

Santiago, 19 de agosto de 2022

Señor

**Benjamín Muhr Altamirano**

Fiscal (S)

Superintendencia del Medio Ambiente

PRESENTE

**MAT.:** Evacúa traslado conferido, respecto a “Análisis crítico y exploratorio Collahuasi UF ‘Faena Minera Collahuasi’ (N° ID 415)” y solicita se tenga presente lo que indica.

**ANT.:**

- Res. Ex. N° 33/Rol D-095-2017, de 8 de agosto de 2022, Provee presentación que indica.
- Res. Ex. N° 34/Rol D-095-2017, de 10 de agosto de 2022, Resuelve solicitud de ampliación de plazo.

**REF.:** Expediente Sancionatorio N° D-095-2017.

---

Att.: Romina Chávez Fica, Fiscal Instructora.

**Cecilia Urbina Benavides**, en representación de **Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM** (en adelante, “CMDIC”), ambos domiciliados para estos efectos en Av. Andrés Bello N° 2457, piso 39, comuna de Providencia, Santiago, en procedimiento sancionatorio **Rol D-095-2017**, en relación con lo resuelto en el Resuelvo I de la **Res. Ex. N° 33/Rol D-095-2017** de 8 de agosto de 2022, vengo en presentar consideraciones, aclaraciones y/o respuestas al documento “Análisis crítico y exploratorio Collahuasi UF ‘Faena Minera Collahuasi’ (N° ID 415)” del Equipo de Geoinformación de la División de Seguimiento e Información Ambiental de vuestra Superintendencia:

**I.****ANTECEDENTES**

Con fecha 3 de febrero de 2022, CMDIC presentó una nueva versión (cuarta) del Programa de Cumplimiento Refundido, Coordinado y Sistematizado y sus Anexos (en adelante, "PdC"), haciéndose cargo de las observaciones consignadas en el Resuelvo III de la Res. Ex. N° 26/Rol D-095-2017, de 30 de diciembre de 2021, de vuestra Superintendencia, y complementando la versión anterior del Programa de Cumplimiento propuesto en el marco del presente procedimiento de sanción Rol D-095-2017.

A su vez, con fecha 4 de marzo de 2022, CMDIC presentó a vuestra Superintendencia un escrito acompañando la actualización del Informe de Experto Análisis de Superficie Lagunar Salar de Coposa y del Informe Experto Componentes flora y vegetación terrestre, en particular, para el análisis de imágenes satelitales de los sectores de Coposa Chico, San Pablo y Tankatankani, así como las minutas de análisis y estimación de efectos de los cargos N° 8 y 9 actualizadas en sus secciones pertinentes. Debido a lo anterior, también se actualizó la sección de descripción de los efectos negativos de los cargos N° 8 y 9 del Plan de Acciones y Metas.<sup>1</sup>

Mediante la Res. Ex. N° 30/Rol D-095-2017, de 7 de marzo de 2022, vuestra Superintendencia tuvo por presentado el PdC refundido de CMDIC, y a través de la Res. Ex. N° 31/Rol D-095-2017, de 25 de marzo de 2022, confirió traslado a esta parte en relación con la presentación efectuada por la Asociación Indígena Aymara Salar de Coposa ("AIASC") el 21 de marzo de 2022, evacuando CMDIC el traslado conferido con fecha 14 de abril de 2022.

Con fecha 8 de agosto de 2022, a través de la Res. Ex. N° 33/Rol D-095-2017 vuestra Superintendencia tuvo por incorporado el documento "Análisis crítico y exploratorio Collahuasi UF 'Faena Minera Collahuasi' (N° ID 415)" del Equipo de Geoinformación de la División de Seguimiento e Información Ambiental al presente procedimiento administrativo, otorgando un plazo de 5 días hábiles para aducir lo que estime pertinente en relación a dicho documento, el cual fue ampliado en 2 días hábiles mediante la Res. Ex. N° 34/Rol D-095-2017.

---

<sup>1</sup> Mediante la Res. Ex. N° 28/Rol D-095-2017 de fecha 03.02.2022, la SMA confirió un nuevo plazo para la presentación de la actualización de estos informes, el cual fue ampliado mediante la Res. Ex. N° 29/Rol D-095-2017 de fecha 15.02.2022.

**II.**

**CONSIDERACIONES, ACLARACIONES Y/O RESPUESTAS AL DOCUMENTO  
“ANÁLISIS CRÍTICO Y EXPLORATORIO COLLAHUASI UF ‘FAENA MINERA  
COLLAHUASI’ (N° ID 415)” DEL EQUIPO DE GEOINFORMACIÓN**

En primer lugar, se hace presente que CMDIC ha encargado al Centro de Ecología Aplicada (“CEA”) el análisis del documento de vuestra Superintendencia, por lo que en Anexo 01 se acompaña Minuta respuesta a Res. Ex. 33 /Rol D-095-2017: Análisis crítico y exploratorio Collahuasi Unidad Fiscalizable Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM (N° ID 415)” del CEA de agosto de 2022 (en adelante “Minuta de respuesta Res. Ex. 33/ Rol D-095-2017”), en la cual se abordan las observaciones realizadas en el documento “Análisis crítico y exploratorio Collahuasi UF ‘Faena Minera Collahuasi’ (N° ID 415)” por el Equipo de Geoinformación de la División de Seguimiento e Información Ambiental de vuestra Superintendencia, en relación a las actualizaciones del Informe de Experto Análisis de Superficie Lagunar Salar de Coposa y del Informe Experto Componentes flora y vegetación terrestre (en adelante “Informes de Experto”), presentados por CMDIC con fecha 4 de marzo de 2022.

En la referida Minuta de respuesta Res. Ex. 33/ Rol D-095-2017 se concluye lo siguiente:

En relación a las consideraciones metodológicas implementadas por la SMA, es posible señalar:

- Respecto de los polígonos definidos por la SMA como Humedal Centro y Humedal 1, no es posible determinar la existencia de humedales, ya que la información de campo da cuenta de vegetación predominantemente del tipo zonal con especies como *Parastrephia lucida* y *Lampaya medicinalis*, las cuales no dependen de manera estricta con aguas subterráneas, sino más bien su abastecimiento está definido por precipitaciones, por lo que no corresponde su inclusión en los análisis temporales efectuados.
- El error de bandeo presente en las imágenes de Landsat 7 ETM+ comienza el 31 de mayo 2003 y genera pérdida de información (sin datos). Este bandeo al no pasar siempre por el mismo lugar (coordenadas geográficas) dificulta el cálculo de un error de incertidumbre.
- La utilización de menos de tres imágenes por trimestre para calcular las medianas y corregir el error de bandeo genera un alto grado de incertidumbre en los resultados obtenidos.
- Esta incertidumbre aumenta cuando el sistema/sector analizado es más pequeño en superficie.
- El porcentaje de error de Landsat 7 ETM+ asociado a la falta de información en el área de estudio varía entre pixeles -74,3% a -88,3%.
- Dado los análisis realizados, no se recomienda la utilización de imágenes Landsat 7 ETM+ en los sistemas analizados ni tampoco asumir el umbral propuesto por SMA, dado que, las imágenes de mediana resolución como Landsat no son una herramienta

apropiada para la estimación de superficie con el nivel de precisión requerido en este proceso, es decir, con determinación de hectáreas por sistema vegetacional y lagunar.

- La determinación de superficie lacustre en el periodo pre-operacional, a través de la mediana obtenida para los años 1985 a 1997 no toma en consideración la pérdida de superficie lacustre que en forma natural se observa en dicho periodo. Este criterio no se condice con el utilizado en el caso del análisis de vegetación.

No obstante lo anterior, con el objeto de comparar los resultados y para efectos de este PdC, se realiza un análisis equivalente bajo los supuestos planteados por la autoridad, con las siguientes consideraciones:

- Se incluye en el análisis de variación de superficie con vegetación y lacustre la existencia de fenómenos climáticos naturales, como la precipitación y temperatura.
- Se reanaliza el set de imágenes considerado por la SMA (utilizando las mismas librerías) utilizando imágenes con una nubosidad menor al 30%, verificando la existencia de errores mediante una inspección visual de cada imagen.
- Exclusión de sectores denominados por la SMA como humedal centro y humedal 1, dado que la evidencia de campo indica que las formaciones allí presentes serían de tipo zonal, las cuales presentan especies que no utilizan aguas subterráneas como fuente hídrica.

Los resultados obtenidos en el análisis de la influencia de la meteorología en el comportamiento temporal de los distintos sistemas presentes en el Salar de Coposa permiten concluir lo siguiente:

- El producto CR2MET permite representar de buena forma el comportamiento de la precipitación registrado *in-situ* en la zona de estudio y, dado que cuenta con un producto de temperatura, se posiciona como una herramienta idónea para caracterizar los patrones climáticos en los sistemas de interés.
- Los diferentes sistemas comparten patrones climáticos similares, los cuales muestran patrones de crecimiento (temperatura) y decrecimiento (precipitaciones) desde el año 1985 en adelante.
- En términos de precipitación, se estima una disminución sistemática de los montos anuales, mientras que la temperatura presenta una significativa tendencia creciente del orden de 0,2°C/década.
- Existen correlaciones significativas en términos estadísticos que permiten explicar, dependiendo de la variable y el sistema, entre el 12% y 40% de la varianza de la superficie, lo cual permite concluir sobre la relación y/o dependencia natural que existe entre el clima y la superficie vegetacional.
- Los cambios en las condiciones climáticas del periodo 1998-2008 respecto al periodo 1985-1997 podrían explicar el 23,5% de la mediana de la disminución de la superficie vegetacional en dicho subperiodo.

En términos de vegetación los resultados obtenidos en el presente trabajo se detallan a continuación:



- Al comparar el periodo asociado a los hechos infraccionales que motivan el presente análisis de efectos, es decir año 2008 con el año 2022, el resultado evidencia una ganancia neta de vegetación reportando un aumento de 28,5 ha en el periodo.
- En dicho periodo el único sector que evidencia una pérdida en la superficie con vegetación corresponde a Tankatankani con 0,73 hectáreas.
- La pérdida total neta de superficie vegetacional, aplicando la metodología utilizada por la SMA, corresponde a 36,3 ha al comparar el período 1997-2022, lo anterior considerando la influencia de la meteorología.
- La mayor pérdida de superficie vegetacional en dicho período se evidencia en el sistema San Pablo.

En relación a la superficie lacustre, es posible señalar:

- El análisis de espejo de agua con imágenes Landsat 7 ETM+ agrupado trimestralmente, y asociado a las estaciones pluviales y estivales, describe que los meses con mayor índice NDWI, corresponden naturalmente a los trimestres de enero-marzo y abril-junio. Sin embargo, el sistema Jachucoposa posee una dinámica más homogénea durante todo el año hidrológico.
- No se observan diferencias estadísticamente significativas entre aguas someras y profundas de la laguna Jachucoposa desde el inicio de la extracción al año 2021, tanto en periodo pluvial como estival.
- De acuerdo al análisis realizado por la SMA, se observa que en el periodo 2008-2021 existe un incremento en la superficie lacustre en todos los trimestres analizados, tanto para aguas someras, como para toda la superficie lagunar.

**Por tanto**, en consideración a lo expuesto en esta sección,

**Solicito a Ud.**, tener por evacuado el traslado conferido mediante Res. Ex. N° 33/ Rol D-095-2017, y tener presente las aclaraciones, explicaciones y/o respuestas dadas respecto al documento “Análisis crítico y exploratorio Collahuasi UF ‘Faena Minera Collahuasi’ (N° ID 415)” del Equipo de Geoinformación de la División de Seguimiento e Información Ambiental de vuestra Superintendencia.

**III.**

**SE TENGA PRESENTE**

En primer lugar, es importante señalar que, aun cuando CMDIC ha efectuado un análisis crítico de la metodología utilizada por vuestra Superintendencia, de acuerdo a lo desarrollado en Minuta de respuesta Res. Ex. 33/ Rol D-095-2017, mi representada manifiesta su voluntad de trabajar la metodología desarrollada en el “Análisis crítico y exploratorio Collahuasi UF ‘Faena Minera Collahuasi’ (N° ID 415)” del Equipo de Geoinformación de la División de Seguimiento e Información Ambiental, con el objeto de continuar avanzando hacia la aprobación del PdC y al cumplimiento de los planes de acción propuestos, junto con la consecución de sus metas respectivas, las cuales han contribuido no solo al robustecimiento

de los estándares medioambientales de mi representada, sino que también a la profundización de instancias de diálogo con las comunidades, en este caso con la AIASC, junto con la cual se han trabajado y acordado ciertas acciones propuestas en el PdC.

Al respecto, tal como se señaló anteriormente el CEA realizó un análisis del documento de vuestra Superintendencia con el objeto de determinar la pérdida de vegetación y superficie lagunar para el período 1997 hasta la actualidad, considerando la metodología utilizada por vuestra Superintendencia. Ahora bien, en el marco del referido análisis por parte del CEA, y tal como se expuso en la sección precedente, se relevan las siguientes consideraciones, en virtud de las cuales se fundamenta el ajuste a las superficies máximas estimadas por vuestra SMA: i) metodología de cálculo de medianas representativas de cada periodo; y ii) efectos naturales (aumento temperatura y disminución de precipitación); y periodo en que se produce la disminución.

En base al nuevo análisis realizado, con las consideraciones metodológicas y los efectos naturales antes señalados y los periodos de análisis, solicita tener presente lo siguiente:

- **Los efectos de las infracciones, considerando como año base el 2008, son nulos en algunos sectores y bajos en otros.**

En la sección 3.3 de la Minuta de respuesta Res. Ex. 33/ Rol D-095-2017, acompañada en Anexo 01, se compara la evaluación en la superficie asociado a los hechos infraccionales que motivan el presente análisis de efectos, es decir, en el periodo comprendido entre los años 2008 al 2022. Los resultados obtenidos tanto por la SMA como por el CEA en la minuta antes señalada, evidencian una ganancia en la superficie con vegetación, la cual en el caso del análisis realizado por el CEA corresponden a un aumento de 28,5 ha en el periodo. En dicho periodo el único sector que muestra una pérdida en la superficie con vegetación corresponde a Tankatankani con 0,73 hectáreas.

Por otra parte, el análisis del CEA da cuenta para el periodo 1997-2022 de una pérdida total neta de superficie vegetacional, basada en la reconstrucción de metodología de la SMA, correspondiente a 36,3 hectáreas, lo anterior considerando la influencia de la meteorología. Al respecto, la mayor pérdida de superficie vegetacional en dicho periodo se evidencia en el sistema San Pablo.

Tal como es posible advertir, los resultados dan cuenta que las disminuciones verificadas que solo ocurren en el periodo de operación del proyecto, las pérdidas solo verificaron en el periodo 1998-2008, las cuales no resultan atribuibles a las infracciones imputadas, dado el tiempo en que se éstas se verificaron.

- **No obstante lo anterior CMDIC tiene la voluntad de hacerse cargo de la evolución de los componentes desde 1997, mediante las acciones 8, 40 y 46 del PdC ajustadas y una reducción adicional de extracciones de aguas en el sector de Coposa norte de 55 l/s.**

En la sección 2.3 de la Minuta de respuesta Res. Ex. 33/ Rol D-095-2017 se presentan los resultados del análisis en términos comparativos, y tal como se indicó en la sección precedente al detallar las conclusiones del análisis, en base a éste se reconocen 36.3 hectáreas de pérdida total neta de superficie vegetacional, basada en la reconstrucción de metodología de la SMA.

- **Propuesta de ajustes a las Acciones 8, 40 y 46**

En consecuencia, se propone ajustar las acciones 8, 40 y 46 del PdC consistente en la ejecución de un plan de enriquecimiento y gestión de condiciones de hábitat que tiene por objeto contribuir a la funcionalidad ecosistémica del acuífero del salar, con miras a acelerar la recuperación en la vegetación (y que se propiciará adicionalmente debido a la reducción de las extracciones propuesta en el marco de las acciones 42 y 44 del PdC).

