

Anexo 10.1

Calculo de superficies lacustres – Imagen Satelital

Cálculo de superficies lacustres

Campaña julio de 2023

Plan de Seguimiento Ambiental, Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama Región de Antofagasta



Julio 2023

INDICE

Contenido

| | |
|---|----|
| INDICE | 2 |
| 1. RESUMEN | 4 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 4 |
| 3. OBJETIVOS | 5 |
| 4. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 5 |
| 4.1. ÁREA DE ESTUDIO | 5 |
| 4.2. MATERIALES, SOFTWARE Y EQUIPOS UTILIZADOS..... | 6 |
| 4.3. PARÁMETROS PARA CARACTERIZAR EL ESTADO Y EVOLUCIÓN DE LAS VARIABLES AMBIENTALES... | 7 |
| 4.4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS..... | 7 |
| 4.5.1. Análisis de Imágenes Satelitales..... | 8 |
| 4.5.2. Contornos de las Lagunas | 14 |
| 4.5.3. Límites Oficiales de las Lagunas para el Cálculo de Superficies | 15 |
| 5. PUNTOS DE CONTROL..... | 18 |
| 6. RESULTADOS..... | 19 |
| 7. CONCLUSIONES..... | 28 |
| 8. REFERENCIAS | 29 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Área de estudio y ubicación de los sistemas lagunares y lagunas (UTM WGS84 19S)..... | 5 |
| Figura 2: Imagen GeoEye-1 Color Real (izquierda) e Infrarrojo Color (derecha) del sistema SONCOR..... | 7 |
| Figura 3: Metodología para la clasificación de cuerpos de Agua. Elaboración Propia. | 8 |
| Figura 4: Formato de datos en imágenes satelitales y sus correcciones. Elaboración Propia. | 9 |
| Figura 5: (a) Combinación RGB Infrarrojo Color de la imagen multiespectral original (resolución de 2 metros), (b) Imagen Pancromática original con resolución de 0,5 metros y (c) Combinación RGB Infrarrojo Color de la imagen Multiespectral fusionada con la banda Pancromática. Elaboración Propia. | 10 |
| Figura 6: NDWI en SONCOR (izquierda) y PEINE (derecha). Elaboración Propia..... | 11 |
| Figura 7: Línea del Suelo y Diagrama de dispersión de los pixeles para las bandas NIR (eje X) y Roja (eje Y).. | 12 |
| Figura 8: Diagramas de dispersión para pixeles de suelo para los sistemas SONCOR y PEINE | 12 |
| Figura 9: TSAVI en SONCOR (izquierda) y PEINE (derecha). Elaboración Propia..... | 13 |
| Figura 10: Transformación HSI en RGB en SONCOR (izquierda) y PEINE (derecha). Elaboración Propia. | 14 |
| Figura 11: Límites de análisis ráster para cada laguna en los sistemas SONCOR y PEINE. | 15 |
| Figura 12: Límites de las lagunas en el sistema SONCOR..... | 17 |

| | |
|--|----|
| Figura 13: Límites de las lagunas en el sistema SONCOR..... | 18 |
| Figura 14: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Chaxa. | 20 |
| Figura 15: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Barros Negros. | 21 |
| Figura 16: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Puilar. | 22 |
| Figura 17: Mapeo de Cuerpos de Agua en Desborde Sur. | 23 |
| Figura 18: Mapeo de Cuerpos de Agua en la Laguna Salada. | 25 |
| Figura 19: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Saladita. | 26 |
| Figura 20: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Interna. | 27 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Resumen de superficies lacustres, julio 2023 | 4 |
| Tabla 2: Principales características de la imagen GeoEye-1 | 6 |
| Tabla 3: Factores a y b para el cálculo del TSAVI..... | 13 |
| Tabla 4: Umbrales utilizados con los índices NDWI, TSAVI e IHS. Elaboración Propia. | 15 |
| Tabla 5: Vértices de las líneas que delimitan los límites de cada laguna Enel sistema Soncor..... | 16 |
| Tabla 6: Vértices de las líneas que delimitan los límites de cada laguna Enel sistema Peine..... | 17 |
| Tabla 7: Medición de superficies lagunares en el sistema SONCOR. | 19 |
| Tabla 8: Medición de superficies lagunares en el sistema PEINE..... | 24 |

1. RESUMEN

El presente informe corresponde al monitoreo de superficies lacustres en los sistemas SONCOR y PEINE, presentes en el Borde Este del Salar de Atacama, Región de Antofagasta para el periodo de Julio 2023 representado en una imagen satelital capturada el día 10 de julio del mismo año.

Este monitoreo se desarrolla en el contexto del Plan de Seguimiento Ambiental establecido en la RCA 226/2006 del Proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” y sus alcances metodológicos acogen a lo establecido en la Resolución Exenta N°224/2010 de la Comisión Regional de Medio Ambiente, Región de Antofagasta.

En acuerdo a lo establecido en la Resolución Exenta N°224/2010, la medición del tamaño de las lagunas se realiza con el uso de imágenes satelitales de alta resolución espacial fusionadas, con el apoyo de índices alternativos (IHS, TSAVI, NDWI), y mediciones de terreno necesarias para la definición de límites difusos que representen una complejidad en la interpretación mediante la imagen satelital.

En el cuadro resumen (Tabla 1) a continuación se presentan las superficies lacustres calculadas para los sistemas SONCOR y PEINE en el período de monitoreo julio 2023.

Tabla 1: Resumen de superficies lacustres, julio 2023. Elaboración Propia.

| Sistema | Nombre del Cuerpo de Agua | Superficie del espejo de agua (m ²) |
|---------|---------------------------|---|
| SONCOR | Chaxa | 290.408 |
| | Barros Negros | 1.028.359 |
| | Puilar | 62.496 |
| | Desborde Sur | 459.288 |
| PEINE | Salada | 197.652 |
| | Saladita | 84.343 |
| | Desborde Laguna Interna | 209.042 |

2. INTRODUCCIÓN

El mapeo de las superficies lacustres también se realiza como parte de las actividades comprometidas en el Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) del EIA “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”, aprobado ambientalmente por la resolución exenta N°226/2006 de la COREMA, Región de Antofagasta. Conforme a lo indicado, a partir del análisis de imágenes satelitales de alta resolución se establece la superficie lacustre de los sistemas SONCOR (lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros) y el sistema PEINE (lagunas Salada, Saladita y Desborde Laguna Interna) (Considerando 10.2.2 y 10.2.4 de la RCA N°226/2006).

Posteriormente, mediante la Resolución Exenta N°244/2010 de la COREMA, Región de Antofagasta, se redefine la metodología para la medición de superficies lacustres, incorporando mejoras en el procesamiento de la imagen satelital como el uso de diversos índices espectrales para la delimitación de contornos y puntos de terreno para el control y corrección de límites, la cual fue implementada a partir de la temporada 2010. Asimismo, la medición considera los límites definidos por la CONAF para cada uno de los sistemas.

3. OBJETIVOS

El objetivo de este informe es presentar los resultados obtenidos en el mapeo de las superficies de los cuerpos lacustres para el mes de julio del año 2023 de los sistemas SONCOR y PEINE. El mapeo se realiza mediante el procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución espacial para determinar la superficie de las lagunas de los sistemas SONCOR y PEINE.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en la II Región de Antofagasta, Chile, en el sector Este del Salar de Atacama donde se encuentran los sistemas SONCOR y PEINE identificado en la RCA 226/2006 (Figura 1).

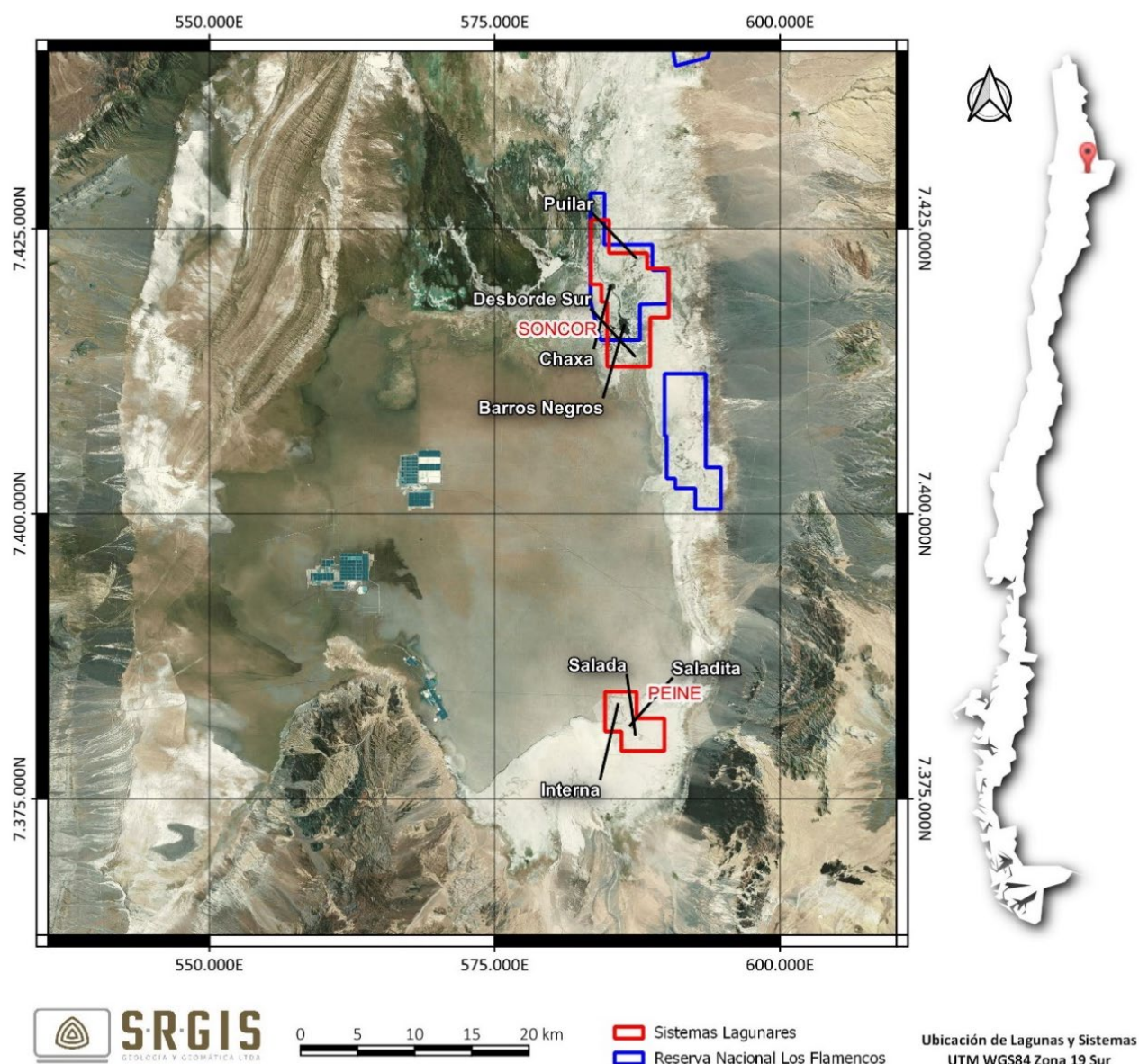


Figura 1: Área de estudio y ubicación de los sistemas lagunares y lagunas (UTM WGS84 19S). Elaboración propia.

El sistema SONCOR forma parte de la Reserva Nacional Los Flamencos y está compuesta por las lagunas Barros Negros, Chaxa y Puillar, además del Canal Burro Muerto. La laguna de mayor tamaño de este sistema es Barros Negros, que se extiende hacia el sur como una zona de inundación de gran extensión denominada “Desborde

Sur”, considerada también para su mapeo. Barros Negros se conecta hacia el norte con la laguna Chaxa por medio del canal Burro Muerto. La Laguna Puilar se ubica al noreste de la de las lagunas mencionadas anteriormente.

El sistema PEINE está formado por dos lagunas distribuidas de sureste a noroeste y conectadas entre sí por un canal, denominadas Salada y Saladita, esta última tiene un desborde hacia el noroeste llamado Desborde Laguna Interna.

4.2. MATERIALES, SOFTWARE Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para este estudio se cuenta con una imagen satelital de alta resolución espacial que posee pixeles que cubren un área de 4 m² por píxel (2 x 2 m) para las bandas multiespectrales y que además posee una banda pancromática que cubre un área de 0,25 m² por píxel (0,5 x 0,5 m). La imagen corresponde al sensor GeoEye-1 y la imagen fue capturada el día 10 de julio de 2023. El resumen de las características de esta imagen puede verse en la Tabla 2:

Tabla 2: Principales características de la imagen GeoEye-1.

| Rango Espectral | Banda | Resolución Espacial |
|--------------------|--------------------|---------------------|
| Visible | Azul | 2 mts. |
| Visible | Verde | 2 mts. |
| Visible | Rojo | 2 mts. |
| Infrarrojo Cercano | Infrarrojo Cercano | 2 mts. |
| Visible | Pancromática | 0,5 mts. |

La Figura 2 muestra las combinaciones RGB Color Real e Infrarrojo Color de la imagen GeoEye-1 en el sistema SONCOR.

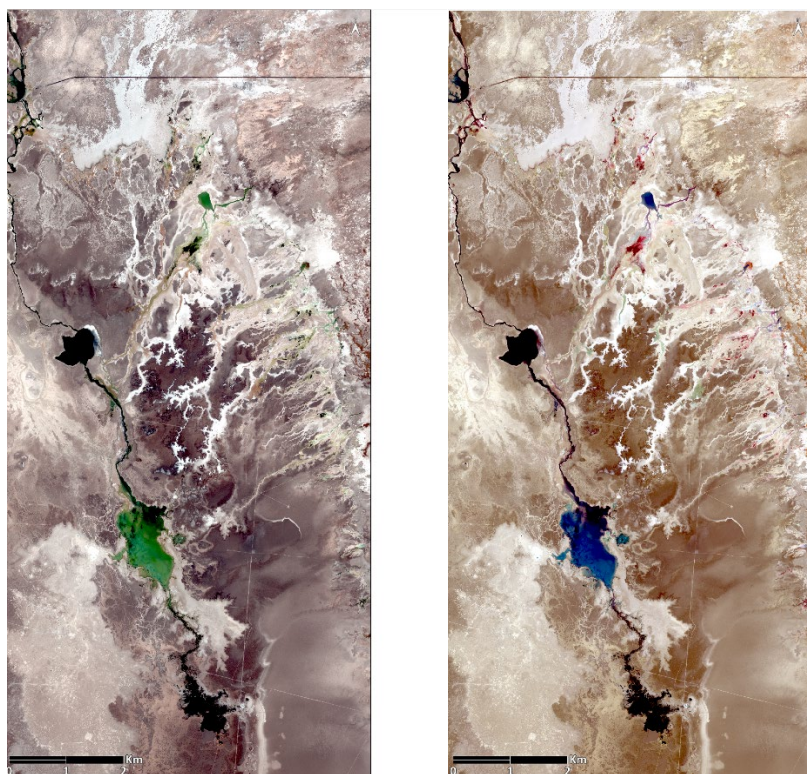


Figura 2: Imagen GeoEye-1 Color Real (izquierda) e Infrarrojo Color (derecha) del sistema SONCOR.

El procesamiento se realizó utilizando ENVI 5.7 (NV5 Geospatial), software especializado en procesamiento de imágenes aéreas y satelitales. La confección de mapas se realizó en el software QGIS 3.22.

4.3. PARÁMETROS PARA CARACTERIZAR EL ESTADO Y EVOLUCIÓN DE LAS VARIABLES AMBIENTALES

El parámetro considerado para caracterizar el estado y evolución de las lagunas es la medición de superficie. De acuerdo a lo señalado en la RCA N°226/2006, la superficie debe ser determinada sobre la base de imágenes satelitales y, según complementa la resolución N°244/2010, la delimitación de los bordes de cada laguna se apoyará en la información generada en terrenos sobre la base de puntos de control.

4.4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS

La medición de las superficies lacustres se realizó según la metodología establecida en la Resolución exenta N°244/2010, a partir de imágenes de alta resolución espacial, aplicándose índices y transformaciones espectrales, posterior a la fusión de la imagen pancromática con la imagen multispectral.

La Figura 3 resume la metodología del procesamiento de las imágenes satelitales. La fusión pancromática implica el remuestreo de la imagen multispectral de 2 metros de resolución por píxel a 0,5 metros de resolución utilizando la banda Pancromática. En los siguientes apartados se detallará cada paso de la metodología utilizada. Debido a que se crean cuerpos de agua provenientes de diferentes índices (clasificación de umbrales) antes de vectorizarlos se realiza una fusión de clases para que unificar el nombre de la clase “agua”.

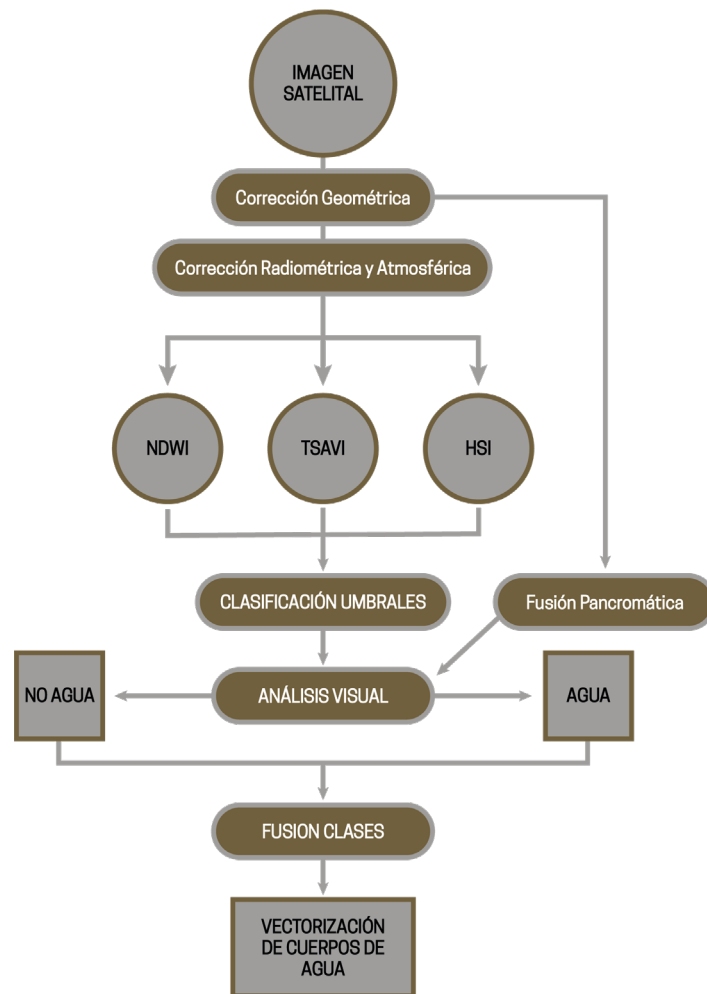


Figura 3: Metodología para la clasificación de cuerpos de Agua. Elaboración Propia.

4.5.1. Análisis de Imágenes Satelitales

Se realizó la solicitud de captura de una imagen satelital de alta resolución para el mes de julio de 2023 por la constelación de satélites de la compañía MAXAR, obteniéndose una imagen GeoEye-1 del día 10 de julio. Las características de esta imagen se encuentran en la Tabla 2. La imagen satelital se procesó bajo el sistema de coordenadas UTM WGS84 Zona 19 Sur. Mediante el uso del software especializado (ENVI 5.7) se calcularon de índices espectrales NDWI y TSAVI además de la transformación IHS (Intensity Hue Saturation / Intensidad Tono Saturación).

4.5.1.1 Corrección Geométrica

La corrección geométrica corresponde a la ortorectificación de la imagen satelital, lo cual corrige las deformaciones por sensor y por topografía, para llevar a cabo este proceso se utilizan parámetros de la imagen que vienen incluidos en su metadata y un modelo digital de elevación (para este preprocesamiento se empleó el DEM Alos-Palsar).

4.5.1.2 Corrección Radiométrica y Atmosférica

Los índices espectrales son concebidos considerando la forma de la curva espectral obtenida en laboratorio mediante un espectro radiómetro que mide la reflectancia de dicho material en distintas longitudes de onda, es por esto, que la imagen satelital debe corregirse para convertir los datos originales a un formato de reflectancia a la superficie de la tierra.

a. Radiancia

Las imágenes satelitales vienen en un formato numérico denominado niveles “DN” (Digital Number). El valor del píxel en este formato contiene información del material en la superficie de la tierra (agua, vegetación, suelo u otro), la influencia de la atmósfera y de las compensaciones predefinidas por el sensor. Este dato debe transformarse a unidades de energía reflejada (radiancia) mediante una corrección radiométrica.

La corrección radiométrica elimina los parámetros preestablecidos de ganancia y pérdida del sensor, por lo tanto, se generan datos comparables entre distintos sensores. Tras esta corrección las imágenes se convierten de DN a Radianza (o Radiancia) que es el flujo radiante que se refleja desde el suelo hacia el sensor, se mide en $W/(m^2 sr^1 \mu m)$ y es la magnitud que detecta el sensor.

La radiancia espectral se calcula a partir de los parámetros específicos entregados por el proveedor y que se encuentran en los metadatos de los archivos de la imagen satelital. Krauss (2003) definió la siguiente ecuación para aplicar estas correcciones:

$$L_{\lambda}(x, y) = \frac{K_{\lambda} \cdot ND_{\lambda}(x, y)}{\Delta_{\lambda}}$$

Donde:

$L_{\lambda}(x, y)$: es la radiancia espectral recibida por el sensor ($W/(m^2 sr \mu m)$)

K_{λ} : son los niveles digitales de pixeles de la imagen satelital.

$ND_{\lambda}(x, y)$: es el factor absoluto de calibración radiométrica ($W/m^2 sr$)

Δ_{λ} : es el ancho de banda efectivo (μm)

b. Reflectancia

Adicionalmente, debido a que los datos radiométricos contienen información de la superficie terrestre como de la atmósfera, se requiere aplicar una corrección que minimice estos efectos de la energía reflejada e incidente en los valores de cada píxel para obtener una imagen de reflectancia superficial, este proceso se denomina corrección atmosférica.

La corrección atmosférica elimina los efectos de la atmósfera en los datos, en este formato los datos (curvas espectrales de los pixeles) son comparables con curvas espectrales de laboratorio. Tras esta corrección las imágenes se convierten de Radiancia a Reflectancia (o Reflectancia Relativa).

La Figura 4 resume el esquema de datos de la imagen y las correcciones necesarias.

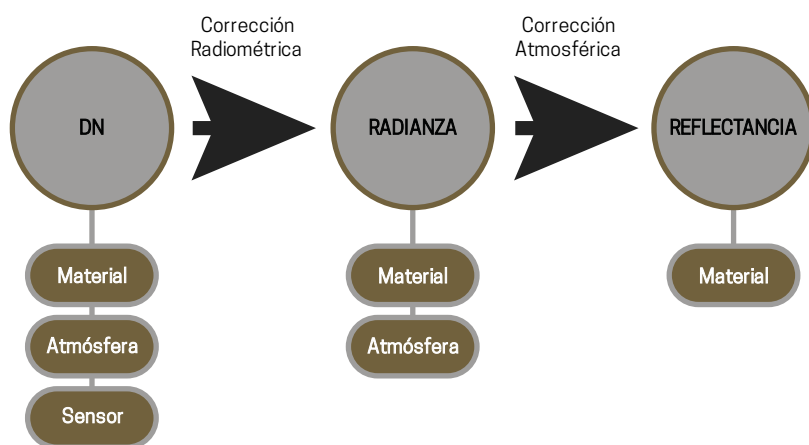


Figura 4: Formato de datos en imágenes satelitales y sus correcciones. Elaboración Propia.

4.5.1.3 Fusión de la Imagen

Para mejorar la resolución espacial de la imagen multispectral obtenida desde el satélite y con el fin de obtener un mayor detalle de información se realiza un proceso denominado “Spectral PanSharpening” que mejora la resolución espacial de una imagen multispectral utilizando la banda pancromática. Este producto se utiliza como apoyo para el análisis visual (Figura 5).

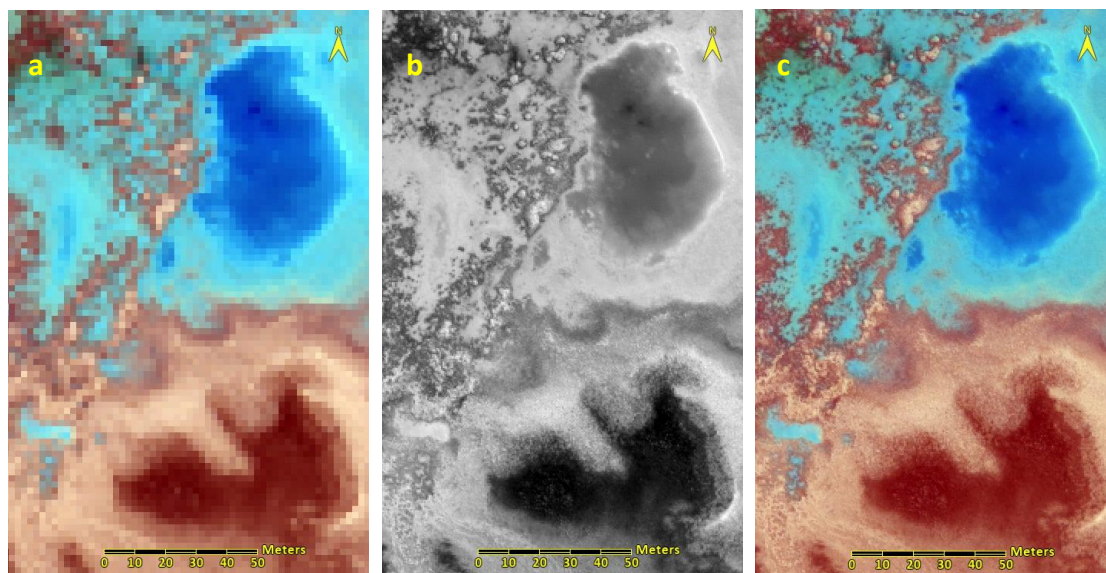


Figura 5: **(a)** Combinación RGB Infrarrojo Color de la imagen multispectral original (resolución de 2 metros), **(b)** Imagen Pancromática original con resolución de 0,5 metros y **(c)** Combinación RGB Infrarrojo Color de la imagen Multispectral fusionada con la banda Pancromática. Elaboración Propia.

4.5.1.4 Índices Espectrales

Para el mapeo y delimitación de las superficies lacustres se utilizaron los siguientes índices espectrales: Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (TSAVI) y la transformación IHS, los que se detallan a continuación.

a. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

El NDWI (Normalized Difference Water Index) (McFeeters, 1996) maximiza la respuesta de las características espectrales del agua al usar la longitud de onda correspondiente al verde (550 nm, valores de reflectancia altos para el agua) y la baja reflectancia del agua en el NIR (850 nm, infrarrojo cercano). El algoritmo del NDWI es el siguiente:

$$NDWI = \frac{(VERDE - NIR)}{(VERDE + NIR)}$$

Donde:

VERDE : Reflectancia de la imagen en el rango espectral verde

NIR : Reflectancia de la imagen en el rango espectral infrarrojo cercano

Este índice normalizado entrega valores acotados para los píxeles entre -1 y 1. Como la reflectancia del agua en la banda verde debe ser mayor a la de la banda NIR, los valores mayores a cero podrían ser considerados a la hora de clasificar el agua con este índice, sin embargo, debido a la mezcla de reflectancia del agua con el suelo en cuerpos más someros, podrían considerarse valores menores a cero (pero cercanos a cero) como coberturas de agua, en otras palabras, el agua al tener una reflectancia del verde mayor a la del infrarrojo

cercano, el índice debería entregar valores positivos para el agua (por el algoritmo VERDE-NIR), pero las sales y el suelo tienen el infrarrojo cercano mayor al verde, entonces al mezclarlos espectralmente podemos considerar valores negativos para agua en zonas someras.

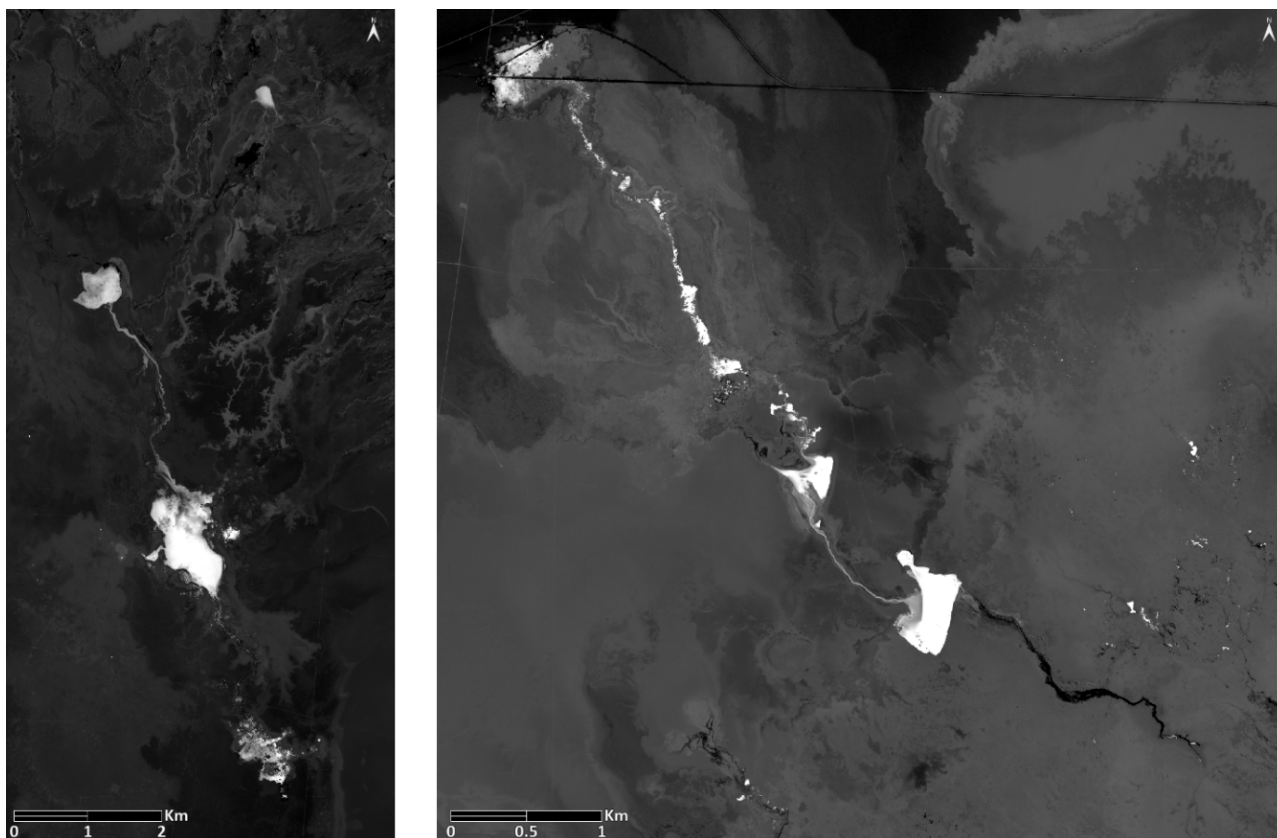


Figura 6: NDWI en SONCOR (izquierda) y PEINE (derecha). Elaboración Propia.

b. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Transformado (TSAVI)

El TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index) (Baret, 1989) pertenece a una familia de índices que modifican el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) cuyo objetivo es minimizar al máximo los efectos del suelo sobre la vegetación utilizando valores relacionados a la línea del suelo en los píxeles de la imagen (Gilbert, 1997). El índice TSAVI se define por la siguiente ecuación:

$$TSAVI = \frac{a \cdot (NIR - a \cdot ROJO - b)}{ROJO + a \cdot NIR - ab + 0,08 \cdot (1 + a^2)}$$

Donde:

ROJO : es la reflectancia en el rango espectral del rojo

NIR : es la reflectancia en el rango espectral del infrarrojo cercano

a : es la pendiente de la línea del suelo

b : es la intersección de la línea del suelo con el eje Y

La Figura 7 muestra un ejemplo de un gráfico de dispersión de los píxeles al graficar en el eje X la banda NIR y en el eje Y la banda roja, la línea del suelo corresponde a la tendencia de los píxeles que corresponden a suelo (valores similares en X e Y). Conociendo la ecuación de esta línea se pueden obtener los valores a y b.

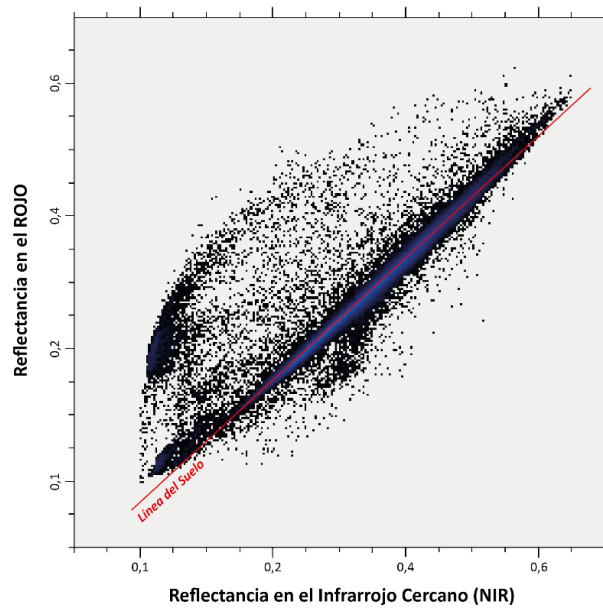


Figura 7: Línea del Suelo y Diagrama de dispersión de los pixeles para las bandas NIR (eje X) y Roja (eje Y)

La Figura 8 muestra los diagramas de dispersión del suelo en las bandas NIR (eje X) y ROJA (eje Y) para cada área de estudio (SONCOR y PEINE) a partir de los cuales se calcularon los valores de a y b para la generación del TSAVI.

Este índice se utiliza como complemento del método expuesto anteriormente en los sectores donde no se observa un borde definido de los cuerpos de agua, dado que para algunas configuraciones presenta un mejor contraste entre suelo y agua. Esto deriva en que no se define un valor específico para distinguir entre suelo y agua, sino que se utiliza como herramienta visual para la determinación de los bordes difusos.

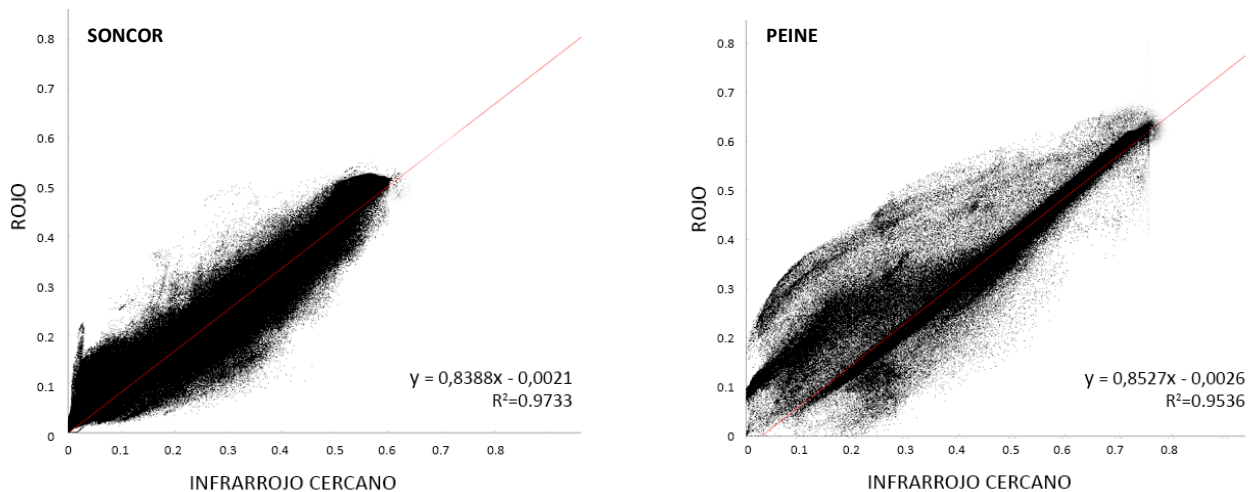


Figura 8: Diagramas de dispersión para pixeles de suelo (Eje X: NIR; Eje Y: ROJO) para los sistemas SONCOR y PEINE

Basado en la ecuación de la línea de tendencia (regresión lineal simple) de cada diagrama (Figura 8), se extraen los parámetros a y b para el cálculo del TSAVI para cada sistema (Tabla 3). La Figura 9 muestra los índices TSAVI para los dos sistemas.

