
ANEXO 10

Extensión lagunar

Anexo 10.1

Informe análisis imagen satelital sistemas Soncor-Peine

Anexo 10.2

Antecedente de informe análisis imagen satelital sistema
Quelana

Anexo 10.3

Resultados extensión lagunar

Anexo 10.1

Informe análisis imagen satelital sistemas Soncor-Peine



“ESTUDIO DE SUPERFICIES LACUSTRES - CAMPAÑA ABRIL DE 2020”

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

VERSIÓN	ELABORADO POR LINKAPSIS	REVISADO y APROBADO POR SQM
1	NOMBRE: Roxana Trujillo	NOMBRE: Valeria Escobedo
	CARGO: Ingeniero de Desarrollos y Procesos	CARGO: Ing. Medio ambiental
	FECHA: 30/10/20	FECHA: //2020

ÍNDICE GENERAL

1. RESUMEN.....	5
2. INTRODUCCION	6
3. OBJETIVOS.....	7
4. MATERIAL Y MÉTODOS	7
4.1. Descripción del área de estudio	7
4.2. Parámetros para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales	9
4.3. Metodología de medición y análisis.....	9
4.3.1. Análisis de imágenes satelitales	9
4.3.2. Preprocesamiento de imágenes.....	10
4.3.3. Fusión de imágenes	13
4.3.4. Transformaciones multiespectrales	14
4.3.5. Contornos de las lagunas	17
4.3.6. Límites de los contornos de las superficies lacustres	18
5. RESULTADOS.....	19
5.1. Sistema Soncor	19
5.1.1. Laguna Chaxa.....	20
5.1.2. Laguna Barros Negros.....	22
5.1.3. Laguna Puilar	24
5.1.4. Desborde Sur	26
5.2. Sistema Peine	28
5.2.1. Laguna Salada	28
5.2.2. Laguna Saladita	30
5.2.3. Laguna Interna	32
6. CONCLUSIONES.....	34
7. REFERENCIAS.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Lagunas Sistemas Soncor y Peine. Fuente: elaboración propia. ...	8
Figura 2. Características técnicas imagen Multiespectral 2020. Fuente: elaboración propia.	10
Figura 3. Fusión de imágenes. Fuente: Elaboración propia	13
Figura 4. Correlación entre bandas para TSAVI, sector Peine. Fuente: Elaboración propia	15
Figura 5. Correlación entre bandas para TSAVI, sector Soncor. Fuente: Elaboración propia	16
Figura 6. Resultados superficie laguna Chaxa. Fuente: elaboración propia.....	21
Figura 7. Resultados superficie laguna Barros Negros. Fuente: elaboración propia ...	23
Figura 8. Resultados superficie laguna Puilar. Fuente: elaboración propia	25
Figura 9. Resultados superficie Desborde Sur. Fuente: elaboración propia.....	27
Figura 10. Resultados superficie Laguna Salada. Fuente: elaboración propia.	29
Figura 11. Resultados superficie Laguna Saladita. Fuente: elaboración propia.	31
Figura 12. Resultados superficie Laguna Interna. Fuente: elaboración propia	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de superficies en cuerpos de agua abril 2020. Fuente: elaboración propia	5
Tabla 2. Resumen de valores presentes en metadato para calibración. Fuente: Elaboración propia	11
Tabla 3. Resumen de valores para cálculo de reflectancia de imagen. Fuente: Elaboración propia	12
Tabla 4. Factores para TSAVI. Fuente: Elaboración propia	16
Tabla 5. Coordenadas de Límites de Control.	18
Tabla 6. Superficies de cuerpos lacustres medidas en abril 2020 mediante análisis de imágenes satelitales - Sistema Soncor. Fuente: elaboración propia.....	19
Tabla 7. Superficies de cuerpos lacustres medidas en abril 2020 mediante análisis de imágenes satelitales - Sistema Peine. Fuente: elaboración propia.....	28

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. El presente 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 han sido establecidos posteriormente en el considerando 6° de la Resolución Exenta N° 244/2010 de la Comisión Regional de Medio Ambiente, Región de Antofagasta.

En acuerdo a lo establecido en la Resolución Exenta N°244/2010, la medición del tamaño de las lagunas se realiza con el uso de imágenes satelitales de alta resolución fusionadas, con el apoyo de índices alternativos (IHS, TSAVI, NDWI), y mediciones de terreno necesarias para la definición de límites difusos que representan una complejidad en la interpretación de la imagen satelital.

En el cuadro resumen (Tabla 1) a continuación se presenta las superficies lacustres calculadas para los sistemas hidrológicos Soncor y Peine en el periodo de monitoreo abril 2020. Por restricciones de acceso y traslado a las lagunas debido al contexto de Pandemia mundial acontecido durante el periodo en estudio, los cálculos para el presente año 2020 han sido estimados únicamente utilizando imágenes satelitales.

SISTEMA	Nombre del Cuerpo de agua	Superficie del espejo (m ²)
SONCOR	Chaxa	346.599
	Barros Negros	1.179.782
	Puilar	63.142
	Desborde Sur	301.545
PEINE	Salada	180.238
	Saladita	90.767
	Interna	446.388

Tabla 1. Resumen de superficies en cuerpos de agua abril 2020. Fuente: Elaboración propia

2. INTRODUCCION

El presente informe expone los resultados obtenidos con las imágenes de abril 2020 asociadas al monitoreo de superficies lacustres en el Borde Este del Salar de Atacama, utilizando las especificaciones metodológicas señaladas en el considerando 6º de la Resolución Exenta N°244/2010 de la COREMA Región de Antofagasta.

La medición de las superficies lacustres 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 Comisión Regional del Medio Ambiente (COREMA) Región de Antofagasta. Conforme a lo indicado, a partir del análisis de imágenes satelitales de alta resolución se establece la superficie lacustre de las principales lagunas de los sistemas Soncor (Puilar, Chaxa y Barros Negros) y el sistema Peine (Salada, Saladita e Interna) (Considerando 10.2.2 y 10.2.4 de la RCA N°226/2006).

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

La labor ha sido realizada por la empresa de consultoría ambiental Linkapsis, por solicitud de SQM Salar S.A.

3. OBJETIVOS

El objetivo del presente informe es mostrar los resultados obtenidos en las mediciones de las superficies de los cuerpos lagunares para el mes de abril 2020 de los sistemas Soncor y Peine, de acuerdo con el Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) del Proyecto "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama" de SQM Salar S.A.

La medición contempla un análisis de las imágenes satelitales para determinar la superficie de las lagunas de los sistemas Soncor y Peine.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a los sistemas lagunares Soncor y Peine, identificados en la RCA 226/2006.

El Sistema lacustre Soncor forma parte de la Reserva Nacional Los Flamencos, y está conformado por las lagunas Barros Negros, Chaxa y el Canal Burro Muerto. Al sur de la laguna Barros Muertos se ubica una zona de inundación de gran extensión denominada "Desborde Sur", la cual también se ha considerado dentro de los cuerpos a medir, pese a que no corresponde a una unidad regular (permanente). La laguna de mayor tamaño de este sistema es Barros Negros, la que se conecta hacia el Norte con la laguna Chaxa mediante el canal Burro Muerto. La laguna Puilar se ubica al noroeste de las lagunas mencionadas anteriormente.

El Sistema lacustre Peine está formado por tres lagunas distribuidas de sureste a noroeste, y conectadas entre sí por un solo canal, denominadas Salada, Saladita e Interna (en orden de sureste a noroeste).

La ubicación de las lagunas se presenta en la figura 1

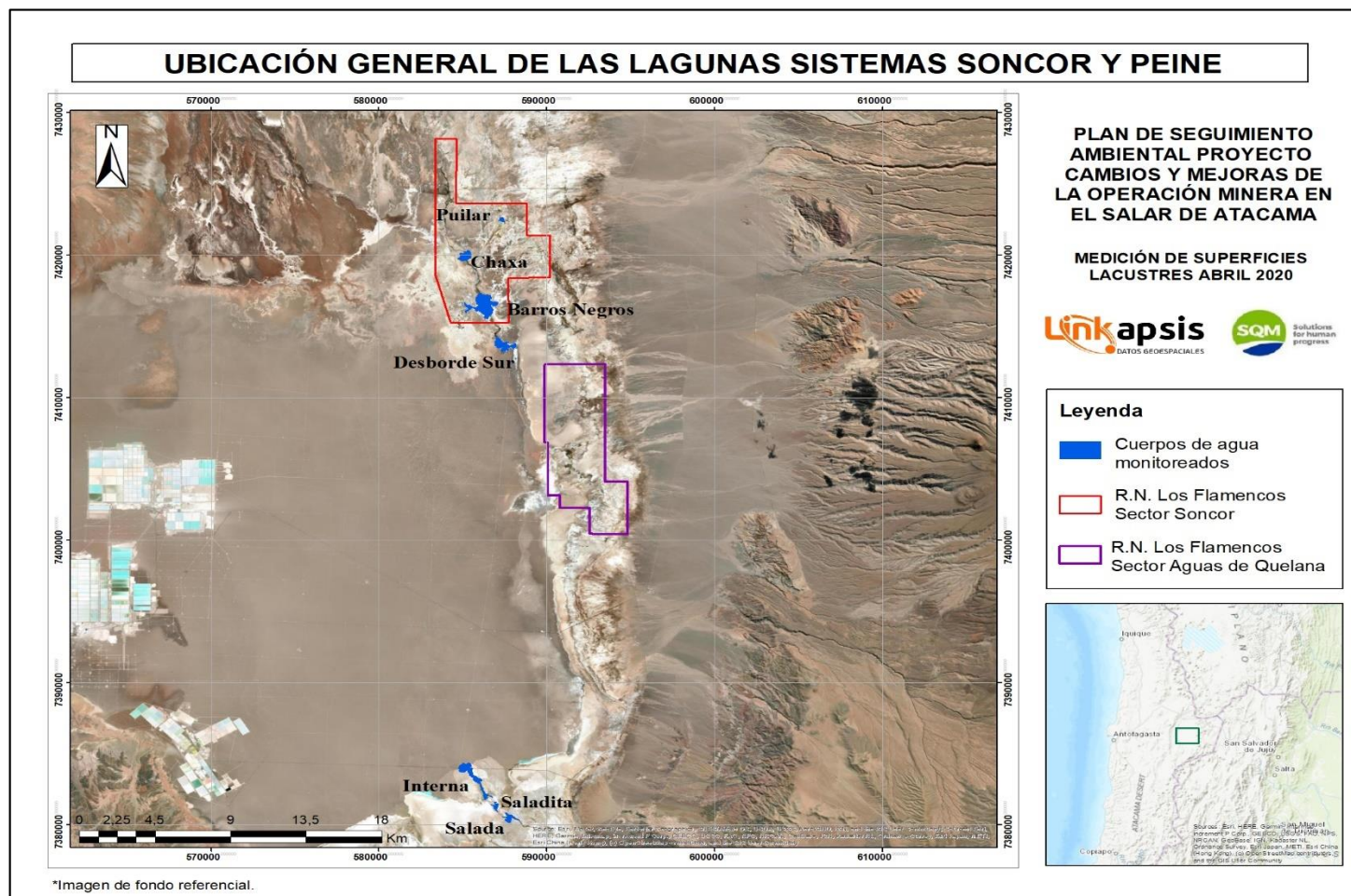


Figura 1. Ubicación Lagunas Sistemas Soncor y Peine. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Parámetros para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales

De acuerdo con el considerando 10.2.1 de la RCA N° 226/2006 uno de los parámetros considerados para caracterizar el estado y evolución de los cuerpos de agua corresponde a su superficie. De acuerdo con lo señalado en la mencionada RCA N° 226/2006 el parámetro superficie debe ser determinado sobre la base de imágenes satelitales, y según complementa la Resolución exenta N° 224/2010, la delimitación de los bordes de cada cuerpo de agua se apoyará en la información generada en terreno sobre la base de puntos de control, los cuales para el año 2020 se han debido omitir a causa del contexto situacional de Pandemia mundial y el consiguiente impedimento de traslados e ingreso al sector como medida de prevención.

4.3. 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, aplicándose índices y transformaciones espectrales, posterior a la fusión de la imagen pancromática con la multiespectral.

4.3.1. Análisis de imágenes satelitales

La primera etapa contempló la obtención y recopilación de las imágenes satélites de alta resolución para el área de interés. Durante el año 2020 se han utilizado imágenes captadas por el satélite Worldview-3. El uso de imágenes de este satélite se debe a la disponibilidad del proveedor para la fecha en que se obtuvo la imagen. Esta imagen es de modalidad Bundle, que incluye una imagen Pancromática y una imagen multiespectral de 4 bandas. El resumen de la imagen capturada el **4 de abril 2020** se muestra en la figura 2:

Size	1,450,104,608 bytes				
Type	TIL				
Columns	6758				
Rows	26822				
Bands	4				
Interleave	BIP				
Data Type	UInt				
Sensor Type	WORLDVIEW-3				
Product Type	Standard2A				
Pixel Size X	2.0				
Pixel Size Y	2.0				
Units	Meters				
	Band Names	Wavelengths	FWHM	Radiance Gains	Radiance Offsets
1	Blue	480.0	60.0	0.205006616667	-4.253
2	Green	545.0	70.0	0.131291082524	-2.633
3	Red	660.0	60.0	0.170866633846	-1.807
4	NIR1	832.5	125.0	0.115996631873	-3.406

Figura 2. Características técnicas imagen Multiespectral 2020. Fuente: Elaboración propia.

La imagen satelital se trabajó bajo el sistema proyectado UTM 19 Sur y Datum WGS84. Luego a través de Software Geomático se generaron algunos procesamientos para facilitar la detección de los cuerpos de agua en estudio, los cuales se describen a continuación:

- Preprocesamiento de imagen
- Fusión de imágenes
- Cálculo de índices IHS, MNDWI, y TSAVI

4.3.2. Preprocesamiento de imágenes

Previo a establecer los índices con los cuales se trabajará para determinar las superficies lacustres, se genera una corrección atmosférica de la imagen con las variables que se encuentran en su metadato.

Los valores de los pixeles de las imágenes se encuentran generalmente en unidades de niveles digitales (DN) y se deben transformar en unidades de energía reflejada, lo que se conoce como calibración radiométrica o radiancia (Asner et al., 2003).

Adicionalmente, debido a que los datos radiométricos contienen información tanto de la superficie terrestre como de la atmosfera, se requiere aplicar una corrección que minimice los efectos de la energía reflejada e incidente en los valores de cada píxel, obteniendo una imagen de superficie de reflectancia. Esta superficie tiene una mayor consistencia en las respuestas radiométricas dentro y entre imágenes, permitiendo la

aplicación de procesos como la corrección atmosférica y modelos estándar para todas las escenas y fechas analizadas (Hansen & Loveland, 2012).

a. Radiancia

La conversión de los niveles digitales de la imagen satelital a variables físicas de significado estándar es un paso previo para la interpretación efectiva de las imágenes garantizando la compatibilidad multitemporal de los datos y el análisis con diversos sensores (Chuvieco, 2002).

La radiancia espectral se calculó a partir de parámetros específicos entregados por el proveedor y de acuerdo a la siguiente ecuación definida por Krause (2003):

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

Dónde:

- $L_{\lambda}(x, y)$: Radiancia espectral recibida por el sensor (W/m² sr μm)
 $ND_{\lambda}(x, y)$: Niveles digitales de pixeles de la imagen satelital
 K_{λ} : Factor absoluto de calibración radiométrica (W/m² sr)
 Δ_{λ} : Ancho de banda efectivo (μm)

De este modo los valores internos que se utilizan para calcular la radiancia espectral se encuentran almacenados en el metadato de la imagen, al cual el Software accede y extrae sus respectivos valores, los cuales se resumen en la tabla 2:

Fecha de captura	Factor absoluto de calibración radiométrica (W/m ² sr)				Ancho de banda efectivo (μm)			
	Azul	Verde	Rojo	Nir	Azul	Verde	Rojo	Nir
04 – 04 – 2020	0,0190361	0,0083855	0,01028364	0,01171636	0,054	0,0618	0,0585	0,1004

Tabla 2. Resumen de valores presentes en metadato para calibración. Fuente: Elaboración propia

b. Reflectancia

La reflectancia se define como la relación entre la energía reflejada y la energía incidente, por lo que su valor varía entre 0 y 1, dicho valor no es constante, sino que

varía en las distintas bandas del espectro, por lo que se añade el calificativo de espectral. Su magnitud depende tanto de las condiciones físicas y químicas de la superficie, como también de las condiciones de observación (Chuvieco, 2002).

Esta reflectancia, obtenida a partir de la imagen de radiancia, es también llamada reflectancia aparente, reflectancia a nivel del sensor o reflectancia al tope de la atmósfera (TOA) y no cuenta aún con correcciones atmosféricas, su valor se ha estimado a través de la ecuación de reflectancia planetaria (NASA, 2011):

$$\rho_a = \frac{\pi \times L_\lambda \times d^2}{ESUN_\lambda \times \cos \theta_s}$$

Dónde

$\rho_a(x, y)$: Reflectancia aparente

$L_\lambda(x, y)$: Radiancia espectral recibida por el sensor (W/m² sr μm)

d^2 : Distancia tierra-sol

$ESUN_\lambda$: Irradiancia Solar

θ_s : Ángulo solar

Los valores utilizados para calcular la reflectancia aparente en la presente imagen se resumen en la tabla 3:

Fecha de captura	Distancia Tierra-Sol		Irradiancia Solar (ESUN)			
	Día juliano	Distancia (U.A.)	Azul	Verde	Rojo	Nir
04 – 04 – 2020	94	0,99954	1971,48	1856,26	1555,11	1071,98

Tabla 3. Resumen de valores para cálculo de reflectancia de imagen. Fuente: Elaboración propia

c. Corrección Atmosférica

Se ocupó el método de corrección atmosférica Quick Atmospheric Correction (QUAC), derivada para el espectro VIS-NIR-SWIR (400-2500 nm) considerando imágenes multiespectrales e hiperespectrales. Se determinaron los parámetros de corrección atmosférica (valor medio de la longitud de onda de la banda y ancho de banda efectivo) directamente de la información contenida dentro de la escena. QUAC se basa en la estimación de la reflectividad espectral promedio de una colección de diversas superficies presentes en la escena. Este método es independiente de cada escena optimizando el proceso de cálculo (Bernstein et al., 2012).

4.3.3. Fusión de imágenes

Para mejorar la resolución espacial de la imagen multiespectral obtenida desde el Satélite Worldview-3, y con el fin de obtener un mayor detalle de información, se procedió a fusionarla con la imagen pancromática mediante el método modificado de fusión de imágenes satelitales denominado IHS (intensidad, tono y saturación en sus siglas en inglés) (Siddiqui, 2003). Esto permite que la imagen multiespectral alcance la resolución espacial de la imagen pancromática (Figura 3).

Dado que la imagen pancromática no siempre se correlaciona de buena forma con la componente intensidad, se incluye una serie de modificaciones al proceso, debido a que la imagen fusionada con el método tradicional no se asemeja a la original (Siddiqui, 2003). Para corregir este problema se superpone espectralmente cada banda multiespectral con la imagen pancromática, modificando la intensidad de esta última a partir de una ponderación, la cual se realiza en base a las longitudes de onda sobre cada banda (Siddiqui, 2003).

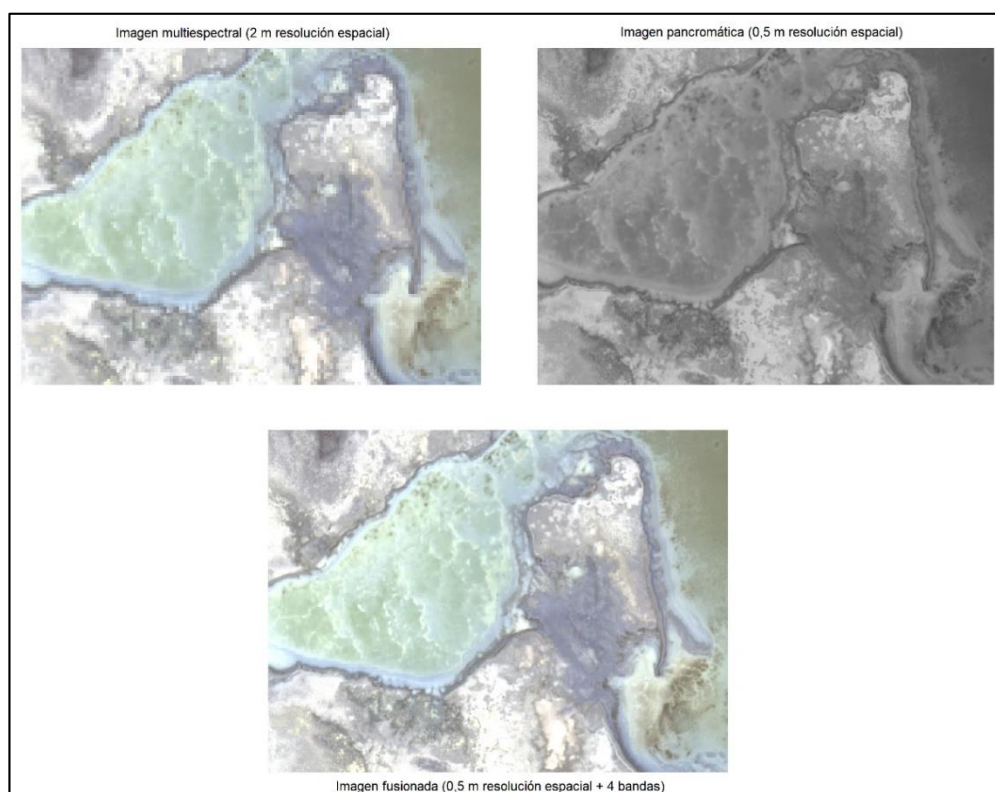


Figura 3. Fusión de imágenes. Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Transformaciones multiespectrales

Con el fin de apoyar la fase de corrección y la delimitación de las superficies lacustres, se realizaron las siguientes transformaciones digitales: Modificación del índice de agua de diferencia normalizada (MNDWI), índice de vegetación ajustado al suelo (TSAVI) y la transformación IHS, los que se presentan en detalle a continuación (Figura 5).

a. Modificación del índice de agua de diferencia normalizada (MNDWI)

El índice NDWI original corresponde a un índice para la discriminación de aguas abiertas, cuya elaboración fue realizada para sensores de alta resolución espectral, especialmente para sensores que capturan información entre 0,76-0,90 micras (infrarrojo cercano) y las 1,55-1,75 micras (infrarrojo medio). Dada la ausencia del infrarrojo medio en la mayoría de los sensores de alta resolución espacial como Quickbird-II, Worldview-II y Geoeye-1, McFeeters (1996) realizó una modificación a este índice calculando una diferencia normalizada entre la banda verde (SR_v) y el infrarrojo cercano (SR_{irc}).

Se considera que el uso del índice NDWI modificado por McFeeters (1996), es más adecuado porque la relación entre bandas permite maximizar la reflectancia del agua al trabajar con longitudes de ondas en el verde.

La fórmula para el cálculo del índice MNDWI se observa en la siguiente ecuación (McFeeters, 1996):

$$MNDWI = \frac{SR_v - SR_{irc}}{SR_v + SR_{irc}}$$

Donde:

SR_v : reflectancia del espectro verde en superficie

SR_{irc} : reflectancia del espectro infrarrojo cercano en superficie

En base a este índice, mediante un proceso iterativo, se logra determinar el valor que diferencia un píxel entre agua (MNDWI de superficie lacustre o vegetación con presencia de agua contigua a éstos con valores mayores a 0) y ausencia de agua (MNDWI con valores iguales o inferiores a 0).

b. Transformación del índice de vegetación ajustado al suelo (TSAVI)

Éste pertenece a una familia de curvas que modifican el índice de vegetación normalizado NDVI, cuyo inconveniente principal es su sensibilidad a las propiedades ópticas del suelo. Las modificaciones del TSAVI se contextualizan en la introducción de parámetros radiométricos del suelo (Factores a y b en la ecuación), minimizando la sensibilidad a estos efectos (Gilabert et al., 1997), como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$TSAVI = \frac{a (SR_{irc} - a SR_r - b)}{SR_r + a SR_{irc} - ab + 0,08(1 + a^2)}$$

Donde:

SR_r : reflectancia del espectro rojo en superficie

SR_{irc} : reflectancia del espectro infrarrojo cercano

a: pendiente de la curva de suelos

b: intercepto de la curva de suelos

Para determinar los valores a y b mencionados, se grafican los valores asociados a las bandas de rojo (SRI) e infrarrojo (Shire) para puntos conocidos que corresponden a suelos, y se determina en base a la línea de tendencia asociada los valores a y b de dicha curva.

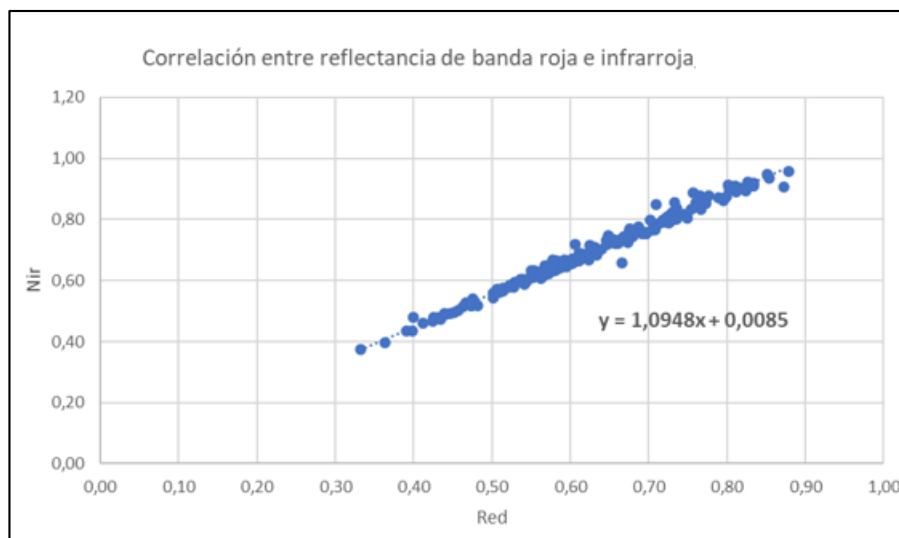


Figura 4. Correlación entre bandas para TSAVI, sector Peine. Fuente: Elaboración propia

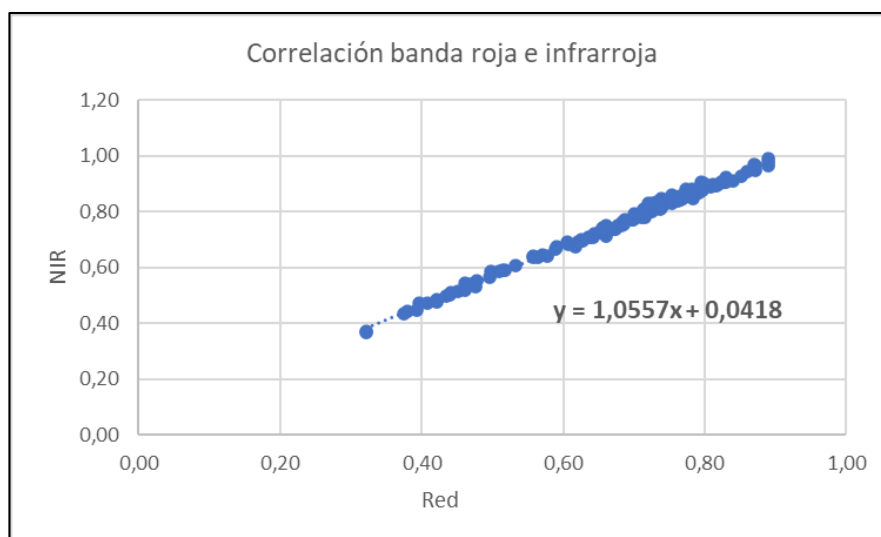


Figura 5. Correlación entre bandas para TSAVI, sector Soncor. Fuente: Elaboración propia

Para el presente informe, los factores a y b utilizados corresponden a los presentados en la tabla 4.

