espectrales son más claras, facilitando la determinación de umbrales de los parámetros del modelo y la clasificación final es mayormente coincidente con los determinados en terreno o por fotointerpretación visual. Así mismo, los valores más bajos en el ajuste del modelo se reportan principalmente en sectores que muestran un gradiente de vegetación en los bordes lagunares, conformando un ecotono de vegetación, el cual conduce a una estimación menos precisa de los límites de la superficie de agua proveniente principalmente de los parámetros NDVI y NIR, esto ocurre especialmente en invierno o en aumentos de las superficies inundadas, periodos en que la humedad del suelo alcanza mayores superficies combinados con otros recubrimientos (vegetación); sin embargo, otro factor sería el retroceso de zonas inundadas con la exposición del sustrato que muchas veces está asociado a otros componentes como microorganismos, o que en las que se acentúa la discontinuidad de las inundaciones generando parches que no son captados como unidades independientes, disminuyendo la precisión en sitios de transición seca - húmeda.

<sup>14</sup> Los rangos de valores para *Kappa* son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

**Tabla N°6-1. Consolidado de índices *Kappa* de validación del modelo de clasificación para imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8.**

| Tipo de imagen   | Fecha monitoreo       | Indicadores de monitoreo | Sistema Lagunar     |             |                  |             |
|------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------|-------------|------------------|-------------|
|                  |                       |                          | La Punta - La Brava | Peine       | Aguas de Quelana | Soncor      |
| PLEIADES 1A - AR | ago-16                | Superficie (ha)          | 47,4                | 74,1        | 33,4             | 258,9       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,45                | 0,89        | 0,72             | 0,89        |
|                  | dic-16                | Superficie (ha)          | 40,9                | 50,2        | 18,8             | 255,6       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,82                | 0,91        | 0,86             | 0,90        |
|                  | ago-17                | Superficie (ha)          | 48,1                | 74,6        | 122,9            | 336,3       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,50                | 0,86        | 0,55             | 0,83        |
|                  | dic-17                | Superficie (ha)          | 48,6                | 74,1        | 27,8             | 220,3       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,73                | 0,83        | 0,59             | 0,84        |
|                  | ago-18                | Superficie (ha)          | 61,9                | 51,5        | 85,2             | 257,6       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,78                | 0,88        | 0,67             | 0,85        |
|                  | dic-18                | Superficie (ha)          | 35,9                | 49,4        | 13,0             | 164,1       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,83                | 0,80        | 0,75             | 0,94        |
|                  | ago-19                | Superficie (ha)          | 52,8                | 86,7        | 57,8             | 232,9       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,66                | 0,83        | 0,66             | 0,92        |
|                  | dic-19                | Superficie (ha)          | 62,7                | 101,7       | 39,8             | 216,5       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,79                | 0,91        | 0,76             | 0,95        |
|                  | ago-20                | Superficie (ha)          | 51,4                | 54,2        | 17,2             | 255,3       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,64                | 0,96        | 0,88             | 0,98        |
|                  | dic-20                | Superficie (ha)          | 28,4                | 73,5        | 8,5              | 168,9       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,62                | 0,73        | 0,37             | 0,94        |
|                  | ago-21                | Superficie (ha)          | 45,8                | 45,7        | 15,6             | 204,0       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,80                | 0,92        | 0,69             | 0,91        |
|                  | dic-21                | Superficie (ha)          | 24,1                | 26,4        | 8,9              | 142,3       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,61                | 0,78        | 0,67             | 0,92        |
|                  | ago-22                | Superficie (ha)          | 45,1                | 50,5        | 18,3             | 190,1       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,67                | 0,90        | 0,57             | 0,95        |
|                  | dic-22                | Superficie (ha)          | 25,3                | 24,2        | 6,2              | 135,5       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,41                | 0,71        | 0,50             | 0,87        |
|                  | ago-23                | Superficie (ha)          | 45,5                | 29,4        | 18,9             | 177,3       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,56                | 0,52        | 0,40             | 0,89        |
|                  | dic-23                | Superficie (ha)          | 26,6                | 22,0        | 5,9              | 112,9       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,46                | 0,62        | 0,64             | 0,82        |
|                  | ago-24                | Superficie (ha)          | 40,7                | 31,4        | 70,9             | 155,5       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,46                | 0,53        | 0,62             | 0,99        |
|                  | dic-24                | Superficie (ha)          | 24,4                | 27,5        | 3,0              | 125,8       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,41                | 0,79        | 0,48             | 0,95        |
|                  | <b>Promedio Kappa</b> |                          | <b>0,62</b>         | <b>0,80</b> | <b>0,63</b>      | <b>0,91</b> |
| LANDSAT 8 - MR   | ago-16                | Superficie (ha)          | 62,6                | 114,7       | 58,2             | 269,9       |
|                  |                       | <i>Índice Kappa</i>      | 0,47                | 0,83        | 0,72             | 0,78        |

| Tipo de imagen | Fecha monitoreo | Indicadores de monitoreo | Sistema Lagunar     |       |                  |        |      |
|----------------|-----------------|--------------------------|---------------------|-------|------------------|--------|------|
|                |                 |                          | La Punta - La Brava | Peine | Aguas de Quelana | Soncor |      |
|                | dic-16          | Superficie (ha)          | 55,0                | 110,3 | 41,6             | 233,8  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,62                | 0,83  | 0,74             | 0,77   |      |
|                | ago-17          | Superficie (ha)          | 38,2                | 104,6 | 263,8            | 393,3  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,50                | 0,74  | 0,71             | 0,73   |      |
|                | dic-17          | Superficie (ha)          | 39,3                | 75,3  | 103,7            | 189,7  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,54                | 0,59  | 0,57             | 0,82   |      |
|                | ago-18          | Superficie (ha)          | 63,7                | 78,4  | 88,6             | 296,1  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,55                | 0,73  | 0,72             | 0,83   |      |
|                | dic-18          | Superficie (ha)          | 44,4                | 81,7  | 17,4             | 255,3  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,84                | 0,83  | 0,63             | 0,90   |      |
|                | ago-19          | Superficie (ha)          | 53,8                | 85,1  | 40,9             | 234,3  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,54                | 0,79  | 0,81             | 0,81   |      |
|                | dic-19          | Superficie (ha)          | 57,7                | 107,8 | 49,9             | 248,2  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,59                | 0,76  | 0,86             | 0,88   |      |
|                | ago-20          | Superficie (ha)          | 60,0                | 105,4 | 18,7             | 331,6  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,56                | 0,77  | 0,80             | 0,78   |      |
|                | dic-20          | Superficie (ha)          | 36,1                | 83,0  | 8,5              | 225,5  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,44                | 0,73  | 0,75             | 0,72   |      |
|                | ago-21          | Superficie (ha)          | 40,0                | 36,0  | 15,6             | 216,1  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,92                | 0,93  | 0,75             | 0,93   |      |
|                | dic-21          | Superficie (ha)          | 35,5                | 33,4  | 24,0             | 235,1  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,50                | 0,87  | 0,51             | 0,84   |      |
|                | ago-22          | Superficie (ha)          | 56,9                | 62,8  | 36,0             | 196,3  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,59                | 0,83  | 0,52             | 0,94   |      |
|                | dic-22          | Superficie (ha)          | 26,9                | 27,7  | 17,8             | 184,8  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,46                | 0,75  | 0,64             | 0,81   |      |
|                | ago-23          | Superficie (ha)          | 39,4                | 62,2  | 28,8             | 219,7  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,41                | 0,75  | 0,45             | 0,94   |      |
|                | dic-23          | Superficie (ha)          | 28,8                | 26,9  | 13,0             | 119,1  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,57                | 0,72  | 0,47             | 0,83   |      |
|                | ago-24          | Superficie (ha)          | 40,0                | 42,4  | 59,8             | 154,0  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,41                | 0,75  | 0,58             | 0,98   |      |
|                | dic-24          | Superficie (ha)          | 34,0                | 22,8  | 6,2              | 141,2  |      |
|                |                 | Índice Kappa             | 0,56                | 0,62  | 0,37             | 0,93   |      |
|                | Promedio Kappa  |                          |                     | 0,56  | 0,77             | 0,64   | 0,85 |

Fuente: Cedrem Consultores.

## 6.2 Análisis de comparación con registros históricos

Con el objetivo de fortalecer el análisis de la serie temporal que abarca las superficies de las lagunas, y teniendo en cuenta que durante la evaluación del proyecto se recopilaron datos que ahora forman parte de los registros históricos, en este noveno año del PSAH, se incorporan al análisis comparativo las superficies de las lagunas obtenidas a partir de imágenes Landsat desde 1972 hasta 2014, las cuales fueron presentadas durante la evaluación ambiental del proyecto.

Este enfoque tiene como objetivo principal explorar la evolución de las superficies lagunares a lo largo de los últimos nueve años de seguimiento semestral. Se busca determinar si estas variaciones forman parte de una variabilidad histórica tanto interanual como intranual. Este análisis se realiza considerando todos los factores que influyen en el funcionamiento de las lagunas en cada uno de los sistemas que conformar el área de estudio.

Es importante destacar que, además de las imágenes de alta resolución ya disponibles, se han incorporado imágenes de media resolución, provenientes de Landsat, para ampliar la perspectiva y enriquecer la comprensión de las dinámicas lagunares. El análisis de estas imágenes se integra en la presente discusión, contribuyendo así a una evaluación más completa y robusta de la evolución temporal de las superficies lagunares en el contexto del PSAH.

De esta forma, y desde el punto de vista de las imágenes Landsat, se cuenta con los siguientes conjuntos de información, cuyo alcance metodológico particular para el análisis de la superficie lagunar se describe brevemente a continuación:

1. Superficie mediante imágenes Landsat, 1972-2014, Adenda 5 RWL (2015).

La comparativa de los datos históricos desde 1972 a 2014, realizados durante la evaluación del proyecto (por el proveedor Argongra), estudió la evolución de las superficies lagunares en fechas representativas de la máxima y mínima extensión de las lagunas (invierno, verano; julio y diciembre, respectivamente). La metodología empleada establece un proceso de clasificación en función de un índice de agua (NDWI) y un proceso de depuración de las zonas obtenidas, mediante fotointerpretación. El resultado, son las superficies de los cuerpos de agua en metros cuadrados ( $m^2$ ) de los sistemas lagunares La Punta - La Brava, Peine, Soncor y Aguas de Quelana, permitiendo con ello la visualización de la evolución temporal interanual de los sistemas estudiados (Apéndice L. *Monitoreo de dinámica espacio-temporal de lagunas de la Zona Marginal del Salar de Atacama a través de imágenes satelitales LANDSAT*, del Anexo 1: *Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama*, de la Adenda 5).

2. Superficie mediante imágenes Landsat, 2016-2024, PSAH N°8 (serie complementaria al seguimiento de Albemarle).

Como complemento al análisis mencionado previamente, se incluye en este informe de PSAH la serie temporal interanual correspondiente a los años 2016 a 2024. En este contexto, la metodología empleada se asemeja a la aplicada en la Adenda 5 RWL (2015). Se mantiene la referencia a los meses de máxima y mínima extensión lagunar (agosto y diciembre; inviernos y veranos), así como la estimación de la superficie lagunar a través del índice NDWI. No obstante, en esta ocasión, la estimación de la superficie lagunar se realiza mediante la creación de "máscaras de agua", es decir, una clasificación binaria que

distingue entre valores de agua y no agua. El resultado final implica el análisis de la frecuencia de píxeles con valores positivos para agua ( $NDWI > 0$ , con un umbral establecido en 0) y su conversión a metros cuadrados ( $m^2$ ). El valor de umbral se determinó a través de la observación de histogramas, el muestreo aleatorio de píxeles y la verificación de los umbrales utilizados en los monitoreos realizados entre 2016 y 2024. Este ejercicio permitió identificar que los píxeles con valores positivos reflejan la variación del índice NDWI en áreas ocupadas por la laguna, mientras que los valores negativos están mayormente asociados a otros tipos de cobertura.

Para todas las imágenes, la automatización del proceso de adquisición de los registros de NDWI se lleva a cabo mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE). Dentro de las etapas metodológicas y durante el preprocesamiento de cada imagen Landsat, se aplica la corrección atmosférica de la reflectancia superficial. Este proceso elimina los efectos de la atmósfera en las mediciones de la luz reflejada por la superficie terrestre. Utilizando algoritmos especializados dentro de la plataforma GEE, se estimaron y ajustaron los efectos atmosféricos en las bandas espectrales, lo que permite obtener valores de reflectancia más precisos y comparables entre diferentes imágenes y momentos de captura, de acuerdo con los valores de georreferenciación ya determinados.

### 3. Superficie mediante imágenes Landsat, 2016-2024, PSAH N°1 a N°9 (frecuencia semestral y parte del seguimiento RCA 21/2016)

En tercer lugar, se dispone de los resultados obtenidos de superficie lagunar mediante imágenes Landsat, los cuales han sido reportados en el marco de la RCA 21/2016 en los informes PSAH N°1 a N°9, y cuya metodología se explica en detalle en la sección 4.6 *Metodología de análisis de las imágenes satelitales para delimitación de cuerpos de agua*, de este informe. Como puede desprenderse de dicha sección, la metodología considera un modelo de clasificación supervisada basado en una serie de parámetros espectrales, así como la validación en terreno/fotointerpretativa.

De esta forma, las superficies resultantes del PSAH entregan en mayor detalle las superficies de los cuerpos de agua, ya que cuentan con la combinación de cuatro índices espectrales y el trabajo en terreno y/o fotointerpretativo como base para la definición de áreas del recubrimiento agua. No obstante, estas pueden ser contrastadas referencialmente con la serie de tiempo de NDWI histórica (1972 – 2014) y su complemento (2016 – 2024), ya que estas establecen los rangos ocupados por cuerpos de agua en un contexto de larga data. A pesar de que las áreas determinadas a partir de las imágenes Landsat involucran diversas metodologías utilizadas por distintos proveedores en su análisis para Albemarle en el pasado, estas diferencias no constituyen obstáculos para ampliar la perspectiva global sobre el comportamiento histórico de los sistemas lagunares, en el sentido de las tendencias y cambios presentados. Las principales diferencias radican en la automatización del proceso y la validación fotointerpretativa como parte del cálculo de superficies. En resumen, la información recopilada a partir de las imágenes Landsat ofrece una visión comprensiva y de más larga data acerca del comportamiento histórico, y por ende, se analiza de manera conjunta. Este enfoque busca ampliar el espectro de variabilidad en las superficies lagunares en comparación con el análisis basado en imágenes de alta resolución (AR). Respecto de esto último, es importante señalar que las imágenes de alta resolución corresponden únicamente a 4 o 5 entre los años 2006 y 2015. Además, es pertinente destacar que estas imágenes se tomaron específicamente en marzo-abril para los sistemas Soncor, Peine y Aguas de Quelana, y entre enero y abril para La Punta La Brava.

De manera complementaria al análisis interanual realizado con imágenes Landsat, en la presente sección se realiza un análisis por sector de la variación intranual que toma como referencia la máxima cantidad de imágenes Landsat disponibles por año (ANEXO 9-25. Imágenes Landsat 2016 – 2024 – Análisis NDWI.) tomando en consideración aquellas que no presenten errores de origen o alta cobertura de nubes. La serie intranual permite visualizar los cambios entre periodos secos – lluviosos y su posible relación con variables ambientales (precipitación).

Finalmente, se presenta para cada sector un análisis de los resultados de superficie lagunar obtenidos en el marco de PSAH, utilizando imágenes de alta resolución, los cuales son contrastados referencialmente con datos de superficie lagunar determinados mediante imágenes de alta resolución en el Anexo 2 de la Adenda 5.

Considerando lo anterior, a continuación se describe brevemente para cada sistema lagunar, su funcionamiento y dinámica; y su análisis considerando los registros históricos tanto interanuales como intranuales. La caracterización del funcionamiento lagunar, toma como base la información del Apéndice I: *Funcionamiento Lagunar*, del Anexo 1: *Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico*, de la Adenda 5.

## 6.2.1 Sistema Lagunas La Punta - La Brava

- Funcionamiento del Sistema Lagunar

De acuerdo con la información histórica, el origen de la alimentación de las lagunas del Sistema La Punta - La Brava se sitúa en las zonas distales en el extremo sur de la cuenca a mayor altura, caracterizadas por aguas cloruradas sódicas, dulces a salobres y de composición isotópica ligera representativa de las aguas de recarga de la región, provenientes de los acuíferos de Monturaqui y Negrillar. Después de atravesar los acuíferos de Monturaqui y Negrillar, las aguas alcanzan la Zona Marginal, de manera subterránea y sub-superficialmente, procedente desde flujos del Callejón de Tilopozo, no existiendo evidencias de un cauce activo que pudiese producir escorrentía superficial. En menor medida, también se producen entradas procedentes del Cordón de Lila en la zona de Tucúcaro.

Una vez que las aguas subterráneas llegan a la Zona Marginal, en las proximidades de las Vegas de Tilopozo, comienza a producirse evaporación directamente desde el terreno, comenzando la dinámica de disolución y precipitación de sales. La evolución de la composición química del agua de sur a norte indica que el enriquecimiento en sales se produce principalmente por fenómenos de disolución hasta llegar a las lagunas.

En la mayor parte de la Zona Marginal la evaporación es suficiente para mantener los niveles por debajo de la superficie. Sin embargo, en el área de las lagunas de este sistema, debido a la magnitud del flujo subterráneo procedente del sur y al encuentro con la salmuera, se genera una interfase salina (zona de mezcla entre el agua dulce y salmuera) que se dispone perpendicular al flujo por lo que el agua dulce-salobre se ve forzada a ascender, aflorando en superficie y dando origen a las lagunas. Ocasionalmente se produce un mayor caudal de entrada a las lagunas, después de períodos húmedos y coincidiendo con la época invernal, lo que produce flujos subsuperficiales hacia el Núcleo que alcanzan el límite con la costra de cloruros formando los “open pools”, donde se evapora y disuelve la costra, enriqueciéndose en sales disueltas que avanzan en el tiempo hacia el interior del Núcleo, convirtiéndose en salmuera.

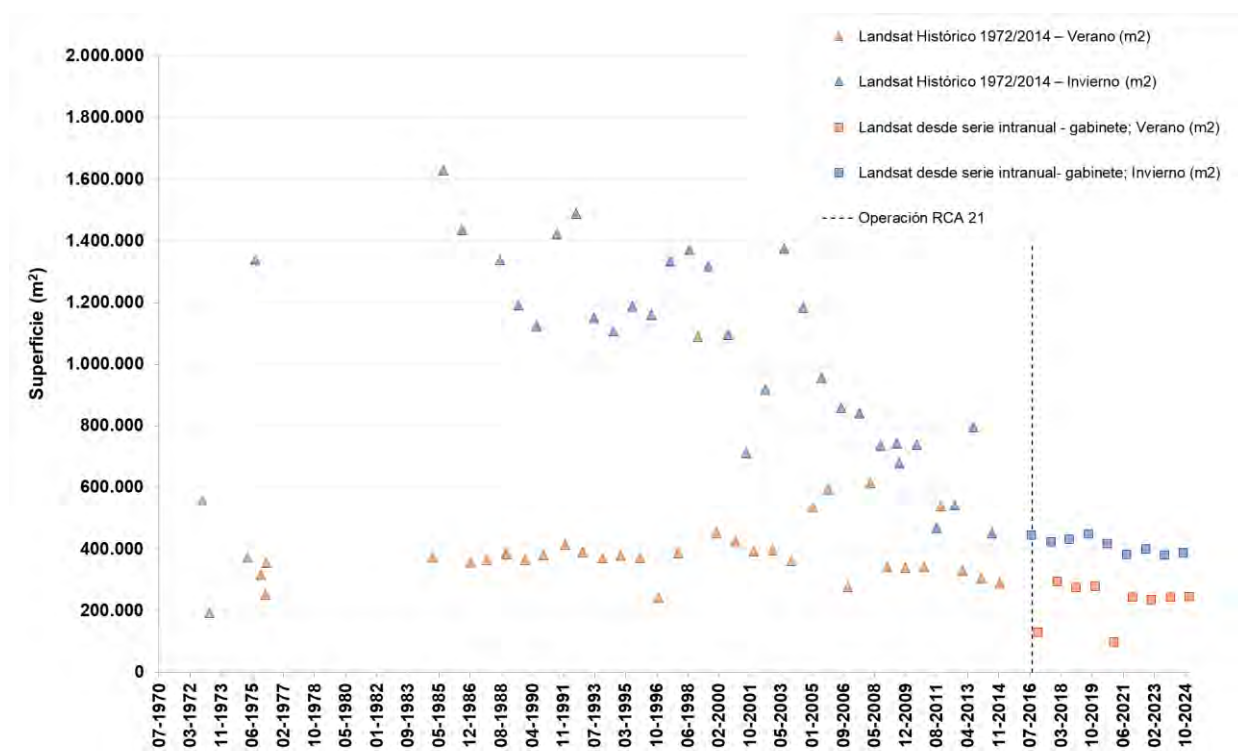
Finalmente, se indica que la superficie de las lagunas está condicionada principalmente por la variación estacional de la evaporación, y en menor medida por la ocurrencia de episodios de lluvia, que lo que provocan es un aumento general de los máximos y mínimos anuales en función de si se está en un período húmedo o uno seco.

- Evolución histórica de superficie mediante imágenes Landsat (serie Adenda 5 RWL (2015) y seguimiento PSAH)

En la **Figura N°6-1** se presenta la serie histórica entre los años 1972 - 2024 de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes satelitales Landsat, asociadas al índice NDWI. Esta serie permite analizar tendencias o evolución. En ella se puede observar que la máxima extensión de las lagunas se produce durante los meses de invierno (indicados en colores celestes); y con los registros más bajos (o mínimos) en verano. De esta información, se tienen los mínimos históricos en marzo 1973 (192.469 m<sup>2</sup>), diciembre 2016 (130.500 m<sup>2</sup>) y diciembre 2020 (99.900 m<sup>2</sup>).

Se observa una tendencia histórica al descenso de las superficies asociadas a los inviernos (julio – agosto), y para las superficies registradas en los veranos (enero – febrero, noviembre - diciembre) presentan variabilidad en sus valores, donde no se repiten inundaciones extremas desde 1999. En general, se observa que la diferencia entre superficies entre los inviernos y veranos se ha ido acortando desde el año 2008, y posterior a esa fecha, se presentaría un quiebre en la tendencia de las superficies de invierno, con un descenso en las coberturas estimadas en invierno 2020 a invierno 2024. Con respecto a los resultados de verano, se mantiene el verano de 2020 como la fecha con las menores superficies estimadas y valores que se encuentren en general en el límite inferior del rango de superficies.

**Figura N°6-1. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector La Punta - La Brava.**

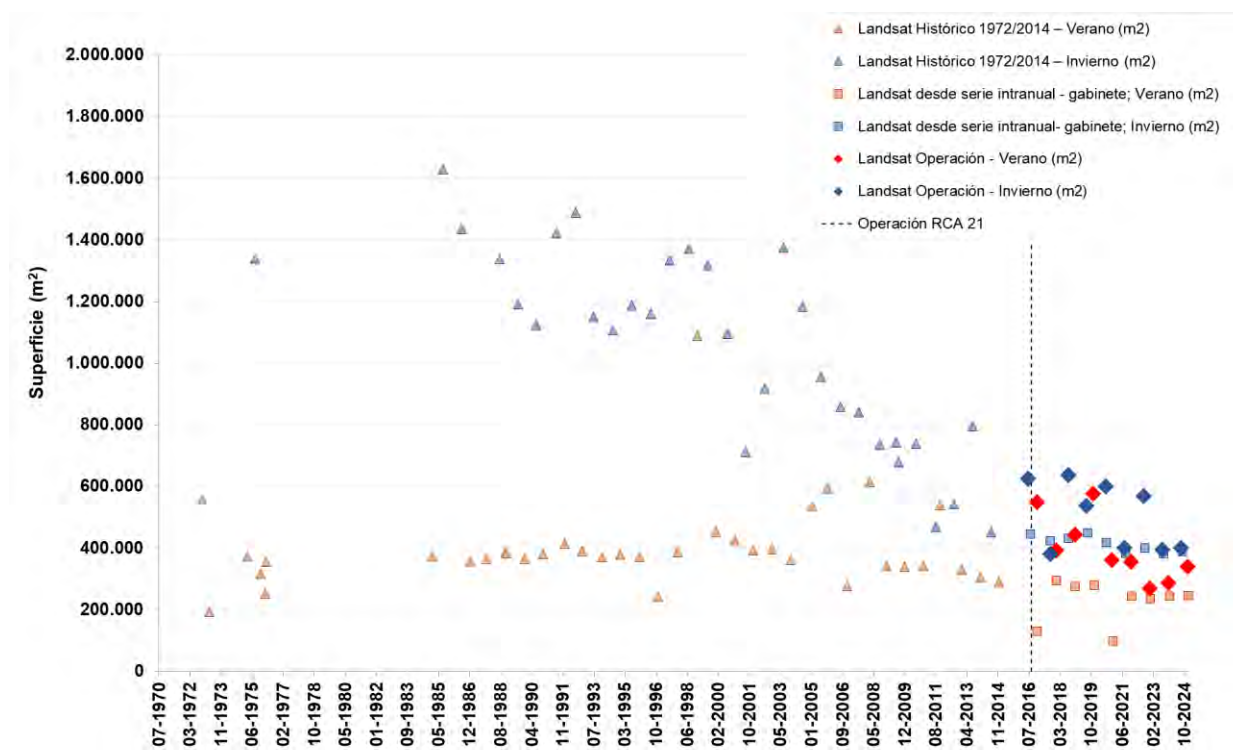


Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: *Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama*, de la Adenda 5 RWL (2015); y serie complementaria de las superficies mediante imágenes Landsat, 2016-2024.

- Evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) en relación con las superficies históricas (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

Los registros de superficies calculadas con Landsat observadas durante el monitoreo 2016 a 2024, como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI para el sector La Punta - La Brava y similares a los datos históricos, tanto en invierno y verano, considerando las superficies históricas de 1972 - 2014 y también las superficies Landsat de los años 2016 - 2024, como se observa en la **Figura N°6-2**. Los últimos 2 años, la superficie total se presenta estable.

**Figura N°6-2. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector La Punta - La Brava.**



Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5 RLW (2015); y serie complementaria de las superficies mediante imágenes Landsat, 2016-2024.

- Variación intranual de la superficie lagunar mediante imágenes Landsat

En relación con las variaciones intranuales, la **Figura N°6-3** muestra la fluctuación de las superficies lagunares, considerando el índice NDWI a partir de imágenes Landsat, tal como se presentó en el proceso de evaluación del proyecto, para los años 2013-2014. Para el presente análisis, se ha llevado a cabo un ejercicio similar para el periodo enero 2016 - diciembre 2024, presentando además las precipitaciones registradas en la estación meteorológica de la Planta Salar Albemarle y otros datos pluviométricos del sector cercano.

Desde este análisis intranual, se observa que durante los años 2013-2014, según la metodología utilizada en ese periodo, se registró un aumento en las superficies lagunares desde finales de mayo hasta agosto de 2013 (otoño – invierno), seguido de una disminución de los valores desde noviembre de 2013 hasta marzo de 2014 (primavera – verano). Posterior a esa fecha, las superficies experimentaron un incremento continuo hasta el siguiente invierno de 2014. Para la serie intranual 2013-2014, se evidenciaba cierta correspondencia o sincronía entre la superficie lagunar y las variaciones mensuales de precipitación a lo largo de ese año.

En el caso de los años 2016-2024 (**Figura N°6-3**, derecha), si bien se observa aumentos de superficie lagunar en invierno y descensos en período de verano, la amplitud de la variación es pequeña y no se

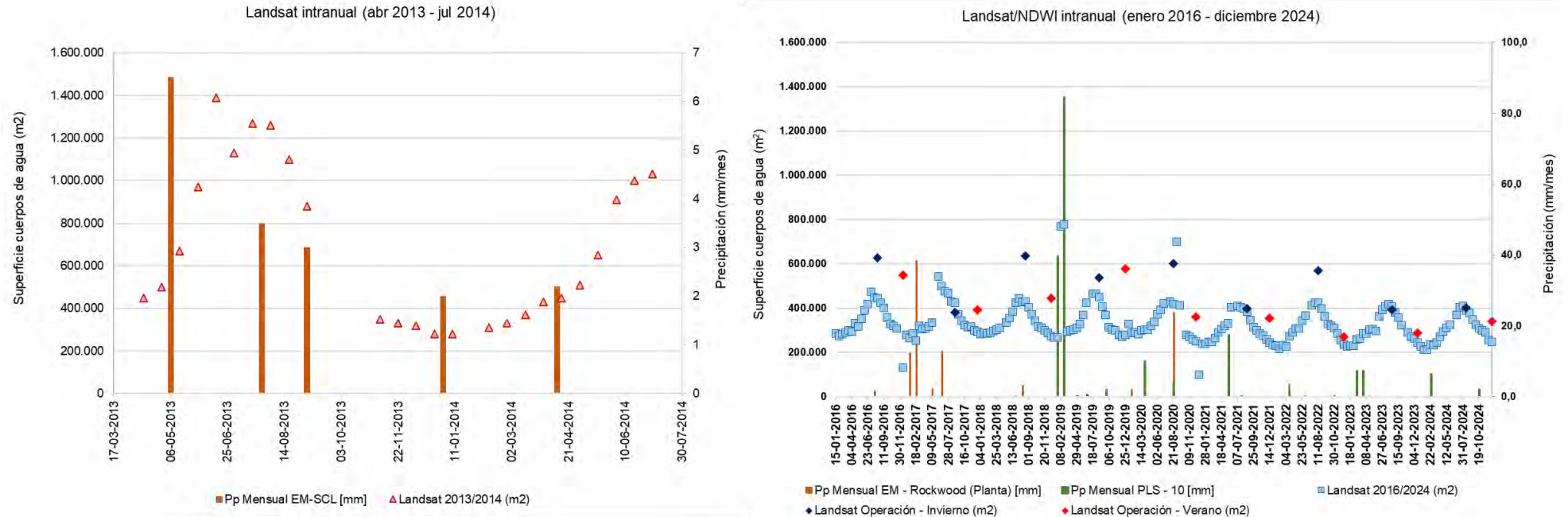
observa una correspondencia directa entre las superficies observadas con los datos pluviométricos, sino más bien se da una respuesta puntual e inmediata, dependiendo a su vez de la magnitud y duración de las precipitaciones, como se verifica por ejemplo en el abrupto aumento de la superficie producto de la precipitación caída en invierno en agosto 2020 (23,8 mm estación planta; 36,8 mm pluviómetro sector LPLB (PLS-10)). Posterior a ello, la superficie lagunar retoma la tendencia previa al evento de lluvia. Los datos resultantes de los pluviómetros por sector muestran respuesta inmediata a los eventos de precipitaciones de enero - febrero 2019 y agosto 2020 con las variaciones en las superficies lagunares, pero con la consiguiente baja abrupta a estos eventos.