Tabla 3: Factores a y b para el cálculo del TSAVI

| SISTEMA | Factor a | Factor b |
|---------|----------|----------|
| SONCOR | 0.8388 | - 0.0021 |
| PEINE | 0.8527 | -0.0026 |

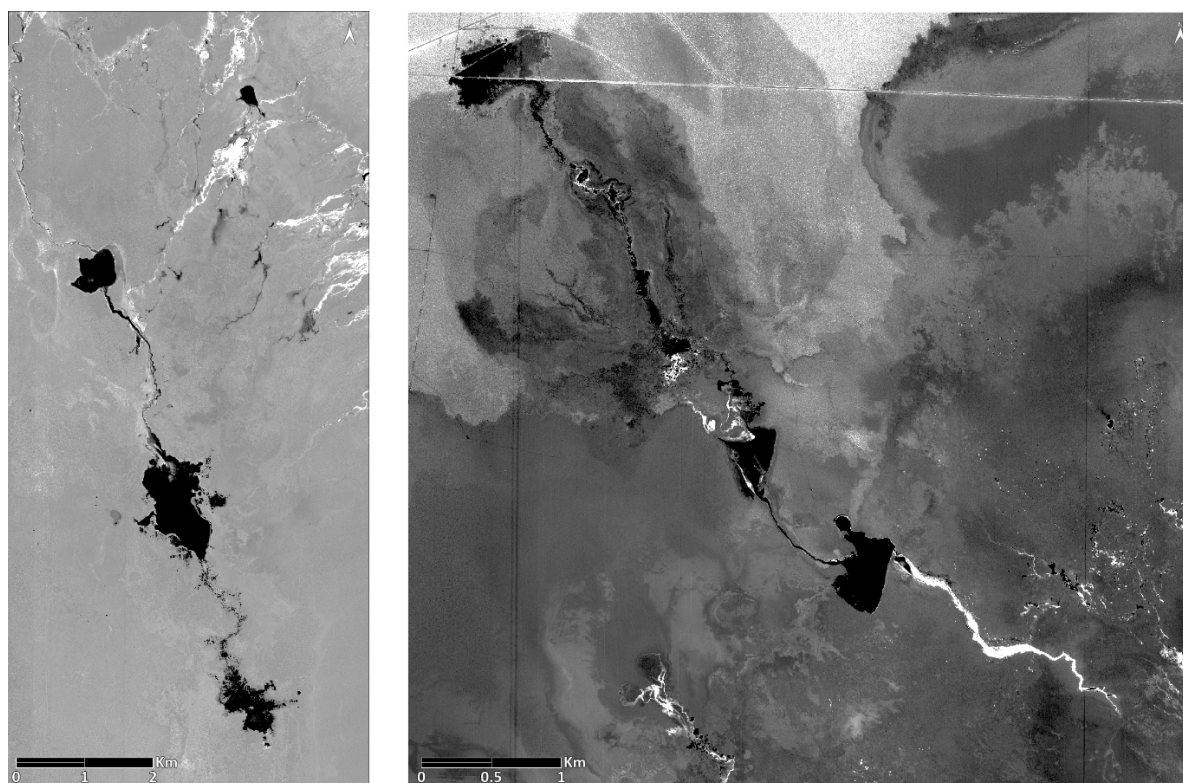


Figura 9: TSAVI en SONCOR (izquierda) y PEINE (derecha). Elaboración Propia.

c. Transformación IHS

Este proceso transforma los valores de una composición de bandas RGB en una forma alternativa de representar el color, basado en sus propiedades de intensidad, tono y saturación (IHS por sus siglas en inglés: Intensity, Hue & Saturation). Su utilidad para la identificación se basa en su potencialidad para la discriminación de algunos rasgos de carácter cromático (Chuvienco, 2002). Al igual que el TSAVI, esta transformación se utiliza para complementar el mapeo con el índice NDWI en sectores donde el borde es difícil de determinar y donde esta transformación presenta una mayor diferencia entre suelo y agua.

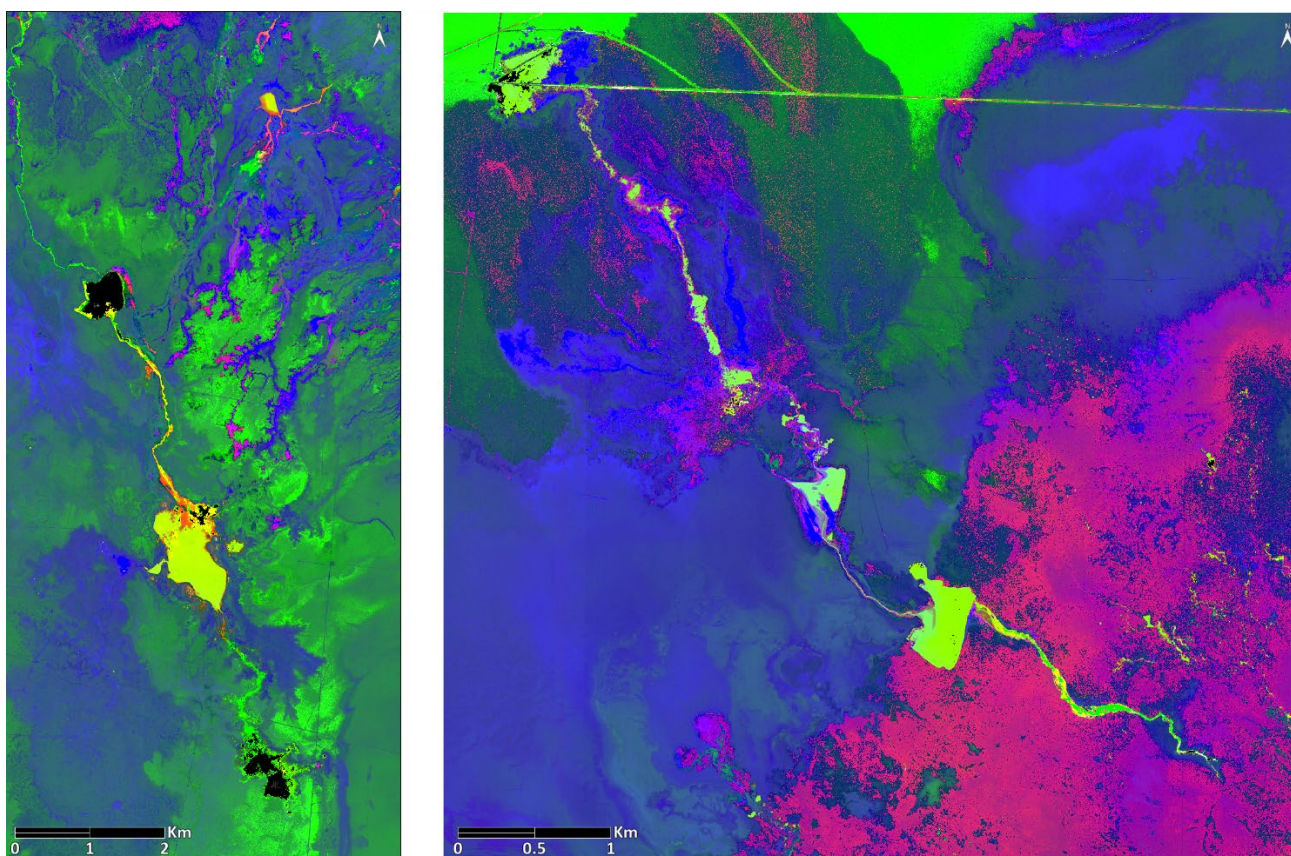


Figura 10: Transformación HSI en RGB en SONCOR (izquierda) y PEINE (derecha). Elaboración Propia.

4.5.2. Contornos de las Lagunas

El mapeo de los cuerpos de agua se realizó mediante una reclasificación de los valores calculados para el índice NDWI, esta consiste en seleccionar un umbral dentro del histograma del índice que corresponda a superficies lacustres identificadas visualmente en la imagen satelital. El resultado de este mapeo obtiene un producto en formato ráster con una resolución de 2 x 2 metros. Posteriormente mediante inspección visual y con ayuda del índice TSAVI y la transformación IHS (Intensidad, Tono y Saturación) se ajusta la clasificación en los sectores con bordes poco definidos. De esta manera el índice TSAVI y las transformaciones IHS se utilizaron sólo donde el índice NDWI no fue suficiente para el mapeo de cuerpos de agua.

La Tabla 4 resume los umbrales utilizados para cada sistema de lagunas. N/A implica que no se utilizó el índice para el mapeo de las lagunas.

Tabla 4: Umbrales utilizados con los índices NDWI, TSAVI e IHS. Elaboración Propia.

| SISTEMA | NDWI | TSAVI | SATURACIÓN | INTENSIDAD |
|---------|---------|--------|------------|------------|
| SONCOR | ≥ -0.10 | ≤ 0.05 | ≤ N/A | ≥ N/A |
| PEINE | ≥ -0.15 | ≤ 0.10 | ≤ N/A | ≥ N/A |

El análisis para cada laguna se realizó en un área predeterminada que abarca la laguna completa y otros cuerpos de agua, no obstante, el área mapeada para cada laguna sólo considera los límites establecidos por CONAF. La Figura 11 muestra el corte realizado a la imagen satelital para el cálculo de los índices espectrales.

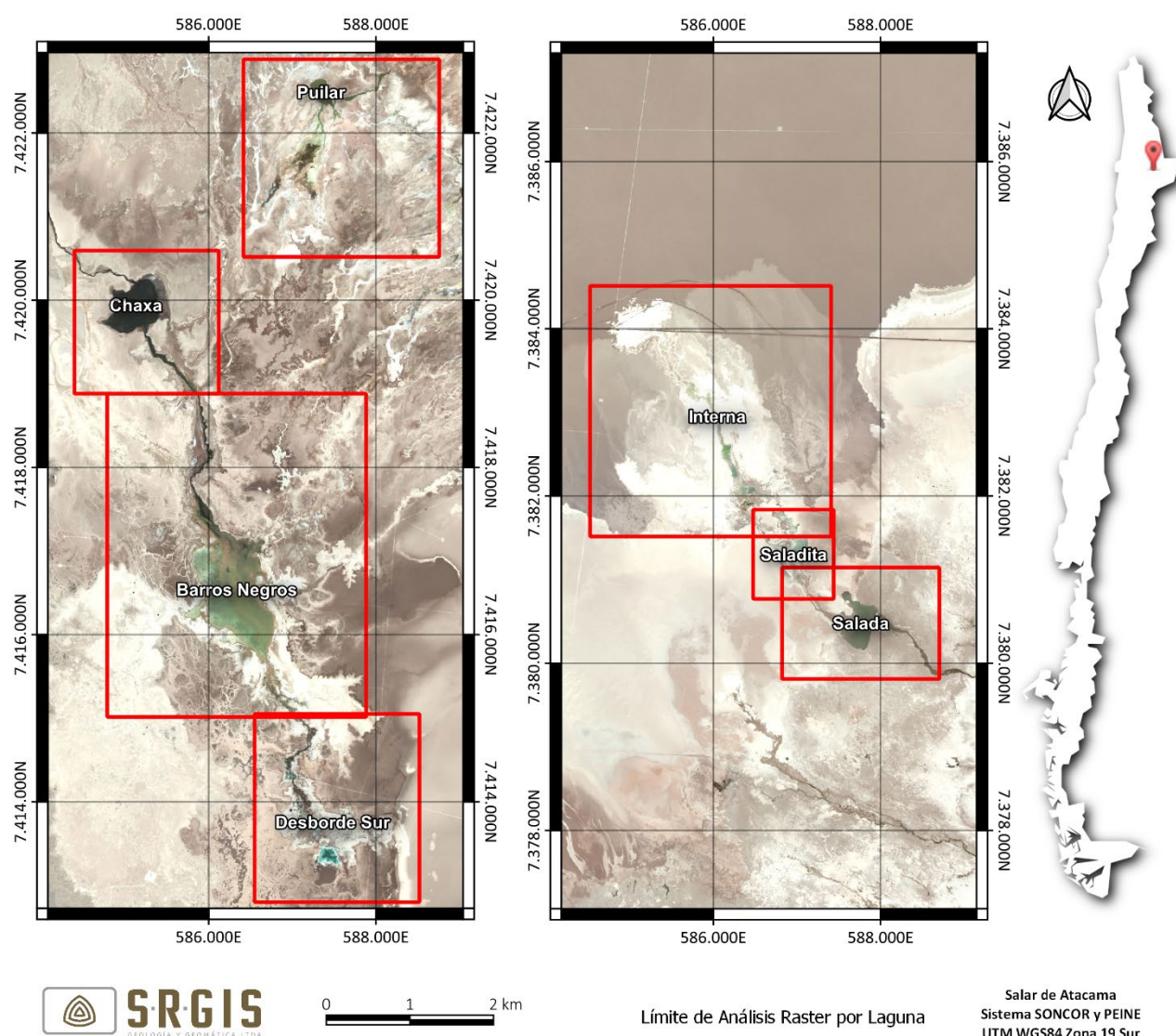


Figura 11: Límites de análisis ráster para cada laguna en los sistemas SONCOR y PEINE.

4.5.3. Límites Oficiales de las Lagunas para el Cálculo de Superficies

Para efectos de la medición de las superficies, la delimitación consideró la definición de límites de cada laguna según criterios de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), expuestos en los informes de monitoreo efectuados dentro del marco del convenio SQM-CONAF "Hábitat y Poblaciones de Avifauna del Salar de Atacama" y por límites presentados en informes previos (informe año 2009 y año 2010) que han sido

aprobados mediante una mesa de trabajo compuesta por el titular y por distintas autoridades tales como CONAMA, CONAF, DGA y SAG y que se han mantenido hasta la fecha. Estos límites o zonas son empleados para diferenciar el cuerpo de la laguna, de los canales de entrada y salida por donde fluye el agua, con la finalidad de tener una superficie definida y comparable entre distintos años.

La Tabla 5 y la Tabla 6 muestran las coordenadas Este y Norte (WGS84 19 Sur) de los vértices de las líneas que limitan cada laguna, así como la entidad que definió dichos límites. La Figura 12 y la Figura 13 muestran los límites sobre la imagen.

Tabla 5: Vértices de las líneas que delimitan los límites de cada laguna En el sistema SONCOR

| Sistema | Laguna | Vértice | Este | Norte | Definición |
|---------|---------------|---------|---------|-----------|----------------------|
| SONCOR | Chaxa | V 1.1 | 585.074 | 7.420.189 | CONAF |
| | | V 1.2 | 585.116 | 7.420.185 | CONAF |
| | | V 1.3 | 585.220 | 7.420.296 | CONAF |
| | | V 2.1 | 585.203 | 7.419.607 | CONAF |
| | | V 2.2 | 585.302 | 7.419.607 | CONAF |
| | Barros Negros | V 1.1 | 585.821 | 7.417.181 | CONAF |
| | | V 1.2 | 586.146 | 7.417.405 | CONAF |
| | | V 2.1 | 586.497 | 7.415.766 | CONAF |
| | | V 2.2 | 586.740 | 7.415.795 | CONAF |
| | | V 3.1 | 586.784 | 7.416.689 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 3.2 | 586.750 | 7.416.465 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 4.1 | 585.751 | 7.416.340 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 4.2 | 585.663 | 7.416.166 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 5.1 | 586.438 | 7.415.838 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 5.2 | 586.535 | 7.415.801 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | Puilar | V 1.1 | 587.523 | 7.422.529 | CONAF |
| | | V 1.2 | 587.523 | 7.422.331 | CONAF |
| | | V 2.1 | 587.411 | 7.422.279 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 2.2 | 587.534 | 7.422.278 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 3.1 | 587.331 | 7.422.342 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 3.2 | 587.369 | 7.422.340 | Mesa de Trabajo 2010 |

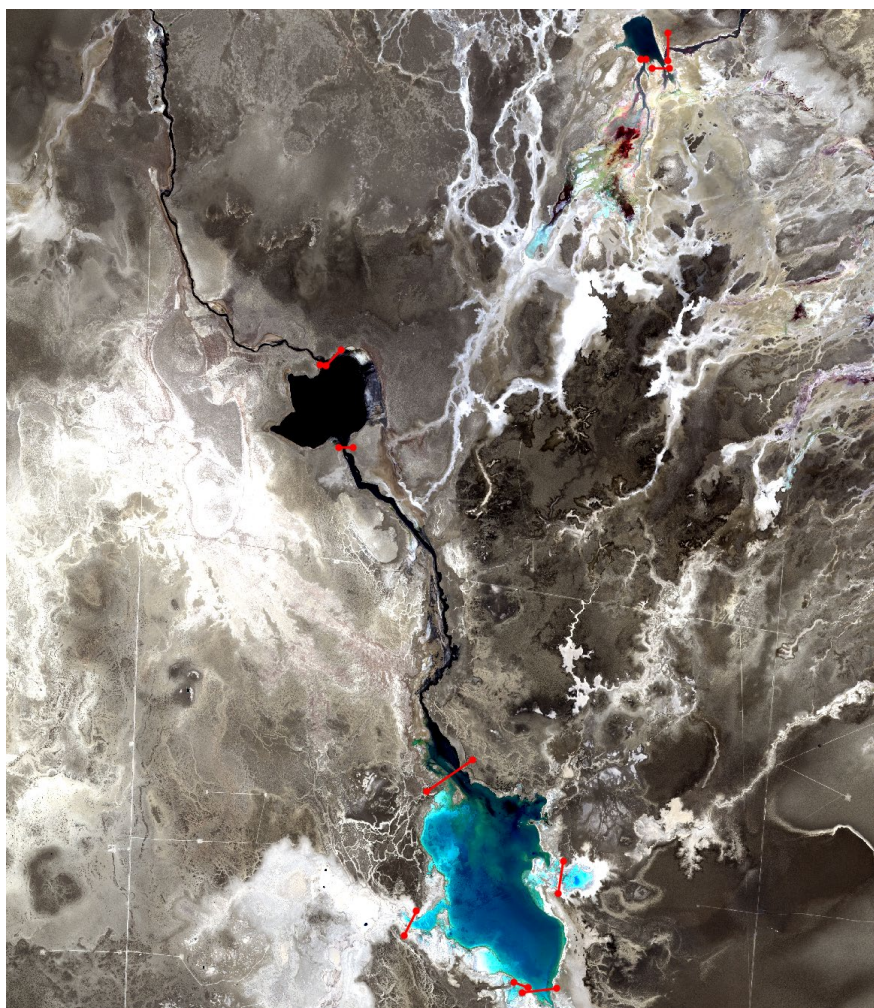


Figura 12: Límites de las lagunas en el sistema SONCOR

Tabla 6: Vértices de las líneas que delimitan los límites de cada laguna Enel sistema PEINE

| Sistema | Laguna | Vértice | Este | Norte | Definición |
|---------|-------------------------|---------|---------|-----------|----------------------|
| PEINE | Salada | V 1.1 | 587.155 | 7.380.528 | CONAF |
| | | V 1.2 | 587.494 | 7.380.642 | CONAF |
| | | V 2.1 | 588.291 | 7.380.247 | CONAF |
| | | V 2.2 | 588.428 | 7.380.416 | CONAF |
| | | V 3.1 | 587.959 | 7.380.591 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 3.2 | 587.970 | 7.380.610 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 4.1 | 587.576 | 7.380.512 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 4.2 | 587.576 | 7.380.551 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | Laguna | Vértice | Este | Norte | Definición |
| PEINE | Saladita | V 1.1 | 586.795 | 7.381.626 | CONAF |
| | | V 1.2 | 587.096 | 7.381.620 | CONAF |
| | | V 2.1 | 586.610 | 7.381.448 | CONAF |
| | | V 2.2 | 586.720 | 7.381.473 | CONAF |
| | | V 3.1 | 587.015 | 7.380.917 | CONAF |
| | | V 3.2 | 587.167 | 7.380.918 | CONAF |
| | Desborde Laguna Interna | V 1.1 | 586.791 | 7.381.997 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 1.2 | 586.785 | 7.381.938 | Mesa de Trabajo 2010 |

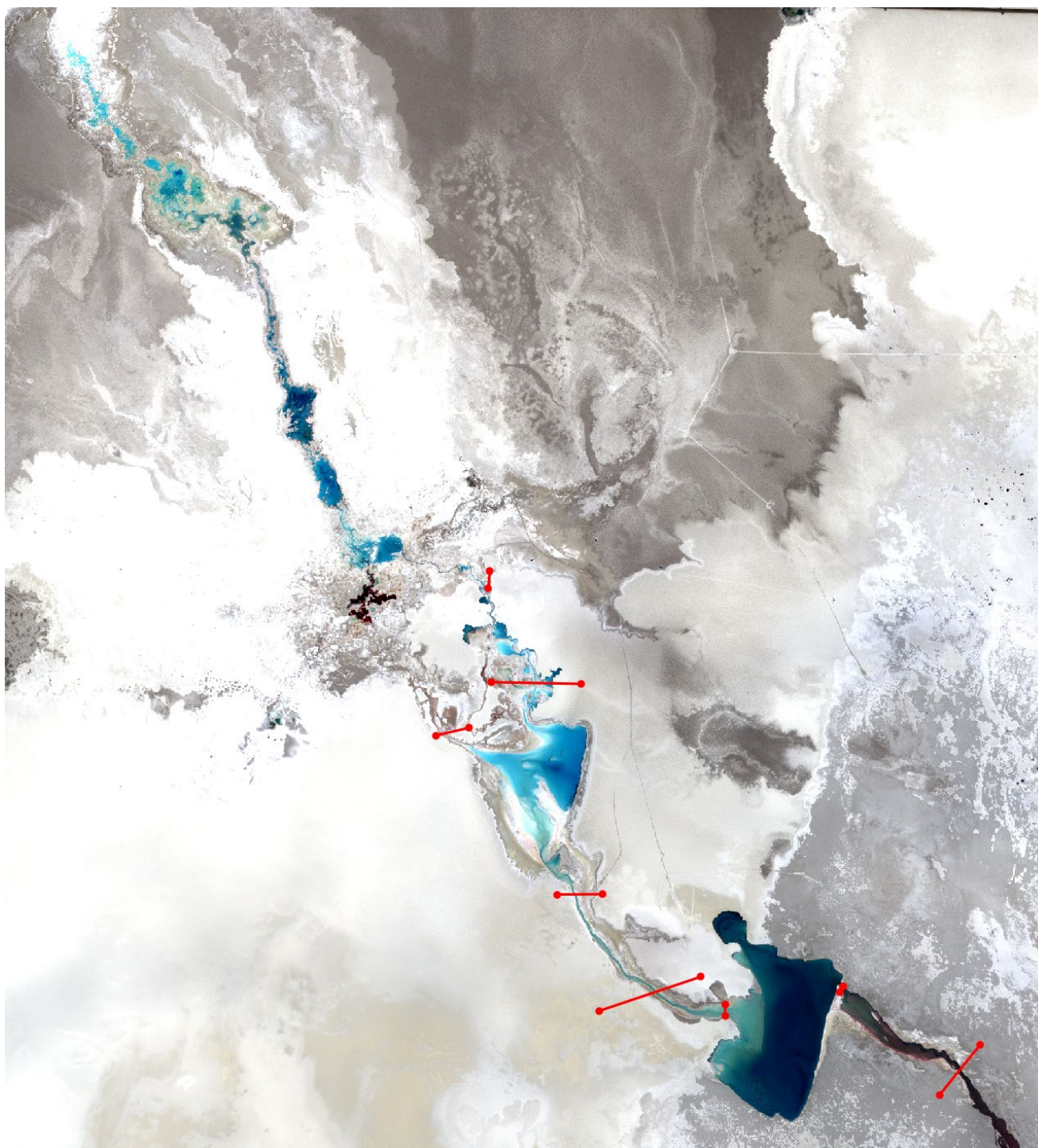


Figura 13: Límites de las lagunas en el sistema PEINE

5. PUNTOS DE CONTROL

El seguimiento de la variable cobertura lagunar que tiene comprometido SQM se basa en varias técnicas en base a la RCA 226/2006 y complementado posteriormente según la RES. EX. N°244/2010 de la COREMA de la Región de Antofagasta. Una de ellas corresponde al análisis abordado en el presente informe y que se basa en el cálculo de índices mediante el uso de una imagen satelital de alta resolución. Pero también se realiza, en el marco del seguimiento ambiental recogido también en la RCA 226/2006, la medición mediante estacas perimetrales con frecuencia trimestral (según lo estipulado en el convenio SQM-CONAF de 2004) y el

levantamiento topográfico de los bordes de los cuerpos lagunares, lo que se llama también RTK, este último se realiza cada 5 años.

La metodología de la medición con estacas perimetrales consiste en medir desde la estaca la distancia más cercana hacia el cuerpo de agua en el caso de que la estaca se encuentre fuera del agua, o de manera inversa la distancia más cercana desde la estaca al contacto agua-salar. Para el período de julio 2023 se realizó una campaña de toma de puntos de control específica además de control de estacas perimetrales.

Para esta campaña se proporcionaron puntos de control para los cuerpos de agua en ambos sistemas lagunares, donde se indica la coordenada específica del punto de control, la cota y observaciones sobre la presencia y espesor de cuerpos de agua; se adjunta también una fotografía orientada y videos el 360° para tener una idea de la situación en terreno y poder mejorar el análisis de la imagen satelital; este trabajo fue realizado por la consultora ATyGeo los días 11 de julio para Chaxa, 12 de julio para Puilar, 18 y 19 de julio para Barros Negros, 20 y 21 de julio para Desborde Sur, 29 de julio para Salada, 30 de julio para Saladita, y 31 de julio para Desborde Laguna Interna.

6. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados del mapeo de las superficies lacustres de las lagunas de los sistemas SONCOR y PEINE para el período julio 2023.

5.1 Sistema SONCOR

A partir del año 2016 se incorporó en las mediciones de superficie el área denominada “Desborde Sur”. Aunque no corresponde estrictamente a una laguna, al día de hoy se considera en la reportabilidad lagunar.

La Tabla 7 resume los resultados del mapeo de superficies de los cuerpos de agua en el Sistema SONCOR.

Tabla 7: Medición de superficies lagunares en el sistema SONCOR.

| Cuerpo | Superficie (m ²) |
|--|------------------------------|
| Laguna Chaxa | 290.408 |
| Laguna Barros Negros | 972.918 |
| Área de Inundación I (Barros Negros) | 3.295 |
| Área de Inundación II (Barros Negros) | 36.594 |
| Área de Inundación III (Barros Negros) | 15.552 |
| Puilar | 62.496 |
| Desborde Sur | 466.645 |

5.1.1. Laguna Chaxa

Chaxa se encuentra constituida por un cuerpo principal cuyo contorno se encuentra bien definido en la mayor parte de la laguna salvo en el borde este (Playa de Chaxa) donde mediante los índices no es posible una delimitación precisa por lo que los puntos de control se vuelven muy importantes para mejorar la delimitación (Figura 14).

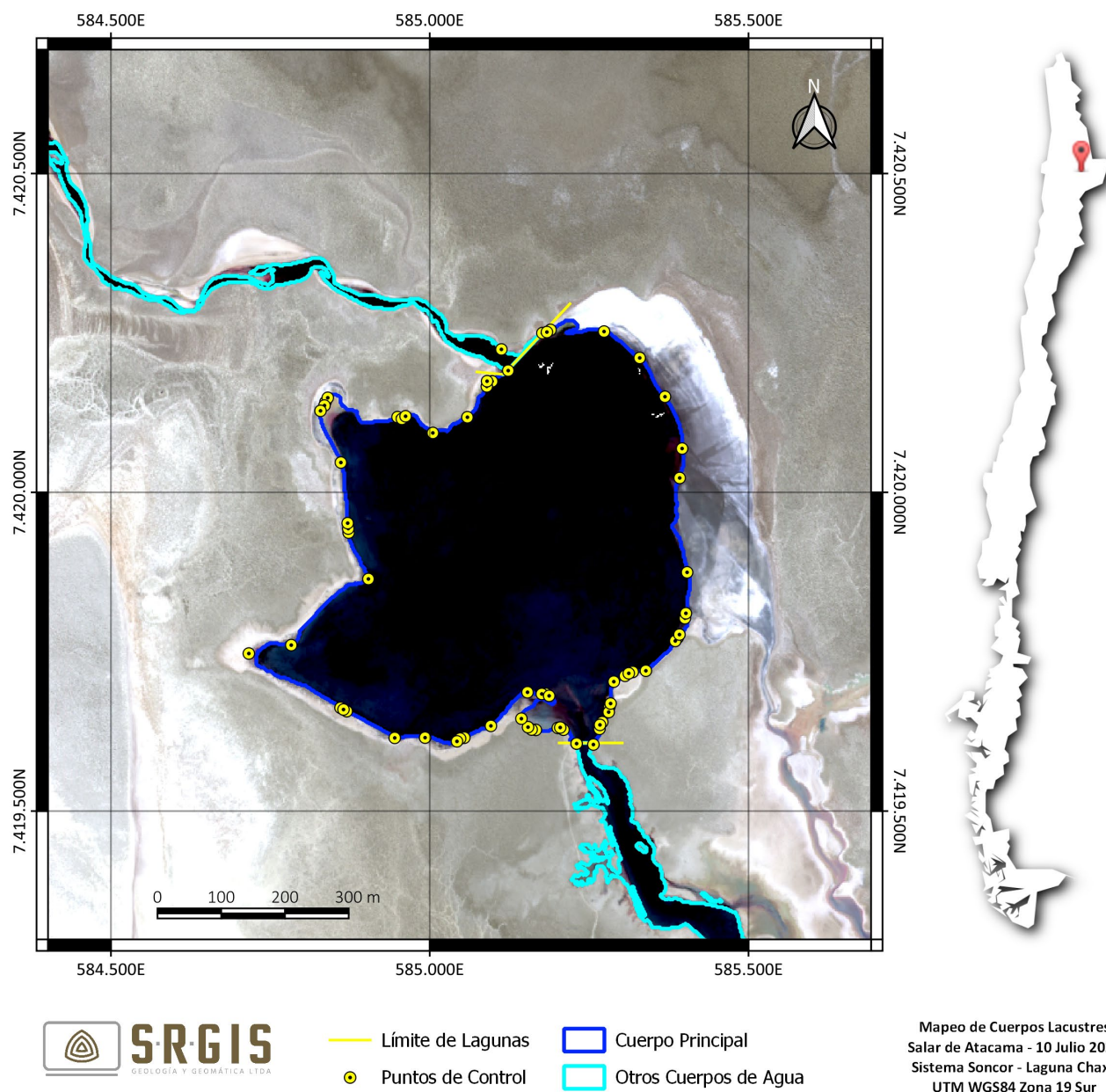


Figura 14: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Chaxa.

5.1.2. Laguna Barros Negros

La Laguna Barros Negros es el cuerpo de agua más grande del sistema SONCOR. Está constituido por un cuerpo principal y tres áreas de inundación, sin contar los cuerpos de agua en “Desborde Sur”. El perímetro del cuerpo principal está bien definido.

El área de inundación I, denominada “Cola de Pez”, se ubica al Oeste de la laguna y fue considerado a partir del límite establecido por la CONAF hacia el Oeste, este año presenta un área bastante pequeña como continuación del cuerpo principal y un pequeño cuerpo más alejado hacia el Oeste (Figura 15). Se consideraron también otras áreas de inundación que corresponden a las “Área de Inundación II”, al este de la laguna y “Área de Inundación III” al sur de la laguna.

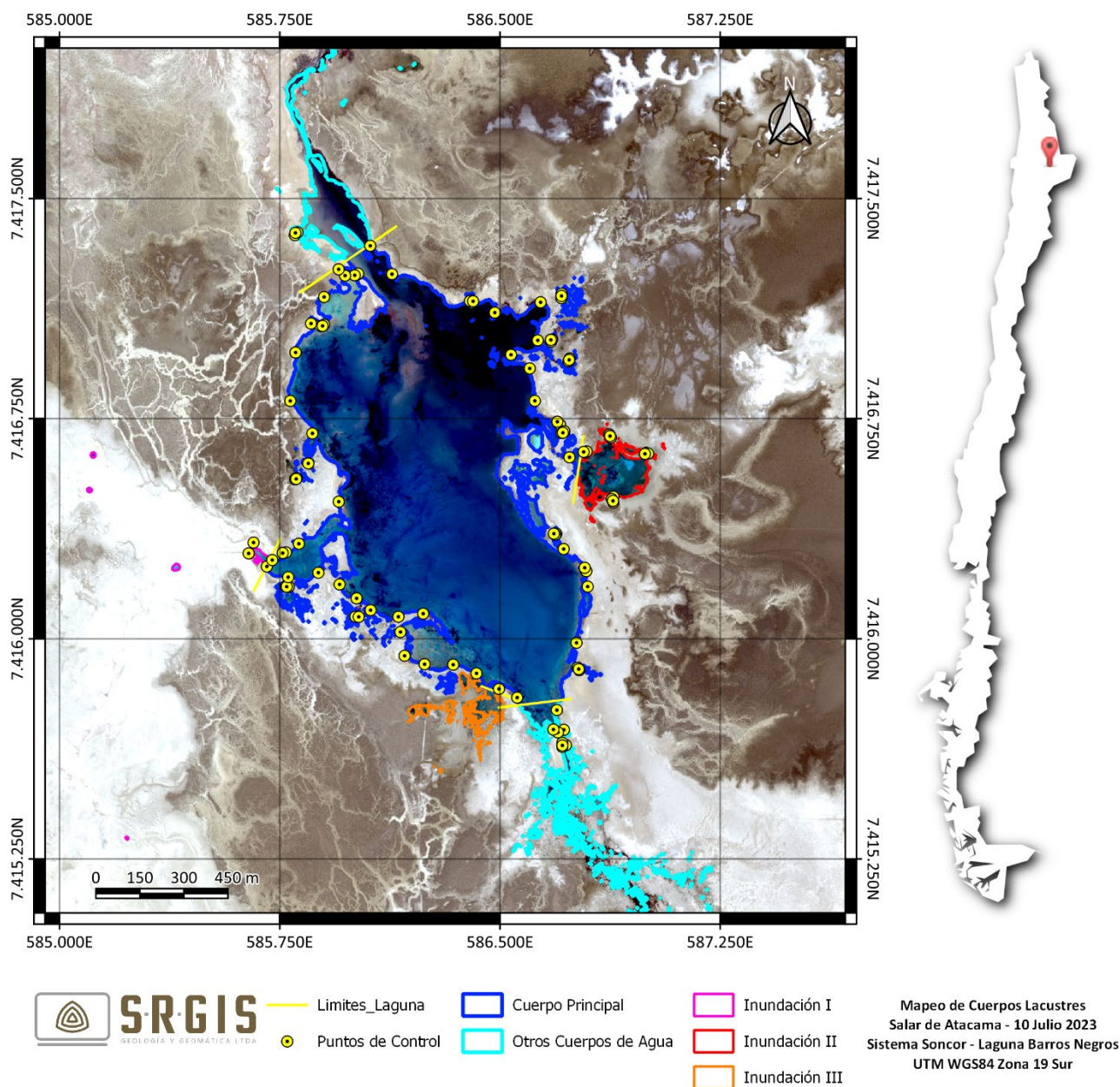


Figura 15: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Barros Negros.

5.1.3. Laguna Puilar

La laguna Puilar tiene un cuerpo principal bien definido pero su delimitación mediante los índices espectrales no es muy precisa, por lo que se vuelven importantes los puntos de control obtenidos en la laguna, así como por los puntos de control de las estacas del canal que se conecta por el Este al cuerpo principal. Mediante la observación de las tonalidades en las distintas combinaciones de banda se puede delimitar de mejor manera el cuerpo principal de esta laguna. (Figura 16).