Sistema	Factor a	Factor b
Soncor	1,0557	0,0418
Peine	1,0948	0,0085

Tabla 4. Factores para TSAVI. Fuente: Elaboración propia

Esta transformación se utiliza como complemento del método expuesto anteriormente en los sectores en 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 utilizó como herramienta visual para la determinación de los bordes difusos.

c. Transformación IHS

Como se mencionó en el método de fusión, básicamente transforma los valores de una composición de RGB (Bandas verde, roja e infrarroja para el caso de este estudio) en una forma alternativa de representar el color basado en sus propiedades. Se trata de la transformación intensidad, tono y saturación (IHS; del inglés intensity, hue and saturation) (Figura 4-6). Su uso para la discriminación de agua se basa en su potencialidad para la discriminación de algunos rasgos de carácter cromático (Chuvieco, 2002). Al igual que el método TSAVI, esta transformación fue utilizada para

complementar al método MNDWI en sectores donde el borde es difícil de determinar y en donde esta transformación presenta una mayor diferencia entre suelo y agua.

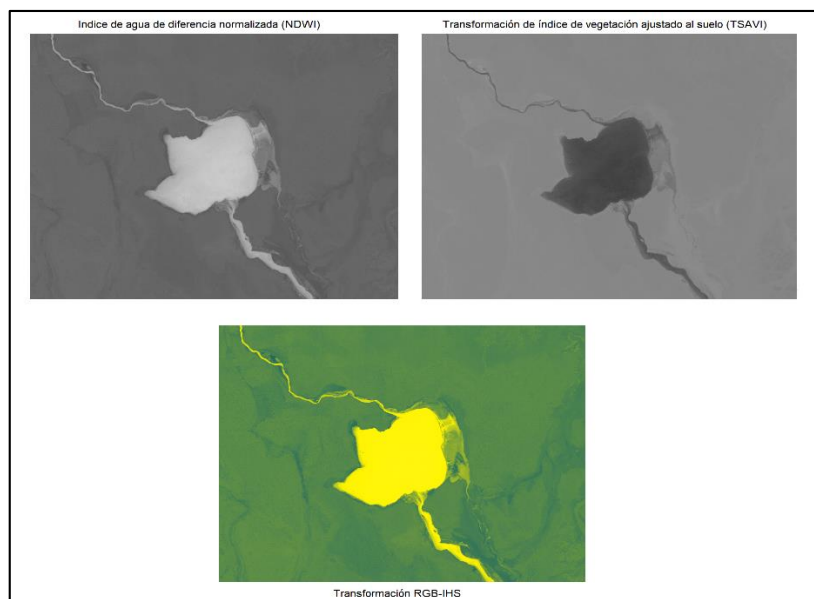


Figura 4-6 Transformaciones en imagen. Fuente: Elaboración propia

4.3.5. Contornos de las lagunas

La identificación de los contornos en las coberturas se realizó mediante una reclasificación de los valores calculados para el Índice MNDWI. La reclasificación consiste en la categorización automática de los píxeles de una imagen en distintas clases de cobertura de suelo.

Producto de la reclasificación, de la imagen satelital se obtuvo información digital en formato ráster (píxeles de resolución 0,5 x 0,5 m de superficies cubiertas con agua y de otras coberturas). Posterior a esto se seleccionaron las coberturas correspondientes a cuerpos de agua, y se vectorizaron sus contornos identificando finalmente aquellos cuerpos lacustres de los sistemas en estudio. Estos contornos se ajustaron posteriormente utilizando la información en las imágenes asociadas a las transformaciones TSAVI e IHS más la imagen fusionada en aquellos sectores donde la imagen no presentaba un borde definido.

4.3.6. Límites de los contornos de las superficies lacustres

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 en el 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) y 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. Este límite es utilizado 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 años. Las coordenadas de los límites se presentan en la tabla 5 a continuación:

Sector (Sistema)	Laguna	Vértice	WGS84 19S		Origen
			Este	Norte	
Soncor	Chaxa	V1.1	585.074	7.420.189	CONAF
		V1.2	585.116	7.420.185	
		V1.3	585.220	7.420.296	
		V2.1	585.203	7.419.607	CONAF
		V2.2	585.302	7.419.607	
	Barros Negros	V1.1	585.821	7.417.181	CONAF
		V1.2	586.146	7.417.405	
		V2.1	586.497	7.415.766	CONAF
		V2.2	586.740	7.415.795	
		V3.1	586.784	7.416.689	Delimitación zona de Inundación (Creada el año 2010)
		V3.2	586.750	7.416.465	
		V4.1	585.751	7.416.340	
		V4.2			CONAF y reemplazada por delimitación zona de inundación (modificada el año 2010)
		V5.1	586.438	7.415.838	Delimitación zona de Inundación (Creada el año 2010)
		V5.2	586.535	7.415.801	
	Puliar	V1.1	587.523	7.422.529	CONAF
		V1.2	587.523	7.422.331	
		V2.1	587.411	7.422.279	Delimitación creada año 2010
		V2.2	587.534	7.422.278	
		V3.1	587.331	7.422.342	Delimitación creada año 2010
Peine	Salada	V1.1	587.155	7.380.528	CONAF
		V1.2	587.494	7.380.642	
		V2.1	588.291	7.380.247	CONAF
		V2.2	588.428	7.380.416	
		V3.1	587.959	7.380.591	Delimitación creada el año 2010 para identificar canal de recarga
		V3.2	587.970	7.380.610	
		V4.1	587.576	7.3805.12	Delimitación creada el año 2010 para identificar canal de descarga
	Saladita	V4.2	587.576	7.380.551	
		V1.1	586.795	7.381.626	CONAF
		V1.2	587.096	7.381.620	
		V2.1	586.610	7.381.448	CONAF
		V2.2	586.720	7.381.473	
	Interna	V3.1	587.015	7.380.917	CONAF
		V3.2	587.167	7.380.918	
		V1.1	586.791	7.381.997	Delimitación creada el año 2009 debido al aumento de la superficie
		V1.2	586.785	7.381.938	

Tabla 5. Coordenadas de Límites de Control.

5. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones de las superficies lacustres de los sistemas Soncor y Peine.

5.1. Sistema Soncor

En el siguiente acápite se presentan las superficies de los cuerpos de agua que componen el sistema hidrológico Soncor, el que se compone de laguna Chaxa, Barros Negros y Puilar. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6. Se presenta, además, la superficie del Desborde Sur, ubicado al sur de laguna Barros Negros. Esta medición es incorporada a partir del año 2016, pese a no ser estrictamente una laguna.

Debido a las restricciones de traslado e ingreso a la Reserva Nacional debido al contexto de Pandemia que se vive en 2020, para este año no se han realizado mediciones en terreno. Por este motivo, las superficies de Chaxa, Barros Negros, Puilar y Desborde sur, fueron calculadas con la información de la imagen satelital.

Cuerpo de agua	Superficie (m ²)
CHAXA	
Cuerpo principal	346.599
Total Chaxa	346.599
BARROS NEGROS	
Cuerpo principal	1.071.838
Área de inundación I	28.422
Área de inundación II	39.699
Área de inundación III	39.824
Total Barros Negros	1.179.782
PUILAR	
Cuerpo principal	63.142
Total Puilar	63.142
DESBORDE SUR (Zona de inundación)	
Cuerpo principal	301.545
Total Desborde Sur	301.545

Tabla 6. Superficies de cuerpos lacustres medidas en abril 2020 mediante análisis de imágenes satelitales - Sistema Soncor. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1. Laguna Chaxa

Laguna Chaxa está constituida por un cuerpo principal cuyo contorno se encuentra definido en su mayor parte por una costra salina blanquecina. No obstante, al lado este y oeste del cauce de descarga, ubicado en el sector sur, se presenta un contorno difuso y de compleja delimitación, producto de un sedimento barroso oscuro en condiciones de anegamiento, en donde se observa en algunos casos una lámina de agua de pocos milímetros de profundidad.

Como se mencionó anteriormente, laguna Chaxa no pudo ser muestreada en terreno, debido a que el ingreso a ella se encontraba restringido, así también el libre desplazamiento hacia el lugar a causa de las medidas sanitarias tomadas por el Gobierno en el contexto de Pandemia mundial. Por esto, el cálculo de la superficie de la lámina de agua se realizó solamente mediante el uso de imágenes satelitales, y debido a esta razón es importante señalar que los valores obtenidos no pudieron ser validados en terreno, situación que además se repite en todos los cuerpos de agua que se han calculado en el presente informe.

A continuación, en la Figura 6, se muestra la ubicación de la laguna Chaxa y los dos límites CONAF considerados para restringir su superficie.

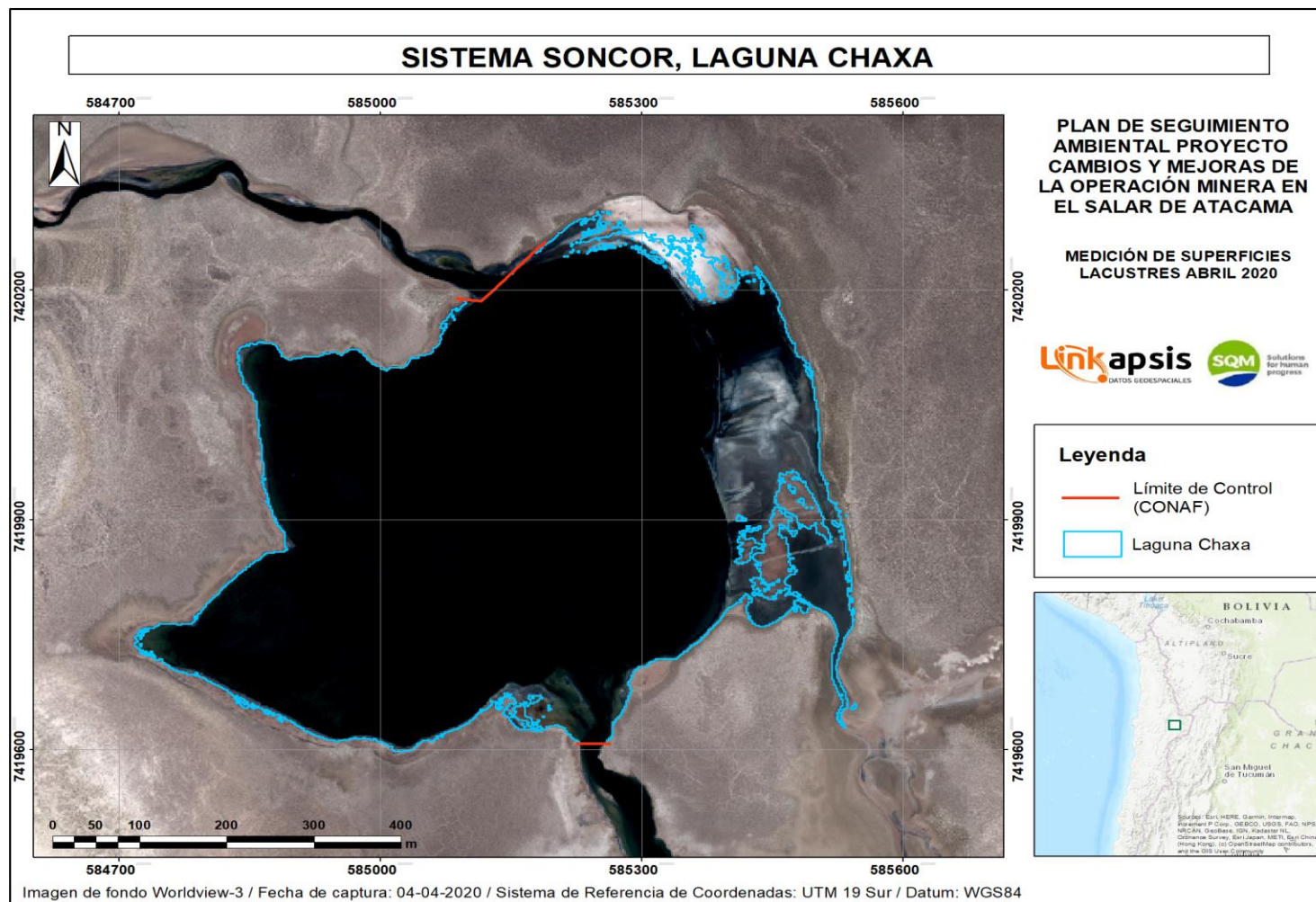


Figura 6. Resultados superficie laguna Chaxa. Fuente: elaboración propia.

5.1.2. Laguna Barros Negros

Laguna Barros Negros es el cuerpo de agua más grande del sistema Soncor. Está constituida por un cuerpo principal y tres (3) áreas de inundación sin contar con el cuerpo "Desborde Sur". El perímetro del cuerpo principal está bien definido con algunos sectores morfológicamente irregulares en el sector sur y noreste, lugares donde los cuerpos de agua menores se conectan al cuerpo principal.

El área de Inundación I, denominada "Cola de pez" y ubicada al oeste de la laguna presenta para este año un contorno menos definido con menor presencia de cuerpo hídrico en comparación a 2019 en donde se distinguía con claridad la superficie de esta área de Inundación.

El área de Inundación II se ubica en el borde este de la laguna. Finalmente, el área de Inundación III se ubica en el lado Sur del cuerpo lacustre

En la Figura 7, se muestra la laguna Barros Negros y los cinco límites de control considerados para restringir la superficie, de los cuales los límites 2009/2010 son los que separan el cuerpo principal de la laguna de sus tres áreas de Inundación.

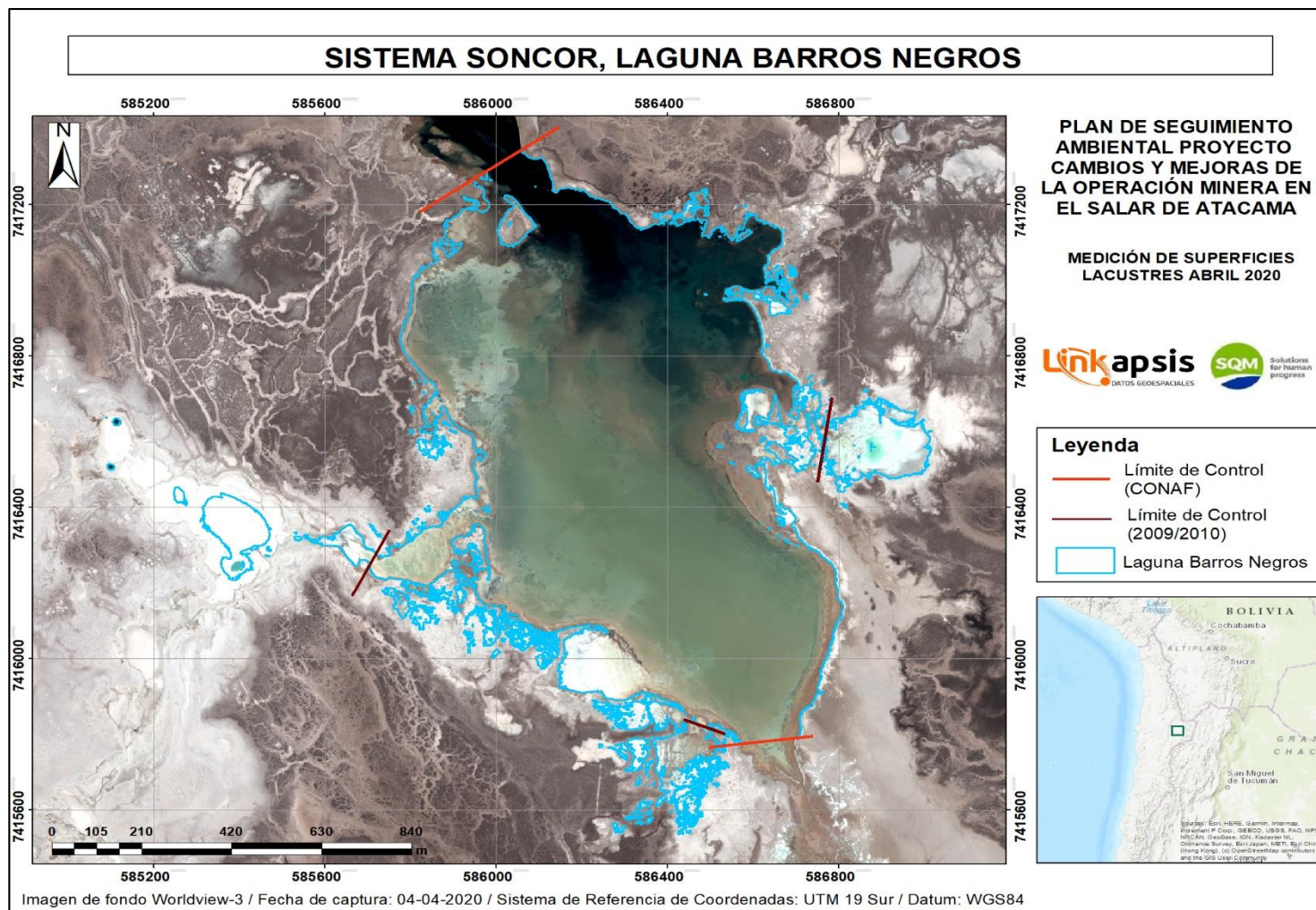


Figura 7. Resultados superficie laguna Barros Negros. Fuente: elaboración propi

5.1.3. Laguna Puilar

Laguna Puilar comprende un cuerpo principal de agua, con presencia de límites definidos y difusos. Los límites difusos están constituidos principalmente por un sustrato barroso húmedo y montículos sedimentarios, correspondientes a nidos de flamencos utilizados en los periodos de nidificación

En el límite sur se observa un canal de descarga con flujo norte-sur cuyo borde es difuso en gran parte de su recorrido debido al sedimento descrito previamente. Aquí se propuso un límite definido por parte de una mesa de trabajo en la que participó tanto el Titular como distintas autoridades el año 2010 para identificar el cuerpo principal de la laguna el cual fue creado en base al registro histórico que se tenía de la laguna en dicho momento.

Al igual que en el caso de las demás lagunas, no se pudo realizar una campaña en terreno, debido a que el ingreso a ella se encontraba restringido, así también el libre desplazamiento hacia el lugar a causa de las medidas sanitarias tomadas por el Gobierno en el contexto de Pandemia mundial. Por esto, el cálculo de la superficie de la lámina de agua se realizó solamente mediante el uso de imágenes satelitales, y debido a esta razón es importante señalar que los valores obtenidos no pudieron ser validados en terreno, situación que además se repite en todos los cuerpos de agua que se han calculado en el presente informe.

En la Figura 8, se muestra laguna Puilar y los tres límites considerados para restringir su superficie. En ella se puede apreciar en el límite de control CONAF Oriente la presencia de un cuerpo de agua somero y lodo en su alrededor, por lo cual a simple vista con la imagen de alta resolución espacial se denota un fino cuerpo de agua con mezcla en sus bordes de lo que se puede considerar lodo. Esto es importante señalarlo ya que no se aprecia de manera fácil en la cartografía de la Figura 8, pero el resultado de los índices y su posterior validación secundaria con la imagen fusionada dan cuenta de esta posibilidad (esto ante la imposibilidad de corroborar esto en terreno).

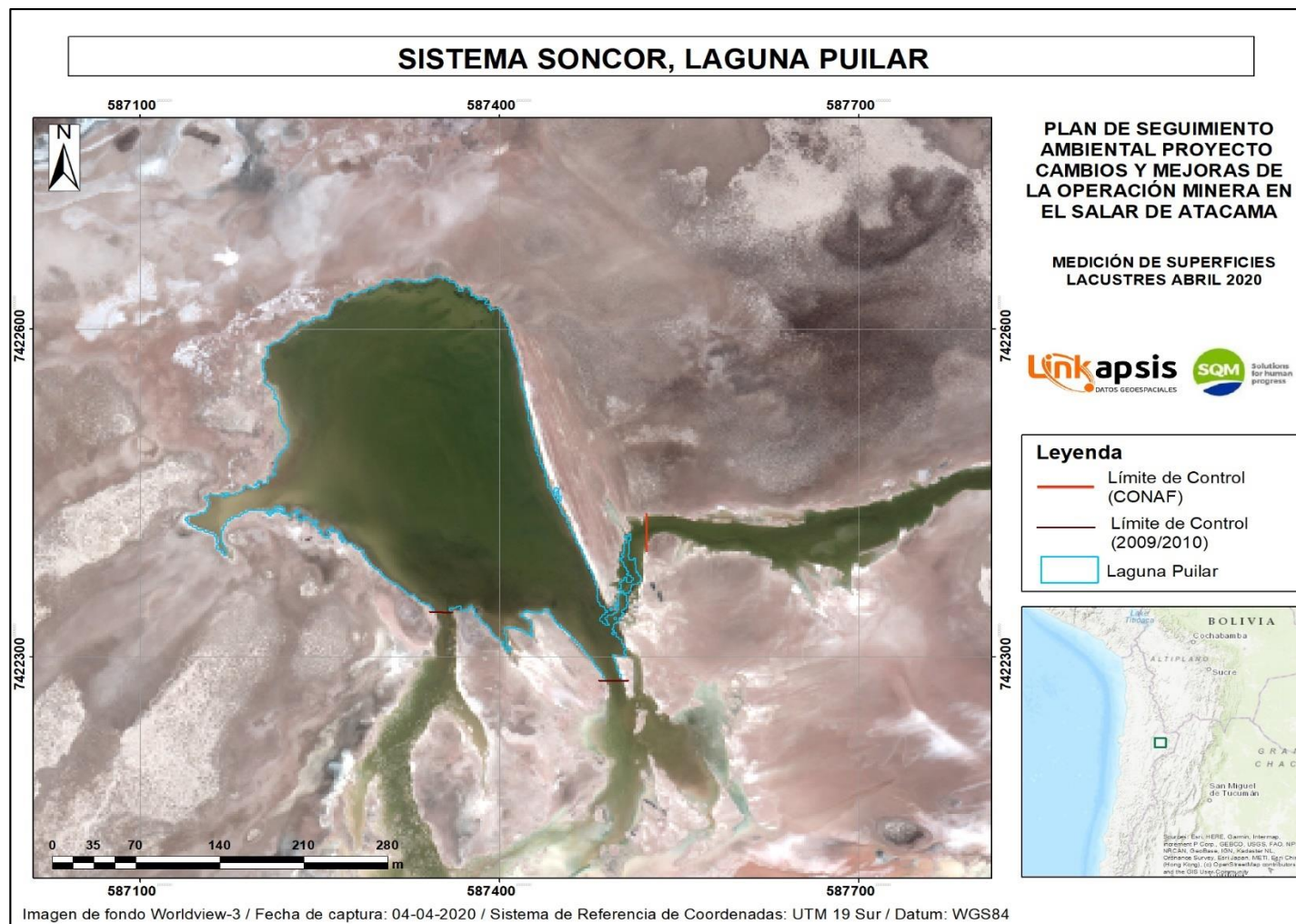


Figura 8. Resultados superficie laguna PUILAR. Fuente: Elaboración propia

5.1.4. Desborde Sur

Este cuerpo de agua, incorporado al control y monitoreo desde el año 2016, corresponde a un cuerpo que se origina como desborde de la Laguna Barros Negros y no corresponde a una unidad regular (permanente) como lo son las lagunas de Chaxa, Barros Negros y Puilar. Debido a esto, se observan límites difusos en el contorno.

En la Figura 9 se observa la unidad irregular denominada Desborde sur y su superficie determinada únicamente con la imagen satelital.

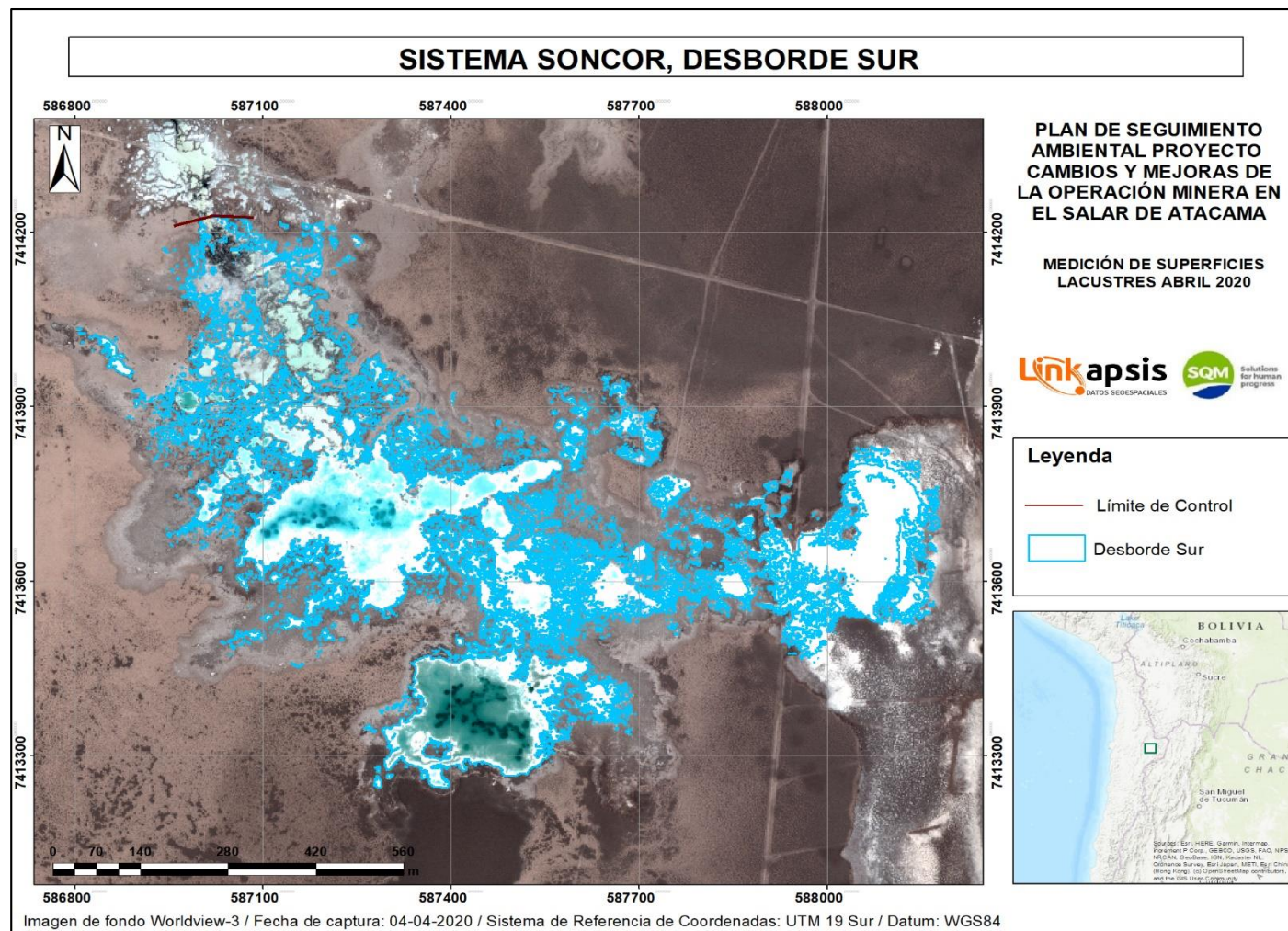


Figura 9. Resultados superficie Desborde Sur. Fuente: Elaboración propia.

5.2. Sistema Peine

En el siguiente acápite se analizará las superficies de las lagunas que componen el sistema hidrológico Peine y que corresponden a las lagunas Salada, Saladita e Interna. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7.

Cuerpo de agua	Superficie (m ²)
SALADA	
Cuerpo principal	171.457
Canal de recarga	4.115
Canal de descarga	4.666
Total Salada	180.238
SALADITA	
Cuerpo principal	90.767
Total Saladita	90.767
INTERNA	
Cuerpo principal	446.388
Total Interna	446.388

Tabla 7. Superficies de cuerpos lacustres medidas en abril 2020 mediante análisis de imágenes satelitales - Sistema Peine. Fuente: elaboración propia.

5.2.1. Laguna Salada

Laguna Salada está compuesta por un cuerpo principal y dos canales superficiales. El cuerpo principal muestra contornos más definidos que las otras lagunas observadas, permitiendo una fácil identificación de la laguna. El canal de recarga se ubica en el sector este de la laguna y se caracteriza por contornos levemente más difusos en comparación con el cuerpo principal. El canal de descarga ubicado en la medianía de la Laguna en el sector Oeste presenta contornos definidos de forma muy similar al cuerpo de agua principal.