No se han registrado a la fecha eventos de precipitaciones en este sector que puedan generar un aporte a las superficies lagunares en seguimiento como lo observado en las fechas citadas.

De ambas series intranuales, se observa que las superficies más altas se tienen en los meses de invierno, entre julio hasta mediados de septiembre y los valores más bajos en primavera – verano, entre noviembre – marzo. De lo anterior, se puede señalar que la variación intranual de las superficies lagunares de La Punta-La Brava, tendría una relación directa con la evapotranspiración y por ende con los niveles de aguas subsuperficiales, dejando la precipitación como un factor secundario dado que esta produce variaciones significativas de la superficie sólo para eventos de “alta precipitación” y de muy corto plazo; incluso no llegando a variar las superficies si se presentan en una cantidad menor a 10 mm.

Este comportamiento es coherente con el observado en los niveles de pozos y barrenos del sector. De los registros de superficies calculadas semestrales del PSAH durante los monitoreos 2016 – 2024, **Figura N°6-3**, se observa que coinciden temporalmente con las variaciones en la serie de tiempo de NDWI intranual y el mayor aporte de precipitaciones (agosto 2020).

**Figura N°6-3. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector La Punta - La Brava.**



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, y a modo de complemento, la **Figura N°6-4** siguiente presenta la serie Landsat histórica período dic1984-2024, elaborada para Informe<sup>15</sup> de Investigación de Causas N°4, por Activación PAT Sector Alerta Acuífero de Albemarle (Mayo 2024), con el objetivo de poder estudiar la tendencia de largo plazo de los cuerpos lagunares a través del tiempo de mayor data. Los registros obtenidos fueron utilizando la misma técnica de clasificación de un índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).

Al igual que para la serie 2016-2022, se utilizaron imágenes satelitales de libre disponibilidad LANDSAT y dado el período, se recopilaron imágenes de los satélites LANDSAT-5, 7, 8 y 9. Estas escenas contienen datos de reflectancia superficial (Surface Reflectance, Level-2), una resolución espacial de 30m de píxel, y se filtraron de acuerdo con su nubosidad (condición despejada) y su calidad radiométrica (no saturada).

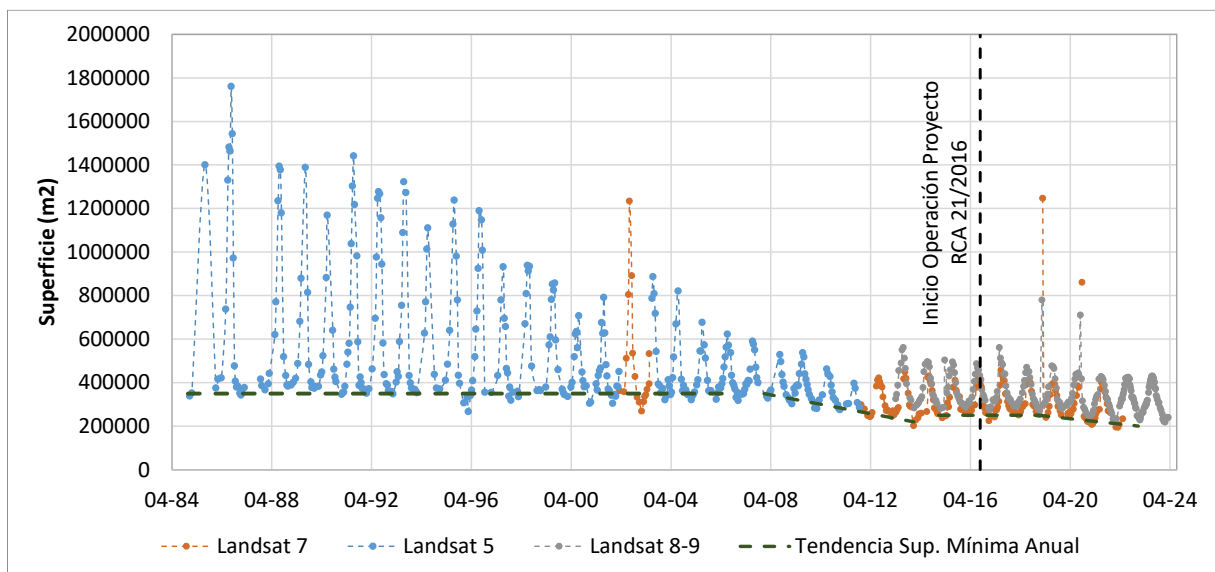
De la variación histórica, **Figura N°6-4**, se observan dos periodos de descenso en las áreas máximas anuales (áreas de invierno), previo al año 2012. El primer período desde el año 1994 a 2000 con una reducción de 1.400.000 m<sup>2</sup> a 705.000 m<sup>2</sup> aprox. y el segundo período de 2003 a 2012 con una reducción de 890.000 m<sup>2</sup> a 420.000 m<sup>2</sup> aprox. En el segundo periodo el área mínima de verano muestra además una reducción en el orden de 60.000 m<sup>2</sup>.

Los dos periodos se encuentran interrumpidos por 2 años (2001 y 2002) donde se aumenta el tamaño máximo de las lagunas hasta 1.230.000 m<sup>2</sup> en julio de 2002. El aumento en el tamaño coincide con 81,7 mm de lluvia caída en marzo de 2001 y 20 mm en marzo de 2002 en la estación de EM – SCL. Finalmente, dada la escala del gráfico y la ventana temporal presentada histórica (1984-2024), en el periodo 2013 a 2024, considerando las variaciones previas del sistema lagunar La Punta - La Brava, se observa una cierta estabilidad en el tamaño máximo y mínimo del área de las lagunas, que es lo que se visualizaba antes de tener toda la serie, que podría estar asociado al efecto amortiguador de los eventos de precipitaciones que habían ocurrido con una frecuencia de 2 años durante los meses de verano de 2013, 2015, 2017, y 2019 (y también agosto de 2020) (Ver **Figura N°6-3**).

En resumen, considerando el periodo de 1984 a 2024 para el Sistema Lagunar La Punta y La Brava, se puede observar una tendencia a la baja histórica y una cierta estabilización pero que a escala más pequeña de tiempo sigue presentando disminución. Los últimos 2 años se muestra en las mismas características de rango de variación.

<sup>15</sup> Informe Técnico de Investigación de Causas N°4, por Activación Plan Alerta Temprana- Sector Alerta Acuífero (Mayo 2024)- Entregado a la SMA a través de Comprobante Cód. 1049249 del 29-05-2024, Entrega Informe de Investigación.

**Figura N°6-4. Variación histórica Sistema Lagunar La Punta-La Brava, Landsat NDWI (1985-2024).**



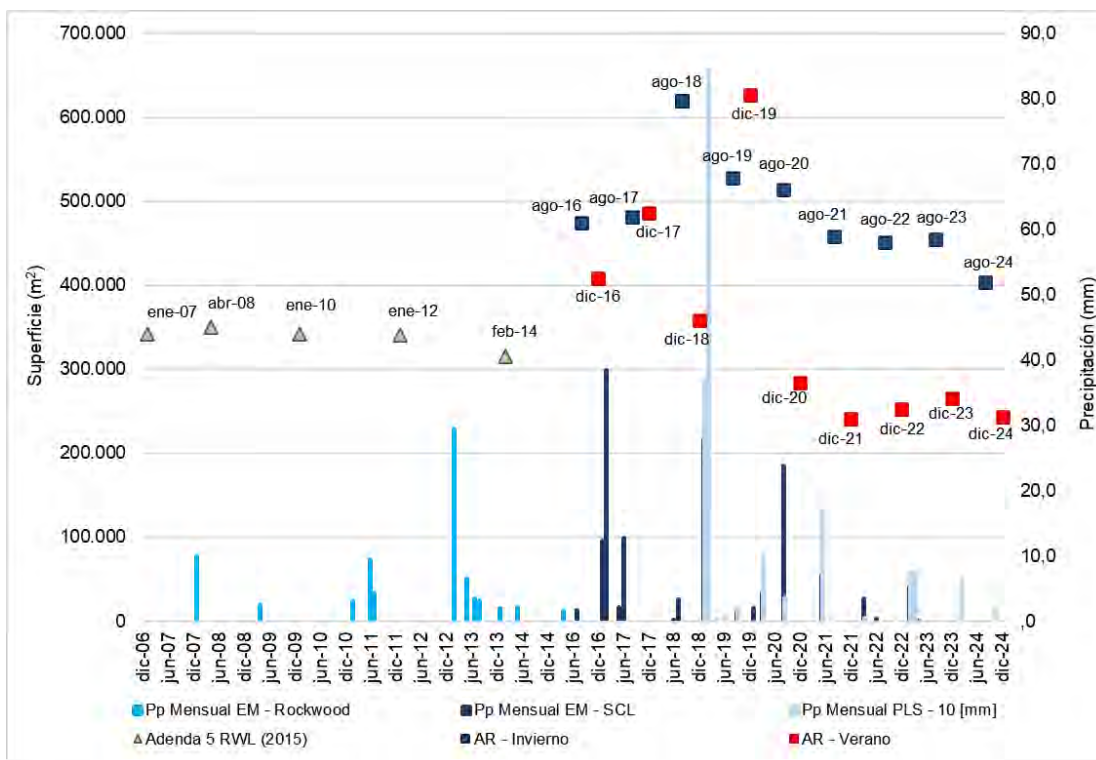
Fuente: ALB-HIDROMAS, 2024. Informe de Investigación N°4.

- Variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución

Con respecto a la variación de las superficies lagunares semestrales del PSAH, en la **Figura N°6-5** se presentan las imágenes de alta resolución para el sector La Punta - La Brava, junto a las superficies históricas AR presentadas en la Adenda 5 RWL (2015). Las superficies semestrales derivadas de imágenes de alta resolución del PSAH muestra variaciones con respecto las superficies lagunares de los registros históricos, especialmente durante los meses de verano. Hasta el verano de diciembre de 2019, estas superficies se encontraban por encima de los valores históricos. No obstante, a partir del verano de 2020, se ha observado que se sitúan por debajo de dichos valores. Para los meses de invierno no hay variaciones, con valores sobre los registros de la Adenda 5 RWL (2015). Es importante destacar que las superficies históricas en alta resolución han sido determinadas en meses distintos a los reportados semestralmente en el PSAH (agosto y diciembre), aspecto importante a considerar, dada la variabilidad intranual mostrada anteriormente.

De los aportes de precipitaciones en el periodo 2016 – 2024, los cuales se presentaron en general en el periodo de los meses de enero – marzo y mayo - julio; solo uno puede asociarse temporalmente al aumento de superficie lagunar de AR, el cual corresponde a las lluvias de enero y febrero de 2019 (sobre 120 mm acumulados en PLS-10). Sin embargo, de dicha información no se puede asegurar una relación entre el bajo aporte de precipitaciones y la baja en las superficies señaladas, ya que los años para los cuales se cuenta con áreas históricas de AR (**Figura N°6-5**) coinciden con el periodo de menos lluvia y épocas de verano, pero también con el periodo de quiebre en la tendencia de las superficies lagunares (2008-2014).

**Figura N°6-5. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar La Punta - La Brava.**



Fuente: Elaboración Propia

### 6.2.2 Sistema Lagunas Peine

- Funcionamiento del Sistema Lagunar

El Modelo conceptual del funcionamiento del Sistema Peine indica que las aguas de las lagunas son alimentadas por agua subterránea procedente del sureste. En la zona donde el nivel freático del acuífero de agua salobre intercepta la superficie del terreno, se sitúan los puntos de surgencia que se disponen a lo largo de un canal situado a unos 2 km al sur de la Laguna Salada. Una vez en superficie, el agua comienza a sufrir proceso de evaporación con más intensidad, fluyendo a través de la Laguna Salada luego por la Laguna Saladita y finalmente hacia la Laguna Interna, a través de una serie de canales de ancho variable y muy poco espesor de lámina de agua. Por último, el agua de la Laguna Interna acaba adentrándose en el Núcleo de salmuera de manera superficial, disolviendo la costra de cloruros y enriqueciéndose paulatinamente en sales disueltas, hasta que finalmente, ya convertida en salmuera, se incorpora al Núcleo.

Junto con lo anterior, además se observa que en los meses estivales se produce precipitación de sales por sobresaturación debida a evaporación, mientras que en los meses de invierno y primavera es cuando mayor es el caudal hacia la Laguna Interna, produciéndose disolución.

Las columnas litológicas obtenidas en las perforaciones realizadas en la zona (Adenda 5 RWL (2015)), han mostrado la existencia de sedimentos finos laminados; principalmente limos carbonatados y materia orgánica, cuyo origen es la deposición en el fondo de antiguas lagunas. Este tipo de sedimentos presenta valores bajos de conductividad hidráulica vertical por lo que la conexión entre el acuífero y el fondo de las lagunas no es buena. El aporte principal es por tanto superficial, ya sea a través de los canales existentes, o bien a través de las orillas de las lagunas.

Para las lagunas de Peine, del modelo conceptual se tiene que existiría una cierta correlación entre el área ocupada por las lagunas, y la precipitación registrada. No se observa una variación estacional de la superficie lagunar por influencia de la evaporación, si fuese así se observaría un aumento de superficie en julio de 2014 (**Figura N°6-6**) lo cual se corrobora con el análisis intranual año 2016-2024 de la misma Figura.

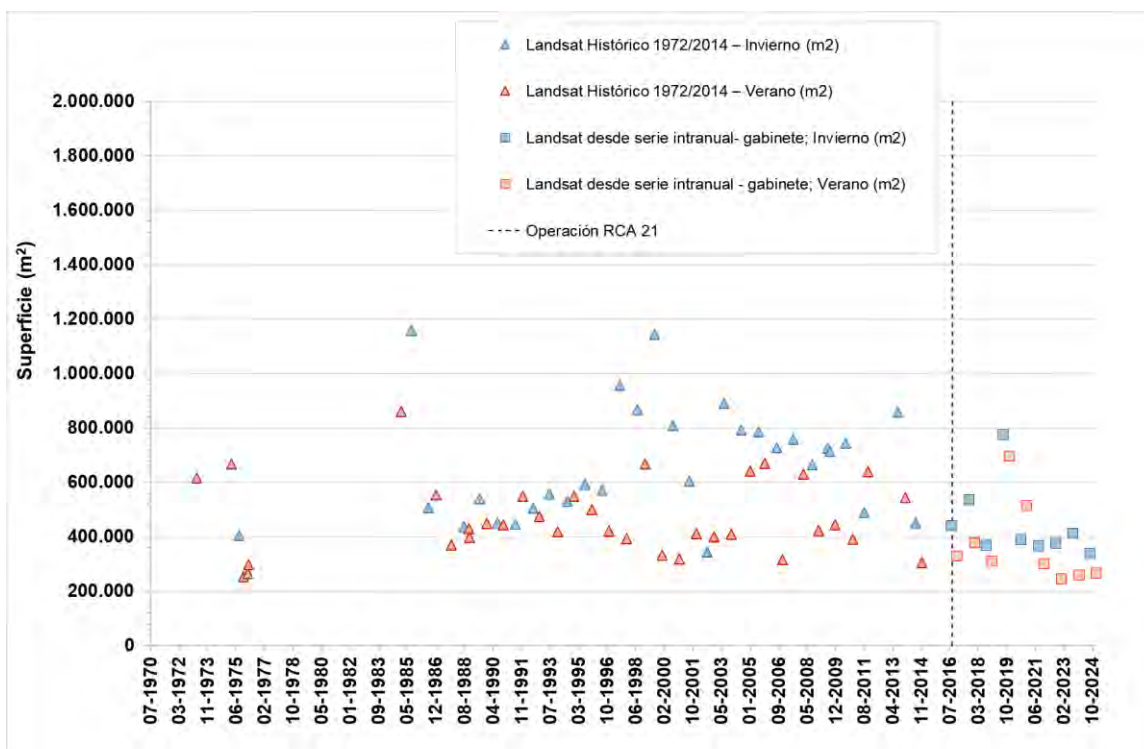
De la línea base y funcionamiento de las lagunas presentado en la Adenda 5 RWL (2015), se tiene de los datos y análisis químicos e isotópicos que, *“las lagunas Saladita e Interna presentan una estrecha relación con el régimen de precipitaciones de la zona, enriqueciéndose isotópicamente en verano y empobreciéndose en invierno. Mientras que el contenido isotópico y químico de la Laguna Salada tiende a ser menos evidente a los cambios de temperatura y de evaporación”*. La explicación para esto se encontraría dada su cercanía a la fuente que da origen a estas lagunas.

- Evolución histórica de superficie mediante imágenes Landsat (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

En la **Figura N°6-6**, se presenta la serie histórica (1972 – 2024) de imágenes de mediana resolución. Durante los inviernos hasta 2014, se observa una variabilidad marcada, con cifras máximas alcanzadas en 1985, registrando una extensión de 1.158.818 m<sup>2</sup>, y cifras mínimas en 1975, con tan solo 405.419 m<sup>2</sup>d.

En contraste, los veranos hasta 2014 revelan una dinámica estacional diferente, con patrones de crecimiento y decrecimiento en las extensiones lagunares. Sin embargo, la serie temporal a partir de 2015 hasta 2024 muestra una tendencia a la baja en ambas estaciones, con una cifra máxima importante en el invierno de 2019, alcanzando 774.900 m<sup>2</sup>; y en los veranos desde el 2021, rangos de superficies similares a los estimados durante los años 1976/1977.

**Figura N°6-6. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Peine.**

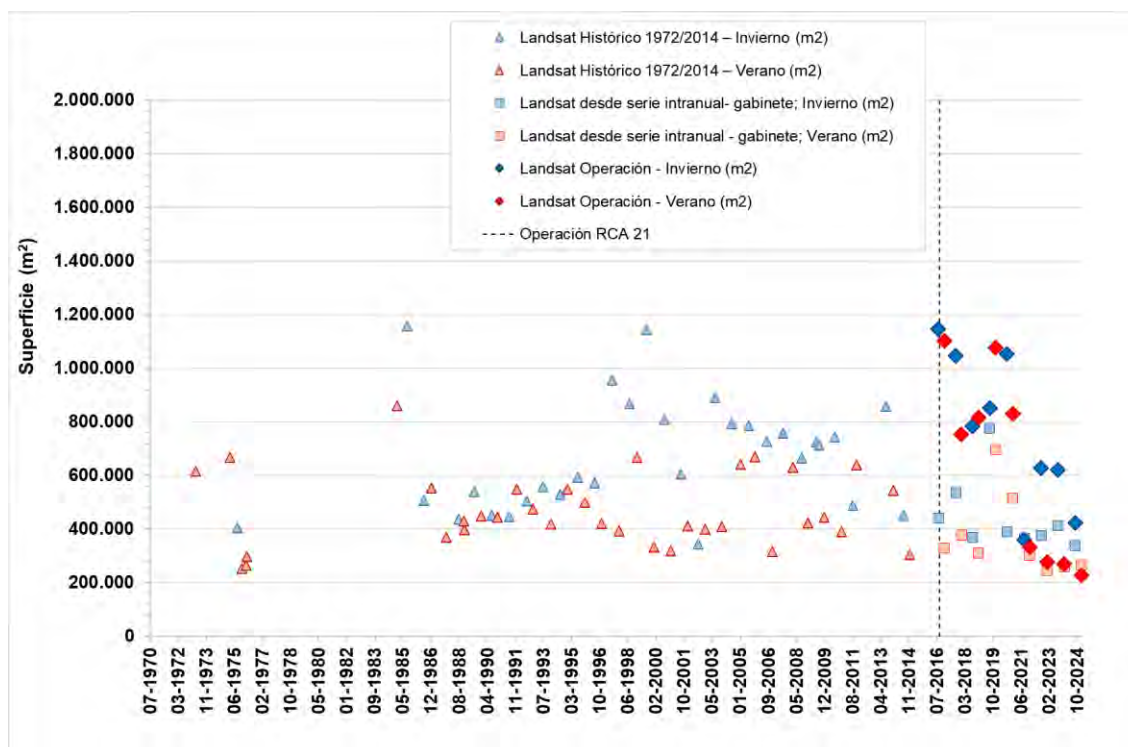


Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

- Evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) en relación con las superficies históricas (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

En la **Figura N°6-7** se presentan las superficies lagunares determinadas en el PSAH entre los años 2016-2024, con relación a las superficies históricas determinadas mediante NDWI – Landsat (1972-2014). Los registros de superficies calculadas con Landsat, reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2024 como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según la variación del índice NDWI, tanto en invierno como en verano, y para las series 1972 – 2014 y 2016 - 2024. Para los años 2016, 2017 y 2020 las superficies de invierno reportadas se encuentran en el rango de las superficies máximas, así como los registros de verano de 2016 y 2019; mientras que las mínimas se presentan en los registros de invierno y verano de 2021 y veranos de 2022, 2023 y 2024, siendo los veranos los que presentan un mayor descenso.

**Figura N°6-7. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Peine.**



Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

- Variación intranual de la superficie lagunar mediante imágenes Landsat

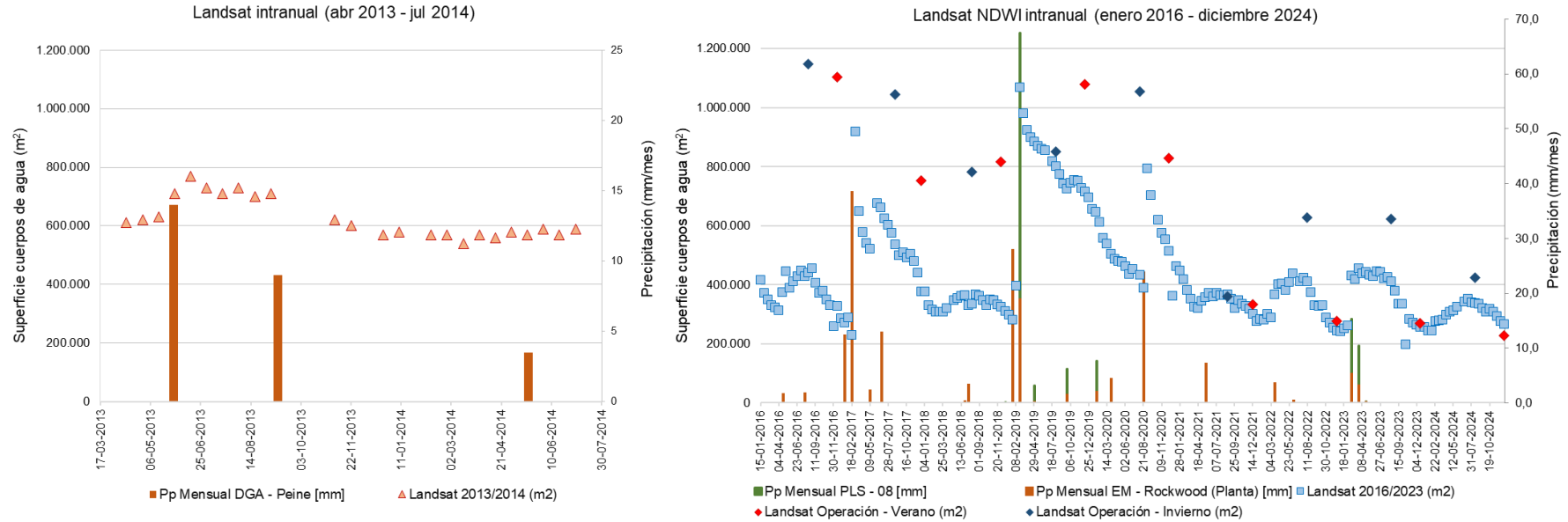
Respecto a las variaciones intranuales para el sector Peine, en la **Figura N°6-8** se observa en el gráfico (lado izquierdo) la variación de las superficies lagunares mediante el índice NDWI - Landsat, durante los años 2013 – 2014 y en el gráfico de la derecha, con un análisis similar para años 2016 – 2024 y junto con ello las precipitaciones de la estación ubicada en Planta Salar Albemarle y pluviométricos sector Peine.

De este análisis intranual se puede apreciar que para los años 2013-2014 se presentó menor variabilidad en la superficie lagunar (200.000 m<sup>2</sup> aprox.), a diferencia de los años 2016-2024 con un rango de variabilidad que va desde 1.000.000 m<sup>2</sup> hasta 200.000 m<sup>2</sup> aprox.

En la **Figura N°6-8** se observa un ligero aumento en las superficies lagunares de Peine de mayo a septiembre de 2013, manteniéndose estables de noviembre 2013 a julio 2014. Para el periodo de 2016-2024, la serie Landsat/NDWI muestra un aumento significativo entre febrero 2019 y septiembre 2020, seguido por una disminución en los valores desde diciembre de 2020 a la fecha, valores que se mantienen por debajo de los 500.000 m<sup>2</sup>. Estas variaciones al alza se relacionan con eventos de precipitación, como se refleja con los datos pluviométricos de enero- febrero 2019, agosto 2020 y febrero 2023.

En relación con las fluctuaciones en las superficies de lagunas según el índice Landsat/NDWI entre 2016 y 2024, así como los registros calculados como parte del PSAH, se destaca que estos últimos se sitúan dentro de los valores máximos y mínimos registrados hasta diciembre de 2024. No obstante, es relevante señalar que los registros de invierno y verano de 2021 – 2022 – 2023 y 2024, se encuentran en el rango mínimo de las superficies calculadas según el índice NDWI.

**Figura N°6-8. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Peine.**



Fuente: Elaboración propia.

Tal como se han estudiado las lagunas La Punta y La Brava, con el objetivo de analizar la evolución histórica que ha tenido el sistema Peine, es que durante el año 202 Albemarle actualizó el estudio de las superficies lagunares de este sistema desde una ventana temporal más amplia, con el objetivo de obtener la tendencia de largo plazo de los cuerpos lagunares en una análisis de larga data. La

**Figura N°6-9** presenta esta serie Landsat histórica período 1985-2024, estimada para el Informe<sup>16</sup> de Investigación de causas N°4 Activación PAT Sector Alerta Acuífero de Albemarle (Mayo 2024). Los registros se obtuvieron utilizando la misma técnica de clasificación de un índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), y considerando todo el sistema Peine en su conjunto, es decir, lagunas Salada, Saladita e Interna.

Para la actualización, se utilizaron imágenes satelitales de libre disponibilidad LANDSAT y dado el período, se recopilaban imágenes de los satélites LANDSAT-5, 7, 8 y 9 entre los años 1984 y 2024. Estas escenas contienen datos de reflectancia superficial (*Surface Reflectance, Level-2*), una resolución espacial de 30m de píxel, y se filtraron de acuerdo con su nubosidad (condición despejada) y su calidad radiométrica (no saturada).

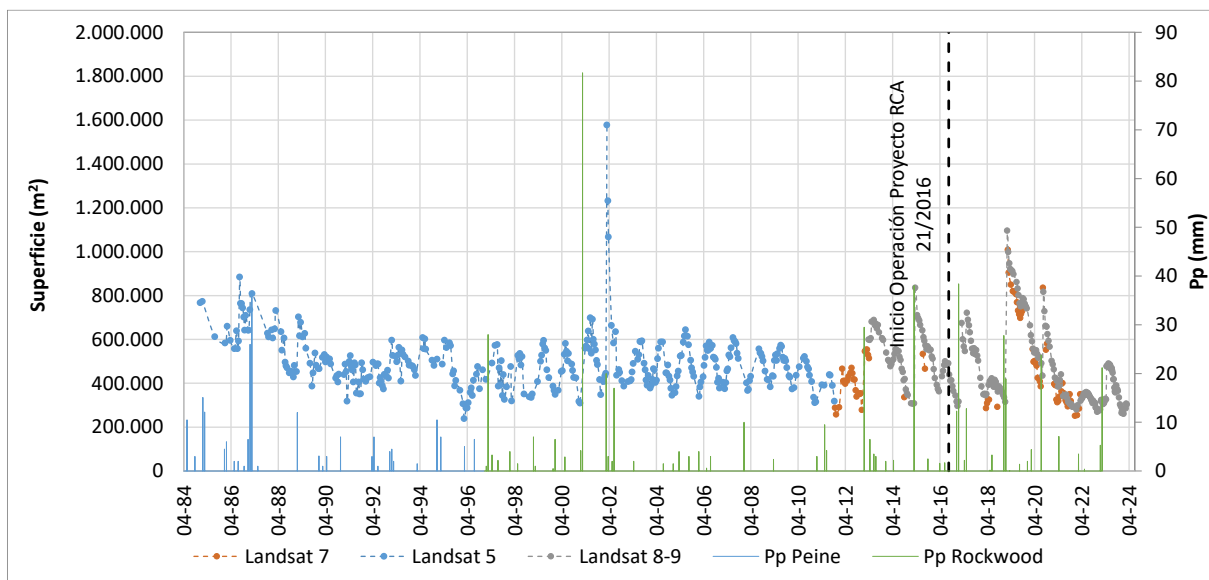
Analizando la variación histórica de las superficies lagunares, a través de las imágenes Landsat NDWI (1985-2023), **Figura N°6-9**, en general se observan tres periodos. El primer período entre 1985 a 1996, marcado por descensos y ascensos tanto de las superficies mínimas de verano como de las de invierno, llegando a un mínimo de casi 200.000 m<sup>2</sup> en el año 1996. El segundo período entre 1996 a 2013, caracterizado por una variabilidad estacional más o menos en rangos estables, entre 400.000 m<sup>2</sup> a 600.000 m<sup>2</sup> aproximadamente, con la excepción de una subida abrupta en marzo del año 2002. Finalmente, un tercer período desde el 2013, en el cual la laguna cambia su comportamiento, presentando una variación no estacional y con aumentos abruptos de superficies en promedio cada 2 años aprox. Estos aumentos grandes o peaks de áreas, han coincidido con las precipitaciones relevantes del último período (Ver **Figura N°6-8**).