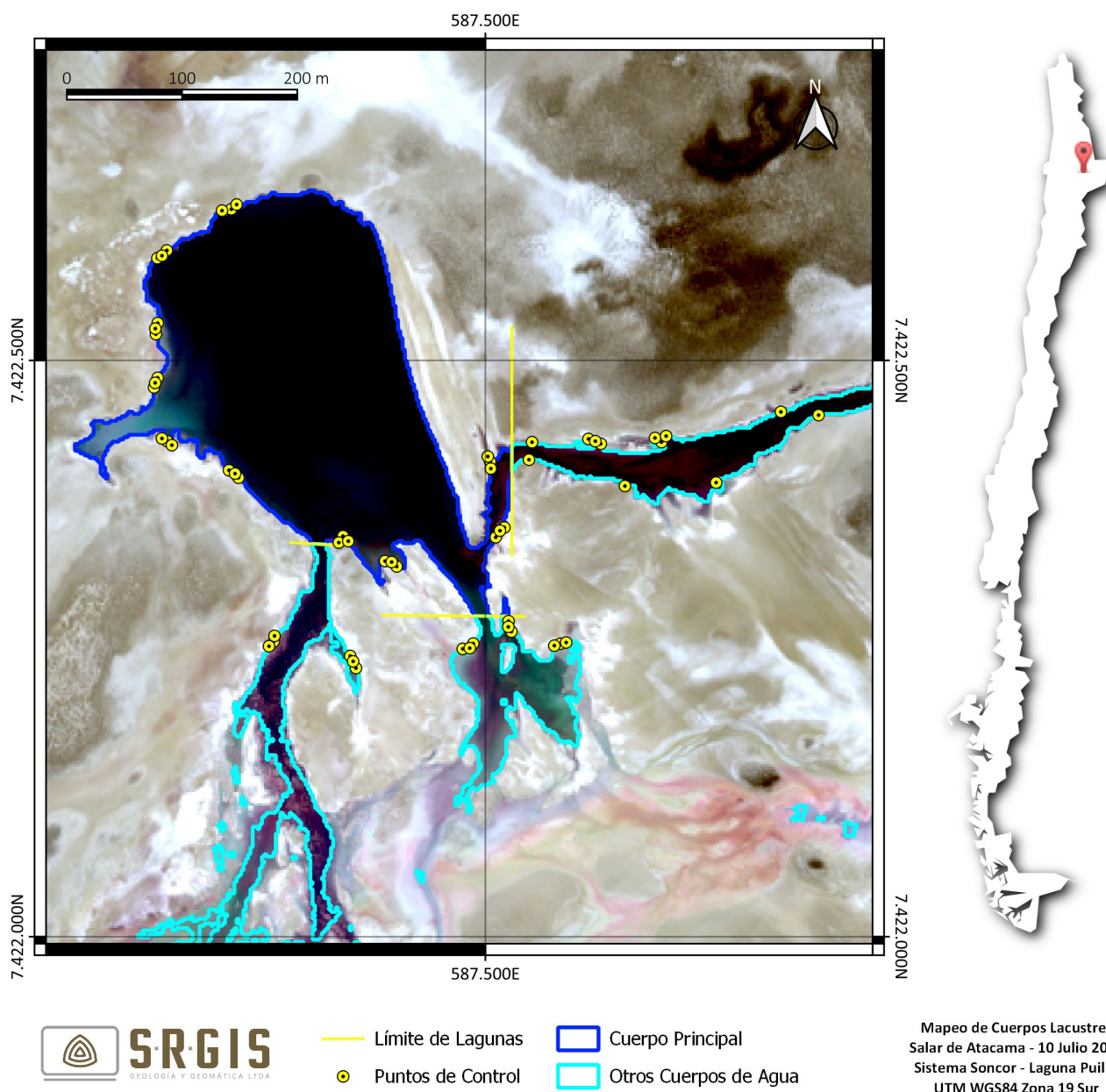


Figura 16: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Puilar.

5.1.4. Desborde Sur

Este cuerpo de agua fue incorporado al control y monitoreo desde el año 2016, corresponde a un cuerpo que se origina como desborde de la laguna Barros Negros, aunque no corresponde a una unidad regular (permanente) como las lagunas Chaxa, Barros Negros y Puilar. En general se observan numerosos cuerpos bien definidos pero cuyo límite es de difícil determinación (Figura 17).

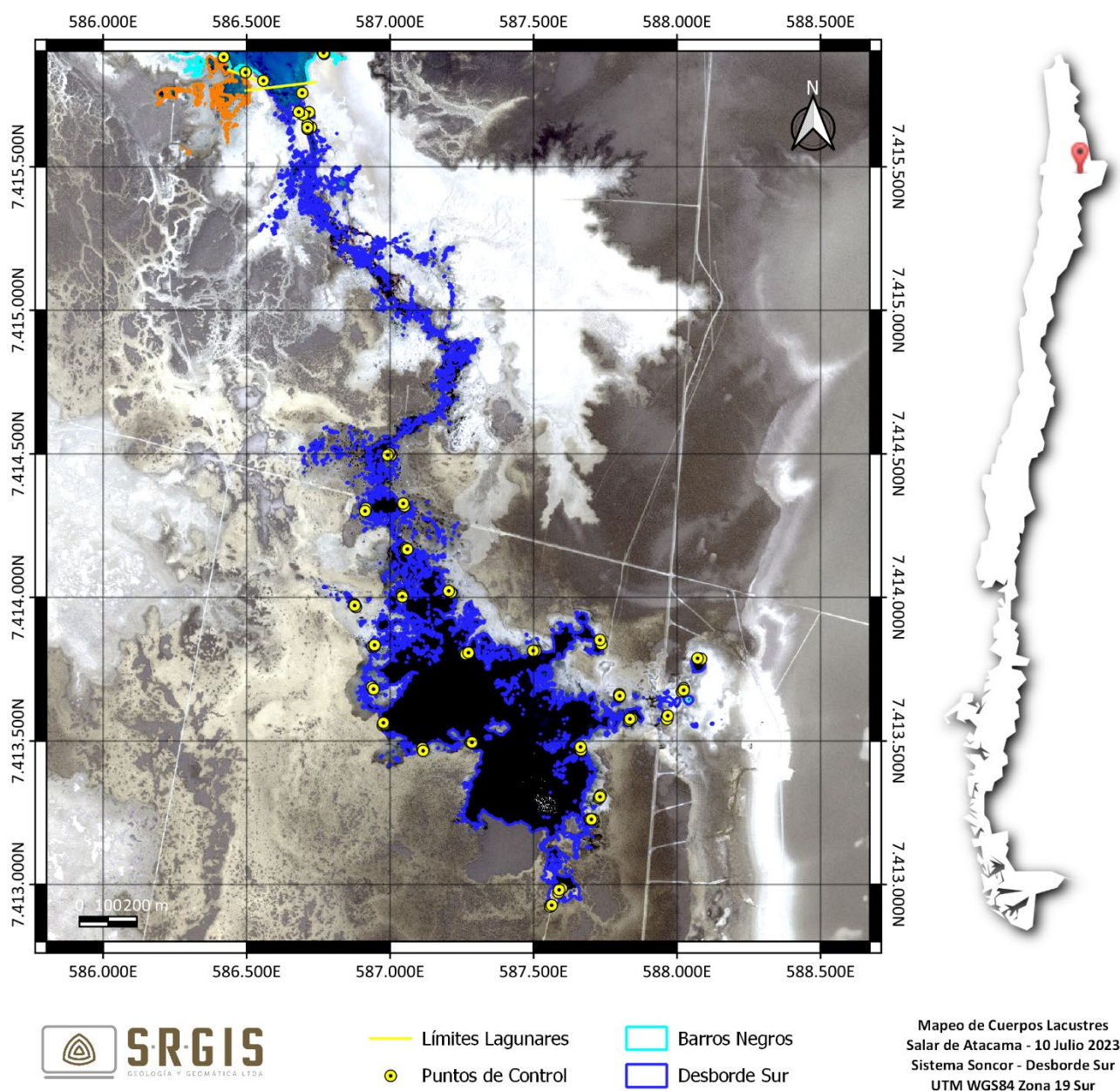


Figura 17: Mapeo de Cuerpos de Agua en Desborde Sur.

5.2 Sistema PEINE

El sistema PEINE está compuesto por las lagunas Salada, Saladita y Desborde Laguna Interna, la Tabla 8 presenta los resultados obtenidos para el mapeo de los cuerpos de agua en este sistema.

Tabla 8: Medición de superficies lagunares en el sistema PEINE.

| Cuerpo | Superficie (m²) |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Salada | 171,083 |
| Canal de Recarga (Salada) | 22.452 |
| Canal de Descarga (Salada) | 4.117 |
| Saladita | 83.627 |
| Desborde Laguna Interna | 209.042 |

5.2.1. Laguna Salada

La laguna Salada está compuesta por un cuerpo principal y 2 canales superficiales. El cuerpo principal muestra contornos bien definidos, a diferencia de los canales de recarga y descarga que tiene límites un poco más difusos (Figura 18).

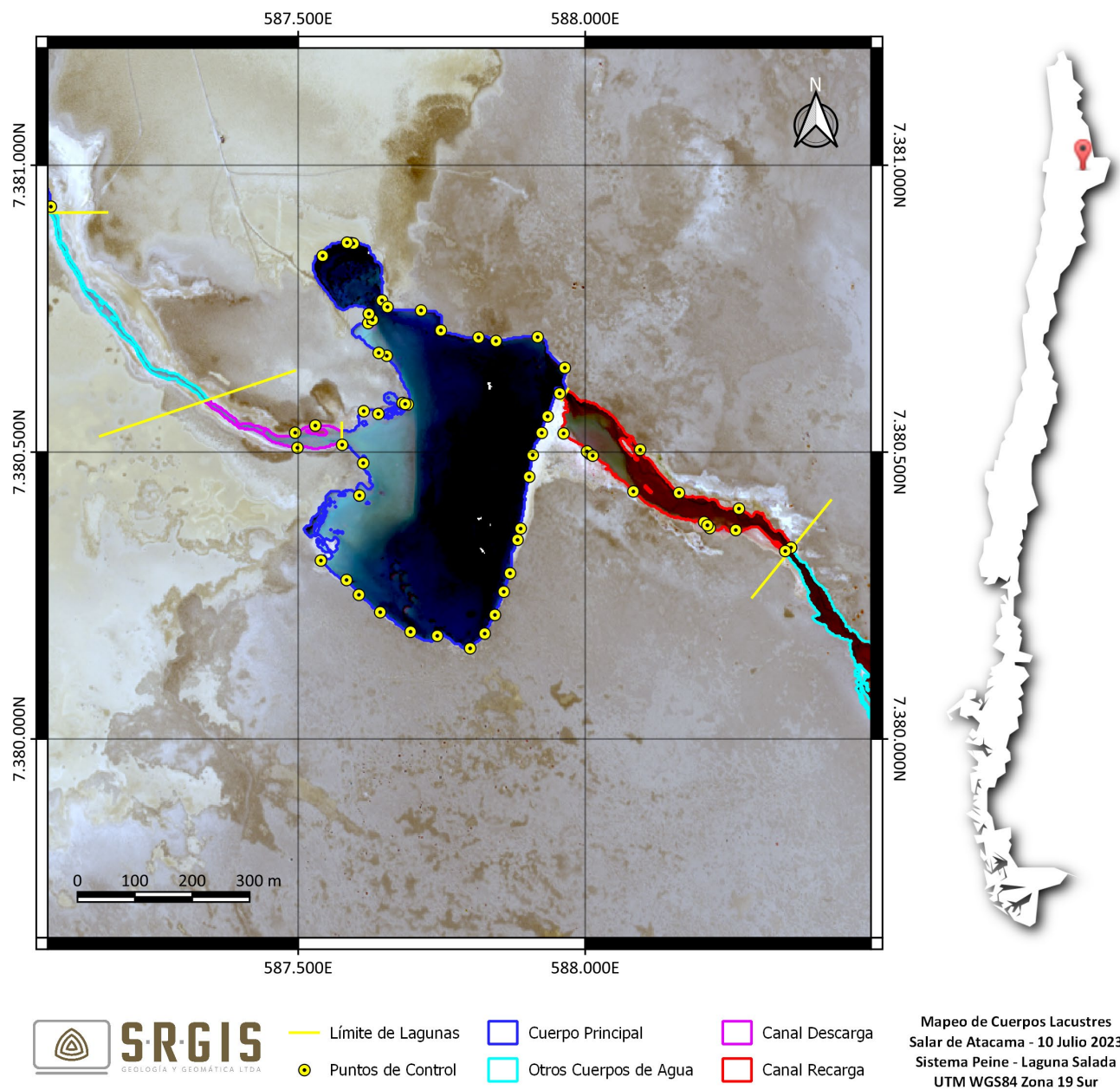


Figura 18: Mapeo de Cuerpos de Agua en la Laguna Salada.

5.2.2. Laguna Saladita

La laguna Saladita presenta contornos más difusos que la laguna Salada, aunque es posible diferenciar los límites de los cuerpos de agua, es sector de playa (al centro y al oeste) se vuelve complejo de delimitar por presencia de cuerpos muy someros de agua, para mejorar la delimitación en esta zona es importante la toma de puntos de control (Figura 19).

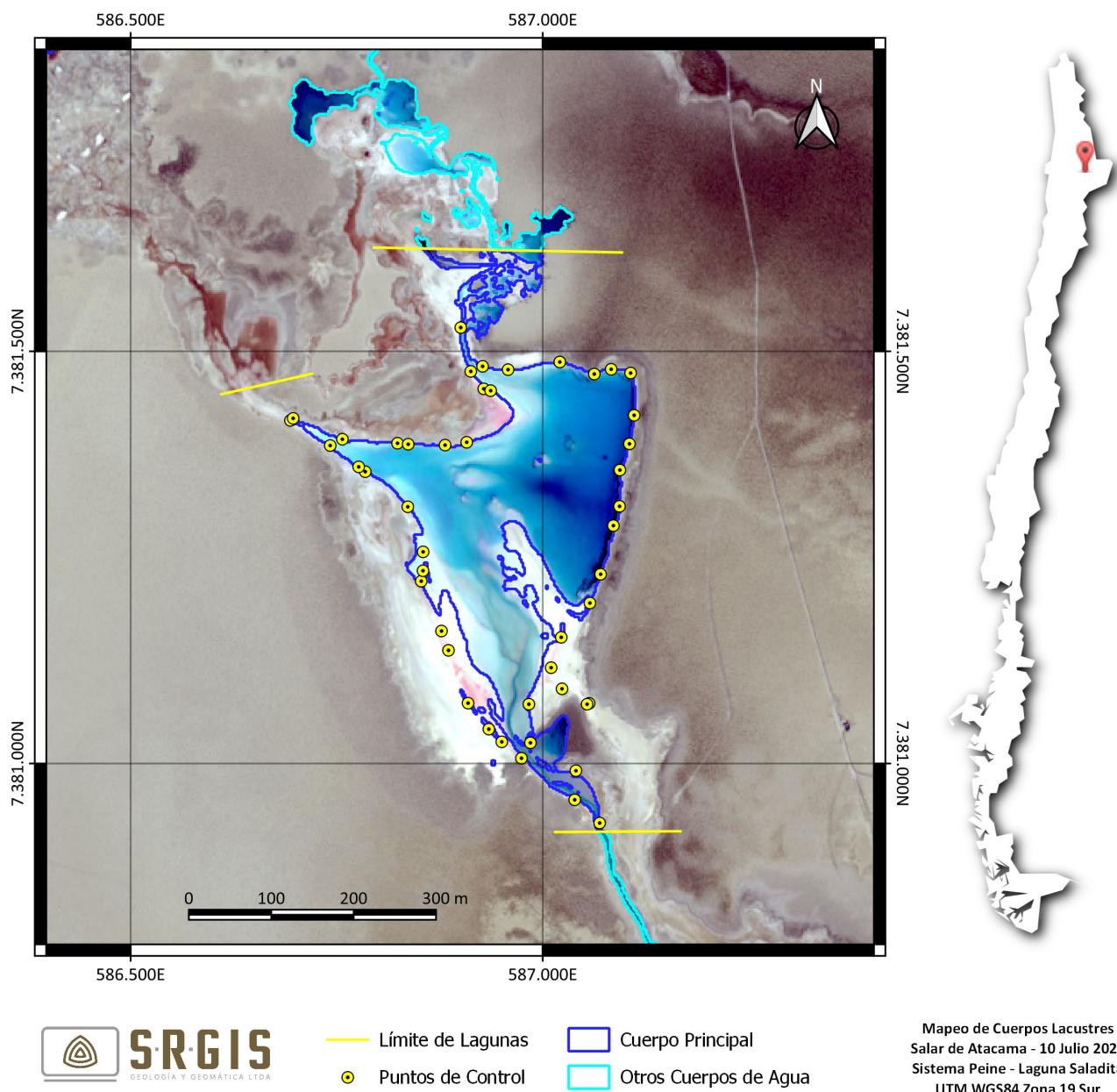


Figura 19: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Saladita.

5.2.3. Desborde Laguna Interna

A diferencia de las lagunas estudiadas anteriormente, el “desborde laguna Interna” no conforma un cuerpo lacustre de superficie continua. Los índices en conjunto con los puntos de control facilitaron la delimitación de los límites de estos cuerpos de agua como se observa en la Figura 20.

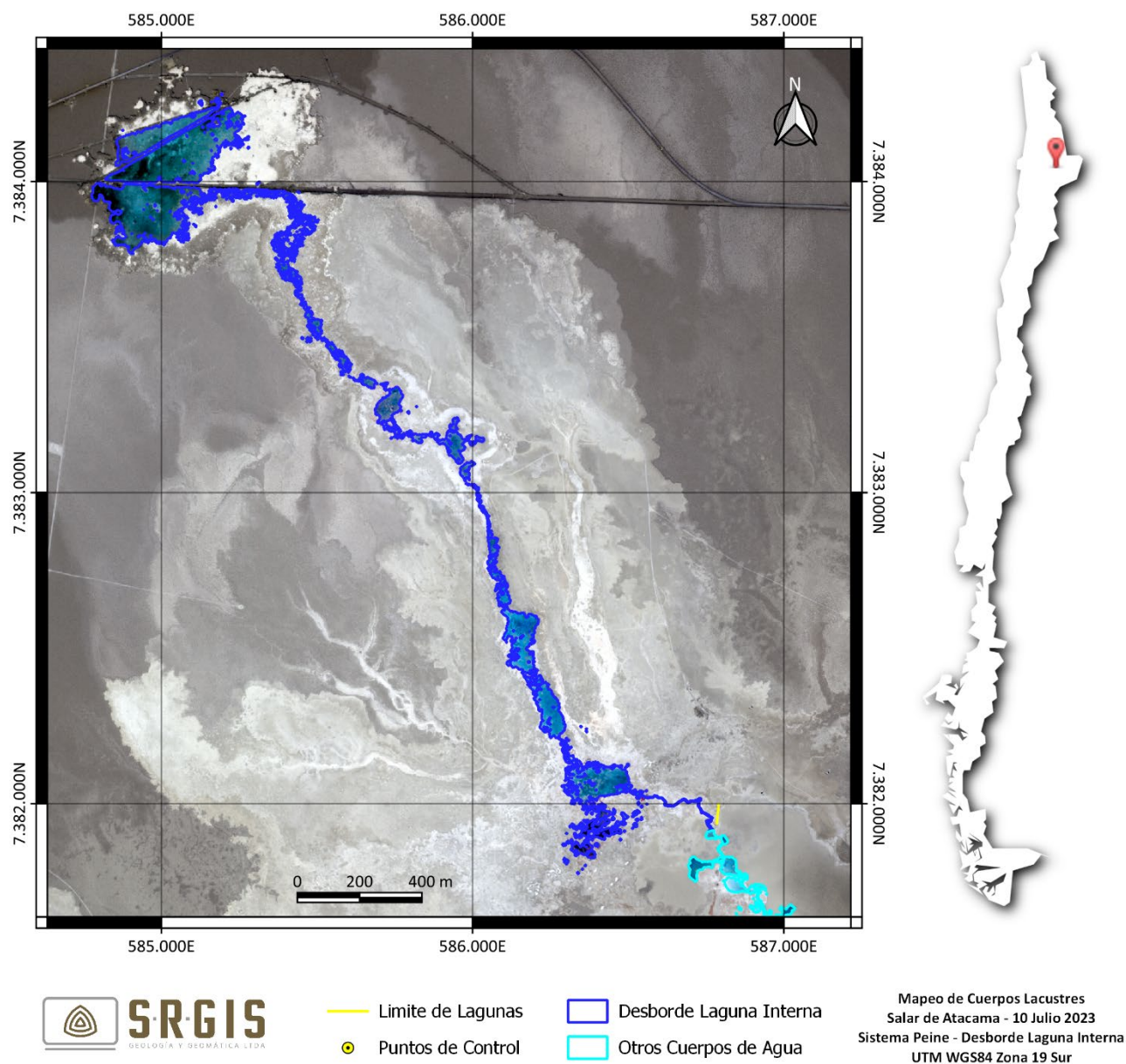


Figura 20: Mapeo de Cuerpos de Agua en Desborde Laguna Interna.

7. CONCLUSIONES

La extensión de los cuerpos de agua superficiales del sistema SONCOR corresponden a los siguientes:

- Laguna Chaxa : 290.408 m²
- Laguna Barros Negros : 1.028.359 m²
- Puilar : 62.496 m²
- Desborde Sur : 466.645 m²

La extensión de los cuerpos de agua superficiales del sistema PEINE corresponden a los siguientes:

- Salada : 197.652 m²
- Saladita : 84.343 m²
- Desborde Laguna Interna : 209.042 m²

8. REFERENCIAS

Baret, F., Guyot, G., Major, D. (1989). "TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation". 3. 1355-1358. 10.1109/IGARSS.1989.576128.

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

Gilabert, M., GFonzález-Piqueras, J., García-Haro, J. "Acerca de los índices de vegetación". Revista española de Teledetección. N° 8, diciembre 1997.

McFeeters. "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features", International Journal of Remote Sensing, 17:7, 1425-1432, DOI: 10.1080/01431169608948714. 1996

Geobiota. "Datos de reconocimiento en terreno de superficies lacustres – Campaña 2018". Informe Interno. Agosto 2018.



srgis

srgisltada



info@srgis.cl



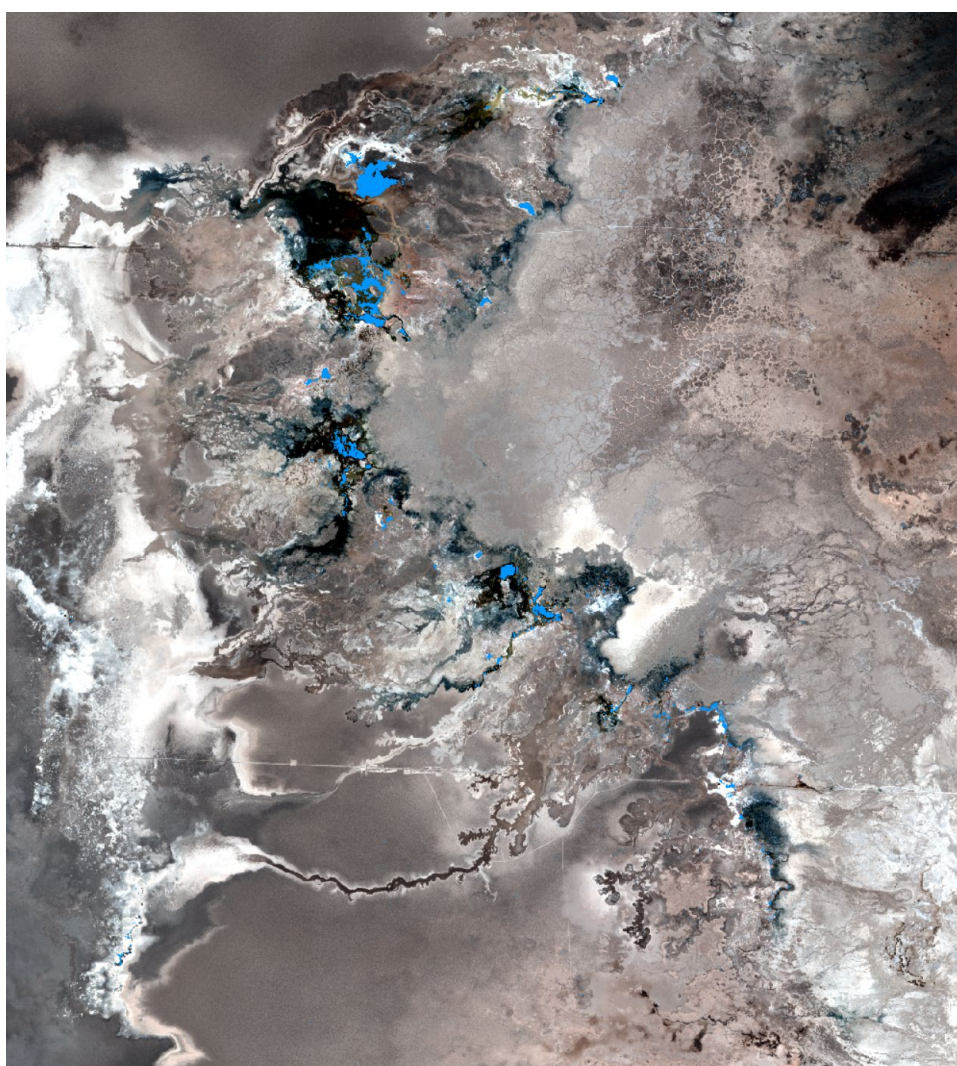
+56 993 498 303



www.srgis.net

**MAPEO DE CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES EN AGUAS DE QUELANA
SALAR DE ATACAMA**

José Manuel Lattus – SRGIS Geología y Geomática Ltda.



Santiago de Chile

Julio 2023

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| ÍNDICE | 1 |
| 1. RESUMEN | 3 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 4 |
| 3.1 ÁREA DE ESTUDIO | 4 |
| 3.2 MATERIALES Y SOFTWARE | 5 |
| 3.3 METODOLOGÍA | 5 |
| 3.3.1 Pre-procesamiento de la Imagen Satelital | 6 |
| 3.3.2 Corrección geométrica (Ortorectificación y Georeferencia) | 7 |
| 3.3.3 Cálculo de Índices y características espectrales (NDWI, NDWI _R y SAVI) y consideración de características espectrales | 7 |
| 3.3.4 Clasificación Binaria | 9 |
| 3.3.5 Pan-Sharpning (Fusión Imagen Multiespectral con Banda Pancromática) | 9 |
| 3.3.6 Generación de Máscara de procesamiento | 10 |
| 3.3.7 Resumen de la metodología para el mapeo de las lagunas | 10 |
| 4. PUNTOS DE CONTROL | 11 |
| 5. RESULTADOS | 12 |
| | 13 |
| 6. DISCUSIÓN | 13 |
| 7. CONCLUSIONES | 14 |
| 8. REFERENCIAS | 15 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Ubicación del Área de Estudio, Aguas de Quelana. Elaboración Propia | 4 |
| Figura 2: Formato de datos en imágenes satelitales y sus correcciones. Elaboración propia. | 6 |
| Figura 3: Curvas espectrales del agua, suelo y vegetación en el espectro solar. Modificado de RSAC Ltd. | 8 |
| Figura 4: Ejemplo de Clasificación Binaria. Elaboración Propia | 9 |
| Figura 5: Metodología de mapeo de cuerpos de Agua. Elaboración propia | 10 |
| Figura 6: Puntos de Control en Aguas de Quelana | 11 |
| Figura 7: Post proceso de edición de resultados | 12 |
| Figura 8: Ejemplo de eliminación de píxeles aislados y relleno de vacíos, en ambos casos se consideró como criterio de eliminación y relleno, familia de 3 píxeles o menos. Elaboración Propia. | 12 |
| Figura 9: Imagen Infrarrojo Color (izquierda) y Mapeo de Cuerpos de Agua (derecha). Elaboración Propia. . | 13 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Vértices de la zona de estudio en coordenadas UTM WGS84 Zona 19 Sur..... | 5 |
| Tabla 2: Principales características de las imágenes procesadas. La sigla RGB se refiere a “Red, Green, Blue”, bandas en longitud de onda del Rojo, Verde y Azul; NIR (Near Infra Red) es la banda en el infrarrojo cercano. Elaboración propia..... | 5 |
| Tabla 3: parámetros de clasificación de cuerpos de agua | 12 |
| Tabla 4: Superficie de cuerpos de agua mapeada el mes de julio de 2023. Elaboración Propia. | 13 |

1. RESUMEN

El mapeo de cuerpos de agua en el sector de Quelana se realizó mediante el procesamiento de una imagen multiespectral de alta resolución GeoEye-1. El sector denominado Aguas de Quelana, dentro de la reserva natural “Los Flamencos”, corresponde un sistema de múltiples cuerpos esporádicos de agua de diversos tamaños, cuyas superficies (cuerpos individuales) pueden ser de algunos pocos metros cuadrados hasta aproximadamente 20.000 m². El mapeo de estos cuerpos se realiza mediante análisis de índices espectrales (índice de agua e índice de vegetación), clasificación binaria y datos estadísticos de los píxeles además de una evaluación y edición manual en base a la observación de combinaciones RGB en Color Natural e Infrarrojo Color.

Para cuerpos de agua profundos, la característica espectral del agua (reflectancia de la luz en distintas longitudes de onda) es muy particular, y se identifica principalmente por su alta reflectancia en la longitud de onda del color verde y una muy baja reflectancia en la longitud de onda del infrarrojo cercano, sin embargo, para cuerpos someros de agua la influencia del material bajo ellos (suelo, sales, vegetación) altera la curva espectral debido a que la luz atraviesa la película de agua e interactúa con dichos materiales generando una curva espectral que mezcla la información del suelo y el cuerpo de agua, dificultando la diferenciación y el mapeo del agua.

2. INTRODUCCIÓN

La dinámica hídrica del Salar de Atacama requiere de un monitoreo constante de diversos elementos. Las imágenes satelitales multiespectrales nos ayudan con la observación superficial de los elementos que cubren la superficie de cualquier terreno, en este caso, nos evidencia la presencia de cuerpos de agua, así como vegetación, suelo, sales, entre otros. Mediante el procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución espacial, se pueden mapear los cuerpos de agua presentes en el salar, y este trabajo enfoca ese análisis para el sector de Aguas de Quelana ubicado en el extremo oriental del Salar de Atacama donde afloran numerosos cuerpos lacustres de muy variados tamaños, los cuales pueden desarrollarse desde algunos cm² hasta unos 20.000 m² aproximadamente. La gran variabilidad del tamaño de los cuerpos de agua, la poca profundidad de éstos y la presencia de vegetación complejizan la determinación de las superficies.

SQM S.A. solicitó a SRGIS Geología y Geomática Ltda. el procesamiento de la imagen satelital de alta resolución para la obtención de la variable extensión de los cuerpos de agua del sistema Aguas de Quelana. Esto en el contexto del Programa de Cumplimiento (PdC), aprobado el 29 de agosto de 2022 según la RES. EX. N°38/ROL F-041-2016. Esta actividad nace del hecho infraccional N° 1 “Extracción de salmuera por sobre lo autorizado, según se expone en el considerando N°27, durante el periodo entre agosto de 2013 y agosto del 2015” y, por tanto, da cumplimiento a la Acción N° 19: robustecer el monitoreo de la superficie lagunar mediante imágenes satelitales de alta resolución con una frecuencia trimestral.

El mapeo de las superficies lacustres también se realiza como parte de las actividades comprometidas en el Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) del EIA “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”, aprobado ambientalmente por la resolución exenta N°226/2006 de la COREMA, Región de Antofagasta. Conforme a lo indicado, a partir del análisis de imágenes satelitales de alta resolución se establece la superficie lacustre de los sistemas SONCOR (lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros) y el sistema PEINE (lagunas Salada, Saladita e Interna) (Considerando 10.2.2 y 10.2.4 de la RCA N°226/2006).

Posteriormente, mediante la Resolución Exenta N°244/2010 de la COREMA, Región de Antofagasta, se redefine la metodología para la medición de superficies lacustres, incorporando mejoras en el procesamiento de la imagen satelital como el uso de diversos índices espectrales para la delimitación de contornos y puntos de terreno para el control y corrección de límites, la cual fue implementada a partir de la temporada 2010. Asimismo, la medición considera los límites definidos por la CONAF para cada uno de los sistemas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado por la consultora SRGIS Geología y Geomática Ltda., específicamente por el geólogo José Manuel Lattus, consultor en teledetección, para el período de julio 2023.

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en la II Región de Antofagasta, Chile, en el extremo oriental del Salar de Atacama en el sector denominado Aguas de Quelana dentro de la cual se encuentra la Reserva Nacional Los Flamencos (Figura 1). Las coordenadas del área de estudio (vértices) pueden verse en la Tabla 1.

Al sector se puede acceder por la Ruta 23 hacia el sur desde el poblado de San Pedro de Atacama o por la Ruta B-39 que sale de la Ruta 5 a la altura de Baquedano.

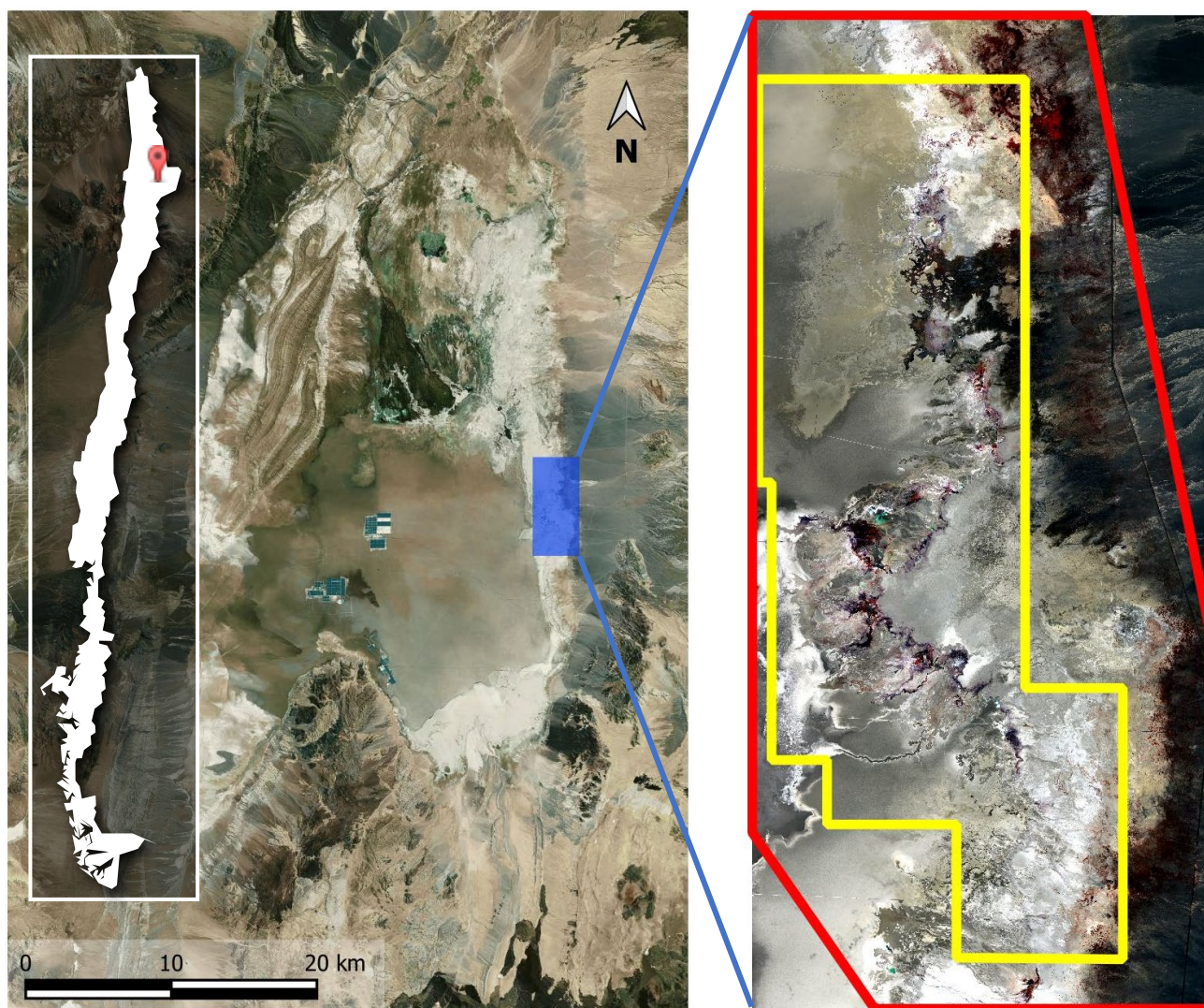


Figura 1: Ubicación del Área de Estudio, Aguas de Quelana. Elaboración Propia.