A continuación, en la figura 10 se muestra la imagen con el contorno resultado, en ella se puede apreciar en el límite de control CONAF Sur-Oriente en el canal, la presencia de un brazo de agua delgado que con la imagen de alta resolución espacial al revisar de manera visual denota un fino cuerpo hídrico con mezcla en sus bordes de lo que se puede considerar lodo, lo cual a su vez ha sido corroborado con los respectivos índices que han contorneado también solo esta delgada línea de agua. Además, cabe señalar una vez más, que al igual que en el caso de las demás lagunas, no se pudo realizar una campaña en terreno, debido a que el ingreso a ella se encontraba restringido, así

también el libre desplazamiento hacia el lugar a causa de las medidas sanitarias tomadas por el Gobierno en el contexto de Pandemia mundial. Por esto, el cálculo de la superficie de la lámina de agua se realizó solamente mediante el uso de imágenes satelitales y debido a esta razón es importante señalar que los valores obtenidos no pudieron ser validados en terreno.

En esta laguna existen cuatro límites que dan origen a los tres sectores de la laguna: Cuerpo principal, Canal de recarga y Canal de descarga.

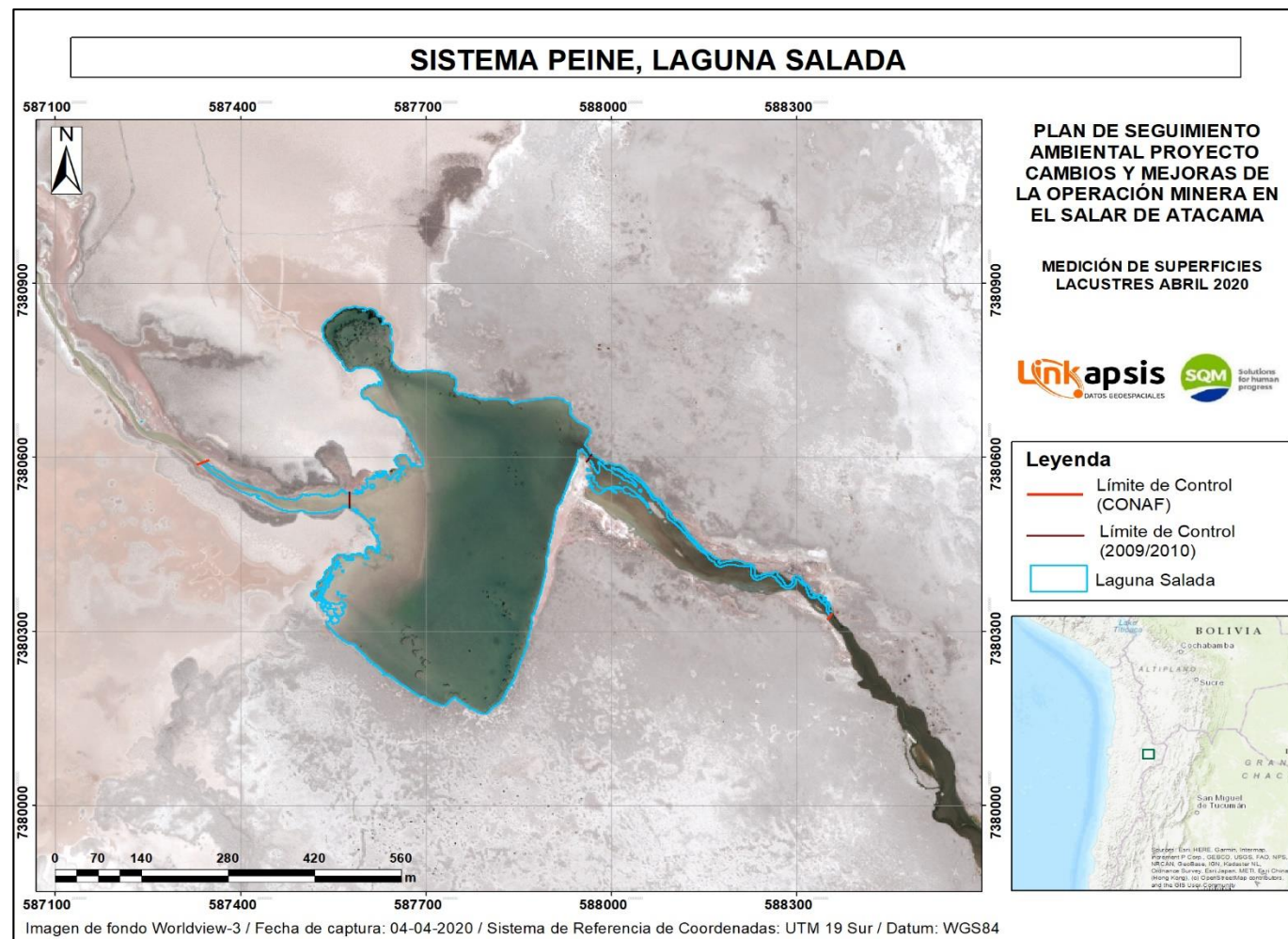


Figura 10. Resultados superficie Laguna Salada. Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Laguna Saladita

Laguna Saladita, a diferencia de Laguna Salada presenta contornos más difusos, donde existen bordes de la laguna con presencia de barro húmedo y/o muchas entradas de sedimento al interior del cuerpo de agua.

A continuación, en la figura 11 se muestra la imagen con el contorno resultado. En esta laguna existen tres límites CONAF que fueron considerados para la estimación de superficie.

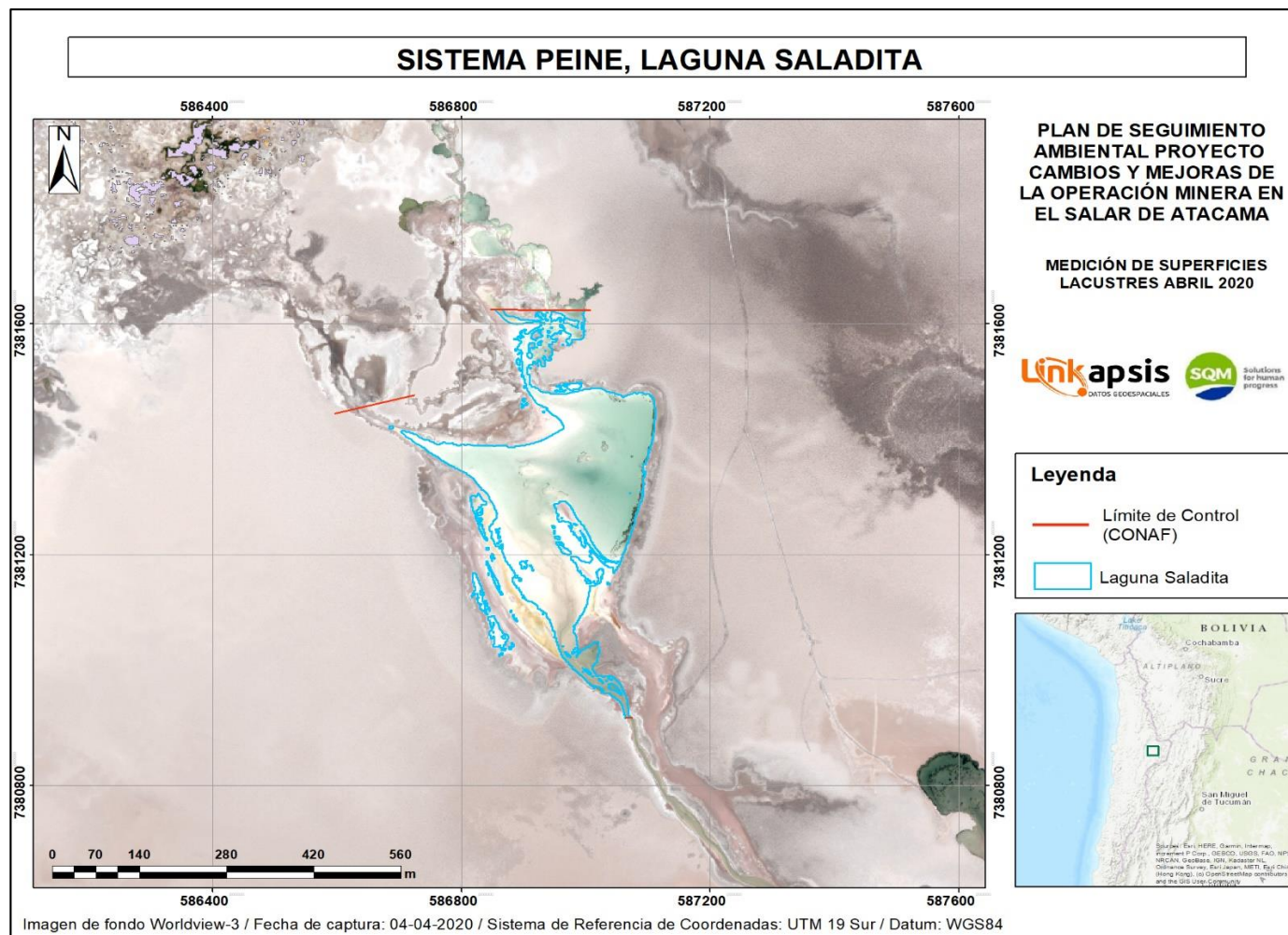


Figura 11. Resultados superficie Laguna Saladita. Fuente: Elaboración propia.

5.2.3. Laguna Interna

Tal como se señala en la validación de superficies lacustres del año 2009, Laguna Interna no conforma un cuerpo lacustre de superficie continua, como es el caso de las otras lagunas analizadas en el sector. En efecto, no es posible distinguir un cuerpo de agua principal que se mantenga estable en el tiempo.

A continuación, en la figura 12 se muestra el resultado obtenido. Cabe recalcar que los límites de esta laguna fueron establecidos respecto del informe 2010, considerando que CONAF no limita su extensión.

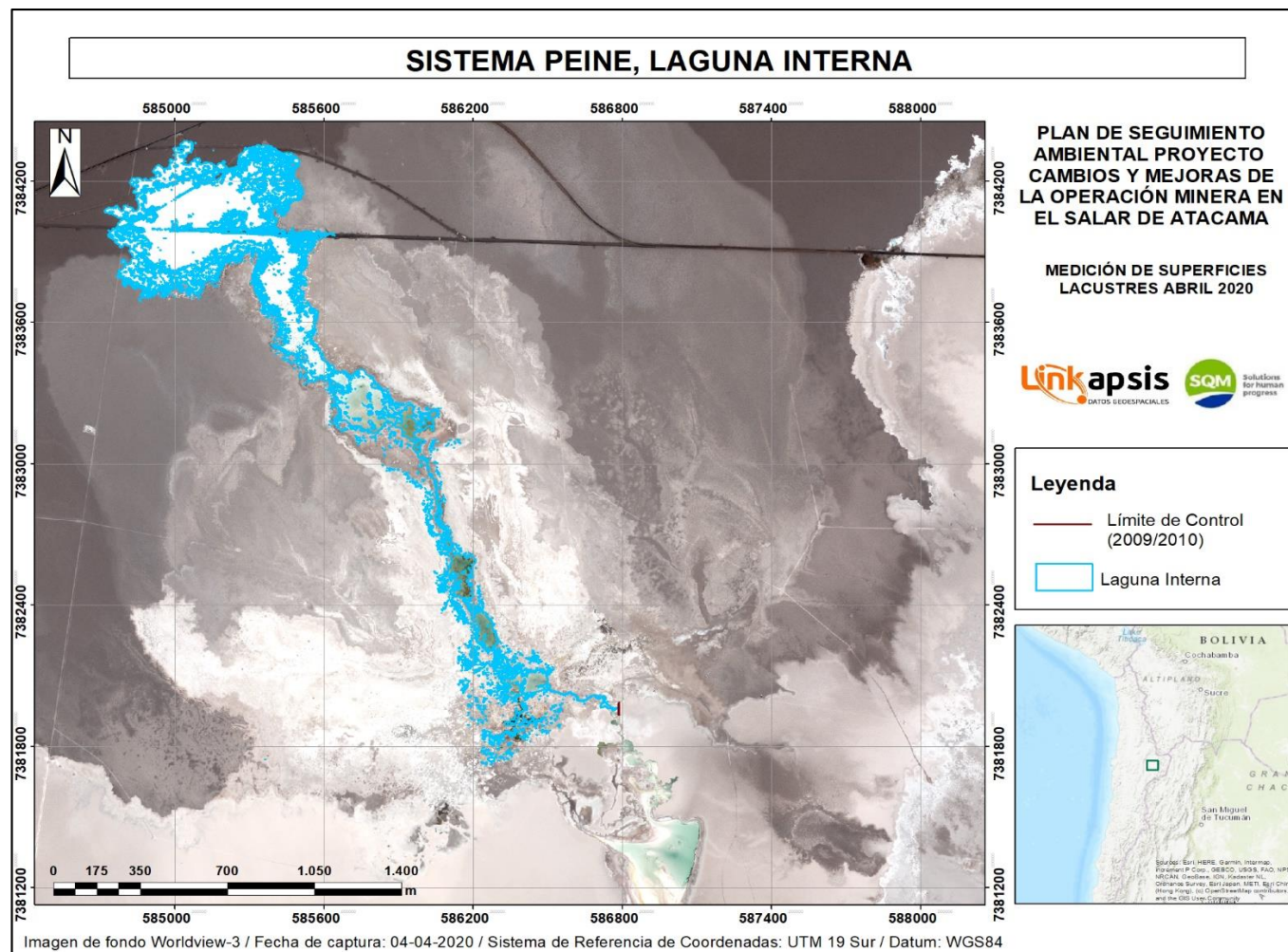


Figura 12. Resultados superficie Laguna Interna. Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES

Se han presentado las superficies lacustres obtenidas para los sistemas hidrológicos Soncor y Peine en el periodo de monitoreo abril 2020. Por restricciones de acceso a las lagunas no se pudo efectuar levantamientos en terreno de ningún tipo en los cuerpos lacustres del sistema Soncor y Peine, por lo cual los cálculos se realizaron únicamente mediante imágenes satelitales.

Respecto a lo planteado, sobre el uso de las imágenes satelitales sin apoyo de campañas en terreno, es importante recalcar que los resultados obtenidos para cada cuerpo lacustre no deben ser considerados como un valor absoluto, es decir, si bien el uso de imágenes satelitales mediante metodologías corroboradas son una herramienta de alta fiabilidad que poseen una larga trayectoria de utilización en diversas áreas de desarrollo, es recomendable siempre poder validar algunos resultados difusos en localizaciones que puedan tener algún nivel de complejidad mayor en torno al procesamiento espectral de los píxeles de una imagen, por lo tanto, si bien los valores finales obtenidos se acercan en gran medida a la cuantificación real de los cuerpos lacustres en estudio, se debe considerar que todo dato obtenido de manera remota como lo son las imágenes satelitales, sometidas a un flujo de procesamiento conocido, se tiene que corroborar en algunos sectores en terreno para finalmente tener un resultado final aun más cercano a la realidad, como ha sido el caso de los años anteriores en los cuales se pudo realizar esta tarea.

A continuación, se presentan los resultados:

La extensión de los cuerpos de agua superficiales del sistema Soncor corresponde a los siguientes:

- Chaxa: 346.599 m²
- Barros negros: 1.179.782 m²
- Puilar: 63.142 m²
- Desborde Sur (Zona de inundación): 301.545 m²

Por otro lado, para los cuerpos de agua superficiales del sistema Peine corresponden a los siguientes:

- Salada: 180.238 m²
- Saladita: 90.767 m²
- Interna: 446.388 m²

7. REFERENCIAS

Bernstein, L. S.; S. M. Adler-Golden.; X. Jin.; B. Gregor. and R. L. Sundberg. 2012. Quickatmospheric correction (QUAC) code for VNIR-SWIR spectral imagery: Algorithm details. In 2012 4th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS) (pp. 1-4).

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

Gilabert, M., González-Piqueras J. & García-Haro J., 1997. Acerca de los índices de vegetación. Revista Española de teledetección N°8 diciembre. 10 p.

KRAUSE, K. 2003. Radiance conversion of Quickbird data. Technical note. DigitalGlobe Inc. Longmont, Colorado USA 4 pp.
https://apollomapping.com/wpcontent/user_uploads/2011/09/Radiance_Conversion_of_QuickBird_Data.pdf

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

NASA, 2011. Landsat 7 Science Data Users Handbook Chapter 11. Recuperated in: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html.

Siddiqui, Y. 2003. The modified IHS method for fusing satellite imagery. ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings, May 5-9, 2003.

Podger, N., Colwell, W. y Taylor, M. 2011. GeoEye-1 Radiance at Aperture and Planetary Reflectance.

Digital Globe, 2014. Imagery Support Data Documentation version 1.1.2.

Anexo 10.2

Antecedente de informe análisis imagen satelital sistema
Quelana

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LAS ÁREAS LAGUNARES EN EL SALAR DE ATACAMA

INFORME TÉCNICO
IT27-20-01



Solutions
for human
progress

GEM
Gestión y Economía Minera Ltda.

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LAS ÁREAS LAGUNARES EN EL SALAR DE ATACAMA

INFORME TÉCNICO

JUAN IGNACIO GUZMÁN
Gerente de Proyecto
jiguzman@gem-ing.cl

CANDELARIA RETAMAL
Ingeniera Analista
cretamal@gem-ing.cl

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO.....	2
1. INTRODUCCIÓN	4
2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....	6
3. METODOLOGÍA	8
3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
3.2. METODOLOGÍA ANÁLISIS LAGUNAR	10
4. DETERMINACIÓN DE LAS SUPERFICIES LAGUNARES. 18	
4.1. SONCOR.....	19
4.2. PEINE	24
4.3. AGUAS DE QUELANA	29
5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS	31
5.1. ANÁLISIS DE QUIEBRES TEMPORALES	31
5.1. SONCOR.....	32
5.2. PEINE	39
5.3. AGUAS DE QUELANA	44
6. REGRESIÓN MULTIVARIABLE	47
6.1. REGRESIÓN MULTIVARIABLE.....	47
7. CONCLUSIONES.....	54
8. BIBLIOGRAFÍA	58

GEM | Gestión y Economía Minera Ltda.
Av. Las Condes 12461, Torre 3, oficina 805
Las Condes, Santiago, Chile
Fono: +56 2 3263 26 59
contacto@gem-ing.cl
www.gem-ing.cl

VERSIÓN	FECHA	DESCRIPCIÓN	ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ
0	24-11-2020	Versión original	CR/JIG	JIG	JIG

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente informe se desarrolla un análisis de la evolución de las áreas lagunares de los sistemas de Soncor, Peine y Aguas de Quelana en conformidad con lo dispuesto por la Superintendencia del Medio Ambiente mediante la Res. Ex. N°29/ ROL F-041-2016, 2020, en relación con el hecho infraccional N°1: “Extracción de salmuera por sobre lo autorizado, durante el período de agosto de 2013 y agosto de 2015”.

En base al requerimiento en el que se estipula que la empresa deberá presentar elementos más detallados de análisis que permitan reducir la incertidumbre y justificar adecuadamente el descarte de efectos respecto del comportamiento dinámico de los sistemas hídricos, se desarrolla este estudio, cuya metodología se encuentra basada en el análisis de imágenes satelitales y análisis de regresión, y considera como principales objetivos los que se enumeran a continuación:

1. Complementar la información bibliográfica, presentando los principales artículos científicos relacionados con el análisis de la evolución dinámica de sistemas lagunares.
2. Considerar una mayor ventana de información en el tiempo, lo que implica enriquecer el estudio con un mayor número de años en los que se cuente con imágenes satelitales. Esto se realiza con la intención de incorporar en el análisis de evolución lagunar el comportamiento previo a la entrada en operación de la RCA 226/2006.
3. Aumentar la frecuencia de muestreo para las imágenes satelitales, con la finalidad de reducir las posibles incertidumbres relacionadas con la estacionalidad.
4. Presentar un análisis estadístico para hallar la significancia de los resultados, sustentado en un modelo de regresión lineal.
5. Desarrollar un análisis estadístico multivariable, con la intención de determinar la existencia de correlación entre el comportamiento de las áreas lagunares y distintas variables que podrían resultar explicativas de dicho fenómeno.

En base al análisis estadístico de la evolución de las áreas lagunares de los sistemas de Soncor y Peine es posible concluir que con un 95% de confianza ninguno de los cuerpos principales presenta tendencia

durante el período infraccional, luego no es posible relacionar un decaimiento en las áreas con la sobre extracción ocurrida entre agosto de 2013 y agosto de 2015.

Junto con esto, y en relación con el período completo de disponibilidad de datos (1986-2018), Soncor posee una tendencia negativa y Peine una tendencia positiva al 95% de confianza. Sin embargo, las fluctuaciones en las áreas lagunares son marginales en comparación al área total del sistema, en el caso de Soncor la caída corresponde a un 0,007% por año, y en el caso de Peine el incremento corresponde a un 0,011% por año.

En el caso de Aguas de Quelana, a través del análisis de evolución temporal efectuado en este sistema, se concluye que el sistema lagunar no presenta tendencia estadísticamente significativa al 95% de confianza para el período en el que se tienen datos, el cual se encuentra comprendido entre 2006 y 2020.

Finalmente, para los análisis de regresión multivariable, a través de la incorporación de distintas variables explicativas, se logra explicar alrededor de un 70% de la variabilidad en la evolución del área de Soncor. En el caso de Peine, fue posible dar explicación a un 81% de la variabilidad de la evolución del área del sistema. Además, se concluye al 95% de confianza que ningún sistema muestra una correlación negativa entre la extracción de salmuera y la evolución de las superficies lacustres. Por lo tanto, no se puede asociar la extracción de salmuera con una reducción del área de los cuerpos lagunares.

1. INTRODUCCIÓN

Conforme a lo dispuesto por la Superintendencia del Medio Ambiente (en adelante SMA) mediante la Res. Ex. N°29/ ROL F-041-2016 con fecha 26 de octubre de 2020, y en relación con el hecho infraccional N°1: “Extracción de salmuera por sobre lo autorizado, durante el período de agosto de 2013 y agosto de 2015”, se determinó que la empresa SQM Salar S.A (SQM Salar en lo sucesivo) debe presentar elementos más detallados de análisis que permitan reducir la incertidumbre y justificar adecuadamente el descarte de efectos respecto del comportamiento dinámico de los sistemas hídricos.

En línea con este requerimiento, GEM desarrolló un informe técnico que tiene por finalidad complementar el análisis expuesto por SQM Salar en el informe técnico “Análisis de superficies lagunares Sistemas Soncor, Peine y Aguas de Quelana. Cargo N°1 DE Res. Ex N°21/ROL F-041-205. SQM Salar S.A.”, con respecto al estudio de la evolución temporal de las superficies lagunares. Particularmente, se trabajará en la medición de las superficies lacustres de los sistemas Soncor, Peine y Aguas de Quelana, en base a un conjunto de información de imágenes satelitales tomadas entre 1986 y 2020. De forma complementaria, se consideró información respecto a la extracción de salmuera y muestreos de aforos (caudales). Con esto, se pretende dar respuesta a las principales observaciones que fueron catalogadas como deficiencias en la Tabla N°1, N°3 de la Res. Ex. N°29/ ROL F-041-2016.

El informe está estructurado de la siguiente manera. En el Capítulo 3 se presenta la revisión de antecedentes con la que se identifican las principales deficiencias señaladas por la SMA respecto al objeto a tratar en este informe. En base a los resultados de la revisión, se analizará la bibliografía y artículos científicos con el fin de revisar el soporte científico disponible para complementar el análisis acerca de la evolución de áreas de las lagunas, empleando imágenes satelitales. Asimismo, en este capítulo se describe la metodología empleada, fundamentándose su validez científica para responder a la interrogante de cómo ha evolucionado el área de las lagunas en el periodo de análisis (1986-2020).

En el capítulo 4 se presentan los resultados de las áreas de cada sistema lacustre, separando – cuando la información lo permite – la información por cuerpos lagunares principales, así como desbordes de estos. En el Capítulo 5 se analizan dichos resultados desde un punto de vista estadístico, con objeto de determinar tendencias que sean estadísticamente significativas. El Capítulo 6 presenta un análisis de regresión donde se detallan las variables que debieran explicar de forma estadísticamente significativa

el cambio en las áreas de las lagunas en el tiempo. En el Capítulo 7 se presentan las conclusiones del estudio, mientras que en el Capítulo 8 se detalla la bibliografía referenciada a lo largo del estudio.

2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Para comenzar, es necesario realizar una revisión general de los antecedentes presentados a la SMA por SQM Salar S.A. en el documento: “Informe de superficies lagunares Sistemas Soncor, Peine y Aguas de Quelana. Cargo N°1 DE Res. Ex N°21/ROL F-041-205. SQM Salar S.A.” en 2018. Esto se realizará para facilitar la búsqueda de información científica atinente que sea de utilidad en la labor de generar una propuesta metodológica robusta con el fin de complementar el análisis.

El informe cuenta con una descripción preliminar respecto de los cuerpos que componen cada uno de los sistemas de interés, desde donde se extrae que: (1) Soncor se compone por las lagunas de Chaxa, Barros Negros y Puilar (2) Peine se compone por las lagunas de Salada, Saladita e Interna y (3) Aguas de Quelana corresponde a un sistema que se compone por un gran número de cuerpos lacustres muy dispersos y de dimensiones variables (que no tienen identificación propia).

Para llevar a cabo el análisis, se emplearon imágenes satelitales Landsat para los sistemas de Soncor y Peine para el período comprendido entre 2008 y 2017. En el caso del sistema Aguas de Quelana, el análisis no fue presentado en el informe de SQM Salar, justificándose que su monitoreo se realiza a través de una metodología distinta que no resulta comparable con la empleada en Soncor y Peine. Respecto a los resultados, el informe de SQM Salar concluye que la laguna Chaxa presenta una tendencia decreciente con una pérdida total de 47.416 m², cuya mayor merma se presentó en el período 2009-2010.

En el “Informe de superficies lagunares Sistemas Soncor, Peine y Aguas de Quelana. Cargo N°1 DE Res. Ex N°21/ROL F-041-205. SQM Salar S.A., 2018” se concluye que, la única laguna donde existiría una reducción en el área lagunar es en Chaxa, ya que el resto de los cuerpos no presenta una tendencia estadísticamente significativa.

En base a estos antecedentes, las principales deficiencias del informe (SQM, 2018) planteadas por la SMA pueden dividirse en cuatro puntos principales que se presentan en el N°3 de la Tabla N°1 de la Res. Ex. N°29/ ROL F-041-2016, y que lleva por nombre: “Análisis de informes técnicos presentados por SQM Salar S.A, relativos a que la sobre extracción de salmuera no habría generado efectos negativos sobre los objetos de protección”.

1. El informe aporta análisis estadísticos para un número acotado de datos (uno por año), de un período asociado al seguimiento ambiental (2008 – 2017), no considerando el comportamiento histórico, el cual debiese incluir información previa al inicio de las actividades de explotación que sea representativa del período previo a la operación del proyecto y que permita demostrar la variabilidad del funcionamiento de los sistemas.
2. Es conocida la variabilidad interanual que presentan estos cuerpos y su asociación con las precipitaciones, por lo que no bastaría con un análisis estadístico tan acotado.
3. El sistema de Aguas de Quelana no fue analizado como sí se hizo con los sistemas de Soncor y Peine, por lo que se concluye que los estudios entregados por SQM Salar S.A. serían insuficientes para abordar esta variable de interés.
4. Se ha constatado una pérdida de la superficie total de Chaxa (47.416 m^2), que registra pérdidas durante el período infraccional y posterior al mismo, lo que se ve agravado por la significativa pérdida de superficie que habría sufrido la laguna en el período previo a la infracción (2009 – 2010), efecto que resultaría insuficientemente abordado por la empresa SQM Salar S.A. en el Plan de Cumplimiento, ya que, si bien el efecto fue descrito y se constató la permanente disminución de la superficie lagunar, no se presentaron acciones que se hicieran cargo del mismo. Asimismo, se debe considerar que la laguna Chaxa es parte del sistema Lacustre Soncor, sistema respecto del cual se activó la Fase II con fecha 20 de mayo de 2018.

3. METODOLOGÍA

3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Con la finalidad de sustentar el análisis de la evolución del área de las distintas lagunas referenciadas en el documento “Informe de superficies lagunares Sistemas Soncor, Peine y Aguas de Quelana. Cargo N°1 DE Res. Ex N°21/ROL F-041-205. SQM Salar S.A.” presentado por SQM Salar S.A. a la SMA en el contexto de la Res. Ex. N°29/ ROL F-041-2016, se realiza en primer lugar un estudio bibliográfico que contenga las principales bases que en la actualidad son validadas por la comunidad científica para realizar este tipo de análisis.