En efecto, el ajuste propuesto por CMDIC tiene por objeto de precisar aun más algunos de sus aspectos, los cuales serán detallados en Anexo 02, y reestructurarla en el sentido de establecer un proceso de tres etapas. Las dos primeras etapas a implementarse en el marco del PdC, correspondientes a: i) Estudios iniciales, diseño conceptual de la medida y de plan piloto; y ii) Implementación de y operación del Plan Piloto; y una tercera etapa que será implementada en el sector de San Pablo, con posterioridad a la implementación y operación del Plan Piloto. Dicha propuesta se fundamenta principalmente debido a que las Acciones N° 8, 40 y 46 del PdC, trascienden a la ejecución de éste, particularmente, respecto al trabajo conjunto con la AIASC, cuyo propósito es precisamente que sea de largo plazo. Ahora bien, se precisa que en todas sus etapas se considera el trabajo conjunto con la AIASC.

En virtud de lo anterior, en Anexo 02 se acompaña documento con el Plan de Enriquecimiento y Gestión de Condiciones de Hábitat correspondiente a las Acciones 8, 40 y 46, con los respectivos ajustes propuestos.

- **Propuesta de ajuste a la Acción 44: reducción adicional de extracciones de aguas en el sector de Coposa norte de 55 l/s.**

Adicionalmente, CMDIC propone reducir las extracciones de agua desde el sector de Coposa norte en 55 l/s adicionales, pasando de un caudal máximo de 265 l/s a 210 l/s. Esta reducción adicional contribuirá a acelerar la recuperación de los niveles freáticos en



el salar y por consiguiente de las condiciones requeridas para el desarrollo natural de la vegetación azonal.

De este modo, CMDIC se compromete a mantener una extracción no superior a 210 l/s en Coposa norte durante toda la vigencia del PdC y por toda la vida útil del proyecto.

**Por tanto**, en consideración a lo expuesto en esta sección,

**Solicito a Ud.**, tener presente lo señalado y los ajustes propuestos a las Acciones N° 8, 40, 44 y 46 del PdC.

#### **IV. ANEXOS**

En conformidad a lo expuesto precedentemente, se solicita tener por acompañados los siguientes documentos, en soporte digital:

- 01.** Minuta respuesta a Res. Ex. 33 /Rol D-095-2017: Análisis crítico y exploratorio Collahuasi Unidad Fiscalizable Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM (N° ID 415)" del Centro de Ecología Aplicada de agosto de 2022.
- 02.** Plan de Enriquecimiento y Gestión de Condiciones de Hábitat correspondiente a las Acciones 8, 40 y 46 ajustadas.

Se hace presente que, en razón del funcionamiento actual de la Oficina de Partes de esta Superintendencia, los anexos antes listados pueden descargarse desde el siguiente enlace web:

<https://www.dropbox.com/sh/ch2e0y2hvmzdzke/AABT5cKe9SVyxXaSatRfSjbHa?dl=0>

CECILIA  
URBINA  
BENAVIDES

Firmado digitalmente por  
CECILIA URBINA  
BENAVIDES  
Fecha: 2022.08.19  
15:37:17 -04'00'

**Cecilia Urbina Benavides**  
p.p. **Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM**



# “Minuta respuesta a Res. Ex 33/ROL D-095-2017: Análisis crítico y exploratorio Collahuasi Unidad Fiscalizable Compañía Doña Inés de Collahuasi SCM (N° ID 415)”

Centro de Ecología Aplicada S.A. · agosto 2022



Compañía minera Collahuasi

CONTROL DEL DOCUMENTO			
Versión	Fecha	Elaborado por	Aprobado por
0	19-08-2022	Salvador Guerra Yohann Videla Natalia Sandoval Eduardo Muñoz Tomás Rioseco	Pablo Lagos

## Índice de contenidos

1	Diferencias entre análisis crítico SMA e informe de experto CMDIC.....	5
1.1	Diferencia en áreas de estudio.....	5
1.2	Criterio de definición de satélite para análisis de imágenes.....	8
	Error de bandeo en Landsat 7 Salar de Coposa .....	10
1.3	Alcance metodológico del NDVI.....	13
1.3.1	Criterio para definir umbral de corte .....	14
2	El análisis semestral y anual se puede ver en el Anexo .....	16
2.1	Resumen de criterios establecidos para dar respuesta a la SMA .....	16
3	Vegetación por sistema Humedal .....	17
3.1	Superficie vegetacional .....	17
3.2	Tendencias climáticas y su influencia en superficie de vegetacional .....	18
3.2.1	Producto CR2MET v2.0 y su comparación respecto a otros productos de precipitación disponibles en la literatura.....	18
3.2.2	Análisis de tendencias climáticas en el periodo histórico 1979-2021.....	21
3.2.3	Relación entre superficies derivadas mediante índices NDVI y variables meteorológicas (P y T).....	26
3.2.4	Modelo de regresión lineal múltiple para la estimación de superficie.....	29
3.3	Metodología y Resultados de análisis de superficies de humedales bajo lineamientos de finido por la SMA.....	34
3.4	Comportamiento histórico sistema lagunar Jachucoposa .....	38
4	Conclusiones.....	43
5	Referencias.....	46
6	Anexo.....	48
6.1	Error de bandeo Landsat 7 .....	48
6.2	Criterio para definir umbral de corte: Análisis semestral y anual.....	50
6.2.1	Análisis comparativo con valor de corte NDVI 0,0 y 0,1 Landsat 7 ETM+ .....	53
6.3	Detalle de consideraciones estadísticas análisis meteorológico .....	67
6.4	Análisis de significancia estadísticas laguna Jachucoposa .....	70

## Contexto

En respuesta a los cargos N°8 y N°9 del proceso sancionatorio SMA Rol D-095-2017, la Compañía Minera Collahuasi solicita a CEA Ltda. un análisis de la variabilidad del componente de flora y vegetación terrestre y de los sistemas lagunares existentes en la cuenca del salar de Coposa. Como respuesta a dicho procedimiento sancionatorio, CMDIC presentó un Programa de Cumplimiento (en adelante PdC), el cual fue aprobado según Resolución Exenta N°12/Rol D-095-2017, de mayo de 2019. En el mismo contexto, la SMA mediante Resolución Exenta N° 13/Rol D-095-2017, de junio de 2020, resolvió retrotraer el procedimiento sancionatorio, solicitando nuevos antecedentes a través de la Res. Ex. 13/2017 y posteriormente mediante Resolución Exenta N° 26/Rol D-095-2017. Para dar respuesta a ello, Collahuasi solicita profundizar el estudio en cuanto a la evolución histórica del espejo de agua de las lagunas y zonas de evaporación presentes en el sector Jachucoposa, Coposito, San Pablo y Tankatankani.

Conforme a los resultados expuestos en un informe de experto (CMDIC, 2022) la SMA realiza nuevas observaciones a la metodología y resultados de ambos informes (Flora y vegetación y evaluación sistema lagunar) mediante la Res. Ex. N°33/2022. El análisis a estos reparos es abordado en esta minuta. Entre los alcances más relevantes planteados por la SMA se encuentran:

i) El cuestionamiento del uso de Landsat 8 y su calibración para análisis vegetacional (se sugiere el uso de Landsat 5 y 7), ii) se sugiere modificar umbral de análisis NDVI (menor a 0.1) y NWDI (menor a 0.2) y III) se modifican polígonos de área de estudio propuestos por CMDIC,2022,

Esta minuta atiende las observaciones realizadas, con procesos históricos comparativos que permiten visualizar el alcance de cada criterio, el ya utilizado y el sugerido mediante la utilización de un nuevo set de datos basados en las sugerencias de la SMA incluyendo análisis meteorológico.



## 1 Diferencias entre análisis crítico SMA e informe de experto CMDIC.

En respuesta al análisis exploratorio realizado por el equipo de Geoinformación (SMA) y que define como un “análisis propio a los componentes de sistemas de superficies lagunares y de vegetación del salar de coposa, detallando sus respectivas metodologías, resultados y alcances”. Se debe aclarar en primera instancia las diferencias sustantivas entre los análisis presentados en la Res Ex N°33 y el “Informe de Experto de Análisis de Superficie Lagunar Salar de Coposa” e “Informe de Experto de Componentes flora y vegetación terrestre” en marzo 2022 (en adelante CMDIC,2022). Los criterios y justificaciones de las diferencias entre los documentos presentados son explicadas en el capítulo 1 de este informe, bajo el siguiente orden lógico:

- Diferencia en áreas de estudio
- Criterio de definición de satélite para análisis de imágenes
- Alcance metodológico del NDVI

### 1.1 Diferencia en áreas de estudio

En el análisis crítico (Res N°33/2022), cuyo objetivo es replicar lo realizado por CEA para CMDIC en informe de experto 2022 (Figura 1-1) se redefinen las áreas generando diferencias notorias en las áreas evaluadas, en la Tabla 1-1 y Figura 1-1 se observan en detalle las hectáreas de diferencia entre ambos documentos. Por este motivo, CMDIC intenta reconstruir el análisis de la SMA con el objeto de comprender y responder a los criterios de la autoridad con un análisis equivalente y/o representativo a modo de dar respuesta a los cargos que se le imputan y a las observaciones efectuadas.

Para ello, se realizó una fotointerpretación sobre los polígonos de interés definidos por la SMA y no sobre el área analizada en la ResN°33/2022. De esta manera, el análisis descrito en esta minuta contempla mayor superficie incluyendo todas las posibles áreas de vegetación dentro del área denominada zona de interés. Los polígonos propuestos por la autoridad (polígonos rojos) y las diferencias con lo realizado por CMDIC (polígonos negros) se explicitan en la Tabla 1.1 y Figura 1.1

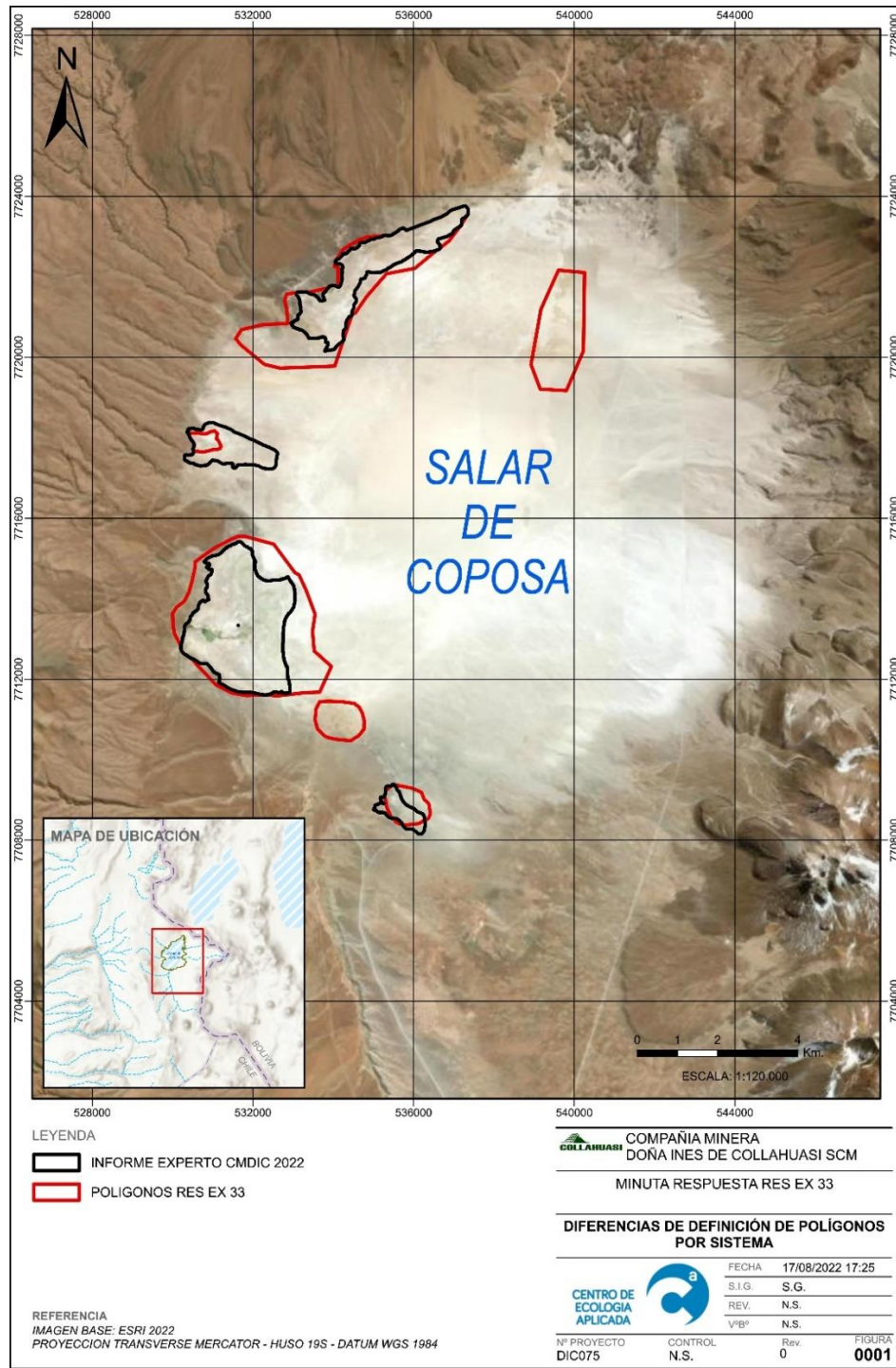


Figura 1-1 Diferencia entre áreas de estudio: Informe experto (2021) y análisis crítico SMA (2022)

Tabla 1-1 Diferencias en ha entre áreas informe de experto CMDIC y áreas redefinidas por SMA Res Ex. 33.

Sistema	Ha SMA (estimado)*	Ha CMDIC
Jachucoposa	1101.52	705.74
Tankatankani	85.02	68.64
San Pablo	706.29	389.06
Coposito	29.64	166.51
Humedal 1	99.26	N/A
Humedal centro	299.26	N/A

\* basado en georeferenciación de cartografía SMA RES N° 33/2022.

Cabe destacar que los sistemas Humedal 1 y Humedal Centro no fueron áreas incluidas en el informe Análisis de experto (CMDIC,2022). En el caso del humedal centro, la información de campo levantada en el año 2018 en contexto del EIA “Desarrollo de Infraestructura y Mejoramiento de Capacidad Productiva de Collahuasi”, da cuenta de la existencia de formaciones vegetacionales de tipo zonal de Matorrales Abiertos de *Parastrephia lucida* y *Lampaya medicinalis* (Figura 1-2), ambas especies no constituyentes de ecosistema de humedales. Es relevante indicar que las especies que constituyen las formaciones zonales usan el agua proveniente de precipitaciones, y no necesariamente dependen de las aguas subterráneas para su desarrollo. En el área es posible identificar también polígonos de formaciones azonales con dominancia de la especie *Xenophyllum incisum*, definidas como Pradera muy abierta, esta podría considerarse como formación de tipo azonal. Es relevante indicar que no existe evidencia en campo de mantillo o rastrojo que den cuenta de la presencia anterior de humedales. Por lo tanto, ante la información en campo, se considera necesario eliminar este polígono con respuesta de NDVI definido como humedal por parte de SMA. Similar situación es la descrita para el polígono humedal 1, el cual según datos de campo correspondería a Matorral Semidenso de *Parastrephia lucida*, por lo cual no correspondería categorizarlo como humedal ya que es vegetación de tipo zonal (Figura 1-3) y se considera necesario eliminar este polígono con respuesta de NDVI definido como ecosistema de humedal por parte de SMA.



Figura 1-2 Formación vegetacional de *P. lucida* de tipo zonal en polígono denominado Humedal Centro. Fuente Ecos 2022



Figura 1-3 Cercanía sector de polígono definido como Humedal 1, no se evidencia registro de humedal. Fuente Ecos 2022.

## 1.2 Criterio de definición de satélite para análisis de imágenes

Para poder usar correctamente las series temporales (1985 - actualidad) de NDVI asociado a diferentes satélites y sensores de la serie Landsat (TM, ETM+ OLI y OLI2), es necesario efectuar una armonización previa de los datos a fin de establecer criterios de calibración y ajuste que permitan validar la metodología (Li et al 2013, Roy et al 2016). Si bien satélites Landsat de la serie 5 TM y 7 ETM+ son similares en su resolución espectral<sup>1</sup>, es necesario tener en consideración que el satélite Landsat 7 (LS7) desde el 31 de mayo de 2003, posee errores de “bando”<sup>2</sup> que imposibilitan la correcta armonización. Lo anterior se reporta, para un caso aplicado al estudio de glaciares en Chile, DGA (2011), donde se menciona explícitamente que imágenes posteriores al 2003 muestran errores de bando que pueden sesgar los resultados (Figura 1-4). Así, resulta clave efectuar un control de calidad sobre los datos recuperados de imágenes satelitales, a modo de asegurar la coherencia espacio-temporal entre las observaciones derivadas de un mismo producto y otros complementarios (e.g., diferentes misiones Landsat).