Como se puede observar, los valores registrados durante el seguimiento ambiental y en particular el año 2024, se encontraría dentro de los rangos de variabilidad histórica del sistema Peine, y de años previos (1996-2013) el que ha fluctuado de manera dinámica y variable a través del tiempo. Las variaciones de las superficies lagunares del último período, podrían estar condicionadas a la morfología de las tres lagunas que conforman el sistema Peine, en especial de la laguna Interna, dados sus desbordes y cambios en sus flujos, así como por las condiciones climatológicas del lugar.

En resumen, considerando el periodo de dic 1984 a 2024 para el Sistema Lagunar Peine, se puede observar una variabilidad histórica y una cierta dependencia de las condiciones locales físicas e hidrológicas, y que en el último período 2013- 2022 se ve muy relacionado con el aporte de precipitaciones. Los dos últimos períodos, se observan con variaciones de menores rangos de amplitud, similar al comportamiento de años previos al 2013.

<sup>16</sup> Informe Técnico de Investigación de Causas N°4, por Activación Plan Alerta Temprana- Sector Alerta Acuífero (Mayo 2024)- Entregado a la SMA a través de Comprobante Cód. 1049249 del 29-05-2024, Entrega Informe de Investigación.

**Figura N°6-9. Variación histórica Sistema Lagunar Peine, Landsat NDWI (1985-2024)**



Fuente: ALB-HIDROMAS, 2024. Informe de Investigación N°4.

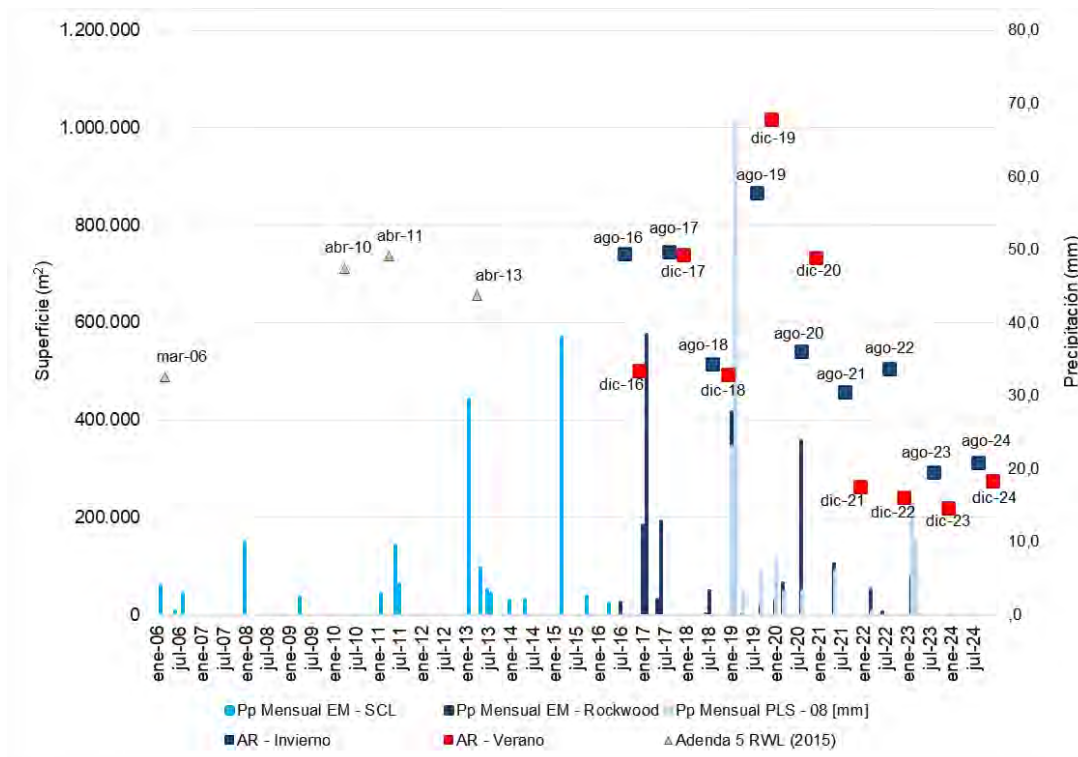
- Variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución

En relación con las variaciones de las superficies semestrales del PSAH a través de imágenes de alta resolución para el sector Peine (ver **Figura N°6-10**), se evidencia una cierta variabilidad estacional manifestada por la diferencia entre las áreas de invierno y verano. Esta variación es apreciable en la mayoría de los años; sin embargo, se evidencia una disminución en esta diferencia con registros más cercanos entre inviernos y veranos. Estos hallazgos, respaldados por los resultados obtenidos a partir de imágenes Landsat, revalidan el modelo conceptual formulado durante la evaluación del proyecto. Según dicho modelo, en general, no se observa una variación estacional significativa en la superficie lagunar de Peine debido a la influencia de la evaporación.

En relación con las magnitudes de las superficies históricas en AR (Adenda 5 RWL, 2015), se observa que las superficies semestrales del PSAH, desde el invierno de 2021 hasta la fecha, se sitúan por debajo del mínimo histórico en AR, de 489,000 m<sup>2</sup>. Es importante resaltar en esta comparativa que las superficies históricas en AR han sido determinadas en meses diferentes a los informados semestralmente en el PSAH, específicamente en agosto y diciembre. Este aspecto es significativo considerando la variabilidad intranual previamente demostrada, ya que las condiciones pueden diferir notablemente entre los meses mencionados.

Con respecto a las precipitaciones para el sector<sup>17</sup>, y considerando las precipitaciones registradas por estación Peine y en los últimos años la estación de Albemarle, observando la **Figura N°6-10**, se desprende que las precipitaciones de mayor aporte no siempre se relacionan temporalmente a superficies máximas o variaciones significativas en los cuerpos de agua del sector Peine, por lo que no puede relacionarse directamente el aporte de precipitaciones a la superficie lagunar.

**Figura N°6-10. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Peine.**



Fuente: Elaboración Propia

Las mediciones de precipitaciones registradas por la estación meteorológica en la Planta Albemarle revelan ciertos patrones durante varios periodos. En los meses de enero a junio de 2017, se observa un aumento con un total acumulado de 65,7 mm para ese periodo (en contraste, la estación DGA - Peine reporta 45 mm acumulados en febrero de 2017). A pesar de este incremento, no se evidencia un efecto directo en las superficies de agua para los meses de agosto y diciembre de 2017, ya que estas se mantienen dentro del rango estimado para el sector. En el caso de las precipitaciones de enero a abril de 2019, con un acumulado de 46,8 mm (5,5 mm según DGA – Peine; 93,7 mm según datos pluviométricos PLS-08 ), podría existir una relación con el aumento de las superficies según los informes semestrales de agosto y diciembre de 2019. En agosto de 2020, con precipitaciones de 23,8 mm, se podría inferir un aumento en las superficies informadas en diciembre de 2020. En el periodo de enero a diciembre de 2021, solo se registran precipitaciones en mayo de 2021 (7,1 mm según datos de la Planta

<sup>17</sup> La recopilación de información de precipitaciones anuales de la estación meteorológica DGA – Peine, actualizada en línea hasta mayo de 2020, posterior a esta fecha no existen datos en DGA, encontrándose en estado de suspensión (diciembre 2023); por lo tanto, se agregan datos de las estaciones meteorológicas Planta Albemarle para contextualización.

Salar), lo que podría indicar un leve aumento en las superficies para agosto de 2021. Para el año 2022, no se reportan precipitaciones, y en el periodo de 2023, las precipitaciones se registran en febrero y marzo, con un acumulado de 8,5 mm, sin generar variaciones significativas en las superficies de las lagunas. Para el año 2024 no se registran precipitaciones en el sector. Estos hallazgos revelan respuestas diversas y variaciones puntuales en las superficies, en algunos casos asociadas a eventos de precipitaciones, pero no de manera consistente. Esto sugiere una relación entre ambas variables, aunque se reconoce la influencia de otros factores como la evapotranspiración y los niveles subsuperficiales.

### 6.2.3 Sistema Aguas de Quelana

- Funcionamiento del Sistema Lagunar

Este sistema lagunar se sitúa sobre la Zona Marginal en el este del Salar de Atacama, y está conformado por un conjunto de lagunas de poca profundidad, situadas al pie de los depósitos aluviales que conectan con las Quebradas de Camar y El Toro. Su disposición es norte-sur, en paralelo al límite entre el Núcleo y la Zona Marginal, y también en paralelo a la posición de la interfase salina en esta zona.

De los datos históricos de superficie lagunar (Landsat 1972-2014) presentados en Adenda 5 RWL, se indica que: *"[...] el complejo de Aguas de Quelana es el único que se ha llegado a observar prácticamente seco, sin apenas lámina libre de agua detectable por satélite con la resolución que permite el sensor montado sobre los satélites LANDSAT" [Ref.: línea de base Apéndice L: Monitoreo satelital Lagunas].*

En este sistema las características de los cuerpos de agua provocan que el error al determinar la superficie inundada por esta metodología sea alto. Esto lleva a una subestimación de la superficie, especialmente en las mediciones de verano cuando los espejos de agua son más pequeños y dispersos. En este sistema presenta una fuerte estacionalidad con superficies en invierno significativamente mayores a las registradas en verano.

La entrada de agua a las lagunas del Sistema Aguas de Quelana, se produce a través de afloramientos situados al Este de estas, en cuyos alrededores se desarrolla vegetación. En este sistema no se aprecia la presencia de canales que alimenten los cuerpos de agua, a diferencia de lo que sucede en los sistemas Peine y Soncor. Esto estaría indicando que las surgencias de agua subterránea se producen en las mismas lagunas o muy cerca de ellas (similar a como se forma La Punta-La Brava). El flujo subterráneo que llega al sistema lagunar proviene de los acuíferos aluviales del este, que son alimentados por las quebradas de Camar, Cucala y El Toro. Los mayores aportes de agua a las lagunas se producen después de los períodos húmedos, sobre un cierto umbral de precipitaciones, como por ejemplo los años 2012 o 2017, que se traducen en un aumento de corto plazo de la superficie inundada de las lagunas.

El agua en las lagunas está sometida a procesos de evaporación. A la vista de las imágenes satelitales y de la geología descrita por Moraga *et al* (1974), se deduce que, durante estos eventos de precipitación, una parte del agua, que no puede evaporarse, discurre superficialmente a través de canales hacia el límite con la costra de cloruros del Núcleo, donde finalmente se incorpora al mismo ya convertida en

salmuera. El hecho de que no se observen los denominados “open pools”, en el límite entre la costra de cloruros y la Zona Marginal, indicaría que estos flujos se producen únicamente tras eventos de gran precipitación.

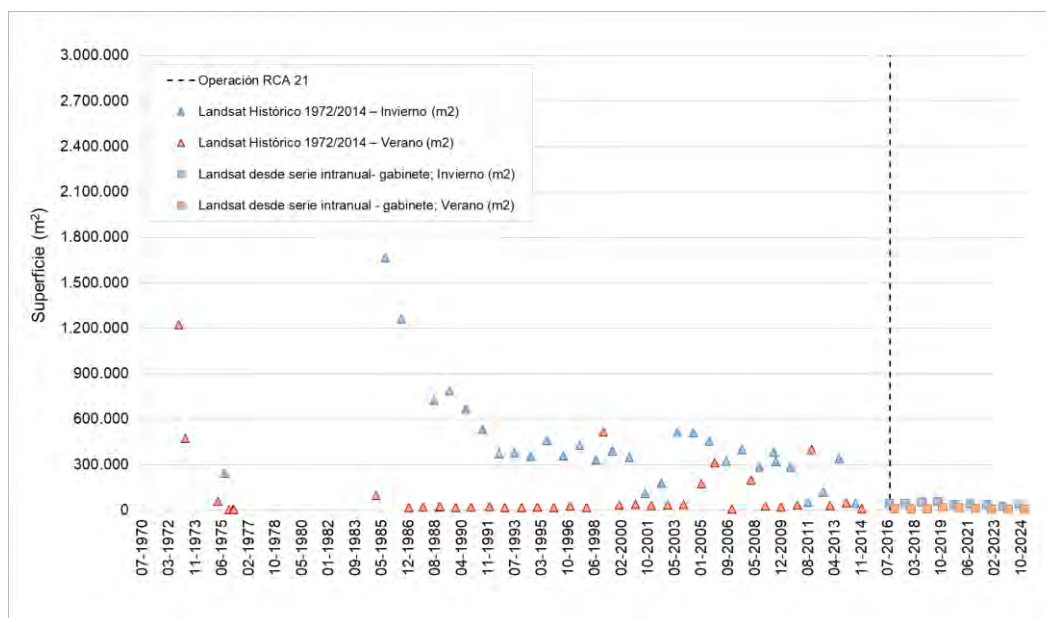
- Evolución histórica de superficie mediante imágenes Landsat (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

En la **Figura N°6-11** se presenta la serie histórica (1972 – 2024) de las superficies lagunares del sector Aguas de Quelana, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat asociadas al índice NDWI.

La serie temporal de superficies lagunares en el sector Aguas de Quelana, registrada desde octubre de 1972 hasta diciembre de 2024, muestra patrones significativos en la variabilidad de estas extensiones a lo largo de los años. Durante los inviernos, se observan superficies con cifras máximas importantes en 1985 y 1986, alcanzando 1.665.409 m<sup>2</sup> y 1.263.722 m<sup>2</sup>, respectivamente. Sin embargo, algunos inviernos presentan extensiones mínimas, como en 2023 con una superficie de 27.000 m<sup>2</sup> y otras que rondan los 35.000 m<sup>2</sup>. En contraste, los veranos muestran una dinámica estacional diferente, con una extensión máxima excepcional en 1972 de 1.224.432 m<sup>2</sup>, pero en general los promedios en verano alcanzan los 60.000 m<sup>2</sup>. Las menores extensiones se observan en el rango de los 5.000 m<sup>2</sup> (2022, 2023 y 2024).

En general, la serie de datos muestra que la máxima extensión de las lagunas se produce principalmente durante los meses de invierno, indicados en colores celestes en la gráfica, con una tendencia a la baja de las superficies lagunares mínimas en los registros de Landsat/NDWI, para ambas temporadas desde 2014.

**Figura N°6-11. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Aguas de Quelana.**



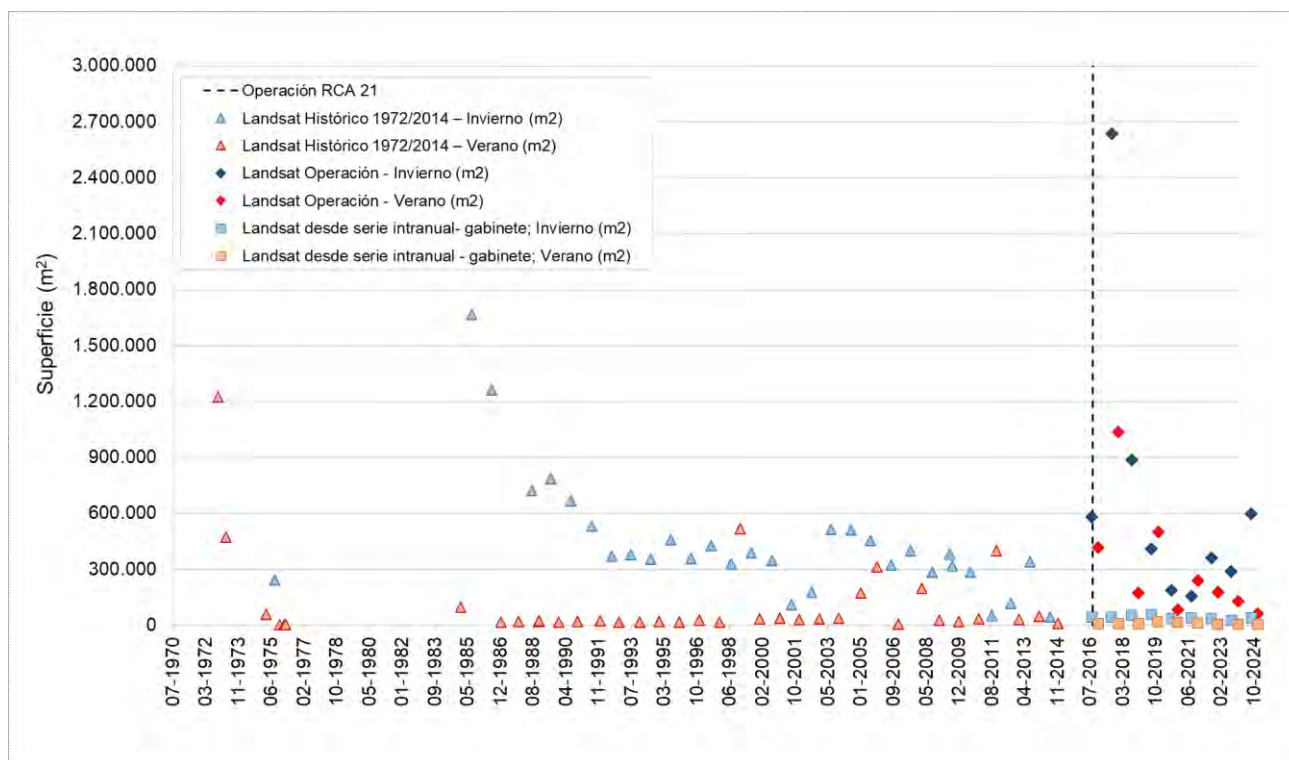
Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

- Evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) en relación con las superficies históricas (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

Los registros de superficies calculadas con Landsat, reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2024 como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI, tanto en invierno como en verano (**Figura N°6-12**).

Las diferencias significativas entre la serie histórica NDWI - Landsat y los resultados de los reportes semestrales dentro del marco del PSAH se atribuyen al fortalecimiento de la metodología de procesamiento de imágenes. Este fortalecimiento incluye la incorporación de otros índices espectrales para abordar zonas con combinaciones de recubrimientos, como por ejemplo, áreas con vegetación y agua. Además, se destaca la importancia de la validación en terreno y el análisis visual fotointerpretativo en este proceso. Estas etapas contribuyen de manera significativa a depurar los límites de los cuerpos de agua y a calibrar el modelo de clasificación en función de las observaciones realizadas en campo. En el contexto específico de Aguas de Quelana, la metodología aplicada en el marco del PSAH posibilita la inclusión de áreas de vegetación inundada en la superficie total de ocupación de las lagunas. Estas áreas son identificadas a través de índices como el NDVI y la Banda NIR, lo que explica la detección de regiones de transición que no son captadas por la metodología NDWI-Landsat. Estas diferencias en la detección de superficies se traducen en discrepancias en las áreas calculadas por ambos métodos.

**Figura N°6-12. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Aguas de Quelana.**



Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

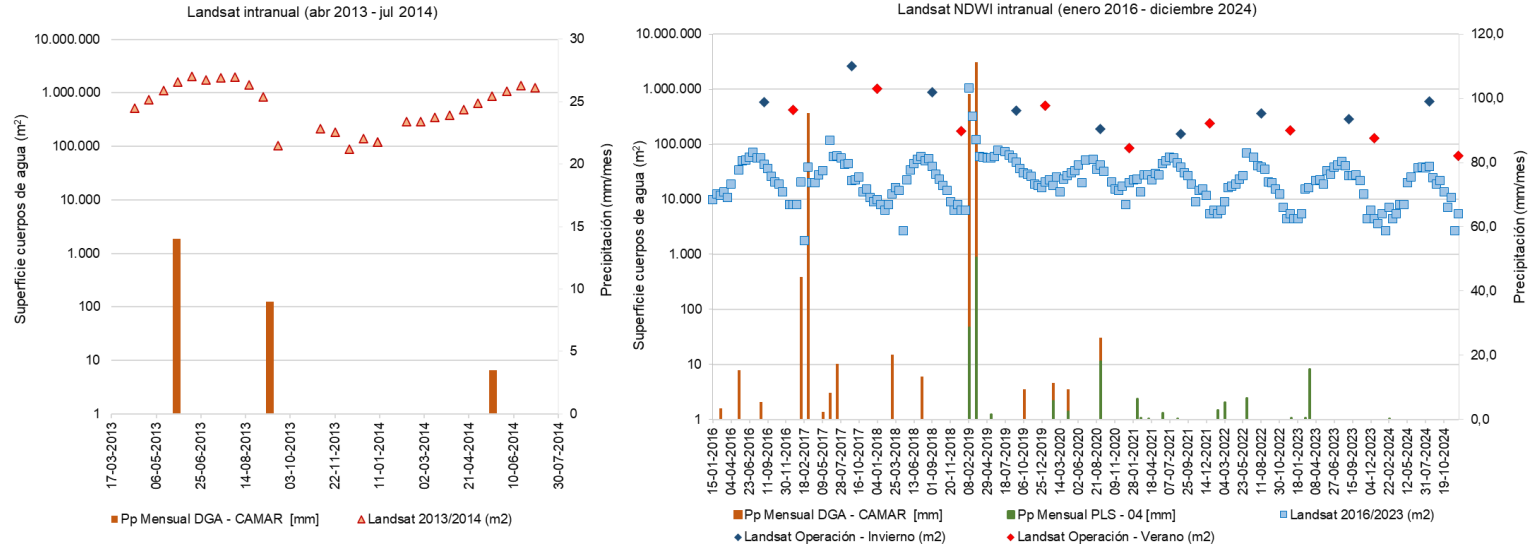
- Variación intranual de la superficie lagunar mediante imágenes Landsat

Con respecto a las variaciones intranuales para el sector Aguas de Quelana, en la **Figura N°6-13** se presenta la variación de las superficies lagunares mediante el índice NDWI - Landsat, durante los años 2013 – 2014, datos presentados en proceso de evaluación del proyecto, y las estimadas para el período 2016 – 2024, junto a los registros de precipitaciones en el sector. De la variación intranual se puede apreciar que para los años 2013-2014 existe aumento de las superficies para la época de invierno, esto es desde fines de mayo de 2013 hasta agosto de 2013, y disminuciones de las superficies para la época de verano, con las menores superficies registradas entre septiembre de 2013 a enero de 2014, siendo este último registro donde no se observan cuerpos de agua.

Por otro lado, los registros en la serie 2016 – 2024, muestran áreas mucho menores que las 2013-2014, pero también siguen mostrando un aumento de las superficies en inviernos (aproximadamente entre mayo y septiembre) y descensos en época de primavera-verano (aproximadamente entre octubre y fines de enero), siendo los valores más bajo del periodo 2016 – 2024 donde se observan superficies que bordean o están bajo los 5.000 m<sup>2</sup> incluso hasta 2.000 m<sup>2</sup> (02-2017, 04-2018, 12-2024).

Del análisis intranual y en relación con las precipitaciones, tanto el período 2013-2014 como el 2016-2024, se observan aumentos y descensos de superficies de lagunas que no se relacionan directamente con los eventos de precipitación, lo que indicaría y reafirmaría el funcionamiento del modelo conceptual para este sistema, con que el agua en las lagunas está sometida a procesos de evaporación, y este sería el factor preponderante. Solo se observa correspondencia entre el aumento de precipitaciones y de superficies en los registros de febrero 2019, donde ambas variables presentan aumentos significativos.

**Figura N°6-13. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Aguas de Quelana.**



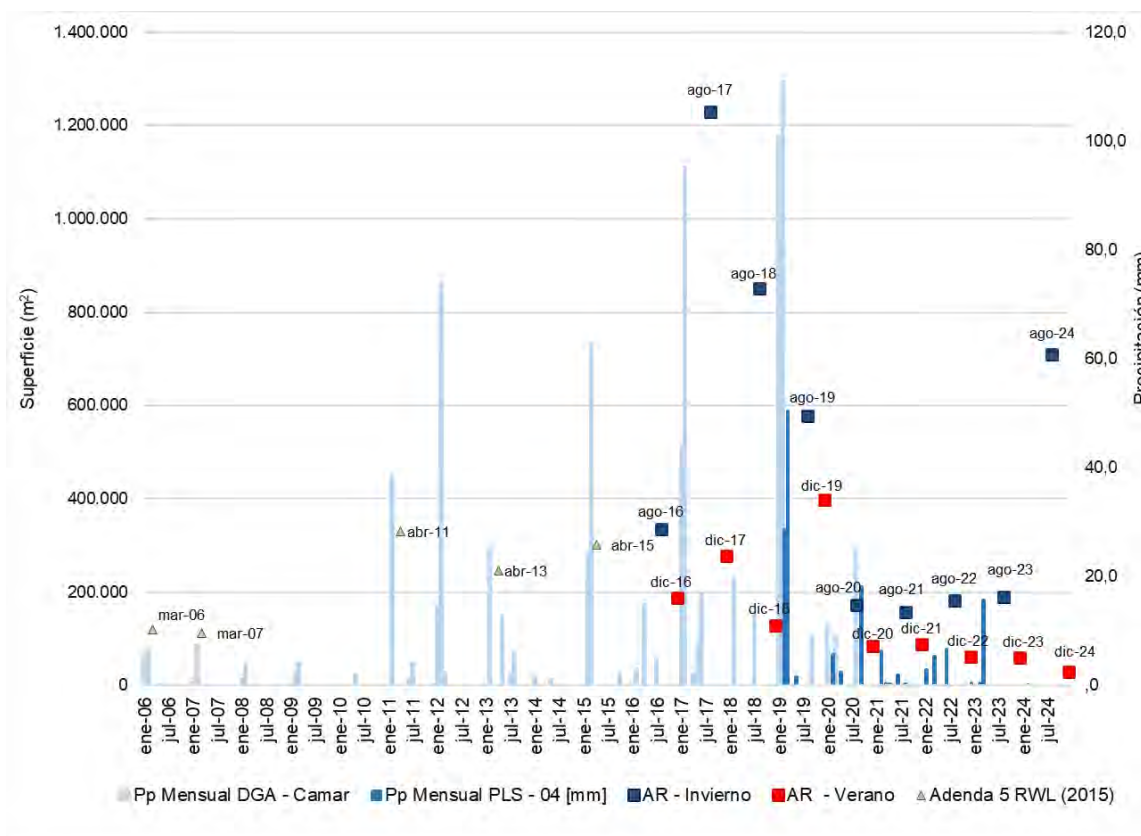
Fuente: Elaboración propia.

- Variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución

En relación con la variación de las superficies semestrales del PSAH en el sector Aguas de Quelana, analizadas mediante imágenes de alta resolución (ver **Figura N°6-14**), se destaca que estas superan el mínimo histórico para comparaciones con registros de invierno, pero se sitúan por debajo en comparación con los registros de verano. Al respecto, es importante señalar que las superficies históricas en alta resolución fueron determinadas en meses diferentes (marzo) respecto a los informes semestrales del PSAH (agosto y diciembre), introduciendo una consideración importante dada la variabilidad intranual previamente mostrada.

En cuanto a las precipitaciones en el sector durante el periodo semestral de 2016 a 2024, se destacan eventos notables, como aquellos ocurridos en febrero de 2017 y enero-febrero de 2019, que influyeron en las variaciones de las superficies de las lagunas. A pesar de la correlación observada entre el aumento de superficies y mayores precipitaciones, estos eventos son específicos en fechas donde la contribución de precipitación excede el rango típico para el sector (aproximadamente 4,5 mm) y se acerca a los máximos (alrededor de 100 mm). El análisis anual e interanual concluye que, aunque las precipitaciones son relevantes, la variabilidad estacional está principalmente determinada por la evaporación del sistema, respaldando así el modelo conceptual propuesto.

**Figura N°6-14. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Aguas de Quelana.**



Fuente: Elaboración Propia

#### 6.2.4 Sistema Soncor

- Funcionamiento del Sistema Lagunar

El Sistema Soncor se sitúa en el sector norte de la Zona Marginal del Salar de Atacama, al sureste del delta del río San Pedro. Se compone de las lagunas de Chaxa, Barros Negros y Puilar. La Laguna Chaxa se alimenta desde el norte a través del Canal del Burro Muerto y descarga hacia el sur por otro canal, hacia la Laguna de Barros Negros.

Las lagunas de Barros Negros y Chaxa se sitúan sobre el acuífero de salmuera, mientras que la Laguna Puilar está en las proximidades de la interfase salina, que en esta zona se dispone en dirección norte-sur, perpendicular a la dirección de los flujos de entrada de agua salobre desde los depósitos aluviales del borde este del Salar. La topografía en esta zona es relativamente plana, existiendo una ligera pendiente en dirección hacia el núcleo del salar.