: Área de Estudio : Reserva Nacional Los Flamencos

Tabla 1: Vértices de la zona de estudio en coordenadas UTM WGS84 Zona 19 Sur.

| Este | Norte |
|---------|-----------|
| 589.804 | 7.413.170 |
| 594.316 | 7.413.170 |
| 596.022 | 7.404.704 |
| 596.022 | 7.399.743 |
| 591.458 | 7.399.743 |
| 589.804 | 7.402.124 |

3.2 MATERIALES Y SOFTWARE

Para este estudio se cuenta con una imagen satelital de alta resolución espacial GeoEye-1 capturada el 10 de julio de 2023. El resumen de las características de esta imagen puede verse en la Tabla 2:

Tabla 2: Principales características de las imágenes procesadas. La sigla RGB se refiere a “Red, Green, Blue”, bandas en longitud de onda del Rojo, Verde y Azul; NIR (Near Infra Red) es la banda en el infrarrojo cercano. Elaboración propia.

| RANGO ESPECTRAL | BANDA | RESOLUCIÓN ESPACIAL |
|--------------------|--------------------|---------------------|
| Visible | Azul | 2 mts. |
| Visible | Verde | 2 mts. |
| Visible | Rojo | 2 mts. |
| Infrarrojo Cercano | Infrarrojo Cercano | 2 mts. |
| Visible | Pancromática | 0,5 mts. |

El procesamiento se realizó utilizando ENVI 5.6, software especializado en procesamiento de imágenes aéreas y satelitales. Todas las imágenes satelitales se trabajaron en el sistema de referencia de coordenadas UTM WGS84 Zona 19 Sur.

3.3 METODOLOGÍA

La medición de cuerpos de agua en la superficie consideró el cálculo de diversos índices, clasificación binaria e inspección visual) y la revisión del comportamiento de las bandas espectrales orientados a la detección y mapeo de cuerpos de agua. Los procesamiento realizados a las imágenes para el mapeo de los cuerpos lacustres son los siguientes:

1. Pre-procesamiento de la imagen satelital
2. Corrección geométrica
3. Cálculo de índices espectrales (NDWI, NDWI_R y SAVI) y consideración de características espectrales
4. Clasificación binaria
5. Fusión imagen (Pan Sharpening)
6. Control de Terreno
7. Aplicación de Máscara de Lagunas

3.3.1 Pre-procesamiento de la Imagen Satelital

Los índices espectrales son concebidos considerando la forma de la curva espectral obtenida en laboratorio mediante un espectro radiómetro el cual mide la reflectancia de dicho material en distintas longitudes de onda, es por esto, que la imagen satelital debe corregirse radiométrica y atmosféricamente para convertir los datos originales a un formato de reflectancia a la superficie de la tierra.

Las imágenes satelitales vienen en un formato numérico denominado niveles “DN” (Digital Number). El valor del píxel en este formato contiene información del material en la superficie de la tierra (agua, vegetación, suelo u otro), la influencia de la atmósfera y de las compensaciones predefinidas por el sensor. Este dato debe transformarse a unidades de energía reflejada (radiancia) mediante una corrección radiométrica.

La corrección radiométrica elimina los parámetros preestablecidos de ganancia y pérdida del sensor, por lo tanto, se generan datos comparables entre distintos sensores. Tras esta corrección las imágenes se convierten de DN a Radianza (o Radiancia) que es el flujo radiante que se refleja desde el suelo hacia el sensor, se mide en $W/(m^2 sr^1 \mu m)$ y es la magnitud que detecta el sensor.

La radiancia espectral se calcula a partir de los parámetros específicos entregados por el proveedor y que se encuentran en los metadatos de los archivos de la imagen satelital:

$$L_{\lambda} = Gain \cdot ND + Offset$$

Donde:

L_{λ} : es la radiancia espectral recibida por el sensor ($W/(m^2 sr \mu m)$)

Gain : es el factor de ganancia para la banda en λ

ND : es el valor del píxel en Niveles Digitales

Offset : es el factor de pérdida para la banda en λ

Adicionalmente, debido a que los datos radiométricos contienen información de la superficie terrestre como de la atmósfera, se requiere aplicar una corrección que minimice estos efectos de la energía reflejada e incidente en los valores de cada píxel para obtener una imagen de reflectancia superficial, este proceso se denomina corrección atmosférica.

La corrección atmosférica elimina los efectos de la atmósfera en los datos, en este formato los datos (curvas espectrales de los pixeles) son comparables con curvas espectrales de laboratorio. Tras esta corrección las imágenes se convierten de Radiancia a Reflectancia (o Reflectancia Relativa).

La Figura 2 resume el esquema de datos de la imagen y las correcciones necesarias.

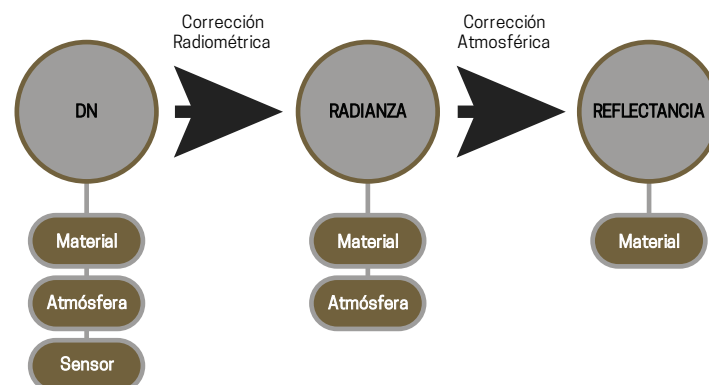


Figura 2: Formato de datos en imágenes satelitales y sus correcciones. Elaboración propia.

La metodología de corrección utilizada fue la corrección “Internal Average Relative Reflectance” (IARR) ya que, para el caso del Salar de Atacama, tras varios estudios, se consideró que es la que entrega mejor resultado para el mapeo específico de cuerpos de agua. Este tipo de corrección funciona mejor para áreas áridas sin vegetación, como es el caso del área de estudio (Harris Geospatial, 2022).

3.3.2 Corrección geométrica (Ortorectificación y Georeferencia)

La ortorectificación consiste en corregir la imagen de distorsiones provocadas principalmente por la topografía, para ello se utiliza un modelo digital de elevación (DEM) y los parámetros internos de la imagen satelital (RPC). Por otro lado, la georeferencia es indicar las coordenadas precisas de algunos pixeles de la imagen para ajustarla a su posición real.

3.3.3 Cálculo de Índices y características espectrales (NDWI, $NDWI_R$ y SAVI) y consideración de características espectrales

Para el mapeo y delimitación de las superficies lacustres se utilizaron los siguientes índices espectrales: Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), Índice de Agua de Diferencia Normalizada en Rojo ($NDWI_R$) e Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).

a. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

El NDWI (Normalized Difference Water Index (McFeeters, 1996)) maximiza la respuesta de las características espectrales del agua al usar la longitud de onda correspondiente al verde (550 nm, valores de reflectancia altos para el agua) y la baja reflectancia del agua en el NIR (850 nm, infrarrojo cercano). El algoritmo del NDWI es el siguiente:

$$NDWI = (VERDE - NIR) / (VERDE + NIR)$$

Donde:

VERDE : Reflectancia de la imagen en el rango espectral verde

NIR : Reflectancia de la imagen en el rango espectral infrarrojo cercano

Este índice normalizado entrega valores acotados para los pixeles entre -1 y 1. Como la reflectancia del agua en la banda verde debe ser mayor a la de la banda NIR, valores mayores a cero deben ser considerados a la hora de clasificar el agua con este índice.

b. Índice de Agua de Diferencia Normalizada en Rojo ($NDWI_R$)

Este índice es una modificación del NDWI, cambiando la banda verde por la banda roja. Para cuerpos de agua con mucho sedimento se ha utilizado este índice ya que los suelos tienen una reflectancia mayor en la longitud de onda del color rojo que en la del verde, de esta manera estos cuerpos de agua con alta carga de sedimentos no tienen su máxima reflectancia en el verde sino en el rojo, pero al estar dentro de cuerpos de agua el infrarrojo cercano sigue teniendo baja reflectancia (Gossn et al., 2019; Moore et al., 2014; Ngoc et al., 2020; Ogashawara et al., 2017). Para cuerpos de agua someros esta característica se mantiene ya que el poco espesor de la capa de agua aumenta la reflectancia del rojo sobre el verde, por lo que este índice aporta mucho al mapeo de cuerpos de agua someros. El algoritmo del $NDWI_R$ es el siguiente:

$$NDWI_R = (ROJO - NIR) / (ROJO + NIR)$$

Donde:

ROJO : Reflectancia de la imagen en el rango espectral rojo

NIR : Reflectancia de la imagen en el rango espectral infrarrojo cercano

Este índice normalizado entrega valores acotados para los píxeles entre -1 y 1. Como la reflectancia del agua en la banda rojo debe ser mayor a la de la banda NIR, valores mayores a cero deben ser considerados a la hora de clasificar el agua con este índice.

c. Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI)

El índice SAVI es similar al NDVI (Rouse Jr et al., 1974), pero suprime los efectos de los píxeles del suelo. Utiliza un factor de ajuste de fondo respecto de la capa superior de la vegetación (parte de la vegetación expuesta hacia el sol directamente), L, que es una función de la densidad de la vegetación y, a menudo, requiere un conocimiento previo de la cantidad de vegetación. Se sugiere un valor óptimo de $L=0,5$ para tener en cuenta las variaciones de fondo del suelo de primer orden (Huete, 1988). Este índice se usa mejor en áreas con vegetación relativamente escasa donde el suelo es visible a través del dosel. El algoritmo del índice SAVI es el siguiente:

$$NDVI = (1.5 * (NIR - ROJO)) / (NIR + ROJO + 0.5)$$

Donde:

ROJO : es la reflectancia en el rango espectral del rojo

NIR : es la reflectancia en el rango espectral del infrarrojo cercano

d. Consideraciones de Características espectrales

Todos los materiales en la superficie tienen una curva espectral única, con ciertas características particulares en ciertos rangos espectrales del espectro electromagnético, en el caso del agua, esta tiene su máxima reflectancia dentro del rango espectral del color verde y esta reflectancia baja considerablemente (tendiendo a cero) en el rango del infrarrojo cercano. La muestra las curvas espectrales de los principales elementos en la superficie en el espectro solar.

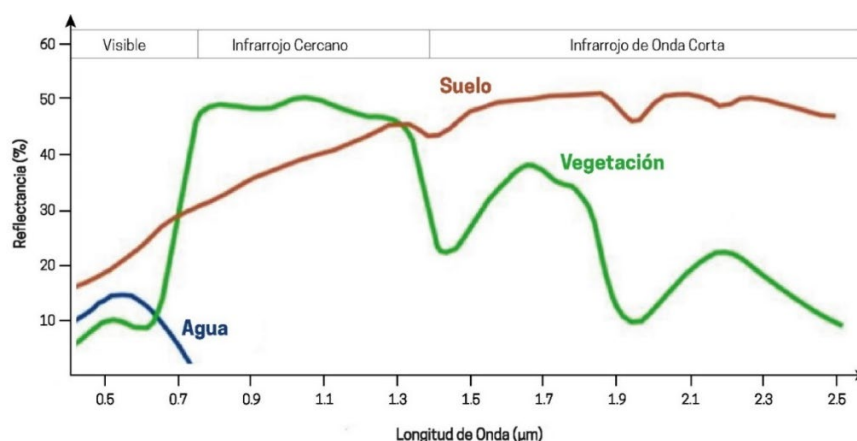


Figura 3: Curvas espectrales del agua, suelo y vegetación en el espectro solar. Modificado de RSAC Ltd.

Teniendo estas consideraciones, se consideraron para el mapeo de cuerpos de agua la reflectancia baja en el rango infrarrojo cercano, lo que se traduce en bajos valores de píxeles en la banda NIR. Es importante considerar que los cuerpos de agua, según su profundidad, pueden resultar en curvas espectrales un poco diferentes a lo esperado, así como el contenido de sedimentos en suspensión, sales disueltas y/o vegetación, de esta manera es que la reflectancia del verde que en general es más alta que la del rojo puede invertirse quedando el rojo con mayor reflectancia lo que justifica el uso del $NDWI_R$, de la misma manera se ha evidenciado que la reflectancia baja en el NIR ayuda a separar valores de NDWI altos que no corresponden a agua de los que si son cuerpos de agua.

3.3.4 Clasificación Binaria

Este tipo de clasificación, también conocida como “Árboles de Decisión” va segmentando la imagen en distintos pasos: todos los píxeles de la imagen se enfrentan a una condición lógica la cual segmenta la imagen en dos clases, los píxeles que cumplen la condición y los que no la cumplen. Estas condiciones son, por ejemplo: $NDWI \geq X$, donde X es el valor de pixel a partir del cual se considera que dicho pixel corresponde a una cobertura de agua. Cada clase generada se puede convertir en un nuevo nodo con una nueva condición que deben cumplir los píxeles que se clasificaron para volver a segmentarlos en dos clases nuevas (Figura 4).

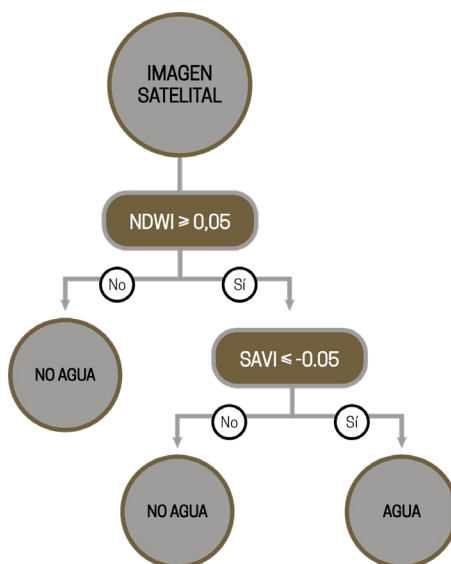


Figura 4: Ejemplo de Clasificación Binaria. Elaboración Propia.

3.3.5 Pan-Sharpening (Fusión Imagen Multiespectral con Banda Pancromática)

Este proceso mejor visualmente el detalle de los datos multiespectrales con la banda pancromática debido a que ésta última tiene una resolución espacial mejor que la multiespectral. Es importante señalar que la radiancia medida por el sensor en cada longitud de ondas (azul, rojo, verde e infrarrojo cercano) se encuentra en los datos multiespectrales y que la banda pancromática abarca un rango espectral amplio (desde el azul al infrarrojo cercano) por lo que se recomienda que estos datos fusionados se utilices de manera estética y para análisis visuales y no procesamientos espectrales.

Para el proceso de PanSharpen, ambas imágenes deben estar corregidas geométricamente para un calce perfecto entre ellas, sin embargo, la corrección radiométrica y atmosférica no es necesario aplicarla a la imagen pancromática, ya que solo se necesita su resolución espacial y no la resolución espectral para el proceso de fusión.

3.3.6 Generación de Máscara de procesamiento

La máscara de lagunas es un archivo digital que posee los límites de las áreas de interés para los diferentes sistemas lagunares. El área seleccionada para el procesamiento en Aguas de Quelana corresponde al “Área de Estudio” indicada en la Figura 1.

3.3.7 Resumen de la metodología para el mapeo de las lagunas

Utilizando los índices espectrales, las características de las curvas espectrales y la imagen índice de la clasificación supervisada se procedió al mapeo de los cuerpos de agua visibles en la superficie. La Figura 5 muestra el esquema de procesamiento para el mapeo de los cuerpos lagunares utilizando todas las variables consideradas en este estudio.

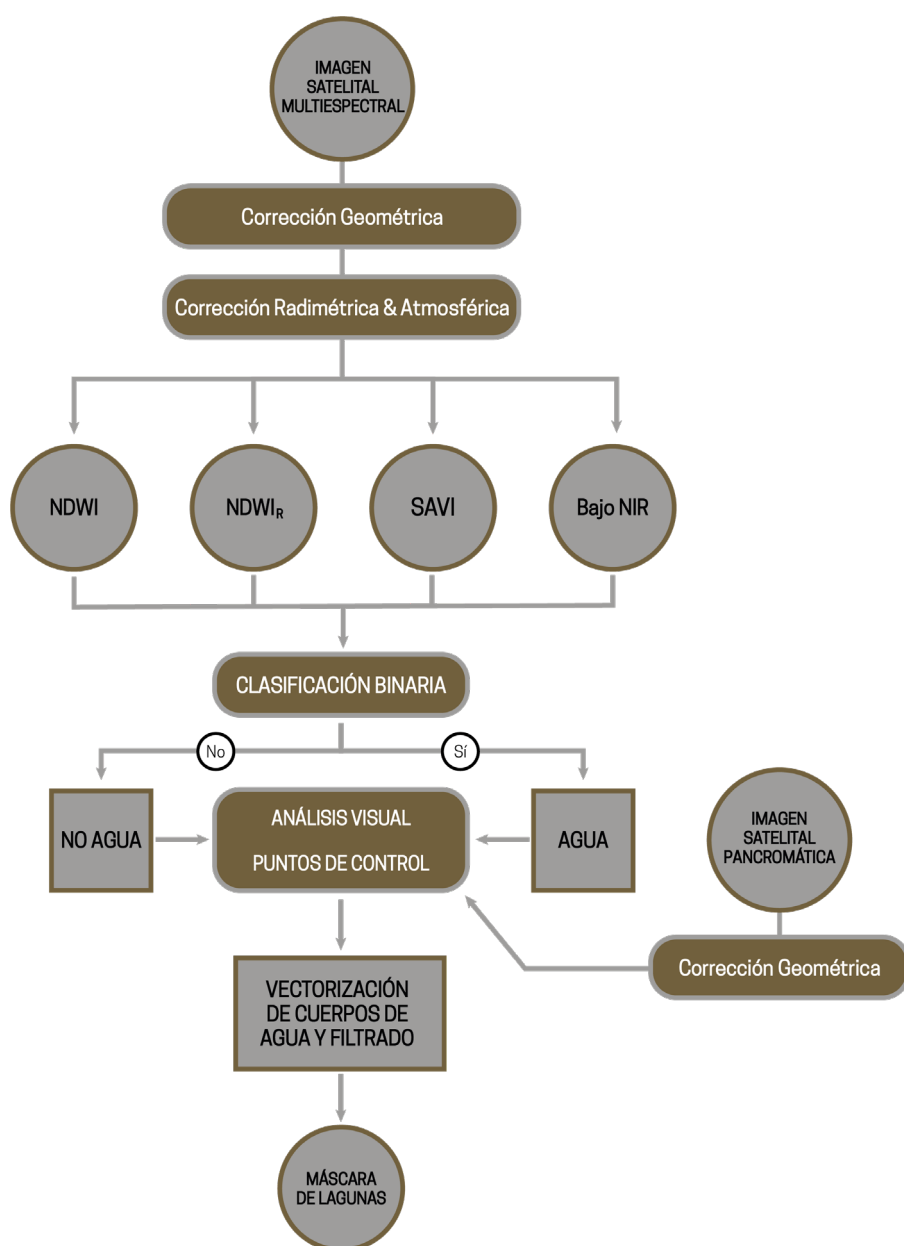


Figura 5: Metodología de mapeo de cuerpos de Agua. Elaboración propia.

4. PUNTOS DE CONTROL

Para la campaña de julio 2023, se realizó una campaña de puntos de control de terreno donde se definieron 117 puntos de borde de agua (Figura 6), en cada punto se indica la coordenada específica del punto de control, la cota y observaciones sobre la presencia y espesor de cuerpos de agua; se adjunta también una fotografía orientada y videos el 360° para tener una idea de la situación en terreno y poder mejorar el análisis de la imagen satelital; este trabajo fue realizado por la consultora ATyGeo los días 03 y 04 de julio de 2023.

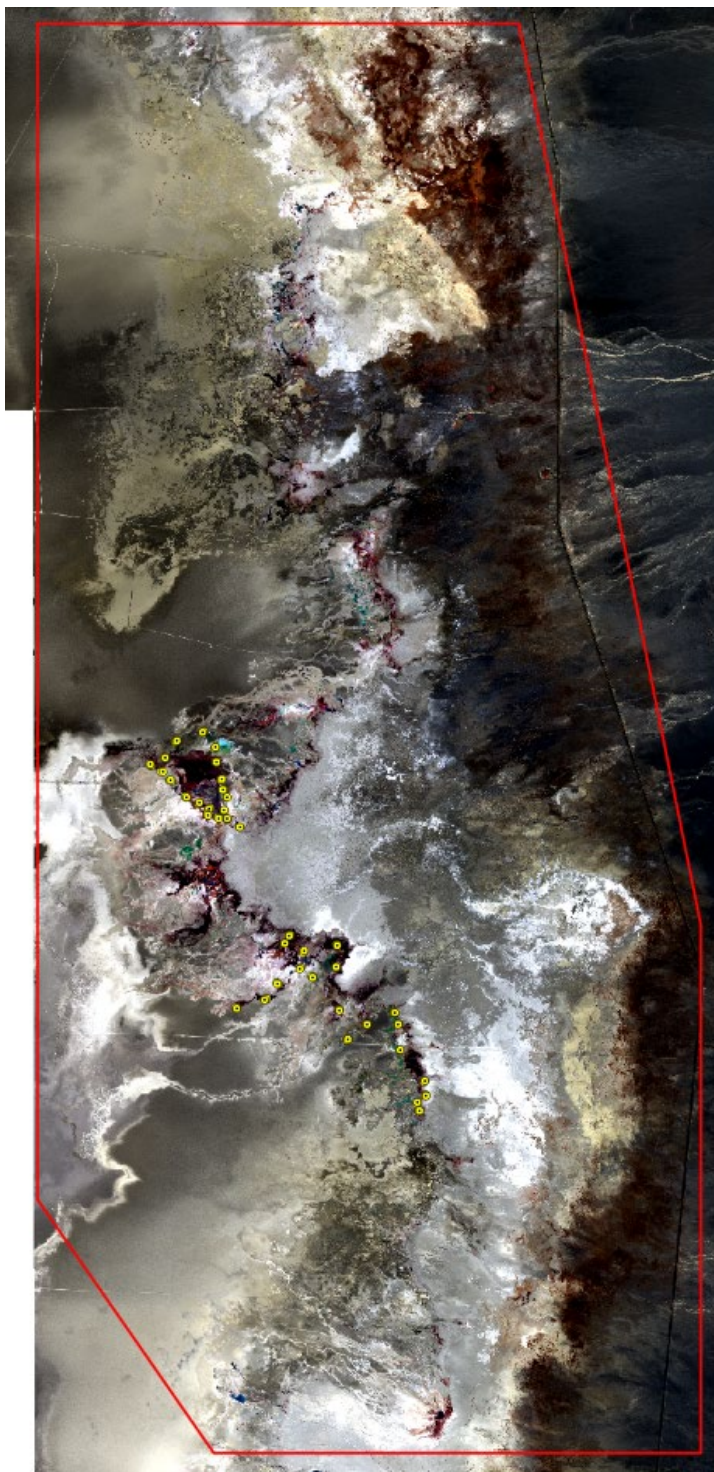


Figura 6: Puntos de Control en Aguas de Quelana

5. RESULTADOS

Para obtener el resultado final del mapeo de cuerpos de agua se realizan dos etapas posteriores importantes. El resultado inicial (mapeo inicial) es el resultado de la clasificación binaria, el cual pasa por un proceso de inspección visual y edición donde se agregan cuerpos de agua que no fueron mapeados, así como se eliminan píxeles que inicialmente se clasificaron como agua pero se identifica que no lo son (mapeo editado); este paso es sensible ya que está sujeto a la interpretación del consultor de determinar cuáles cuerpos mapeados inicialmente no se consideran como cobertura de agua, cuales cuerpos de agua no se mapearon por la clasificación y deben agregarse al resultado, y la edición de otros cuerpos (extenderlos o disminuirlos), en esta etapa la existencia de puntos de control es fundamental para tomar decisiones respecto de la extensión de los cuerpos de agua. Luego, debido que el mapeo inicial tiene bastante ruido, se realiza un proceso de filtrado donde se eliminan todos los píxeles aislados, o con un área mínima, mapeados como cuerpos de agua (mapeo filtrado). De esta manera tenemos tres resultados distintos: Mapeo Inicial, Mapeo Filtrado y Mapeo Final (Figura 7).



Figura 7: Post proceso de edición de resultados

El proceso de filtrado consiste eliminar píxeles aislados, el cual se aplica considerando que un píxel aislado no es representativo del mapeo y representa más el ruido del proceso que cuerpos de agua en sí (Figura 8). Para este trabajo se mantendrán cuerpos de agua que sean mayores o iguales a 2 píxeles.

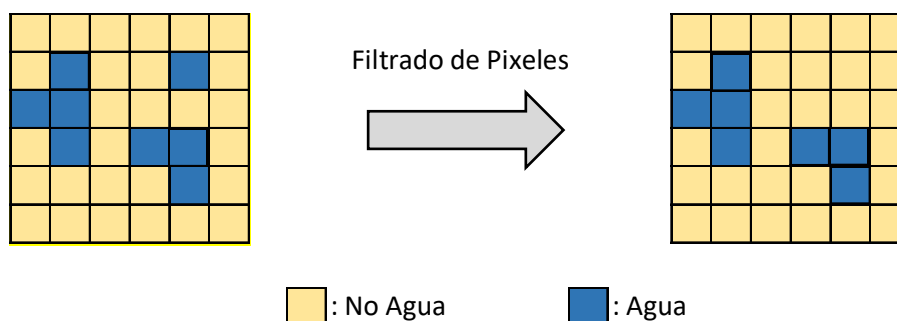


Figura 8: Ejemplo de eliminación de píxeles aislados, se consideró como criterio eliminar píxeles aislados (1 píxel).
Elaboración Propia.

La Tabla 3 resume los parámetros utilizados en la clasificación binaria para el mapeo de los cuerpos de agua.

Tabla 3: parámetros de clasificación de cuerpos de agua

| SISTEMA | NDWI | NDWI _R | SAVI | NIR |
|------------------|--------------|-------------------|---------------|------|
| AGUAS DE QUELANA | $\geq 0,050$ | $\geq 0,05$ | $\leq -0,050$ | 0,75 |

El área mapeada para la imagen de julio 2023 puede verse en la Tabla 4.

Tabla 4: Superficie de cuerpos de agua mapeada el mes de julio de 2023. Elaboración Propia.

| Fecha | Mapeo Inicial (m ²) | Mapeo Editado (m ²) | Mapeo Final (m ²) |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 10-07-2023 | 308.116 | 468.132 | 462.545 |

La Figura 9 muestra el resultado final del mapeo en Aguas de Quelana.

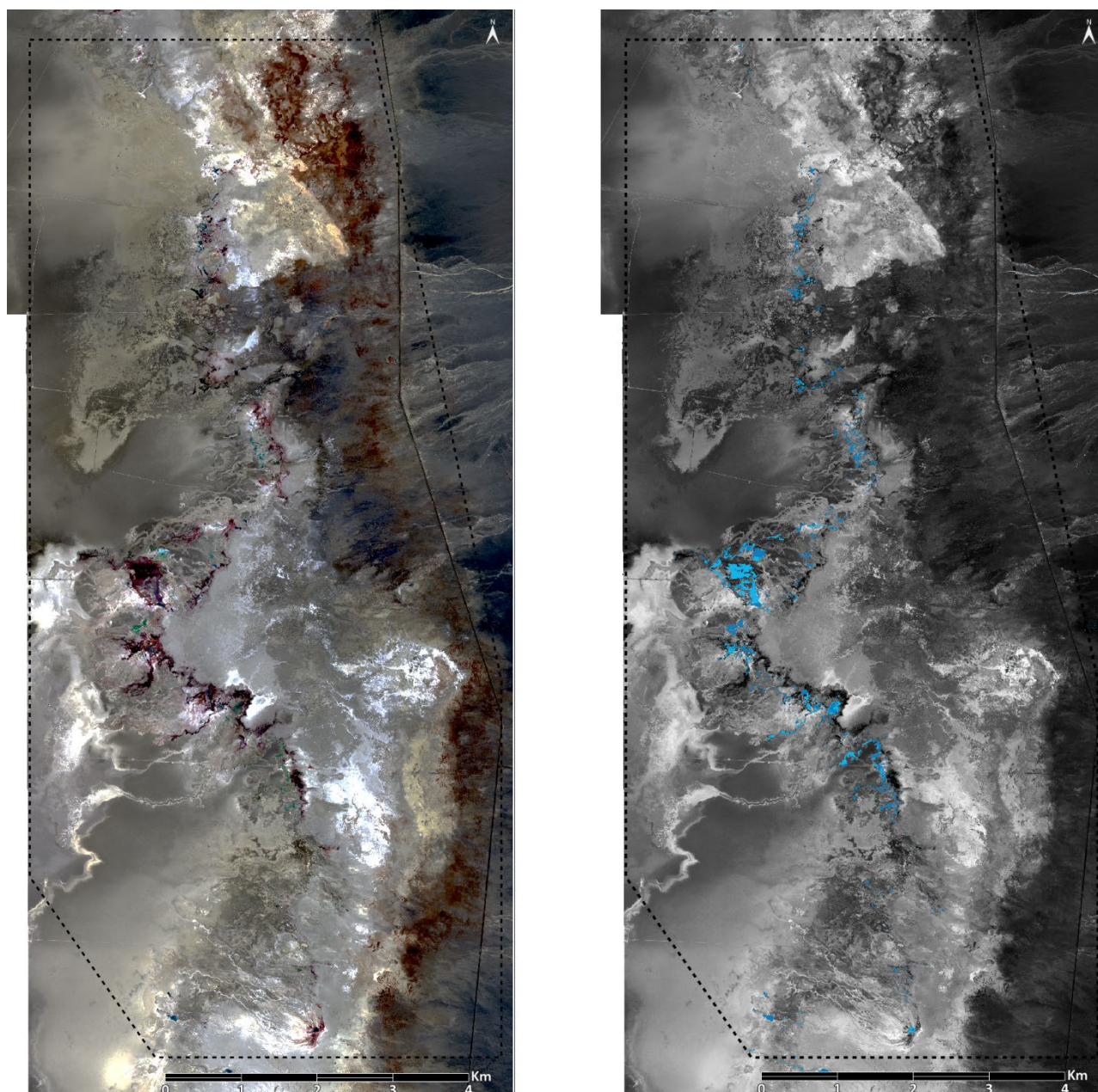


Figura 9: Imagen Infrarrojo Color (izquierda) y Mapeo de Cuerpos de Agua (derecha). Elaboración Propia.

6. DISCUSIÓN

Hay una importante diferencia entre el mapeo semiautomático (mapeo inicial) con el mapeo final, esto se debe a que se priorizó el mapeo de cuerpos efectivos de agua al inicio, al modificar los umbrales para los índices se mapeaban más cuerpos de agua, pero también aparecen muchos falsos positivos; en la edición manual es más eficiente agregar nuevos cuerpos de agua que eliminar mapeos que no corresponden a agua.

Por otra parte, se pudo contar con bastantes puntos de control de terreno para mejorar la interpretación, esto se vuelve muy relevante para los pequeños cuerpos esporádicos en Aguas de Quelana.

7. CONCLUSIONES

La metodología utilizada para el mapeo de cuerpos de agua en Aguas de Quelana considera las características espectrales del agua, así como consideraciones particulares de la zona como la restricción espacial donde afloran estos cuerpos y un porcentaje bajo de cobertura de agua respecto del total de la zona de estudio.

El mapeo de la cobertura total de agua está relacionado al tamaño y profundidad de los cuerpos de agua. Los posibles errores en la clasificación de los materiales (“Agua” y “No Agua”) están condicionado a que la validación se realizó solo mediante interpretación visual y esto se relaciona con la interpretación final del resultado del mapeo, que corresponde a la “edición visual” en la metodología presentada. Para establecer una precisión más realista, se recomienda la toma de puntos de terreno con la información correspondiente en una fecha lo más cercana a la captura de la imagen satelital, sin embargo no siempre se logra esto debido a los permisos que se requieren para el ingreso a las zonas de estudio, es por eso que es importante poder alinear esfuerzos para que la toma de puntos de control no se obstaculice, con el objetivo de un mejor resultado a la hora de realizar las campañas de mapeo para apoyar en análisis satelital.

8. REFERENCIAS

- Gossn, J. I., Ruddick, K. G., & Dogliotti, A. I. (2019). Atmospheric correction of OLCI imagery over extremely turbid waters based on the Red, NIR and 1016 nm bands and a new baseline residual technique. *Remote Sensing*, 11(3), 220.
- Harris Geospatial. (2022). *ENVI 5.6 Help*.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.
- Moore, T. S., Dowell, M. D., Bradt, S., & Verdu, A. R. (2014). An optical water type framework for selecting and blending retrievals from bio-optical algorithms in lakes and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 143, 97–111.
- Ngoc, D. D., Loisel, H., Vantrepotte, V., Chu Xuan, H., Nguyen Minh, N., Verpoorter, C., Meriaux, X., Pham Thi Minh, H., Le Thi, H., & Le Vu Hong, H. (2020). A simple empirical band-ratio algorithm to assess suspended particulate matter from remote sensing over coastal and inland waters of vietnam: Application to the VNREDSat-1/NAOMI sensor. *Water*, 12(9), 2636.
- Ogashawara, I., Li, L., & Moreno-Madriñán, M. J. (2017). Slope algorithm to map algal blooms in inland waters for Landsat 8/Operational Land Imager images. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(1), 12005.
- Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A., & Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*.

Atte.