Antes de introducir la metodología utilizada para medir el área de las lagunas es necesario mencionar que en el caso específico de las lagunas referidas en la Res. Ex. N°29/ ROL F-041-2016 existe una única referencia académica publicada en una revista indexada, al menos conocida por GEM, y que da cuenta del área de estas lagunas. Esta se refiere a Tejeda *et. al.* (2003), quienes a partir de una modelación hidrodinámica del Salar de Atacama establecen la existencia de una serie de mecanismos ambientales que permiten que “las lagunas presentes en el Salar de Atacama no experimenten cambios significativos en tamaño a pesar de las variaciones que ocurren en la recarga de agua dulce” (Tejeda *et. al.*, 2003, pág. 34, en inglés en el original). Esta información puede ser complementada con estudios que analicen la dinámica de los sistemas en escalas temporales mayores. Este es el caso del informe “Cambios paleo climatológicos y sedimentológicos durante el Pleistoceno- Holoceno en el Salar de Atacama”, realizado por Le Roux (2018).

Le Roux (2018), presenta un estudio sedimentológico del desarrollo dinámico del Salar de Atacama durante el Cuaternario, en el que se estudia la evolución de los sistemas sedimentológicos del Delta de San Pedro y del sistema Soncor en el pasado geológico, relacionándolo con cambios paleoclimatológicos que afectaron la región durante el Holoceno. Según el autor, la dinámica de las lagunas del Sistema Soncor ha sido muy variable durante el período Holoceno, pudiendo aumentar o disminuir sus áreas lacustres dependiendo de los eventos climatológicos que imperen en el momento. Con estos antecedentes, se comprende que Barros Negros, Chaxa y Puilar dependen de ciclos climáticos de escala regional, pudiendo expandirse, contraerse, cambiar de zonas de desbordes, aumentar o disminuir su caudal de descarga, dependiendo de la cantidad disponible de agua superficial. Por lo

tanto, cualquier variación en la dinámica del Sistema Soncor debe estudiarse y entenderse primariamente como parte de ciclos climáticos regionales, a los que pueden superponerse efectos antrópicos. La cuantificación de áreas lacustres surge como una rama fundamental de la morfometría de lagos (Håkanson, 1981). Las primeras metodologías de medición de áreas lagunares nacen en la década de 1940 y basan el seguimiento de las superficies en mapeos manuales del contorno lagunar (Welch, 1948; Hutchinson, 1975; Wetzel, 1975). Con la aparición de los sonares, las metodologías de seguimiento de área fueron complementadas con metodologías de medición de mayor precisión (Håkanson, 1981).

Hacia la década de 1980, cuando su uso se vuelve de más fácil acceso, comienza la implementación del uso de imágenes satelitales con objeto de determinar el área de las superficies lagunares por medio de sensores remotos ópticos. Una excelente referencia para el uso de este tipo de tecnologías de sensores remotos ópticos en el caso del estudio espacial y temporal de los medioambientes asociados a salares es Milewski (2020).

La metodología más ampliamente utilizada en la actualidad para realizar el análisis de áreas de cuerpos de agua fue introducida por Stuart McFeeters en 1996 (McFeeters, 1996). McFeeters sugiere utilizar las bandas que provienen de las mediciones satelitales por medio de los sensores remotos ópticos para generar un índice que funciona como un filtro sobre la imagen. A partir de dicho índice es posible reconocer con alta precisión aquellos cuerpos que corresponden a agua y diferenciarlos de otros que podrían corresponder a vegetación o a humedad residual del suelo.

El índice introducido por McFeeters (1996), y empleado en el presente análisis, lleva por nombre *Normalized Difference Water Index* (en adelante NDWI). Para validar el uso de este índice cabe destacar que este artículo ha recibido cerca de 3.500 citaciones, lo que soporta el que su utilización en el mundo científico se encuentre ampliamente validada. Más aún, el uso de esta metodología aplicada al seguimiento de áreas lagunares, se basa en aquella aprobada por la COREMA de la Región de Antofagasta en la Resolución Exenta N°244/2010, validando de esta forma su implementación en el marco de los requerimientos de la autoridad ambiental de la región.

Pese a su amplio uso, el NDWI fue originalmente planteado con foco en la identificación remota de agua presente en la vegetación de los sistemas (Gao, 1996). Esto significa que el índice no solo permite el reconocimiento de cuerpos de agua sino también de vegetación y humedad residual del suelo. Es por este motivo que se han introducido modificaciones al NDWI originalmente planteado por McFeeters (1996) para emplearlo con el propósito de identificar únicamente cuerpos de agua (Ji *et. al.*,

2009). En particular, la consideración principal que ha sido incorporada con este fin se refiere a que el umbral de detección de agua del índice varía dependiendo de las proporciones del subpíxel y los componentes ambientales que caracterizan la zona de análisis. Luego, no se puede asumir que en todos los casos cualquier píxel de la imagen tratada que tome valores mayores a cero corresponda a agua. En algunas publicaciones se especifica que el umbral mínimo podría tomar valores de más de 0,1 o incluso de 0,3 (Sheng *et. al.*, 2016). Se recomienda entonces la calibración de datos como una metodología adecuada para encontrar dicho umbral mínimo para el NDWI que permita detectar cuerpos de agua.

La idea de realizar un seguimiento temporal de un sistema lacustre se ha popularizado durante la última década. Esto debido a que con anterioridad los efectos de la urbanización, el cambio climático y la industrialización no eran considerados factores de relevancia ambiental para evaluar el estado de los sistemas, por lo que la mayoría de las mediciones se hacían con el fin de caracterizar (una vez en el tiempo) y no necesariamente monitorear (análisis sistemáticos en el tiempo). Junto con esto, la incorporación de nuevas tecnologías en el tiempo se ha ido intensificando desde la aparición de las imágenes satelitales en la década de 1980, esto ha permitido la aparición de instrumentos más precisos y confiables que facilitan el desarrollo de estudios basados en el seguimiento temporal de los sistemas lagunares.

Existen diversos estudios que acreditan la utilización de series de tiempo y análisis estadísticos para hacer un seguimiento del estado de distintos sistemas lagunares en el tiempo. Particularmente, algunos estudios de interés en cuanto al uso de la metodología permiten realizar seguimiento de áreas lagunares en Egipto, áreas cubiertas por glaciares y reservas de agua (Eid *et. al.*, 2015; Huang *et. al.*, 2012; Yao *et. al.*, 2019).

3.2. METODOLOGÍA ANÁLISIS LAGUNAR

Con la finalidad de dar respuesta a los cuatro puntos indicados como deficientes en las observaciones de la SMA relativas al cargo 1 (presentados en el Capítulo 2) se llevará a cabo un análisis de imágenes satelitales tipo Landsat, seguido de un estudio estadístico basado en series de tiempo para estudiar el comportamiento de los sistemas lacustres de Soncor, Peine y Aguas de Quelana. Con la incorporación de Aguas de Quelana se espera dar respuesta además a la indicación número 3 de la SMA en la que se solicita añadir dicho sistema al análisis.

La metodología empleada toma en consideración las recomendaciones entregadas por la SMA, además de la información aceptada por la comunidad científica respecto del adecuado seguimiento de áreas lagunares. Los pasos se enuncian en las subsecciones que se presentan a continuación.

3.2.1. TRATAMIENTO DE IMÁGENES: INCORPORACIÓN DEL ÍNDICE NDWI

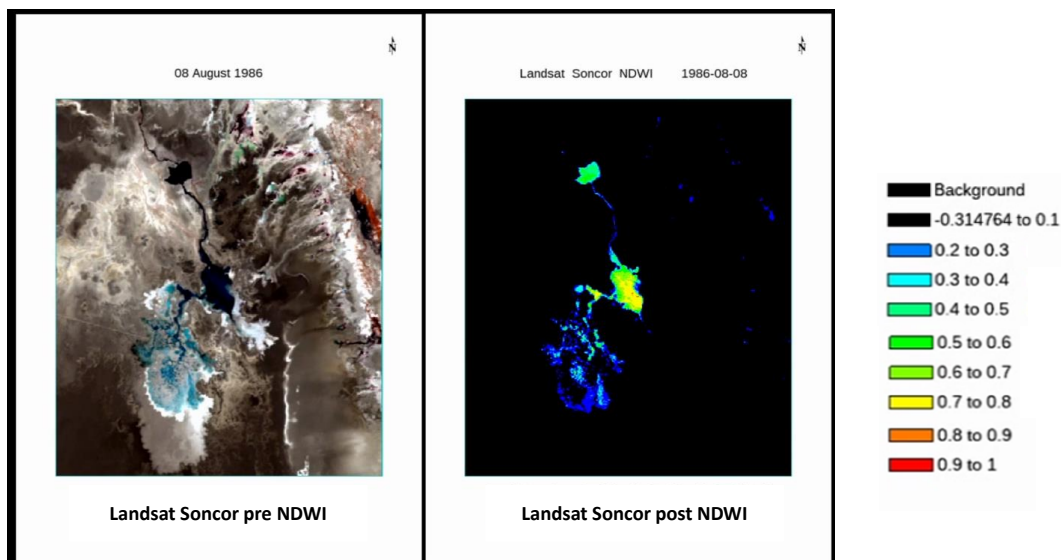
Para desarrollar este punto es necesario, en primer lugar, procesar las imágenes satelitales en base a las bandas de refracción. En la **Tabla 3.1** se resumen las principales bandas detectables a través del uso de satélites tipo Landsat y su respectivo rango de longitud de onda.

TABLA 3.1. BANDAS Y LONGITUDES DE ONDA DETECTABLES POR SATÉLITES LANDSAT
Fuente: US Geological Service.

BANDAS	LONGITUD DE ONDA [micrómetros]	BANDAS	LONGITUD DE ONDA [micrómetros]
Banda 1 – Aerosol costero	0,43 – 0,45	Banda 7 – SWIR 2	2,11 – 2,29
Banda 2 – Azul	0,45 – 0,51	Banda 8 – Pancromático	0,50 – 0,68
Banda 3 – Verde	0,53 – 0,59	Banda 9 – Cirrus	1,36 – 1,38
Banda 4 – Rojo	0,64 – 0,67	Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10,6 – 11,19
Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0,85 – 0,88	Banda 11 – Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11,5 – 12,51
Banda 6 – SWIR 1	1,57 – 1,65		

Tomando esto en consideración, se utiliza una relación matemática que vincula ambas bandas requeridas. Los resultados, que entregan valores numéricos entre -1 y 1, se aplican en la extensión completa de la imagen, pudiendo colorear con una escala definida aquellos valores de NDWI superiores a cero. En la **Figura 3.1** que se presenta a continuación, se muestra un ejemplo de una imagen satelital antes y después de ser tratada con la implementación del filtro NDWI.

FIGURA 3.1. EJEMPLO DE IMAGEN SATELITAL PRE Y POST TRATADA CON ÍNDICE NDWI



Desde esta figura es posible notar que los valores cercanos a cero presentan colores fríos, mientras que los valores cercanos a 1 se encuentran en la gama de colores cálidos. En referencia a lo que fue expuesto en el análisis bibliográfico (Sección 3.1), es necesario comprender que el umbral del NDWI que permite identificar agua no siempre se encuentra en cero, pudiendo en general alcanzar valores superiores a 0,1. De esta forma, se realizará una calibración con los datos existentes para abordar dicho problema.

La metodología utilizada para determinar el área de las lagunas y sus tendencias estadísticas en el tiempo se presenta en las Subsecciones siguientes.

3.2.2. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES: CUANTIFICACIÓN DE ÁREA

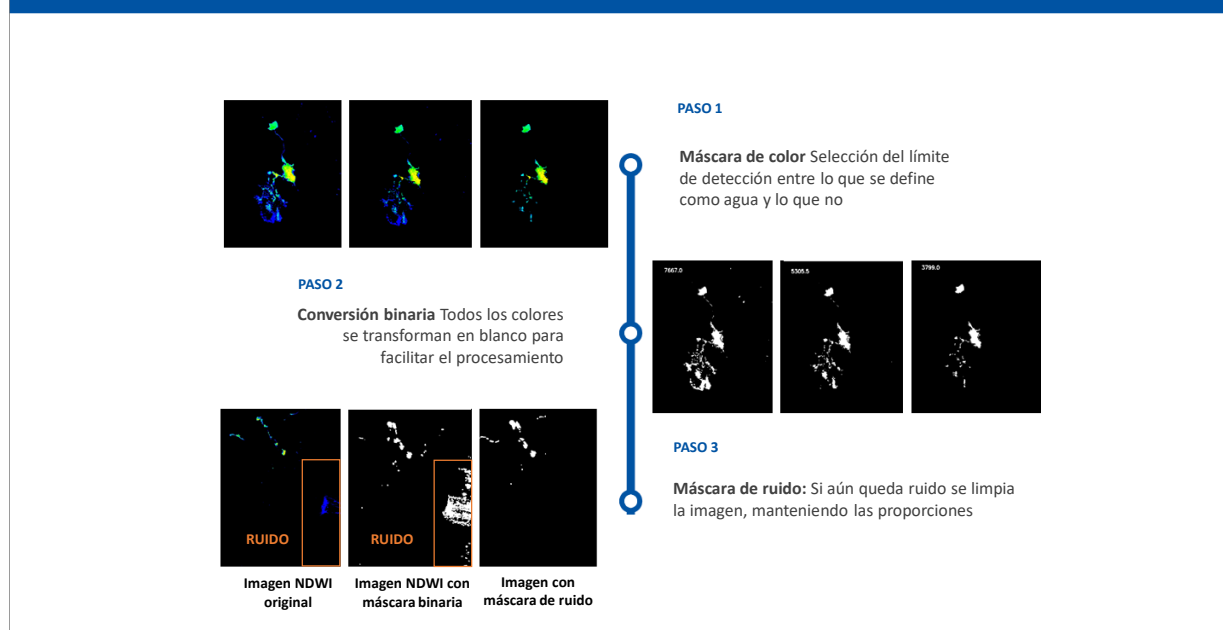
Para desarrollar este punto es necesario utilizar un *software* que permita emplear un sistema de procesamiento de imágenes. En este caso se utilizó Python 3.8, que corresponde a un *software* de código abierto, cuyo paquete “opencv” es el seleccionado para realizar adecuadamente el tratamiento requerido (Opencv, 2016). Es importante notar que se trabaja solo con aquellas imágenes que se encuentran ya filtradas utilizando el índice NDWI. Los pasos por seguir se enumeran a continuación:

1. **Máscara de color:** Si se revisa la **Figura 3.1** es posible notar que la escala de colores seleccionada es continua (considerando la base de colores HSV¹). Esto permite trabajar de forma tal que el *software* genere filtros que permitan incluir o eliminar colores del mapa (se debe revisar la simbología de la **Figura 3.1** para relacionar valores con colores). De esta forma, si se desea indicar que el umbral mínimo de existencia de agua se encuentra en 0,3, se deben eliminar todos los colores de la escala que se encuentre por debajo del color indicado como 0,3 – 0,4 en la simbología. Esto significa que todos los colores que se encuentran en el rango -1 y 0,3 se convertirán en negro.
2. **Conversión binaria:** Una vez que el umbral de trabajo ha sido seleccionado y el programa filtra aquellos colores que no forman parte del rango mínimo se realiza una conversión binaria, en la que todos los colores a excepción del negro se pasan a blanco.
3. **Máscara de ruido:** Se revisan las imágenes tratadas y se retira cualquier interferencia que pueda haber surgido de la toma o tratamiento de las imágenes satelitales. Estas interferencias se conocen con el nombre de ruido y se refiere a aquellos puntos en los que el filtro NDWI aplicado identifica zonas donde potencialmente existiría agua, sin que esto sea efectivo.

En la **Figura 3.2** hay un resumen general de los pasos a seguir, además en ella es posible apreciar un ejemplo del efecto que tienen en las imágenes cada uno de los pasos detallados en esta subsección. En el paso 1 se puede apreciar la imagen NDWI original, seguida de la imagen con umbral mínimo 0,2, y la de umbral mínimo 0,3. En el paso 2 se muestra el cambio de los colores filtrados a blanco y negro para los mismos umbrales que los seleccionados para el paso 1. Finalmente, en el paso 3 se muestra la corrección de una imagen que presentó ruido en el análisis. Con la aplicación de las 3 máscaras es posible calcular el área de cada una de las imágenes en unidad de píxeles, luego a través de la resolución del satélite, se puede realizar la transformación desde píxeles (#) a área (m²).

¹ El modelo HSV (Hue, Saturation, Value) define un modelo de color en términos de sus componentes. Los colores se agrupan en una escala que permite diferenciarlos a través de matiz (rango de colores), saturación (brillo) y valor (que es la altura a la que se encuentran en el eje blanco y negro).

FIGURA 3.2. PASOS A SEGUIR PARA REALIZAR EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT



3.2.3 TRATAMIENTO DE IMÁGENES: CALIBRACIÓN

Dado que la definición de un umbral mínimo de detección de agua es clave para realizar los análisis de áreas lagunares, se debe realizar un proceso de calibración para encontrar aquel umbral del NDWI que debiese dividir los que son píxeles de agua de los que no lo son. Esto se logra a partir de un procedimiento iterativo en el que se calculan las áreas lagunares para distintos umbrales, empleando la metodología detallada en la Subsección 3.2.2 (máscaras de color con distintos umbrales de corte). Los valores que resultan de este análisis se contrastan con los datos históricos de mediciones de las áreas (por métodos distintos de medición de campo), que es la información que se utiliza para calibrar. Estos datos para calibrar provienen del seguimiento de superficies lacustres generadas en el Plan de Seguimiento Ambiental (en adelante PSA) de SQM Salar desde 2007 y disponibles en el documento “Estudio de impacto ambiental proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama: modelo hidrogeológico conceptual del salar de atacama (2020)”. Se debe notar que la información histórica del PSA es un seguimiento con frecuencia anual, mientras que los datos con los que se cuenta para este estudio son imágenes con frecuencia de 3 a 4 veces por año. Es por esto que, cuando se realiza el contraste, se compara la imagen Landsat cuya fecha se encuentre más cercana a la fecha en la que se realiza el muestreo de campo anual del PSA, ya que las mediciones históricas y las fotografías de Landsat tratadas con NDWI debiesen coincidir para un mismo periodo de tiempo. Luego, se selecciona como umbral aquel valor medio para el que los valores de área calculada

por métodos directos de medición de campo se ajustan más cercanamente a los valores calculados por medio del uso de las imágenes satelitales.

3.2.4. SERIES DE TIEMPO: MEDIDAS DE DISPERSIÓN CENTRAL Y TASA DE CRECIMIENTO

Tras seleccionar el umbral del filtro NDWI, es posible extraer la serie de tiempo que muestra la evolución del área del sistema para el periodo de tiempo para el cual existen imágenes disponibles. En este punto es relevante entender que cada imagen tratada representa el estado del sistema lagunar en un momento de tiempo específico. Luego, el conjunto de una serie de imágenes Landsat, procesadas con la metodología ya presentada, es suficiente para extraer los datos que muestran la evolución de las áreas de las distintas lagunas en un período de tiempo. Con esta información se puede realizar un análisis de series de tiempo, donde se muestren las medidas de dispersión central de cada una de las series (media, moda y mediana) y la tasa de crecimiento correspondiente a la función de tendencia lineal que mejor se ajuste a los datos. Con ello se puede saber si el comportamiento medio del área del sistema en el tiempo posee una naturaleza creciente, decreciente o nula. Sin embargo, resulta de mayor interés conocer el comportamiento de los sistemas lagunares considerando un intervalo de confianza estadística y no solo el comportamiento medio. Es por ese motivo que se propone la realización de un análisis estadístico que considere intervalos de confianza al 95% para las tasas de crecimiento de la evolución del área lagunar, dicha metodología será complementada en la subsección siguiente.

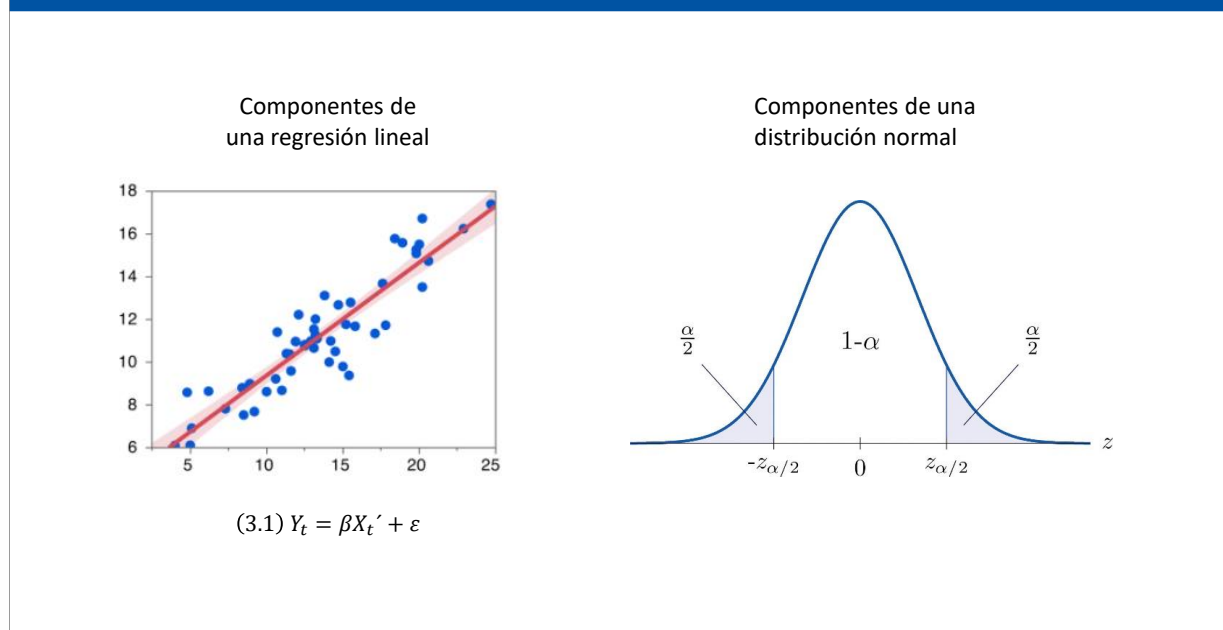
3.2.5. SERIES DE TIEMPO: QUIEBRES POR PERÍODOS Y ANÁLISIS DE REGRESIÓN UNIVARIADO

Dado que se posee el comportamiento global de las series de tiempo que muestran la evolución de las áreas lagunares en el período completo, cabe preguntarse qué ocurriría con las tendencias temporales de las áreas si se seccionaran distintos períodos, según algún criterio relevante.

Se propone generar, en base a las extracciones totales de salmuera en el Salar de Atacama, un criterio de quiebre temporal que permita dividir el periodo completo de análisis agrupando los años según tasas de bombeo similares en un mismo período. Con esto, se espera inferir una potencial causalidad, a partir de las correlaciones, entre las tasas de explotación de salmuera y el área de las lagunas.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, más que el comportamiento medio, es relevante conocer el rango de valores en el que se puede mover la evolución de las áreas lagunares considerando un cierto nivel de confianza. En la **Figura 3.3** se presenta una imagen referencial que indica las componentes de un ajuste de regresión lineal con la finalidad de facilitar su comprensión.

FIGURA 3.3. DISTRIBUCIÓN DE AJUSTE EN UNA REGRESIÓN LINEAL



Una regresión lineal queda definida por la ecuación 3.1 presentada en la **Figura 3.3** para una única variable independiente (el caso multivariado requiere una formulación matemática matricial que se omite por simplicidad de exposición). Los parámetros β y ε corresponden a la pendiente media de la regresión y al error de estimación asociado. En este caso, la metodología de ajuste se basa en mínimos cuadrados ordinarios (Maddala y Lahiri, 1992) y la principal suposición es que existe normalidad en la distribución asociada a los parámetros. Luego, hay un rango de valores en los que puede moverse la solución, según sea el intervalo de confianza escogido. En la imagen que muestra los componentes de una regresión lineal se presenta el rango de valores en el que se puede mover la solución en la franja roja translúcida, contigua a la pendiente media (línea roja sólida). Análogamente, la curva de distribución normal presentada a mano derecha muestra desde donde provienen los resultados antes presentados. Un corte transversal en el centro de la curva de distribución indicaría el valor medio (análogo a la línea roja sólida), no obstante, existe un rango completo de posibles soluciones que se mueven en la región blanca de la curva (análoga a la franja roja translúcida). Los valores en el intervalo inferior y superior delimitan el rango en el que se mueve la franja y se calculan como el valor medio ± 2 desviaciones estándar (con objeto de garantizar el 95% de confianza estadística).

Para generar resultados con un alto nivel de confianza estadística, se propone para los análisis tanto de período completo como de quiebres temporales según magnitud de extracciones, la realización de una regresión lineal para las series de tiempo de las áreas de los distintos cuerpos de agua. A través de ella

se espera determinar el rango de valores de la pendiente (y por ende las tendencias crecientes o decrecientes) de las series de tiempo considerando un 95% de confianza. Con esto se podrá determinar si las tendencias son estrictamente crecientes, estrictamente decrecientes o bien pudiese tratarse de una tendencia de tipo nula, según sean los valores máximos y mínimos tomados por las pendientes.

3.2.6. SERIES DE TIEMPO: ANÁLISIS DE REGRESIÓN MULTIVARIABLE

Un análisis de regresión multivariable en un contexto de series de tiempo es un procedimiento estadístico para estimar la relación entre una variable dependiente y un conjunto de variables independientes (o predictores) (Hamilton, 1994). En una regresión lineal, el procedimiento consiste en encontrar aquella combinación de variables independientes que mejor predice el comportamiento de la data disponible. Junto con esto, el método puede emplearse para inferir relaciones causales entre variables dependientes e independientes.

Para este trabajo se empleará el análisis de regresión para realizar un primer acercamiento a la relación y causalidad entre el área de las lagunas y distintas variables potenciales que podrían impactar tener impacto en dichas áreas. El método a utilizar para esta estimación corresponde al de mínimos cuadrados ordinarios y la especificación de los modelos corresponde a una regresión lineal, cuyos coeficientes de construcción vienen dados por la minimización de la suma de los cuadrados entre los datos observados y los estimados.

Dado que no basta con un análisis estadístico que se encuentre acotado únicamente a la variabilidad interanual de los cuerpos en relación con las precipitaciones, el desarrollo de la metodología detallada en el Capítulo 6 será clave para establecer relaciones entre variables de distinta naturaleza (precipitaciones, temperatura, radiación, extracción de salmueras, entre otras) y la evolución de las áreas lagunares.

4. DETERMINACIÓN DE LAS SUPERFICIES LAGUNARES

En esta sección se presentarán los resultados numéricos de áreas calculadas a partir del análisis de imágenes satelitales Landsat para los sistemas de Soncor, Peine y Aguas de Quelana. Para desarrollar estos resultados se empleó la metodología detallada entre las Subsecciones 3.2.1 a 3.2.3.

Las imágenes satelitales provienen desde satélites tipo Landsat 7 para el periodo 1986 – 2013 y Landsat 8 para el periodo 2013 – 2018, y poseen en ambos casos una resolución espacial de 30 [m] x 30 [m]. Respecto a la naturaleza de las imágenes empleadas, se cuenta con 133 imágenes que datan de febrero de 1986 y se extienden hasta octubre de 2018. En general se cuenta con 3 a 4 imágenes anuales separadas en un intervalo de 3 a 4 meses para los tres sistemas lagunares de interés. Sin embargo, en el caso de Aguas de Quelana, tras realizar el análisis se detectaron problemas en la identificación de las áreas lacustres, puesto que la alta dispersión de los cuerpos de agua y su morfometría disgregada dificulta su captura a partir de imágenes Landsat debido a que el tamaño del píxel no posee una resolución mínima requerida. Es por eso que para este sistema se emplearon imágenes tipo Quickbird, las cuales poseen una resolución espacial de 2 [m] x 2 [m]. A diferencia de las imágenes Landsat, estas solo se encuentran disponibles con frecuencia anual entre 2006 y 2020 (contándose con un total de 15 imágenes). Este número de imágenes cumple con extenderse durante todo el intervalo de operación del proyecto (RCA 226/2006).