1 Número y ancho de bandas RGB e IR

2 Error de bando: franja de aproximadamente 210 m de inexistencia de datos sobre la imagen satelital.





### Error de bandeo en Landsat 7 Salar de Coposa

Se comprueba la existencia de errores de bandeo a partir del año 2003, que cuantitativamente se traduce en la inexistencia de datos en los 4 sistemas analizados. Este bandeo<sup>4</sup> de sensor es dinámico, por lo que no siempre se ubica espacialmente en la misma zona, aumentando así la incertidumbre de la pérdida de información tele detectada. Este error se ejemplifica espacialmente en las Figura 1-5 y Figura 1-6.

Es importante destacar que la SMA asume como solución a este problema el fusionar imágenes a nivel trimestral, a fin de suplir el error dinámico de bandeo, obteniendo una mediana de tres meses representativos de este periodo. Frente a ello, se evidencia que no todos los trimestres poseen la misma muestra de imágenes, y esta puede variar entre 6 imágenes (existencia total de imágenes libres de nubes por trimestre) y 1 imagen (una imagen disponible sin nubes por trimestre), siendo este último caso no representativo ni tampoco estadísticamente significativo del periodo de 90 días representado, sesgando así el análisis aún más. No obstante, este no fue el criterio usado en el informe de experto 8 (CMDIC, 2022) ya que este error es subsanado utilizando Landsat 5 y Landsat 8.

---

4 Bandedo o Scanline Errors (SLE's)

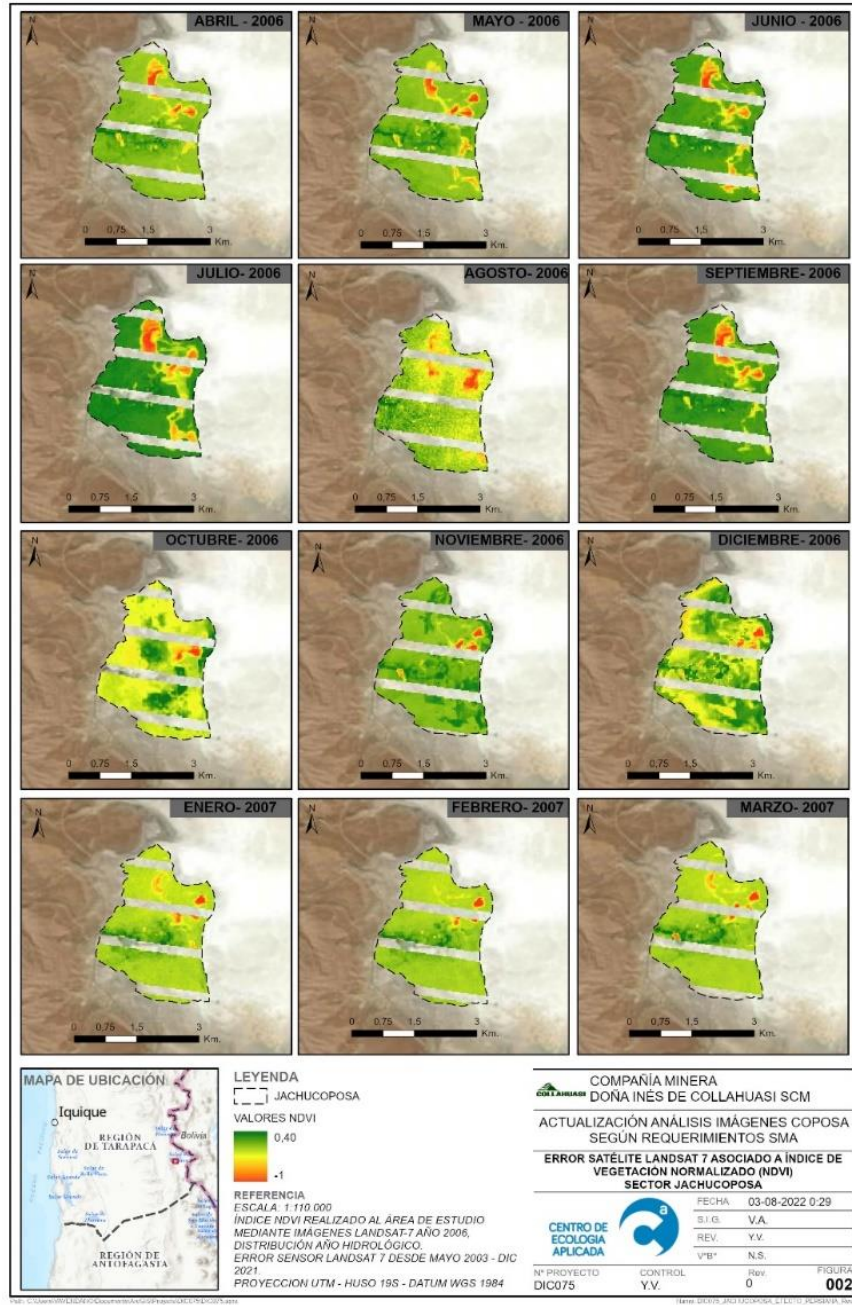


Figura 1-5 Ejemplo de error de sensor de Landsat 7, imágenes históricas de Jachucoposa

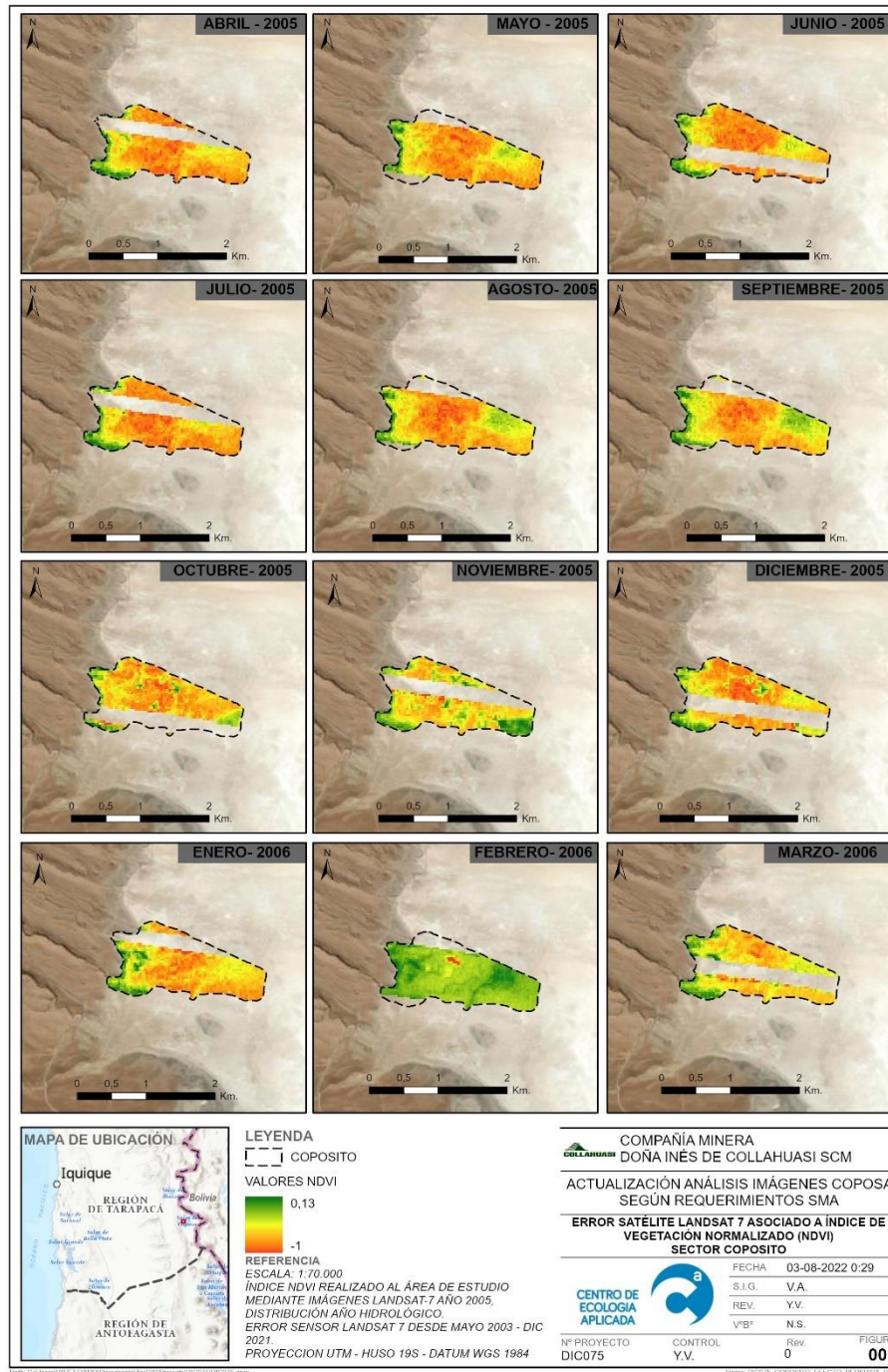


Figura 1-6 Ejemplo de error de sensor de Landsat 7, imágenes históricas de Coposito



Por otro lado, el criterio de agrupamiento trimestral aumenta la incertidumbre, ya que no todos los trimestres poseen la misma muestra (N) de imágenes. (Figura 1-7), sesgando el análisis aún más. En este sentido, el análisis de experto (CMDIC,2022) trabajó los datos imagen por imagen de manera independiente. Pese a ello, este informe, reconstituye lo realizado por la SMA a modo de poder dar respuesta con análisis comparables, lo que no implica que se validen los criterios metodológicos utilizados y descritos en la Res Ex N° 33/2022.

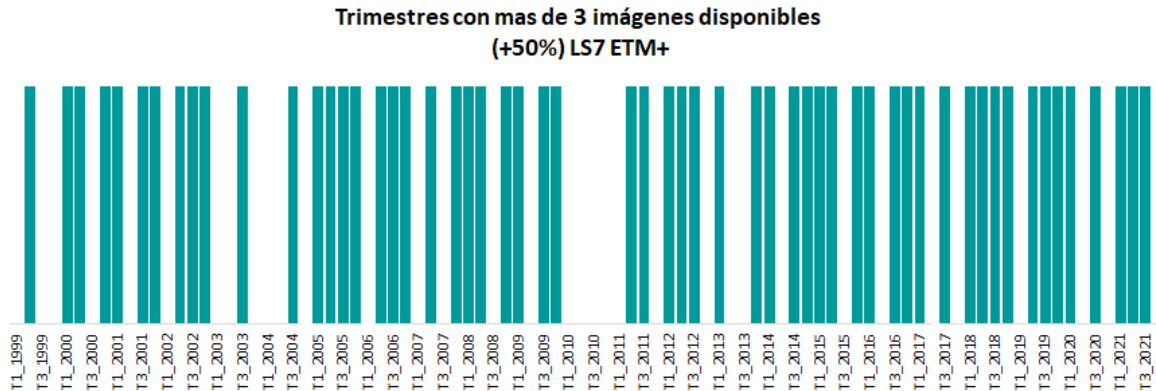


Figura 1-7 las barras expresan la existencia de más del 50% de Información disponible por trimestre. Barra inexistente menos del 50% de información.

No obstante, lo anterior, y a modo de consensuar resultados y definir tendencias comparables entre ambos estudios es que se reanalizan los datos presentados en el informe de experto (CMDIC, 2022) con el criterio metodológico propuesto por el equipo de Geoinformación de la SMA (RES.EX. N°33/2022). De este modo, CMDIC da respuesta, con un análisis de tendencia por sistemas evaluados con datos del satélite Landsat 5 TM<sup>5</sup> 7 ETM<sup>6</sup> colección de reflectancia superficial nivel 2, considerando a su vez iguales valores de corte para filtrar el NDVI e identificar la presencia de vegetación.

### 1.3 Alcance metodológico del NDVI

#### **Acerca de definir superficie con imágenes Landsat**

La utilización de una herramienta de diagnóstico de mediana Resolución (30 m píxel), como las imágenes LANDSAT, posibilita la evaluación histórica de la evolución y tendencia de índices tan importantes como, por ejemplo, NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) o NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada), los que permiten detectar la presencia de determinados tipos cobertura vegetal y agua, respectivamente. Sin embargo, dada la resolución espacial base de Landsat, es poco conservador cuantificar superficies del orden de has. para sistemas tan

<sup>5</sup> ee. ImageCollection "LANDSAT/LT05/C02/T1\_L2" USGS Landsat 5 Level 2, Collection 2, Tier 1

<sup>6</sup> ee. ImageCollection "LANDSAT/LT07/C02/T1\_L2" USGS Landsat 7 Level 2, Collection 2, Tier 1

pequeños como los tratados en esta minuta, ello, debido a que el error del sensor se maximiza conforme se reduce el tamaño del polígono de objeto. Así, el error de magnitud asociado a la incertidumbre del sensor es del orden del 5 al 7,1%, lo que viene a validar que Landsat es una herramienta para **tenencias** dada la extensa data que reconstruyen (1985 – actualidad), pero no para cuantificar superficies de detalle cómo se especifica en la Res Ex N°33/2022. En este sentido, las imágenes de alta resolución, utilizadas en el informe experto (CMDIC,2022) constituyen herramientas idóneas para estos efectos.

### 1.3.1 Criterio para definir umbral de corte

Conforme al alcance del NDVI, NDWI y los criterios para seguimiento de tendencia históricas en vegetación y espejo de agua, se establece que el rango de corte apropiado para este tipo de análisis es  $NDVI \geq 0,1$  y para  $NDWI \geq 0,2$ . En el caso del NDVI, el rango de corte permite discriminar la reflectancia de la clorofila respecto de cualquier otro tipo de suelo como el desnudo, etc. En este sentido y dada la incertidumbre propia del sensor y su resolución radiométrica diferente entre LS5 y LS7 (Teillet et al., 2001, Li et al., 2013, Charder et al 2006), rangos entre 0,0 -0,09 no corresponderían a vegetación. Esta diferencia se expresa en los análisis para cada sistema. Es decir, NDVI es un índice de vegetación y en ningún caso de agua o suelo, ya que en su composición matemática no incorpora ninguna banda espectral relacionada a ese tipo de elementos presentes en el suelo. Así, valores inferiores a 0,1 pueden ser atribuidos a presencia de sal, roca o cualquier otro tipo de suelo (Huete &Liu, 1994; Leprieur et al., 2000).

Respecto del NDWI considerar valores inferiores a 0,2 significa igualmente incorporar superficie que no corresponden a un espejo de agua somero ni profundo. Por lo tanto, incorporar un rango inferior perturba la correcta interpretación de una cobertura con agua.

Si bien, en la Res Ex N°33 se acepta este criterio metodológico se solicita ampliar el umbral mínimo en la construcción de los box plot, con el objeto de visualizar la real variabilidad de las cajas. No obstante, este criterio no permite ver la variabilidad natural estacional de cada sistema. Para verificar esta afirmación se realiza un análisis mensual en un sistema con agua permanente e intermitente:

#### **a.-Jachucoposa NDVI**

El análisis con umbral de corte NDVI en 0,0, no representa la variabilidad mensual del sistema en la mediana de los valores. Esta variabilidad ya reconocida en imágenes de alta resolución queda sesgada al 10% más alto de los datos graficados (P90). (Figura 1-8).