José Manuel Lattus



srgis



info@srgis.cl



srgisltda



+56 993 498 303

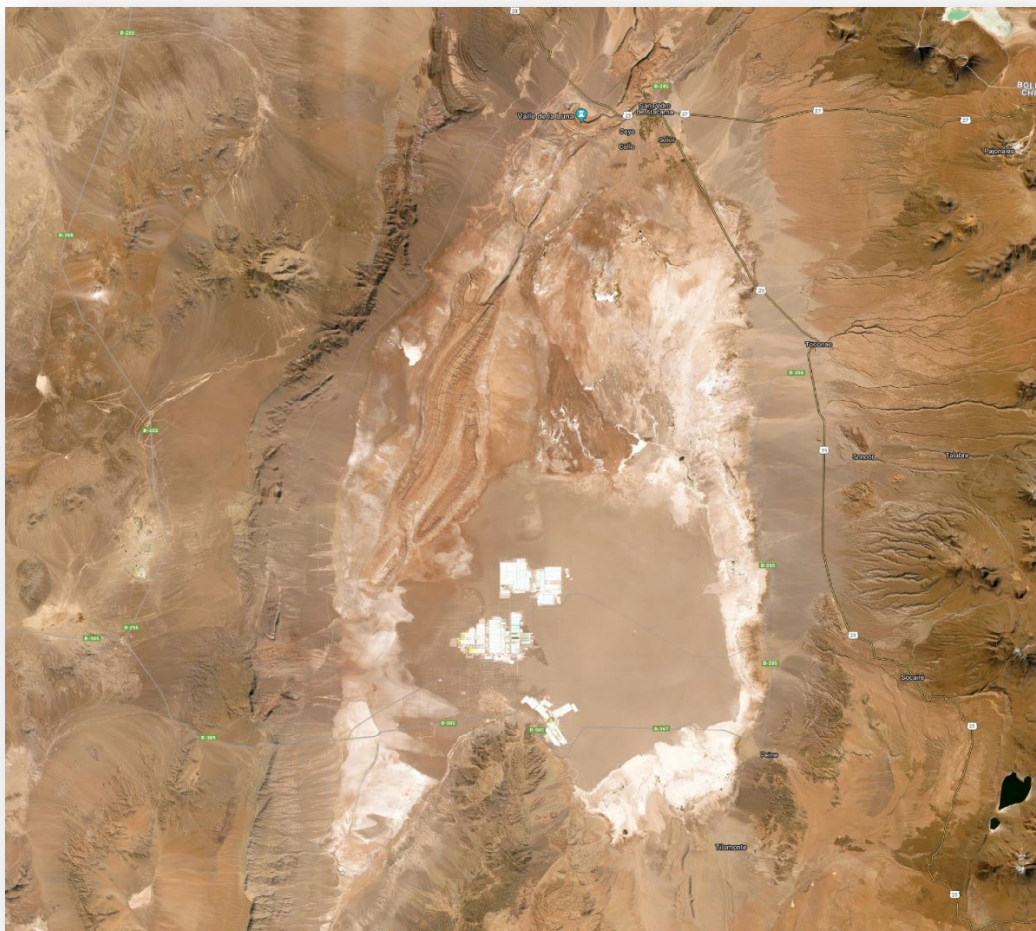


www.srgis.net

Campaña octubre de 2023

Plan de Seguimiento Ambiental, Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama

Región de Antofagasta



Octubre 2023

INDICE

Contenido

| | |
|--|----|
| INDICE | 2 |
| 1. RESUMEN | 4 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 4 |
| 3. OBJETIVOS | 5 |
| 4. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 5 |
| 4.1. ÁREA DE ESTUDIO | 5 |
| 4.2. MATERIALES, SOFTWARE Y EQUIPOS UTILIZADOS | 6 |
| 4.3. PARÁMETROS PARA CARACTERIZAR EL ESTADO Y EVOLUCIÓN DE LAS VARIABLES AMBIENTALES . | 7 |
| 4.4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS | 8 |
| 4.5.1. Análisis de Imágenes Satelitales..... | 8 |
| 4.5.2. Contornos de las Lagunas | 15 |
| 4.5.3. Límites Oficiales de las Lagunas para el Cálculo de Superficies | 16 |
| 5. PUNTOS DE CONTROL | 19 |
| 6. RESULTADOS..... | 20 |
| 7. CONCLUSIONES..... | 29 |
| 8. REFERENCIAS | 30 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Área de estudio y ubicación de los sistemas lagunares y lagunas (UTM WGS84 19S). Elaboración propia..... | 6 |
| Figura 2: Imagen WorldView-3 Color Real (izquierda) e Infrarrojo Color (derecha) del sistema SONCOR. | 7 |
| Figura 3: Metodología para la clasificación de cuerpos de Agua. Elaboración Propia. | 8 |
| Figura 4: Formato de datos en imágenes satelitales y sus correcciones. Elaboración Propia. | 10 |
| Figura 5: (a) Combinación RGB Infrarrojo Color de la imagen multiespectral original (resolución de 2 metros), (b) Imagen Pancromática original con resolución de 0,5 metros y (c) Combinación RGB Infrarrojo Color de la imagen Multiespectral fusionada con la banda Pancromática. Elaboración Propia. | 10 |
| Figura 6: NDWI en Soncor (izquierda) y Peine (derecha). Elaboración Propia..... | 11 |
| Figura 7: Línea del Suelo y Diagrama de dispersión de los pixeles para las bandas NIR (eje X) y Roja (eje Y).. | 12 |
| Figura 8: Diagramas de dispersión para pixeles de suelo (Eje X: NIR; Eje Y: ROJO) para los sistemas SONCOR y PEINE..... | 13 |
| Figura 9: TSAVI en Soncor (izquierda) y Peine (derecha). Elaboración Propia..... | 14 |
| Figura 10: Transformación HSI en RGB en Soncor (izquierda) y Peine (derecha). Elaboración Propia. | 15 |
| Figura 11: Límites de análisis ráster para cada laguna en los sistemas Soncor y Peine. | 16 |

| | |
|--|----|
| Figura 12: Límites de las lagunas en el sistema Soncor | 18 |
| Figura 13: Límites de las lagunas en el sistema Peine | 19 |
| Figura 14: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Chaxa..... | 21 |
| Figura 15: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Barros Negros. | 22 |
| Figura 16: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Puilar. | 23 |
| Figura 17: Mapeo de Cuerpos de Agua en Desborde Sur. | 24 |
| Figura 18: Mapeo de Cuerpos de Agua en la Laguna Salada. | 26 |
| Figura 19: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Saladita..... | 27 |
| Figura 20: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Interna. | 28 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Resumen de superficies lacustres, octubre 2023. Elaboración Propia..... | 4 |
| Tabla 2: Principales características de la imagen WorldView-3..... | 7 |
| Tabla 3: Factores a y b para el cálculo del TSAVI..... | 13 |
| Tabla 4: Umbrales utilizados con los índices NDWI, TSAVI e IHS. Elaboración Propia. | 16 |
| Tabla 5: Vértices de las líneas que delimitan los límites de cada laguna Enel sistema Soncor..... | 17 |
| Tabla 6: Vértices de las líneas que delimitan los límites de cada laguna Enel sistema Peine..... | 18 |
| Tabla 7: Medición de superficies lagunares en el sistema SONCOR. | 20 |
| Tabla 8: Medición de superficies lagunares en el sistema PEINE..... | 25 |

1. RESUMEN

El presente informe corresponde al monitoreo de superficies lacustres en los sistemas SONCOR y PEINE, presentes en el Borde Este del Salar de Atacama, Región de Antofagasta para el periodo de octubre 2023 representado en una imagen satelital capturada el día 04 de octubre del mismo año.

Este monitoreo se desarrolla en el contexto del Plan de Seguimiento Ambiental establecido en la RCA 226/2006 del Proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” y sus alcances metodológicos acogen a lo establecido en la Resolución Exenta N°224/2010 de la Comisión Regional de Medio Ambiente, Región de Antofagasta.

En acuerdo a lo establecido en la Resolución Exenta N°224/2010, la medición del tamaño de las lagunas se realiza con el uso de imágenes satelitales de alta resolución espacial fusionadas, con el apoyo de índices alternativos (IHS, TSAVI, NDWI), y mediciones de terreno necesarias para la definición de límites difusos que representen una complejidad en la interpretación mediante la imagen satelital.

En el cuadro resumen (Tabla 1) a continuación se presentan las superficies lacustres calculadas para los sistemas Soncor y Peine en el período de monitoreo octubre 2023.

Tabla 1: Resumen de superficies lacustres, octubre 2023. Elaboración Propia.

| Sistema | Nombre del Cuerpo de Agua | Superficie del espejo de agua (m ²) |
|---------|---------------------------|---|
| Soncor | Chaxa | 278.722 |
| | Barros Negros | 896.955 |
| | Puilar | 62.472 |
| | Desborde Sur | 329.673 |
| Peine | Salada | 199.248 |
| | Saladita | 86.540 |
| | Interna | 163.682 |

2. INTRODUCCIÓN

La dinámica hídrica del Salar de Atacama requiere de un monitoreo constante de diversos elementos. Las imágenes satelitales multiespectrales nos ayudan con la observación superficial de los elementos que cubren la superficie de cualquier terreno, en este caso, nos evidencia la presencia de cuerpos de agua, así como vegetación, suelo, sales, entre otros. Mediante el procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución espacial, se pueden mapear los cuerpos de agua presentes en el salar, y este trabajo enfoca ese análisis para los sistemas lagunares de Soncor y Peine.

SQM S.A. solicitó a SRGIS Geología y Geomática Ltda. el procesamiento de la imagen satelital de alta resolución de octubre 2023 para la obtención de la variable extensión lacustre. Esto en el contexto del Programa de Cumplimiento (PdC), aprobado el 29 de agosto de 2022 según la RES. EX. N°38/ROL F-041-2016. Esta actividad nace del hecho infraccional N° 1 “Extracción de salmuera por sobre lo autorizado, según se expone en el considerando N°27, durante el periodo entre agosto de 2013 y agosto del 2015” y, por tanto, da cumplimiento a la Acción N° 19: Robustecer el monitoreo de la superficie lagunar mediante imágenes satelitales de alta resolución con una frecuencia trimestral.

El mapeo de las superficies lacustres también se realiza como parte de las actividades comprometidas en el Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) del EIA “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”, aprobado ambientalmente por la resolución exenta N°226/2006 de la COREMA, Región de Antofagasta. Conforme a lo indicado, a partir del análisis de imágenes satelitales de alta resolución se establece la superficie lacustre de los sistemas SONCOR (lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros) y el sistema PEINE (lagunas Salada, Saladita y Desborde Laguna Interna) (Considerando 10.2.2 y 10.2.4 de la RCA N°226/2006).

Posteriormente, mediante la Resolución Exenta N°244/2010 de la COREMA, Región de Antofagasta, se redefine la metodología para la medición de superficies lacustres, incorporando mejoras en el procesamiento de la imagen satelital como el uso de diversos índices espectrales para la delimitación de contornos y puntos de terreno para el control y corrección de límites, la cual fue implementada a partir de la temporada 2010. Asimismo, la medición considera los límites definidos por la CONAF para cada uno de los sistemas.

3. OBJETIVOS

El objetivo de este informe es presentar los resultados obtenidos en el mapeo de las superficies de los cuerpos lacustres para el mes de octubre del año 2023. El mapeo se realiza mediante el procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución espacial para determinar la superficie de las lagunas de los sistemas SONCOR y PEINE.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en la II Región de Antofagasta, Chile, en el sector Este del Salar de Atacama donde se encuentran los sistemas SONCOR y PEINE identificado en la RCA 226/2006 (Figura 1).

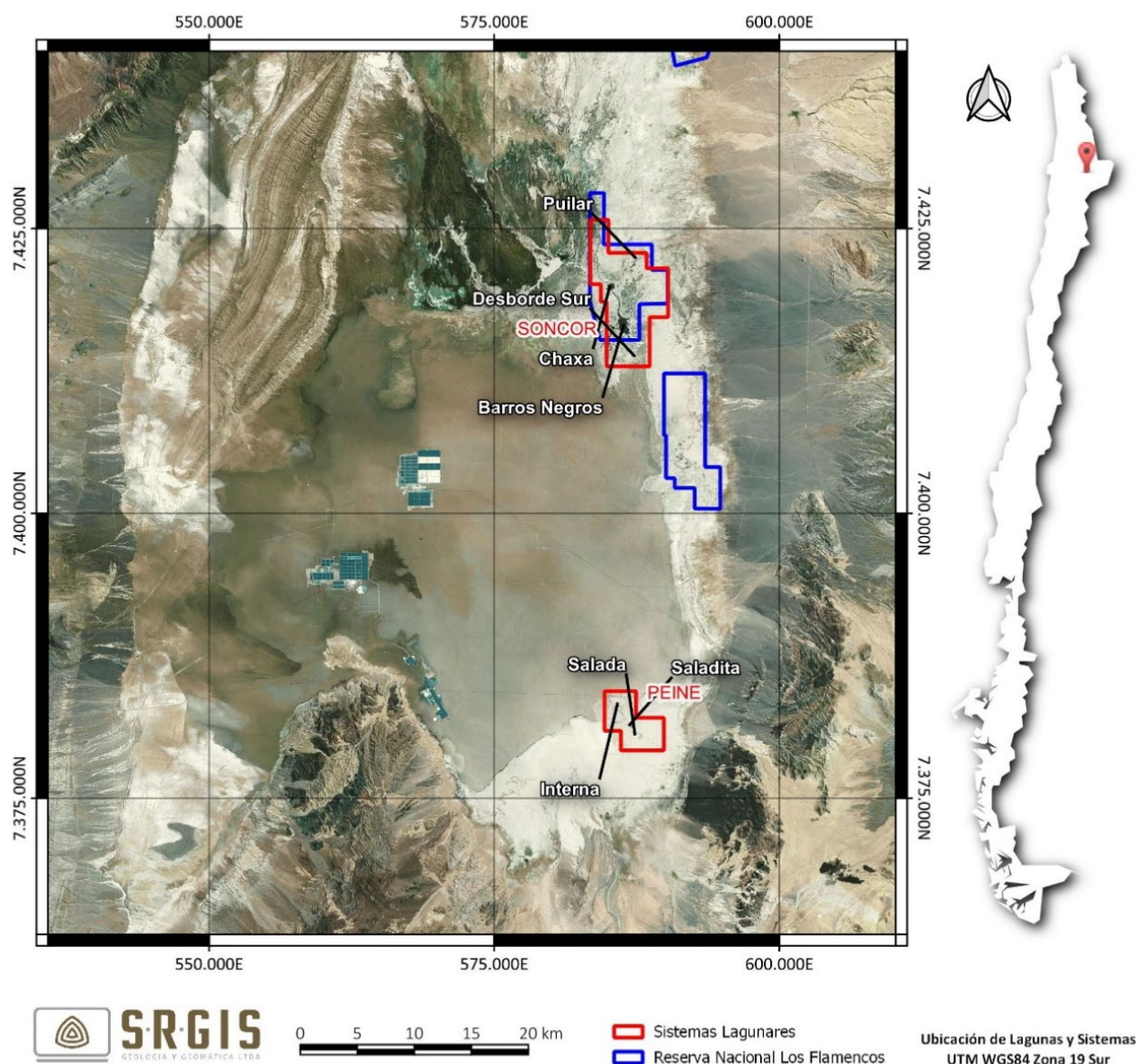


Figura 1: Área de estudio y ubicación de los sistemas lagunares y lagunas (UTM WGS84 19S). Elaboración propia.

El sistema SONCOR forma parte de la Reserva Nacional Los Flamencos y está compuesta por las lagunas Barros Negros, Chaxa y Puillar, además del Canal Burro Muerto. La laguna de mayor tamaño de este sistema es Barros Negros, que se extiende hacia el sur como una zona de inundación de gran extensión denominada “Desborde Sur”, considerada también para su mapeo. Barros Negros se conecta hacia el norte con la laguna Chaxa por medio del canal Burro Muerto. La Laguna Puillar se ubica al noreste de la de las lagunas mencionadas anteriormente.

El sistema PEINE está formado por dos lagunas distribuidas de sureste a noroeste y conectadas entre sí por un canal, denominadas Salada y Saladita, esta última tiene un desborde hacia el noroeste llamado Desborde Laguna Interna.

4.2. MATERIALES, SOFTWARE Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para este estudio se cuenta con una imagen satelital de alta resolución espacial que posee píxeles que cubren un área de 4 m² por píxel (2 x 2 m) para las bandas multispectrales y que además posee una banda pancromática que cubre un área de 0,25 m² por píxel (0,5 x 0,5 m). La imagen corresponde al sensor

WorldView-3 y fue capturada el día 04 de octubre de 2023. El resumen de las características de esta imagen puede verse en la Tabla 2:

Tabla 2: Principales características de la imagen WorldView-3.

| Rango Espectral | Banda | Resolución Espacial |
|------------------------------|--------------------|---------------------|
| Visible | Azul | 2 mts. |
| Visible | Verde | 2 mts. |
| Visible | Rojo | 2 mts. |
| Infrarrojo Cercano | Infrarrojo Cercano | 2 mts. |
| Visible + Infrarrojo Cercano | Pancromática | 0,5 mts. |

La Figura 2 muestra las combinaciones RGB Color Real e Infrarrojo Color de la imagen WorldView-3 en el sistema SONCOR.

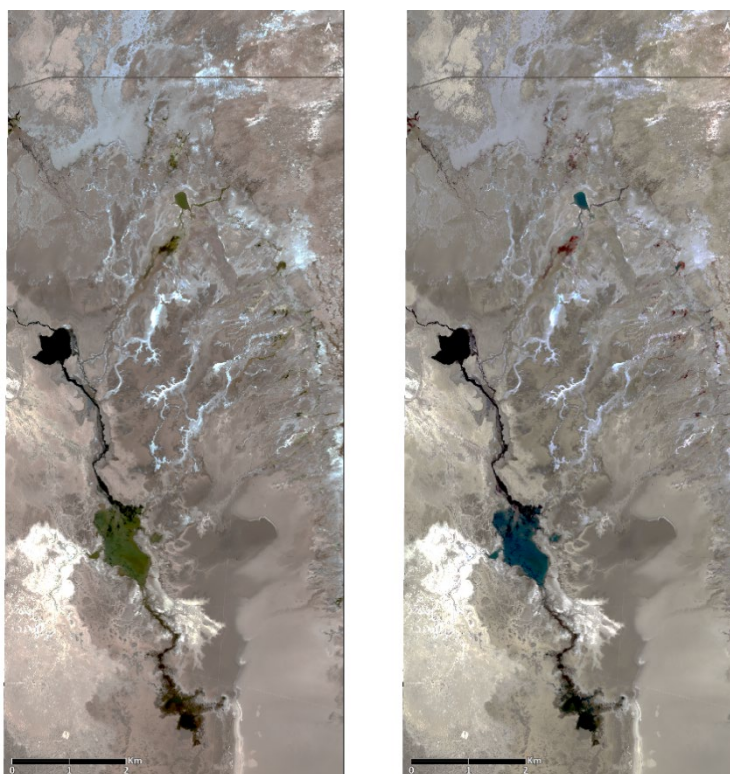


Figura 2: Imagen WorldView-3 Color Real (izquierda) e Infrarrojo Color (derecha) del sistema SONCOR.

El procesamiento se realizó utilizando ENVI 5.7 (NV5 Geospatial), software especializado en procesamiento de imágenes aéreas y satelitales. La confección de mapas se realizó en el software QGIS 3.22.

4.3. PARÁMETROS PARA CARACTERIZAR EL ESTADO Y EVOLUCIÓN DE LAS VARIABLES AMBIENTALES

El parámetro considerado para caracterizar el estado y evolución de las lagunas es la medición de superficie. De acuerdo a lo señalado en la RCA N°226/2006, la superficie debe ser determinada sobre la base de imágenes satelitales y, según complementa la resolución N°244/2010, la delimitación de los bordes de cada laguna se apoyará en la información generada en terrenos sobre la base de puntos de control.

4.4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS

La medición de las superficies lacustres se realizó según la metodología establecida en la Resolución exenta N°244/2010, a partir de imágenes de alta resolución espacial, aplicándose índices y transformaciones espectrales.

La Figura 3 resume la metodología del procesamiento de las imágenes satelitales. La fusión pancromática implica el remuestreo de la imagen multiespectral de 2 metros de resolución por píxel a 0,5 metros de resolución utilizando la banda Pancromática. En los siguientes apartados se detallará cada paso de la metodología utilizada. Debido a que se crean cuerpos de agua provenientes de diferentes índices (clasificación de umbrales) antes de vectorizarlos se realiza una fusión de clases para que unificar el nombre de la clase “agua”.

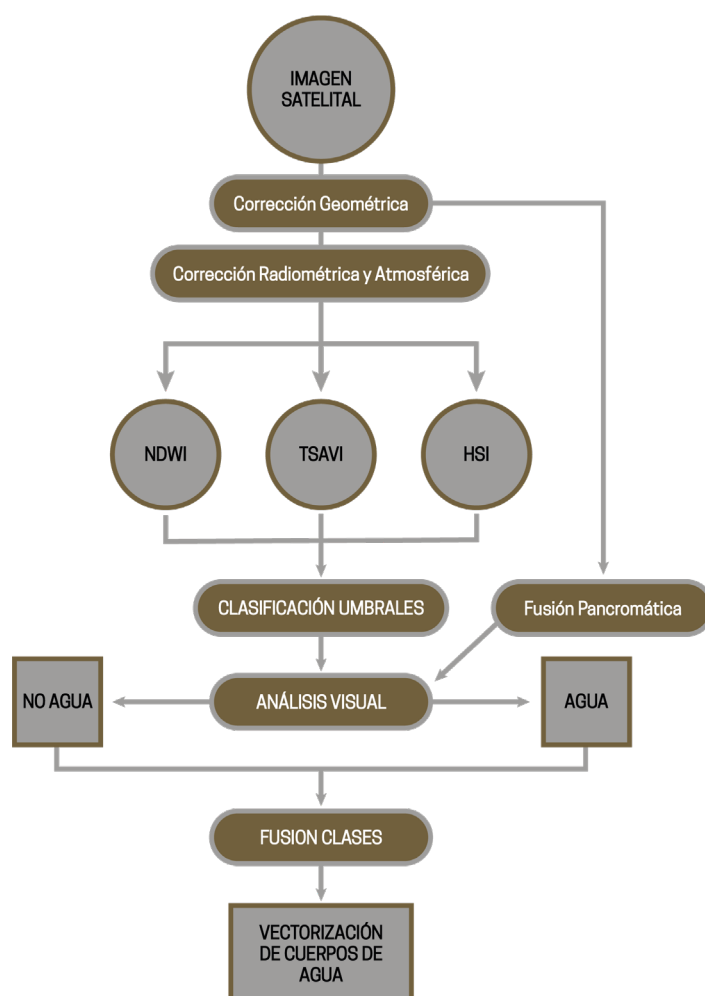


Figura 3: Metodología para la clasificación de cuerpos de Agua. Elaboración Propia.

4.5.1. Análisis de Imágenes Satelitales

Se realizó la solicitud de captura de una imagen satelital de alta resolución para el mes de octubre de 2023 por la constelación de satélites de la compañía MAXAR, obteniéndose una imagen WorldView-3 del día 04 de octubre. Las características de esta imagen se encuentran en la Tabla 2. La imagen satelital se procesó bajo el sistema de coordenadas UTM WGS84 Zona 19 Sur. Mediante el uso del software especializado (ENVI 5.7) se calcularon de índices espectrales NDWI y TSAVI además de la transformación IHS (Intensity Hue Saturation / Intensidad Tono Saturación).

4.5.1.1 Corrección Geométrica

La corrección geométrica corresponde a la ortorectificación de la imagen satelital, lo cual corrige las deformaciones por sensor y por topografía, para llevar a cabo este proceso se utilizan parámetros de la imagen que vienen incluidos en su metadata y un modelo digital de elevación (para este preprocesamiento se empleó el DEM Alos-Palsar).

4.5.1.2 Corrección Radiométrica y Atmosférica

Los índices espectrales son concebidos considerando la forma de la curva espectral obtenida en laboratorio mediante un espectro radiómetro que mide la reflectancia de dicho material en distintas longitudes de onda, es por esto, que la imagen satelital debe corregirse para convertir los datos originales a un formato de reflectancia a la superficie de la tierra.

a. Radiancia

Las imágenes satelitales vienen en un formato numérico denominado niveles “DN” (Digital Number). El valor del píxel en este formato contiene información del material en la superficie de la tierra (agua, vegetación, suelo u otro), la influencia de la atmósfera y de las compensaciones predefinidas por el sensor. Este dato debe transformarse a unidades de energía reflejada (radiancia) mediante una corrección radiométrica.

La corrección radiométrica elimina los parámetros preestablecidos de ganancia y pérdida del sensor, por lo tanto, se generan datos comparables entre distintos sensores. Tras esta corrección las imágenes se convierten de DN a Radianza (o Radiancia) que es el flujo radiante que se refleja desde el suelo hacia el sensor, se mide en $W/(m^2 sr^1 \mu m)$ y es la magnitud que detecta el sensor.

La radiancia espectral se calcula a partir de los parámetros específicos entregados por el proveedor y que se encuentran en los metadatos de los archivos de la imagen satelital. Krauss (2003) definió la siguiente ecuación para aplicar estas correcciones:

$$L_{\lambda}(x, y) = \frac{K_{\lambda} \cdot ND_{\lambda}(x, y)}{\Delta_{\lambda}}$$

Donde:

$L_{\lambda}(x, y)$: es la radiancia espectral recibida por el sensor ($W/(m^2 sr \mu m)$)

K_{λ} : son los niveles digitales de pixeles de la imagen satelital.

$ND_{\lambda}(x, y)$: es el factor absoluto de calibración radiométrica ($W/m^2 sr$)

Δ_{λ} : es el ancho de banda efectivo (μm)

b. Reflectancia

Adicionalmente, debido a que los datos radiométricos contienen información de la superficie terrestre como de la atmósfera, se requiere aplicar una corrección que minimice estos efectos de la energía reflejada e incidente en los valores de cada píxel para obtener una imagen de reflectancia superficial, este proceso se denomina corrección atmosférica.

La corrección atmosférica elimina los efectos de la atmósfera en los datos, en este formato los datos (curvas espectrales de los pixeles) son comparables con curvas espectrales de laboratorio. Tras esta corrección las imágenes se convierten de Radiancia a Reflectancia (o Reflectancia Relativa).

La Figura 4 resume el esquema de datos de la imagen y las correcciones necesarias.

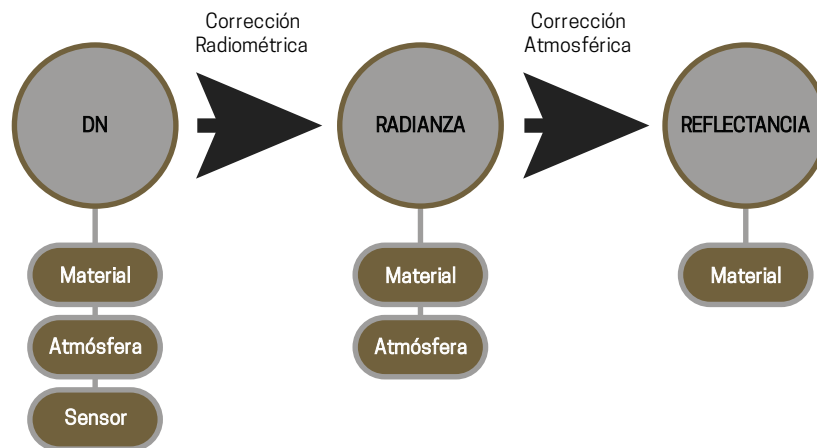


Figura 4: Formato de datos en imágenes satelitales y sus correcciones. Elaboración Propia.

4.5.1.3 Fusión de la Imagen

Para mejorar la resolución espacial de la imagen multispectral obtenida desde el satélite y con el fin de obtener un mayor detalle de información se realiza un proceso denominado “Spectral PanSharpening” que mejora la resolución espacial de una imagen multispectral utilizando la banda pancromática. Este producto se utiliza como apoyo para el análisis visual (Figura 5).

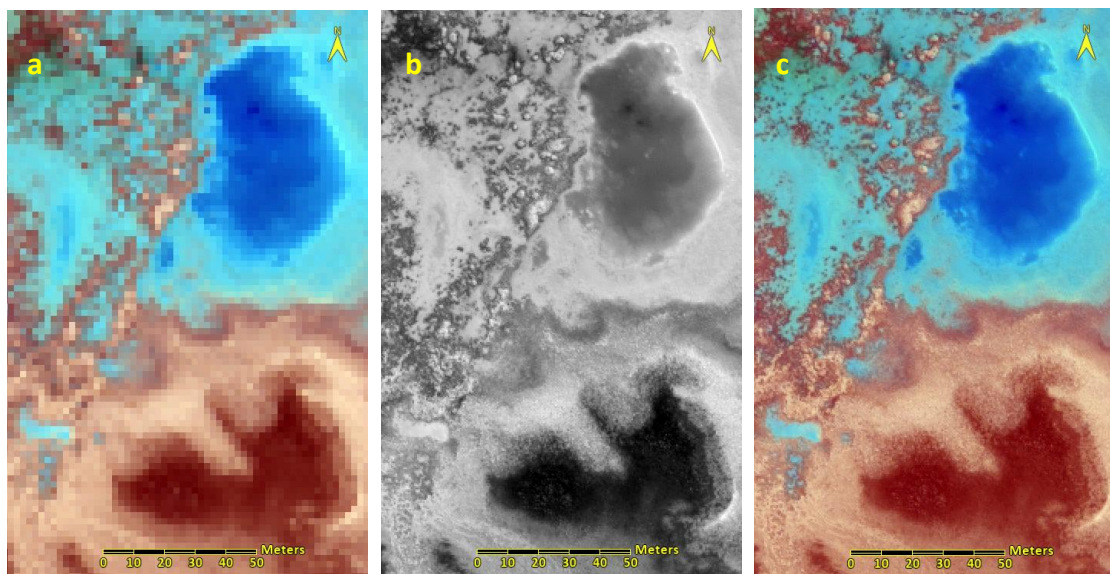


Figura 5: **(a)** Combinación RGB Infrarrojo Color de la imagen multispectral original (resolución de 2 metros), **(b)** Imagen Pancromática original con resolución de 0,5 metros y **(c)** Combinación RGB Infrarrojo Color de la imagen Multispectral fusionada con la banda Pancromática. Elaboración Propia.

4.5.1.4 Índices Espectrales

Para el mapeo y delimitación de las superficies lacustres se utilizaron los siguientes índices espectrales: Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (TSAVI) y la transformación IHS, los que se detallan a continuación.

a. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

El NDWI (Normalized Difference Water Index) (McFeeters, 1996) maximiza la respuesta de las características espectrales del agua al usar la longitud de onda correspondiente al verde (550 nm, valores de reflectancia altos para el agua) y la baja reflectancia del agua en el NIR (850 nm, infrarrojo cercano). El algoritmo del NDWI es el siguiente:

$$NDWI = \frac{(VERDE - NIR)}{(VERDE + NIR)}$$

Donde:

VERDE : Reflectancia de la imagen en el rango espectral verde

NIR : Reflectancia de la imagen en el rango espectral infrarrojo cercano

Este índice normalizado entrega valores acotados para los píxeles entre -1 y 1. Como la reflectancia del agua en la banda verde debe ser mayor a la de la banda NIR, los valores mayores a cero podrían ser considerados a la hora de clasificar el agua con este índice, sin embargo, debido a la mezcla de reflectancia del agua con el suelo en cuerpos más someros, podrían considerarse valores menores a cero (pero cercanos a cero) como coberturas de agua, en otras palabras, el agua al tener una reflectancia del verde mayor a la del infrarrojo cercano, el índice debería entregar valores positivos para el agua (por el algoritmo VERDE-NIR), pero las sales y el suelo tienen el infrarrojo cercano mayor al verde, entonces al mezclarlos espectralmente podemos considerar valores negativos para agua en zonas someras.

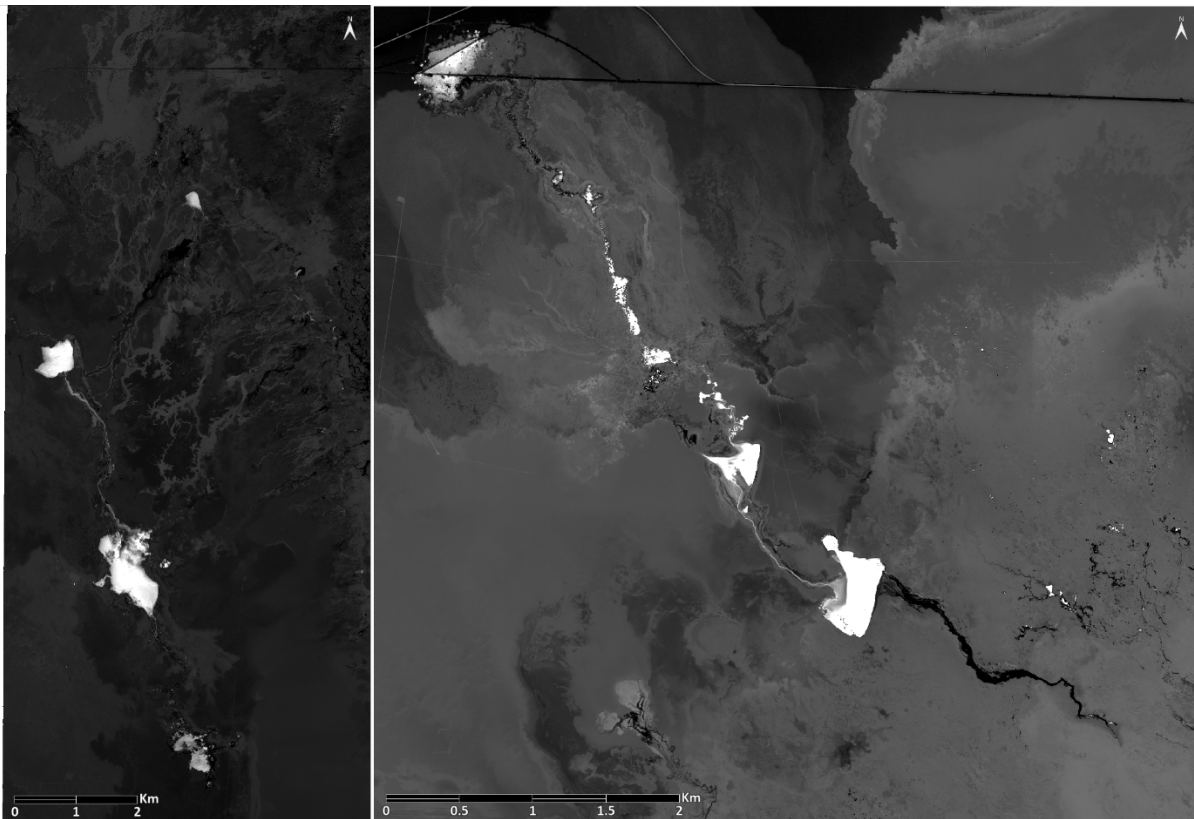


Figura 6: NDWI en Soncor (izquierda) y Peine (derecha). Elaboración Propia.

b. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Transformado (TSAVI)

El TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index) (Baret, 1989) pertenece a una familia de índices que modifican el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) cuyo objetivo es minimizar al máximo los efectos del suelo sobre la vegetación utilizando valores relacionados a la línea del suelo en los píxeles de la imagen (Gilbert, 1997). El índice TSAVI se define por la siguiente ecuación:

$$TSAVI = \frac{a \cdot (NIR - a \cdot ROJO - b)}{ROJO + a \cdot NIR - ab + 0,08 \cdot (1 + a^2)}$$

Donde:

ROJO : es la reflectancia en el rango espectral del rojo

NIR : es la reflectancia en el rango espectral del infrarrojo cercano

a : es la pendiente de la línea del suelo

b : es la intersección de la línea del suelo con el eje Y

La Figura 7 muestra un ejemplo de un gráfico de dispersión de los píxeles al graficar en el eje X la banda NIR y en el eje Y la banda roja, la línea del suelo corresponde a la tendencia de los píxeles que corresponden a suelo (valores similares en X e Y). Conociendo la ecuación de esta línea se pueden obtener los valores a y b.

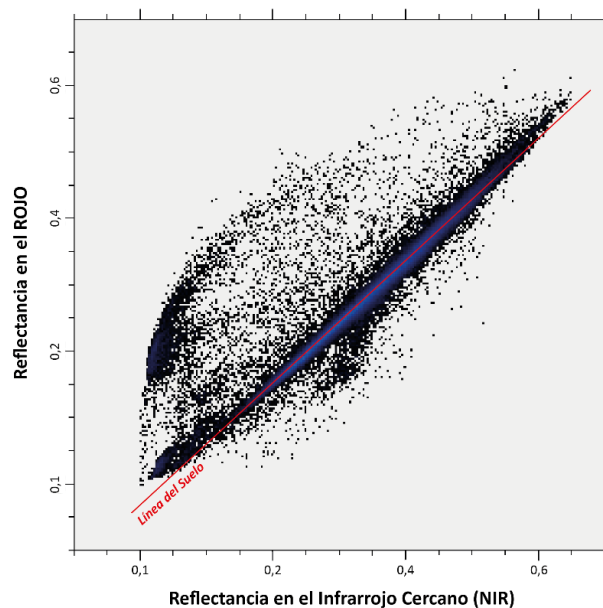


Figura 7: Línea del Suelo y Diagrama de dispersión de los píxeles para las bandas NIR (eje X) y Roja (eje Y)

La Figura 8 muestra los diagramas de dispersión del suelo en las bandas NIR (eje X) y ROJA (eje Y) para cada área de estudio (SONCOR y PEINE) a partir de los cuales se calcularon los valores de a y b para la generación del TSAVI.

Este índice se utiliza como complemento del método expuesto anteriormente en los sectores donde no se observa un borde definido de los cuerpos de agua, dado que para algunas configuraciones presenta un mejor contraste entre suelo y agua. Esto deriva en que no se define un valor específico para distinguir entre suelo y agua, sino que se utiliza como herramienta visual para la determinación de los bordes difusos.