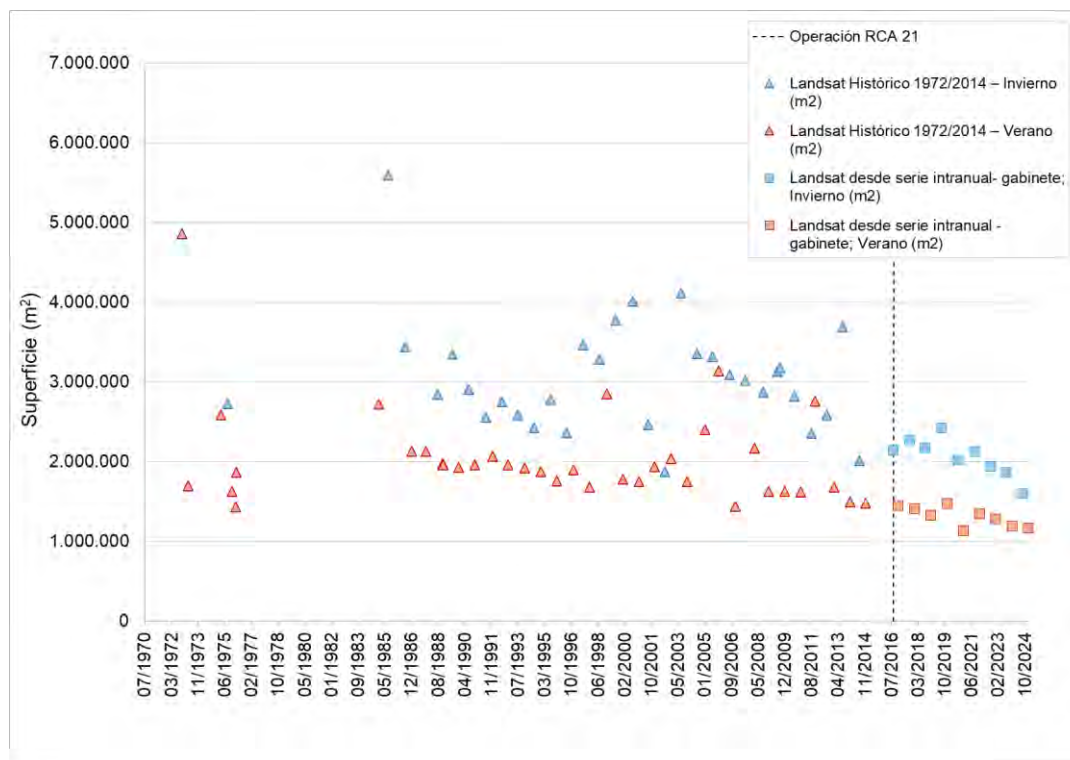
La zona situada al sur de la Laguna Barros Negros representa una zona de acumulación por desbordamiento, y en cierto modo comunicada con el acuífero de salmuera, al encontrarse el nivel en la misma cota.

En resumen, se tiene que, las lagunas de este sistema Soncor son alimentadas por agua subterránea que ingresa al sistema proveniente de los acuíferos situados al norte y este. En la zona donde la interfase salina intercepta con el terreno se producen desbordamientos del agua que fluye hacia el oeste de manera superficial y subsuperficial. La mayor parte de estos flujos se concentra en el canal de Burro Muerto que acaba desembocando en la Laguna Chaxa, mientras otros desbordamientos alcanzan el canal que une la Laguna Chaxa con la Laguna Barros Negros y la propia Laguna de Barros Negros. Una vez que alcanza los canales mencionados, el agua fluye en dirección sur y comienza a sufrir proceso de evaporación, pasando primero por la Laguna Chaxa, después Barros Negros, y finalmente termina saliendo del sistema por la zona de desbordamiento “Cola de Pez” e infiltrándose en el Núcleo.

- Evolución histórica de superficie mediante imágenes Landsat (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

En la **Figura N°6-15**, se presenta la serie histórica (1972 – 2024) de las superficies lagunares del sector Soncor, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat, en base al índice NDWI. En la serie total, se puede observar que la máxima extensión de las lagunas se produce principalmente durante los meses de invierno. En este caso, la diferencia entre las superficies de los periodos de invierno y verano puede alcanzar aproximadamente el 60%, sin embargo esta diferencia se ha ido acortando en los registros más actuales. La tendencia de las superficies asociadas a los inviernos (julio – agosto) muestran un comportamiento variable de aumentos y descensos desde el 2004 (descenso 1986-1996; ascenso 1997-2003; descenso 2004-2014), para luego estabilizarse un poco entre 2015 y 2023. Respecto a las superficies históricas medidas en verano, éstas se observan en general con tendencia al descenso, desde 1984 a la fecha.

**Figura N°6-15. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor.**



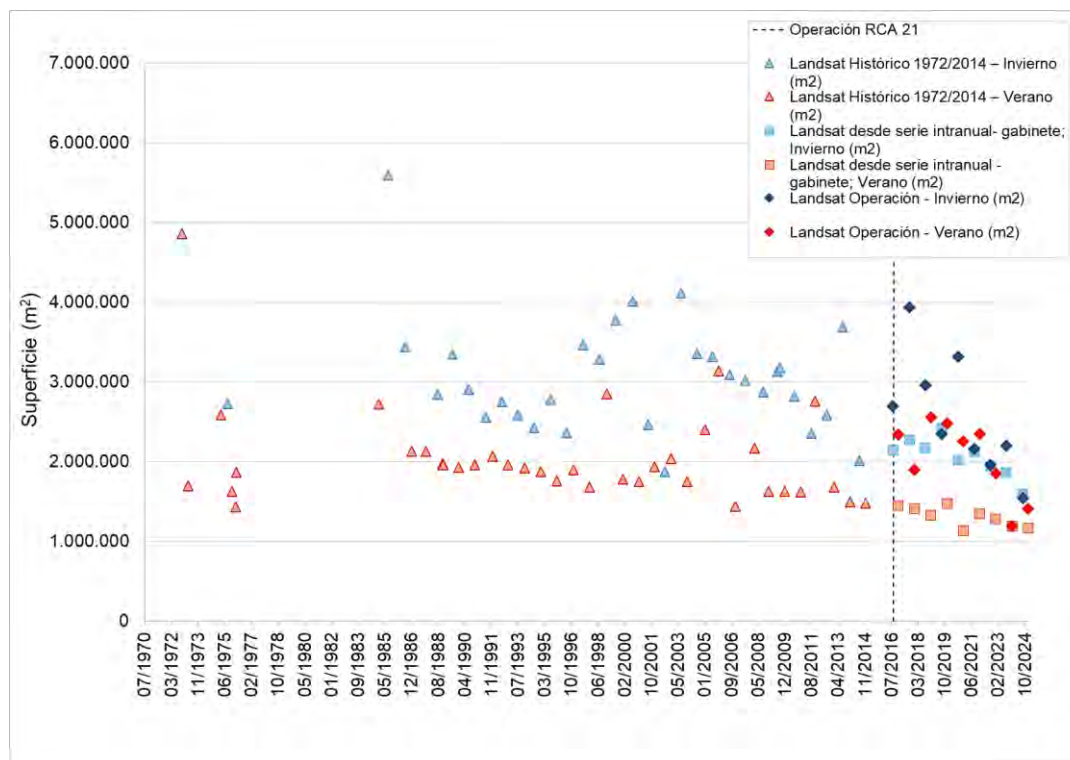
Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

- Evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) en relación con las superficies históricas (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

Los registros de superficies semestrales calculadas con Landsat, (**Figura N°6-16**) reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2024 como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI, tanto en invierno como en verano, y para las series 1972 – 2014 y 2016 – 2024. Las principales diferencias entre la serie histórica NDWI - Landsat y los resultados de los reportes semestrales en el marco del PSAH, se pueden atribuir a varios factores metodológicos ya mencionados. No obstante, estas diferencias resultan ser menores respecto a los sectores ya analizados, debido a la fisonomía de Soncor, lo cual ayuda en la definición de las lagunas y por ende la brecha entre ambos tipos de metodologías se reduce.

En general, las superficies semestrales presentan valores más cercanos a los máximos históricos de la serie NDWI – Landsat, tanto en invierno como en verano, a excepción del registro de diciembre de 2023 similar a lo determinado en la serie NDWI/Landsat.

**Figura N°6-16. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Soncor.**



Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

- Variación intranual de la superficie lagunar mediante imágenes Landsat

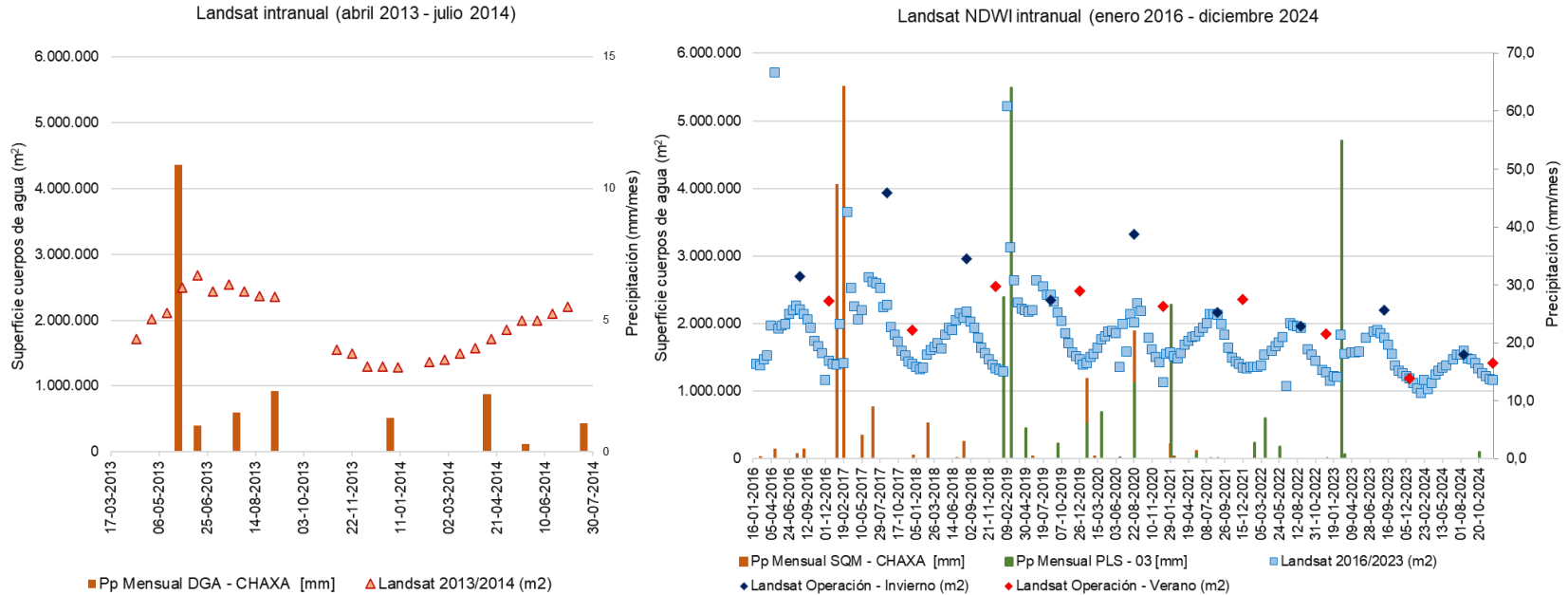
Con respecto a las variaciones intranuales para el sector Soncor, en la **Figura N°6-17** se observa la variación de las superficies lagunares mediante el índice NDWI - Landsat, durante los años 2013 – 2014 y 2016 – 2024 y su relación con las precipitaciones.

Del análisis intranual de superficies lagunares realizado en la Adenda 5 (año 2013-2014), se puede observar que la máxima extensión de las lagunas se produce durante los meses de invierno, tras el período de lluvias del primer semestre de 2013, por lo que se podría atribuir cierta relación entre ambas variables, sin embargo, tras registrarse la mínima extensión en el verano de 2014, la superficie lagunar vuelve a aumentar, sin estar este hecho precedido de eventos importantes de precipitación. Asimismo, los registros en la serie 2016 – 2024, también muestran un aumento de las superficies en invierno; mientras que los registros mínimos, se aprecian entre octubre y febrero - marzo. Por lo anterior, se tiene que la precipitación no sería el factor preponderante al cual atribuir la variabilidad estacional del sistema; a excepción de registros puntuales en febrero de 2017, febrero de 2019 y febrero 2023, donde hay una correspondencia entre los registros de precipitaciones y el aumento de las superficies registradas.

Con respecto a las variaciones de las superficies lagunares del índice Landsat/NDWI 2016- 2024 y los registros calculados como parte del PSAH para el sector Soncor, estos últimos se encuentran en el rango de los registros máximos y mínimos para la serie total hasta diciembre de 2024, con agosto de 2019, agosto de 2021 y agosto 2022, al igual que el verano de 2023, presentando valores similares a los observados en la serie NDWI.

De la serie Landsat/NDWI 2016- 2024, se observa una tendencia al descenso a partir de 2019 en las superficies máximas de invierno, y menor en las superficies mínimas de verano. El último año se percibe cierta estabilidad, en rangos mínimos.

**Figura N°6-17. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor.**



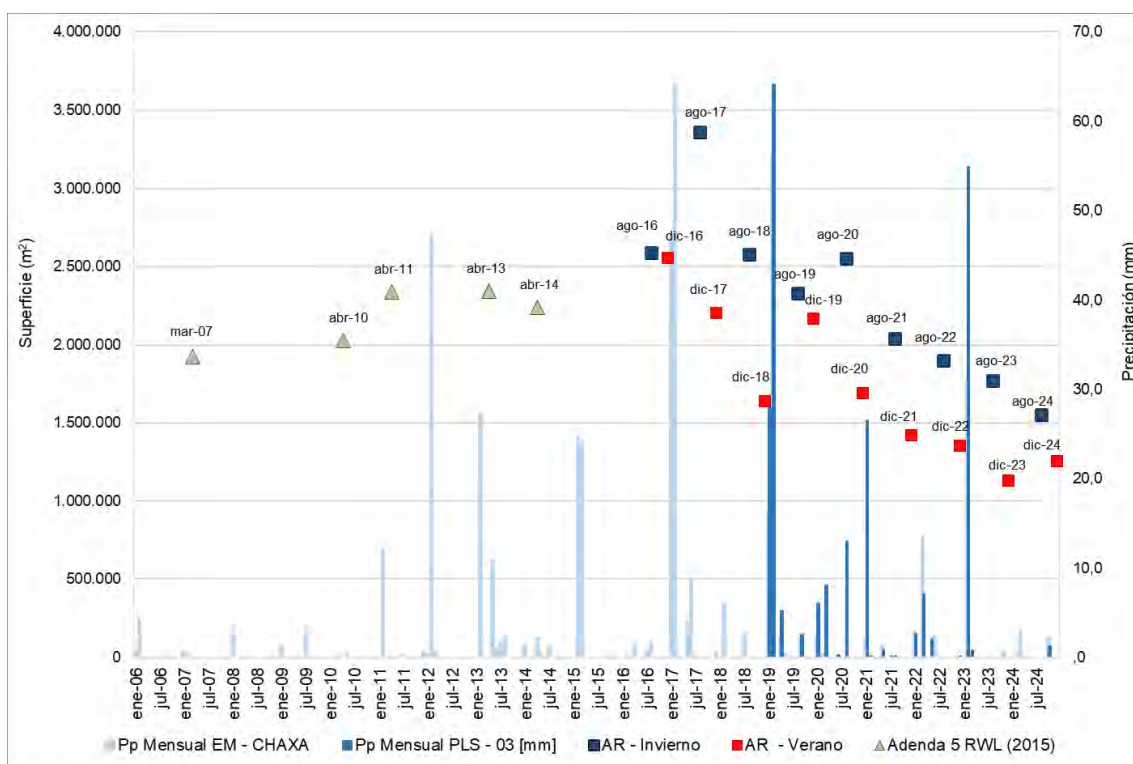
Fuente: Elaboración propia.

- Variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución

Con respecto a la variación de las superficies semestrales del PSAH desde imágenes de alta resolución, para el sector Soncor (**Figura N°6-18**) se puede observar variabilidad estacional, con meses de agosto con superficies mayores a las registradas en diciembre. En relación con las superficies históricas en AR (Adenda 5 RWL, 2015), las superficies semestrales del PSAH se presentan por sobre y bajo el mínimo de Adenda 5 AR (1.924.000 m<sup>2</sup>). Dentro de esta comparativa, es importante destacar que las superficies históricas en AR han sido determinadas en meses distintos a los reportados semestralmente en el PSAH (agosto y diciembre), aspecto importante a considerar, dada la variabilidad intranual mostrada anteriormente.

Con respecto a las precipitaciones para el sector<sup>18</sup>, para las superficies máximas del periodo 2016 – 2024, el registro de agosto de 2017 esta precedido por 124,1 mm acumulados desde enero a junio de 2017, lo cual repercutió en un aumento de superficie entre ambos meses. Una situación similar se observa en las siguientes temporadas invierno-verano del periodo en cuestión, en donde aumentó la superficie lagunar de invierno 2020 para luego bajar, en diciembre 2020.

**Figura N°6-18. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Soncor.**



Fuente: Elaboración Propia

<sup>18</sup> La recopilación de información de precipitaciones anuales de la estación meteorológica EM – Chaxa, estación SQM, disponibles en línea en <https://www.sqmsenlinea.com/meteorology/231>.

## 7 CONCLUSIONES

Con respecto a los resultados de las superficies de cuerpos de agua por sistema lagunar, al contrastar los resultados semestrales de los cuatro sistemas en 2024, se observa que la mayor cobertura es para el sector Soncor, desde imágenes Pleiades 1-A, tanto en invierno 2024 como en verano 2024-2025, con 1.555.486,6 m<sup>2</sup> y 1.257.816,2 m<sup>2</sup>, respectivamente. En tanto, las menores superficies se presentaron en el sector Aguas de Quelana, en verano 2024-2025 con 30.007,6 m<sup>2</sup> y el sector Peine en el periodo de invierno con 313.749,3 m<sup>2</sup> (**Tabla N°7-1**). El análisis comparativo de las superficies de cuerpos de agua determinadas para el noveno año de monitoreo 2024 con respecto a los registros históricos se presenta en la **Tabla N°7-1**. De los resultados de las campañas para el año 2024, se puede concluir que las estimaciones de superficies lagunares mediante imágenes de alta resolución, para la condición de invierno 2024 se encuentran por sobre el mínimo histórico en los sectores La Punta – La Brava y Aguas de Quelana y bajo el mínimo histórico en los sectores Peine y Soncor; y para la estación de verano (diciembre 2024) todos los sistemas presentaron superficies bajo el mínimo histórico. Dentro de esta comparativa, es importante destacar que las superficies históricas en AR han sido determinadas en meses distintos (marzo – abril) a los reportados semestralmente en el PSAH (agosto y diciembre), aspecto importante a considerar, dada la variabilidad intranual mostrada en la discusión de este informe.

**Tabla N°7-1. Superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales (alta y media resolución) y datos obtenidos en el monitoreo 2024 (invierno y verano), respecto de los registros de históricos (Adenda 5 RWL, 2015).**

| Tipo de imagen                              | Sistema Lagunar | Superficie Mínima Histórica Adenda 5 (ha) | Superficies lagunares (ha) Monitoreo Fase Operación |                         |
|---------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------|
|                                             |                 |                                           | Invierno 2024 (agosto)                              | Verano 2024 (diciembre) |
|                                             |                 | m <sup>2</sup>                            | m <sup>2</sup>                                      | m <sup>2</sup>          |
| Superficies Pleiades 1-A de alta resolución | LPLB            | 316.000                                   | 407.332,2                                           | 243.682,9               |
|                                             | PE              | 489.000                                   | 313.749,3                                           | 275.083,5               |
|                                             | AQ              | 113.000                                   | 708.985,1                                           | 30.007,6                |
|                                             | SO              | 1.924.000                                 | 1.555.486,6                                         | 1.257.816,2             |
| Superficies Landsat 8 de media resolución   | LPLB            | 192.000                                   | 400.103,0                                           | 340.036,7               |
|                                             | PE              | 254.000                                   | 424.333,4                                           | 227.885,9               |
|                                             | AQ              | 2.000                                     | 598.204,1                                           | 62.437,8                |
|                                             | SO              | 1.433.000                                 | 1.540.142,5                                         | 1.411.927,4             |

Dónde: AQ: Aguas de Quelana, LPLB: La Punta - La Brava, PE: Peine, SO: Soncor.

\*Superficies a partir de modelo de clasificación supervisada de imágenes satelitales. (\*\*): Las fechas en que se obtuvieron los registros históricos, corresponden a las que se presentaron en el "Apéndice B. Determinación Espacio Temporal de la Vegetación Azonal y Cuerpos de agua" del "Anexo 2 Plan de Manejo Biótico" y en el "Apéndice L. Monitoreo de dinámica espaciotemporal de lagunas de la Zona Marginal del Salar de Atacama a través de imágenes satelitales LANDSAT" y que se enmarcan en las áreas definidas por los polígonos indicados en la RCA N°21/2016 (Considerando N°7), "Polígonos en Tabla de 3-4 del Anexo 3" del PSAH del proyecto. Fuente: Elaboración Propia

La validación del ajuste de las coberturas determinadas, con relación a los datos de terreno recabados y fotointerpretados, se realizó mediante el índice *Kappa*. Este índice tuvo una variación entre 0,99 y 0,46 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y desde 0,98 y 0,41 para imágenes de resolución media Landsat 8 en agosto de 2024. Respecto de diciembre de 2024, este índice tuvo una variación entre 0,95 y 0,41 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y desde 0,93 a 0,37 para imágenes de resolución media Landsat 8. Todos los valores antes indicados muestran una alta precisión del modelo de clasificación supervisada aplicado, que según el índice *Kappa* muestra un nivel de concordancia *aceptable a casi perfecta*<sup>19</sup>.

Los resultados de la correlación entre las superficies calculadas a partir de imágenes de alta resolución (Pleiades 1-A) y de media resolución (Landsat), utilizando el coeficiente de correlación de Pearson, muestran una relación positiva entre las variables en todos los sectores. Los valores de *p* obtenidos indican una asociación estadísticamente significativa entre las variables Pleiades y Landsat, lo que subraya la consistencia de estas asociaciones en los diferentes sectores analizados.

- Sector La Punta-La Brava

La serie histórica de superficies lagunares entre 1972 y 2024, basada en imágenes satelitales Landsat y el índice NDWI, ofrece una visión detallada de las variaciones estacionales. Se destaca la máxima extensión durante los inviernos y los registros más bajos generalmente en verano, con eventos destacados en 1973, 2002, 2019 y 2020. La tendencia histórica principal muestra una disminución de las superficies invernales desde el año 2000, y la brecha entre inviernos y veranos se ha acortado desde 2008, con un quiebre en la tendencia de las superficies invernales en 2021-2024, evidenciando un descenso. Los últimos dos años 2023 y 2024 se observa cierta estabilidad con superficies similares, tanto en invierno como en verano, con ausencia de precipitaciones relevantes.

Las observaciones durante el monitoreo (2016-2024) muestran que las superficies calculadas con Landsat en el marco del PSAH están dentro de los registros históricos, tanto en invierno como en verano, siendo consistentes con los datos NDWI. Las diferencias entre la serie histórica NDWI - Landsat y los informes semestrales del PSAH se atribuyen a mejoras metodológicas, como el robustecimiento del procesamiento de imágenes y la validación en terreno, que han depurado límites de cuerpos de agua y calibrado los modelos de clasificación.

La variación de las superficies lagunares semestrales del PSAH, desde alta resolución, muestra diferencias respecto a los registros históricos, especialmente en verano. Hasta diciembre de 2019, las superficies de verano superaban los valores históricos, pero desde el verano de 2020 se ubican por debajo de estos. En invierno, no se observan variaciones, manteniéndose por encima de los registros de la Adenda 5 RWL (2015).

<sup>19</sup> Valores cercanos a 1,00 indican una mayor concordancia inter-observador. Los rangos de valores son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

- Sector Peine

La serie histórica de imágenes de mediana resolución (1972-2024) revela importantes fluctuaciones en las superficies lagunares durante los inviernos hasta 2014, destacando máximos en 1985 y mínimos en 1975. Posteriormente, tanto inviernos como veranos muestran una tendencia a la baja desde 2013-2015 hasta 2024. El PSAH entre 2016-2024 presenta registros de superficies calculadas con Landsat que se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según la variación del índice NDWI, tanto en invierno como en verano.

Las variaciones intranuales para el sector Peine exhiben una mayor variabilidad desde 2016-2024 en comparación con años anteriores. Se observa un aumento puntual y de plazo inmediato en las superficies lagunares en 2013, 2017, 2019 y 2020 asociado a eventos de precipitación, y posterior a ello, sin eventos relevantes, vuelve al tipo comportamiento estacional que se observa previo al 2012.

La comparación de las superficies semestrales del PSAH con las históricas en AR muestra que, desde el diciembre de 2021, las superficies, tanto de invierno como de verano, están por debajo de las áreas AR de referencia.

- Sector Aguas de Quelana

La serie histórica (1972-2024) de superficies lagunares en el sector Aguas de Quelana, analizada mediante imágenes satelitales Landsat y el índice NDWI, muestra importantes variaciones. Durante los inviernos hasta 2014, se observan extensiones máximas entre 1985 y 1986, con descensos desde esa época en las superficies de invierno principalmente. En los años más recientes (2020-2024) se registran extensiones mínimas como en 2023 con una superficie de 27.000 m<sup>2</sup> y otras que rondan los 35.000 m<sup>2</sup>. Los veranos, en general, presentan menor extensión, con máxima excepcional en 1972 y promedios alrededor de 60.000 m<sup>2</sup>, mientras las menores extensiones se observan en el rango de los 5.000 m<sup>2</sup> (2022, 2023 y 2024).

La serie de datos (2016-2024) indica que las mayores extensiones lagunares se dan principalmente en invierno y mínimas en verano, con variaciones estacionales y una tendencia en ambas temporadas. Los registros de superficies calculadas con Landsat entre 2016 y 2024, como parte del PSAH, se encuentran dentro de los máximos y mínimos históricos según el análisis del índice NDWI.

La variación de las superficies semestrales del PSAH en Aguas de Quelana, analizadas con imágenes de alta resolución, supera el mínimo histórico para invierno pero se sitúa por debajo en comparación con verano. La comparación con las precipitaciones destaca eventos importantes, como en agosto de 2017 y enero-febrero de 2019, que influyen en las variaciones de superficies. Desde diciembre 2020, los valores de superficie lagunar AR han estado por debajo de los valores AR tomados de referencia.

- Sector Soncor

La serie histórica (1972-2024) de las superficies lagunares en el sector Soncor, analizada mediante imágenes satelitales Landsat y el índice NDWI, muestra que la máxima extensión de las lagunas se observa principalmente en invierno. La tendencia de las superficies asociadas a los inviernos (julio – agosto) muestran un comportamiento variable de aumentos y descensos, y desde el 2004 con tendencia a la baja, para luego estabilizarse un poco entre 2015 y 2019; mientras que las superficies de verano muestran una tendencia general a la baja desde 1984.

Los registros semestrales calculados con Landsat entre 2016 y 2024, como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis del índice NDWI. Las diferencias entre la serie histórica NDWI-Landsat y los informes semestrales del PSAH son menores en comparación con otros sectores, gracias a la fisonomía de Soncor que facilita la definición de las lagunas.

En la serie Landsat 2016-2024, se registran variaciones estaciones, con aumentos en invierno y mínimas en verano, y alzas puntuales producto de precipitaciones, tales como en febrero de 2017, enero y febrero de 2019 y febrero de 2023. Pese a estas alzas, la tendencia de superficies máximas de invierno y mínimas de verano se observa a la baja desde el 2019 a la fecha actual, siendo más notable el descenso en los inviernos.

Las superficies semestrales del PSAH desde imágenes de alta resolución presentan para Soncor superficies mayores en agosto respecto a las registradas en diciembre. En comparación con las superficies de referencia AR, las superficies semestrales del PSAH están por encima y por debajo del mínimo de AR (1.924.000 m<sup>2</sup>). Desde diciembre 2019 las superficies de verano y de invierno presentan tendencia a la baja. Para este último año, diciembre 2024 estuvo un poco superior a la superficie AR de diciembre 2023.

## 8 REFERENCIAS

- ANEXO 1, ADENDA 5 EIA, APÉNDICE I, PROYECTO ROCKWOOD LITHIUM 2015. Funcionamiento Hidrogeológico de los Sistemas Lagunares La Punta – la Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor. Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico, Sector Sur del Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Rockwood Lithium Limitada – SGA, Soluciones y Gestión ambiental. Región de Antofagasta, 246 pp.
- ANEXO 1, ADENDA 5 EIA, APÉNDICE L, PROYECTO ROCKWOOD LITHIUM 2015. Monitoreo de dinámica espacio – temporal de lagunas de la Zona Marginal del Salar de Atacama a través de Imágenes Satelitales. Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico, Sector Sur del Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Rockwood Lithium Limitada – SGA, Soluciones y Gestión ambiental. Región de Antofagasta, 246 pp.
- ANEXO 2, ADENDA 5 EIA, APÉNDICE B, PROYECTO ROCKWOOD LITHIUM 2015. Determinación espacio temporal de la vegetación azonal y cuerpos de agua. Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Rockwood Lithium Limitada - CEA, Centro de Ecología Aplicada. Región de Antofagasta, 10-2015.
- ANEXO 3, ADENDA 5 EIA, PROYECTO ROCKWOOD LITHIUM 2015. Plan de seguimiento ambiental y Plan de alerta temprana de los recursos hídricos. Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Rockwood Lithium – SGA. Región de Antofagasta.
- ALBEMARLE - VAI, 2023. Informe Técnico de Investigación N°3 Activación PAT Alerta Temprana- Sector Alerta Acuífero (julio 2023)- Anexo D. Informe Teledetección Satelital Landsat Cuerpos de Agua Sectores La Punta La Brava y Peine. Albemarle – HIDROMAS. Junio 2023.
- CHANDER G., B. Markham, D. Helder, 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, Remote Sensing of Environment, Volume 113, Issue 5, 893-903 pp.
- CHUVIECO, E. 2006. Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel, Barcelona, España.
- CONGALTON, R. G., ODERWALD, R. G. & MEAD, R. A. 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 49: 1671-1678.
- CONGALTON, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 37: 35-46.