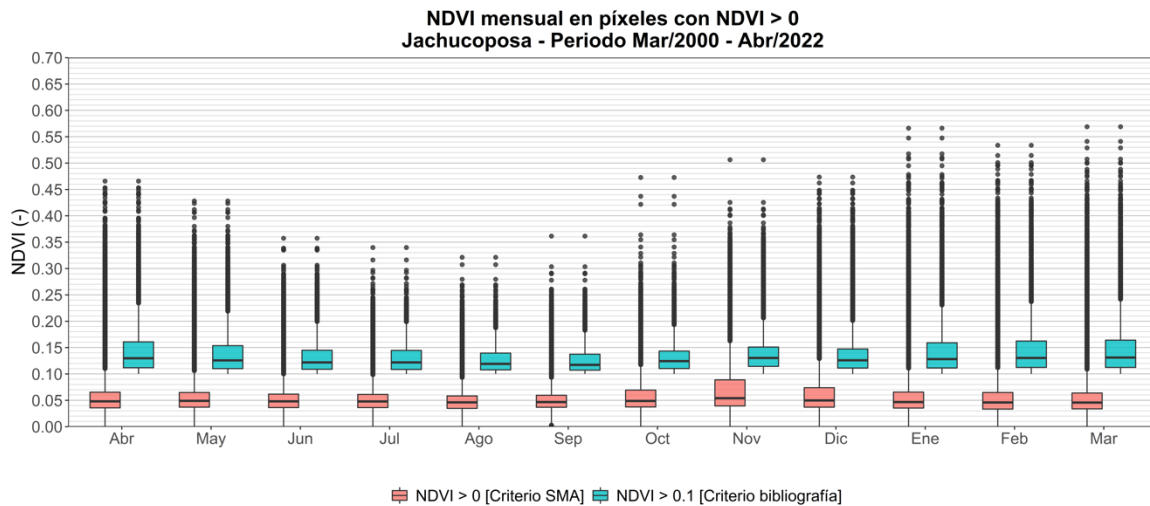


Figura 1-8 NDWI mensual en píxeles con NDWI  $\geq 0$  en sistema Jachucoposa entre marzo 2000-abril 2022

Se debe considerar que el análisis siempre estará sesgado a la falta de información del error de bandeado, el cual, en Jachucoposa se hace menos evidente, debido al tamaño de los sistemas lagunares respecto la superficie de error.

### b.- Jachucoposa NDWI

Al adherir al análisis de espejo de agua, valores NDWI entre 0,0 y 0,19, se compromete un mayor grado de incertidumbre, debido a que el índice NDWI por su composición matemática solo es capaz de discriminar agua (sobre 0,2), de cualquier otro elemento del suelo (bajo 0,2). En este sentido, lo que se interpretaría con valores sobre 0,0 es la variación de = agua + otro componente, el cual, por alcances del método, puede corresponder a cualquier tipo de cobertura.

En el caso de la variabilidad propia del sistema, incorporar el umbral sobre cero impide visualizar la estacionalidad natural del sistema. Ello se justifica debido a que, dado los cambios de superficie existente entre verano e invierno (diferencias sobre el 50% de superficie), la variabilidad debería verse reflejado en la mediana del box plot que representa el 50% de los valores y en ningún caso en los percentiles de P75 y/o P25.

Sin embargo, al considerar el umbral propuesto en la bibliografía científica (NDWI sobre 0,2), se observa que los valores asociados a la mediana exponen la variabilidad propia del sistema (Figura 1-9, validando lo reportados en anteriores informes (CMDIC, 2022).

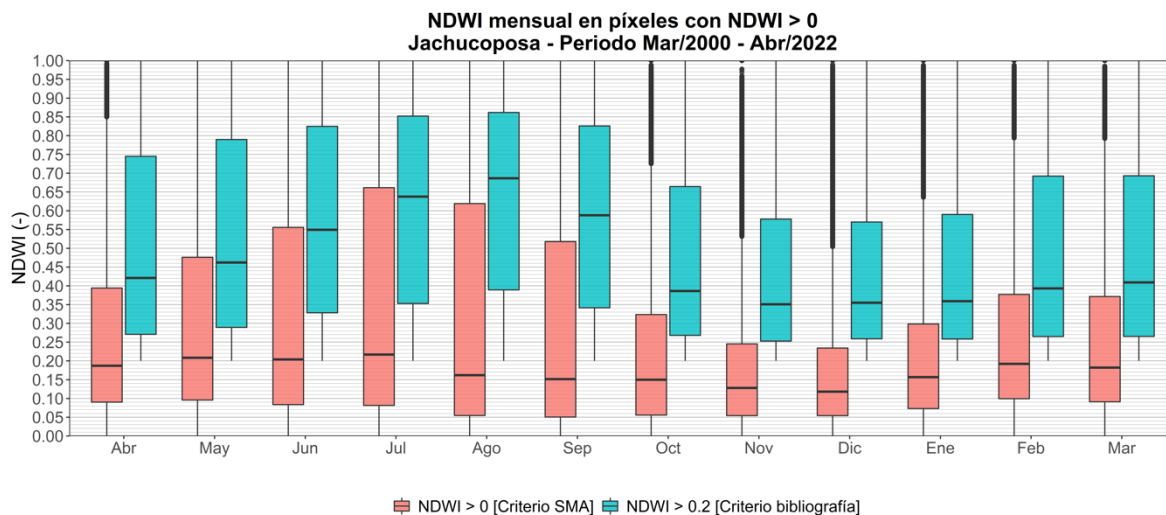


Figura 1-9 NDWI mensual en píxeles con NDWI ≥ 0 en sistema Jachucoposa entre marzo 2000-abril 2022

## 2 El análisis semestral y anual se puede ver en el Anexo

### 2.1 Resumen de criterios establecidos para dar respuesta a la SMA

Pese a que no existe consenso en los supuestos metodológicos de SMA y CMDIC, 2022; en el uso de imágenes de mediana resolución (Landsat) para estimar tendencias y no superficies; el no uso de sensores con errores de bandeo como Landsat 7 (ETM+); en el establecimiento de nuevos polígonos de interés (no argumentados en RES N°33/2022); en la amplitud del umbral de corte de NDVI y NDWI; significancia de N (muestra) de imágenes representativas de un trimestre, CMDIC resuelve realizar un análisis de los efectos generados a consecuencia de las infracciones bajo los supuestos de la autoridad, es decir, no responde a las observaciones basándose en debates metodológicos sino más bien en interpretaciones obtenidos de manera global en el set de datos. Para esto se utilizará las definiciones establecidas por la SMA, de manera de tener resultados comparables bajo el mismo criterio metodológico. Lo anterior permitirá visualizar potenciales efectos asociados a la variabilidad y o tendencia histórica que han experimentado los diferentes sistemas.

Tabla 2-1 Criterios que serán empleados para dar respuesta a Res. Ex N° 33/2022

Criterio metodológico SMA	No apropiado	No apropiado, pero se adopta a criterio SMA	Apropiado
Polígonos de área de estudio		x	
Año Base 1997 (2 imágenes), y comparación con mediana de trimestre 2022 (5 imágenes)	x		
N diferente de imágenes en trimestres en de máxima expresión de vigorosidad		x	

Criterio metodológico SMA	No apropiado	No apropiado, pero se adopta a criterio SMA	Apropiado
Uso de Landsat 7 ETM+		x	
Umbral de corte $\geq 0,0$ NDVI (box plot)		x	
Definición de superficie en % y ha con NDVI		x	
Uso trimestres de máxima expresión de vigorosidad NDVI para representatividad de cada sistema			x

### 3 Vegetación por sistema Humedal

A continuación, se presenta el análisis exploratorio del comportamiento espacio-temporal de la vegetación en el Salar de Coposa a través de series temporales históricas del Índice de Vegetación NDVI. Ello, conforme a los criterios metodológicos establecidos por la SMA y en caso de diferencias metodológicas, estas son expresadas mediante gráficos explicativo a modo de argumentar las diferencias de alcance que deben ser consideradas según CEA-CMDIC.

#### 3.1 Superficie vegetacional

Aquí se manifiesta el criterio de comparación para obtener el valor neto de variación por ecosistema. En el caso de la SMA se evalúa un primer tramo previo a la captación de agua de parte de CMDIC como la mediana entre 2 imágenes disponibles del año 1997. Por otra parte, este valor es comparado con un tercer tramo asociado a la temporalidad de los hechos infraccionales (2008-2022) donde este último año se considera un valor puntual de recuperación, de la resta de ambos valores se estima la variación neta de vegetación por sistema.

Por otro lado, el periodo comprendido entre 1985 y 1997 es considerado por la SMA como un periodo base sin intervención, considerando este tramo como referencia para luego restar lo estimado al año 2008 y el 2022. No obstante, es relevante considerar que en este periodo (1985-1997) existe un claro decrecimiento de superficie vegetacional observada en todos los sistemas (Figura 3-1), el cual respondería a influencias meteorológicas y/o climáticos locales observados también en los gráficos de box plot, es decir, temperatura y precipitación (Figura 3-6 y Figura 3-7) ya que hasta 1997 Collahuasi no comenzaba a bombear desde Jachucoposa. En este sentido ambas variables son analizadas e incorporadas como corrección a los posibles efectos negativos observados.

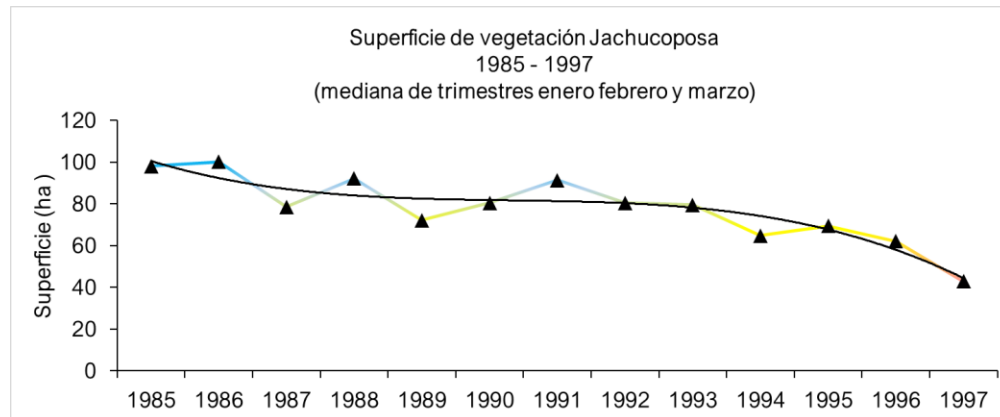


Figura 3-1 Ejemplo de mediana de tendencia anual a la disminución en periodo sin intervención (Jachucoposa)

### 3.2 Tendencias climáticas y su influencia en superficie de vegetalional

Para incluir en el análisis de variabilidad de superficie vegetalional, se analiza la influencia climática en el área de interés. A continuación, se detalla la metodología empleada para el estudio de tendencias climáticas en el periodo 1979-2021 y su correlación respecto a cambios en la superficie vegetalional y/o lagunar de los sistemas Coposito, Jachucoposa, San Pablo y Tankatankani. Asimismo, apoyados en técnicas de modelación estadística, se construye un modelo de regresión lineal múltiple (MLR por sus siglas en inglés) para analizar la sensibilidad de los sistemas respecto a cambios vinculados principalmente a la precipitación y temperatura.

#### 3.2.1 Producto CR2MET v2.0 y su comparación respecto a otros productos de precipitación disponibles en la literatura

El análisis de tendencias climáticas se realizó utilizando como referencia el producto CR2MET v2.0, disponible de manera gratuita para su descarga en el sitio web del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Este producto, que se basa en observaciones locales, satelitales y regresiones lineales múltiples respecto a variables de gran escala derivadas del reanálisis atmosférico ERA5 (C3S, 2017), entrega información diaria de precipitación y temperatura extremas (i.e., máxima y mínima) en el periodo 1979-2021, distribuida en una grilla regular de 0,05° latitud-longitud. Así, se cuenta con información meteorológica continua en el tiempo y espacialmente distribuida, lo cual permite mitigar, en cierto grado, la escasez de información meteorológica en el país y, en particular, en la zona de interés. Para mayor información del producto CR2MET v2.0 se recomienda al lector las publicaciones de Álvarez-Garretón et al. (2018), Boisier et al. (2018) y las publicaciones realizadas en el contexto del proyecto “Actualización del Balance Hídrico Nacional” (DGA, 2019a, 2019b, 2018, 2017).

A modo de verificar el desempeño de CR2MET v2.0 en la zona de interés y, adicionalmente, contrastarlo con otros productos de precipitación disponibles en la literatura, se comparan las estimaciones de precipitación anual y mensual respecto a la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio, la cual corresponde a la estación Coposa (código: C01700009). Los datos de

precipitación mensual, tanto de la estación como de los productos, son descargados desde el explorador de precipitaciones Mawün (<https://mawun.cr2.cl/>). Con estos datos, se calcula la diferencia de precipitación mensual, para luego realizar gráficos tipo *boxplot* con los resultados anuales (Figura 3-2) y mensuales (Figura 3-3). Cabe mencionar que, para efectos de la comparación gráfica, condicionados por los registros en la estación Coposa se seleccionó el subperiodo de mayor frecuencia de datos en el periodo 1979-2021.

En ambos gráficos se observa que los productos que tienen una menor diferencia con respecto a los datos medidos por la estación Coposa son CHIRPS, CR2MET y ERA5, por lo que el resto de ellos quedan inmediatamente descartado. El producto ERA5 posee una resolución espacial de aproximadamente 0,25° latitud-longitud (~25x25 km en la zona central), por lo que se descarta tomando en cuenta la escala que define a los sistemas y que los productos CHIRPS y CR2MET entregan una resolución más fina (0,05° latitud-longitud).

Además de la resolución espacial, CHIRPS y CR2MET comparten una extensión y resolución temporal similar, con CHIRPS entregando valores diarios desde 1982 hasta el presente y CR2MET desde 1979. Sin embargo, el producto CR2MET, a diferencia de CHIRPS, es un producto nacional que ha sido validado por diferentes estudios en Chile continental como, por ejemplo, el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2019a, 2019b, 2018, 2017) y ARClm (Pica-Téllez et al., 2020). Adicionalmente, CR2MET tiene una base observacional local y lo acompaña un producto de temperaturas extremas que, por construcción, es consistente con el producto de precipitaciones (Figura 3-2 y Figura 3-3). Considerando lo anterior, se opta por la utilización del producto grillado CR2MET como representativo de los patrones climáticos de Chile continental y, en particular, de la zona de estudio.

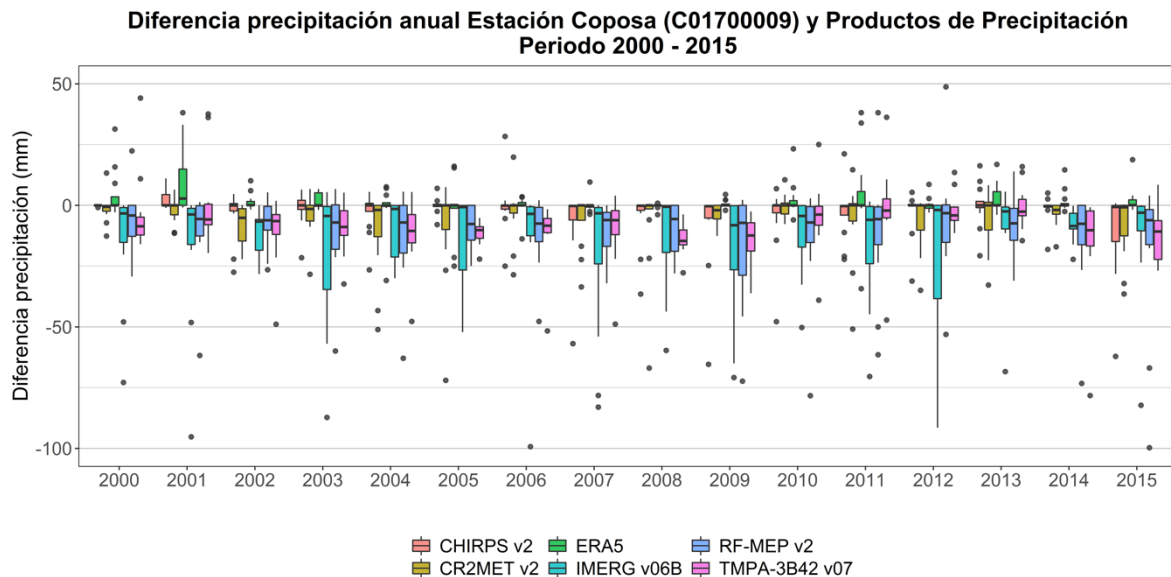


Figura 3-2: Serie anual de diferencia de precipitación.