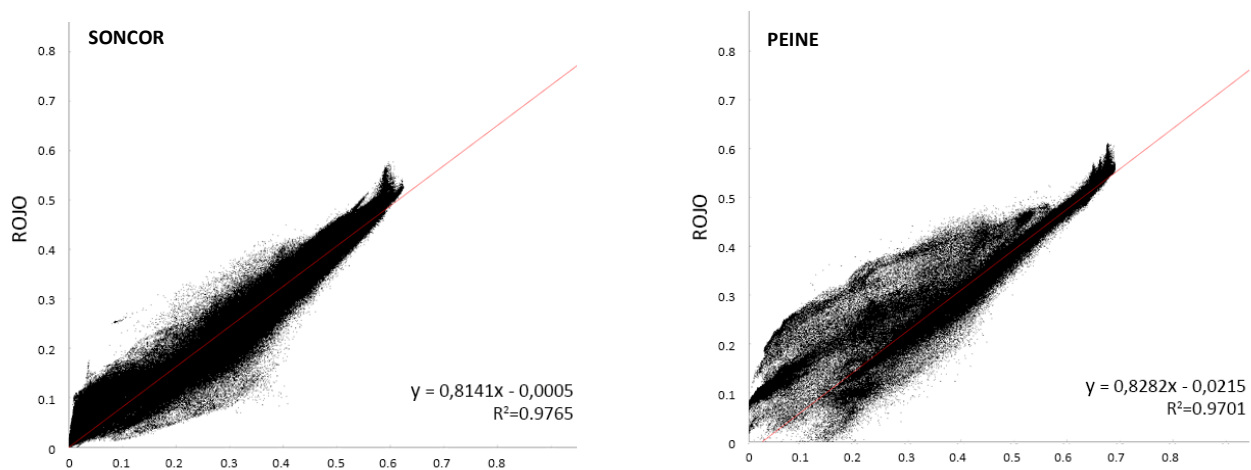


Figura 8: Diagramas de dispersión para pixeles de suelo (Eje X: NIR; Eje Y: ROJO) para los sistemas SONCOR y PEINE

Basado en la ecuación de la línea de tendencia (regresión lineal simple) de cada diagrama (Figura 8), se extraen los parámetros a y b para el cálculo del TSAVI para cada sistema (Tabla 3). La Figura 9 muestra los índices TSAVI para los dos sistemas.

Tabla 3: Factores a y b para el cálculo del TSAVI

| SISTEMA | Factor a | Factor b |
|---------|----------|----------|
| SONCOR | 0.8141 | - 0.0005 |
| PEINE | 0.8282 | - 0.0215 |

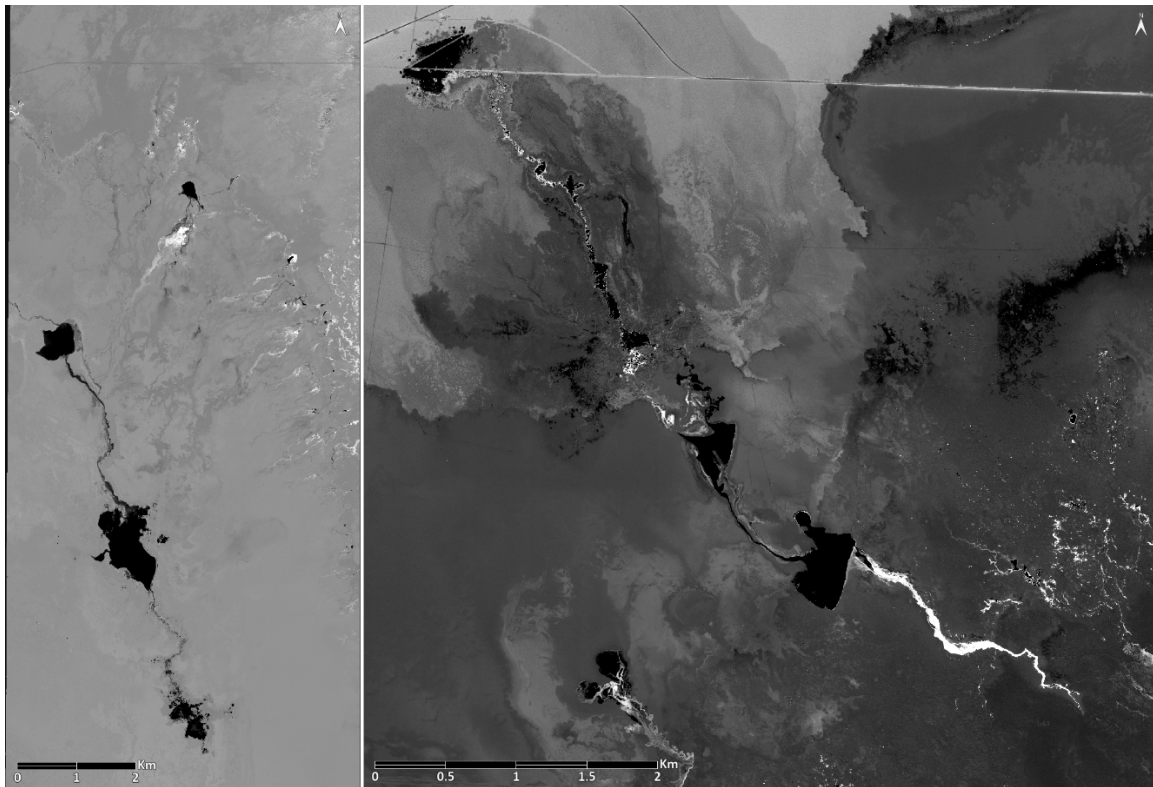


Figura 9: TSAVI en Soncor (izquierda) y Peine (derecha). Elaboración Propia.

c. Transformación IHS

Este proceso transforma los valores de una composición de bandas RGB en una forma alternativa de representar el color, basado en sus propiedades de intensidad, tono y saturación (IHS por sus siglas en inglés: Intensity, Hue & Saturation). Su utilidad para la identificación se basa en su potencialidad para la discriminación de algunos rasgos de carácter cromático (Chuvieco, 2002). Al igual que el TSAVI, esta transformación se utiliza para complementar el mapeo con el índice NDWI en sectores donde el borde es difícil de determinar y donde esta transformación presenta una mayor diferencia entre suelo y agua.

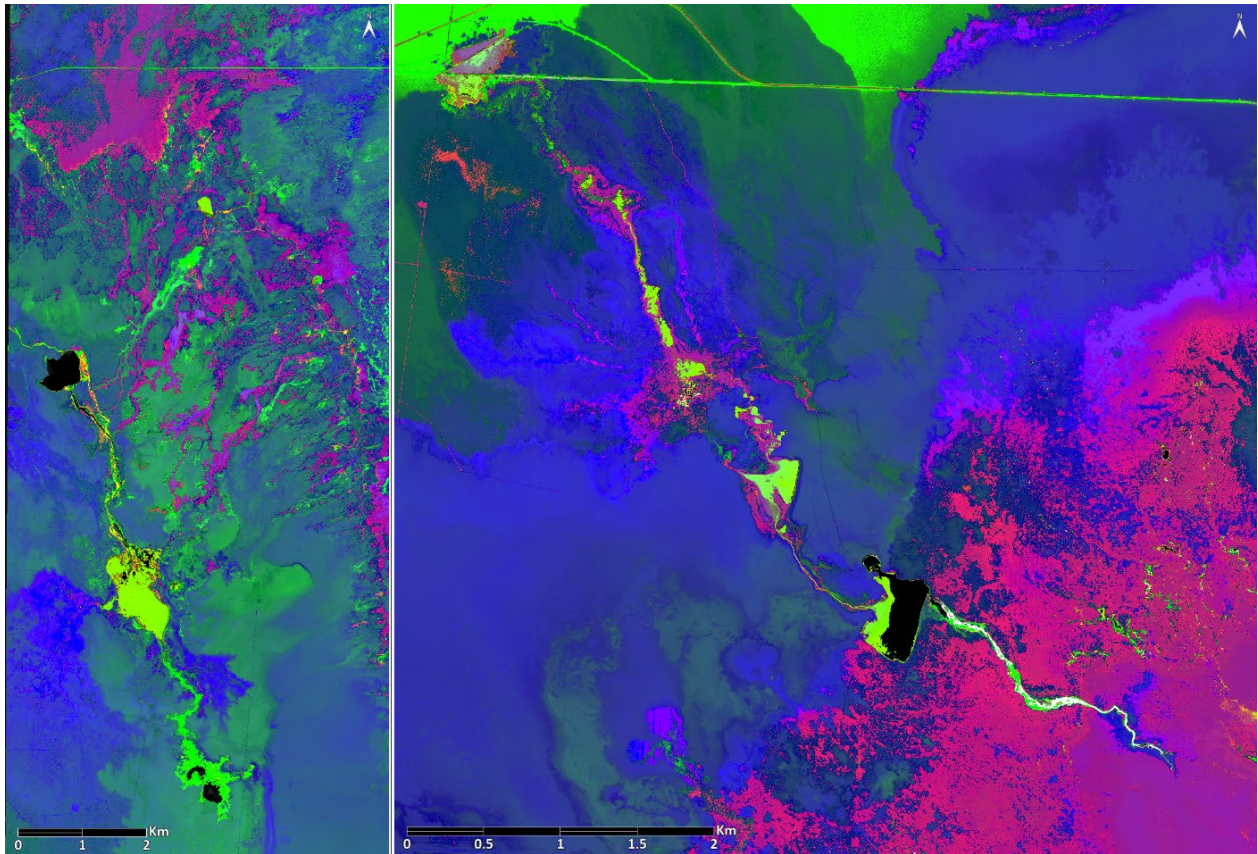


Figura 10: Transformación HSI en RGB en Soncor (izquierda) y Peine (derecha). Elaboración Propia.

4.5.2. Contornos de las Lagunas

El mapeo de los cuerpos de agua se realizó mediante una reclasificación de los valores calculados para el índice NDWI, esta consiste en seleccionar un umbral dentro del histograma del índice que corresponda a superficies lacustres identificadas visualmente en la imagen satelital. El resultado de este mapeo obtiene un producto en formato ráster con una resolución de 2 x 2 metros. Posteriormente mediante inspección visual y con ayuda del índice TSAVI y la transformación IHS (Intensidad, Tono y Saturación) se ajusta la clasificación en los sectores con bordes poco definidos. De esta manera el índice TSAVI y las transformaciones IHS se utilizaron sólo donde el índice NDWI no fue suficiente para el mapeo de cuerpos de agua.

La Tabla 4 resume los umbrales utilizados para cada sistema de lagunas. N/A implica que no se utilizó el índice para el mapeo de las lagunas.

Tabla 4: Umbrales utilizados con los índices NDWI, TSAVI e IHS. Elaboración Propia.

| SISTEMA | NDWI | TSAVI | SATURACIÓN | INTENSIDAD |
|---------|--------------|--------------|------------|------------|
| SONCOR | ≥ -0.10 | ≤ 0.075 | \leq N/A | \geq N/A |
| PEINE | ≥ -0.20 | ≤ 0.125 | \leq N/A | \geq N/A |

El análisis para cada laguna se realizó en un área predeterminada que abarca la laguna completa y otros cuerpos de agua, no obstante, el área mapeada para cada laguna sólo considera los límites establecidos por CONAF. La Figura 11 muestra el corte realizado a la imagen satelital para el cálculo de los índices espectrales.

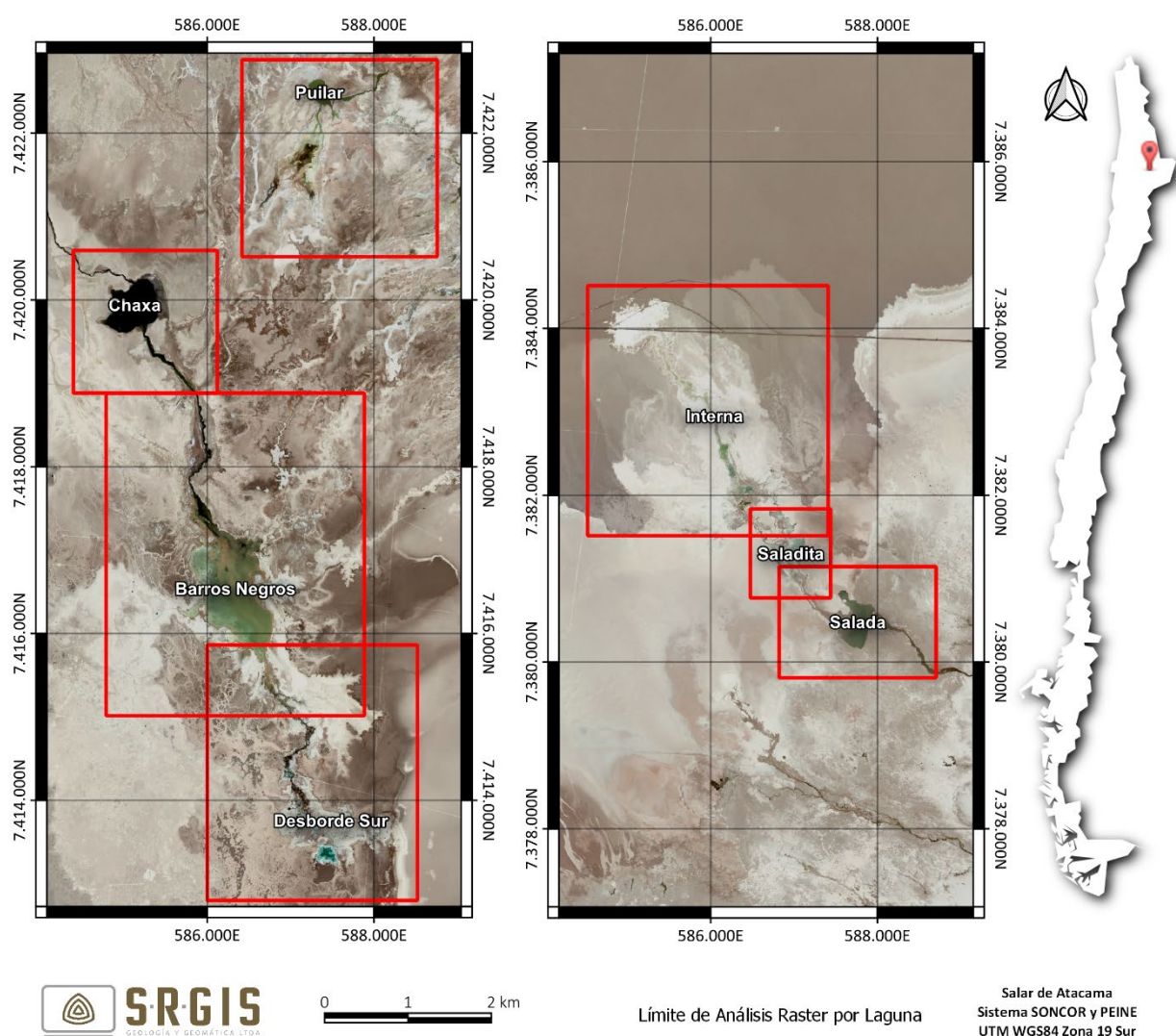


Figura 11: Límites de análisis ráster para cada laguna en los sistemas SONCOR y PEINE.

4.5.3. Límites Oficiales de las Lagunas para el Cálculo de Superficies

Para efectos de la medición de las superficies, la delimitación consideró la definición de límites de cada laguna según criterios de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), expuestos en los informes de monitoreo efectuados dentro del marco del convenio SQM-CONAF “Hábitat y Poblaciones de Avifauna del Salar de Atacama” y por límites presentados en informes previos (informe año 2009 y año 2010) que han sido aprobados mediante una mesa de trabajo compuesta por el titular y por distintas autoridades tales como

CONAMA, CONAF, DGA y SAG y que se han mantenido hasta la fecha. Estos límites o zonas son empleados para diferenciar el cuerpo de la laguna, de los canales de entrada y salida por donde fluye el agua, con la finalidad de tener una superficie definida y comparable entre distintos años.

La Tabla 5 y la Tabla 6 muestran las coordenadas Este y Norte (WGS84 19 Sur) de los vértices de las líneas que limitan cada laguna, así como la entidad que definió dichos límites. La Figura 12 y la Figura 13 muestran los límites sobre la imagen.

Tabla 5: Vértices de las líneas que delimitan los límites de cada laguna Enel sistema Soncor

| Sistema | Laguna | Vértice | Este | Norte | Definición |
|---------|---------------|---------|---------|-----------|----------------------|
| SONCOR | Chaxa | V 1.1 | 585.074 | 7.420.189 | CONAF |
| | | V 1.2 | 585.116 | 7.420.185 | CONAF |
| | | V 1.3 | 585.220 | 7.420.296 | CONAF |
| | | V 2.1 | 585.203 | 7.419.607 | CONAF |
| | | V 2.2 | 585.302 | 7.419.607 | CONAF |
| | Barros Negros | V 1.1 | 585.821 | 7.417.181 | CONAF |
| | | V 1.2 | 586.146 | 7.417.405 | CONAF |
| | | V 2.1 | 586.497 | 7.415.766 | CONAF |
| | | V 2.2 | 586.740 | 7.415.795 | CONAF |
| | | V 3.1 | 586.784 | 7.416.689 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 3.2 | 586.750 | 7.416.465 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 4.1 | 585.751 | 7.416.340 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 4.2 | 585.663 | 7.416.166 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 5.1 | 586.438 | 7.415.838 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 5.2 | 586.535 | 7.415.801 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | Puilar | V 1.1 | 587.523 | 7.422.529 | CONAF |
| | | V 1.2 | 587.523 | 7.422.331 | CONAF |
| | | V 2.1 | 587.411 | 7.422.279 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 2.2 | 587.534 | 7.422.278 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 3.1 | 587.331 | 7.422.342 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 3.2 | 587.369 | 7.422.340 | Mesa de Trabajo 2010 |

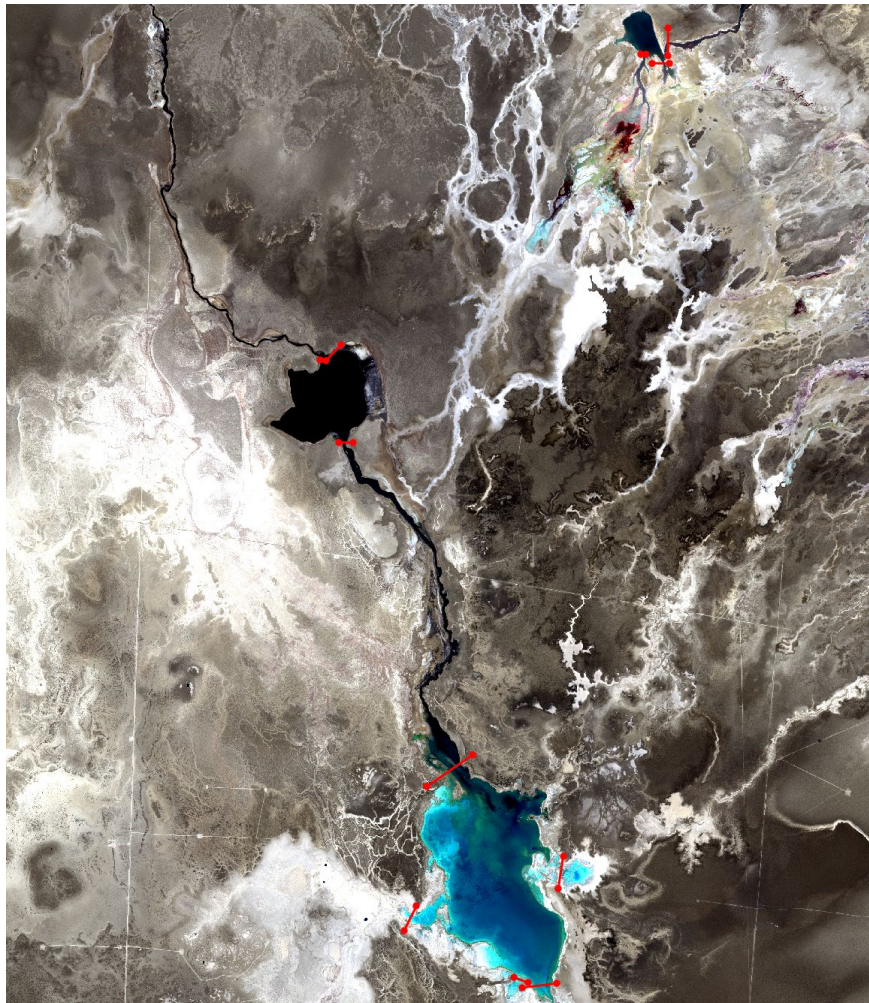


Figura 12: Límites de las lagunas en el sistema Soncor

Tabla 6: Vértices de las líneas que delimitan los límites de cada laguna Enel sistema Peine

| Sistema | Laguna | Vértice | Este | Norte | Definición |
|---------|----------|---------|---------|-----------|----------------------|
| PEINE | Salada | V 1.1 | 587.155 | 7.380.528 | CONAF |
| | | V 1.2 | 587.494 | 7.380.642 | CONAF |
| | | V 2.1 | 588.291 | 7.380.247 | CONAF |
| | | V 2.2 | 588.428 | 7.380.416 | CONAF |
| | | V 3.1 | 587.959 | 7.380.591 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 3.2 | 587.970 | 7.380.610 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 4.1 | 587.576 | 7.380.512 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 4.2 | 587.576 | 7.380.551 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | Laguna | Vértice | Este | Norte | Definición |
| PEINE | Saladita | V 1.1 | 586.795 | 7.381.626 | CONAF |
| | | V 1.2 | 587.096 | 7.381.620 | CONAF |
| | | V 2.1 | 586.610 | 7.381.448 | CONAF |
| | | V 2.2 | 586.720 | 7.381.473 | CONAF |
| | | V 3.1 | 587.015 | 7.380.917 | CONAF |
| | | V 3.2 | 587.167 | 7.380.918 | CONAF |
| | Interna | V 1.1 | 586.791 | 7.381.997 | Mesa de Trabajo 2010 |
| | | V 1.2 | 586.785 | 7.381.938 | Mesa de Trabajo 2010 |

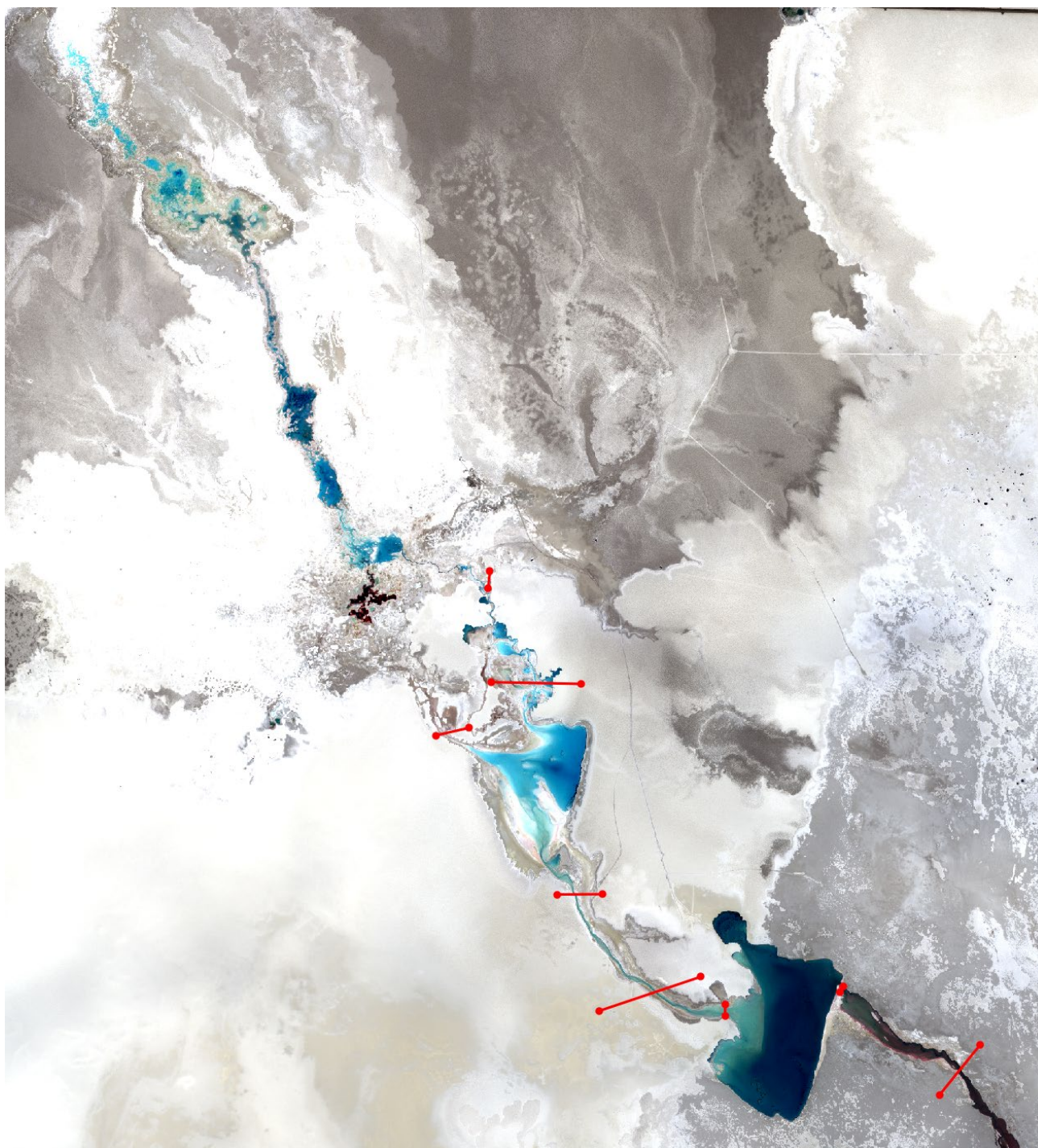


Figura 13: Límites de las lagunas en el sistema Peine

5. PUNTOS DE CONTROL

El seguimiento de la variable cobertura lagunar que tiene comprometido SQM se basa en varias técnicas en base a la RCA 226/2006 y complementado posteriormente según la RES. EX. N°244/2010 de la COREMA de la Región de Antofagasta. Una de ellas corresponde al análisis abordado en el presente informe y que se basa en el cálculo de índices mediante el uso de una imagen satelital de alta resolución. Pero también se realiza, en el marco del seguimiento ambiental recogido también en la RCA 226/2006, la medición mediante estacas perimetrales con frecuencia trimestral (según lo estipulado en el convenio SQM-CONAF de 2004) y el

levantamiento topográfico del perímetro lagunar de los bordes de los cuerpos lagunares, este último se realiza cada 5 años.

La metodología de la medición con estacas perimetrales consiste en medir desde la estaca la distancia más cercana hacia el cuerpo de agua en el caso de que la estaca se encuentre fuera del agua, o de manera inversa la distancia más cercana desde la estaca al contacto agua-salar. Para el período de octubre 2023 se realizó una campaña de toma de puntos de control específica además de control de estacas perimetrales en laguna Saladita.

Para esta campaña solo se proporcionaron puntos de control para los cuerpos de agua en el sistema PEINE, donde se indica la coordenada específica del punto de control, la cota y observaciones sobre la presencia y espesor de cuerpos de agua; se adjunta también una fotografía orientada y videos el 360° para tener una idea de la situación en terreno y poder mejorar el análisis de la imagen satelital; este trabajo fue realizado por la consultora ATyGeo los días 22 de septiembre para Interna y 24 de septiembre para Saladita.

6. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados del mapeo de las superficies lacustres de las lagunas de los sistemas SONCOR y PEINE para el período octubre 2023.

5.1 Sistema SONCOR

A partir del año 2016 se incorporó en las mediciones de superficie el área denominada “Desborde Sur”. Aunque no corresponde estrictamente a una laguna, al día de hoy se considera en la reportabilidad lagunar.

La Tabla 7 resume los resultados del mapeo de superficies de los cuerpos de agua en el Sistema SONCOR.

Tabla 7: Medición de superficies lagunares en el sistema SONCOR.

| Cuerpo | Superficie (m ²) |
|--|------------------------------|
| Laguna Chaxa | 278.722 |
| Laguna Barros Negros | 877.447 |
| Área de Inundación I (Barros Negros) | 2.702 |
| Área de Inundación II (Barros Negros) | 16.158 |
| Área de Inundación III (Barros Negros) | 648 |
| Puilar | 62.472 |
| Desborde Sur | 329.673 |

5.1.1. Laguna Chaxa

Chaxa se encuentra constituida por un cuerpo principal cuyo contorno se encuentra bien definido en la mayor parte de la laguna salvo en el borde este (Playa de Chaxa) donde mediante los índices no es posible una delimitación precisa por lo que los puntos de control se vuelven muy importantes para mejorar la delimitación (Figura 14). No fue posible realizar una campaña de toma de puntos de control para este período por restricciones de acceso a la reserva.

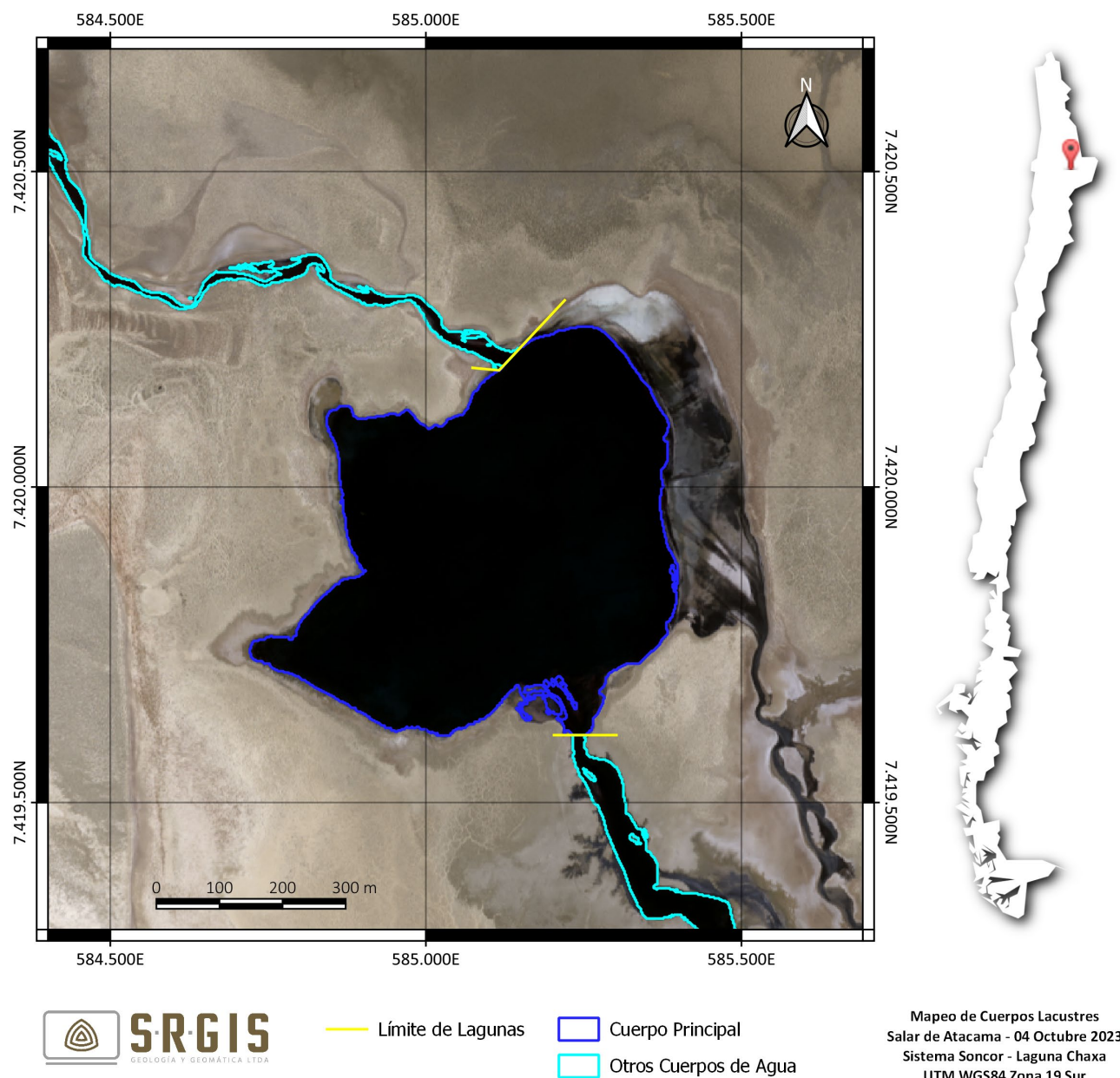


Figura 14: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Chaxa.

5.1.2. Laguna Barros Negros

La Laguna Barros Negros es el cuerpo de agua más grande del sistema SONCOR. Está constituido por un cuerpo principal y tres áreas de inundación, sin contar los cuerpos de agua en “Desborde Sur”. El perímetro del cuerpo principal está bien definido.

El área de inundación I, denominada “Cola de Pez”, se ubica al Oeste de la laguna y fue considerado a partir del límite establecido por la CONAF hacia el Oeste, este año presenta un área bastante pequeña como continuación del cuerpo principal y un pequeño cuerpo más alejado hacia el Oeste (Figura 15). Se consideraron también otras áreas de inundación que corresponden a las “Área de Inundación II”, al este de la laguna y “Área de Inundación III” al sur de la laguna. Es importante mencionar que, a la actualidad el área de inundación I o “Cola de pez” experimenta una migración activa hacia zona de Desborde Sur. No fue posible realizar una campaña de toma de puntos de control para este período por restricciones de acceso a la reserva.

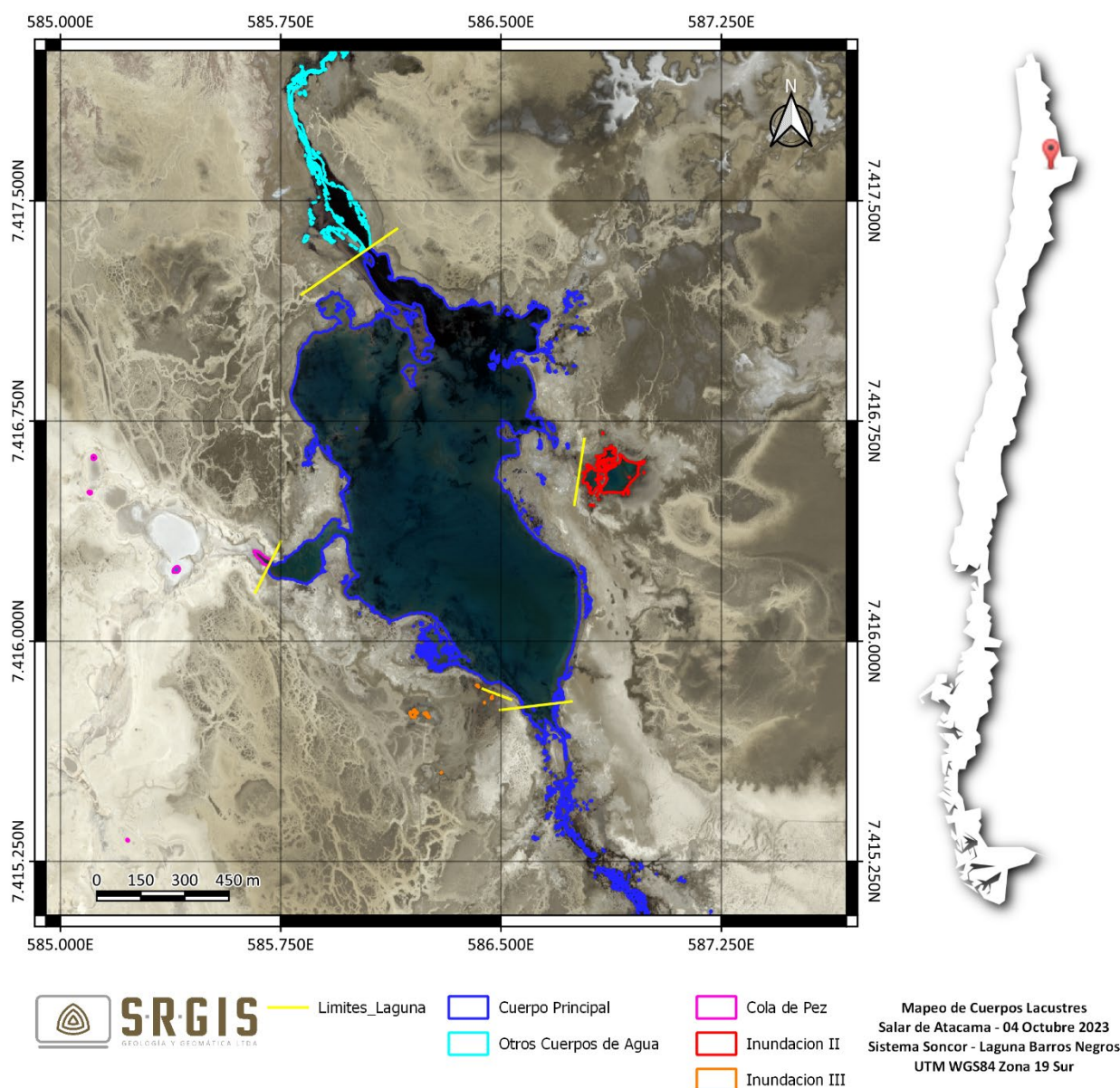


Figura 15: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Barros Negros.