En referencia a los datos de área estimadas a partir de las imágenes procesadas, es necesario tener en cuenta que existe un salto tecnológico entre las imágenes comprendidas entre 1986 y 2012 y las comprendidas entre 2013 y 2018. Mientras en el primer periodo las imágenes fueron tomadas por el Landsat 7, en el segundo periodo las imágenes fueron capturadas por el Landsat 8. Esto implica que podrían existir, por ejemplo, diferencias para los umbrales escogidos entre estos dos períodos. La necesidad de considerar distintos umbrales ante un cambio de Landsat se sustenta en Sheng *et. al.* (2016). De acuerdo con Sheng *et. al.* (2016) esta diferencia se explica principalmente por la calidad de cada tecnología, puesto que con el tiempo se han desarrollado satélites con mayor sensibilidad y capacidad de penetración en sus sensores ópticos. Es por este motivo que la distinción de dos umbrales es un punto clave en la calibración de cada uno de estos sistemas lagunares.

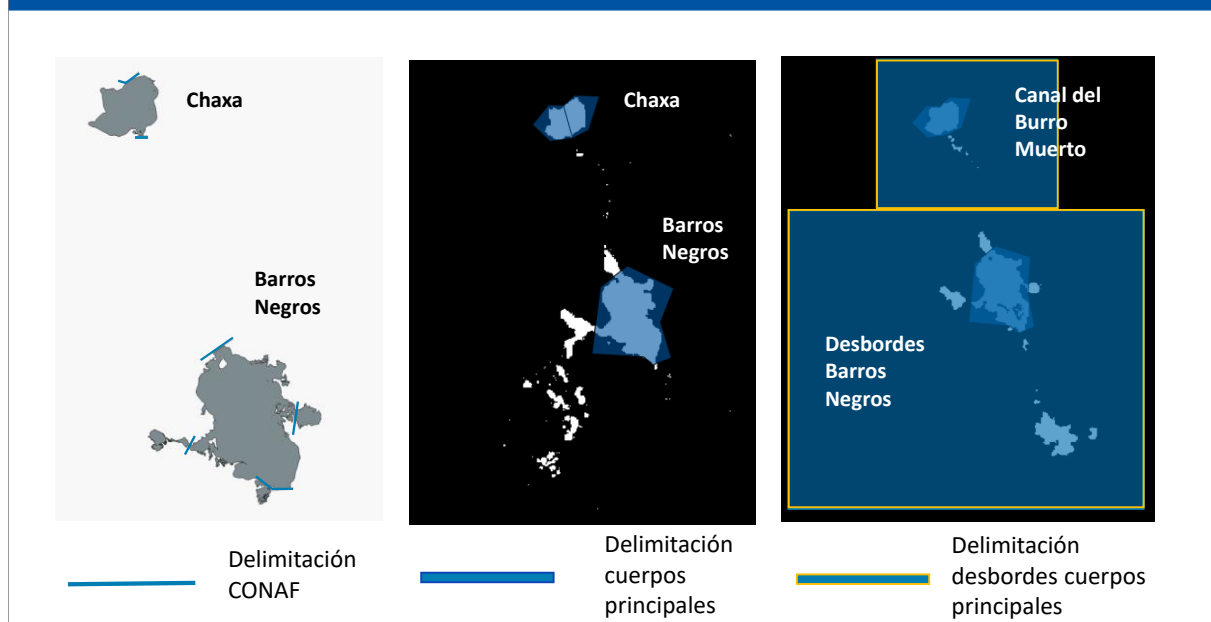
4.1. SONCOR

El sistema de Soncor cuenta con 3 cuerpos lagunares principales que corresponden a las lagunas de Barros Negros, Chaxa y Puilar. Dado que la metodología de análisis se basa en la utilización de satélites tipo Landsat, cuyos píxeles de resolución son de 30 [m] x30 [m], la laguna Puilar no ha sido considerada en este análisis general debido a que su morfometría requiere de una precisión espacial mayor para poder ser capturada de forma realista. Cabe mencionar que la laguna Puilar (SQM, 2018b) representa en promedio, entre los años 2008 y 2017 un 4,61% del área total del sistema Soncor, y corresponde al cuerpo principal con menor desviación estándar; por lo tanto, se espera que su omisión en este análisis lagunar no impacte de forma significativa los resultados del estudio.

Para desarrollar esta sección se realizaron una serie de análisis, los cuales contemplan: (1) determinación del área completa del sistema lacustre en el periodo para el cual las imágenes están disponibles, (2) la determinación de la evolución temporal de cada cuerpo principal, cuya delimitación fue realizada a través de los límites oficiales de CONAF y (3) la evolución temporal de las áreas que corresponden al Canal del Burro Muerto y a los desbordes de Barros Negros (no medidos como parte de los datos oficiales de CONAF, por encontrarse precisamente fuera de lo que se define como cuerpo principal).

En la **Figura 4.1** se presentan tres imágenes que muestran cada una de las delimitaciones mencionadas. En la primera (de izquierda a derecha), se presenta la delimitación determinada por CONAF. En la segunda se muestra la delimitación realizada para desarrollar el tratamiento de imágenes, con la que se identifican los cuerpos principales que componen el sistema y se basa en aquella determinada por CONAF. En la tercera imagen se presenta la delimitación utilizada para definir los desbordes de cada cuerpo principal. Se debe notar que los desbordes se calcularon como el área encuadrada en la tercera imagen restando el área que delimita cada cuerpo principal (segunda imagen).

FIGURA 4.1. DELIMITACIÓN DE CUERPOS LAGUNARES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE SONCOR

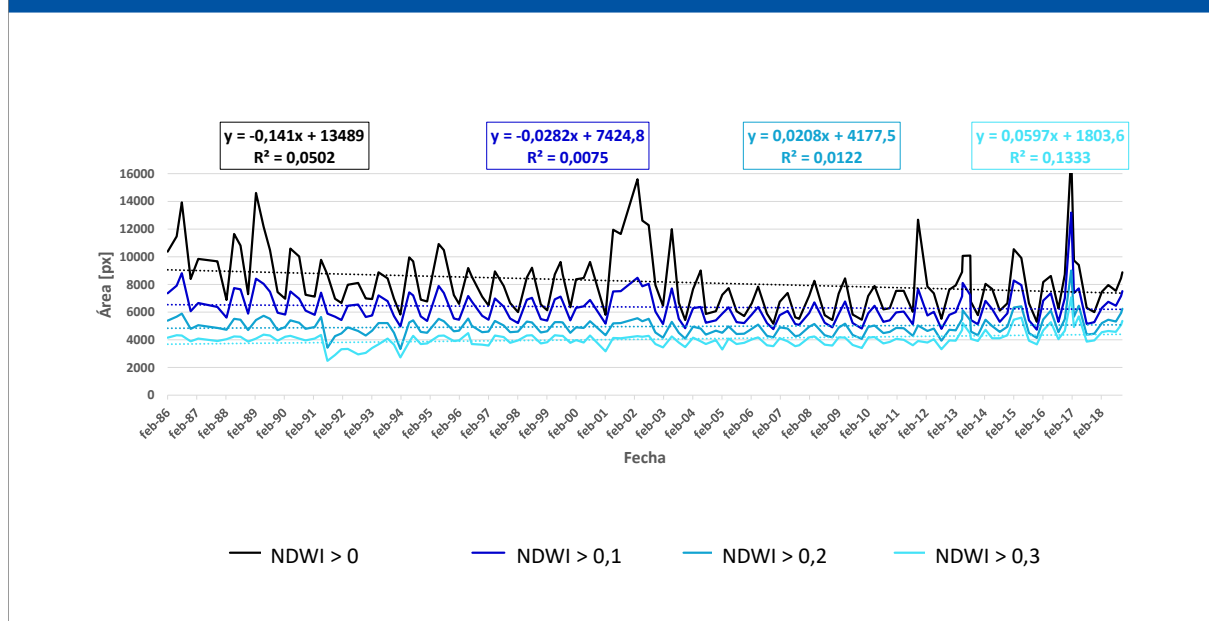


4.1.1. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Es posible ver en la **Figura 3.1** la evolución de una de las imágenes satelitales de Soncor antes y después de la aplicación de índice NDWI, esta Figura es una muestra referencial de los datos utilizados para efectuar el tratamiento de las imágenes.

Para el segundo paso, especificado en el Subsección 3.2.2, es necesario incorporar las tres máscaras de edición para realizar, a través de ellas, varias iteraciones a distintos umbrales NDWI de detección de agua. En la **Figura 4.2** se muestran los resultados de la evolución de área del sistema Soncor, a distintos umbrales de detección en unidades de píxeles [px]. En la leyenda es posible revisar el umbral al que se encuentra asociada cada una de las curvas de evolución de área.

FIGURA 4.2. EVOLUCIÓN DEL ÁREA LAGUNAR DE SONCOR [PX] A DISTINTOS UMBRALES DE DETECCIÓN DE AGUA



Con los resultados presentados en la **Figura 4.2** es posible notar que, como es de esperar, un umbral mayor genera una reducción en el área media del sistema. La máscara de ruido, que se encuentra detallada en la Subsección 3.2.2, no fue necesaria en las imágenes de Soncor, ya que con la aplicación del filtro NDWI estas no presentaron anomalías de esta naturaleza. Finalmente, para pasar desde píxeles [px] a área [m²] se siguió el siguiente procedimiento: (1) En la imagen Landsat (ver la imagen izquierda de la **Figura 3.1** como referencia) se dibuja un trazo que une dos puntos que están ubicados al interior de la imagen. A través del *software* Inkscape se calcula el número de píxeles que están comprendidos entre los dos puntos extremos que unen el trazo generado. (2) En un mapa georreferenciado de la zona, se realiza un trazo uniendo los mismos dos puntos que fueron escogidos sobre la imagen Landsat. Utilizando el *software* QGIS se realiza el mismo procedimiento que antes se efectuó con Inkscape y se mide la longitud del trazo, ahora en unidades de metros [m]. (3) Dado que al realizar los puntos descritos en (1) y (2) se obtiene una relación que vincula metros [m] con píxeles [px] (que son unidades de longitud) y lo que se desea es transformar unidades de área, entonces basta con elevar al cuadrado la relación que vincula metros [m] con píxeles [px]. Con esto es posible transformar el área que proviene desde el tratamiento de imágenes de Python desde píxeles [px] a metros [m²], para el caso de Soncor se obtuvo una equivalencia de 324 [m²/px].

4.1.2. CALIBRACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con aquello estipulado en la subsección 3.2.3, el último punto a abordar corresponde a la calibración entre los datos obtenidos en el tratamiento de imágenes y aquella información proveniente desde las mediciones históricas del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA), el cual es realizado por SQM Salar y se encuentra detallado en la Subsección 3.2.3. Las mediciones del PSA se realizan una vez al año, durante el mes de abril desde 2007 a 2018 y se encuentran disponibles en el archivo “Estudio de impacto ambiental proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama: modelo hidrogeológico conceptual del salar de atacama (2020)”.

Para que la calibración sea adecuada se selecciona la imagen Landsat más cercana en fecha a la disponible en el informe PSA, en la mayoría de los años se empleó la imagen satelital del mes de mayo (tomada con 15 días de diferencia de aquella disponible en el informe PSA). Los valores del área PSA se contrastan con los que provienen del tratamiento de imágenes año a año, y se determina un umbral que minimiza la diferencia entre las áreas. Finalmente, se calcula el valor del umbral promedio entre 2007 y 2012 y entre 2013 y 2018. Esto se realiza ya que se consideró que el cambio en el satélite Landsat 7 a 8 pudo haber generado variaciones en el umbral característico, tal y como se mencionó con anterioridad al comienzo de este capítulo.

A continuación, se presenta en la **Tabla 4.1** un resumen de los umbrales escogidos para cada año entre 2007 y 2018. Período en el que existe información disponible para este sistema desde el informe PSA. Las áreas incluidas solo corresponden a los cuerpos principales de las lagunas, no considerándose los desbordes del sistema.

TABLA 4.1. UMBRALES DE DETECCIÓN NDWI ASIGNADOS A TRAVÉS DE CALIBRACIÓN CON LOS DATOS DE GEOMENSURA.

Fuente: GEM y SQM.

AÑO	ÁREA SEGUIMIENTO PSA ² [ha]	UMBRAL NDWI
2007	161,4	0,13
2008	147,8	0,13
2009	164,7	0,11
2010	158,1	0,16
2011	170,0	0,14
2012	163,4	0,11
UMBRAL NDWI PROMEDIO LANDSAT 7		0,13
2013	162,0	0,2
2014	162,3	0,22
2015	168,5	0,19
2016	154,1	0,26
2017	189,5	0,19
2018	152,0	0,26
UMBRAL NDWI PROMEDIO LANDSAT 8		0,22

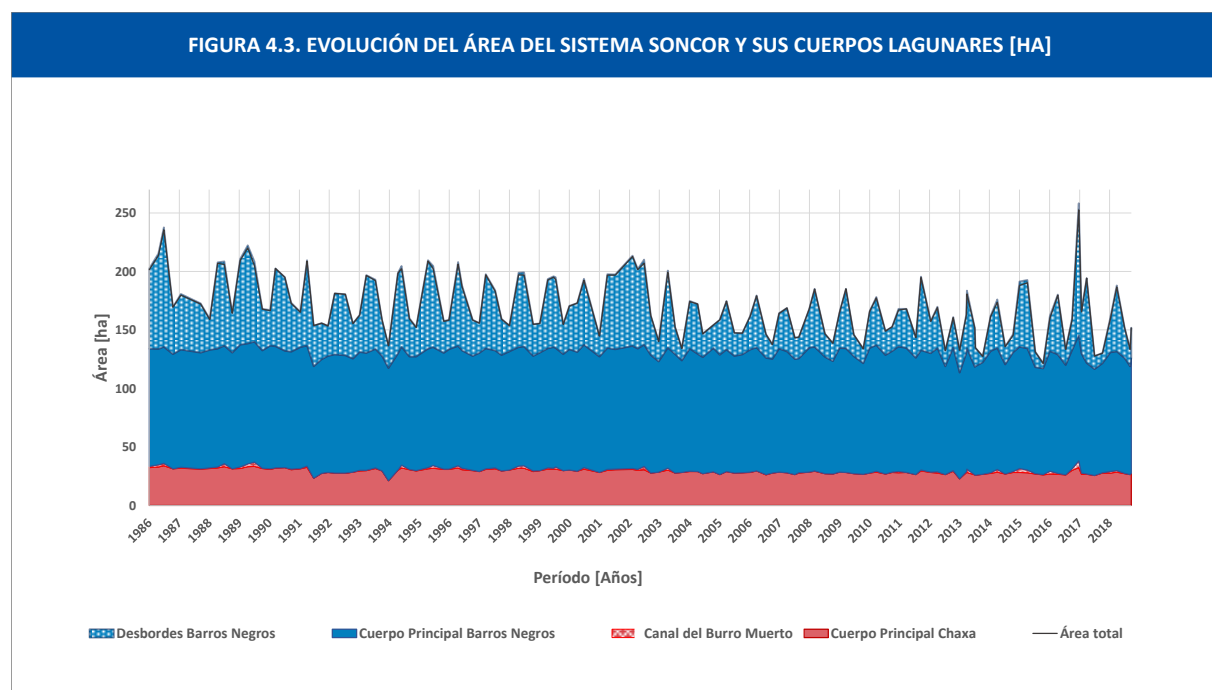
A través de este análisis se determinó el uso de los umbrales 0,13 y 0,22 para los períodos 1986-2012 y 2013-2018, respectivamente³. Dichos valores fueron los empleados en el análisis de evolución de las lagunas del sistema Soncor, tanto para el área completa como para el análisis de cuerpos lagunares y sus respectivos desbordes.

4.1.3. EVOLUCIÓN DE LAS ÁREAS LAGUNARES

A continuación, en la **Figura 4.3** se presentan los resultados que muestran el comportamiento de las áreas lagunares, considerando los umbrales hallados y las delimitaciones correspondientes según sea el análisis de interés (sistema completo o por cuerpos y desbordes). Si se comparan las áreas obtenidas en este análisis y las presentadas en los informes de seguimiento ambiental, se encontrará que estas se mueven dentro de un rango de valores similar, aunque no exactamente idéntico. En este sentido, es

² “Estudio de impacto ambiental proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama: modelo hidrogeológico conceptual del salar de atacama (2020)”.

relevante destacar que el foco de este estudio no es el valor absoluto de la superficie, sino que el análisis de su variación en el tiempo. Es por esto que la existencia de discrepancias menores entre estos valores no generará complicaciones al momento de realizar el análisis.



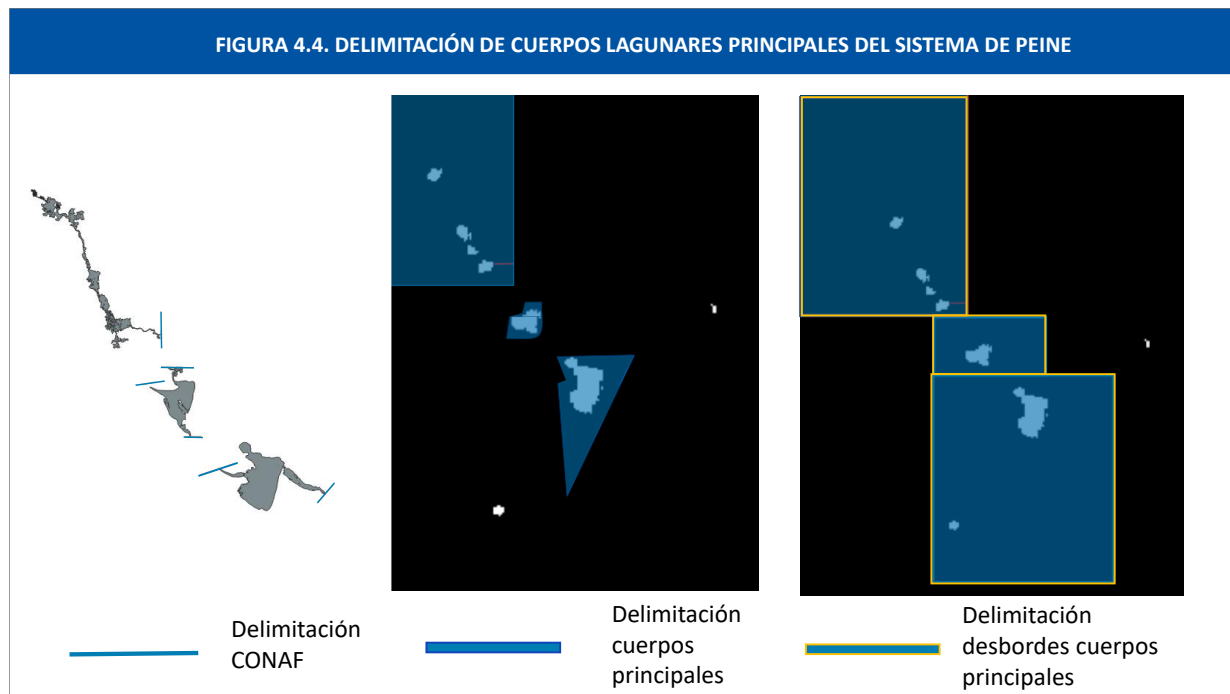
La interpretación y profundización de estos resultados se desarrollará en el siguiente capítulo, cuando se realice el análisis estadístico de las series de tiempo derivadas.

4.2. PEINE

El sistema de Peine cuenta con 3 cuerpos lagunares principales que corresponden a las lagunas de Salada, Saladita e Interna. Para desarrollar esta sección se aplicó el mismo análisis que fue realizado en Soncor, el cual contempla: (1) determinación del área completa del sistema lacustre en el periodo para el cual las imágenes están disponibles, (2) la determinación de la evolución temporal de cada cuerpo principal, cuya delimitación fue realizada a través de los datos oficiales de CONAF y (3) la evolución temporal de las áreas que corresponden a los desbordes de Salada y Saladita (no medidos como parte de los datos oficiales de CONAF, por encontrarse precisamente fuera de lo que se define como cuerpo principal).

En la **Figura 4.4** se presentan tres imágenes que muestran cada una de las delimitaciones mencionadas. En la primera (de izquierda a derecha), se presenta la delimitación determinada por CONAF. En la segunda se muestra la delimitación realizada para desarrollar el tratamiento de imágenes, con la que

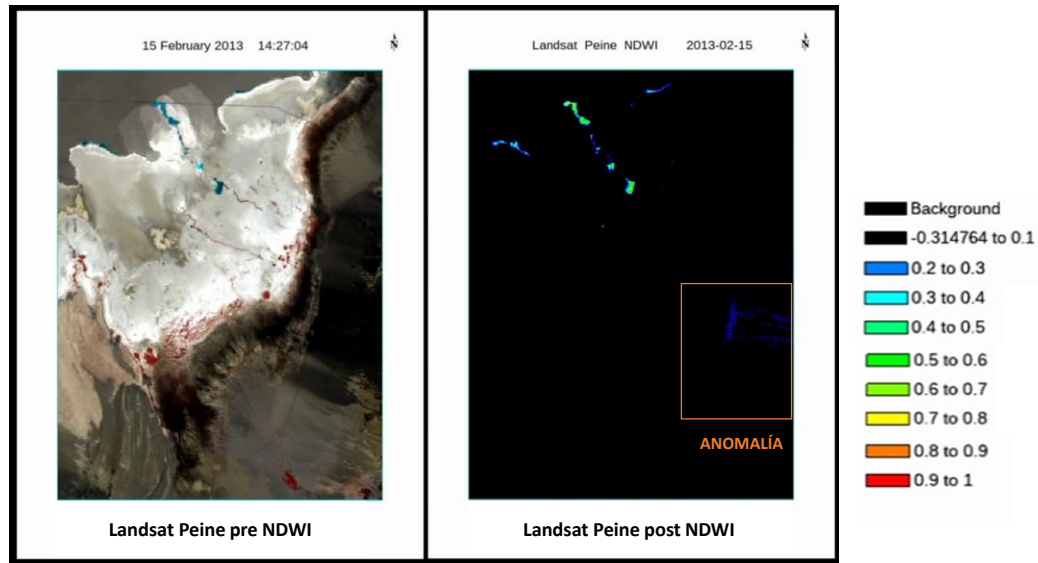
se identifican los cuerpos principales que componen el sistema y se basa en aquella determinada por CONAF. En la tercera imagen se presenta la delimitación utilizada para definir los desbordes de cada cuerpo principal. Se debe notar que los desbordes se calcularon como el área encuadrada en la tercera imagen restando el área que delimita cada cuerpo principal (segunda imagen).



4.2.1. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

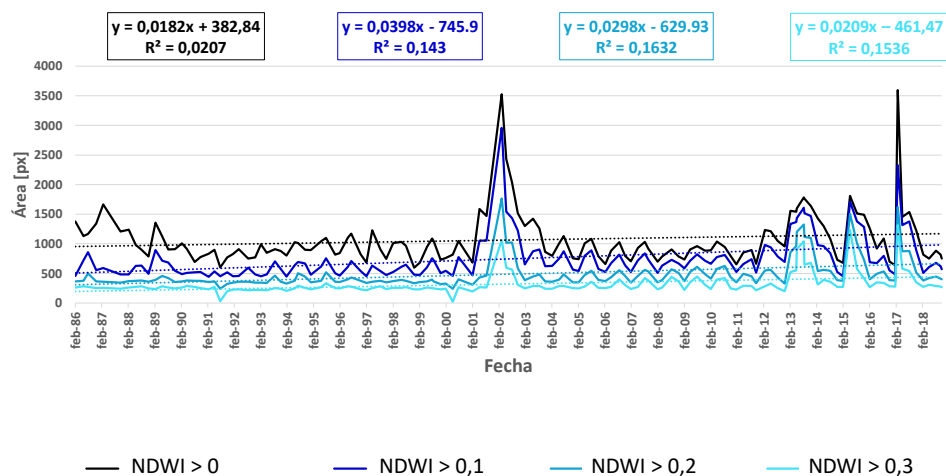
Es posible ver en la **Figura 4.5** la evolución de una de las imágenes satelitales de Peine antes y después de la aplicación de índice NDWI, esta Figura es una muestra referencial de la data utilizada para efectuar el tratamiento de las imágenes.

FIGURA 4.5. EJEMPLO DE IMAGEN SATELITAL DE PEINE PRE Y POST TRATADA CON ÍNDICE NDWI



Para el segundo paso, especificado en la Subsección 3.2.2, es necesario incorporar las tres máscaras de edición para realizar, a través de ellas, varias iteraciones a distintos umbrales NDWI de detección de agua. En la **Figura 4.6** se muestran los resultados de la evolución de área del sistema Peine, a distintos umbrales de detección en unidades de píxeles [px]. En la leyenda es posible revisar el umbral al que se encuentra asociada cada una de las curvas de evolución de área.

FIGURA 4.6. EVOLUCIÓN DEL ÁREA LAGUNAR DE PEINE [PX] A DISTINTOS UMBRALES DE DETECCIÓN DE AGUA



Con los resultados presentados en la **Figura 4.2** es posible notar que, como es de esperar, un umbral mayor genera una reducción en el área media del sistema. La máscara de ruido, que se encuentra detallada en la Subsección 3.2.2, fue utilizada en algunas de las imágenes de Peine, ya que con la aplicación del filtro NDWI estas presentaron una anomalía en la zona inferior derecha, visible en la **Figura 4.5**. Finalmente, para pasar desde píxeles [px] a área [m²] se siguió el siguiente procedimiento: (1) En la imagen Landsat (ver la imagen izquierda de la **Figura 3.1** como referencia) se dibuja un trazo que une dos puntos que están ubicados al interior de la imagen. A través del *software* Inkscape se calcula el número de píxeles que están comprendidos entre los dos puntos extremos que unen el trazo generado. (2) En un mapa georreferenciado de la zona, se realiza un trazo uniendo los mismos dos puntos que fueron escogidos sobre la imagen Landsat. Utilizando el *software* QGIS se realiza el mismo procedimiento que antes se efectuó con Inkscape y se mide la longitud del trazo, ahora en unidades de metros [m]. (3) Dado que al realizar los puntos descritos en (1) y (2) se obtiene una relación que vincula metros [m] con píxeles [px] (que son unidades de longitud) y lo que se desea es transformar unidades de área, entonces basta con elevar al cuadrado la relación que vincula metros [m] con píxeles [px]. Con esto es posible transformar el área que proviene desde el tratamiento de imágenes de Python desde píxeles [px] a metros [m²], para el caso de Peine se obtuvo una equivalencia de 900 [m²/px].

4.2.2. CALIBRACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con aquello estipulado en la subsección 3.2.3, el último punto a abordar corresponde a la calibración entre los datos obtenidos en el tratamiento de imágenes y aquella información proveniente desde las mediciones históricas del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA), el cual es realizado por SQM Salar y se encuentra detallado en la Subsección 3.2.3. Las mediciones del PSA se realizan una vez al año, durante el mes de abril desde 2007 a 2018 y se encuentran disponibles en el archivo “Estudio de impacto ambiental proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama: modelo hidrogeológico conceptual del salar de atacama (2020)”.

A pesar de que el PSA comienza sus mediciones en 2007, no existe información para Saladita ni Interna en este año. Desde el 2008 se comienzan a monitorear las tres lagunas principales de Peine, por ende, el primer año en que fue considerado el valor de las áreas para realizar esta calibración es 2008. A continuación, se presenta en la **Tabla 4.2** un resumen de los umbrales escogidos para cada año entre 2008 y 2018.

TABLA 4.2. UMBRALES DE DETECCIÓN NDWI ASIGNADOS A TRAVÉS DE CALIBRACIÓN CON LOS DATOS DE GEOMENSURA DE PEINE.

Fuente: GEM Y SQM.