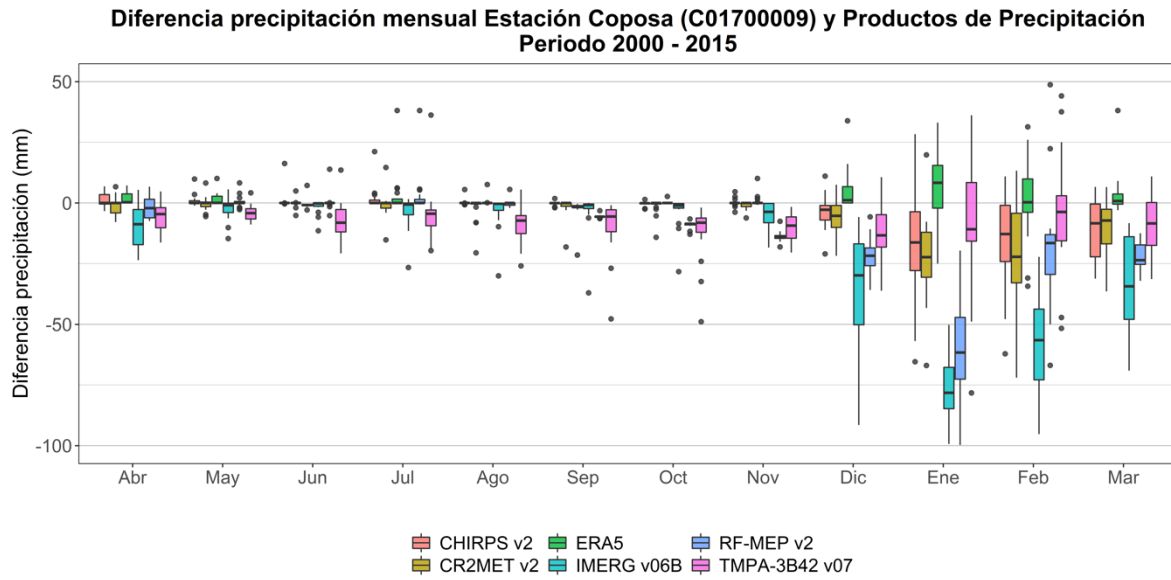


Figura 3-3: Serie estacional de diferencia de precipitación.



### 3.2.2 Análisis de tendencias climáticas en el periodo histórico 1979-2021

Para la obtención de tendencia climáticas, en primera instancia se analiza la estacionariedad de la serie de datos de CR2MET para cada sistema en estudio. Para ello, se agrega mensualmente la precipitación (P) y temperatura (T) de la serie, para luego descomponer, bajo un enfoque aditivo, los datos originales en sus componentes de tendencia, estacionalidad y residuo o componente aleatoria de la serie. A modo de ejemplo (análogo para el resto de los casos de estudio), a continuación, se muestran de manera gráfica los resultados obtenidos para el sistema Coposito (Figura 3-4 y Figura 3-4):

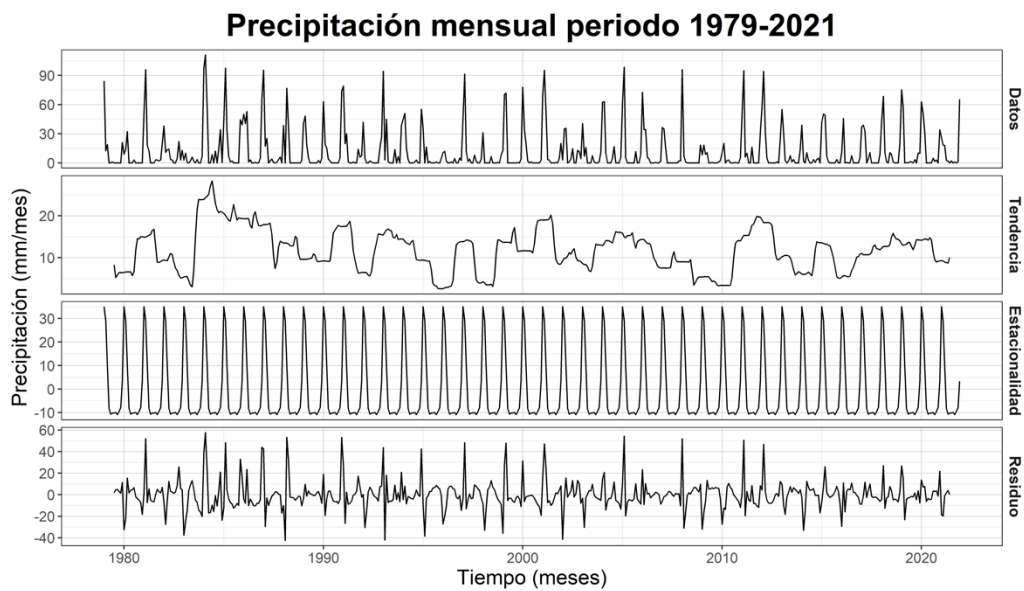


Figura 3-4: Descomposición de la precipitación mensual, sistema Coposito.

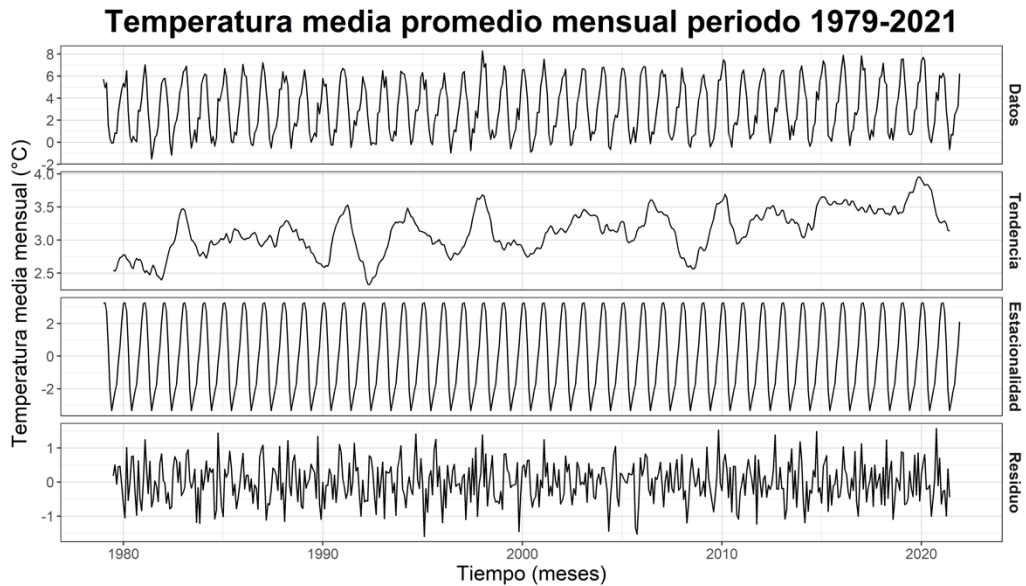


Figura 3-5: Descomposición de la temperatura media mensual promedio, sistema Cposito.

La Figura 3-4 y Figura 3-5 muestran una marcada estacionalidad con valores máximos en los meses de verano (i.e., fines de diciembre/enero a marzo), mientras que los ciclos de tendencia solo muestran una trayectoria creciente para el caso de la temperatura. Para el caso de la precipitación, si bien se aprecia un ciclo de tendencia de 10-15 años (aumenta y disminuye en forma cíclica), el potencial modulado, no marca un patrón creciente o decreciente que permita concluir sobre la presencia de una tendencia sistemática. En forma complementaria a la descomposición estadística de las series de valores mensuales, se presenta la curva de variación estacional (CVE) de precipitación (Figura 3-6) y temperatura (Figura 3-7), las cuales reafirman el hallazgo de un patrón estacional centrado entre los meses de diciembre a marzo.

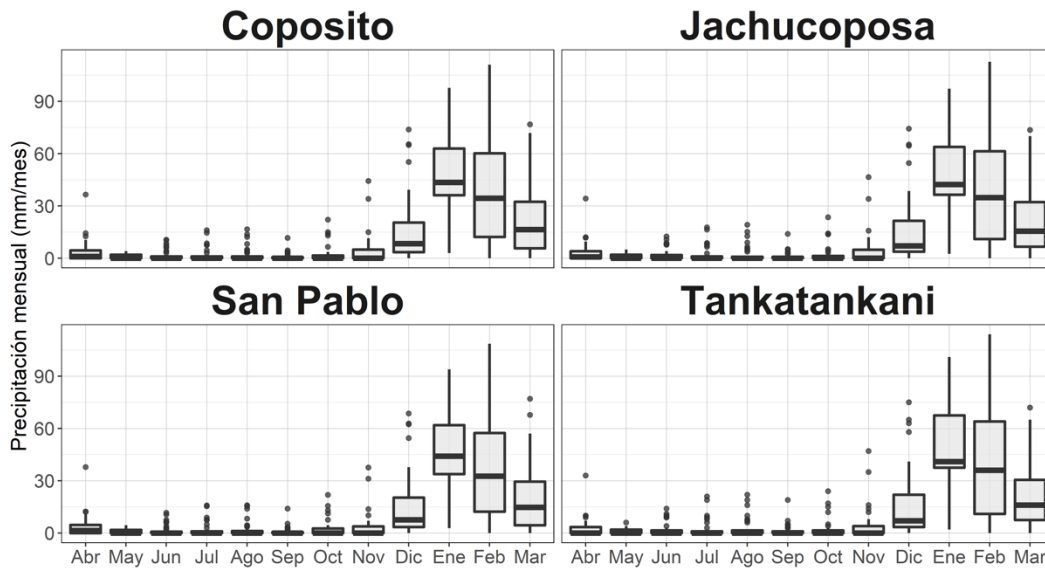


Figura 3-6: Curva de variación estacional de la precipitación para los cuatro salares de estudio.

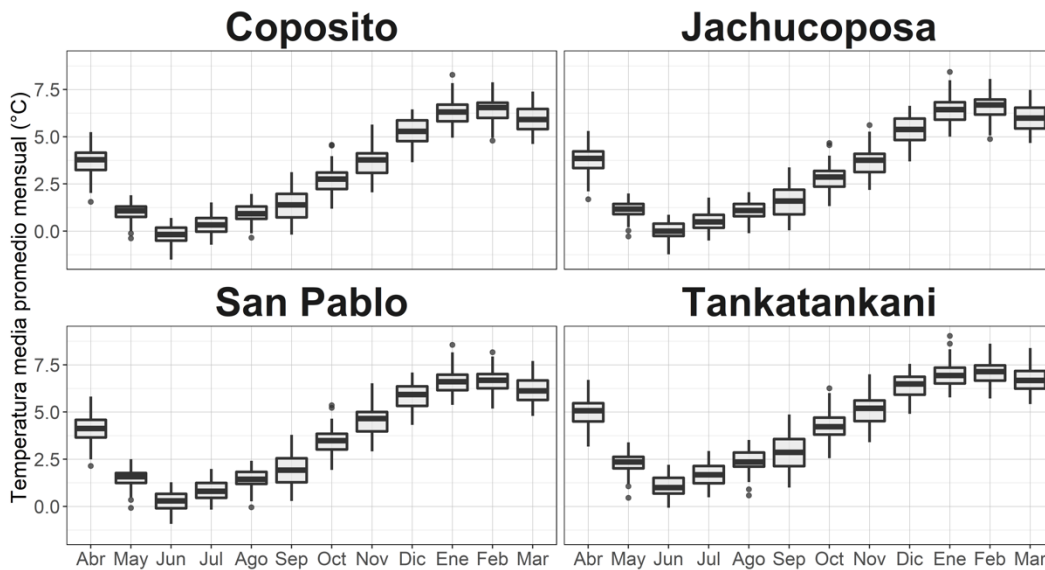


Figura 3-7: Curva de variación estacional de la temperatura media para los cuatro salares de estudio.

Resulta importante notar que, para el caso de la precipitación, se observa una alta dispersión de los datos en los meses desde diciembre a marzo, lo cual se evidencia en los cuatro sistemas. Por su parte, la temperatura tiene baja dispersión mensual durante todo el año.

Adicionalmente, se calculan las agregaciones trimestrales, semestrales y anuales de los datos, las cuales se presentan en el anexo digital denominado “Series\_meteorologicas\_1979\_2021”. La serie de valores anuales se grafica acompañada de un ajuste lineal para ilustrar potenciales tendencias en cada zona de estudio. Los gráficos para cada variable se muestran a continuación (Figura 3-8y Figura 3-9):

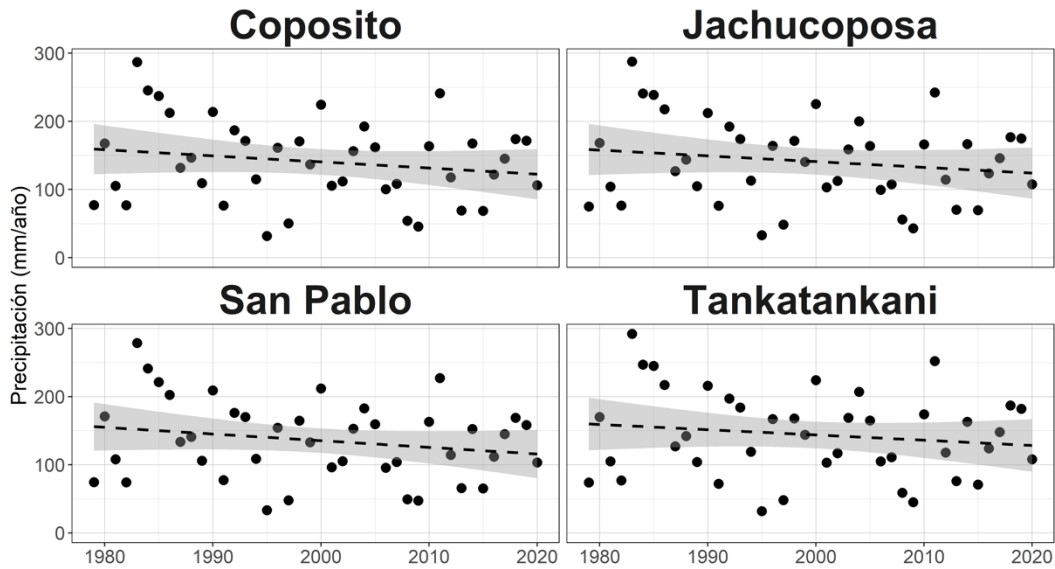


Figura 3-8: Serie de precipitación anual (puntos) y su tendencia (línea segmentada y zona gris).

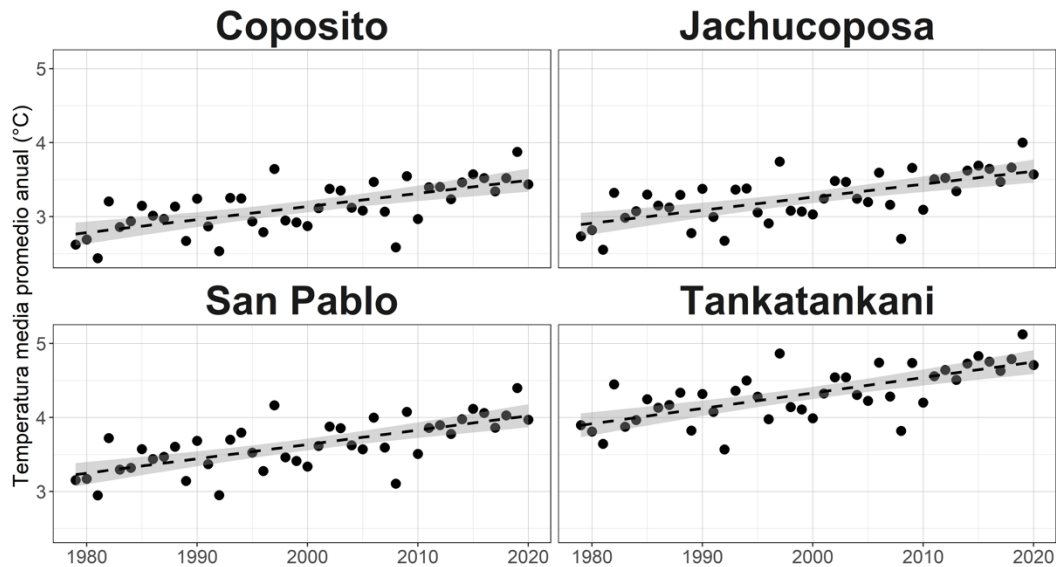


Figura 3-9: Serie de temperatura media anual (puntos) y su tendencia (línea segmentada y zona gris).