- CORNELLÀ, O., SALAS, J., ARAVENA, R., GUZMÁN, E., GUIMERÁ, J., TORE, C., VON IGEL, W., HENRÍQUEZ, A., FOCK, A. Hidrogeología de los sistemas lagunares del margen E del Salar de Atacama. XII Congreso Geológico Chileno. Santiago, 22-26 de noviembre, 2009.
- CRIST, E. P. AND CICONE R.C. 1984. Application of the Tasseled Cap concept to simulated Thematic Mapper data, Photogrammetric, Eng. Remote Sens Vol. 50(3), 343-352.
- CRIST, E. P., LAURIN, R., AND CICONE, R.C. 1986. Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper data. In Proceedings of IGARSS' 86 Symposium, 1465- 70.
- DGA, Dirección General de Aguas. 2014. División de Estudios y Planificación. Análisis de los mecanismos de evaporación y evaluación de los recursos hídricos del Salar de Atacama. Santiago, 2014.
- FLORES CARTAGENA, D. 2002. Identificación y Análisis de Cambios en Bofedales de la Cordillera Occidental y del Altiplano de Bolivia. Tesis Maestría en Ciencias, Conservación de Cuencas.
- HERNÁNDEZ, H. J. Apuntes de clases de SIG y Percepción Remota. Magíster en áreas silvestres y conservación de la naturaleza. Universidad de Chile. 2005.
- HUDSON, W. D. & RAMM, C. W. 1987. Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 53: 421-422.
- IZUMI, 2021. Informe Teledetección Satelital Landsat Cuerpos de Agua Sectores La Punta La Brava y Peine. Albemarle. Anexo D, Albemarle-VAI, 2021.
- KAUTH, R. J., & THOMAS, G. S. (1976). The tasseled cap a graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen in Landsat. In Proceedings of the symposium on machine processing of remotely sensed data, LARS, Purdue University, West Lafayette, IN (pp. 441 - 451).
- LANDIS J, KOCH G, 1977: The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics 1977; 33:159-74.
- LAMOLDA H. Estudio de la influencia de las correcciones a imágenes Landsat ETM+ en la obtención de propiedades de cubiertas vegetales. Tesis de pregrado para optar a la titulación en ingeniero técnico en topografía. Universidad Politécnica de Madrid. 124 pp. 2008.
- MORAGA, A.; CHONG, G.; FORTT, M.A.; HENRIQUEZ, H. 1974. Estudio geológico del salar de Atacama, Provincia de Antofagasta. Boletín del Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Chile, 29, 56p.

- MMA, Ministerio de Medio Ambiente, Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) y Dirección General de Aguas (DGA). Guía para la Conservación y Seguimiento Ambiental de Humedales Andinos. Santiago, 2011.
- ORTIZ, C., ARAVENA, R., BRIONES, E., SUAREZ, F., TORE, C. & MUÑOZ, J.F., 2014. Sources of surface water for the Soncor ecosystem, Salar de Atacama basin, northern Chile. Hydrological Sciences Journal, 59 (2), 336 – 350.
- RCA N°21/2016. Resolución exenta N°21, Antofagasta, 2016. Calificación ambiental del Proyecto “EIA Modificaciones y Mejoramientos de Sistema de Pozas de Evaporación Solar, en el Salar de Atacama”.
- ALB, Albemarle. 2016a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año I, agosto de 2016.
- ALB, Albemarle. 2016b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año I, diciembre de 2016.
- ALB, Albemarle. 2017a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año II, agosto de 2017.
- ALB, Albemarle. 2017b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año II, diciembre de 2017.
- ALB, Albemarle. 2018a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año III, agosto de 2018.
- ALB, Albemarle. 2018b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año III, diciembre de 2018.
- ALB, Albemarle. 2019a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de

Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año IV, agosto de 2019.

ALB, Albemarle. 2019b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año IV, diciembre de 2019.

ALB, Albemarle. 2020a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año V, agosto de 2020.

ALB, Albemarle. 2020b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año V, diciembre de 2020.

ALB, Albemarle. 2021a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VI, agosto de 2021.

ALB, Albemarle. 2021b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VI, diciembre de 2021.

ALB, Albemarle. 2022a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VII, agosto de 2022.

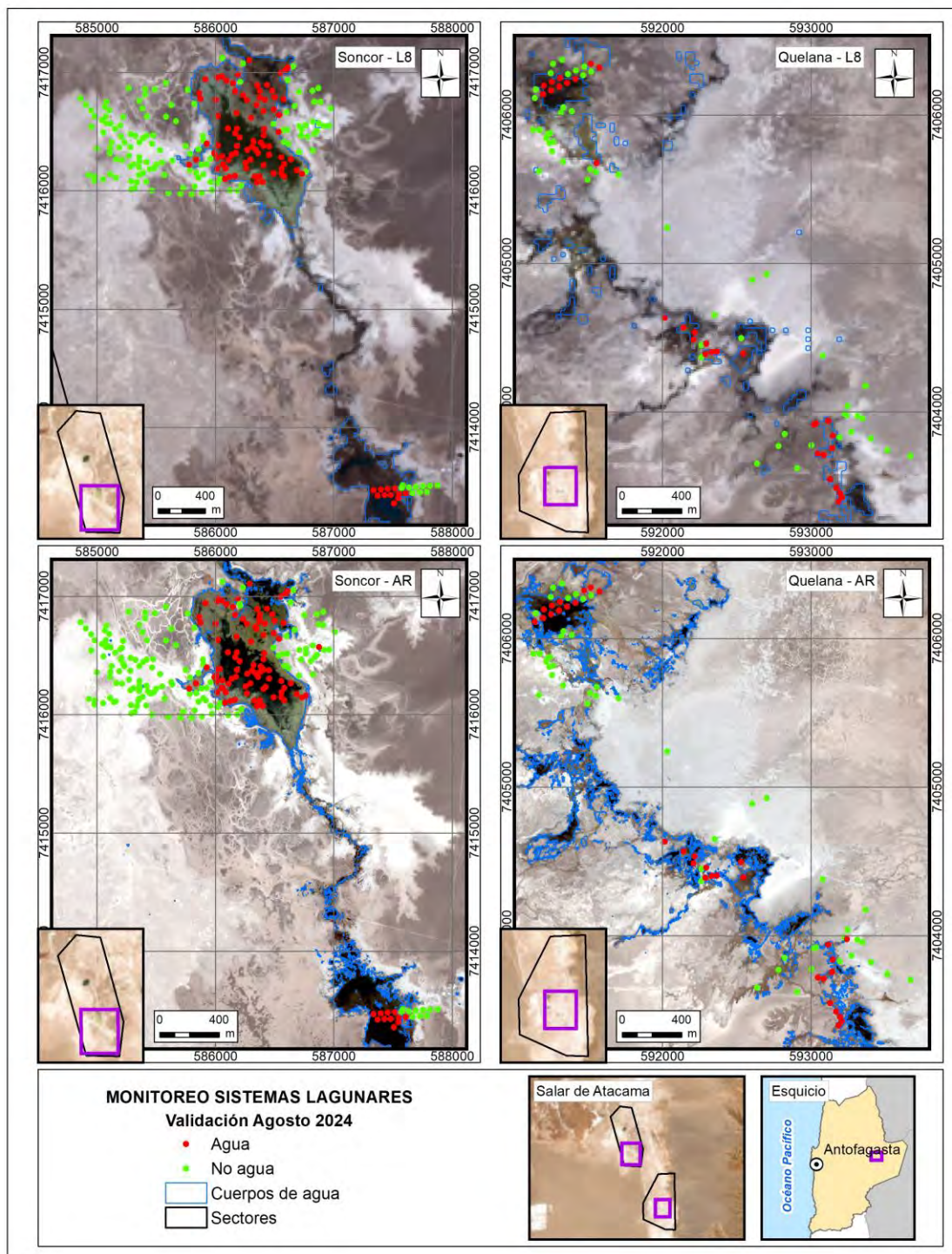
ALB, Albemarle. 2022b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VII, diciembre de 2022.

ALB, Albemarle. 2023a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VIII, agosto de 2023.

- ALB, Albemarle. 2023b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VIII, diciembre de 2023.
- ALB, Albemarle. 2024a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año IX, agosto de 2024.
- ALB, Albemarle. 2024b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año IX, diciembre de 2024.
- WANG, Q., LI, P., CHEN, X., 2012. Retrieval of soil salt content from an integrated approach of combining inversed reflectance model and regressions: an experimental study. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 50, 3950–3957.
- XU, HANQIU, 2007. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27:14, 3025-3033.

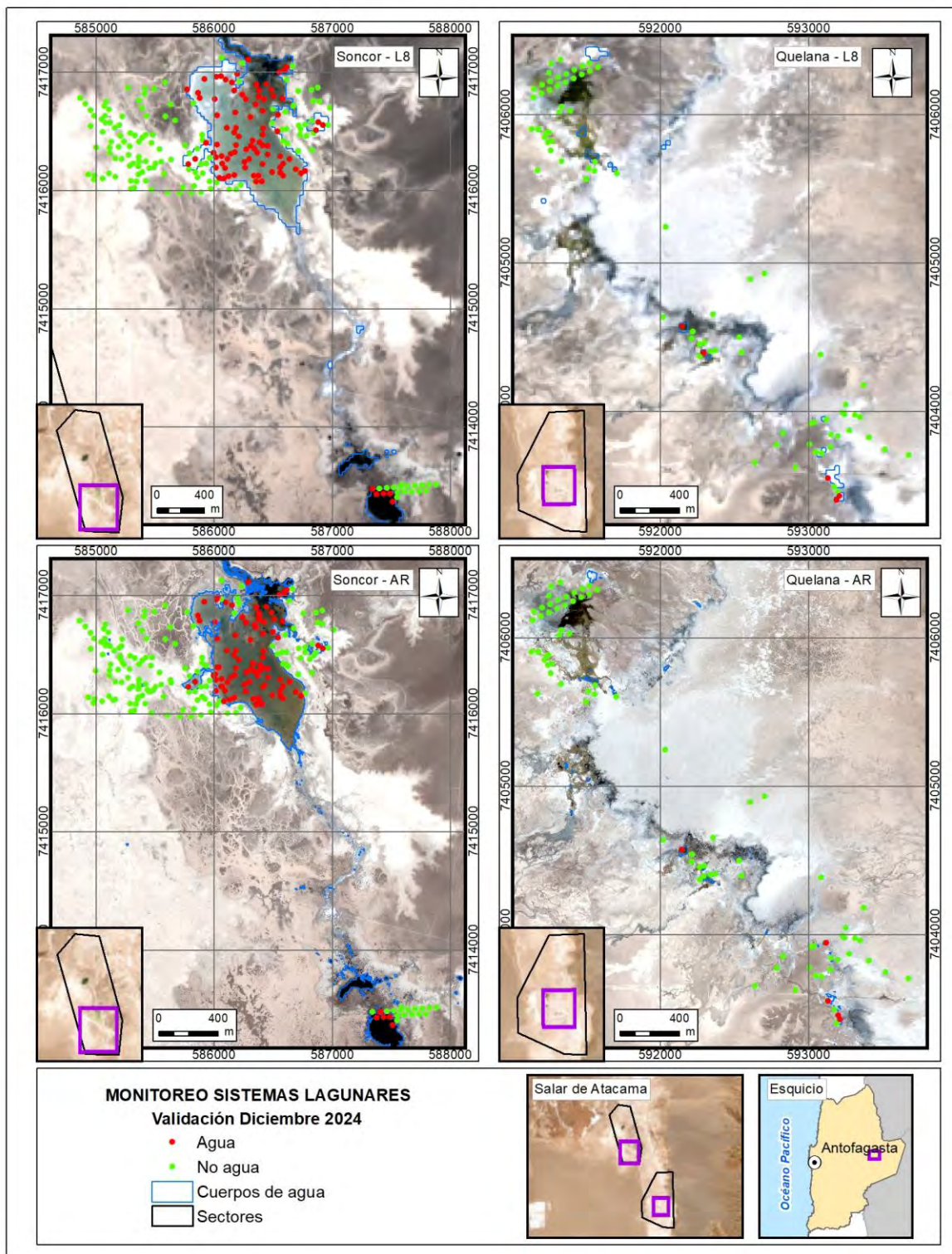
## 9 ANEXOS

### ANEXO 9-1. Distribución de puntos de validación para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, invierno 2024.



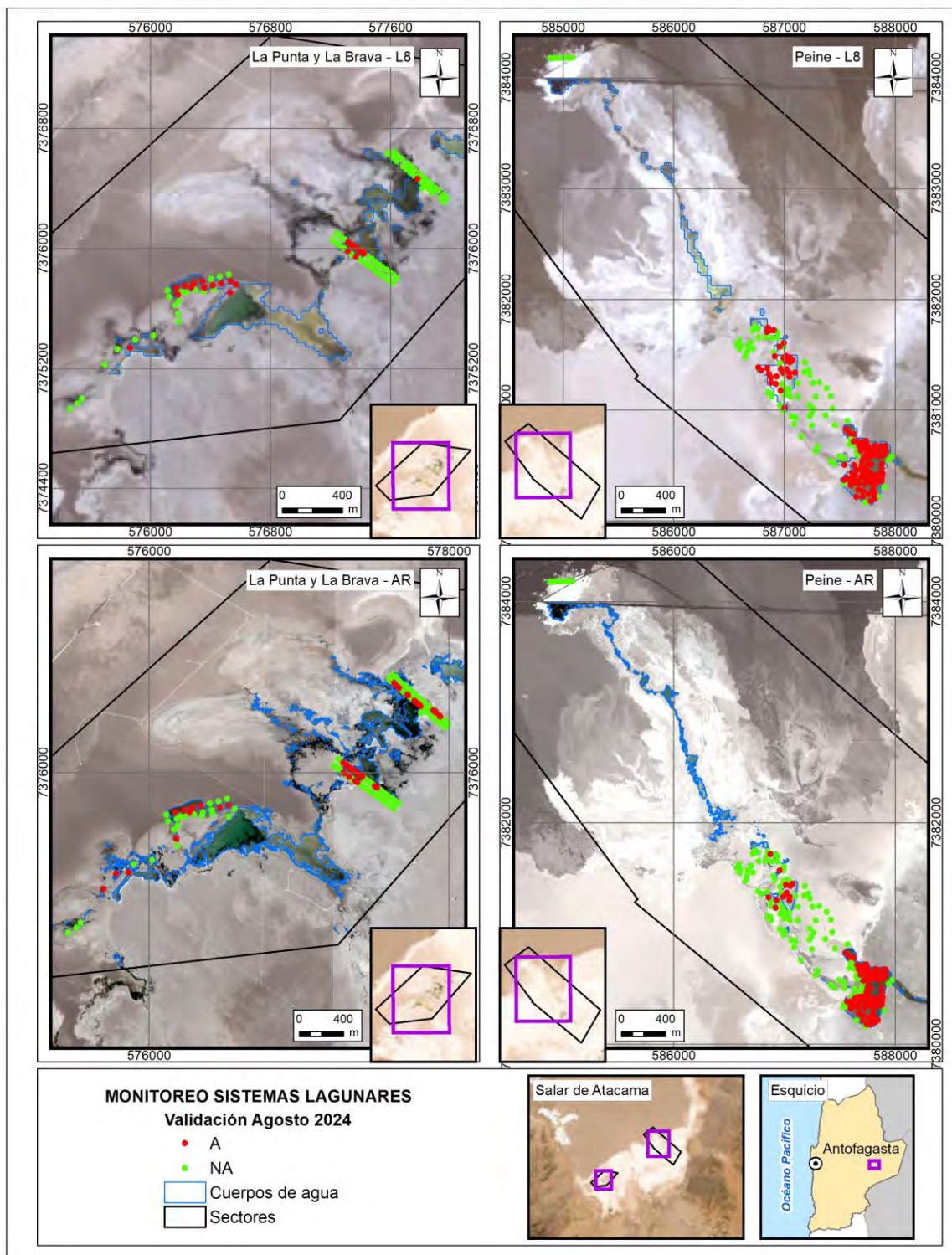
Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 9-2. Distribución de puntos de validación para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, verano 2024-2025.**



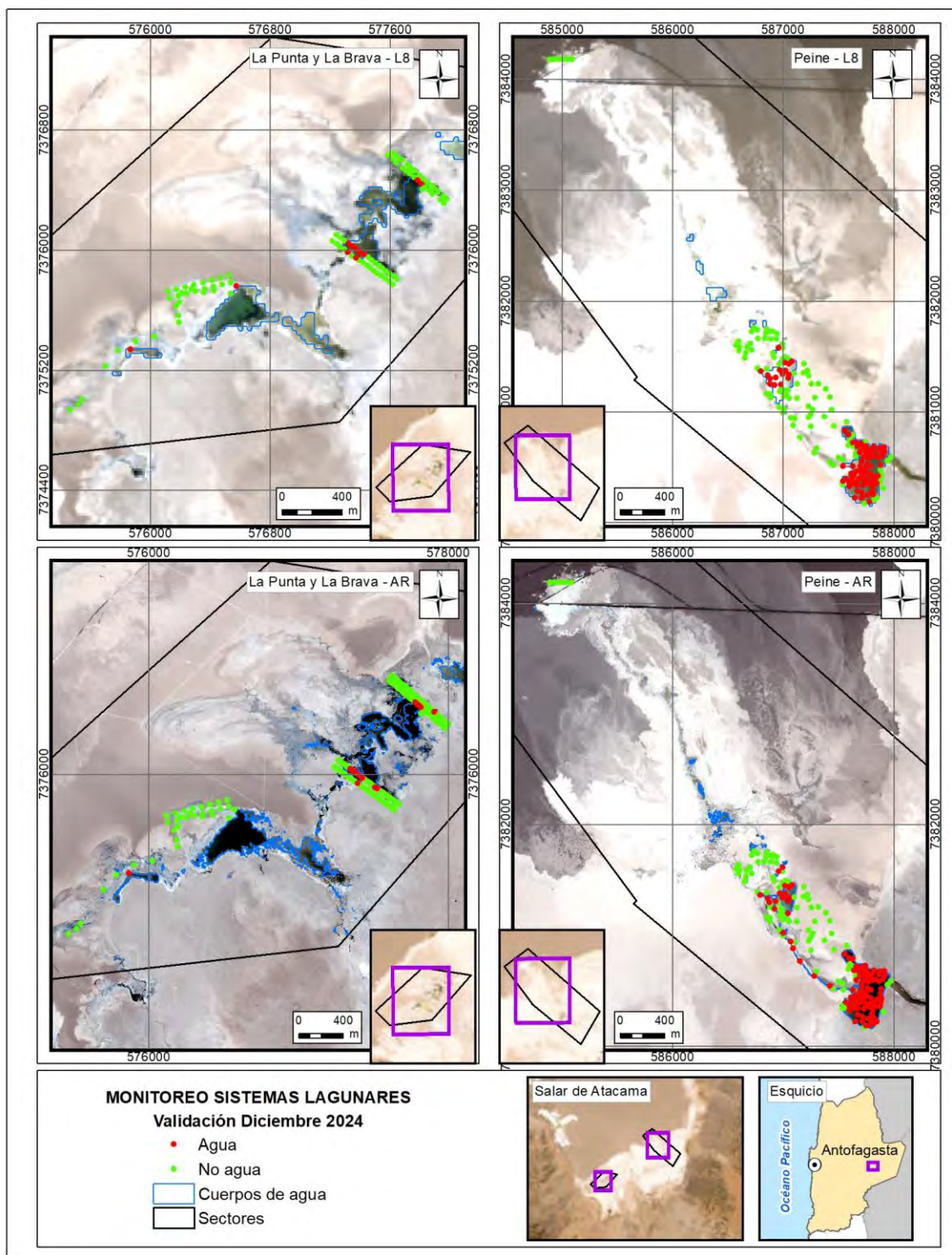
Fuente: Elaboración propia

### ANEXO 9-3. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector sur, invierno 2024.



Fuente: Elaboración propia

#### ANEXO 9-4. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, verano 2024-2025.



Fuente: Elaboración propia

## ANEXO 9-5. Coordenadas de puntos de validación en terreno

Archivo adjunto en formato Excel:

**ALB\_PM\_VALID\_AR\_L8\_AGO24\_DIC24\_14022025.xlsx**

## ANEXO 9-6. Cuadro comparativo de diferencias implementadas en el estudio actual respecto a Adenda 5 RWL (2015).

| MATERIALES Y MÉTODOS CON MODIFICACIÓN                                    | Adenda 5 RWL, 2015                                                     | MONITOREO FASE DE OPERACIÓN (CEDREM Consultores)                                                                                                              | DESCRIPCIÓN DE MODIFICACIÓN APLICADA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1. Imágenes satelitales de alta resolución</b>                        | Worldview 2, Geoeye 1 y Quickbird 2.                                   | Pleiades 1-A                                                                                                                                                  | <p>Se ha implementado este cambio con el objetivo de agilizar la cobertura de extensas áreas en un período reducido, sin necesidad de una confirmación prolongada, utilizando un único sensor para garantizar la homogeneidad de los datos. Este ajuste ha resultado en una mayor coherencia entre los datos al reducir el intervalo temporal necesario para completar la cobertura de cada polígono. Además, se ha ampliado el ancho de la franja, lo que facilita la integración de menos escenas y mejora el grado de coregistro de las imágenes, aspecto crucial para la detección de cambios en estudios multitemporales.</p> <p>Es importante destacar que las diferencias en resolución espectral y espacial entre estas imágenes son mínimas, lo que resulta en variaciones menores en los análisis realizados.</p> |
| <b>2. Validación en terreno</b>                                          | No especificado                                                        | Índice <i>Kappa</i> en base a diseño de muestreo estadístico aleatorio – estratificado, por sistema lagunar.                                                  | <p>Contribuye a realizar una evaluación numérica, objetiva y con presencia de un indicador, de la certidumbre en el modelo y, por ende, conocer la bondad de ajuste en las coberturas obtenidas.</p> <p>La validación en terreno en categorías “agua” y “no agua” permite una evaluación binaria que da certidumbre al modelo.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>3. Procesamiento de imágenes satelitales – Corrección atmosférica</b> | IARR (por su sigla inglés, promedio interno de reflectancia relativa). | Proceso de remoción del error atmosférico proporcionado por el modelo de <i>Airbus</i> ~ ATCOR (por su sigla en inglés, Atmospheric & Topographic Correction) | <p>Este modelo propende la remoción del efecto atmosférico, mientras que IARR lo estandariza sobre la imagen. Por lo mismo, genera una respuesta espectral –corregida- más clara en los objetos de clasificación.</p> <p>La corrección utilizada (con mejor efecto de remoción del error atmosférico), conllevó a que tanto los parámetros</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

| MATERIALES Y MÉTODOS CON MODIFICACIÓN                  | Adenda 5 RWL, 2015                                                                                                                        | MONITOREO FASE DE OPERACIÓN (CEDREM Consultores)                                                                                                                                                                                                        | DESCRIPCIÓN DE MODIFICACIÓN APLICADA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        |                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                         | espectrales, como el modelo de clasificación, fueran más sensibles a la detección de cuerpos de agua.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 4. Parámetros espectrales del modelo de clasificación  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• NDWI,</li> <li>• Reflectancia NIR y</li> <li>• Reclasificación de bandas espectrales.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• NDWI,</li> <li>• Reflectancia NIR,</li> <li>• Reclasificación de bandas espectrales (en Pleiades 1-A),</li> <li>• NDVI,</li> <li>• Transformada <i>Tasseled Cap</i> “<i>Wetness</i>” (en Landsat 8)</li> </ul> | <p>Esta modificación, se realizó con el fin de robustecer el modelo ya desarrollado y en consideración que los suelos salinos afectan la reflectancia del suelo y puede conducir a errores significativos durante interpretaciones espectrales.</p> <p>En el modelo de clasificación, la incorporación de más parámetros espectrales condujo principalmente a una mayor sensibilidad en la detección de cuerpos de agua.</p> |
| 5. Umbrales de clasificación                           | Clasificación asistida (procedimiento no especificado)                                                                                    | Mejor respuesta entre métodos de clasificación de datos por cuantiles, intervalos equivalentes y quiebres naturales. Además, clasificación asistida en base al patrón de coberturas históricas.                                                         | Esta modificación, se basó en establecer <i>métricas estadísticas</i> que podrán ser replicables en los monitoreos posteriores, más allá del valor número del umbral, el cual puede estar sujeto a variaciones multitemporales y entre imágenes satelitales.                                                                                                                                                                 |
| 6. Regla de clasificación de píxeles en cuerpo de agua | Cumplía con los umbrales de corte de los <b>tres parámetros</b> espectrales de clasificación.                                             | Cumplía con los umbrales de corte en al menos tres de los cuatro parámetros espectrales de clasificación.                                                                                                                                               | Esta modificación, se realizó con el fin de robustecer el modelo ya desarrollado y en consideración de evitar errores significativos durante interpretaciones espectrales. Así mismo, se clasificaron en cuerpos de agua a los píxeles que tuvieran una alta probabilidad de pertenecer a este tipo de recubrimiento.                                                                                                        |
| 7. Fechas de medición                                  | Durante invierno altiplánico: enero-abril.                                                                                                | Durante invierno y verano ~ agosto y diciembre del 2016 al 2024.                                                                                                                                                                                        | Corresponde con lo establecido por el Plan de Manejo Biótico.<br>Esta modificación, influye sobre las coberturas lagunares, según variaciones estacionales intranuales propias de los sistemas en el área de estudio.                                                                                                                                                                                                        |

#### ANEXO 9-7. Metadata de Imágenes de alta resolución – Pleiades 1-A

Archivos en formato \*.pdf, en las carpetas adjuntas:

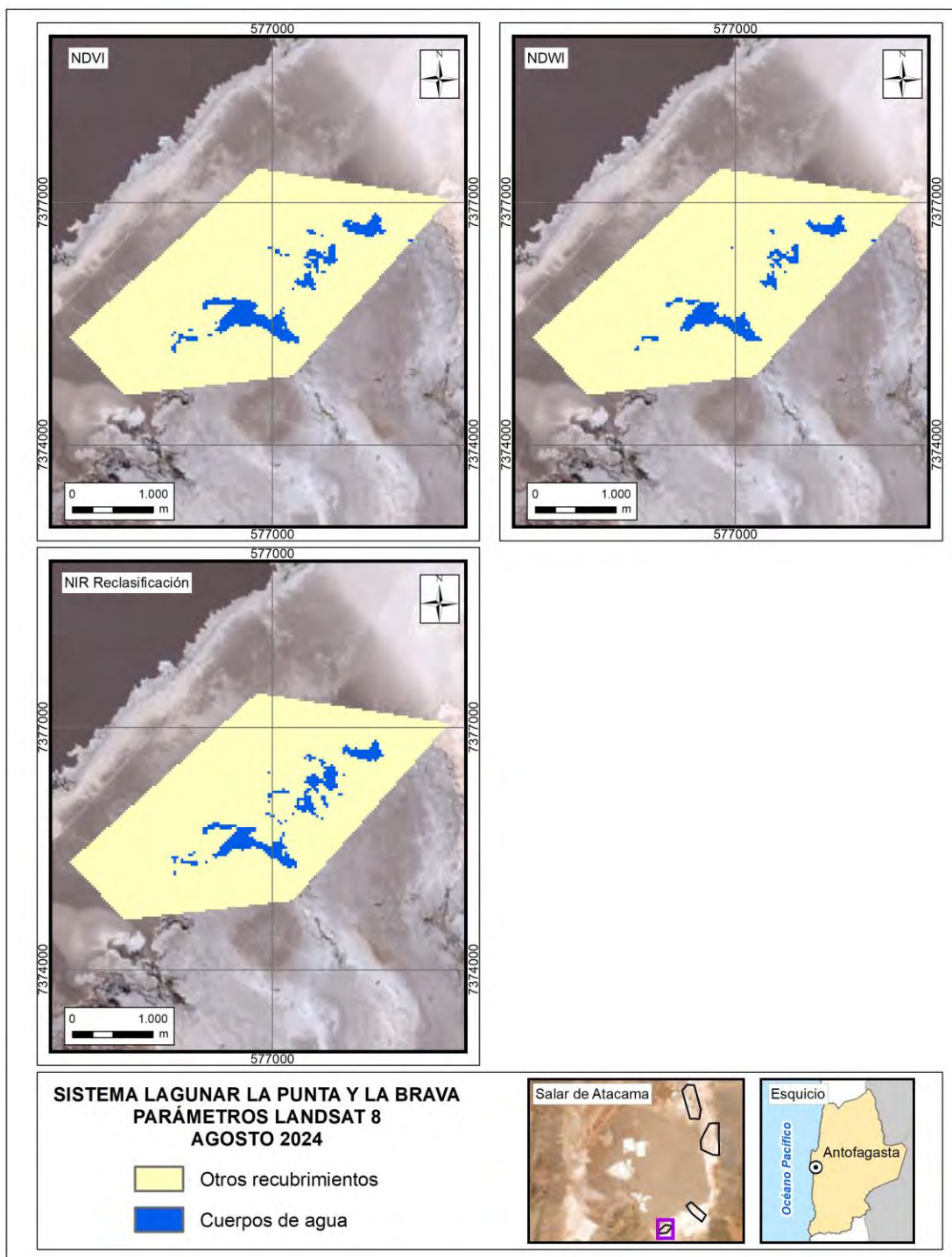
**METADATA\Metadata\_IMA\_Pleiades\AGO24 ; METADATA\Metadata\_IMA\_Pleiades\DIC24**