5.1.3. Laguna Puilar

La laguna Puilar tiene un cuerpo principal bien definido pero su delimitación mediante los índices espectrales no es muy precisa, por lo que se vuelven importantes los puntos de control obtenidos en la laguna, así como por los puntos de control de las estacas del canal que se conecta por el Este al cuerpo principal. Mediante la observación de las tonalidades en las distintas combinaciones de banda se puede delimitar de mejor manera el cuerpo principal de esta laguna. (Figura 16). No fue posible realizar una campaña de toma de puntos de control para este período por restricciones de acceso a la reserva.

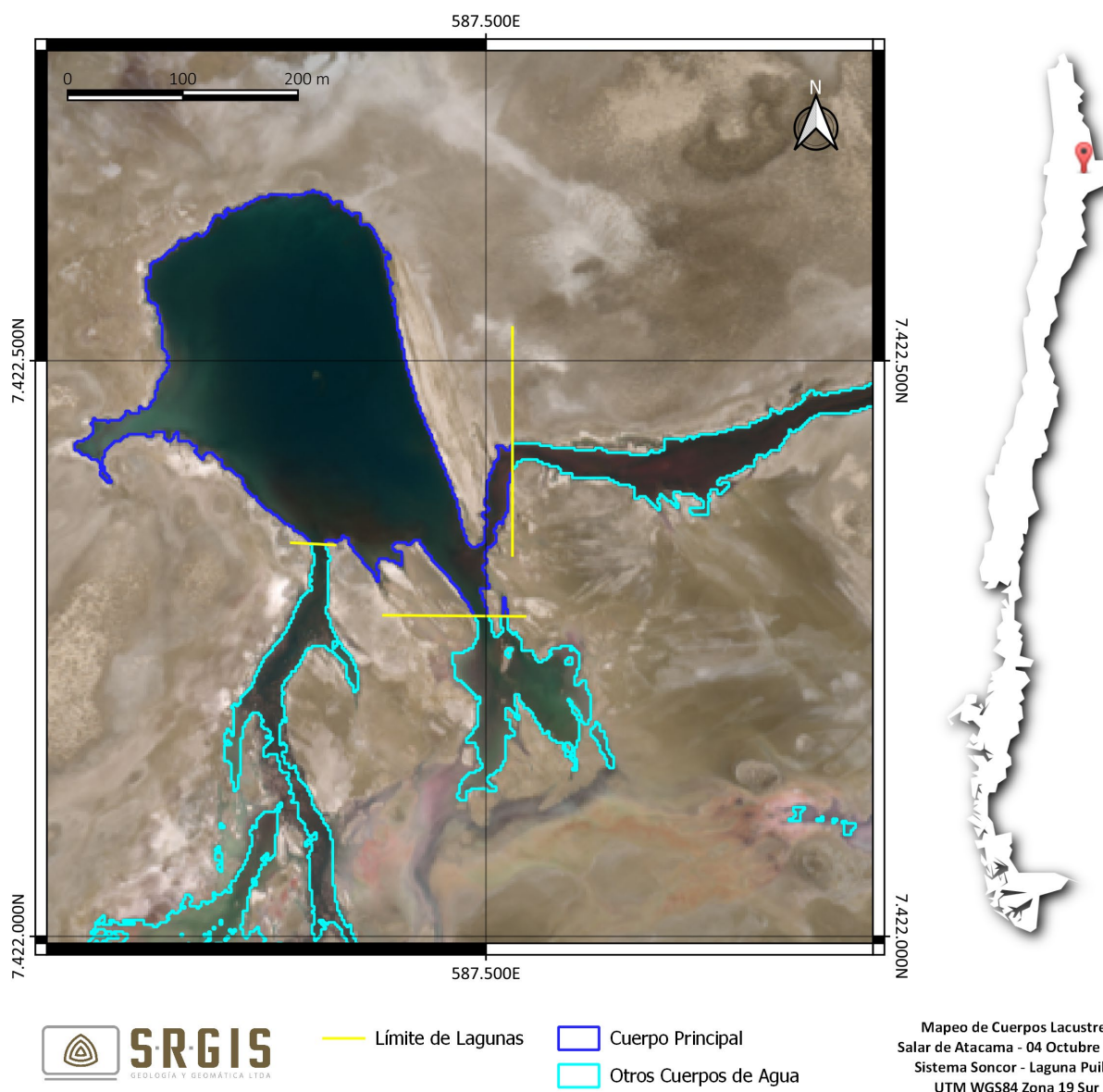


Figura 16: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Puilar.

5.1.4. Desborde Sur

Este cuerpo de agua fue incorporado al control y monitoreo desde el año 2016, corresponde a un cuerpo que se origina como desborde de la laguna Barros Negros, aunque no corresponde a una unidad regular (permanente) como las lagunas Chaxa, Barros Negros y Puilar. En general se observan numerosos cuerpos bien definidos pero cuyo límite es de difícil determinación (Figura 17). No fue posible realizar una campaña de toma de puntos de control para este período por restricciones de acceso a la reserva.

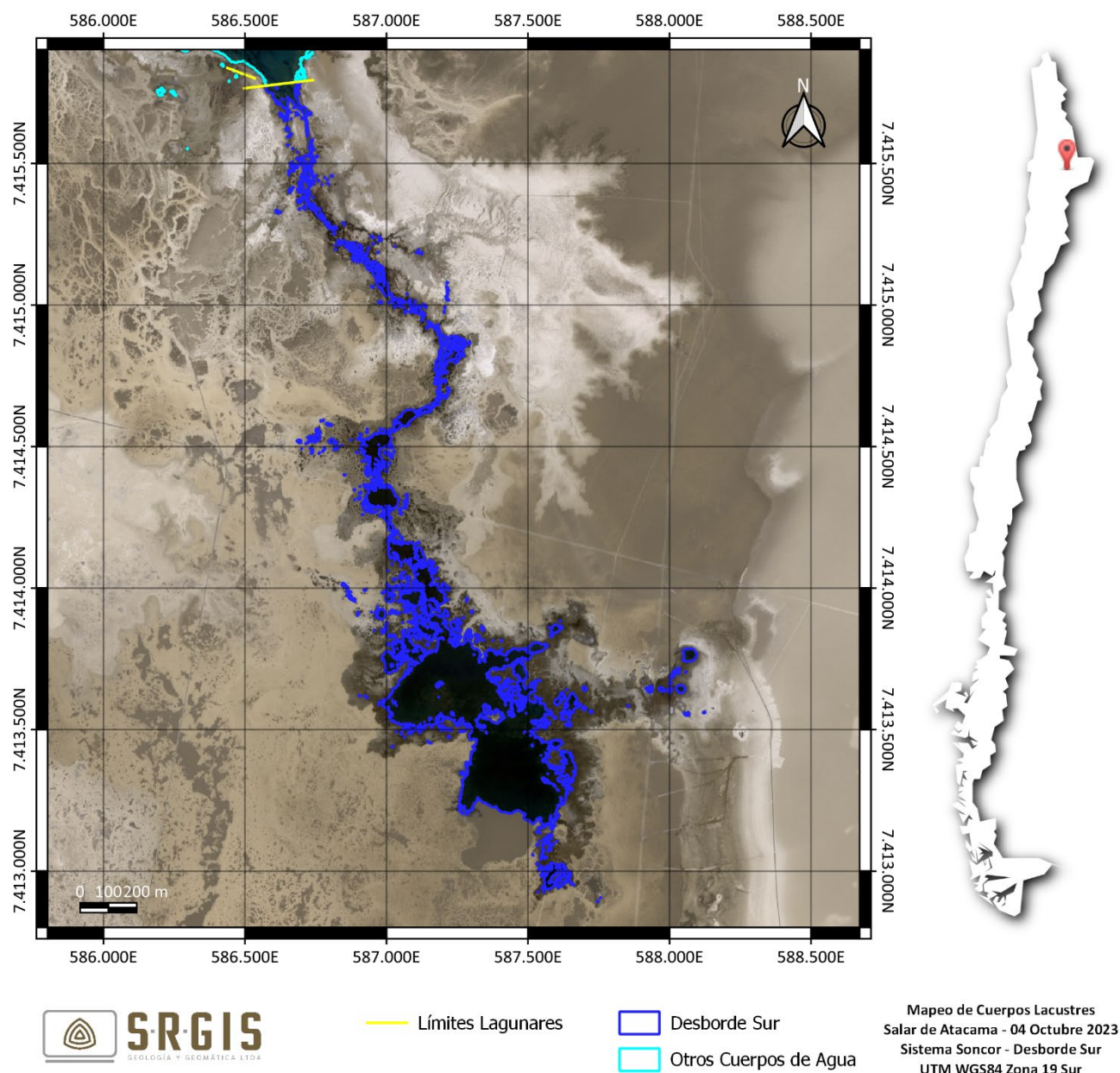


Figura 17: Mapeo de Cuerpos de Agua en Desborde Sur.

5.2 Sistema PEINE

El sistema PEINE está compuesto por las lagunas Salada, Saladita y Desborde Laguna Interna, la Tabla 8 presenta los resultados obtenidos para el mapeo de los cuerpos de agua en este sistema.

Tabla 8: Medición de superficies lagunares en el sistema PEINE.

| Cuerpo | Superficie (m²) |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Salada | 171.571 |
| Canal de Recarga (Salada) | 23.180 |
| Canal de Descarga (Salada) | 4.497 |
| Saladita | 86.540 |
| Interna | 163.682 |

5.2.1. Laguna Salada

La laguna Salada está compuesta por un cuerpo principal y 2 canales superficiales. El cuerpo principal muestra contornos bien definidos, a diferencia de los canales de recarga y descarga que tiene límites un poco más difusos (Figura 18). No fue posible realizar una campaña de toma de puntos de control para este período por restricciones de acceso a la reserva.

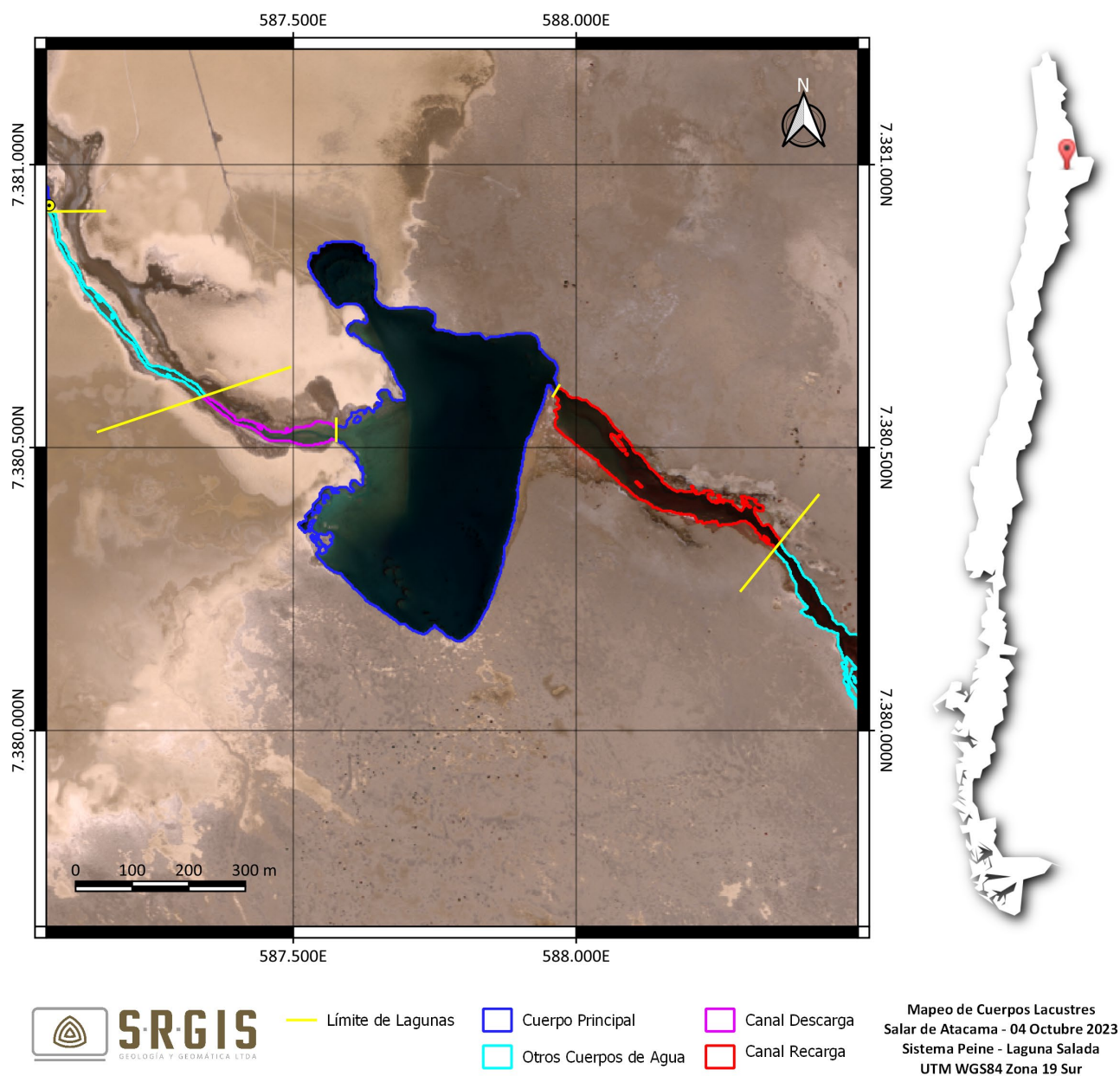


Figura 18: Mapeo de Cuerpos de Agua en la Laguna Salada.

5.2.2. Laguna Saladita

La laguna Saladita presenta contornos más difusos que la laguna Salada, aunque es posible diferenciar los límites de los cuerpos de agua, es sector de playa (al centro y al oeste) se vuelve complejo de delimitar por presencia de cuerpos muy someros de agua, para mejorar la delimitación en esta zona es importante la toma de puntos de control (Figura 19).

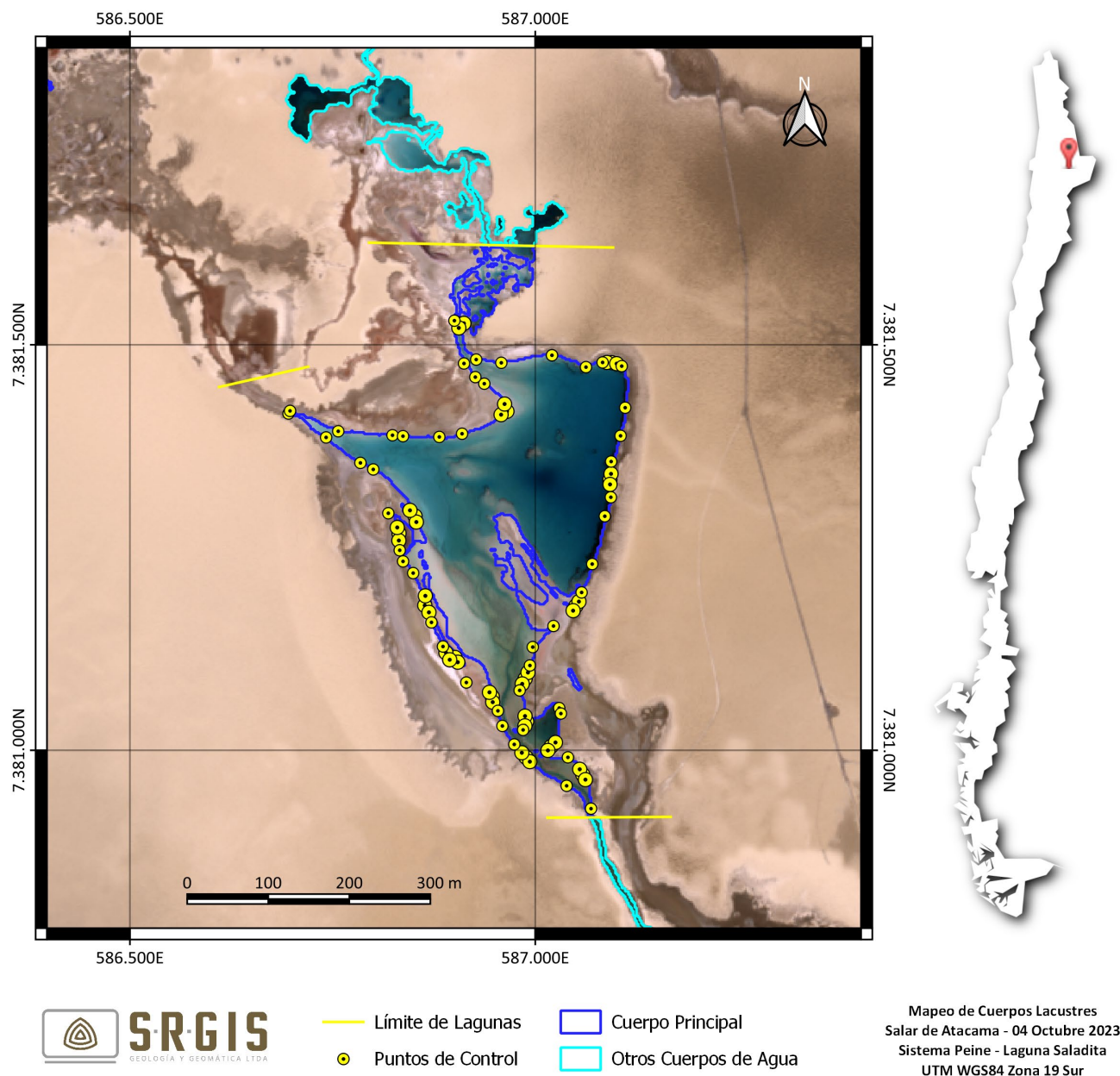


Figura 19: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Saladita.

5.2.3. Desborde Laguna Interna

A diferencia de las lagunas estudiadas anteriormente, el “desborde laguna Interna” no conforma un cuerpo lacustre de superficie continua. Los índices en conjunto con los puntos de control facilitaron la delimitación de los límites de estos cuerpos de agua como se observa en la Figura 20. Es importante mencionar que, hacia la parte distal del sistema lagunar (NW), se identifican en terreno zonas con alta presencia de costra de sal recientemente formada.

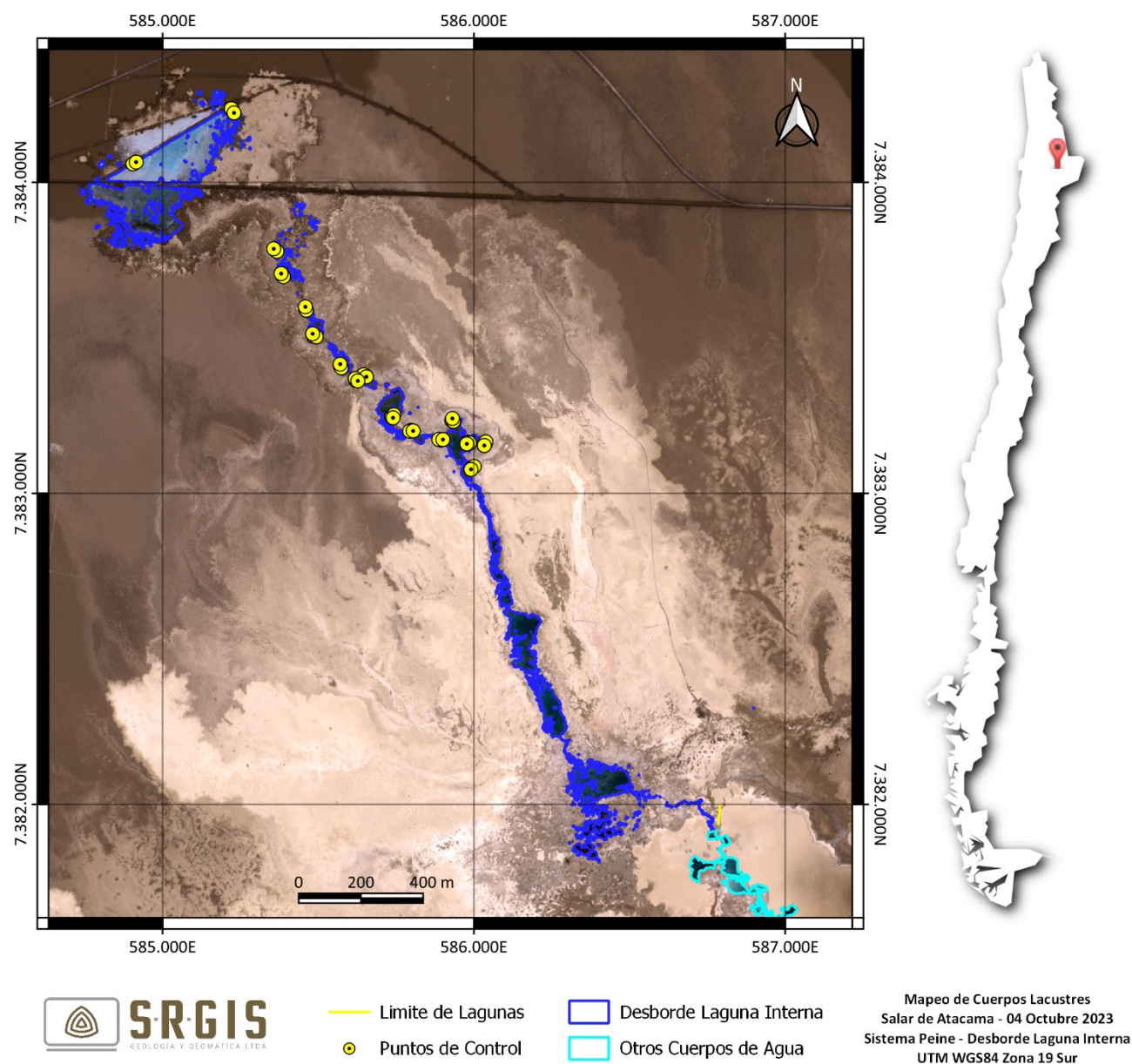


Figura 20: Mapeo de Cuerpos de Agua en la laguna Interna.

7. CONCLUSIONES

La extensión de los cuerpos de agua superficiales del sistema SONCOR corresponden a los siguientes:

- Laguna Chaxa : 278.722 m²
- Laguna Barros Negros : 896.955 m²
- Puilar : 62.472 m²
- Desborde Sur : 329.673 m²

La extensión de los cuerpos de agua superficiales del sistema PEINE corresponden a los siguientes:

- Salada : 199.248 m²
- Saladita : 86.540 m²
- Desborde Laguna Interna : 163.682 m²

8. REFERENCIAS

Baret, F., Guyot, G., Major, D. (1989). "TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation". 3. 1355-1358. 10.1109/IGARSS.1989.576128.

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

Gilabert, M., GFonzález-Piqueras, J., García-Haro, J. "Acerca de los índices de vegetación". Revista española de Teledetección. N° 8, diciembre 1997.

McFeeters. "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features", International Journal of Remote Sensing, 17:7, 1425-1432, DOI: 10.1080/01431169608948714. 1996

Geobiota. "Datos de reconocimiento en terreno de superficies lacustres – Campaña 2018". Informe Interno. Agosto 2018.



srgis



info@srgis.cl



srgisltda



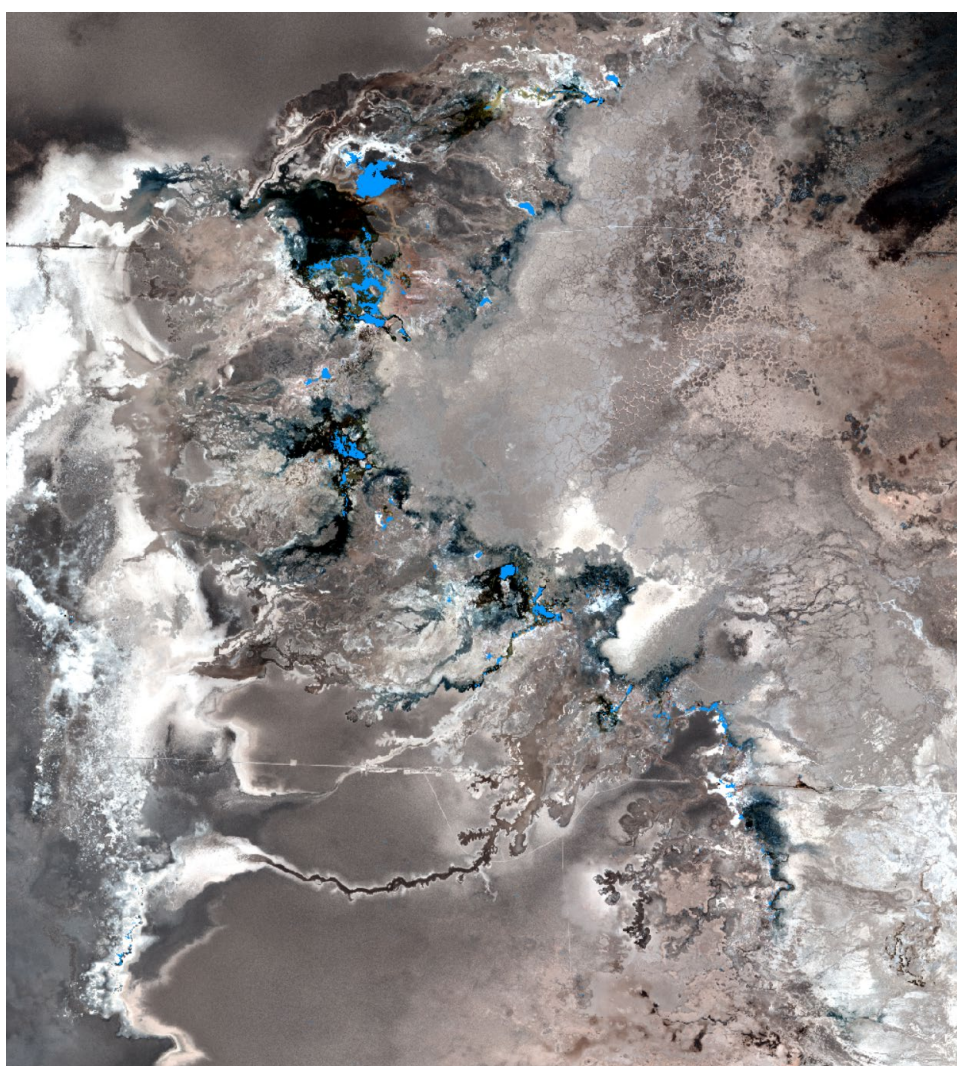
+56 993 498 303



www.srgis.net

MAPEO DE CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES EN AGUAS DE QUELANA SALAR DE ATACAMA

José Manuel Lattus – SRGIS Geología y Geomática Ltda.



Santiago de Chile

Octubre 2023

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| ÍNDICE | 1 |
| 1. RESUMEN | 3 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 4 |
| 3.1 ÁREA DE ESTUDIO | 4 |
| 3.2 MATERIALES Y SOFTWARE | 5 |
| 3.3 METODOLOGÍA | 5 |
| 3.3.1 Pre-procesamiento de la Imagen Satelital | 6 |
| 3.3.2 Corrección geométrica (Ortorectificación y Georeferencia) | 7 |
| 3.3.3 Cálculo de Índices y características espectrales (NDWI, NDWI _R y SAVI) y consideración de características espectrales | 7 |
| 3.3.4 Clasificación Binaria | 9 |
| 3.3.5 Pan-Sharpning (Fusión Imagen Multiespectral con Banda Pancromática) | 9 |
| 3.3.6 Generación de Máscara de procesamiento | 10 |
| 3.3.7 Resumen de la metodología para el mapeo de las lagunas | 10 |
| 4. PUNTOS DE CONTROL | 11 |
| 5. RESULTADOS | 12 |
| | 13 |
| 6. DISCUSIÓN | 14 |
| 7. CONCLUSIONES | 14 |
| 8. REFERENCIAS | 15 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Ubicación del Área de Estudio, Aguas de Quelana. Elaboración Propia | 4 |
| Figura 2: Formato de datos en imágenes satelitales y sus correcciones. Elaboración propia. | 6 |
| Figura 3: Curvas espectrales del agua, suelo y vegetación en el espectro solar. Modificado de RSAC Ltd. | 8 |
| Figura 4: Ejemplo de Clasificación Binaria. Elaboración Propia | 9 |
| Figura 5: Metodología de mapeo de cuerpos de Agua. Elaboración propia | 10 |
| Figura 6: Puntos de Control en Aguas de Quelana | 11 |
| Figura 7: Post proceso de edición de resultados | 12 |
| Figura 8: Ejemplo de eliminación de píxeles aislados y relleno de vacíos, en ambos casos se consideró como criterio de eliminación y relleno, familia de 3 píxeles o menos. Elaboración Propia. | 12 |
| Figura 9: Imagen Infrarrojo Color (izquierda) y Mapeo de Cuerpos de Agua (derecha). Elaboración Propia. . | 13 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Vértices de la zona de estudio en coordenadas UTM WGS84 Zona 19 Sur..... | 5 |
| Tabla 2: Principales características de las imágenes procesadas. La sigla RGB se refiere a “Red, Green, Blue”, bandas en longitud de onda del Rojo, Verde y Azul; NIR (Near Infra Red) es la banda en el infrarrojo cercano. Elaboración propia..... | 5 |
| Tabla 3: parámetros de clasificación de cuerpos de agua | 12 |
| Tabla 4: Superficie de cuerpos de agua mapeada el mes de octubre de 2023. Elaboración Propia..... | 13 |

1. RESUMEN

El mapeo de cuerpos de agua en el sector de Quelana se realizó mediante el procesamiento de una imagen multiespectral de alta resolución WorldView-3. El sector denominado Aguas de Quelana, dentro de la reserva natural “Los Flamencos”, corresponde un sistema de múltiples cuerpos esporádicos de agua de diversos tamaños, cuyas superficies (cuerpos individuales) pueden ser de algunos pocos metros cuadrados hasta aproximadamente 20.000 m². El mapeo de estos cuerpos se realiza mediante análisis de índices espectrales (índice de agua e índice de vegetación), clasificación binaria y datos estadísticos de los píxeles además de una evaluación y edición manual en base a la observación de combinaciones RGB en Color Natural e Infrarrojo Color.

Para cuerpos de agua profundos, la característica espectral del agua (reflectancia de la luz en distintas longitudes de onda) es muy particular, y se identifica principalmente por su alta reflectancia en la longitud de onda del color verde y una muy baja reflectancia en la longitud de onda del infrarrojo cercano, sin embargo, para cuerpos someros de agua la influencia del material bajo ellos (suelo, sales, vegetación) altera la curva espectral debido a que la luz atraviesa la película de agua e interactúa con dichos materiales generando una curva espectral que mezcla la información del suelo y el cuerpo de agua, dificultando la diferenciación y el mapeo del agua.

El mapeo de cuerpos de agua resultó en una superficie de 270.420 m² de agua superficial en la zona de estudio.

2. INTRODUCCIÓN

La dinámica hídrica del Salar de Atacama requiere de un monitoreo constante de diversos elementos. Las imágenes satelitales multiespectrales nos ayudan con la observación superficial de los elementos que cubren la superficie de cualquier terreno, en este caso, nos evidencia la presencia de cuerpos de agua, así como vegetación, suelo, sales, entre otros. Mediante el procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución espacial, se pueden mapear los cuerpos de agua presentes en el salar, y este trabajo enfoca ese análisis para el sector de Aguas de Quelana ubicado en el extremo oriental del Salar de Atacama donde afloran numerosos cuerpos lacustres de muy variados tamaños, los cuales pueden desarrollarse desde algunos cm² hasta unos 20.000 m² aproximadamente. La gran variabilidad del tamaño de los cuerpos de agua, la poca profundidad de éstos y la presencia de vegetación complejizan la determinación de las superficies.

SQM S.A. solicitó a SRGIS Geología y Geomática Ltda. el procesamiento de la imagen satelital de alta resolución para la obtención de la variable extensión de los cuerpos de agua del sistema Aguas de Quelana. Esto en el contexto del Programa de Cumplimiento (PdC), aprobado el 29 de agosto de 2022 según la RES. EX. N°38/ROL F-041-2016. Esta actividad nace del hecho infraccional N° 1 “Extracción de salmuera por sobre lo autorizado, según se expone en el considerando N°27, durante el periodo entre agosto de 2013 y agosto del 2015” y, por tanto, da cumplimiento a la Acción N° 19: robustecer el monitoreo de la superficie lagunar mediante imágenes satelitales de alta resolución con una frecuencia trimestral.

El mapeo de las superficies lacustres también se realiza como parte de las actividades comprometidas en el Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) del EIA “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”, aprobado ambientalmente por la resolución exenta N°226/2006 de la COREMA, Región de Antofagasta. Conforme a lo indicado, a partir del análisis de imágenes satelitales de alta resolución se establece la superficie lacustre de los sistemas SONCOR (lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros) y el sistema PEINE (lagunas Salada, Saladita e Interna) (Considerando 10.2.2 y 10.2.4 de la RCA N°226/2006).

Posteriormente, mediante la Resolución Exenta N°244/2010 de la COREMA, Región de Antofagasta, se redefine la metodología para la medición de superficies lacustres, incorporando mejoras en el procesamiento de la imagen satelital como el uso de diversos índices espectrales para la delimitación de contornos y puntos

de terreno para el control y corrección de límites, la cual fue implementada a partir de la temporada 2010. Asimismo, la medición considera los límites definidos por la CONAF para cada uno de los sistemas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado por la consultora SRGIS Geología y Geomática Ltda., específicamente por el geólogo José Manuel Lattus, consultor en teledetección y magíster en Teledetección, para el período de octubre 2023.

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en la II Región de Antofagasta, Chile, en el extremo oriental del Salar de Atacama en el sector denominado Aguas de Quelana dentro de la cual se encuentra la Reserva Nacional Los Flamencos (Figura 1). Las coordenadas del área de estudio (vértices) pueden verse en la Tabla 1.

Al sector se puede acceder por la Ruta 23 hacia el sur desde el poblado de San Pedro de Atacama o por la Ruta B-39 que sale de la Ruta 5 a la altura de Baquedano.