La Figura 3-8 y Figura 3-9 muestran un comportamiento linealmente decreciente y creciente para la precipitación y temperatura respectivamente. Para evaluar la significancia estadística de las tendencias, se aplican las pruebas de Mann-Kendall y pendiente de Sen, los cuales buscan determinar si existe una tendencia significativa en los datos. El test de Mann-Kendall, por una parte, propone la hipótesis nula de que no hay tendencia y, mediante una metodología basada en la comparación en orden secuencial entre los valores de la serie, obtiene un valor para el que la hipótesis nula es aceptada si es igual a 0 a un nivel de significancia dado. Por su parte, la prueba de Sen estima los cambios en el tiempo de la pendiente para cada par de puntos de una serie cuando esta tiene tendencia lineal; así, la mediana de los cambios se denomina pendiente de Sen y es utilizada para detectar tendencia en los datos. En este caso, para ambas pruebas estadísticas se definió una significancia del 5%. Los resultados obtenidos de las pruebas estadísticas para cada sistema y variable se resumen en la Tabla 3-1, donde se observa que en el caso de la precipitación si bien se ratifica la presencia de una tendencia decreciente (valores negativos de Mann-Kendall y Sen) con una razón de cambio de entre 6,7 y 8,4 mm/década, estos no son estadísticamente significativos ( $p$ -valor > 5%; i.e., se rechaza la hipótesis nula de la prueba estadística). Para la temperatura media anual se observa una significativa tendencia creciente ( $p$ -valor < 5%), la cual, según la pendiente de Sen estimada, da cuenta de un aumento de 0,2°C/década.

Tabla 3-1: Resultados de las pruebas estadísticas aplicadas a las series anuales de precipitación y temperatura media.

Sistema	Test	Precipitación		Temperatura	
		Valor Test	p-valor	Valor Test	p-valor
Coposito	Mann-Kendall	-0,10	36%	0,47	0%

Sistema	Test	Precipitación		Temperatura	
		Valor Test	p-valor	Valor Test	p-valor
	Pendiente de Sen	-0,79	36%	0,02	0%
Jachucoposa	Mann-Kendall	-0,09	39%	0,48	0%
	Pendiente de Sen	-0,78	39%	0,02	0%
San Pablo	Mann-Kendall	-0,14	19%	0,50	0%
	Pendiente de Sen	-0,84	19%	0,02	0%
Tankatankani	Mann-Kendall	-0,10	38%	0,51	0%
	Pendiente de Sen	-0,67	38%	0,02	0%

### 3.2.3 Relación entre superficies derivadas mediante índices NDVI y variables meteorológicas (P y T)

Para estudiar la relación entre las superficies vegetacionales de los diferentes sistemas, estimadas a través del índice NDVI derivado de los satélites Landsat (LS), y las series de precipitación y temperatura en el periodo 1979-2021 derivadas de CR2MET v2.0, se realiza un análisis exploratorio en búsqueda de correlaciones entre ambas variables (i.e., superficie y serie meteorológica). Las series de superficies en el periodo 1985-2021 se estiman a partir de la combinación de las imágenes recuperadas de las misiones Landsat5 (LS5), Landsat7 (LS7) y Landsat8 (LS8) según:

1. LS5-LS8
2. LS7
3. LS5-LS7-LS8
4. LS5-LS7

Las superficies de interés se correlacionan con la precipitación y temperatura estimada para cada sistema. Así, se identifica la fecha de cada observación satelital y, para cada una de ellas se calcula la precipitación y temperatura positiva (i.e.,  $T > 0^{\circ}\text{C}$ ) acumulada en los N días previos al registro satelital. Con esto, se calcula el coeficiente de determinación, o  $R^2$ , para los cuatro sistemas en estudio y tomando como referencia las superficies estimadas, como se listó anteriormente, a partir de la combinación de imágenes Landsat recuperadas de diferentes misiones para extender el periodo observacional. Asimismo, se identifica la cantidad de días transcurridos desde la última precipitación, previa a la captura de la imagen satelital. Los gráficos obtenidos para cada índice y variable derivada de la meteorología se muestran a continuación:

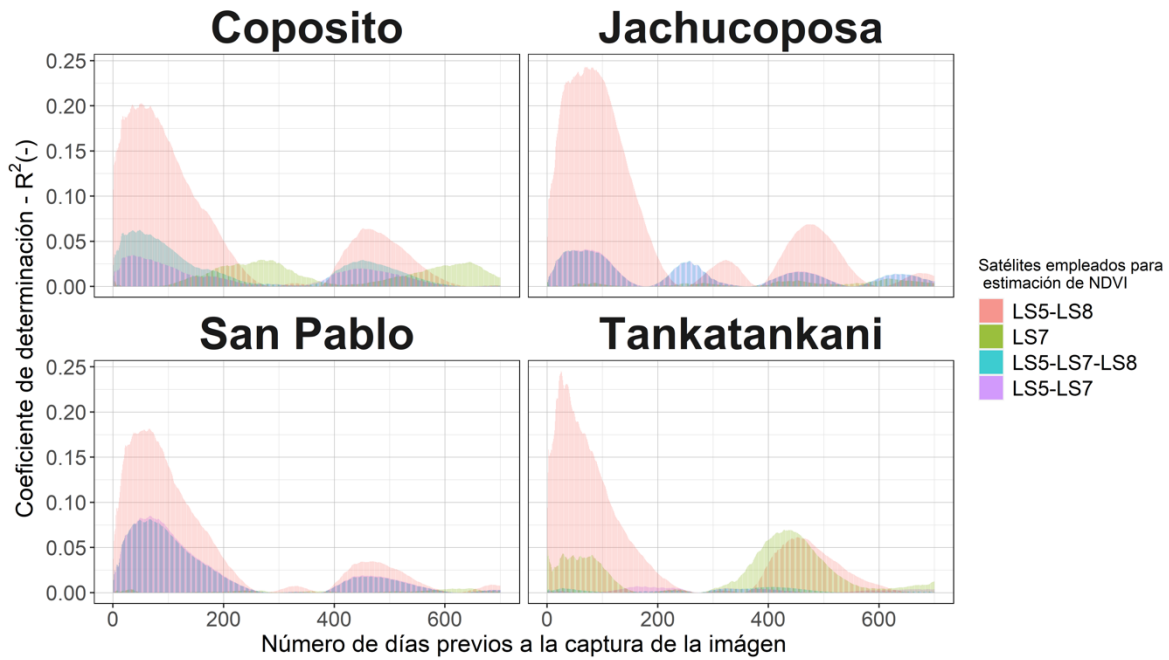


Figura 3-10: Coeficiente de determinación entre la precipitación acumulada previa a la captura de imagen satelital y la superficie vegetal estimada a partir del índice NDVI. Periodo 1985-2021.

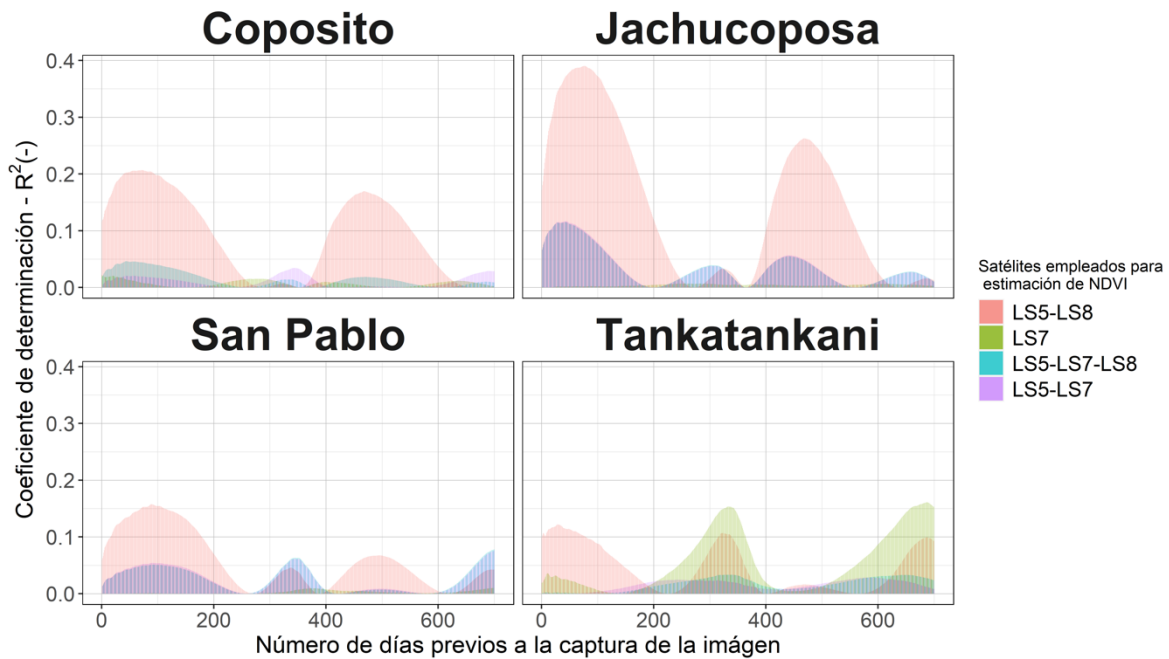


Figura 3-11: Coeficiente de determinación entre la temperatura media positiva acumulada previa a la captura de imagen satelital y la superficie vegetal estimada a partir del índice NDVI. Periodo 1985-2021.

En términos prácticos, la Figura 3-10 y Figura 3-11 dan cuenta de la proporción de la varianza total de las superficies vegetacionales que se puede explicar mediante una regresión lineal respecto a precipitación acumulada los días previos a la observación de referencia y la temperatura positiva acumulada los días previos a la misma respectivamente. Así, cuando más cerca del 100% se ubique el valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), mayor ajuste existirá entre las variables. Por el contrario, valores cercanos a 0% darán cuenta de un nulo nivel de ajuste lineal. En el caso particular de los resultados presentados, si se observa, por ejemplo, las estimaciones derivadas de LS5-LS8 se tiene que la precipitación acumulada explica entre un 18% y 25% de la varianza de la superficie dependiendo del sistema en estudio, mientras que la temperatura positiva acumulada explica de manera individual entre un 12% y 38% dependiendo del sistema.

En forma complementaria, la Tabla 3-2 resume las correlaciones, y días previos asociados para el caso de las precipitaciones y temperaturas positivas acumuladas, que recuperan el máximo coeficiente de determinación para cada sistema y configuración de productos. Asimismo, se muestra la correlación entre la superficie y la cantidad de días transcurridos desde la última precipitación. De allí se desprende que, en general, salvo para la temperatura acumulada en Tankatankani, las mayores correlaciones absolutas (i.e., omitiendo el signo de la correlación) se recuperan al utilizar la serie de valores derivados de LS5-LS8. Cabe mencionar que las correlaciones se presentan a través del coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), el cual varía entre -1 y 1 y cuantifica el grado de asociación lineal entre dos variables. Así, un cercano a -1 indica que dos variables varían linealmente en forma inversa (e.g., una aumenta y la otra disminuye), mientras que un valor cercano a 1 indica una relación lineal directa (e.g., una aumenta y la otra aumenta). Un valor cercano o igual a 0 da cuenta de una relación que no se puede explicar, al menos, en términos lineales (i.e.,  $f(x) = m \cdot x + n$ ).

Tabla 3-2: Resumen de casos que permiten recuperar el máximo coeficiente de correlación de Pearson por sistema y combinación de productos satelitales empleado para estimar la superficie vegetal.

Sistema	Producto	Prec. Acumulada		Temp. Acumulada		Última Prec.
		r	Días previos	r	Días previos	Días previos
Coposito	LS5-LS8	0.45	52	-0.45	73	-0.35
	LS7	0.17	267	0.15	1	-0.01
	LS5-LS7-LS8	0.25	48	-0.22	44	-0.18
	LS5-LS7	0.19	35	0.19	342	-0.14
Jachucoposa	LS5-LS8	0.49	69	-0.62	78	-0.47
	LS7	-0.09	617	0.08	257	-0.03
	LS5-LS7-LS8	0.20	69	-0.34	43	-0.17
	LS5-LS7	0.20	69	-0.34	43	-0.17
San Pablo	LS5-LS8	0.43	67	-0.40	90	-0.35



Sistema	Producto	Prec. Acumulada		Temp. Acumulada		Última Prec.
		r	Días previos	r	Días previos	Días previos
	LS7	0.07	644	0.11	730	-0.07
	LS5-LS7-LS8	0.29	67	0.28	703	-0.16
	LS5-LS7	0.29	67	0.28	703	-0.16
Tankatankani	LS5-LS8	0.50	26	-0.35	29	-0.33
	LS7	0.26	429	0.40	687	-0.13
	LS5-LS7-LS8	0.08	410	0.18	338	-0.08
	LS5-LS7	-0.08	162	0.17	589	-0.06

Dentro de los resultados presentados en la Tabla 3-2 resulta interesante notar que, incluir LS7 dentro del conjunto de productos empleados para obtener la serie de superficies vegetacionales incluye un cierto “ruido” a las correlaciones, llegando incluso a invertir los signos (*e.g.*, sistema San Pablo pasa de -0,4 al usar LS5-LS8 a valores positivos cuando se incluye LS7). En términos prácticos, se puede mencionar que dicho ruido conduce a resultados que, incluso, escapan a la dinámica real del sistema pues, por ejemplo, resulta contra intuitivo pensar que un aumento en la temperatura positiva acumulada traerá consigo un aumento en la superficie vegetal (*i.e.*, correlación positiva). Asimismo, al analizar la máxima correlación de Precipitación acumulada ( $P_{acc}$ ) y la superficie vegetal, se desprende que incluir LS7 en la muestra reporta valores que incluso sobrepasan el año (*i.e.*, el sistema tendría una memoria climática de 1 año), lo cual dista de la dinámica y las escalas temporales que caracterizan los sistemas vegetacionales estudiados y los mecanismos que condicionan su variabilidad inter e intra-anual.

Ejemplo de lo anterior se observa si consideramos la precipitación acumulada en Coposito, LS7 recupera la máxima correlación al considerar 267 previos a la captura de la imagen satelital, es decir, reporta que la superficie vegetal estará condicionada a lo que ocurre en los 8-9 meses previos al análisis. Lo anterior dista de lo reportado en la combinación LS5-LS8, donde la correlación se maximiza a los 52 días previos (*i.e.*, 1-2 meses), lo cual resulta ser un valor más realista que se condice con la dinámica del sistema de estudio (registrados y reportados históricamente por CMDIC con datos de terreno) y de concordancia con los patrones climáticos estacionales reportados en la Figura 3-6 y Figura 3-7.

### 3.2.4 Modelo de regresión lineal múltiple para la estimación de superficie

Para estudiar la variabilidad de los sistemas en estudio condicionada únicamente por componentes meteorológicas, se propone ajustar modelos de regresión lineal múltiple (MLR) que permitan vincular series derivadas de la meteorología característica de la zona de estudio y la superficie vegetal estimada mediante el índice NDVI en el periodo 1985-2021. Dichas estimaciones de superficie provienen de imágenes satelitales LS5 y LS8. Es importante reiterar que Landsat 7 (LS7),

y cualquier combinación que incluya imágenes derivadas de esta misión, no es considerado en este análisis tomando en cuenta que la maximización de las correlaciones lineales recuperadas con estos datos (ver Tabla 3-2) reportan valores que no se condicen con la dinámica natural observada por CMDIC en los sistemas en estudio ni con los patrones estacionales característicos del dominio.

En particular, el modelo propuesto se basa en el uso de la precipitación acumulada los días anteriores a la adquisición de la imagen satelital y su símil de temperatura positiva acumulada<sup>7</sup>, ambos registros estimados a partir del producto CR2MET v2.0, como predictores (*i.e.*, datos de entrada), a lo cual se suma la cantidad de días transcurridos desde la última precipitación. Para validar el uso de estos predictores, en primera instancia se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson para analizar la correlación lineal entre predictores y predictando (*i.e.*, lo que se busca estimar). A modo de ejemplo, la Figura 3-12 muestra los resultados obtenidos para la superficie vegetal estimada a partir del índice NDVI para el salar Coposito.