#### ANEXO 9-8. Metadata de Imágenes de media resolución – Landsat

Archivos en formato \*.pdf, en las carpetas adjuntas:

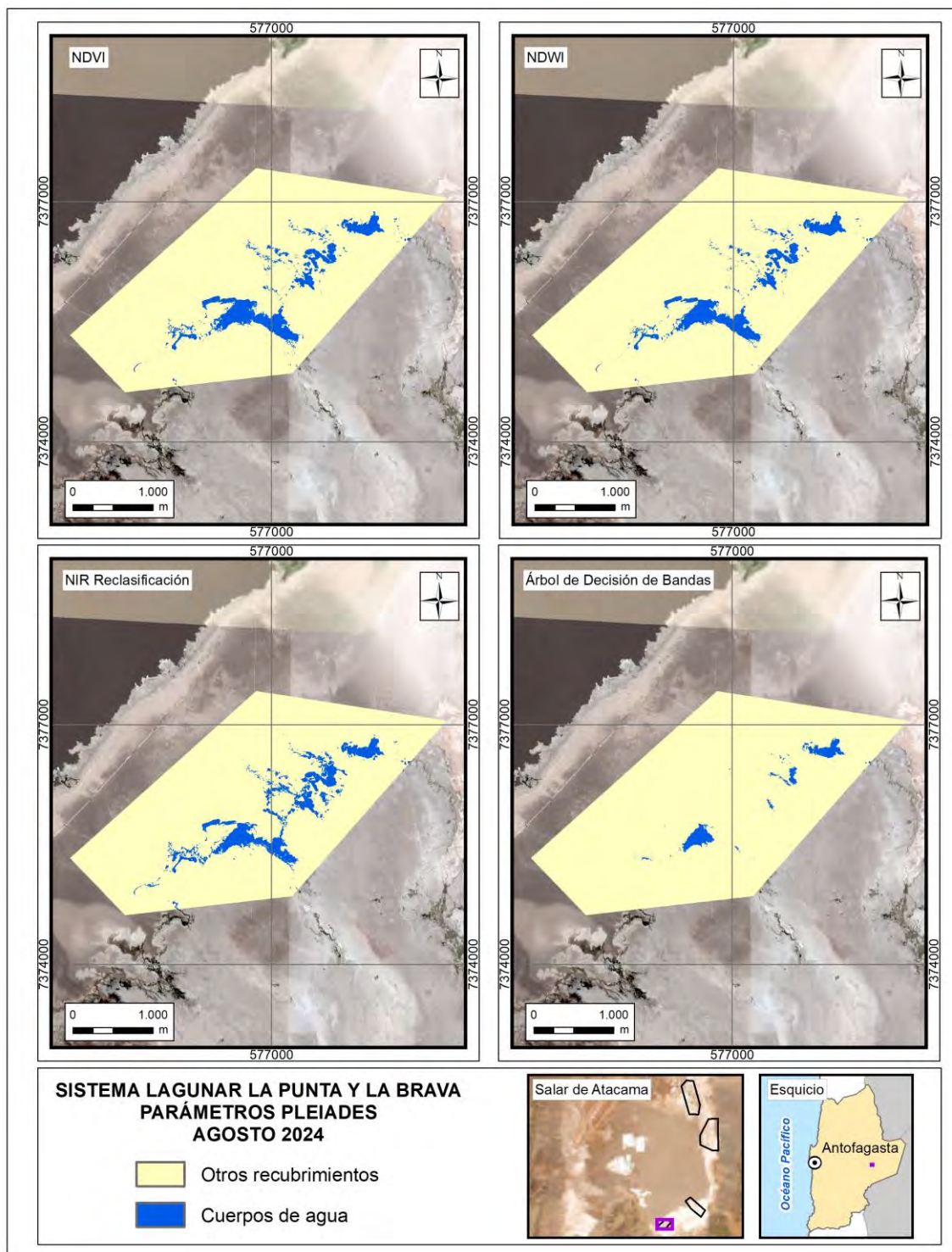
**METADATA\Metadata\_IMA\_L8\AGO24 ; METADATA\Metadata\_IMA\_L8\DIC24**

**ANEXO 9-9. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Landsat 8, invierno 2024.**



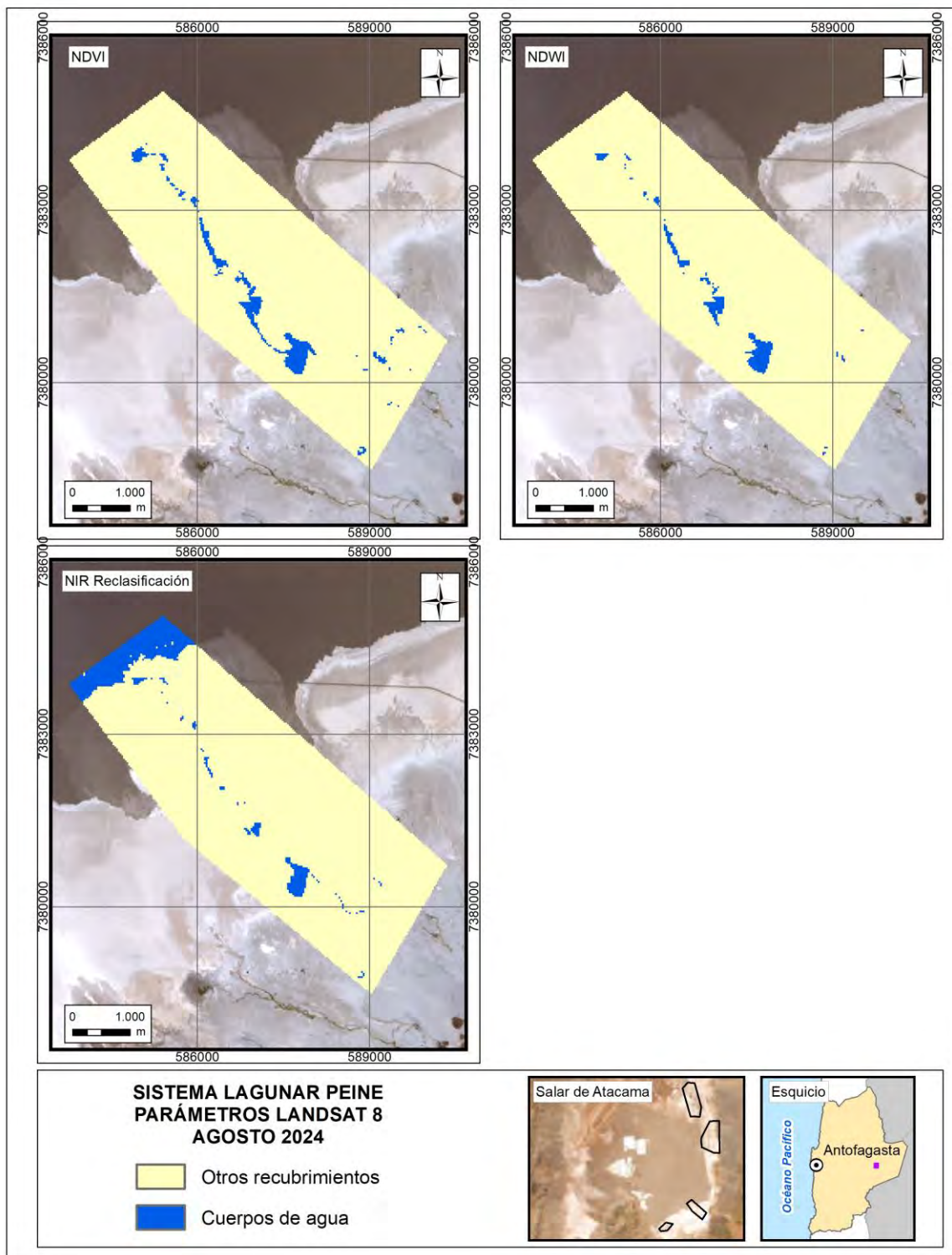
Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 9-10. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2024.**



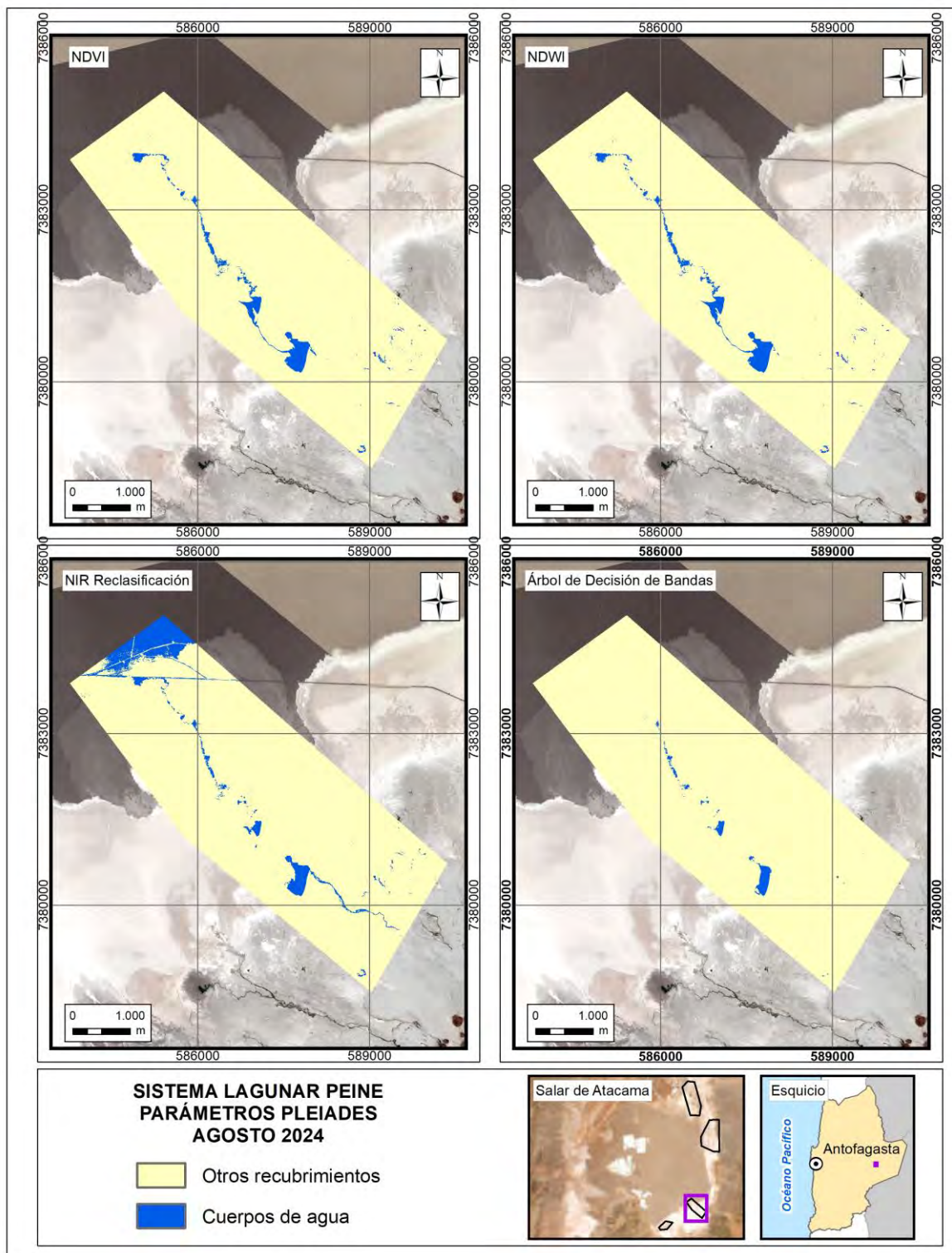
Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 9-11. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Landsat 8, invierno 2024.**