AÑO	ÁREA SEGUIMIENTO PSA⁴ [ha]	UMBRAL NDWI
2008	35,7	0,17
2009	47,2	0,22
2010	47,6	0,24
2011	46,3	0,21
2012	53,1	0,19
UMBRAL MÍNIMO PROMEDIO LANDSAT 7		0,21
2013	61,0	0,25
2014	53,6	0,24
2015	59,2	0,26
2016	40,0	0,25
2017	58,6	0,25
2018	29,3	0,25
UMBRAL MÍNIMO PROMEDIO LANDSAT 8		0,25

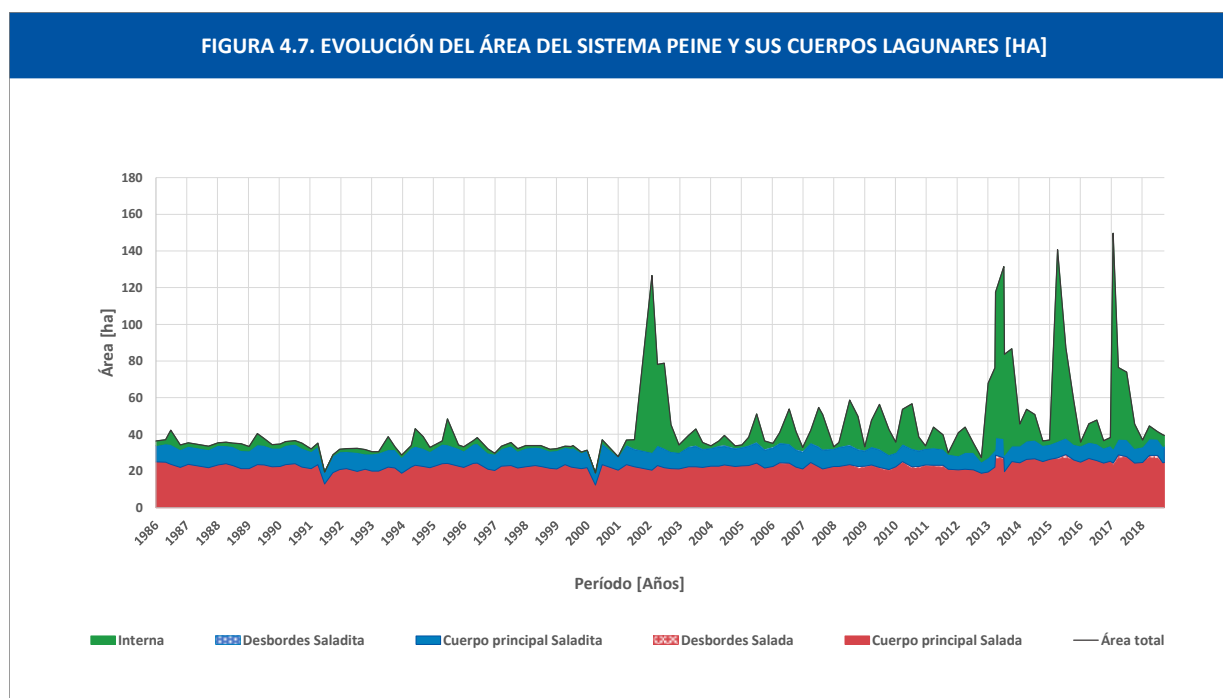
A través de este análisis se determinó el uso de los umbrales 0,21 y 0,25 para los períodos 1986-2012 y 2013-2018, respectivamente. Dichos valores son los empleados en el análisis de evolución lagunar del sistema Peine, tanto para el área completa como para el análisis de cuerpos lagunares y sus respectivos desbordes.

4.2.3. EVOLUCIÓN DE LAS ÁREAS LAGUNARES

A continuación, en la **Figura 4.7** se presentan los resultados que muestran el comportamiento de las áreas lagunares, considerando los umbrales hallados y las delimitaciones correspondientes según sea el análisis de interés (sistema completo o por cuerpos principales y desbordes). Si se comparan las áreas obtenidas en este análisis y las presentadas en los informes de seguimiento ambiental, se encontrará que estas se mueven dentro de un rango de valores similar, aunque no exactamente idéntico. En este sentido, es relevante destacar que el foco de este estudio no es el valor absoluto de la superficie, sino

⁴ “Estudio de impacto ambiental proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama: modelo hidrogeológico conceptual del salar de atacama (2020)”.

que el análisis de su variación en el tiempo. Es por esto que la existencia de discrepancias menores entre estos valores no generará complicaciones al momento de realizar el análisis.



La interpretación y profundización de estos resultados se desarrollará, al igual que en el caso de Soncor, en el siguiente capítulo, cuando se realice el análisis estadístico de las series de tiempo derivadas.

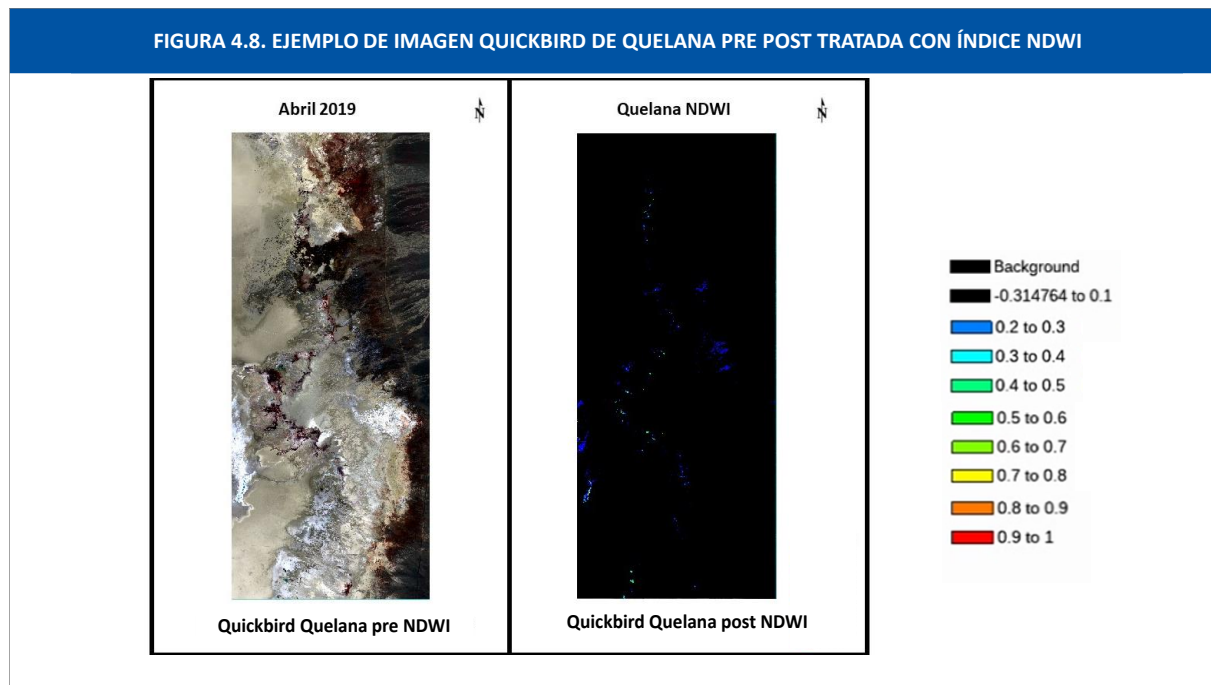
4.3. AGUAS DE QUELANA

Aguas de Quelana corresponde a un sistema que se compone por un gran número de cuerpos de agua muy dispersos y de dimensiones variables. Dado que no existe una delimitación clara que identifique cuerpos principales, se procedió a realizar un análisis donde se caracteriza la evolución del área completa del sistema, pero reconociendo la necesidad de requerir de una grilla más densa en término de imágenes.

4.3.1. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

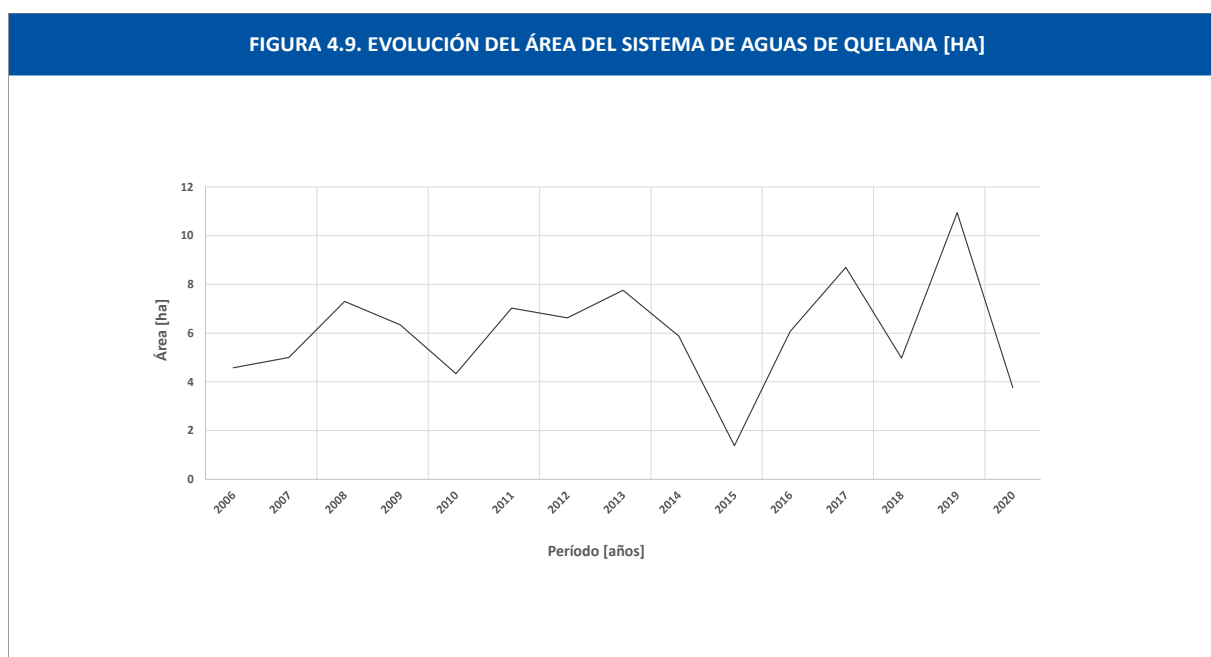
Debido a la imposibilidad de mostrar un seguimiento apropiado de la evolución del sistema lagunar a través de resultados provenientes desde imágenes Landsat, se optó por incorporar una serie de nuevas imágenes del tipo Quickbird, cuyo detalle fue especificado al comienzo de este capítulo. En la **Figura 4.8** que se presenta a continuación se muestra una de las imágenes Quickbird de Aguas de Quelana con el filtro NDWI aplicado. En este caso, para pasar desde píxeles [px] a área [m²] se siguió la misma

metodología antes explicada en los sistemas de Soncor y Peine para realizar la conversión. Con ello se obtuvo una equivalencia de 400 [m²/px].



4.3.2. EVOLUCIÓN DE LAS ÁREAS LAGUNARES

Se mantiene la metodología de calibración propuesta en la Subsección 4.3.2 y con ello se calculan las áreas resultantes. En la **Figura 4.9** se presenta la evolución del área lagunar del sistema en el período de tiempo indicado. El análisis estadístico de resultados se realizará en el siguiente capítulo.



5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS DE QUIEBRES TEMPORALES

Se realizó un análisis que busca seccionar las series de tiempo de las áreas lagunares según la magnitud de las extracciones históricas anuales de salmueras en el Salar de Atacama, considerando tanto las extracciones de SQM como Albemarle. En la **Tabla 5.1** se presentan las tasas de extracción anuales desde 1983 hasta 2018, agrupadas en 4 períodos principales que se encuentran categorizados según magnitudes de extracción similares.

TABLA 5.1. PERÍODOS DE QUIEBRE TEMPORAL CATEGORIZADOS SEGÚN EXTRACCIÓN.

Fuente: GEM.

Período I		Período II		Período III		Período IV	
AÑO	m³/h	AÑO	m³/h	AÑO	m³/h	AÑO	m³/h
1983	127,9	1995	867,65	1998	2.271,09	2010	3.942,77
1984	97,29	1996	1.153,89	1999	2.673,93	2011	4.493,33
1985	107,00	1997	1.816,91	2000	2.716,80	2012	4.483,36
1986	71,52			2001	2.132,18	2013	4.900,75
1987	74,92			2002	2.255,72	2014	5.023,63
1988	104,13			2003	2.291,32	2015	5.325,59
1989	122,91			2004	2.288,57	2016	5.779,46
1990	155,47			2005	2564,70	2017	5.319,64
1991	140,43			2006	2558,06	2018	4.349,53
1992	129,25			2007	2.610,18		
1993	135,29			2008	3.015,47		
1994	184,72			2009	2.655,68		

La **Tabla 5.2** presenta la media anual y desviación estándar de las tasas de extracción que componen los años de cada período definido en la **Tabla 5.1**. Se presentan los valores probables a un 95% de confianza que se obtienen como banda en torno a la media (con un valor máximo equivalente a la

media + 2 desviaciones estándar) y mínimos (con un valor máximo equivalente a la media - 2 desviaciones estándar).

TABLA 5.2 ESTADÍSTICAS PARA PERÍODOS DE QUIEBRE TEMPORAL.

Fuente: GEM.

Período I		Período II		Período III		Período IV	
MEDIDA	m ³ /h	MEDIDA	m ³ /h	MEDIDA	m ³ /h	MEDIDA	m ³ /h
MEDIA	120,91	MEDIA	1.279,48	MEDIA	2.502,81	MEDIA	4.846,46
DESV. EST	32,42	DESV. EST	486,93	DESV. EST	256,27	DESV. EST	578,62
MÍN	56,06	MÍN	305,61	MÍN	1.990,28	MÍN	3.689,21
MÁX	185,76	MÁX	2.253,34	MÁX	3.015,35	MÁX	6.003,70

Para facilitar los análisis futuros, es de importancia recalcar que el Periodo I puede ser considerado previo a la entrada en operación de SQM (noviembre de 1994). Las bajas cantidades extraídas durante este periodo se deben a las operaciones que actualmente Albemarle realiza. Este periodo es particularmente importante debido a que permite controlar los potenciales impactos que tendría la extracción de salmueras sobre los sistemas lagunares en lo referido a sus áreas.

Para el análisis de la evolución de las áreas de Soncor y Peine, donde existen datos para el periodo 1986-2018, se utilizarán estos períodos para estimar el comportamiento del sistema total y el de cada uno de los cuerpos en estos períodos. La finalidad es estimar si un aumento en la extracción ha alterado las tendencias de las áreas lagunares. En el caso de Aguas de Quelana un análisis que seccione temporalmente de acuerdo con estos períodos queda fuera del alcance, debido a que la información base para el cálculo del área comienza recién en el año 2006 (cubriéndose de esta forma la parte final del Periodo III y el Periodo IV completo, que abarca todo el período de operación de la RCA 226/2006).

5.1. SONCOR

En referencia a la **Figura 4.3**, desde donde es posible observar las series de tiempo que muestran la evolución de las áreas de los distintos cuerpos que componen el sistema Soncor, se presenta a continuación un análisis estadístico que tiene por finalidad presentar la evolución del área total, junto con la de cada una de las lagunas, considerando tanto el período completo de tiempo como los cuatro períodos presentados en la sección anterior. Para ello se presentarán primero los valores medios, seguidos del comportamiento al 95% de confianza, en el que se analizará el intervalo de valores en el

que se pueden desplazar las tasas de crecimiento. Esto indicará si el comportamiento en el tiempo es en términos estadísticos significativamente creciente o decreciente, o si más bien no existe una tendencia significativa desde el punto de vista estadístico.

5.1.1. MEDIDAS DE DISPERSIÓN EN EL PERÍODO HISTÓRICO COMPLETO (1986 – 2018) Y TASAS DE CRECIMIENTO MEDIA EN PERÍODOS DE QUIEBRE TEMPORAL

En la **Tabla 5.3** se presentan las medidas de dispersión central más relevantes de las series de tiempo que presentan la evolución en hectáreas de cada uno de los cuerpos y del sistema completo.

TABLA 5.3 MEDIDAS DE DISPERSIÓN DEL ÁREA TOTAL Y CUERPOS DE SONCOR 1986-2018.
Fuente: GEM.

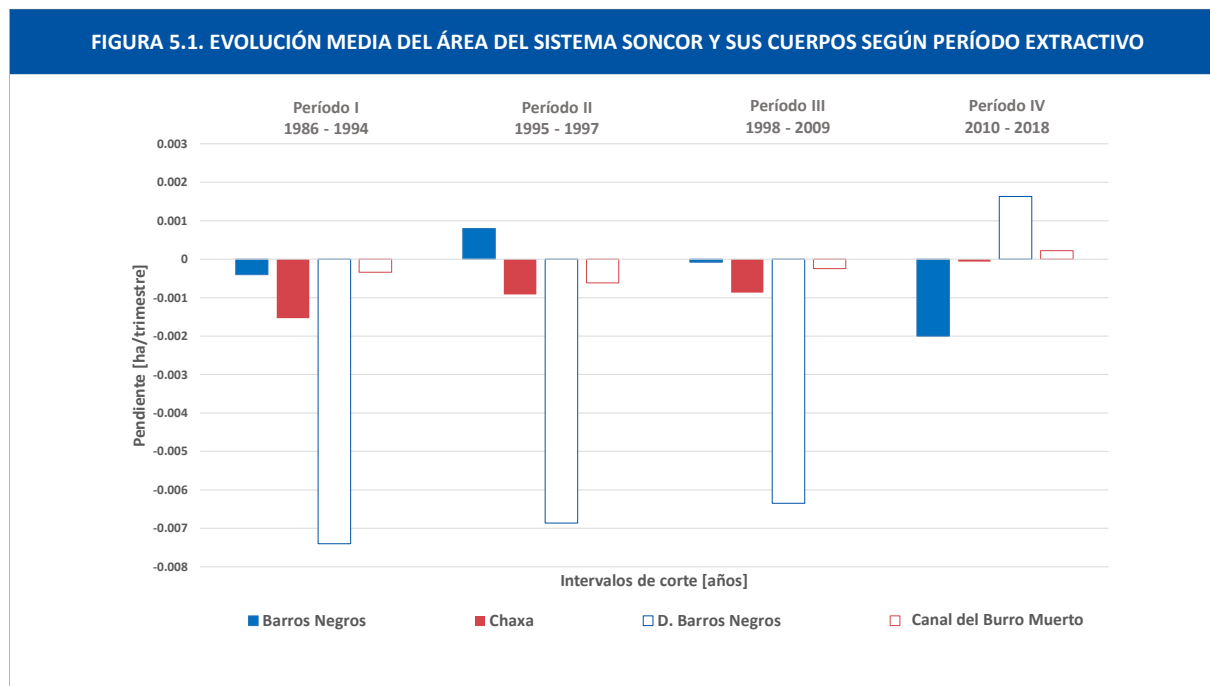
SISTEMA	CUERPO	ÁREA MEDIA [HA]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR [HA]
Soncor	Barros Negros	100,75	3,09
	Chaxa	29,01	2,02
	Desborde Barros Negros	39,44	18,03
	Canal del Burro Muerto	0,60	0,75
	Sistema total	169,8	5,97

De la **Tabla 5.3** es posible concluir que los cuerpos principales presentan un comportamiento aparentemente estable asociado a su baja desviación estándar. Por otro lado, los desbordes de Barros Negros presentan una alta desviación estándar que se explica debido a su gran variabilidad e inestabilidad temporal. En relación con los períodos de quiebre temporal, el comportamiento medio de las tasas de crecimiento se presenta en la **Tabla 5.4**.

TABLA 5.4 TASAS DE CRECIMIENTO MEDIAS PARA ÁREAS EN DISTINTOS PERIODOS DE QUIEBRE TEMPORAL
Fuente: GEM.

SISTEMA	CUERPO	PERÍODO I TENDENCIA MEDIA [HA/AÑO]	PERÍODO II TENDENCIA MEDIA [HA/AÑO]	PERÍODO III TENDENCIA MEDIA [HA/AÑO]	PERÍODO IV TENDENCIA MEDIA [HA/AÑO]
Soncor	Barros Negros	-0,0012	0,0024	-0,0002	-0,0060
	Chaxa	-0,0045	-0,0026	-0,0024	-0,0002
	Desborde Barros Negros	-0,0217	-0,0202	-0,0188	0,0048
	Canal del Burro Muerto	-0,0008	-0,0018	-0,0005	0,0006

Para facilitar la interpretación de los resultados de la **Tabla 5.4** se presenta la **Figura 5.1** que es una representación gráfica de los resultados de las tasas de crecimiento medias por período.



Para comenzar con el análisis se debe notar en primer lugar, que los valores de la **Figura 5.1** corresponden a tasas medias de crecimiento, por ende, no entregan resultados estadísticamente confiables para determinar si los cuerpos se encuentran creciendo o decreciendo. No obstante, se presentan como una primera aproximación que permite reconocer si ha existido una tendencia media que permita asociar el aumento en la tasa de extracción de salmueras con un decaimiento medio sostenido de las áreas lagunares.

Las tasas de crecimiento medias correspondientes al Período IV, que es el quiebre temporal que comprende las tasas de extracción máxima, donde se encuentra contenido el período de infracción, (2010 – 2018), muestran que el cuerpo principal de Chaxa, si bien continúa siendo negativo al igual que en los períodos anteriores, disminuye su tasa de decrecimiento. Barros Negros, por otro lado, si es comparado con las tendencias medias en los Período I, II y III, presenta en el período IV la tendencia más negativa. Junto con esto, la tendencia en ambos cuerpos de desborde pasa de ser negativa en el Periodo I (previo a la entrada en operación de SQM) a positiva en el Periodo IV.

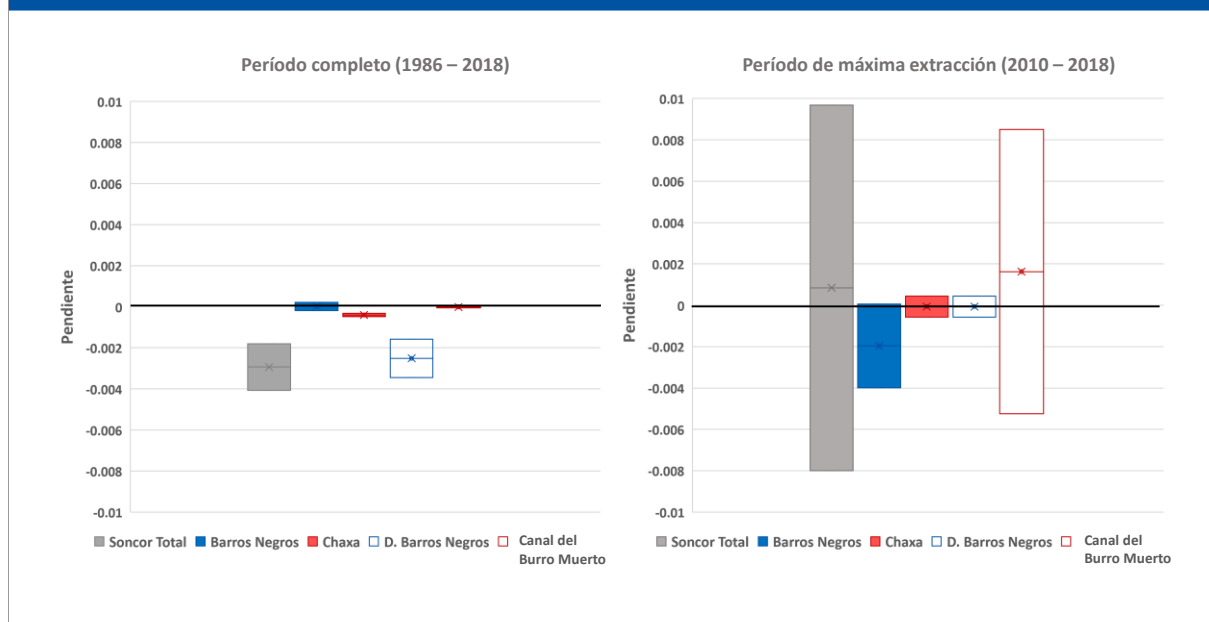
Resulta también atinente analizar que entre los años 1986 y 1994, que conforman el Período I, todas las tendencias lagunares de la media presentan un comportamiento a la baja. Esto significa que, tanto los cuerpos principales como los desbordes habrían decrecido en valor esperado durante este período. Sin embargo, esta tendencia media decreciente se habría aminorado con el tiempo, mientras que las tasas de extracción de salmuera habrían aumentado con el tiempo. De aquí, no existe una correlación entre el aumento en las tasas de extracción y una disminución media sostenida de las tasas de crecimiento del sistema Soncor y sus cuerpos lagunares.

Por último, se debe mencionar que las áreas medias de crecimiento y decrecimiento anual corresponden a tasas más bien marginales, si se comparan en términos porcentuales con el área esperada de los cuerpos lagunares. La variación porcentual anual de las áreas de Soncor en cada uno de los períodos de estudio corresponden a: (1) Período I (1986 – 1994), Barros Negros presenta un crecimiento anual de -0,0012% y Chaxa uno de -0,016%. (2) Período II (1995 – 1997), Barros Negros presenta un crecimiento anual de 0,0024% y Chaxa uno de -0,0090%. (3) Período III (1998 – 2009), Barros Negros presenta un crecimiento anual de -0,0002% y Chaxa uno de -0,0082%. (4) Período IV (2010 – 2018), Barros Negros presenta un crecimiento anual de -0,0060% y Chaxa uno de -0,0007%. Estos resultados indican que las tasas de fluctuación son marginales en contraste con el área total de estos cuerpos. De aquí, es posible sostener que las áreas lagunares medias del sistema Soncor se han mantenido estables durante el período completo de estudio.

5.1.2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN CON CONFIANZA ESTADÍSTICA AL 95%

Junto con analizar las tendencias medias, es necesario incorporar un análisis de las bandas (a un 95% de confianza estadística) en las que se mueven los resultados de las tasas de crecimiento y, por ende, el crecimiento o decrecimiento de los cuerpos lagunares. En la **Figura 5.2** se presentan las bandas en las que se mueven las tasas de crecimiento del sistema total y de cada uno de los cuerpos de interés, contrastando el período completo de tiempo (1986 – 2018) con el Período IV (2010 – 2018), que se encuentra asociado a la máxima extracción. Esto se hace con la intención de comprobar si existe un aumento en la tasa de decrecimiento del área de los distintos cuerpos que conforman este sistema lagunar, al incrementar la tasa de extracción, en comparación con el comportamiento histórico general.

FIGURA 5.2. BANDAS DE COMPORTAMIENTO DE PENDIENTES DEL SISTEMA SONCOR Y SUS CUERPOS



En los diagramas de caja de la **Figura 5.2** se encuentran los valores máximos, mínimos y medios (estos últimos identificados por una cruz media en la caja) en el que se mueve la tasa de crecimiento del área del sistema Soncor y sus distintos cuerpos considerando un 95% de confianza estadística. En relación con la manera de interpretar los resultados se debe reconocer que: (1) Una caja que se mueve siempre en el rango de valores positivos, sin cruzar el eje de las abscisas, cumple con la hipótesis de tener un comportamiento estrictamente creciente con un 95% de confianza estadística. (2) Análogamente, una caja que solo se mueve entre valores negativos, sin cruzar la línea de las abscisas, cumple con la hipótesis de tener un comportamiento estrictamente decreciente con un 95% de confianza. (3) Finalmente, una caja que se mueve entre valores positivos y negativos, cruzando el eje de las abscisas, genera un escenario en el que no se puede rechazar la hipótesis nula de que la evolución del área lagunar no presente tendencia (es decir, ni crezca ni decrezca) con un 95% de confianza estadística.

De acuerdo con lo presentado en la **Figura 5.2**, para el periodo completo (1986 – 2018), todos los cuerpos de Soncor presentan un comportamiento medio decreciente, a excepción de Barros Negros. Sin embargo, si se analizan las bandas al 95% de confianza, el cuerpo principal de Barros Negros y el Canal del Burro Muerto se mueven ambos dentro de un rango de valores positivos y negativos, por lo que no se puede rechazar la hipótesis nula de que estos cuerpos no presenten tendencia al 95% de

confianza. Por otro lado, tanto el cuerpo principal de Chaxa como los desbordes de Barros Negros presentan un comportamiento estrictamente decreciente al 95% de confianza estadística.

Si se analizan solo los años que se encuentran dentro del período de extracción máxima de salmueras (2010 – 2018) tanto los cuerpos principales de Chaxa y Barros Negros como sus desbordes (Canal del Burro Muerto y Barros Negros, respectivamente) presentan una tasa de crecimiento nula con un 95% de confianza estadística.