En términos prácticos, las correlaciones de la Figura 3-12 indican una relación directamente proporcional entre la precipitación acumulada los días previos (P\_acc) y la superficie vegetal (Superficie) y una correlación inversa entre dicha variable y la temperatura acumulada (T\_acc) y los días transcurridos desde la última precipitación (días\_secos). Asimismo, se puede concluir que, para el sistema Coposito, la precipitación acumulada permite explicar por si sola el 20% ( $R^2$  de 0.45) de la variabilidad de la superficie vegetal, mientras que la temperatura acumulada un 20% y los días desde la última lluvia un 12%.

---

<sup>7</sup> Los Grados día de Crecimiento (DGC) se miden a partir de la suma media entre las temperaturas mínimas y máximas acumuladas, restándose una temperatura basal de crecimiento necesaria para que una planta entre en actividad fotosintética. (<https://mrcc.purdue.edu/gismaps/info/gddinfo.htm>)

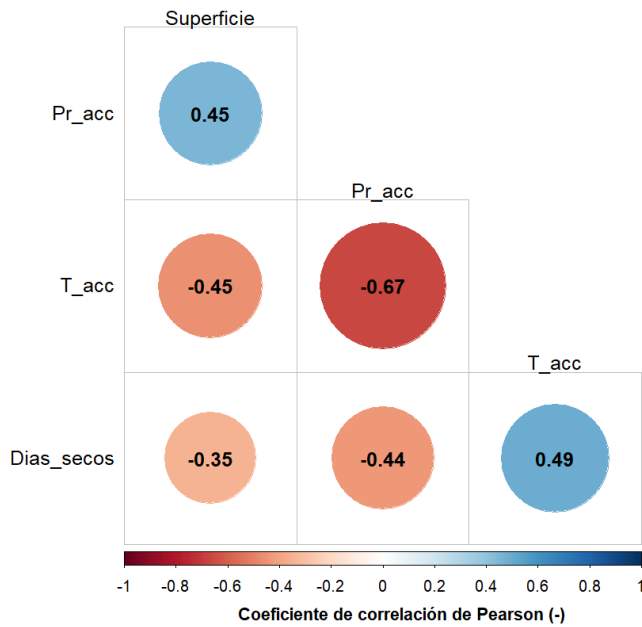


Figura 3-12: Coeficiente de correlación de Pearson entre predictores y predictando. El tamaño de círculo representa la magnitud de la correlación, mientras que el color el signo (rojo valores negativos y azul valores positivos).

Por otra parte, se analiza la normalidad del predictando, debido a que uno de los supuestos base para la construcción de regresiones lineales radica en que el predictando siga una distribución normal. Todos los detalles de consideraciones estadísticas de este análisis se pueden ver en Anexo 6.3.

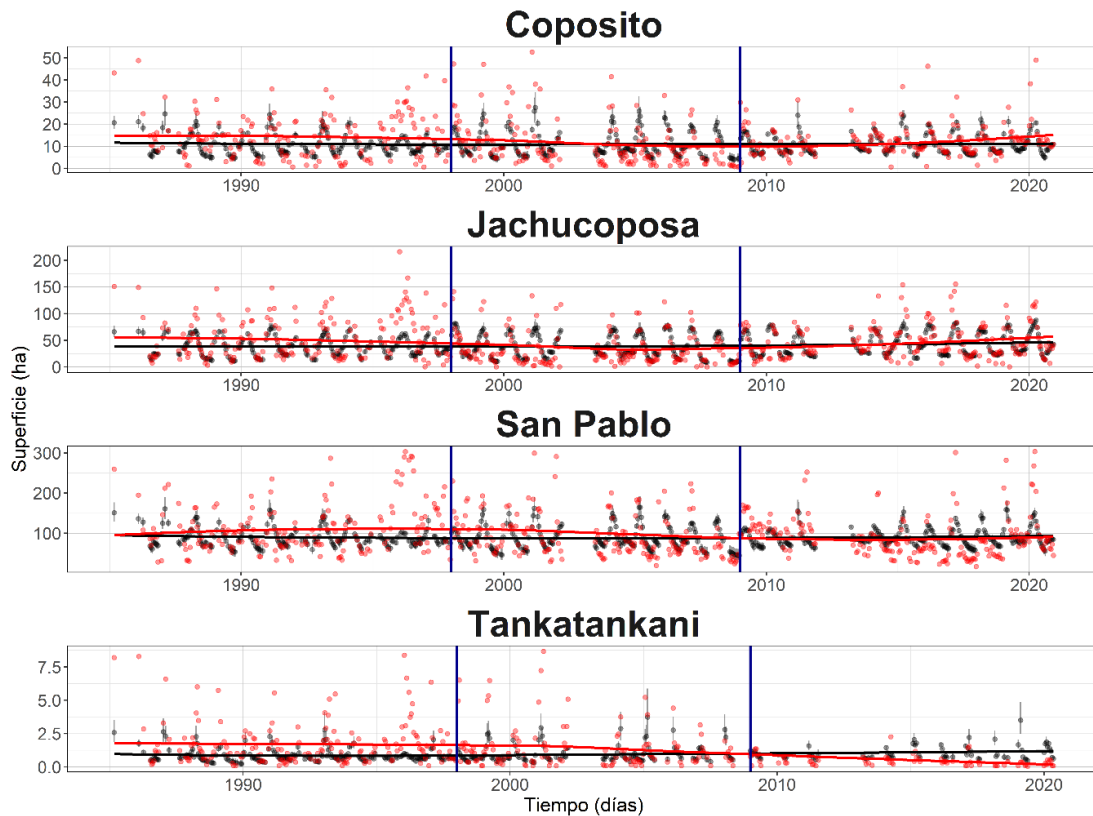


Figura 3-13: Serie de tiempo de superficie vegetal estimada mediante NDVI. Las líneas verticales azules indican el inicio y término del subperiodo comprendido entre el 01-01-1998 y el 31-12-2008. Los puntos rojos corresponden a las estimaciones de superficie derivadas de Landsat (referencia), los puntos grises son la estimación de superficie mediante regresión lineal múltiple (MLR) y las barras de error que acompañan a los puntos grises son el intervalo de confianza al 95% de la estimación. Las líneas continuas rojo y azul representan una suavización de la serie de puntos de referencia y derivados mediante MLR.

En términos de la serie de tiempo de variaciones en la superficie (Figura 3-13), se observa que la serie de referencia muestra una mayor variabilidad a nivel interanual (ver puntos rojos) y en el largo plazo (ver curva suavizada color rojo). Por contrario, el comportamiento estimado a partir de la MLR muestra que, si bien se aprecian patrones estacionales, la variabilidad en el largo plazo es más suave y estable. Lo anterior resulta coherente a la construcción del modelo y a la dependencia directa y lineal respecto a la variabilidad climática. No obstante, se debe tener en consideración que la respuesta de un sistema natural es altamente no lineal y está condicionada por múltiples mecanismos que determinan su estado con el paso de tiempo. Así, se debe recalcar que los modelos propuestos apuntan a explicar, en cierto grado, la variabilidad de los sistemas de interés a partir de información derivada de la meteorología característica.

Tomando como base los MLR ajustados para cada sistema de interés ( ver Anexo 6.3), se estiman los cambios en la superficie por subperiodo de análisis, lo cual se presenta de manera gráfica en la Figura 3-14 y numéricamente en la Tabla 3-3 para la comparación del periodo 1998-2008 respecto al periodo previo 1985-1997, donde a su vez se muestra la diferencia en la mediana de los montos

de precipitación anual en el periodo y la temperatura asociada. De allí se desprende que, en el periodo 1998-2008 existe, en general, una disminución en la mediana de la superficie del periodo respecto al periodo antecedente, el cual se explica, principalmente, por la disminución de la precipitación. El único caso donde se estima un aumento de superficie corresponde a Tankatankani, lo cual se condice con un aumento de la precipitación en ese periodo (1998-2008).

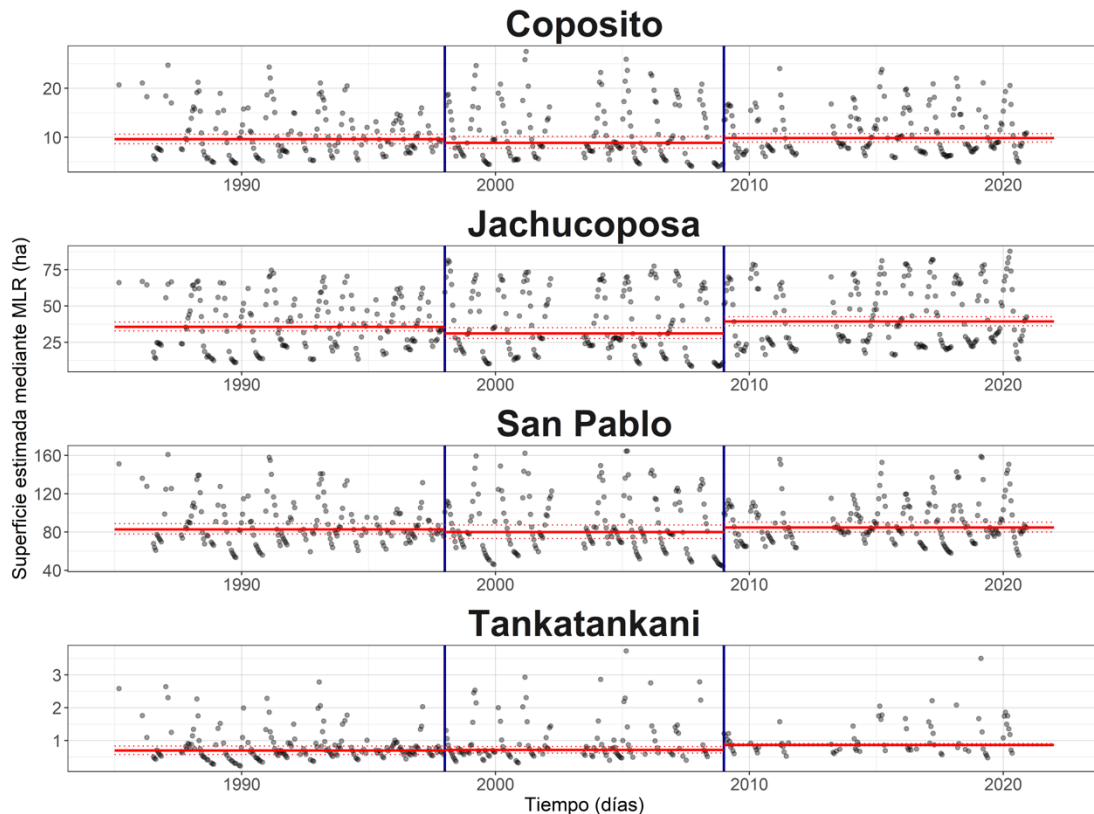


Figura 3-14: Serie de tiempo de superficie vegetal estimada mediante regresión lineal múltiple y predictores de base climática. Las líneas verticales azules indican el inicio y término del subperiodo comprendido entre el 01-01-1998 y el 31-12-2008. Los puntos grises son la estimación de superficie mediante regresión lineal múltiple (MLR). Las líneas horizontales color rojo representan la mediana de la superficie en el periodo, mientras que las líneas segmentadas dan cuenta del intervalo de confianza al 95%.

La Tabla 3-3 da cuenta, a su vez, de la sensibilidad de los sistemas a los cambios en las condiciones climáticas pues, por ejemplo, Jachucoposa reduce su superficie en un ~13% al disminuir en ~2% la precipitación del periodo. Por otro lado, San Pablo, que presenta una disminución cercana al ~6% de la precipitación en el periodo respecto al antecedente, su superficie se reduce en ~3%. Así, considerando los cambios negativos en la superficie de los sistemas (i.e., reducción) se tiene que, los cambios en las condiciones climáticas del periodo 1998-2008 respecto al periodo 1985-1997 podrían explicar el 23,5% de la mediana de la disminución en dicho subperiodo. En forma complementaria, si se consideran todos los cambios (positivos y negativos) las condiciones climáticas del periodo estarían explicando un 20,6% de la mediana de la disminución de superficie.

Tabla 3-3: Resumen del efecto de la variabilidad climática sobre cambios en la superficie vegetal en el periodo 1998-2008 respecto a la línea base de referencia 1985-2007. Se detalla estimación (%) de efecto meteorológico por sistema y sus intervalos de confianza.

Sistema	$\Delta P$ (%)	$\Delta T$ (°C)	Estimación (%)	Límite inferior (%) Intervalo Conf. 95%	Límite superior (%) Intervalo Conf. 95%
Coposito	-6,8	0,07	-7,5	-10,4	-4,1
Jachucoposa	-2,2	0,05	-12,7	-15,9	-10,1
San Pablo	-5,8	0,07	-3,3	-5,9	-1,6
Tankatankani	1,4	0,04	2,9	-1,6	8,1
<b>Total</b>	-	-	<b>-23,5</b>	<b>-34,0</b>	<b>-15,8</b>

### 3.3 Metodología y Resultados de análisis de superficies de humedales bajo lineamientos definido por la SMA.

Con el objetivo de ajustar la metodología a lo propuesto por la SMA en la Res N° 33/2022, CMDIC, decide utilizar el mismo set de datos y/o librería de imágenes utilizada por la SMA, el cual se detalla a continuación.

- 1.- “USGS Landsat 4 Level 2, Collection 2, Tier 1”,
- 2.- “USGS Landsat 5 Level 2, Collection 2, Tier 1”,
- 3.- “USGS Landsat 7 Level 2, Collection 2, Tier 1” y
- 4.- “USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1”

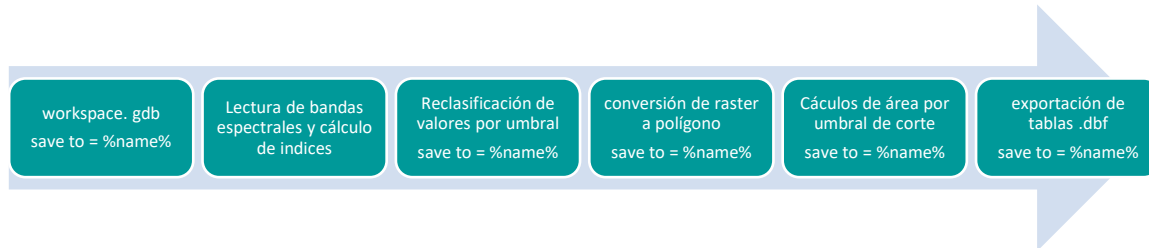
Todos disponibles en

[https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_LT04\\_C02\\_T1\\_L2](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LT04_C02_T1_L2),  
[https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_LT05\\_C02\\_T1\\_L2](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LT05_C02_T1_L2),  
[https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_LE07\\_C02\\_T1\\_L2](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LE07_C02_T1_L2),  
 respectivamente. Es importante indicar que estas imágenes cuentan con preproceso de corrección geométrica atmosférica y radiométrica de reflectancia superficial.

Así, y en función de lo anterior, se utilizaron para el análisis 649 imágenes, correspondientes a 2 imágenes del satélite Landsat 4, 314 imágenes del satélite Landsat 5 y 334 imágenes del satélite Landsat 7, entre el 5 de mayo de 1985 y el 31 de marzo de 2022, donde a diferencia de la SMA en el último periodo de enero marzo de 2022 solo se pudieron rescatar 2 imágenes LS7 que cumplieron los supuestos de discriminación de nubosidad menor al 30% y máscara de nube.

Para evitar otro tipo de error no detectable en el código fuente, se realizó de igual forma una inspección visual a cada una de las imágenes utilizadas.

El procesamiento y post-procesamiento se realiza mediante la librería de arcpy del software ArcGIS Pro™ 2.6™ donde se genera un batch de procesamiento en cadena según el siguiente esquema.



La cadena de proceso guarda cada archivo con el nombre de origen de la imagen satelital permitiendo hacer seguimiento en cada paso a nivel de píxel, a fin de tener un archivo espacial y multitemporal.

Pese a no aceptar el supuesto SMA de que 3 o menos imágenes satelitales son representativas de un periodo de 90 días, se utiliza de igual forma dicho criterio para conocer la tendencia general del sistema y exponer resultados comparables. Procesado el set completo de imágenes, se procede a seleccionar un set que maximice la vigorosidad estacional de la vegetación, la cual se da en el trimestre 1 de cada año calendario y/o el trimestre 4 de cada año hidrológico y que para fines prácticos equivale a los meses de enero febrero y marzo.