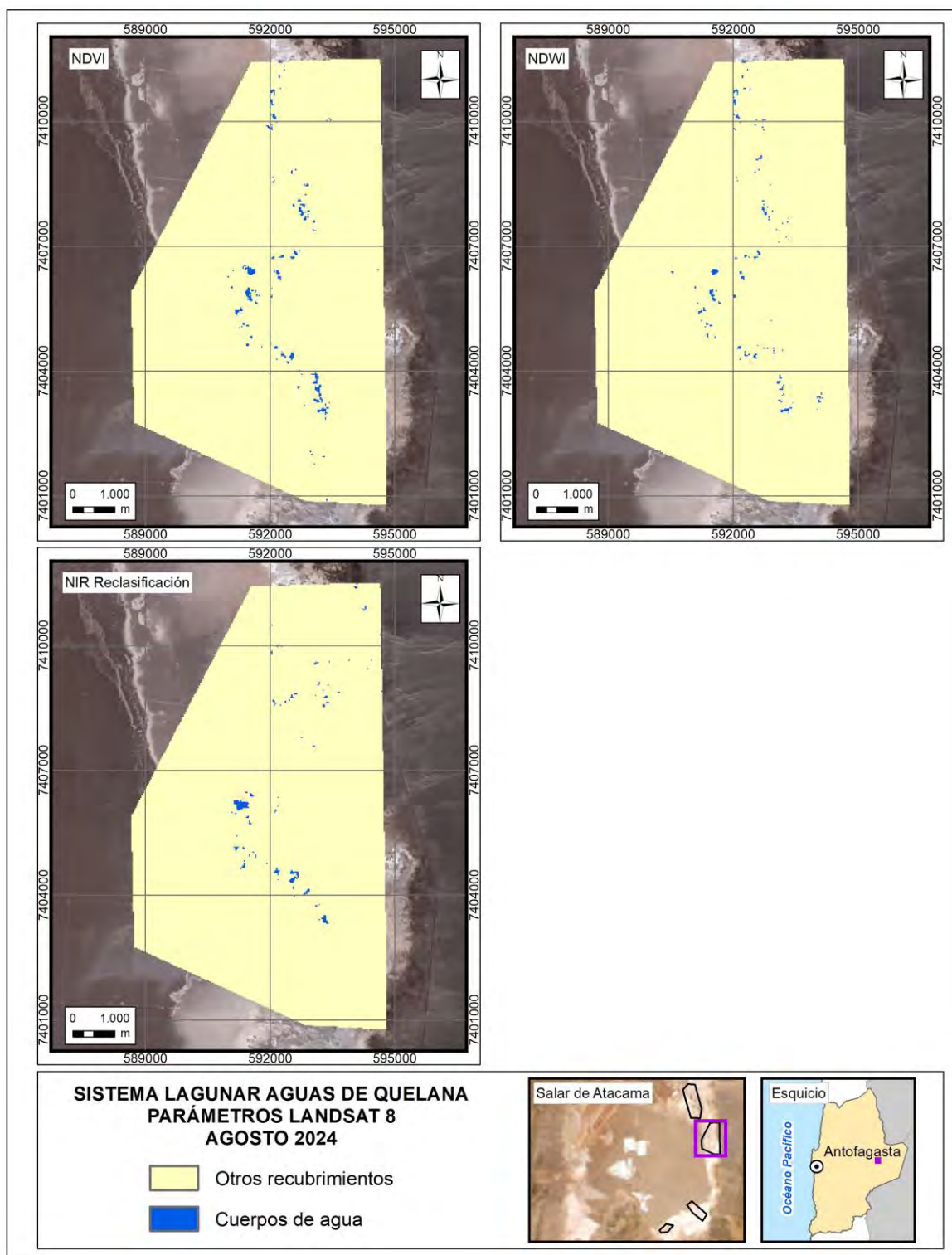
Fuente: Elaboración propia

## ANEXO 9-12. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2024.



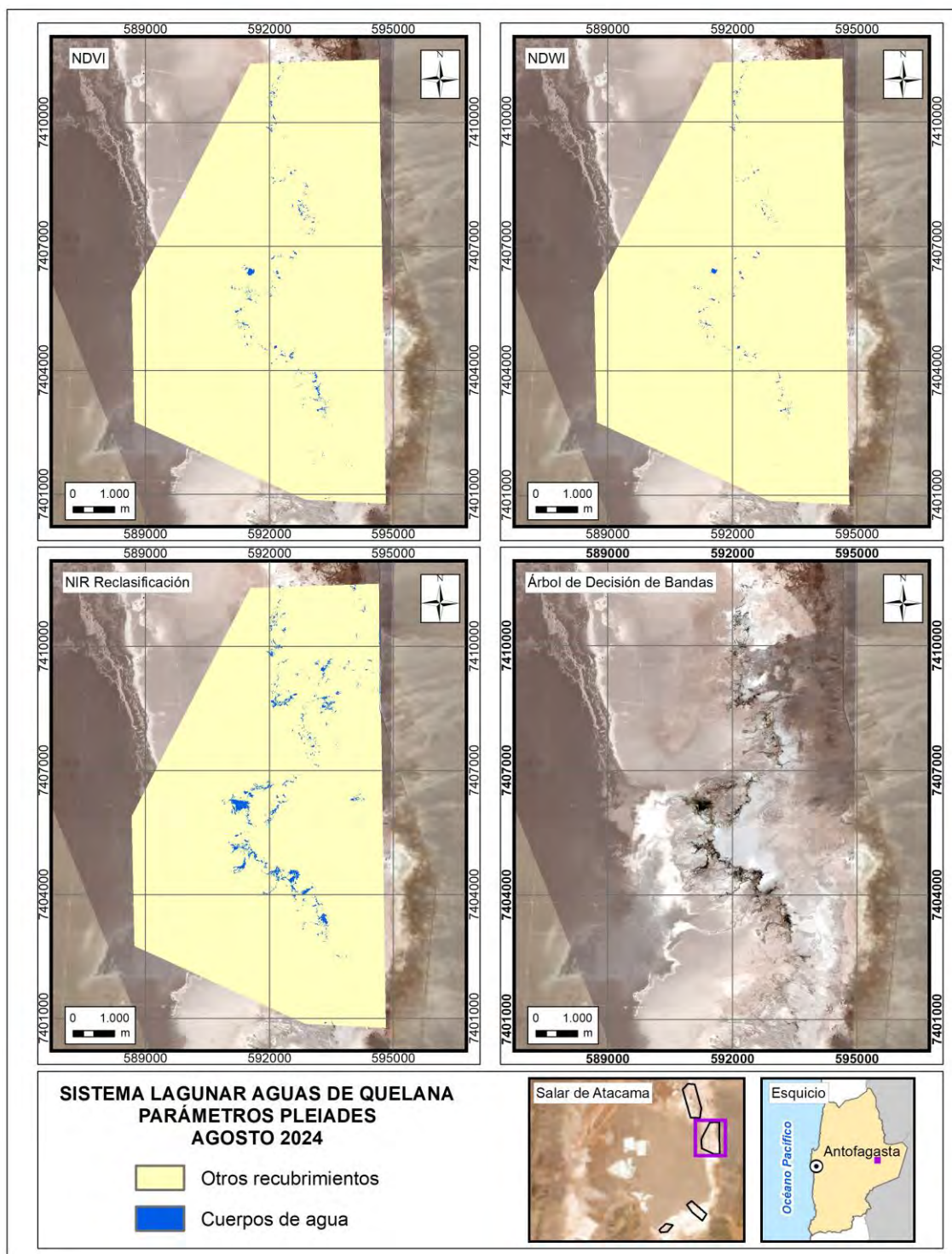
Fuente: Elaboración propia

### ANEXO 9-13. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Landsat 8, invierno 2024.



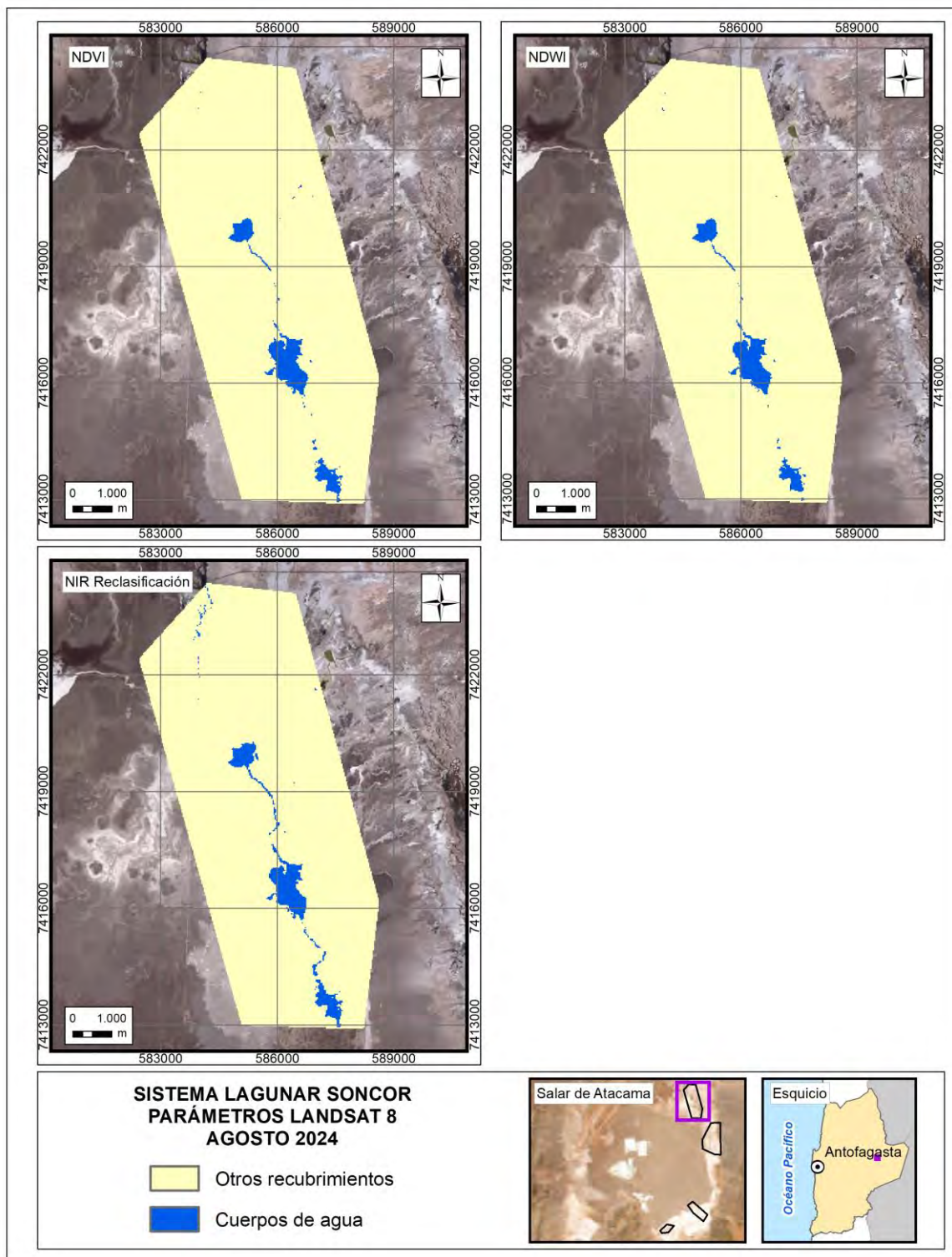
Fuente: Elaboración propia

# **ANEXO 9-14. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2024.**



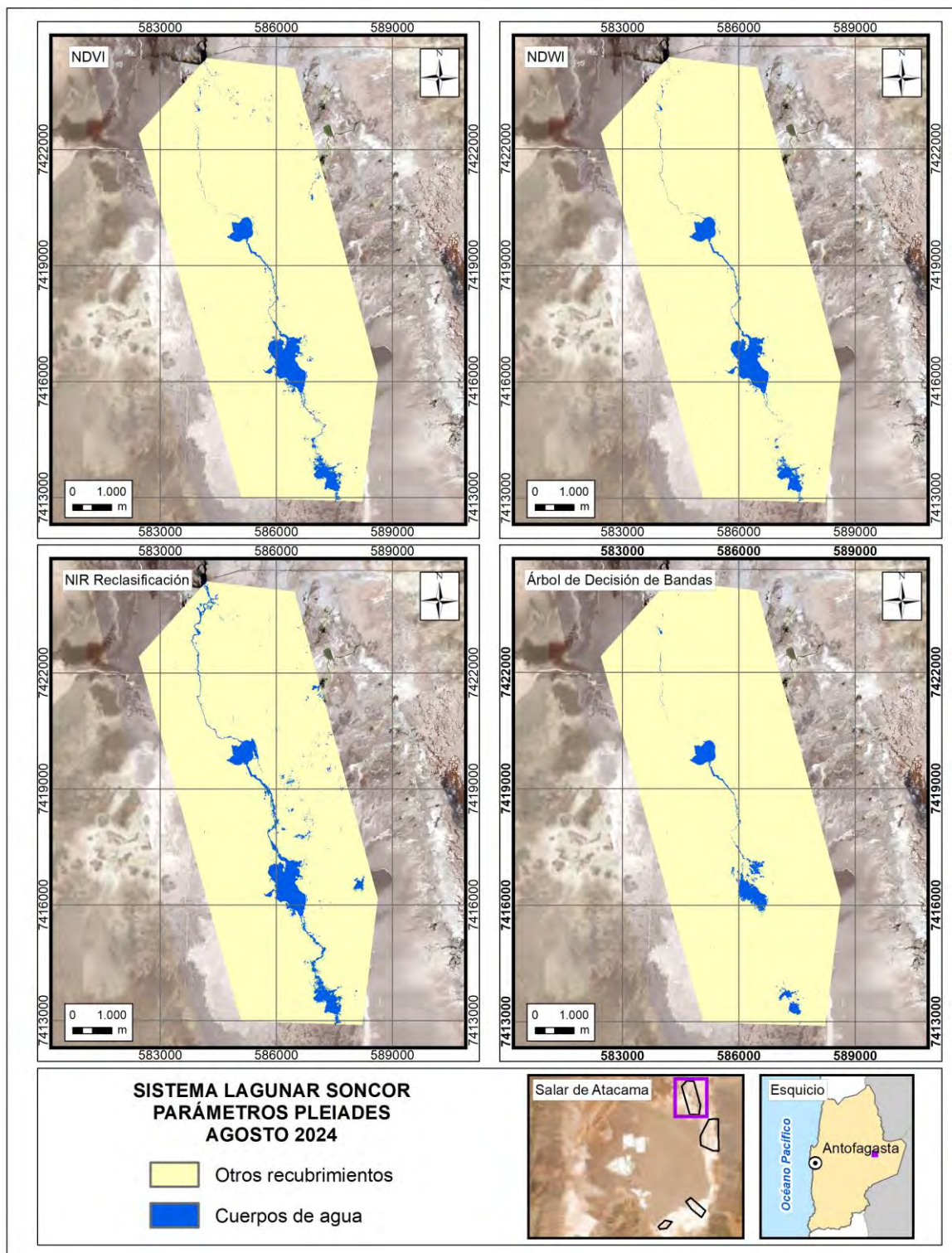
Fuente: Elaboración propia

### ANEXO 9-15. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Landsat 8, invierno 2024.



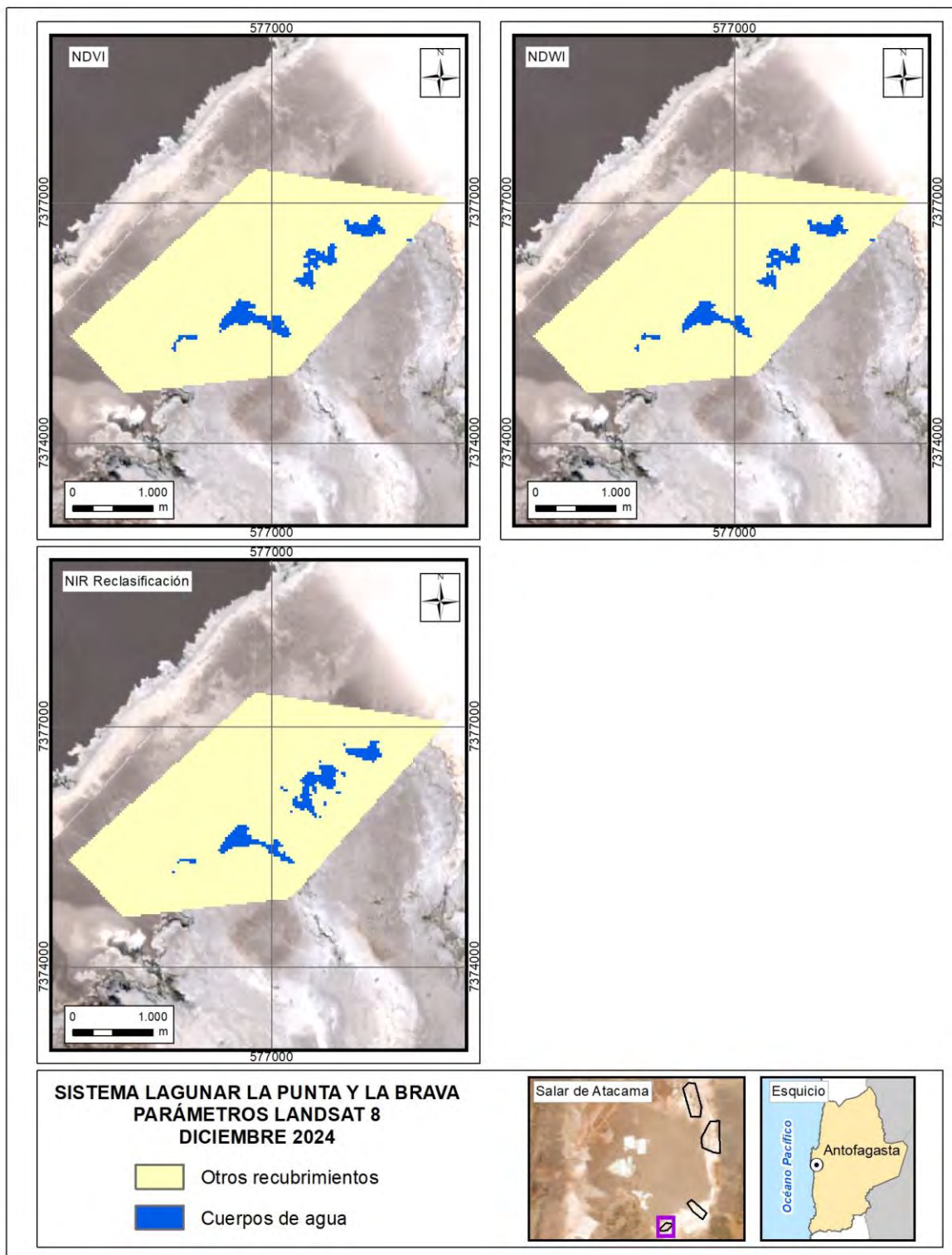
Fuente: Elaboración propia

### ANEXO 9-16. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2024.



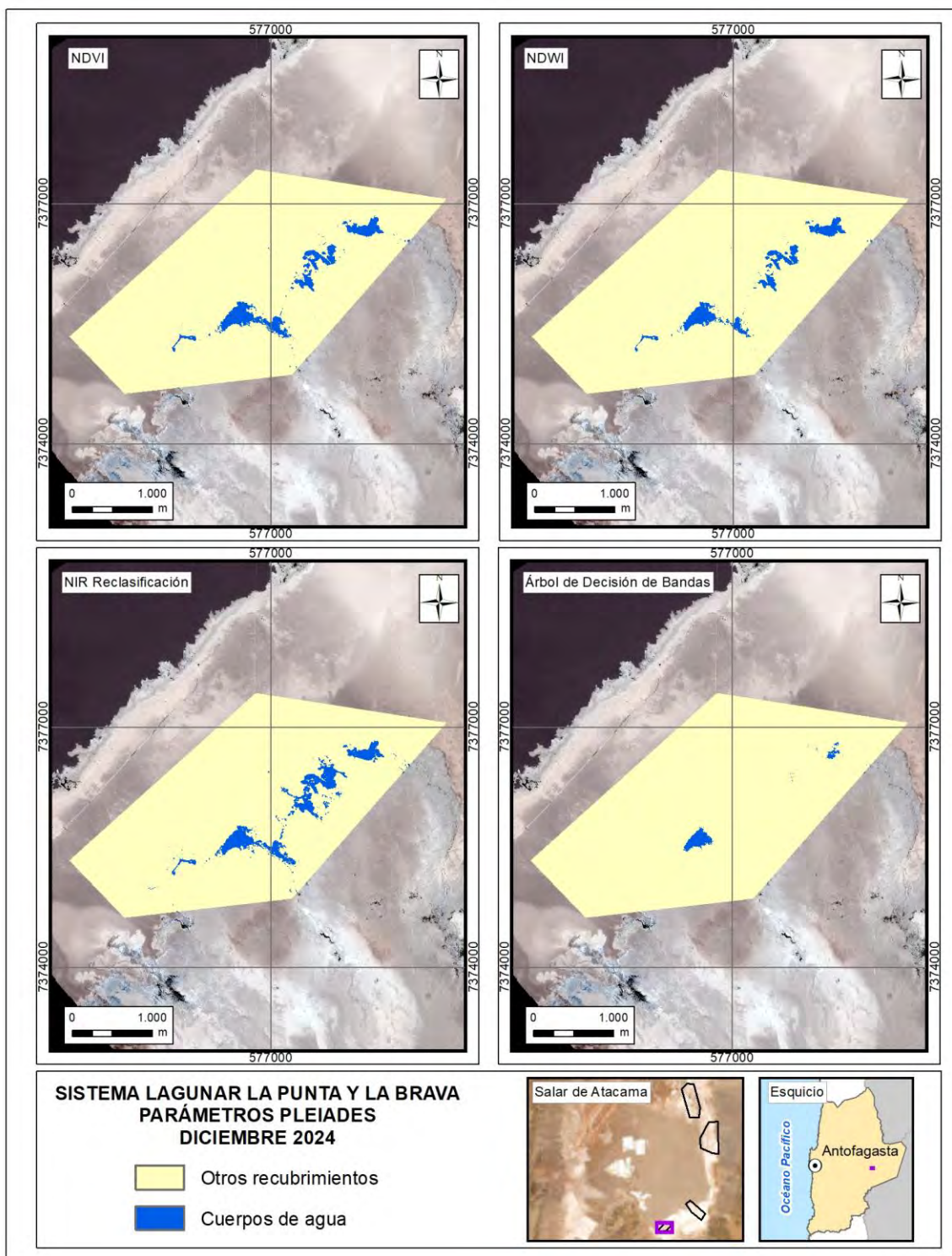
Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 9-17. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Landsat 8, verano 2024-2025.**



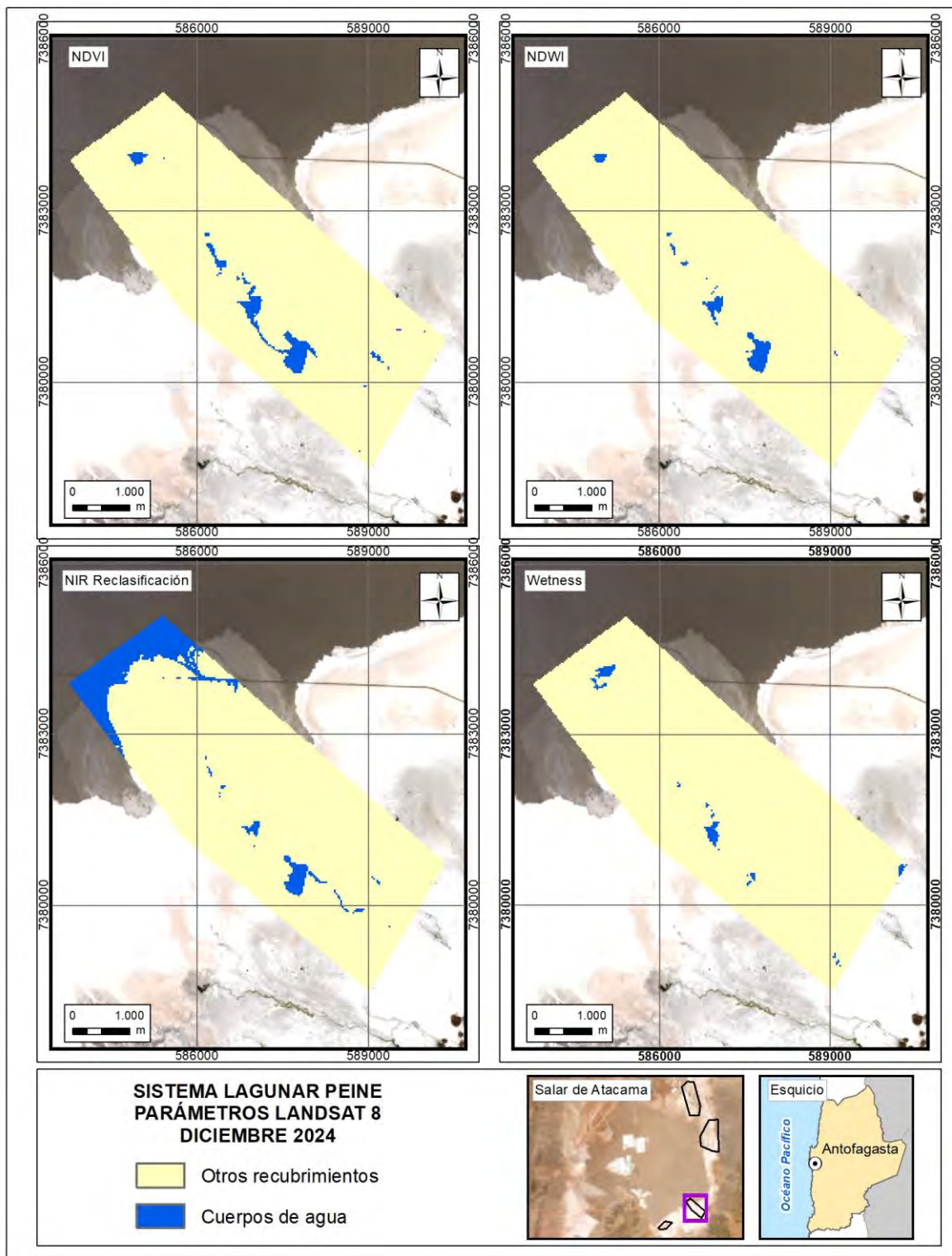
Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 9-18. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Pleiades 1-A, verano 2024-2025.**



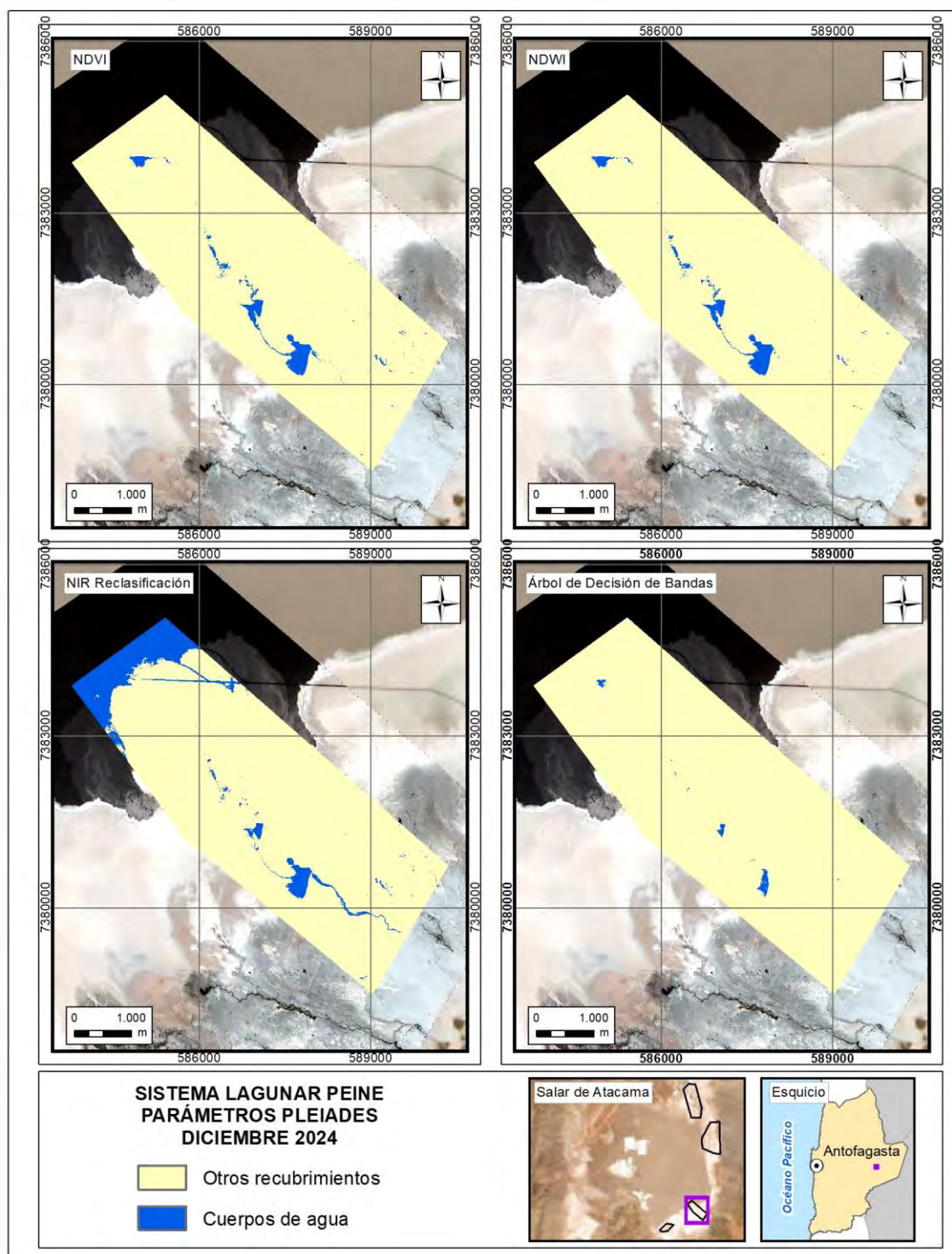
Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 9-19. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Landsat 8, verano 2024-2025.**



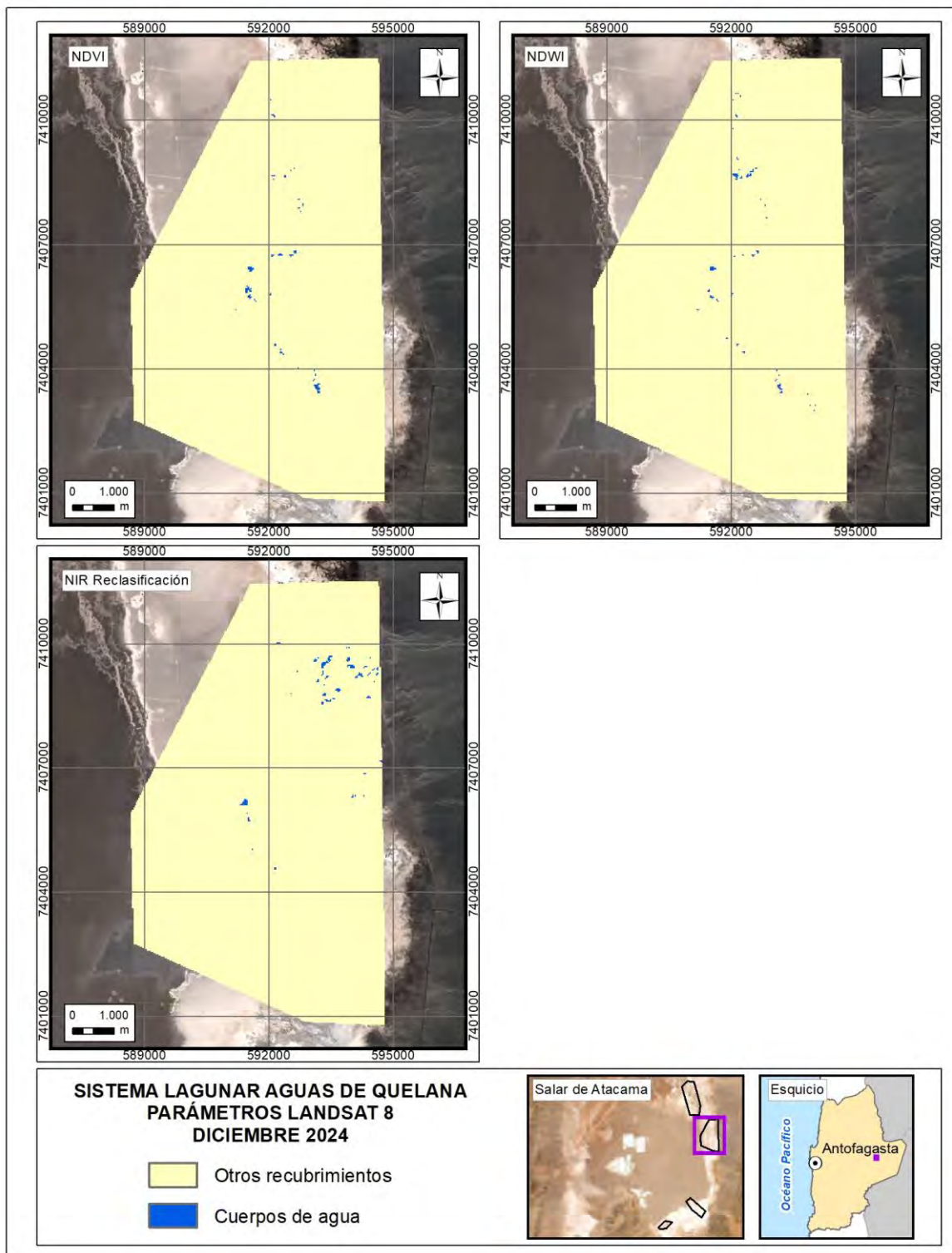
Fuente: Elaboración propia

# **ANEXO 9-20. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Pleiades 1-A, verano 2024-2025.**



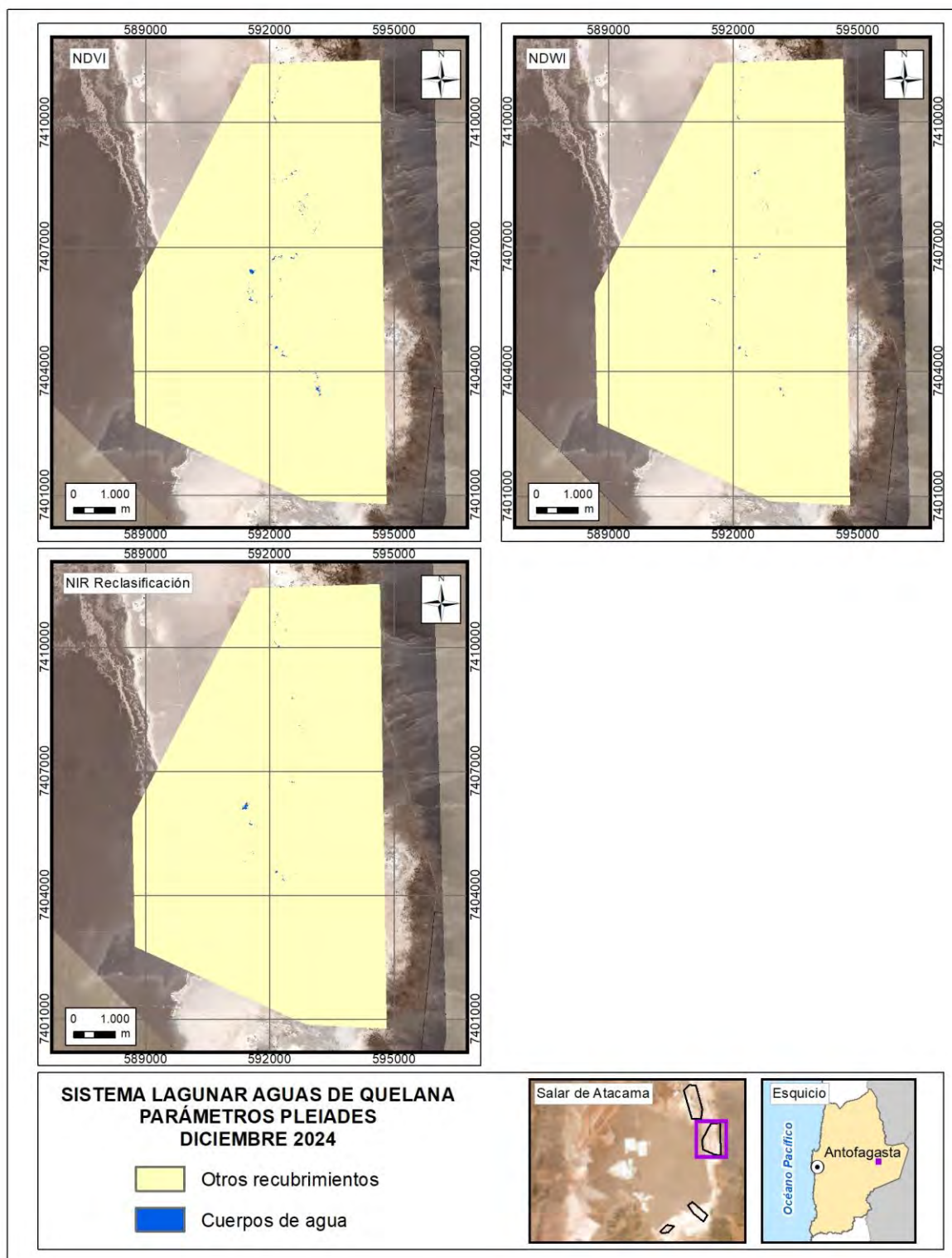
Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 9-21. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Landsat 8, verano 2024-2025.**



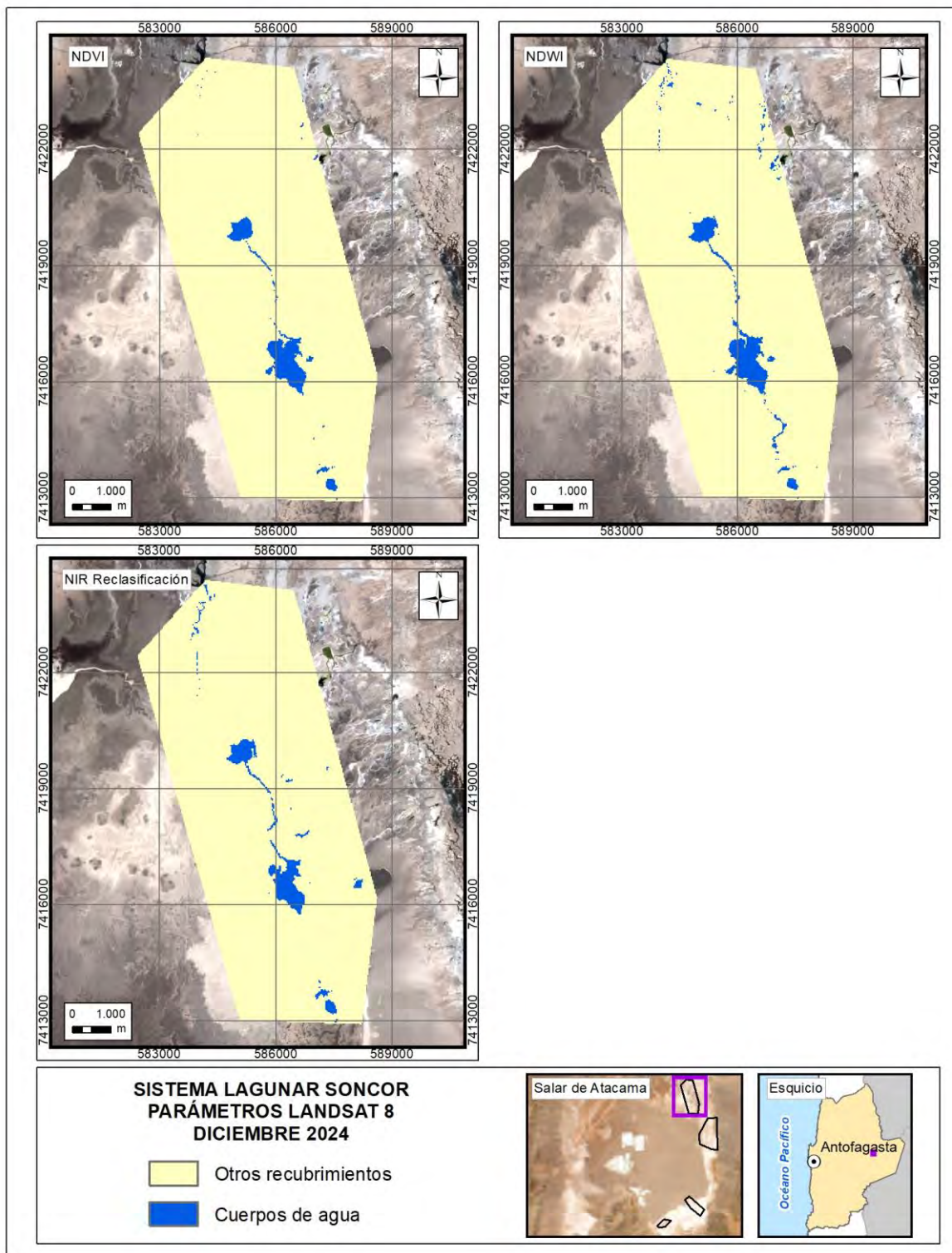
Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 9-22. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A, verano 2024-2025.**



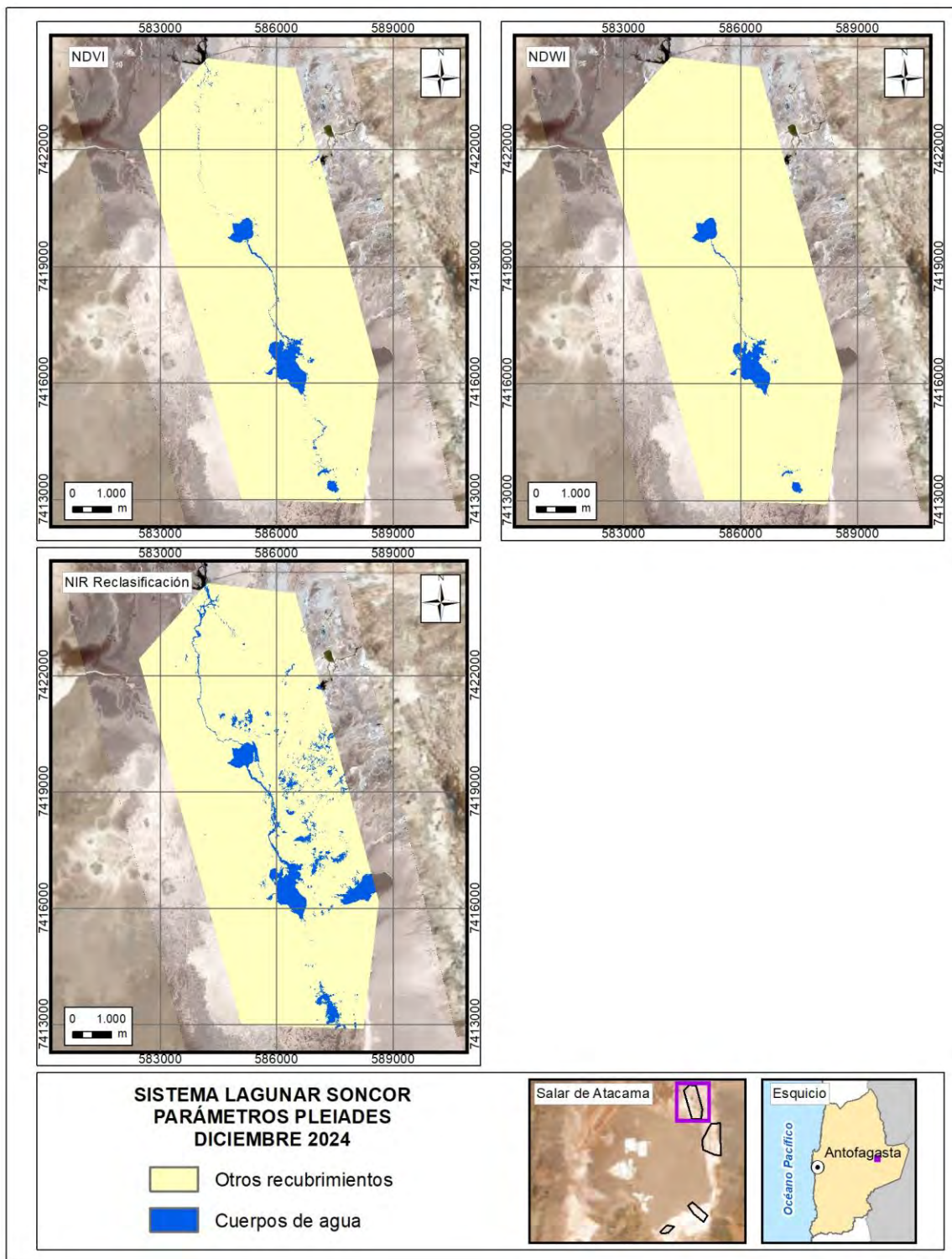
Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 9-23. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Landsat 8, verano 2024-2025.**



Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 9-24. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Pleiades 1-A, verano 2024-2025.**