Con estos resultados se estima que el decrecimiento de las áreas lagunares no se relacionaría directamente a la extracción (algo que se expondrá en mayor detalle en el Capítulo 6), puesto que, para el período de máxima extracción, comprendido entre 2010 y 2018, ninguno de los cuerpos presenta una tendencia decreciente a un 95% de confianza. Más aún, tanto el cuerpo principal de Chaxa como el área total del sistema Soncor poseen un valor medio positivo en este último periodo. Esto se contrasta con: (1) el comportamiento estadísticamente decreciente que presenta la laguna Chaxa, los desbordes de Barros Negros y el área total en el período histórico completo (1983 – 2018); y (2) la tendencia media decreciente que presentan todos los cuerpos lagunares de Soncor en el Período I (previo a la entrada en operación de SQM).

Por otro lado, y en respuesta a la indicación número 4 de la Resolución de la SMA en la que se solicitan acciones respecto al decrecimiento de Chaxa, a través de este análisis se descartaría un posible efecto, atribuible a la operación durante el Período IV, sobre dicho cuerpo lagunar con un 95% de confianza estadística, puesto que no se puede rechazar la hipótesis nula de que Chaxa no crece ni decrece. Este análisis se justificaría en el uso de una correlación simple entre ambas variables. Para controlar por otras variables potencialmente importantes que podrían afectar las áreas de las lagunas véase el Capítulo 6.

Con los resultados obtenidos, es posible estimar para cada uno de los cuerpos que componen el sistema Soncor, cuánta área lagunar (en m^2) se habría perdido o ganado año a año desde 1986 hasta 2018 en promedio. Dichos resultados se presentan en la **Tabla 5.5** a continuación:

TABLA 5.5. CRECIMIENTO ANUAL DEL SISTEMA SONCOR Y SUS CUERPOS.
Fuente: GEM.

SISTEMA	CUERPO	CRECIMIENTO ANUAL (INFERIOR)[m ²]	CRECIMIENTO ANUAL (MEDIO)[m ²]	CRECIMIENTO ANUAL (SUPERIOR)[m ²]	ÁREA TOTAL PROMEDIO [m ²]
Soncor	Barros Negros	-5,68	+0,26	+6,22	1.007.500
	Chaxa	-14,88	-11,91	-8,93	290.100
	Desborde Barros Negros	-104,21	-74,43	-47,63	394.400
	Canal del Burro Muerto	-1,58	-0,21	+1,14	6000
	Área total	-122,08 (-0,007%)	-86,34 (-0,005%)	-53,59 (-0,003%)	1.698.000

Si los resultados presentados en la **Tabla 5.5** se traducen al número de hectáreas que se habrían perdido o ganado en las lagunas principales, durante los 33 años para los que se tiene información, es posible notar que Barros Negros entre los años 1986 y 2018, para el valor inferior de la banda habría perdido 0,019 [ha] totales, para el caso medio habría ganado 0,001 [ha] totales y para valor superior de la banda habría aumentado 0,021 [ha] totales. El caso de la laguna principal de Chaxa es distinto ya que entre los años 1986 y 2018, se habría reducido un máximo de 0,049 [ha] y un mínimo de 0,029 [ha] al 95% de confianza. Los desbordes de ambos cuerpos se presentan en este caso como un complemento al análisis realizado para los cuerpos principales. Cabe señalar que un crecimiento de los desbordes debiera estar asociado a un crecimiento de los cuerpos principales, pero una caída en los desbordes no necesariamente implica una caída en el área de los cuerpos lagunares principales.

En relación con el número de hectáreas totales de los cuerpos principales de Soncor (Chaxa y Barros Negros) al 95% de confianza estadística estas podrían haber decrecido un máximo de 0,4 [ha] y un mínimo de 0,17 [ha] en el periodo de 1986-2018. Finalmente, y en relación con el período infraccional, es posible realizar un análisis de tendencia que indique a un 95% de confianza cuál es el valor de la tasa de crecimiento que proviene de la evolución de las áreas entre agosto de 2013 y agosto de 2015. Para los cuerpos principales de Soncor, con un 95% de confianza, ninguno de los cuerpos principales presenta tendencia. Barros Negros podría haber decrecido un máximo de 0,0331 [ha/año] (-0.033%) y crecido un máximo de 0,0672 [ha/año] (+0.067%). Chaxa a su vez podría haber decrecido un máximo de 0,0011 [ha/año] (-0.0038%) y crecido un máximo de 0,0130 [ha/año] (+0.045%).

5.2. PEINE

En referencia a la **Figura 4.7**, desde donde es posible observar las series de tiempo que muestran la evolución de las áreas de los distintos cuerpos que componen el sistema Peine, se presenta a continuación un análisis estadístico que tiene por finalidad presentar la evolución del área total, junto con la de cada una de las lagunas, considerando tanto el período completo de tiempo como los períodos de quiebre temporal presentados en la Sección 5.1. Para ello se presentarán primero los valores medios, seguidos del comportamiento al 95% de confianza, tal como se hizo para el caso de Soncor.

5.2.1. MEDIDAS DE DISPERSIÓN EN EL PERÍODO HISTÓRICO COMPLETO (1986 – 2018) Y TASA DE CRECIMIENTO MEDIA EN PERÍODOS DE QUIEBRE TEMPORAL

En la **Tabla 5.6** se presentan las medidas de dispersión central más relevantes de las series de tiempo que presentan la evolución en hectáreas de cada uno de los cuerpos y del sistema completo.

TABLA 5.6. MEDIDAS DE DISPERSIÓN DEL ÁREA TOTAL Y CUERPOS DE PEINE 1986-2018.

Fuente: GEM.

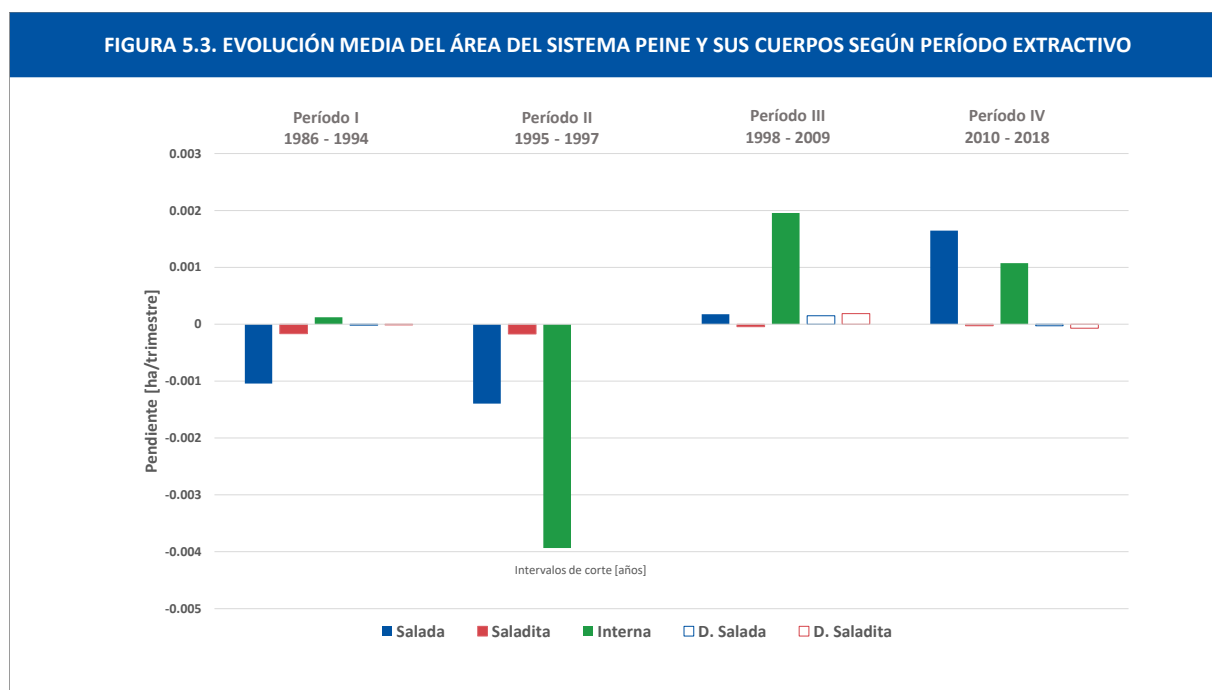
SISTEMA	CUERPO	ÁREA MEDIA [HA]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR [HA]
Peine	Salada	22,58	2,04
	Saladita	9,49	0,82
	Interna	10,48	17,28
	Desborde Salada	0,18	0,39
	Desborde Saladita	0,20	0,30
	Sistema total	42,93	4,16

De la **Tabla 5.6** es posible concluir que los cuerpos principales Salada y Saladita presentan un comportamiento aparentemente estable asociado a su baja desviación estándar. Por otro lado, Interna presentan una alta desviación estándar que se explica debido a su morfometría. En relación con los períodos de quiebre temporal, el comportamiento medio de la tasa de crecimiento del área de estos cuerpos se presenta en la **Tabla 5.7**.

TABLA 5.7. TASAS DE CRECIMIENTO MEDIAS PARA ÁREAS EN DISTINTOS PERIODOS DE QUIEBRE TEMPORAL.
Fuente: GEM.

SISTEMA	CUERPO	PERÍODO I TENDENCIA MEDIA [HA/AÑO]	PERÍODO II TENDENCIA MEDIA [HA/AÑO]	PERÍODO III TENDENCIA MEDIA [HA/AÑO]	PERÍODO IV TENDENCIA MEDIA [HA/AÑO]
Peine	Salada	-0,0030	-0,0042	0,0006	0,0060
	Saladita	-0,0003	-0,0003	-0,0001	-0,0001
	Interna	0,0003	-0,0119	0,0060	0,0033
	Desborde Salada	0,0000	0,0000	0,0003	-0,0001
	Desborde Saladita	0,0000	0,0000	0,0006	-0,0002

Para facilitar la interpretación de los resultados de la **Tabla 5.7** se presenta la **Figura 5.3** que es una representación gráfica de los resultados de las tasas de crecimiento medias por período.



Al igual que en el caso del análisis de los valores medios de los cuerpos principales de Soncor, estos se presentan como una primera aproximación que permite reconocer si ha existido una tendencia media que permita asociar el aumento en la tasa de extracción de salmueras con un decrecimiento medio sostenido de las áreas lagunares.

Las tasas de crecimiento medias correspondientes al Período IV, que es el quiebre temporal que comprende las tasas de extracción máxima (2010 – 2018), muestran las siguientes tendencias medias para los cuerpos principales que componen el sistema: (1) una tendencia media creciente en los cuerpos principales de Salada e Interna y (2) una tendencia media decreciente en Saladita, la cual se arrastra desde períodos previos a la entrada en operación de SQM pero ha disminuido su tasa de decrecimiento en el tiempo pese a aumentarse la extracción de salmueras en dicho periodo. Por otro lado, los desbordes que pasaron de una tendencia positiva a una levemente negativa son masas de agua pequeñas en el sistema Peine (revisar áreas promedio en **Tabla 5.8**), cuyo impacto en el área lagunar no es considerable.

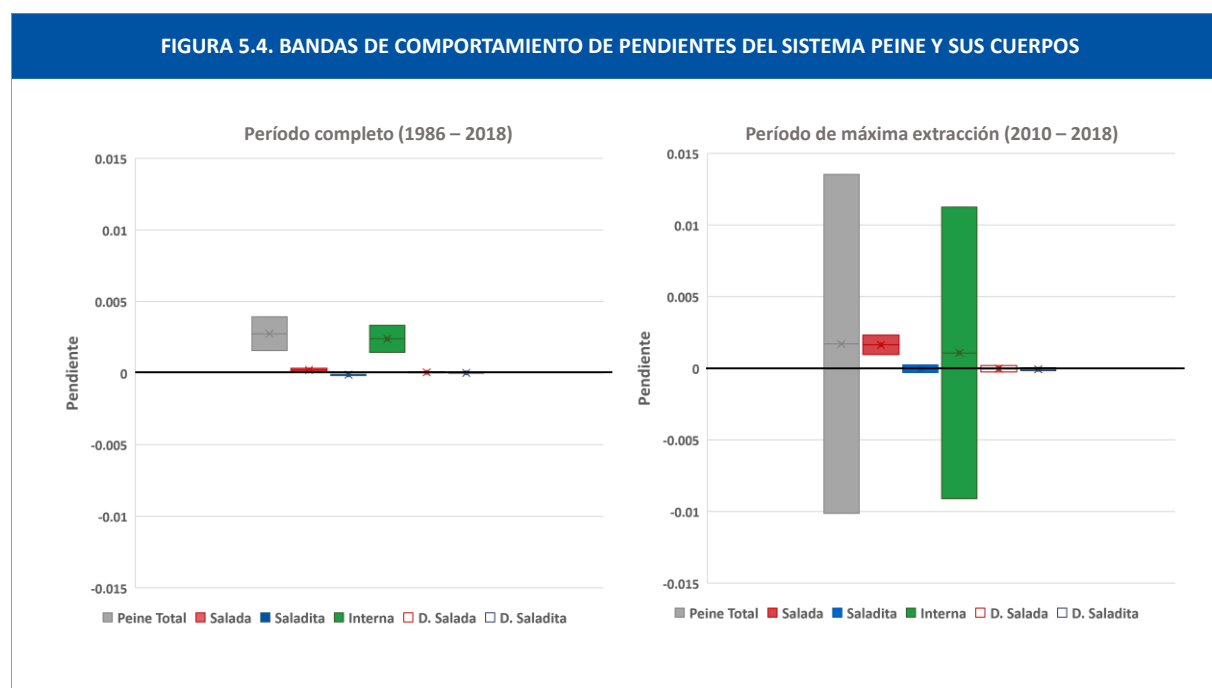
Resulta también atinente analizar que entre los años 1986 y 1994, que conforman el Período I (previo a la entrada en operación de SQM), todas las tendencias lagunares de la media presentan un comportamiento a la baja, a excepción de Interna. Esto significa que tanto los cuerpos principales como los desbordes (a excepción de Interna) habrían decrecido en valor esperado durante este período. Sin embargo, de la **Figura 5.3** es posible desprender que no existe una correlación entre el aumento en las tasas de extracción y una disminución media sostenida de las tasas de crecimiento del sistema Peine y sus cuerpos lagunares.

Por último, se debe mencionar que las áreas medias de crecimiento y decrecimiento anual corresponden a tasas marginales, si se comparan en términos porcentuales con el área esperada de los cuerpos lagunares. La variación porcentual anual de las áreas de Peine en cada uno de los períodos de estudio corresponde a: (1) Período I (1986 – 1994), Salada presenta un crecimiento medio anual de -0,0133%, Saladita uno de -0,0032% e Interna uno de 0,0029%. (2) Período II (1995 – 1997), Salada presenta un crecimiento anual de -0,0190%, Saladita uno de -0,0032% e Interna uno de 0,1135%. (3) Período III (1998 – 2009), Salada presenta un crecimiento anual de 0,0027%, Saladita uno de -0,0011% e Interna uno de 0,0572%. (4) Período IV (2010 – 2018 Salada presenta un crecimiento anual de 0,0266%, Saladita uno de -0,0011% e Interna uno de 0,0315%. Estos resultados indican que las tasas de fluctuación son marginales en contraste con el área total de los sistemas, por ende, es posible sostener que las áreas lagunares medias del sistema Peine se han mantenido estables durante el período completo de estudio.

5.2.2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN CON CONFIANZA AL 95%

Junto con analizar las tendencias medias, es necesario incorporar un análisis de las bandas (a un 95% de confianza estadística) en las que se mueven los resultados de las tasas de crecimiento y, por ende,

el crecimiento o decrecimiento de los cuerpos lagunares. En la **Figura 5.4** se presentan las bandas en las que se mueven las tasas de crecimiento de del sistema total y de cada uno de los cuerpos de interés, contrastando el período completo de tiempo (1986 – 2018) con el Período IV (2010 – 2018), que se encuentra asociado a la máxima extracción. Esto se hace con la intención de comprobar si existe un aumento en la tasa de decrecimiento del área de los distintos cuerpos que conforman este sistema lagunar, al incrementar la tasa de extracción, en comparación con el comportamiento histórico general.



En los diagramas de caja de la **Figura 5.4** se encuentran los valores máximos, mínimos y medios (estos últimos identificados por una cruz media en la caja) en el que se mueven la tasa de crecimiento del área del sistema Peine y sus distintos cuerpos considerando un 95% de confianza estadística. En relación con la manera de interpretar los resultados esto se realiza de la misma forma en la que se interpretaron los resultados de Soncor en la Subsección 5.2.2.

De acuerdo con lo presentado en la **Figura 5.4**, para el periodo completo (1986 – 2018), todos los cuerpos de Peine presentan un comportamiento medio creciente, a excepción de Saladita. Si se analizan las bandas al 95% de confianza estadística se puede rechazar la hipótesis nula de que estos cuerpos no presenten tendencia, ya que todos a excepción de Saladita presentan una tendencia estrictamente creciente. Mientras que Saladita presenta una tendencia estrictamente decreciente al 95% de confianza estadística.

Si se analizan solo los años que se encuentran dentro del período de extracción máxima de salmueras (2010 – 2018), no se puede rechazar la hipótesis nula de que los cuerpos tengan una tendencia de crecimiento del área nula en todos los casos menos en Salada, cuya tendencia es estadísticamente creciente al 95% de confianza.

En términos generales, el área total del sistema presenta un comportamiento estadísticamente creciente en el período histórico y para el Período IV el área total no presenta una tendencia estadísticamente significativa. Luego no se puede relacionar estadísticamente la extracción con un decrecimiento en el área lagunar de Peine para el Período IV.

Con los resultados obtenidos es posible estimar para cada uno de los cuerpos que componen el sistema Peine, cuánta área lagunar se habría perdido o ganado año a año desde 1986 hasta 2018 en promedio. Dichos resultados se presentan en la **Tabla 5.8** a continuación:

TABLA 5.8 CRECIMIENTO ANUAL DEL SISTEMA PEINE.
Fuente: GEM.

SISTEMA	CUERPO	CRECIMIENTO ANUAL (INFERIOR)[m ²]	CRECIMIENTO ANUAL (MEDIO)[m ²]	CRECIMIENTO ANUAL (SUPERIOR)[m ²]	ÁREA TOTAL PROMEDIO [m ²]
Peine	Salada	+2,977	+5,955	+8,932	225.800
	Saladita	-5,955	-2,977	-2,153	94.900
	Interna	+44,662	+71,459	+98,256	104.800
	Desborde Salada	+1,131	+1,718	+2,305	1.800
	Desborde Saladita	+0,230	+0,691	+1,152	2.000
	Sistema total	+47,639 (+0,011%)	+77,414 (+0,018%)	+116,120 (+0,027%)	429.300

Si los resultados presentados en la **Tabla 5.8** se traducen al número de hectáreas que se habrían perdido o ganado en las lagunas principales, durante los 33 años para los que se tiene información, es posible notar que Salada entre los años 1986 y 2018, en todos los escenarios se encontraría creciendo en, 0,0098 [ha] totales como mínimo, 0,029 [ha] totales como máximo. La laguna Saladita por otro lado se encontraría decreciendo en, 0,020 [ha] totales como máximo y 0,007 [ha] totales como mínimo. El caso de la laguna Interna es análogo a lo ocurrido en Salada, ya que en todos los escenarios se encontraría creciendo, en 0,32 [ha] totales como máximo y 0,14 [ha] como mínimo. Dicho crecimiento

es destacable, debido a que ha ocurrido a una alta tasa a lo largo del período analizado. Los desbordes, se presentan en este caso como un complemento al análisis realizado para los cuerpos principales, dado que las áreas son muy pequeñas en magnitud en comparación con el área del resto de los cuerpos. Luego, no inciden fuertemente en las ganancias o pérdidas sufridas por el sistema.

En relación con el número de hectáreas totales de los cuerpos principales de Peine (Salada, Saladita e Interna) al 95% de confianza estadística estas podrían haber crecido un máximo de 0,34 [ha] y un mínimo de 0,13 [ha] en el periodo de 1986-2018. Finalmente, y en relación con el período infraccional, es posible realizar un análisis de tendencia que indique a un 95% de confianza cuál es el valor de la tasa de crecimiento que proviene de la evolución de las áreas entre agosto de 2013 y agosto de 2015. La discusión respecto de la representatividad de los resultados es análoga a la presentada en el sistema Soncor. Los resultados del análisis comprendido entre 2013 y 2015, el cual fue realizado para los cuerpos principales de Peine, indican con un 95% de confianza, que ninguno de los cuerpos principales presenta tendencia. Salada podría haber decrecido un máximo de 0,0028 [ha/año] (-0,012%) y crecido un máximo de 0,0302 [ha/año] (+0,13%). Saladita a su vez podría haber decrecido un máximo de 0,0098 [ha/año] (-0,103%) y crecido un máximo de 0,0033 [ha/año] (+0,034%). Interna podría haber decrecido un máximo de 0,3934 [ha/año] (-3,754%) y crecido un máximo de 0,2895 [ha/año] (-2,762%).

5.3. AGUAS DE QUELANA

En referencia a la **Figura 4.9**, desde donde es posible observar la serie de tiempo que muestra la evolución del área del sistema Aguas de Quelana, se presenta a continuación un análisis estadístico que tiene por finalidad exhibir la evolución del área total en el período completo de tiempo para el que se tienen observaciones (2006 – 2020). Para ello se presentarán primero los valores medios, seguidos del comportamiento al 95% de confianza estadística, tal como se hizo para el caso de los otros dos sistemas lagunares, solo que para este caso no se implementará la subdivisión por períodos de quiebre, tal y como se mencionó con anterioridad.

5.3.1. MEDIDAS DE DISPERSIÓN Y TASA DE CRECIMIENTO MEDIA

Para comenzar el análisis, se presentan en la **Tabla 5.9** las medidas de dispersión central más relevantes de la serie de tiempo que presentan la evolución en hectáreas de sistema.

TABLA 5.9. MEDIDAS DE DISPERSIÓN DEL ÁREA TOTAL DEL SISTEMA AGUAS DE QUELANA 2006-2020.
Fuente: GEM.

SISTEMA	LAGUNA	ÁREA MEDIA [HA]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR [HA]
Aguas de Quelana	Aguas de Quelana	6,04	2,25

De la **Tabla 5.9** es posible concluir que se identifica una alta desviación estándar que se condice con la inestabilidad del sistema lagunar en estudio.

5.3.2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN CON AL 95% DE CONFIANZA ESTADÍSTICA

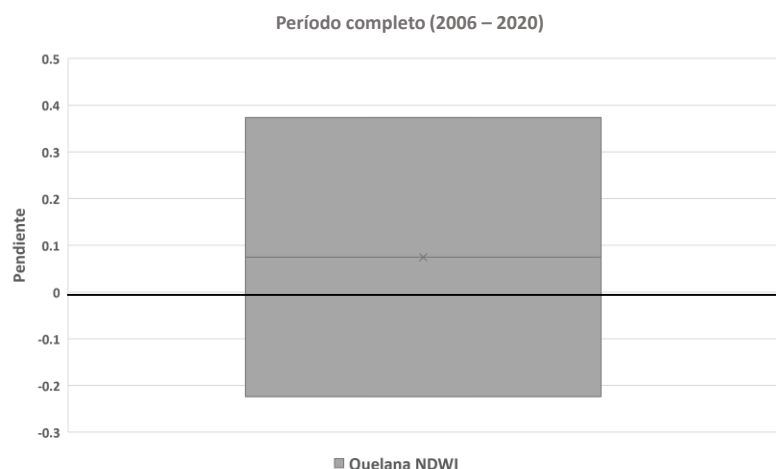
Junto con analizar las tendencias medias, es necesario incorporar un análisis de las bandas en las que se mueven los resultados de la tasa de crecimiento y, por ende, el crecimiento o decrecimiento de los cuerpos lagunares a un 95% de confianza estadística. En la **Tabla 5.10** se presentan los resultados. La información de esta tabla se encuentra esquematizada a través de un diagrama de cajas, en la **Figura 5.5**.

TABLA 5.10. TASA DE CRECIMIENTO DE ÁREA DE AGUAS DE QUELANA CON INTERVALO AL 95% DE CONFIANZA ESTADÍSTICA 2006-2020.
Fuente: GEM.

SISTEMA	TASA DE CRECIMIENTO MÍNIMA [HA/AÑO]	TASA DE CRECIMIENTO MEDIA [HA/AÑO]	TASA DE CRECIMIENTO MÁXIMA [HA/AÑO]
Aguas de Quelana	-0,224	0,075	0,37

Por medio de la **Figura 5.5** se puede determinar que para el período comprendido entre los años 2006 y 2020, considerando una única medición anual en el mes de abril, Aguas de Quelana presentaría un comportamiento medio positivo. Sin embargo, no se puede rechazar la hipótesis nula de que el cuerpo no presente tendencia ya que el intervalo se mueve entre valores positivos y negativos, cruzando el eje de las abscisas.

FIGURA 5.5. BANDA DE COMPORTAMIENTO DE PENDIENTE DEL SISTEMA AGUAS DE QUELANA



Con los resultados obtenidos para la tasa de crecimiento media, y los valores máximos y mínimos que toma la tasa de crecimiento al 95% de confianza estadística, es posible estimar cuánta área lagunar se habría perdido o ganado año a año desde 2006 hasta 2020. Dichos resultados se presentan en la **Tabla 5.11** a continuación.

TABLA 5.11 CRECIMIENTO ANUAL DEL SISTEMA AGUAS DE QUELANA.

Fuente: GEM.

SISTEMA	CRECIMIENTO ANUAL (95% INFERIOR)[m ²]	CRECIMIENTO ANUAL (MEDIO)[m ²]	CRECIMIENTO ANUAL (95% SUPERIOR)[m ²]
Aguas de Quelana	-2.240	+746	+3.700

Cabe destacar que para Aguas de Quelana se obtiene una alta variabilidad en los resultados con respecto a la tasa de crecimiento del área de la laguna, ya que el número de observaciones es reducido.

6. REGRESIÓN MULTIVARIABLE

6.1. REGRESIÓN MULTIVARIABLE

Habiendo descartado que los sistemas lagunares de Soncor y Peine posean tendencias significativas en cuanto a la variación de sus áreas entre 1986 y 2018, resta entender la posible relación que existiría entre la explotación del Salar de Atacama y dichas áreas. Para establecer esta relación se utilizará un análisis de regresión multivariado, en el cual se testean de forma simultánea el impacto que tendrían distintas variables de carácter meteorológico (precipitaciones, temperaturas, evaporación), climatológico (radiación solar y otros factores correlacionados con el tiempo⁵) y antropogénico (en este último caso referido a la extracción de salmueras en el Salar de Atacama).

El impacto de otras variables de interés tales como el aforo del Puente San Luis en el caso de Soncor o las extracciones de agua dulce desde los pozos no fueron incluidas en los análisis de regresión multivariante, ya que no se dispone de información lo suficientemente extensa. Luego, el número de observaciones se reduce en las regresiones, reduciendo de esta forma la robustez de los resultados.

Antes de proceder al análisis de regresión multivariante es necesario notar que en el caso Aguas de Quelana no es posible realizar este tipo de análisis, debido fundamentalmente al número de observaciones disponibles desde las imágenes Quickbird (N=15, lo que se considera una muestra pequeña como para generar respuestas confiables desde el punto de vista estadístico). Sin embargo, de contarse en el futuro con un mayor número de observaciones, así como una mayor frecuencia en los datos (al menos trimestral, e idealmente mensual), sería posible aplicar la metodología utilizada en este capítulo a este sistema lagunar.

Cabe señalar que el uso de regresiones multivariadas cuenta con un gran soporte académico (Maddala y Lahiri, 1992). Sin embargo, si bien este análisis permite rechazar el impacto de una variable independiente sobre la variable dependiente, debido a que en esencia corresponde a un análisis de correlación, no permite concluir con respecto a la causalidad entre la variable independiente y dependiente. Es decir, de existir una variable independiente con un impacto significativo sobre la variable dependiente, la causalidad podría o bien referirse a una en la cual la variable dependiente

⁵ Debido a que estas variables en general no son observables, se utiliza como variable *proxy* el tiempo. El uso de esta variable es común en los análisis de series de tiempo (Hamilton, 1994).

afecta la variable independiente, o deberse a un factor de confusión omitido en la ecuación. Para efectos de lo que interesa en este estudio, no obstante, de no existir un impacto entre alguna de las variables independientes (meteorológicas, climatológicas, antropogénicas) y el área de los sistemas lagunares es posible descartar la dependencia en niveles de la variable no significativa.