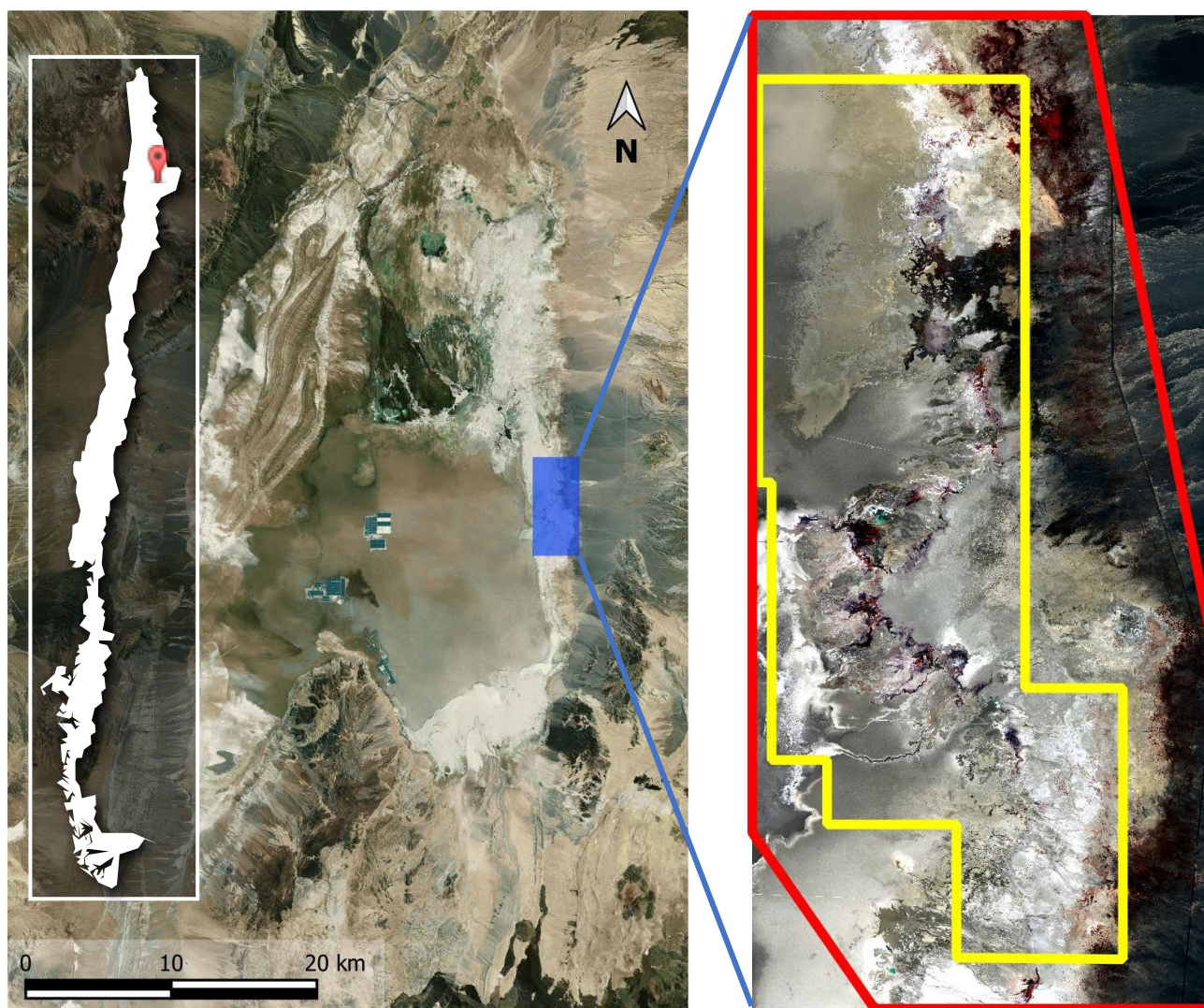


Figura 1: Ubicación del Área de Estudio, Aguas de Quelana. Elaboración Propia.

: Área de Estudio : Reserva Nacional Los Flamencos

Tabla 1: Vértices de la zona de estudio en coordenadas UTM WGS84 Zona 19 Sur.

| Este | Norte |
|---------|-----------|
| 589.804 | 7.413.170 |
| 594.316 | 7.413.170 |
| 596.022 | 7.404.704 |
| 596.022 | 7.399.743 |
| 591.458 | 7.399.743 |
| 589.804 | 7.402.124 |

3.2 MATERIALES Y SOFTWARE

Para este estudio se cuenta con una imagen satelital de alta resolución espacial WorldView-3 capturada el 04 de octubre de 2023. El resumen de las características de esta imagen puede verse en la Tabla 2:

Tabla 2: Principales características de la imagen WorldView-3. Elaboración propia.

| RANGO ESPECTRAL | BANDA | RESOLUCIÓN ESPACIAL |
|------------------------------|--------------------|---------------------|
| Visible | Azul | 2 mts. |
| Visible | Vede | 2 mts. |
| Visible | Rojo | 2 mts. |
| Infrarrojo Cercano | Infrarrojo Cercano | 2 mts. |
| Visible + Infrarrojo Cercano | Pancromática | 0,5 mts. |

El procesamiento se realizó utilizando ENVI 5.7, software especializado en procesamiento de imágenes aéreas y satelitales. Todas las imágenes satelitales se trabajaron en el sistema de referencia de coordenadas UTM WGS84 Zona 19 Sur.

3.3 METODOLOGÍA

La medición de cuerpos de agua en la superficie consideró el cálculo de diversos índices, clasificación binaria e inspección visual) y la revisión del comportamiento de las bandas espectrales orientados a la detección y mapeo de cuerpos de agua. Los procesamientos realizados a las imágenes para el mapeo de los cuerpos lacustres son los siguientes:

1. Pre-procesamiento de la imagen satelital
2. Corrección geométrica
3. Cálculo de índices espectrales (NDWI, NDWI_R y SAVI) y consideración de características espectrales
4. Clasificación binaria
5. Fusión imagen (Pan Sharpening)
6. Control de Terreno
7. Aplicación de Máscara de Lagunas

3.3.1 Pre-procesamiento de la Imagen Satelital

Los índices espectrales son concebidos considerando la forma de la curva espectral obtenida en laboratorio mediante un espectro radiómetro el cual mide la reflectancia de dicho material en distintas longitudes de onda, es por esto, que la imagen satelital debe corregirse radiométrica y atmosféricamente para convertir los datos originales a un formato de reflectancia a la superficie de la tierra.

Las imágenes satelitales vienen en un formato numérico denominado niveles “DN” (Digital Number). El valor del píxel en este formato contiene información del material en la superficie de la tierra (agua, vegetación, suelo u otro), la influencia de la atmósfera y de las compensaciones predefinidas por el sensor. Este dato debe transformarse a unidades de energía reflejada (radiancia) mediante una corrección radiométrica.

La corrección radiométrica elimina los parámetros preestablecidos de ganancia y pérdida del sensor, por lo tanto, se generan datos comparables entre distintos sensores. Tras esta corrección las imágenes se convierten de DN a Radianza (o Radiancia) que es el flujo radiante que se refleja desde el suelo hacia el sensor, se mide en $W/(m^2 sr^1 \mu m)$ y es la magnitud que detecta el sensor.

La radiancia espectral se calcula a partir de los parámetros específicos entregados por el proveedor y que se encuentran en los metadatos de los archivos de la imagen satelital:

$$L_{\lambda} = Gain \cdot ND + Offset$$

Donde:

L_{λ} : es la radiancia espectral recibida por el sensor ($W/(m^2 sr \mu m)$)

Gain : es el factor de ganancia para la banda en λ

ND : es el valor del píxel en Niveles Digitales

Offset : es el factor de pérdida para la banda en λ

Adicionalmente, debido a que los datos radiométricos contienen información de la superficie terrestre como de la atmósfera, se requiere aplicar una corrección que minimice estos efectos de la energía reflejada e incidente en los valores de cada píxel para obtener una imagen de reflectancia superficial, este proceso se denomina corrección atmosférica.

La corrección atmosférica elimina los efectos de la atmósfera en los datos, en este formato los datos (curvas espectrales de los pixeles) son comparables con curvas espectrales de laboratorio. Tras esta corrección las imágenes se convierten de Radiancia a Reflectancia (o Reflectancia Relativa).

La Figura 2 resume el esquema de datos de la imagen y las correcciones necesarias.

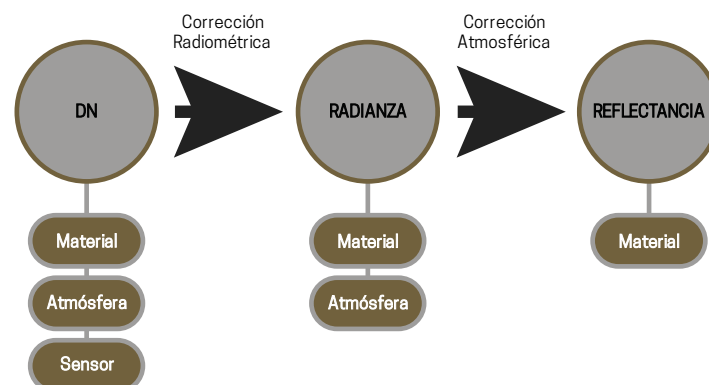


Figura 2: Formato de datos en imágenes satelitales y sus correcciones. Elaboración propia.

La metodología de corrección utilizada fue la corrección “Internal Average Relative Reflectance” (IARR) ya que, para el caso del Salar de Atacama, tras varios estudios, se consideró que es la que entrega mejor resultado para el mapeo específico de cuerpos de agua. Este tipo de corrección funciona mejor para áreas áridas sin vegetación, como es el caso del área de estudio (Harris Geospatial, 2022).

3.3.2 Corrección geométrica (Ortorectificación y Georeferencia)

La ortorectificación consiste en corregir la imagen de distorsiones provocadas principalmente por la topografía, para ello se utiliza un modelo digital de elevación (DEM) y los parámetros internos de la imagen satelital (RPC). Por otro lado, la georeferencia es indicar las coordenadas precisas de algunos pixeles de la imagen para ajustarla a su posición real.

3.3.3 Cálculo de Índices y características espectrales (NDWI, NDWI_R y SAVI) y consideración de características espectrales

Para el mapeo y delimitación de las superficies lacustres se utilizaron los siguientes índices espectrales: Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), Índice de Agua de Diferencia Normalizada en Rojo (NDWI_R) e Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). A continuación, se pasa a describir cada uno de ellos:

a. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

El NDWI (Normalized Difference Water Index (McFeeters, 1996)) maximiza la respuesta de las características espectrales del agua al usar la longitud de onda correspondiente al verde (550 nm, valores de reflectancia altos para el agua) y la baja reflectancia del agua en el NIR (850 nm, infrarrojo cercano). El algoritmo del NDWI es el siguiente:

$$NDWI = (VERDE - NIR) / (VERDE + NIR)$$

Donde:

VERDE : Reflectancia de la imagen en el rango espectral verde

NIR : Reflectancia de la imagen en el rango espectral infrarrojo cercano

Este índice normalizado entrega valores acotados para los pixeles entre -1 y 1. Como la reflectancia del agua en la banda verde debe ser mayor a la de la banda NIR, valores mayores a cero deben ser considerados a la hora de clasificar el agua con este índice.

b. Índice de Agua de Diferencia Normalizada en Rojo (NDWI_R)

Este índice es una modificación del NDWI, cambiando la banda verde por la banda roja. Para cuerpos de agua con mucho sedimento se ha utilizado este índice ya que los suelos tienen una reflectancia mayor en la longitud de onda del color rojo que en la del verde, de esta manera estos cuerpos de agua con alta carga de sedimentos no tienen su máxima reflectancia en el verde sino en el rojo, pero al estar dentro de cuerpos de agua el infrarrojo cercano sigue teniendo baja reflectancia (Gossn et al., 2019; Moore et al., 2014; Ngoc et al., 2020; Ogashawara et al., 2017). Para cuerpos de agua someros esta característica se mantiene ya que el poco espesor de la capa de agua aumenta la reflectancia del rojo sobre el verde, por lo que este índice aporta mucho al mapeo de cuerpos de agua someros. El algoritmo del NDWIR es el siguiente:

$$NDWI_R = (ROJO - NIR) / (ROJO + NIR)$$

Donde:

ROJO : Reflectancia de la imagen en el rango espectral rojo

NIR : Reflectancia de la imagen en el rango espectral infrarrojo cercano

Este índice normalizado entrega valores acotados para los píxeles entre -1 y 1. Como la reflectancia del agua en la banda rojo debe ser mayor a la de la banda NIR, valores mayores a cero deben ser considerados a la hora de clasificar el agua con este índice.

c. Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI)

El índice SAVI es similar al NDVI (Rouse Jr et al., 1974), pero suprime los efectos de los píxeles del suelo. Utiliza un factor de ajuste de fondo respecto de la capa superior de la vegetación (parte de la vegetación expuesta hacia el sol directamente), L, que es una función de la densidad de la vegetación y, a menudo, requiere un conocimiento previo de la cantidad de vegetación. Se sugiere un valor óptimo de $L=0,5$ para tener en cuenta las variaciones de fondo del suelo de primer orden (Tesdaev, N. et al., 2020). Este índice se usa mejor en áreas con vegetación relativamente escasa donde el suelo es visible a través del dosel. El algoritmo del índice SAVI es el siguiente:

$$SAVI = (1.5 * (NIR - ROJO)) / (NIR + ROJO + 0.5)$$

Donde:

ROJO : es la reflectancia en el rango espectral del rojo

NIR : es la reflectancia en el rango espectral del infrarrojo cercano

d. Consideraciones de Características espectrales

Todos los materiales en la superficie tienen una curva espectral única, con ciertas características particulares en ciertos rangos espectrales del espectro electromagnético, en el caso del agua, esta tiene su máxima reflectancia dentro del rango espectral del color verde y esta reflectancia baja considerablemente (tendiendo a cero) en el rango del infrarrojo cercano. La muestra las curvas espectrales de los principales elementos en la superficie en el espectro solar.

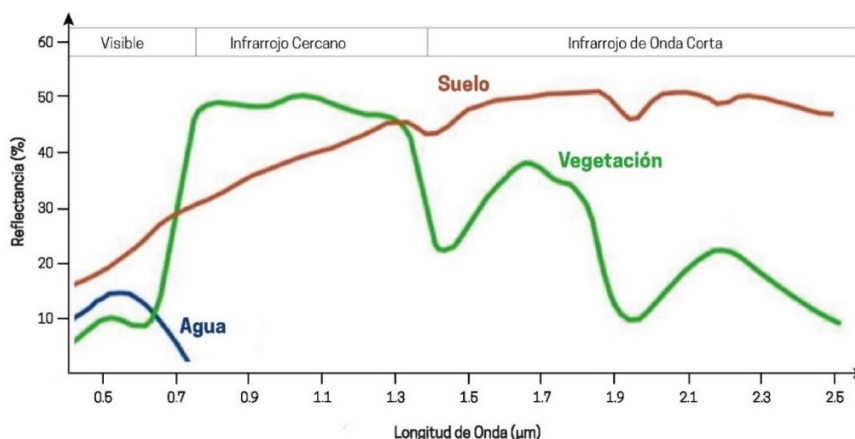


Figura 3: Curvas espectrales del agua, suelo y vegetación en el espectro solar. Modificado de RSAC Ltd.

Teniendo estas consideraciones, se consideraron para el mapeo de cuerpos de agua la reflectancia baja en el rango infrarrojo cercano, lo que se traduce en bajos valores de píxeles en la banda NIR. Es importante considerar que los cuerpos de agua, según su profundidad, pueden resultar en curvas espectrales un poco diferentes a lo esperado, así como el contenido de sedimentos en suspensión, sales disueltas y/o vegetación, de esta manera es que la reflectancia del verde que en general es más alta que la del rojo puede invertirse quedando el rojo con mayor reflectancia lo que justifica el uso del $NDWI_R$, de la misma manera se ha evidenciado que la reflectancia baja en el NIR ayuda a separar valores de NDWI altos que no corresponden a agua, como costras recién formadas, de los que si son cuerpos de agua.

3.3.4 Clasificación Binaria

Este tipo de clasificación, también conocida como “Árboles de Decisión” va segmentando la imagen en distintos pasos: todos los píxeles de la imagen se enfrentan a una condición lógica la cual segmenta la imagen en dos clases, los píxeles que cumplen la condición y los que no la cumplen. Estas condiciones son, por ejemplo: $NDWI \geq X$, donde X es el valor de pixel a partir del cual se considera que dicho pixel corresponde a una cobertura de agua. Cada clase generada se puede convertir en un nuevo nodo con una nueva condición que deben cumplir los píxeles que se clasificaron para volver a segmentarlos en dos clases nuevas (Figura 4).

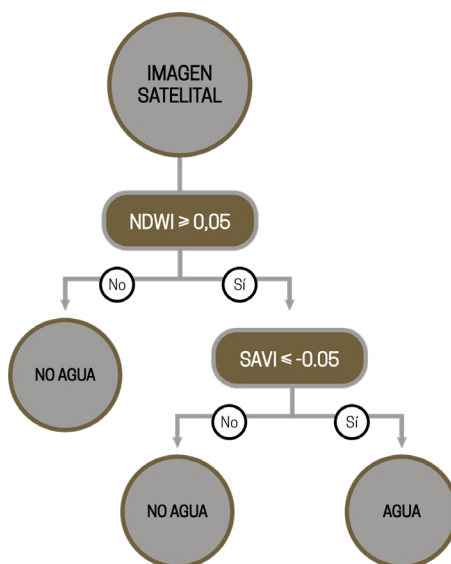


Figura 4: Ejemplo de Clasificación Binaria. Elaboración Propia.

3.3.5 Pan-Sharpening (Fusión Imagen Multiespectral con Banda Pancromática)

Este proceso mejora visualmente el detalle de los datos multiespectrales con la banda pancromática debido a que ésta última tiene una resolución espacial mejor que la multiespectral. Es importante señalar que la radiancia medida por el sensor en cada longitud de ondas (azul, rojo, verde e infrarrojo cercano) se encuentra en los datos multiespectrales y que la banda pancromática abarca un rango espectral amplio (desde el azul al infrarrojo cercano) por lo que se recomienda que estos datos fusionados se utilicen de manera estética y para análisis visuales y no procesamiento espectral.

Para el proceso de PanSharpen, ambas imágenes deben estar corregidas geométricamente para un calce perfecto entre ellas, sin embargo, la corrección radiométrica y atmosférica no es necesario aplicarla a la imagen pancromática, ya que solo se necesita su resolución espacial y no el valor del pixel en reflectancia.

3.3.6 Generación de Máscara de procesamiento

La máscara de lagunas es un archivo digital que posee los límites de las áreas de interés para los diferentes sistemas lagunares. El área seleccionada para el procesamiento en Aguas de Quelana corresponde al “Área de Estudio” indicada en la Figura 1.

3.3.7 Resumen de la metodología para el mapeo de las lagunas

Utilizando los índices espectrales, las características de las curvas espectrales y la imagen índice de la clasificación supervisada se procedió al mapeo de los cuerpos de agua visibles en la superficie. La Figura 5 muestra el esquema de procesamiento para el mapeo de los cuerpos lagunares utilizando todas las variables consideradas en este estudio.

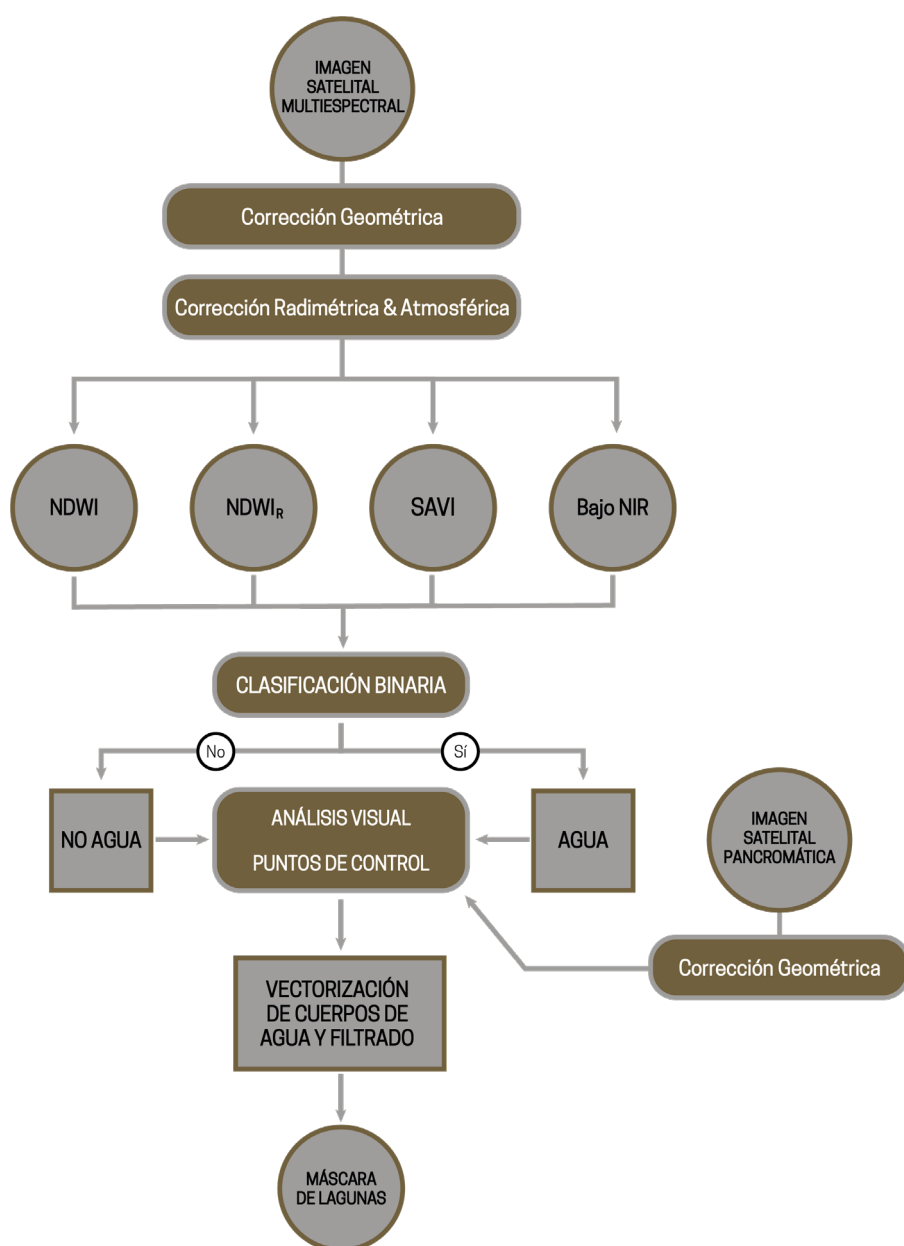


Figura 5: Metodología de mapeo de cuerpos de Agua. Elaboración propia.

4. PUNTOS DE CONTROL

Para la campaña de octubre 2023, se realizó una campaña de puntos de control de terreno donde se definieron 48 puntos de borde de agua (Figura 6), en cada punto se indica la coordenada específica del punto de control, la cota y observaciones sobre la presencia y espesor de cuerpos de agua; se adjunta también una fotografía orientada y videos el 360° para tener una idea de la situación en terreno y poder mejorar el análisis de la imagen satelital; este trabajo fue realizado por la consultora ATyGeo los días 04 y 05 de octubre de 2023, sin embargo la campaña estuvo restringida por alta presencia de flamencos.

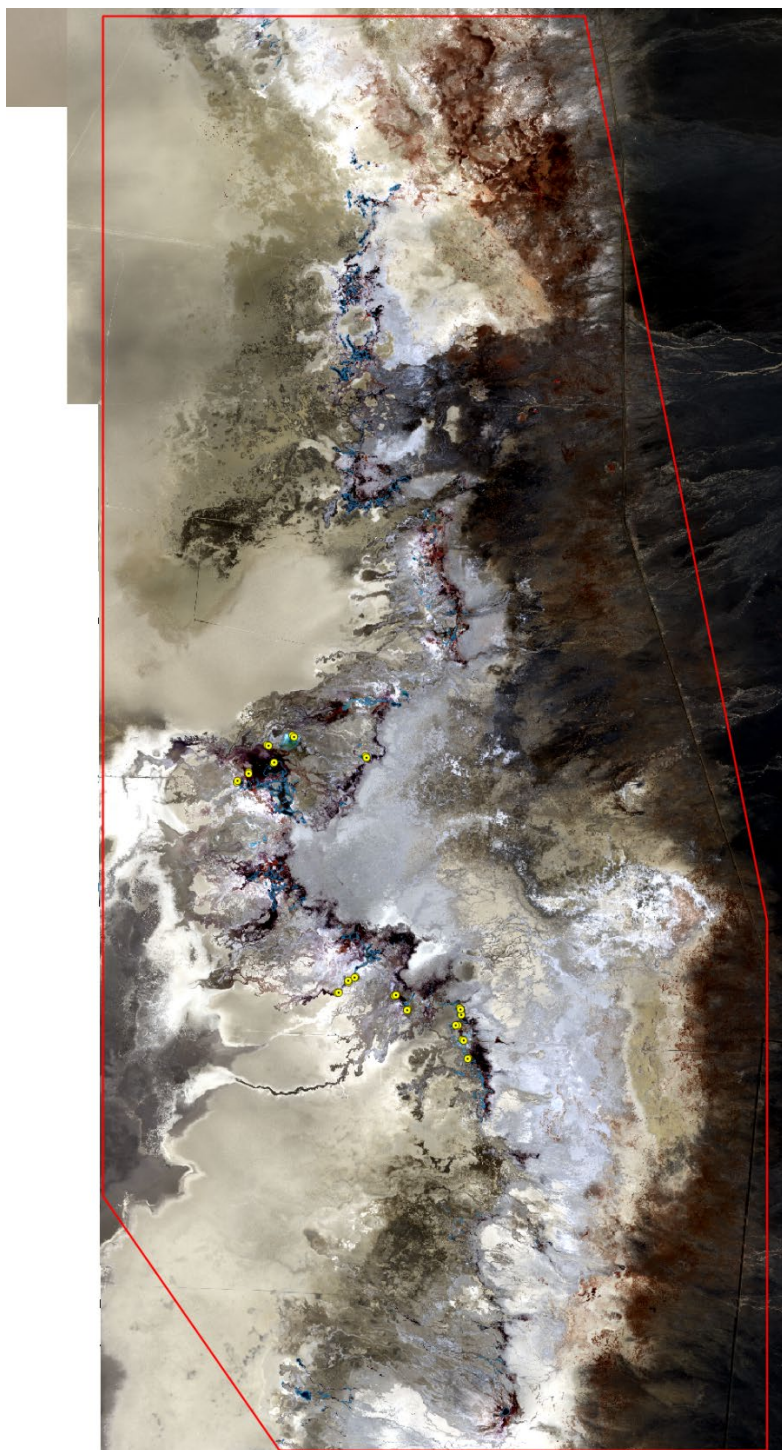


Figura 6: Puntos de Control en Aguas de Quelana

5. RESULTADOS

Para obtener el resultado final del mapeo de cuerpos de agua se realizan dos etapas posteriores importantes. El resultado inicial (mapeo inicial) es el resultado de la clasificación binaria por medio del uso de índices y consideraciones espectrales, el cual pasa por un proceso de inspección visual y edición donde se agregan cuerpos de agua que no fueron mapeados, así como se eliminan píxeles que inicialmente se clasificaron como agua pero se identifica que no lo son (mapeo editado); este paso es sensible ya que está sujeto a la interpretación del consultor de determinar cuáles cuerpos mapeados inicialmente no se consideran como cobertura de agua, cuales cuerpos de agua no se mapearon por la clasificación y deben agregarse al resultado, y la edición de otros cuerpos (extenderlos o disminuirlos), en esta etapa la existencia de puntos de control es fundamental para tomar decisiones respecto de la extensión de los cuerpos de agua. Luego, debido que el mapeo inicial tiene bastante ruido, se realiza un proceso de filtrado donde se eliminan todos los píxeles aislados, o con un área mínima, mapeados como cuerpos de agua (mapeo filtrado). De esta manera tenemos tres resultados distintos: Mapeo Inicial, Mapeo Filtrado y Mapeo Final (Figura 7).



Figura 7: Post proceso de edición de resultados

El proceso de filtrado consiste eliminar píxeles aislados, el cual se aplica considerando que un píxel aislado no es representativo del mapeo y representa más el ruido del proceso que cuerpos de agua en sí (Figura 8). Para este trabajo se mantendrán cuerpos de agua que sean mayores o iguales a 2 píxeles.

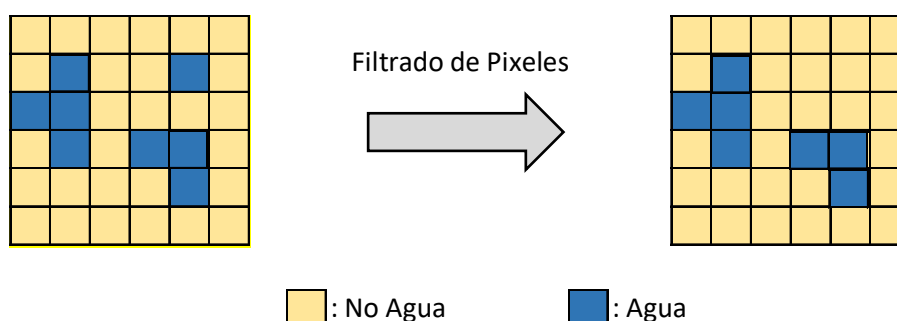


Figura 8: Ejemplo de eliminación de píxeles aislados, se consideró como criterio eliminar píxeles aislados (1 píxel).
Elaboración Propia.

La Tabla 3 resume los parámetros utilizados en la clasificación binaria para el mapeo de los cuerpos de agua.

Tabla 3: parámetros de clasificación de cuerpos de agua

| SISTEMA | NDWI | NDWI _R | SAVI | NIR |
|------------------|--------------|-------------------|---------------|---------|
| AGUAS DE QUELANA | $\geq 0,050$ | $\geq 0,075$ | $\leq -0,050$ | $0,075$ |

El área mapeada para la imagen de octubre 2023 puede verse en la Tabla 4.

Tabla 4: Superficie de cuerpos de agua mapeada el mes de octubre de 2023. Elaboración Propia.

| Fecha | Mapeo Inicial (m ²) | Mapeo Editado (m ²) | Mapeo Final (m ²) |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 04-10-2023 | 131.948 | 290.832 | 270.420 |

La Figura 9 muestra el resultado final del mapeo en Aguas de Quelana.

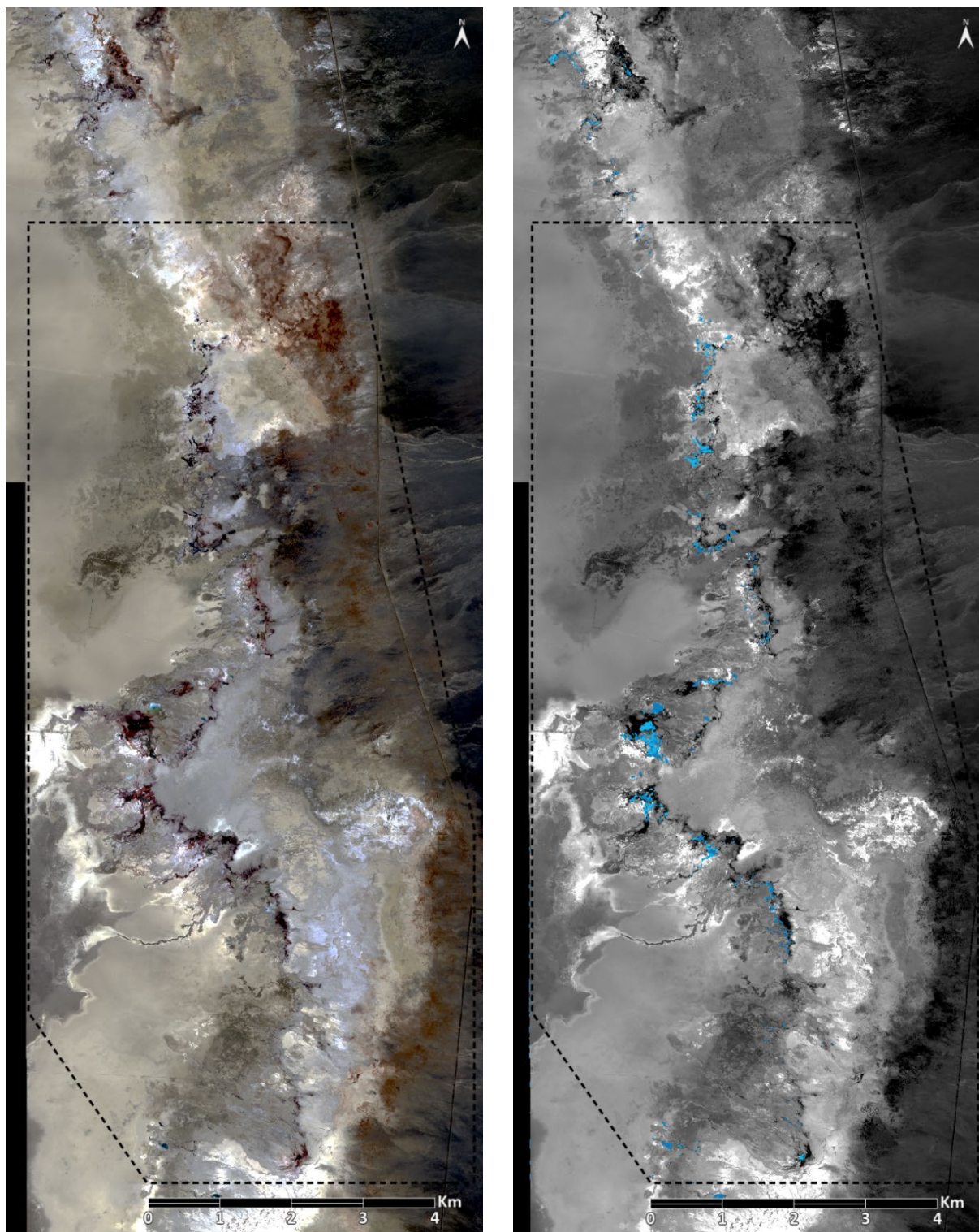


Figura 9: Imagen Infrarrojo Color (izquierda) y Mapeo de Cuerpos de Agua (derecha). Elaboración Propia.

6. DISCUSIÓN

Hay una importante diferencia entre el mapeo semiautomático (mapeo inicial) con el mapeo final, esto se debe a que se prioriza el mapeo de cuerpos efectivos de agua al inicio, al modificar los umbrales para los índices se mapeaban más cuerpos de agua, pero también aparecen muchos falsos positivos; en la edición manual es más eficiente agregar nuevos cuerpos de agua que eliminar mapeos que no corresponden a agua. Por otra parte, se pudo contar con puntos de control de terreno para mejorar la interpretación en algunos sectores de la zona de estudio, para el resto del área la toma de puntos de control se restringió por alta presencia de flamencos.

7. CONCLUSIONES

La metodología utilizada para el mapeo de cuerpos de agua en Aguas de Quelana considera las características espectrales del agua, así como consideraciones particulares de la zona como la restricción espacial donde afloran estos cuerpos y un porcentaje bajo de cobertura de agua respecto del total de la zona de estudio.

El mapeo de la cobertura total de agua está relacionado al tamaño y profundidad de los cuerpos de agua. Los posibles errores en la clasificación de los materiales (“Agua” y “No Agua”) están condicionado a la validación realizada mediante interpretación visual la cual se depura de mejor manera con la presencia de puntos de control, no obstante, del aprendizaje realizado en diversas zonas de mezcla espectral donde se han evidenciado zonas con coberturas de agua que corresponden a mezcla espectral por la toma de puntos de control de terreno. La captura de puntos de terreno con la información correspondiente en una fecha lo más cercana a la captura de la imagen satelital, mejora sustancialmente la delimitación de cuerpos de agua en la zona de estudio y ya se han identificado zonas específicas donde esta información se vuelve más importante por zonas de cuerpos de agua someros, algas en cuerpos de agua y otras zonas donde la imagen no releva con total certeza la existencia de cuerpos de agua. Esta captura de puntos de control de terreno no siempre se logra debido a los permisos que se requieren para el ingreso a las zonas de estudio, es por eso que es importante poder alinear esfuerzos para que la toma de puntos se lleve a cabo, con el objetivo de una mejor comprensión del comportamiento de cuerpos lagunares en Aguas de Quelana.

8. REFERENCIAS

- Gossn, J. I., Ruddick, K. G., & Dogliotti, A. I. (2019). Atmospheric correction of OLCI imagery over extremely turbid waters based on the Red, NIR and 1016 nm bands and a new baseline residual technique. *Remote Sensing*, 11(3), 220.
- Harris Geospatial. (2022). *ENVI 5.6 Help*.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.
- Moore, T. S., Dowell, M. D., Bradt, S., & Verdu, A. R. (2014). An optical water type framework for selecting and blending retrievals from bio-optical algorithms in lakes and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 143, 97–111.
- Ngoc, D. D., Loisel, H., Vantrepotte, V., Chu Xuan, H., Nguyen Minh, N., Verpoorter, C., Meriaux, X., Pham Thi Minh, H., Le Thi, H., & Le Vu Hong, H. (2020). A simple empirical band-ratio algorithm to assess suspended particulate matter from remote sensing over coastal and inland waters of vietnam: Application to the VNREDSat-1/NAOMI sensor. *Water*, 12(9), 2636.
- Ogashawara, I., Li, L., & Moreno-Madriñán, M. J. (2017). Slope algorithm to map algal blooms in inland waters for Landsat 8/Operational Land Imager images. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(1), 12005.
- Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A., & Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*.
- Teshaev, N., Mamadaliyev, B., Ibragimov, A., & Khasanov, S. (2020). The soil-adjusted vegetation index for soil salinity assessment in Uzbekistan. *ICIGIS*, 26, 324–333.

Atte.

José Manuel Lattus



srgis



info@srgis.cl



srgisltda



+56 993 498 303



www.srgis.net