Fuente: Elaboración propia

### ANEXO 9-25. Imágenes Landsat 2016 – 2024 – Análisis NDWI.

| N° | Producto/Sensor | Año  | Fecha de adquisición | ID - LANDSAT                             | Cobertura nubosa* |
|----|-----------------|------|----------------------|------------------------------------------|-------------------|
| 1  | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 15-01-2016           | LC08_L1TP_233076_20160115_20180528_01_T1 | 0,43              |
| 2  | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 31-01-2016           | LC08_L1TP_233076_20160131_20170330_01_T1 | 2,32              |
| 3  | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 16-02-2016           | LC08_L1TP_233076_20160216_20170329_01_T1 | 19,56*            |
| 4  | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 03-03-2016           | LC08_L1TP_233076_20160303_20180528_01_T1 | 0,39              |
| 5  | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 19-03-2016           | LC08_L1TP_233076_20160319_20170328_01_T1 | 0,53              |
| 6  | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 04-04-2016           | LC08_L1TP_233076_20160404_20170327_01_T1 | 5,38              |
| 7  | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 20-04-2016           | LC08_L1TP_233076_20160420_20170326_01_T1 | 35,03*            |
| 8  | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 06-05-2016           | LC08_L1TP_233076_20160506_20170325_01_T1 | 8,72              |
| 9  | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 22-05-2016           | LC08_L1TP_233076_20160522_20170324_01_T1 | 1,06              |
| 10 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 07-06-2016           | LC08_L1TP_233076_20160607_20170324_01_T1 | 0,96              |
| 11 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 23-06-2016           | LC08_L1TP_233076_20160623_20170323_01_T1 | 0,92              |
| 12 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 09-07-2016           | LC08_L1TP_233076_20160709_20170323_01_T1 | 8,66              |
| 13 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 25-07-2016           | LC08_L1TP_233076_20160725_20170322_01_T1 | 2,81              |
| 14 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 10-08-2016           | LC08_L1TP_233076_20160810_20170322_01_T1 | 1,15              |
| 15 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 26-08-2016           | LC08_L1TP_233076_20160826_20170322_01_T1 | 1,47              |
| 16 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 11-09-2016           | LC08_L1TP_233076_20160911_20170321_01_T1 | 1,1               |
| 17 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 27-09-2016           | LC08_L1TP_233076_20160927_20170319_01_T1 | 0,89              |
| 18 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 13-10-2016           | LC08_L1TP_233076_20161013_20170319_01_T1 | 1,03              |
| 19 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 29-10-2016           | LC08_L1TP_233076_20161029_20170319_01_T1 | 1,9               |
| 20 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 14-11-2016           | LC08_L1TP_233076_20161114_20170318_01_T1 | 0,82              |
| 21 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 30-11-2016           | LC08_L1TP_233076_20161130_20180528_01_T1 | 54,44*            |
| 22 | OLI_TIRS_L1TP   | 2016 | 16-12-2016           | LC08_L1TP_233076_20161216_20170316_01_T1 | 9,39              |
| 23 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 01-01-2017           | LC08_L1TP_233076_20170101_20170312_01_T1 | 0,6               |
| 24 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 17-01-2017           | LC08_L1TP_233076_20170117_20170311_01_T1 | 9,7               |
| 25 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 02-02-2017           | LC08_L1TP_233076_20170202_20170215_01_T1 | 0,51              |
| 26 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 18-02-2017           | LC08_L1TP_233076_20170218_20170228_01_T1 | 25,81*            |
| 27 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 06-03-2017           | LC08_L1TP_233076_20170306_20170316_01_T1 | 2,33              |
| 28 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 22-03-2017           | LC08_L1TP_233076_20170322_20170329_01_T1 | 0,8               |
| 29 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 07-04-2017           | LC08_L1TP_233076_20170407_20170414_01_T1 | 2,73              |
| 30 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 23-04-2017           | LC08_L1TP_233076_20170423_20170502_01_T1 | 1,51              |
| 31 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 09-05-2017           | LC08_L1TP_233076_20170509_20170516_01_T1 | 1,18              |
| 32 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 25-05-2017           | LC08_L1TP_233076_20170525_20170614_01_T1 | 81,52*            |
| 33 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 10-06-2017           | LC08_L1TP_233076_20170610_20170627_01_T1 | 2,72              |

| N° | Producto/Sensor | Año  | Fecha de adquisición | ID - LANDSAT                             | Cobertura nubosa* |
|----|-----------------|------|----------------------|------------------------------------------|-------------------|
| 34 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 26-06-2017           | LC08_L1TP_233076_20170626_20170714_01_T1 | 9,28              |
| 35 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 12-07-2017           | LC08_L1TP_233076_20170712_20170726_01_T1 | 3,4               |
| 36 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 28-07-2017           | LC08_L1TP_233076_20170728_20170810_01_T1 | 3,5               |
| 37 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 13-08-2017           | LC08_L1TP_233076_20170813_20170825_01_T1 | 2,71              |
| 38 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 29-08-2017           | LC08_L1TP_233076_20170829_20180301_01_T1 | 2,4               |
| 39 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 14-09-2017           | LC08_L1TP_233076_20170914_20170928_01_T1 | 1,65              |
| 40 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 30-09-2017           | LC08_L1TP_233076_20170930_20171013_01_T1 | 1,72              |
| 41 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 16-10-2017           | LC08_L1TP_233076_20171016_20171024_01_T1 | 4,24              |
| 42 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 01-11-2017           | LC08_L1TP_233076_20171101_20171109_01_T1 | 1,57              |
| 43 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 17-11-2017           | LC08_L1TP_233076_20171117_20171122_01_T1 | 1,38              |
| 44 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 03-12-2017           | LC08_L1TP_233076_20171203_20171207_01_T1 | 3,6               |
| 45 | OLI_TIRS_L1TP   | 2017 | 19-12-2017           | LC08_L1TP_233076_20171219_20171224_01_T1 | 15,63*            |
| 46 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 04-01-2018           | LC08_L1TP_233076_20180104_20180118_01_T1 | 0,89              |
| 47 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 20-01-2018           | LC08_L1TP_233076_20180120_20180206_01_T1 | 4,26              |
| 48 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 05-02-2018           | LC08_L1TP_233076_20180205_20180221_01_T1 | 21,42*            |
| 49 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 21-02-2018           | LC08_L1TP_233076_20180221_20180308_01_T1 | 0,77              |
| 50 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 09-03-2018           | LC08_L1TP_233076_20180309_20180320_01_T1 | 0,77              |
| 51 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 25-03-2018           | LC08_L1TP_233076_20180325_20180404_01_T1 | 3,02              |
| 52 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 10-04-2018           | LC08_L1TP_233076_20180410_20180417_01_T1 | 1,33              |
| 53 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 26-04-2018           | LC08_L1TP_233076_20180426_20180502_01_T1 | 42,69*            |
| 54 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 12-05-2018           | LC08_L1TP_233076_20180512_20180517_01_T1 | 1,09              |
| 55 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 28-05-2018           | LC08_L1TP_233076_20180528_20180605_01_T1 | 0,9               |
| 56 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 13-06-2018           | LC08_L1TP_233076_20180613_20180703_01_T1 | 4,85              |
| 57 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 29-06-2018           | LC08_L1TP_233076_20180629_20180716_01_T1 | 2,63              |
| 58 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 15-07-2018           | LC08_L1TP_233076_20180715_20180730_01_T1 | 2,8               |
| 59 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 31-07-2018           | LC08_L1TP_233076_20180731_20180814_01_T1 | 3,6               |
| 60 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 16-08-2018           | LC08_L1TP_233076_20180816_20180829_01_T1 | 3,68              |
| 61 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 01-09-2018           | LC08_L1TP_233076_20180901_20180912_01_T1 | 2,5               |
| 62 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 17-09-2018           | LC08_L1TP_233076_20180917_20180928_01_T1 | 1,7               |
| 63 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 03-10-2018           | LC08_L1TP_233076_20181003_20181010_01_T1 | 2,49              |
| 64 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 19-10-2018           | LC08_L1TP_233076_20181019_20181031_01_T1 | 0,88              |
| 65 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 04-11-2018           | LC08_L1TP_233076_20181104_20181115_01_T1 | 0,62              |
| 66 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 20-11-2018           | LC08_L1TP_233076_20181120_20181129_01_T1 | 1,31              |
| 67 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 06-12-2018           | LC08_L1TP_233076_20181206_20181211_01_T1 | 0,97              |
| 68 | OLI_TIRS_L1TP   | 2018 | 22-12-2018           | LC08_L1TP_233076_20181222_20181227_01_T1 | 0,99              |
| 69 | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 07-01-2019           | LC08_L1TP_233076_20190107_20190130_01_T1 | 0,6               |

| N°  | Producto/Sensor | Año  | Fecha de adquisición | ID - LANDSAT                             | Cobertura nubosa* |
|-----|-----------------|------|----------------------|------------------------------------------|-------------------|
| 70  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 23-01-2019           | LC08_L1TP_233076_20190123_20190205_01_T1 | 0,24              |
| 71  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 08-02-2019           | LC08_L1TP_233076_20190208_20190221_01_T1 | 36,87*            |
| 72  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 24-02-2019           | LC08_L1TP_233076_20190224_20190309_01_T1 | 0,67              |
| 73  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 12-03-2019           | LC08_L1TP_233076_20190312_20190325_01_T1 | 0,99              |
| 74  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 28-03-2019           | LC08_L1TP_233076_20190328_20190404_01_T1 | 1,18              |
| 75  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 13-04-2019           | LC08_L1TP_233076_20190413_20190422_01_T1 | 1                 |
| 76  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 29-04-2019           | LC08_L1TP_233076_20190429_20190508_01_T1 | 1,25              |
| 77  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 15-05-2019           | LC08_L1TP_233076_20190515_20190521_01_T1 | 1,03              |
| 78  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 31-05-2019           | LC08_L1TP_233076_20190531_20190605_01_T1 | 0,96              |
| 79  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 16-06-2019           | LC08_L1TP_233076_20190616_20190620_01_T1 | 31,3*             |
| 80  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 02-07-2019           | LC08_L1TP_233076_20190702_20190718_01_T1 | 38,81*            |
| 81  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 18-07-2019           | LC08_L1TP_233076_20190718_20190731_01_T1 | 1,25              |
| 82  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 03-08-2019           | LC08_L1TP_233076_20190803_20190819_01_T1 | 1,25              |
| 83  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 19-08-2019           | LC08_L1TP_233076_20190819_20190902_01_T1 | 1,09              |
| 84  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 04-09-2019           | LC08_L1TP_233076_20190904_20190917_01_T1 | 8,14              |
| 85  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 20-09-2019           | LC08_L1TP_233076_20190920_20190926_01_T1 | 2,11              |
| 86  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 06-10-2019           | LC08_L1TP_233076_20191006_20191018_01_T1 | 1,44              |
| 87  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 22-10-2019           | LC08_L1TP_233076_20191022_20191030_01_T1 | 1,01              |
| 88  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 07-11-2019           | LC08_L1TP_233076_20191107_20191115_01_T1 | 0,4               |
| 89  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 23-11-2019           | LC08_L1TP_233076_20191123_20191203_01_T1 | 2,98              |
| 90  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 09-12-2019           | LC08_L1TP_233076_20191209_20191217_01_T1 | 0,84              |
| 91  | OLI_TIRS_L1TP   | 2019 | 25-12-2019           | LC08_L1TP_233076_20191225_20200110_01_T1 | 2,11              |
| 92  | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 10-01-2020           | LC08_L1TP_233076_20200110_20200114_01_T1 | 16,81*            |
| 93  | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 26-01-2020           | LC08_L1TP_233076_20200126_20200210_01_T1 | 13,69*            |
| 94  | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 11-02-2020           | LC08_L1TP_233076_20200211_20200225_01_T1 | 2,08              |
| 95  | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 27-02-2020           | LC08_L1TP_233076_20200227_20200313_01_T1 | 0,34              |
| 96  | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 14-03-2020           | LC08_L1TP_233076_20200314_20200325_01_T1 | 5,49              |
| 97  | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 30-03-2020           | LC08_L1TP_233076_20200330_20200410_01_T1 | 0,71              |
| 98  | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 15-04-2020           | LC08_L1TP_233076_20200415_20200423_01_T1 | 0,58              |
| 99  | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 01-05-2020           | LC08_L1TP_233076_20200501_20200509_01_T1 | 0,9               |
| 100 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 17-05-2020           | LC08_L1TP_233076_20200517_20200527_01_T1 | 0,85              |
| 101 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 02-06-2020           | LC08_L1TP_233076_20200602_20200608_01_T1 | 3,88              |
| 102 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 18-06-2020           | LC08_L1TP_233076_20200618_20200625_01_T1 | 1,06              |
| 103 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 04-07-2020           | LC08_L1TP_233076_20200704_20200708_01_T1 | 0,75              |
| 104 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 20-07-2020           | LC08_L1TP_233076_20200720_20200807_01_T1 | 68,38*            |
| 105 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 05-08-2020           | LC08_L1TP_233076_20200805_20200821_01_T1 | 1,36              |

| N°  | Producto/Sensor | Año  | Fecha de adquisición | ID - LANDSAT                             | Cobertura nubosa* |
|-----|-----------------|------|----------------------|------------------------------------------|-------------------|
| 106 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 21-08-2020           | LC08_L1TP_233076_20200821_20200905_01_T1 | 2,06              |
| 107 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 06-09-2020           | LC08_L1TP_233076_20200906_20200918_01_T1 | 4,2               |
| 108 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 22-09-2020           | LC08_L1TP_233076_20200922_20201006_01_T1 | 3,59              |
| 109 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 08-10-2020           | LC08_L1TP_233076_20201008_20201016_01_T1 | 1,45              |
| 110 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 24-10-2020           | LC08_L1TP_233076_20201024_20201105_01_T1 | 1,13              |
| 111 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 09-11-2020           | LC08_L1TP_233076_20201109_20210317_01_T1 | 0,96              |
| 112 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 25-11-2020           | LC08_L1TP_233076_20201125_20210315_01_T1 | 0,4               |
| 113 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 11-12-2020           | LC08_L1TP_233076_20201211_20210313_01_T1 | 0,37              |
| 114 | OLI_TIRS_L1TP   | 2020 | 27-12-2020           | LC08_L1TP_233076_20201227_20210311_01_T1 | 18,55*            |
| 115 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 12-01-2021           | LC08_L1TP_233076_20210112_20210307_01_T1 | 3,2               |
| 116 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 28-01-2021           | LC08_L1TP_233076_20210128_20210305_01_T1 | 0,53              |
| 117 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 13-02-2021           | LC08_L1TP_233076_20210213_20210304_01_T1 | 0,58              |
| 118 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 01-03-2021           | LC08_L1TP_233076_20210301_20210311_01_T1 | 1,57              |
| 119 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 17-03-2021           | LC08_L1TP_233076_20210317_20210328_01_T1 | 0,64              |
| 120 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 02-04-2021           | LC08_L1TP_233076_20210402_20210409_01_T1 | 0,79              |
| 121 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 18-04-2021           | LC08_L1TP_233076_20210418_20210424_01_T1 | 0,86              |
| 122 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 04-05-2021           | LC08_L1TP_233076_20210504_20210517_01_T1 | 0,74              |
| 123 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 20-05-2021           | LC08_L1TP_233076_20210520_20210528_01_T1 | 5,01              |
| 124 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 05-06-2021           | LC08_L1TP_233076_20210605_20210614_01_T1 | 4,41              |
| 125 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 21-06-2021           | LC08_L1TP_233076_20210621_20210629_01_T1 | 18,57*            |
| 126 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 07-07-2021           | LC08_L1TP_233076_20210707_20210713_01_T1 | 2,37              |
| 127 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 23-07-2021           | LC08_L1TP_233076_20210723_20210729_01_T1 | 1,51              |
| 128 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 08-08-2021           | LC08_L1TP_233076_20210808_20210818_01_T1 | 2,09              |
| 129 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 24-08-2021           | LC08_L1TP_233076_20210824_20210831_01_T1 | 1,22              |
| 130 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 09-09-2021           | LC08_L1TP_233076_20210909_20210916_01_T1 | 3,8               |
| 131 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 25-09-2021           | LC08_L1TP_233076_20210925_20211001_01_T1 | 1,01              |
| 132 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 11-10-2021           | LC08_L1TP_233076_20211011_20211019_01_T1 | 0,94              |
| 133 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 27-10-2021           | LC08_L1TP_233076_20211027_20211104_01_T1 | 0,89              |
| 134 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 12-11-2021           | LC08_L1TP_233076_20211112_20211124_01_T1 | 0,59              |
| 135 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 28-11-2021           | LC08_L1TP_233076_20211128_20211208_01_T1 | 0,4               |
| 136 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 14-12-2021           | LC08_L1TP_233076_20211214_20211223_01_T1 | 3,44              |
| 137 | OLI_TIRS_L1TP   | 2021 | 30-12-2021           | LC08_L1TP_233076_20211230_20220106_01_T1 | 0,46              |
| 138 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 15-01-2022           | LC08_L2SP_233076_20220115_20220123_02_T1 | 17,48*            |
| 139 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 31-01-2022           | LC08_L2SP_233076_20220131_20220205_02_T1 | 3,86              |
| 140 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 16-02-2022           | LC08_L2SP_233076_20220216_20220223_02_T1 | 1,59              |
| 141 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 04-03-2022           | LC08_L2SP_233076_20220304_20220314_02_T1 | 12,73*            |

| N°  | Producto/Sensor | Año  | Fecha de adquisición | ID - LANDSAT                             | Cobertura nubosa* |
|-----|-----------------|------|----------------------|------------------------------------------|-------------------|
| 142 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 20-03-2022           | LC08_L2SP_233076_20220320_20220329_02_T1 | 17,14*            |
| 143 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 05-04-2022           | LC08_L2SP_233076_20220405_20220412_02_T1 | 0,83              |
| 144 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 21-04-2022           | LC08_L2SP_233076_20220421_20220428_02_T1 | 0,79              |
| 145 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 07-05-2022           | LC08_L2SP_233076_20220507_20220512_02_T1 | 11,05*            |
| 146 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 23-05-2022           | LC08_L2SP_233076_20220523_20220602_02_T1 | 1,17              |
| 147 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 08-06-2022           | LC08_L2SP_233076_20220608_20220616_02_T1 | 5,85              |
| 148 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 10-07-2022           | LC08_L2SP_233076_20220710_20220722_02_T1 | 13,28*            |
| 149 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 26-07-2022           | LC08_L2SP_233076_20220726_20220802_02_T1 | 1,12              |
| 150 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 11-08-2022           | LC08_L2SP_233076_20220811_20220818_02_T1 | 1,65              |
| 151 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 27-08-2022           | LC08_L2SP_233076_20220827_20220909_02_T1 | 1,23              |
| 152 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 12-09-2022           | LC08_L2SP_233076_20220912_20220922_02_T1 | 3,89              |
| 153 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 28-09-2022           | LC08_L2SP_233076_20220928_20221005_02_T1 | 0,99              |
| 154 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 14-10-2022           | LC08_L2SP_233076_20221014_20221021_02_T1 | 1,08              |
| 155 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 30-10-2022           | LC08_L2SP_233076_20221030_20221108_02_T1 | 1,13              |
| 156 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 15-11-2022           | LC08_L2SP_233076_20221115_20230113_02_T1 | 0,63              |
| 157 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 01-12-2022           | LC08_L2SP_233076_20221201_20221212_02_T1 | 0,58              |
| 158 | OLI_TIRS_L2SP   | 2022 | 17-12-2022           | LC08_L2SP_233076_20221217_20221227_02_T1 | 0,36              |
| 159 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 02-01-2023           | LC08_L2SP_233076_20230102_20230111_02_T1 | 14,47             |
| 160 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 18-01-2023           | LC08_L2SP_233076_20230118_20230131_02_T1 | 4,45              |
| 161 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 03-02-2023           | LC08_L2SP_233076_20230203_20230209_02_T1 | 3,42              |
| 162 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 19-02-2023           | LC08_L2SP_233076_20230219_20230224_02_T1 | 5,37              |
| 163 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 07-03-2023           | LC08_L2SP_233076_20230307_20230316_02_T1 | 0,67              |
| 164 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 23-03-2023           | LC08_L2SP_233076_20230323_20230404_02_T1 | 23,33             |
| 165 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 08-04-2023           | LC08_L2SP_233076_20230408_20230420_02_T1 | 0,84              |
| 166 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 24-04-2023           | LC08_L2SP_233076_20230424_20230501_02_T1 | 0,76              |
| 167 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 10-05-2023           | LC08_L2SP_233076_20230510_20230518_02_T1 | 0,94              |
| 168 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 26-05-2023           | LC08_L2SP_233076_20230526_20230603_02_T1 | 11,2              |
| 169 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 11-06-2023           | LC08_L2SP_233076_20230611_20230614_02_T1 | 0,91              |
| 170 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 27-06-2023           | LC08_L2SP_233076_20230627_20230710_02_T1 | 1,26              |
| 171 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 13-07-2023           | LC08_L2SP_233076_20230713_20230724_02_T1 | 1,16              |
| 172 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 29-07-2023           | LC08_L2SP_233076_20230729_20230805_02_T1 | 1,15              |
| 173 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 14-08-2023           | LC08_L2SP_233076_20230814_20230819_02_T1 | 1,12              |
| 174 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 30-08-2023           | LC08_L2SP_233076_20230830_20230906_02_T1 | 0,96              |
| 175 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 15-09-2023           | LC08_L2SP_233076_20230915_20230925_02_T1 | 1,39              |
| 176 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 01-10-2023           | LC08_L2SP_233076_20231001_20231011_02_T1 | 0,99              |
| 177 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 17-10-2023           | LC08_L2SP_233076_20231017_20231103_02_T1 | 9,35              |

| N°  | Producto/Sensor | Año  | Fecha de adquisición | ID - LANDSAT                             | Cobertura nubosa* |
|-----|-----------------|------|----------------------|------------------------------------------|-------------------|
| 178 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 02-11-2023           | LC08_L2SP_233076_20231102_20231109_02_T1 | 1,08              |
| 179 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 18-11-2023           | LC08_L2SP_233076_20231118_20231122_02_T1 | 1,03              |
| 180 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 04-12-2023           | LC08_L2SP_233076_20231204_20231209_02_T1 | 0,73              |
| 181 | OLI_TIRS_L2SP   | 2023 | 20-12-2023           | LC08_L2SP_233076_20231220_20240103_02_T1 | 0,34              |
| 182 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 05-01-2024           | LC08_L1TP_233076_20240105_20240112_02_T1 | 5,05              |
| 183 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 21-01-2024           | LC08_L1TP_233076_20240121_20240129_02_T1 | 0,6               |
| 184 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 06-02-2024           | LC08_L1TP_233076_20240206_20240212_02_T1 | 14,13             |
| 185 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 22-02-2024           | LC08_L1TP_233076_20240222_20240229_02_T1 | 10,33             |
| 186 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 09-03-2024           | LC08_L1TP_233076_20240309_20240316_02_T1 | 0,88              |
| 187 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 25-03-2024           | LC08_L1TP_233076_20240325_20240403_02_T1 | 0,55              |
| 188 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 10-04-2024           | LC08_L1TP_233076_20240410_20240419_02_T1 | 0,9               |
| 189 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 26-04-2024           | LC08_L1TP_233076_20240426_20240510_02_T1 | 0,92              |
| 190 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 12-05-2024           | LC08_L1TP_233076_20240512_20240520_02_T1 | 0,62              |
| 191 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 28-05-2024           | LC08_L1TP_233076_20240528_20240611_02_T1 | 0,91              |
| 192 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 29-06-2024           | LC08_L1TP_233076_20240629_20240709_02_T1 | 0,76              |
| 193 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 15-07-2024           | LC08_L1TP_233076_20240715_20240722_02_T1 | 0,98              |
| 194 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 31-07-2024           | LC08_L1TP_233076_20240731_20240807_02_T1 | 0,97              |
| 195 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 16-08-2024           | LC08_L1TP_233076_20240816_20240822_02_T1 | 2,98              |
| 196 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 01-09-2024           | LC08_L1TP_233076_20240901_20240906_02_T1 | 0,94              |
| 197 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 17-09-2024           | LC08_L1TP_233076_20240917_20240921_02_T1 | 0,77              |
| 198 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 03-10-2024           | LC08_L1TP_233076_20241003_20241008_02_T1 | 0,99              |
| 199 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 19-10-2024           | LC08_L1TP_233076_20241019_20241028_02_T1 | 0,5               |
| 200 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 04-11-2024           | LC08_L1TP_233076_20241104_20241113_02_T1 | 0,49              |
| 201 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 20-11-2024           | LC08_L1TP_233076_20241120_20241203_02_T1 | 3,56              |
| 202 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 06-12-2024           | LC08_L1TP_233076_20241206_20241210_02_T1 | 0,34              |
| 203 | OLI_TIRS_L2SP   | 2024 | 22-12-2024           | LC08_L1TP_233076_20241222_20241228_02_T1 | 0,46              |

\*Las coberturas nubosas mayores al 10% fueron analizadas según el área de corte, y consideradas en la medida que no afectarían la metodología de análisis; sus resultados se analizan por la imagen de salida, pero podría no considerarse en la medida que se presente como un valor extremo en la serie de datos.

## ANEXO 9-26. Cartas de notificación de restricciones de acceso



**CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL  
REGIÓN DE ANTOFAGASTA  
DIRECCIÓN REGIONAL ANTOFAGASTA  
DRS/FGS**

**CARTA OFICIAL N° 55/2024**

**ANTOFAGASTA, 16/09/2024**

**SEÑORITA  
PAULETTE SAN MARTÍN T.  
LÍDER DE MONITOREO Y SEGUIMIENTO AMBIENTAL  
ALBEMARLE LIMITADA  
AVDA HÉCTOR GÓMEZ COBO 975  
ANTOFAGASTA**

Por medio del presente se indica que durante el 28 Agosto y el 9 de Septiembre, se han visto indicios de adelantamiento del proceso reproductivo de las colonias de Flamencos Altoandinos en los cuerpos lacustres del Sistema Hidrológico de Soncor, en el Salar de Atacama.

A continuación se presentan los detalles de observaciones de Guardaparques de CONAF y Guías de la Comunidad de Toconao del centro Chaxas:

### **Monitoreo de actividades de Flamencos Altoandinos en el Sistema Hidrológico de Soncor, Período 22/08/24 – 09/09/24.**

| Fecha    | Ubicación     | Actividad      | Especie                  | Abundancia |
|----------|---------------|----------------|--------------------------|------------|
| 22/08/24 | Laguna Puilar | Marcha Nupcial | Flamenco Andino          | 80         |
| 29/08/24 | Laguna Chaxas | Marcha Nupcial | Flamenco Andino          | 30         |
| 02/09/24 | Laguna Puilar | Alimentación   | Flamencos Andino-Chileno | 660        |

|          |                          |                |                                         |                |
|----------|--------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
| 02/09/24 | Laguna Chaxas            | Alimentación   | Flamenco Chileno                        | 73             |
| 02/09/24 | Laguna Barros Negros Sur | Alimentación   | Flamencos Andino-Chileno                | 120            |
| 03/09/24 | Canal Burro Muerto       | Alimentación   | Flamenco Andino-Chileno e indeterminado | 77<br>86<br>66 |
| 09/09/24 | Laguna Puilar            | Marcha Nupcial | Flamenco Andino                         | 150            |

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de las actividades de los Flamencos Altoandinos, se ha visto el adelantamiento de las marchas nupciales en Laguna Puilar y Laguna Chaxas, siendo habitual que esto suceda en el mes de Octubre hasta Febrero, fecha en la que culmina toda la actividad del proceso reproductivo.

De acuerdo al protocolo de ingreso para actividades de monitoreo en el Salar de Atacama, la restricción de actividades comienza a partir de Octubre a Febrero, periodo correspondiente a la temporada reproductiva de los Flamencos Altoandinos, sin embargo por adelantarse este periodo, se indica que se procederá a ejecutar el cierre inmediato de actividades monitoreo, mediciones e investigaciones, en todos los puntos que se encuentren insertos en un área buffer de protección de 1 KM a los cuerpos lacustres del sistema hidrológico de Soncor, dejando la posibilidad de poder seguir implementando monitoreos y mediciones fuera del rango indicado hasta el mes de Octubre, periodo en que comienza formalmente el ciclo reproductivo del Flamenco y se realiza el cierre del sector.

Para evaluar los puntos de exclusión para monitoreo, mediciones e investigación autorizadas inicialmente en las últimas autorizaciones trimestrales, se adjuntan en formato google earth, las áreas de exclusión a los cuerpos lacustres indicados. Podrán haber indicaciones adicionales según cada caso específico, las cuales serán indicadas por la administración de la Reserva Nacional los Flamencos.

CONAF y la Comunidad Atacameña de Toconao seguirán monitoreando la actividad reproductiva, y en el caso que se vea un incremento en la situación expuesta, se darán nuevas indicaciones.

Esperando la comprensión, saluda atentamente.

Saluda atentamente a usted



Comunidad Atacameña de Peine Latorre S/N, Peine.  
ADI Atacama La Grande, San Pedro de Atacama.

N°94/2024

Peine, Lunes 28 de Octubre de 2024.

Señor  
Manuel Zamora Pizarro  
Gerente de Relaciones Comunitarias  
Albemar Limitada

**PRESENTE**

**Asunto:** Cierre de lagunas Salada, Saladita e Interna

Estimado Sr. Zamora,

Junto con saludar, nuestra Comunidad Atacameña de Peine es una institución altamente comprometida con la preservación de la biodiversidad y su territorio Likanantai, patrimonio de nuestra cultura milenaria, altamente adaptada a las condiciones desérticas más agrestes conocidas por la humanidad.

Dentro de nuestra biodiversidad endémica está nuestra micro y macrofauna, la cual posee temporadas de apareamiento, postura, incubación, eclosión y primeras etapas de polluelo; en el caso de los Sonor o flamencos (*P. andinus*, *P. jamesi* y *P. chilensis*).

Por esta razón, nos vemos en la necesidad de cerrar las lagunas Salada, Saladita e Interna desde el mes de noviembre de 2024 hasta la segunda quincena de marzo 2025.

Agradecemos su comprensión y colaboración en nuestra misión de preservar nuestra biodiversidad endémica, insigne de nuestro norte y nuestro país.

Sin otro particular.

Se despide atentamente,

  
  
**Sergio Cubillos Verasay**  
**Presidente**  
**Comunidad Atacameña de Peine**

07 08 2024

35

Firme de permisos de trabajo con John Soza a las 7 a.m. en rancho de Peine.

Equipos de superficies laguneras va a Tacones para juntarse con personal Conif y comunidad de Tacones a las 9 a.m.

Equipos de fauna se reúnen en cancha de fútbol con Pablo Cruz de comunidad de Peine con John Soza y con personal del Conif de Puentes Atacama.

Todo fauna hace revisión de trampas y Transecto según programación y esperan en terreno para la realización de playback de anfibios y aves nocturnas. Equipo 2 de fauna en lagunas de Peine solo tuvo avist a los puntos de Entorno, el avist a Solado y Soladito estaba restringido.

Después del monitoreo nocturno, todos los equipos retornan a Peine sin novedades a las 20 hrs aproximadamente.

Rolando P. Barahona