En la **Tabla 6.1** se presentan las variables disponibles para realizar el análisis de regresión multivariado con un periodo suficientemente extenso, de forma tal de que las regresiones realizadas sean robustas estadísticamente. En este caso se cuenta con las precipitaciones, temperaturas y evaporaciones de una estación meteorológica en Chaxa (y precipitaciones solamente para una estación meteorológica en Peine), todas las cuales corresponden a variables meteorológicas. En el caso de las variables climatológicas disponibles estas se limitan a la tendencia temporal, que en teoría debiese estar correlacionada con procesos que dependen de variables cuyas dinámicas se mueven en una escala mucho mayor que la cuenca del Salar de Atacama, y a la radiación solar de la cuenca⁶.

Con objeto de completar la información a nivel mensual, frecuencia con la cual se cuenta con información para el caso de las extracciones de salmueras, así como las variables meteorológicas y climatológicas, se procedió a interpolar la información faltante del área de los cuerpos lagunares utilizando un método de interpolación lineal que da cuenta de la estacionalidad de los datos. Esta técnica de completitud de los datos es utilizada frecuentemente en series de tiempo, y con objeto de determinar la sensibilidad de los resultados de dicho procedimiento se realizaron los análisis de regresión utilizando sólo los datos disponibles, los que entregaron idénticos resultados cualitativos.

Con las variables presentadas, se desarrollaron modelos de regresión del tipo de series de tiempo empleando la evolución de las áreas lagunares como variables dependientes, en función de todas las variables independientes que se presentan en la lista. La idea es determinar aquellas variables independientes que en conjunto tendrían un impacto significativo con la evolución de las áreas de los cuerpos lagunares de Soncor y Peine.

Cabe mencionar que para trabajar con el desfase producto de las distintas conductividades hidráulicas que existen en las unidades hidrogeológicas que componen el Salar, se probó con períodos distintos

⁶ Esta información, derivada matemáticamente de los ciclos de Milancović (Milancović, 1998) fue obtenida del sitio web National Aeronautics and Space Administration: Goddard Institute for Space Studies (<https://data.giss.nasa.gov/modelE/ar5plots/srlocat.html>) mediante las coordenadas del Salar de Atacama (-23,5° S y -68,25° W). Los ciclos de Milanković describen los efectos conjuntos que los cambios en los movimientos de la Tierra provocan en el clima a lo largo de su evolución astronómica, y considera tanto efectos de la rotación de la tierra, así como de precesión axial y apsidal.

hasta encontrar aquel rezago que mejor correlaciona con el área de los sistemas lagunares (en términos del R^2 ajustado de la regresión, $\overline{R^2}$).

TABLA 6.1 VARIABLES DISPONIBLES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN.

Fuente: GEM.

VARIABLES DEPENDIENTES	PERÍODO	VARIABLES INDEPENDIENTES	PERÍODO
Área Barros Negros	1986 - 2018	Precipitaciones en Chaxa y Peine	1986 – 2018
Área Chaxa	1986 - 2018		
Área Desborde Barros Negros	1986 - 2018	Temperaturas en Chaxa	1999 – 2018
Área Canal del Burro Muerto	1986 - 2018	Evaporación en Chaxa	1999 – 2018
Área Saladita	1986 - 2018	Radiación en la cuenca	1986 – 2018
Área Salada	1986 - 2018	Aforo del Puente San Luis	2001 - 2019
Área Interna	1986 - 2018	Tendencia temporal	t_{temp}
Área Desborde Salada	1986 - 2018	Variable dependiente rezagada 1 período	$Y_{t(-1)}$
Área Desborde Saladita	1986 - 2018		

Finalmente, cabe señalar que, con objeto de estabilizar el nivel de las variables y hacerlas similares entre sí, se ha aplicado el logaritmo natural a todas las variables, a excepción de la variable *proxy* de tendencia temporal. Los modelos log-lineales resultantes poseen una propiedad de interés, referida a que los parámetros asociados a cada variable independiente corresponden a la elasticidad del área de los sistemas lagunares con respecto a dicha variable. Es decir, un parámetro de 0,1 asociado a una variable independiente x es equivalente a una elasticidad de 0,1 entre la variable x y la variable dependiente (en este caso el área del sistema lagunar). Esto equivale a un aumento (o reducción) de 10% con respecto a un aumento (o reducción) en la variable independiente. Así, por ejemplo, si la variable independiente aumenta en 50% la variable dependiente solo subiría 5% si la elasticidad es 0,1.

6.1.1. MODELO DE REGRESIÓN SISTEMA SONCOR

Luego de probar un alto número de combinaciones posibles entre las variables independientes y la variable dependiente (área del sistema Soncor), se obtuvo la ecuación 6.1 para el área del sistema lagunar de Soncor por corresponder a la opción con un mayor $\overline{R^2}$, y con significancia para todas las variables consideradas. A_t es el área del sistema Soncor, que incluye tanto los cuerpos principales de Chaxa y Barros Negros como sus desbordes) en un mes t . En este caso la regresión incluye un total de

387 observaciones (desde marzo de 1986 a junio de 2018), lo que en series de tiempo es considerado una muestra grande (y por tanto los resultados son confiables desde el punto de vista estadístico). Nótese que en este caso R_t corresponde a la radiación solar, t es la variable *proxy* de tiempo y S_t corresponde a la extracción total de salmueras en el mes t (sumando lo extraído por SQM y Albemarle).

$$\ln(A_t) = 4,04548 + 0,68272\ln(A_{t-1}) + 0,08166\ln(R_t) - 0,00024t + 0,00541\ln(S_{t-3}) + \varepsilon_{p_t}, \overline{R^2} = 0,702$$

(8,36) (19,01) (4,76) (-4,96) (2,28)

(6.1)

Debe notarse que en la ecuación 6.1 entre paréntesis se presenta el estadístico t de Student, el que entrega una medida de la significancia estadística de cada variable. Para el tamaño de la muestra utilizada en la regresión un estadístico t de Student superior a 1,96 (en valor absoluto) es suficiente para rechazar la hipótesis nula de que la variable asociada al parámetro estimado es no-significativa. Por su parte, un $\overline{R^2}$ de 0,702 indica que el modelo planteado es capaz de explicar alrededor del 70% de la variabilidad en la variable dependiente.

Dado lo anterior, las variables asociadas a la regresión de la ecuación 6.1 son todas estadísticamente significativas. Lo interesante es que en base a esta el área del sistema no solo presentaría inercia (lo que se encuentra asociado a la significancia de la variable rezagada un periodo, con parámetro estimado positivo), sino que también la radiación solar tendría un impacto positivo sobre el área. *A priori*, este resultado puede parecer contraintuitivo (debido a que a mayor radiación se esperaría un mayor nivel de evaporación de las lagunas). Sin embargo, la relación de la radiación solar con otras variables meteorológicas tales como precipitaciones, temperatura, evaporación, formación de nubes, etc., se puede recuperar solo con una frecuencia mayor a la mensual (por ejemplo, diaria u horaria). Al contar solo con datos mensuales, la radiación solar promedio mensual no genera un impacto negativo sobre el área del sistema lagunar.

La ecuación 6.1 muestra una clara tendencia decreciente del área del sistema lagunar asociado a una o varias variables correlacionadas con el *proxy* tiempo. Por su parte, la ecuación 6.1 sugiere un impacto positivo de la extracción de salmueras, con un rezago de 3 meses desde la extracción hasta que se materializa el impacto, sobre el área del sistema lagunar. Sin embargo, la elasticidad asociada al parámetro estimado (0,00541) es suficientemente pequeña para obviar el impacto con respecto a las demás variables de la ecuación. Para ejemplificar esto último, un aumento al doble en la extracción de salmueras por parte de SQM y Albemarle entre un mes y otro habría tenido un impacto de apenas un incremento de 0,5% en el área del sistema lagunar de Soncor (tres meses más tarde). Por ende, la

principal conclusión es que no existe un impacto negativo de la extracción de salmuera sobre el área del sistema lagunar de Soncor para el caso en el que se consideran los desbordes en el análisis.

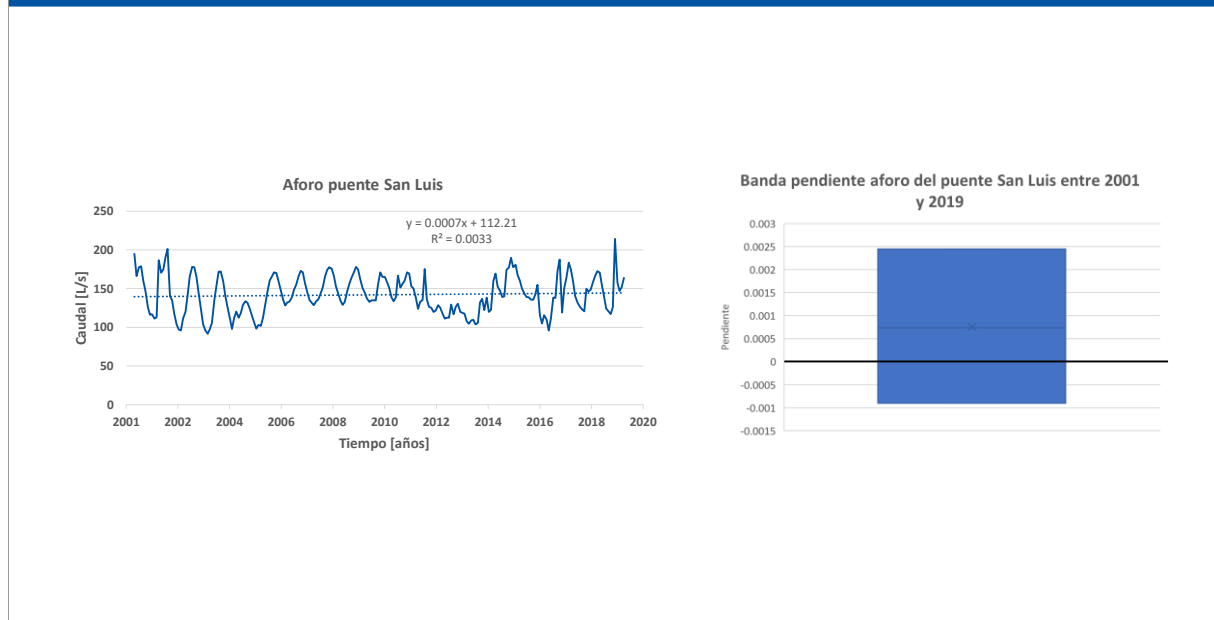
En cuanto a la regresión para el área únicamente de los cuerpos principales (sin considerar desbordes), dada por A'_t , se obtuvo la ecuación 6.2.

$$\begin{aligned} \ln(A'_t) = & 3,35654 + 0,76160\ln(A'_t) - 0,00245\ln(R_t) - 0,00005t + 0,00186\ln(S_{t-3}) + \varepsilon_{pt}, \overline{R^2} = 0,653 \\ & (6,98) \quad (21,90) \quad (-0,53) \quad (-3,66) \quad (2,72) \end{aligned} \quad (6.2)$$

En el caso de la ecuación 6.2 es interesante notar que la inercia del sistema (en este caso el área de los cuerpos principales) es mayor que cuando se consideran los desbordes. Esto es intuitivo dado que la variabilidad del área del sistema Soncor está asociada fundamentalmente al área de los desbordes más que los cuerpos principales. También es importante destacar que en el caso de la ecuación 6.2 el impacto de la variable *proxy* dada por el tiempo sobre el área de los cuerpos principales del sistema lagunar en casi cinco veces menor que el impacto sobre el área del sistema cuando se considera el Canal del Burro Muerto y Barros Negros. Por otra parte, el impacto de la extracción de salmuera se ve reducido tres veces respecto al caso en el que se consideran los desbordes. Finalmente, la radiación solar no tendría impacto sobre el área de los cuerpos principales del sistema, al menos no como promedio mensual. En este caso, tampoco existe un impacto negativo de la extracción de salmuera sobre el área del sistema lagunar de Soncor.

Por último, es relevante mencionar que, para este sistema el Aforo del Puente San Luis podría resultar una variable de interés para analizar en Soncor debido a que corresponde a la principal entrada de agua del sistema. Sin embargo, como se mencionó con anterioridad, incluirla en el ejercicio reduciría el número de observaciones y periodo de análisis, reduciendo la robustez de la regresión y empeorando el valor del $\overline{R^2}$ ajustado. Por otro lado, como se presenta en la **Figura 6.1**, la tendencia del aforo del puente San Luis posee una tendencia estadísticamente nula en el periodo, por lo que no debiese ayudar a explicar una tendencia en los cuerpos de agua de este sistema.

FIGURA 6.1. TENDENCIA DEL AFORO DEL PUENTE DE SAN LUIS (2001 – 2019)



6.1.2. MODELO DE REGRESIÓN SISTEMA PEINE

Luego de probar un alto número de combinaciones posibles entre las variables independientes y la variable dependiente (área del sistema Peine), se obtuvo la ecuación 6.3 para el área del sistema lagunar de Peine, A_t , que incluye tanto los cuerpos principales de Interna, Salada y Saladita como sus desbordes) en un mes t . En este caso la regresión incluye un total de 387 observaciones (desde marzo de 1986 a junio de 2018), lo que en series de tiempo es considerado una muestra grande (y por tanto los resultados son confiables desde el punto de vista estadístico). Nótese que en este caso R_t corresponde a la radiación solar, t es la variable *proxy* de tiempo y S_t corresponde a la extracción total de salmueras en el mes t (sumando lo extraído por SQM y Albemarle).

$$\ln(A_t) = 1,08780 + 0,84796\ln(A_{t-1}) + 0,14523\ln(R_t) + 0,00027t - 0,00340\ln(S_{t-1}) + \varepsilon_{pt}, \overline{R^2} = 0,810 \quad (6.3)$$

(2,84) (32,69) (4,79) (2,68) (-0,72)

Debe notarse que en la ecuación 6.1 entre paréntesis se presenta el estadístico t de Student, el que entrega una medida de la significancia estadística de cada variable. Para el tamaño de la muestra utilizada en la regresión un estadístico t de Student superior a 1,96 (en valor absoluto) es suficiente para rechazar la hipótesis nula de que la variable asociada al parámetro estimado es no-significativa. Por su parte, un $\overline{R^2}$ de 0,810 indica que el modelo planteado es capaz de explicar el 81% de la variabilidad en la variable dependiente.

Dado lo anterior, las variables asociadas a la regresión de la ecuación 6.3 son todas estadísticamente significativas, a excepción de la extracción de salmueras de SQM y Albemarle (cuyo rezago óptimo en términos de $\overline{R^2}$ resulta ser de 1 mes, pero con variaciones en este rezago la variable sigue no siendo significativa). Lo interesante es que en base a la ecuación 6.3 el área del sistema no solo presentaría una mayor inercia que el sistema Soncor, sino que también la radiación solar no impactaría negativamente en el área, al igual que en el sistema Soncor.

La ecuación 6.3 muestra una clara tendencia creciente del área del sistema lagunar asociado a variables correlacionadas con el tiempo, lo que podría deberse a que la oferta de agua del sistema pudiera estar creciendo por razones climatológicas.

En cuanto a la regresión para el área únicamente de los cuerpos principales (sin considerar desbordes), dada por A'_t , se obtuvo la ecuación 6.4.

$$Ln(A_t) = 1,07826 + 0,84958Ln(A_{t-1}) + 0,14361Ln(R_t) + 0,00026t - 0,00346Ln(S_{t-1}) + \varepsilon_{pt}, \overline{R^2} = 0,810$$

(2,82) (32,86) (4,73) (2,60) (-0,74)

(6.4)

En el caso de la ecuación 6.4 es interesante notar el impacto de las variables independientes se mantiene similar al caso cuando se incluyen los desbordes (ecuación 6.4), lo que daría cuenta de que las variabilidades principales en estos cuerpos están asociadas precisamente a los cuerpos principales más que a los desbordes (lo que no corresponde al caso del sistema Soncor). Además, de igual forma que para la ecuación 6.3, la extracción de salmueras de SQM y Albemarle se mantiene como una variable no significativa.

7. CONCLUSIONES

Desde el presente estudio, realizado para complementar el análisis de los cuerpos lagunares ubicados en el Salar de Atacama, es posible concluir que:

1. Respecto a los aspectos más relevantes de las medidas de dispersión en la evolución de las áreas de los sistemas de Soncor y Peine cabe destacar que la laguna Interna y los desbordes de Barros Negros son cuerpos que presentan alta variabilidad.
2. Al realizar el análisis de tendencias medias de los cuerpos que componen los sistemas principales de Soncor y Peine se obtiene que no es posible establecer una relación entre el aumento de las extracciones de salmuera y una disminución en las áreas lagunares. Junto con esto, las tasas de crecimiento de los cuerpos principales a lo largo de todos los períodos de quiebre presentan valores marginalmente positivos o negativos, por lo que se estima que las áreas de los sistemas analizados han presentado un comportamiento estable entre los años 1986 y 2018.
3. Además de las tasas de crecimiento medias de las áreas lagunares, es relevante conocer el rango de valores en el que se puede mover la evolución de las áreas lagunares considerando un cierto nivel de confianza. Con esto es posible determinar si el cuerpo presenta una tendencia creciente, decreciente o nula a un 95% de confianza estadística.
4. De acuerdo con el análisis estadístico de las tasas de crecimiento en Soncor, que estima con un 95% de confianza si los comportamientos son crecientes, decreciente o nulos, se tiene que existe una tendencia histórica (1986 – 2018) significativamente decreciente para el área total. En el caso de los cuerpos lagunares, solo para Barros Negros y los desbordes de Chaxa se puede concluir con significancia estadística que no poseen tendencia. Todo el resto de los cuerpos presentan una tendencia histórica significativamente decreciente. Si se replica el análisis para el Período IV (máxima extracción), sin embargo, se obtiene como resultado que no se puede rechazar la hipótesis nula ni para el área total ni para ninguna de las lagunas. En base a este análisis se concluye que con un 95% de confianza no es posible atribuir un decrecimiento de la laguna Chaxa al período de máxima extracción, el cual contiene el hecho infraccional.

5. Para el análisis estadístico de las tasas de crecimiento en Peine, se tiene que existe una tendencia histórica significativamente creciente que se repite para todos los cuerpos lagunares a excepción de Saladita, que es decreciente. Si se replica el análisis para el Período IV, se obtiene como resultado que no se puede rechazar la hipótesis nula ni para el área total ni para ninguno de los cuerpos, salvo Salada que presenta un comportamiento creciente. Luego no se puede relacionar estadísticamente la extracción con un decrecimiento en el área lagunar de Peine para el Período IV.
6. Lo anterior es consistente con el de hecho de que la dinámica de los sistemas lagunares del Salar de Atacama hayan respondido históricamente a ciclos climatológicos de escala regional (Le Roux, 2018), pudiendo expandirse, contraerse, crear nuevas zonas de desbordes, aumentar o disminuir su caudal de descarga, entre otros, dependiendo de la disponibilidad de agua superficial que exista en un periodo determinado.
7. Al realizar el análisis comprendido entre agosto de 2013 y agosto de 2015 (período infraccional), el cual fue realizado para los cuerpos principales tanto de Peine como de Soncor, con un 95% de confianza, los cuerpos no presentan tendencia en todos los casos analizados.
8. En el caso de Aguas de Quelana, con los datos disponibles se concluye que no es posible rechazar la hipótesis nula de que el área no presente tendencia.
9. Al convertir las tasas de crecimiento en el número de hectáreas totales que se han perdido o ganado en el sistema de Soncor entre los años 1986 y 2018, se obtiene que la mayor pérdida registrada corresponde al desborde de Barros Negros y es igual a 0,25 [ha] para todo el periodo. Por otro lado, la mayor ganancia procede del cuerpo Barros Negros y es igual a 0,0008 [ha].
10. Al convertir las tasas de crecimiento en el número de hectáreas totales que se han perdido o ganado en el sistema de Peine entre los años 1986 y 2018, se obtiene que la mayor pérdida registrada corresponde al cuerpo de Saladita y es igual a 0,0098 [ha], por otro lado, la mayor ganancia procede del cuerpo Interna y es igual a 0,23 [ha].
11. Si se comparan los mínimos crecimientos que han evidenciado los sistemas totales de Soncor y Peine entre 1986 y 2018 con el área total media de los sistemas se obtiene una baja anual de 0,007% para Soncor y un alza anual de 0,011% para Peine.

12. En el marco de la realización de un análisis de regresión multivariado, el modelo planteado para el sistema Soncor, considerando los desbordes, es capaz de explicar alrededor del 70% de la variabilidad en la variable dependiente. El área del sistema no solo presentaría inercia, sino que también la radiación solar no generaría un impacto negativo neto sobre el área. Junto con esto, se evidencia una clara tendencia decreciente del área del sistema lagunar asociado a una o varias variables correlacionadas con el *proxy* tiempo. En cuanto al impacto generado por la variable extracción de salmuera sobre las áreas lagunares, dado que la elasticidad es muy pequeña (0,00541), la vinculación entre las variables no sería relevante. Cabe destacar que, el efecto de extracción de salmuera no generaría un impacto negativo sobre las áreas con una significancia estadística del 95%.
13. Para el caso del modelo planteado para el sistema Soncor, considerando solos los cuerpos principales, la inercia del sistema es mayor que cuando se consideran los desbordes. Esto es intuitivo dado que la variabilidad del área del sistema Soncor está asociada fundamentalmente al área de los desbordes más que los cuerpos principales. También es importante destacar que el impacto de la variable *proxy*, dada por el tiempo sobre el área de los cuerpos principales del sistema lagunar, es casi cinco veces menor que el impacto sobre el área del sistema cuando se consideran los desbordes de Chaxa y Barros Negros. Por otra parte, el impacto de la extracción de salmuera se ve reducido tres veces respecto al caso en el que se consideran los desbordes. Finalmente, la radiación solar no tendría impacto sobre el área de los cuerpos principales del sistema, al menos no como promedio mensual. En este caso el efecto de extracción de salmuera tampoco generaría un impacto negativo sobre las áreas con una significancia estadística del 95%.
14. El modelo planteado para el sistema Peine, considerando los desbordes, es capaz de explicar alrededor del 81% de la variabilidad en la variable dependiente. El área del sistema no solo presentaría inercia, sino que también la radiación solar tendría un impacto positivo sobre el área, cuya explicación es análoga a la realizada para el caso del sistema Soncor. Junto con esto, existe una clara tendencia creciente del área del sistema lagunar asociada a variables correlacionadas con el tiempo, lo que podría deberse a que la oferta de agua del sistema pudiera estar creciendo por razones climatológicas. Por otro lado, para este caso, la extracción de salmuera no resultó ser estadísticamente significativa al 95% de confianza (ni con ni sin rezago).

15. En el caso de la ecuación que describe el comportamiento del sistema lagunar de Peine, sin considerar desbordes, es interesante notar que el impacto de las variables independientes se mantiene similar al caso cuando se incluyen los desbordes, lo que daría cuenta de que las variabilidades principales en estos cuerpos están asociadas precisamente a los cuerpos principales más que a los desbordes (lo que difiere de lo ocurrido en el caso del sistema Soncor).
16. En términos generales, para los sistemas de Soncor y Peine se realizaron análisis multivariantes para determinar con un 95% de confianza el impacto de diversas variables explicativas a las fluctuaciones experimentadas por las áreas. En el caso del sistema Soncor, la extracción de salmuera es una variable explicativa que, en ningún caso genera un impacto negativo sobre el área de las lagunas. Para Peine, la extracción de salmuera no resultó ser estadísticamente significativa a un 95% de confianza para explicar las fluctuaciones en el área del sistema.

8. BIBLIOGRAFÍA

Ali, M. I., Dirawan, G. D., Hasim, A. H., & Abidin, M. R. 2019. Detection of Changes in Surface Water Bodies Urban Area with NDWI and MNDWI Methods. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 9(3), 946-951.

Eid, A. N. M., Olatubara, C. O., Ewemoje, T. A., El-Hennawy, M. T., & Farouk, H. (2020). Inland wetland time-series digital change detection based on SAVI and NDWI indices: Wadi El-Rayan lakes, Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100347.

Gao, B. C. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.

Håkanson, L. 1981. A manual of lake morphometry. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Alemania.

Hamilton, J. 1994. Time series analysis. Princeton University Press. Princeton, New Jersey, USA.

Han-Qiu, X. U. 2005. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *Journal of remote sensing*, 5, 589-595.

Huang, S., Li, J., & Xu, M. 2012. Water surface variations monitoring and flood hazard analysis in Dongting Lake area using long-term Terra/MODIS data time series. *Natural hazards*, 62(1), 93-100.

Hutchinson, G. E. 1975. A treatise on limnology: limnological botany (Vol. 3). John Wiley & Sons. New Jersey, EE.UU.

Ji, L., Zhang, L., & Wylie, B. 2009. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), 1307-1317.

Le Roux., J.P., 2018. Cambios paleoclimáticos y sedimentológicos durante el Pleistoceno- Holoceno en el Salar de Atacama. InvestSed Associates.

Maddala, G. S., & Lahiri, K. 1992. Introduction to econometrics (Vol. 2). New York: Macmillan.

McFeeters, Stuart 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.

Milancović, M. 1998. Canon of insolation and the ice-age problem. *Zavod Za Udžbenike I Nastavna Sredstva*, Belgrado, Serbia.

Milewski, R. 2020. Potential of Optical Remote Sensing for the Analysis of Salt Pan Environments. Tesis de doctorado, Universidad de Postdam y German Research Centre for Geosciences, Alemania.

OpenCv. (2016.). OpenCV. Consultado el 13 de noviembre de 2020, desde <https://opencv.org/>.

Sheng, Y., Song, C., Wang, J., Lyons, E. A., Knox, B. R., Cox, J. S., & Gao, F. 2016. Representative lake water extent mapping at continental scales using multi-temporal Landsat-8 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 185, 129-141.

SQM Salar S.A. 2018. Informe de superficies lagunares Sistemas Soncor, Peine y Aguas de Quelana. Cargo N°1 DE Res. Ex N°21/ROL F-041-205. SQM Salar S.A.

SQM Salar S.A. 2018b. Informe N° 21 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico. Proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. 364 pp.

SQM Salar S.A. 2020. Estudio de impacto ambiental proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama: modelo hidrogeológico conceptual del salar de atacama.

Superintendencia de Medio Ambiente. 2020. RES. EX. N°29/ ROL F-041-2016.

Tejeda, I., Cienfuegos, R., Muñoz, J. F., & Durán, M. 2003. Numerical modeling of saline intrusion in Salar de Atacama. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(1), 25-34.

Welch, P. S. 1948. *Limnological methods*. McGraw-Hill Book Company. Blackiston, Philadelphia, EE.UU.

Wetzel, R. G. 1975. *Limnology*. WB Sanders, Philadelphia, EE.UU.

Yao, F., Wang, J., Wang, C., & Crétaux, J. F. 2019. Constructing long-term high-frequency time series of global lake and reservoir areas using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111210.

Anexo 10.3

Resultados extensión lagunar

Superficies lacustres medidas con imágenes satelitales

Fecha	Barros Negros (cuerpo principal) (m2)	Barros Negros (áreas aledañas) (m2)	Chaxa (m2)	Puilar (m2)	Aguas de Quelana (m2)	Salada (m2)	Saladita (m2)	Interna (m2)
abr - 2008	1.060.666	211.583	315.363	69.823	204.040	170.447	113.240	175.958
abr - 2009	1.080.628	243.388	316.764	70.360	214.810	199.511	109.968	191.671
abr - 2010	1.048.924	154.737	308.357	69.267	84.480	198.178	108.022	198.838
abr - 2011	1.083.311	242.137	305.433	70.003	111.710	199.521	110.394	182.616
abr - 2012	1.085.391	241.942	300.248	68.280	249.130	196.398	116.315	246.828
abr - 2013	1.063.325	192.643	295.786	68.264	169.330	197.314	110.227	331.075
abr - 2014	1.064.767	193.848	296.162	68.419	65.800	197.427	105.522	261.763
abr - 2015	1.116.891	263.359	297.955	68.940	100.720	198.429	103.638	472.172
abr - 2016	1.051.449	131.257	291.397	67.151	56.490	198.928	96.262	134.054
abr - 2017	1.082.109	207.049	293.310	69.434	77.740	200.958	99.410	405.302
abr - 2018	1.065.345	97.428	291.001	66.828	86.840	200.710	95.010	112.523
abr - 2019	1.101.511	227.782	330.083	62.101	131.030	195.632	89.263	680.710
abr - 2020	1.071.838	107.945	346.599	63.142	110.670	180.238	90.767	446.388