Junto con lo anterior y conocido el panorama meteorológico y/o climático, se debería considerar como criterio de estimación de superficie, el uso de medianas por tramos y posterior corrección con aplicación de influencia meteorológica en el total de la variación (ha), no obstante, para fines comparativos respecto la RES N° 33/2022, se asume de igual forma el supuesto metodológico de SMA, el cual se basa en:

- Uso de la diferencia de un valor puntual representativo del trimestre (enero febrero y marzo 1997) como línea de base y el uso de un valor final representativo del trimestre enero, febrero y marzo de 2022.
- Uso de la diferencia de un valor puntual representativo del trimestre (enero febrero y marzo 2008) como el año que comienzan las medidas de mitigación y el uso de un valor final representativo del trimestre enero, febrero y marzo de 2022.
- A este supuesto se le debe restar, la corrección con aplicación de influencia meteorológica en el total de la variación (ha).
- Cabe recordar que se elimina la inclusión de Humedal Centro por el registro de campo que da cuenta principalmente de vegetación de tipo zonal, no constituyente de humedal.

Para esta estimación se consideraron años puntuales propuestos por la SMA (Res. Ex. N°33), es decir, periodo base año 1997, periodo con intervención al año 2008 (relacionado con los hechos

infracionales) y periodo sin intervención al año 2022. Así al último valor (2022) se les restó el último valor del año previo a la intervención (1997) y previo a los hechos infraccionales (2008), obteniendo así el resultado de las diferencias de superficie. Al total de la diferencia neta estimada, se le aplicó la corrección meteorológica calculada previamente (-23,5%). Esto tiene como objetivo discriminar los efectos naturales sobre la reducción de superficie vegetal de cada sistema y la variación de origen antrópico. Por otro parte, se evidencia la recuperación de hectáreas de vegetación en la mayoría de los sistemas entre el periodo 2008-2022. Los resultados son expuestos en la Tabla 3-4 (valores positivos representan un aumento en la superficie con vegetación, mientras que valores negativos son representativos de una disminución de la misma).

En comparación del año 2008 -2022 se evidencia un aumento de la vegetación de 28,8 ha en el caso de incorporar el efecto meteorológico, se esperaría que el resultado de incremento de aumento.

Tabla 3-4 Superficie vegetal por sistema en años 1997 y 2022 reconstituyendo metodología SMA y ajuste con variable meteorológica

Jachucoposa			Coposito		
Periodo	mediana de superficie (ha)	N (muestra de trimestres/meses)	Periodo	mediana de superficie (ha)	N (muestra de trimestres/meses)
1997	42.9039	6	1997	7.51	6
2008	32.6998	6	2008	1.55	6
2022	53.4200	6	2022	3.01	6
Efecto neto (2022-1997)	10.52	18	Efecto neto (2022-1997)	-4.50	18
Efecto neto (2022-2008)	20.72	18	Efecto neto (2022-2008)	1.46	18
San Pablo			Tankatankani		
Periodo	mediana de superficie (ha)	N (muestra de trimestres/meses)	Periodo	mediana de superficie (ha)	N (muestra de trimestres/meses)
1997	105.65	6	1997	2.49	6
2008	47.26	6	2008	0.73	6
2022	54.65	6	2022	0.00	6
Efecto neto (2022-1997)	-51.00	18	Efecto neto (2022-1997)	-2.49	18
Efecto neto (2022-2008)	7.40	18	Efecto neto (2022-2008)	-0.73	18
Humedal 1			Humedal centro		



Periodo	mediana de superficie (ha)	N (muestra de trimestres/meses)	Periodo	mediana de superficie (ha)	N (muestra de trimestres/meses)
1997	11.00	6	1997	12.36	6
2008	9.30	6	2008	0.10	6
2022	11.80	6	2022	0.00	6
Efecto neto (2022-1997)	0.80	18	Efecto neto (2022-1997)	-12.36	18
Efecto neto (2022-2008)	2.50	18	Efecto neto (2022-2008)	-0.10	18

Sin efecto meteorológico	Corrección de efecto meteorológico		
Efecto total (ha)	Lim. superior (ha)	medio (ha)	Lim. inferior (ha)
-47.48	-31.34	<b>-36.32</b>	-39.98

Para términos comparativos, se presentan los resultados ya reportados en el informe de experto (CMDIC,2022) basados en criterios como el uso de Landsat 5 y 8, los resultados de SMA utilizando Landsat 7 y la reconstitución del análisis de la RES EX 33 /22 presentada en esta minuta (Tabla 3-5).

Tabla 3-5 Tabla comparativa de resultados analizado por SMA y CMDIC

Sistema	SMA (Res. Ex N° 33 /2022)	Estimado SMA (Res. Ex N° 33 /2022) Δ 2022-2008	Reconstruido <sup>8</sup> CEA en base a Res. Ex N° 33 /2022 (LS5 – LS7) Δ 2022-1997	Reconstruido[1] CEA en base a Res. Ex N° 33 /2022 (LS5 – LS7) Δ 2022-2008	Informe experto CMDIC 2022 (LS5 – LS8c)
Jachucoposa	-25.29	29.88	10.52	20.72	-22.9
Coposito	-5.4	1.44	-4.5	1.46	1.27
San Pablo	-63.45	1.03	-51.0	7.40	-21.3
Tankatankani	-2.43	-0.72	-2.49	-0.73	-2.9
Humedal 1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Humedal centro**	-12.06	-0.18	N/A	N/A	N/A
Total, pérdida y/o ganancia neta	-108.63	31.45	-47.47	28.85	-45.83
Total, con corrección meteorológica	-85.8		-36.3		-35.1

\*\* Sistemas N/A, han sido descartados por no corresponder biológicamente a un humedal.

La principal diferencia de superficie entre los cálculos presentados por la SMA y los expuestos por CMDIC en esta minuta, se ven reflejados en el sistema Jachucoposa, donde CMDIC reconstruye para el año base 1997 un total de 42.9 ha, mientras que SMA describe en Res. Ex. N° 33 /2022 un total de 87,66 ha, teniendo una diferencia de 44.76 ha.

Es importante destacar que como se asume la metodología SMA, en este estudio se respeta la diferencia de años puntuales antes de la intervención (1997) y año final 2022 (enero marzo) y también entre los 2008 - 2022.

### 3.4 Comportamiento histórico sistema lagunar Jachucoposa

Al igual que lo descrito por la SMA, el sistema lagunar Jachucoposa presenta una alta variabilidad estacional, la que responde a periodos pluviales y estivales. Respecto de las diferencias planteadas en la Res. Ex. N°33/2022 entre las aguas someras y profundas por cada trimestre, se presenta un

<sup>8</sup> Se refiere a cartografía “Figura 7. Zonas de interés Salar de Coposa”, la cual se ortorectifica, para estimar la superficie considerada por SMA. No obstante, la figura 9 SMA (Área de análisis dentro de cada zona de interés.), dada sus características de resolución es imposible de replicar.

análisis de tendencias históricas en la Figura 3-15. Cabe destacar que este análisis se realiza en base a los polígonos descritos en el informe de experto (CMDIC,2022, Figura 7), dado que la SMA no explicita en su metodología los polígonos utilizados para la evaluación de sistemas lagunares, lo cual, imposibilita replicar su análisis. No obstante, las tendencias históricas son similares independiente del sensor utilizado (tal como se presenta en la minuta Res. Ex. N°33/2022), por lo que son ejemplificadas trimestralmente a continuación.

En la Figura 3-15 y Figura 6-27 se puede observar que desde el inicio de la extracción en los periodos pluviales y estivales no existe una reducción significativa de las aguas profundas respecto de las someras.

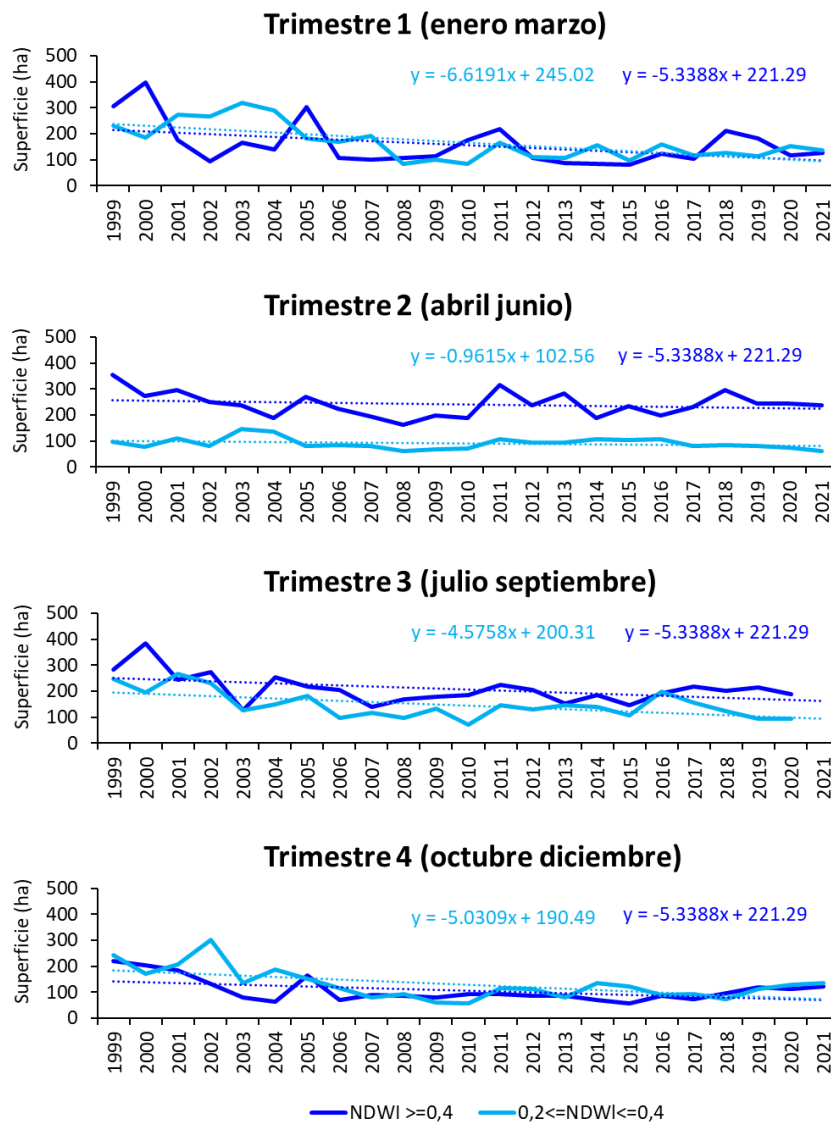


Figura 3-15 Análisis comparativos de aguas profundas y someras en periodos pluviales y estivales desde 1999-2021

Respecto a la Figura 3-15 y Figura 3-16 es importante indicar que los resultados expuestos no indican un cambio a la disminución estadísticamente significativo ( $p$ : no asociado) (ver elipses Anexo 6.4). Pero si, existen cambios puntuales de significancia, como los ocurridos en el trimestre 1 del espejo de agua profundo (NDWI  $\geq 0,4$ , que reflejan un ascenso positivo en el año 2000, mostrando resultados outliers positivos de un conjunto de 95% de confianza. Misma situación ocurre en el trimestre 3 del año 2000 y T4 del año 2002 en aguas someras. Además es importante destacar que la SMA considera para el perdido previo a la etapa de proyecto el estadígrafo de mediana desde el 85, siendo que en este período de pre proyecto ya hay una disminución natural del sistema con tendencia negativa (ver elipses Anexo 6.4), por lo que dicho estadígrafo incorpora la tendencia natural del sistema.

De igual forma, no se observan diferencias significativas entre aguas someras y profundas de la laguna Jachucoposa desde el año de la extracción al año 2021, tanto en periodo pluvial como estival. Detalles del análisis estadístico pueden ser revisado en Anexo 6.4.

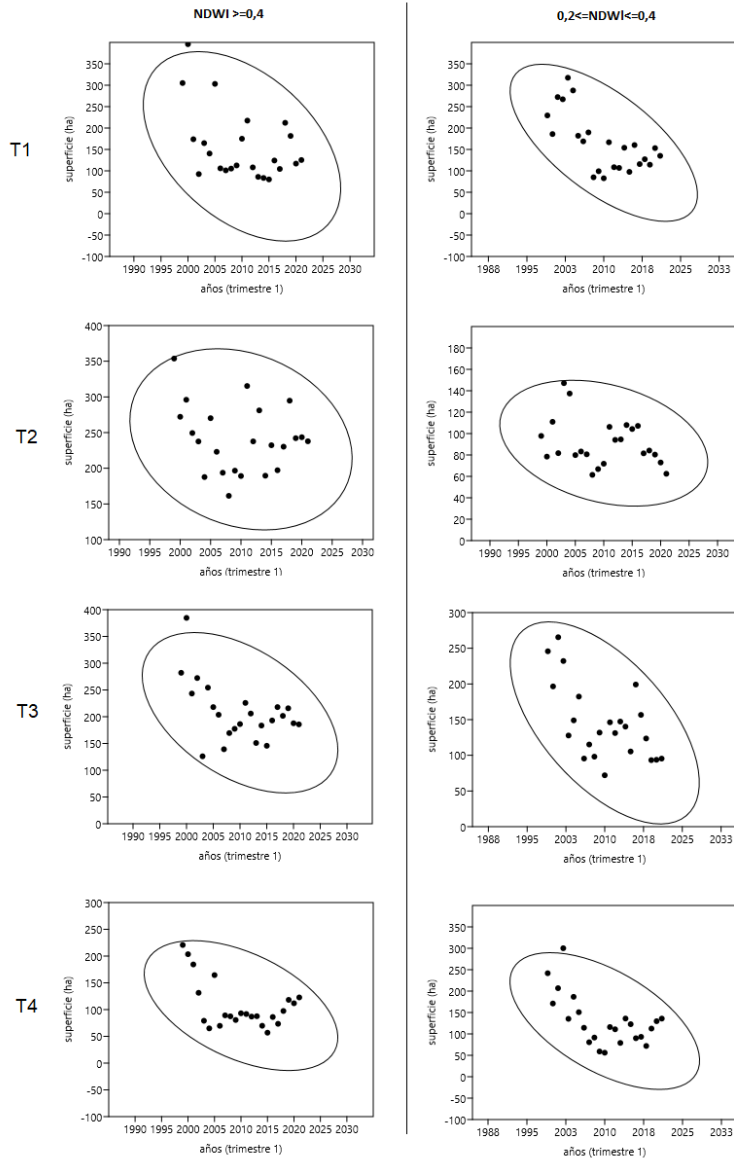


Figura 3-16 Elipsis del 95% de confiabilidad

Tendencia de espejo de agua Jachucoposa (LS5TM LS7ETM+)

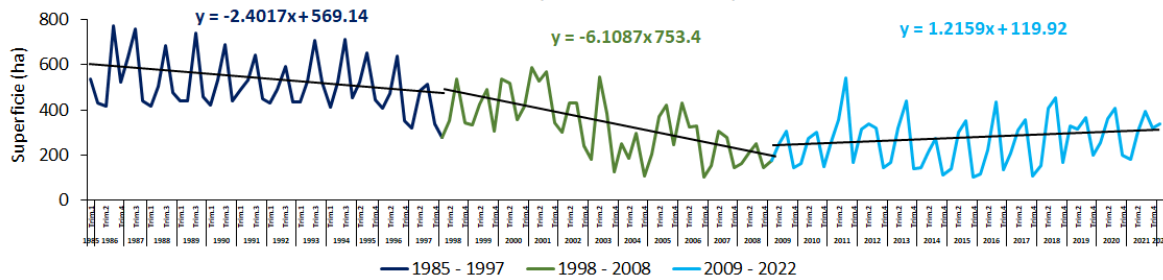


Figura 3-17 Análisis de variabilidad y tendencia histórica de superficie lagunar sistema Jachucoposa

Referido al comportamiento histórico del sistema Jachucoposa en la Figura 3-17 se observa que la tendencia a la disminución del espejo de agua comienza antes del momento de la extracción, proyectándose hasta el año 2010 para luego presentar una recuperación entre los años 2011-2022. En este sentido existe incoherencia en el supuesto adoptado por SMA, donde asume un valor de mediana previo al periodo de proyecto para fines comparativos, debido a que esta mediana está influenciada por la tendencia propia del sistema arrastrando dicho error en cada año calculado para el periodo 1985 y 1997.

## 4 Conclusiones

En relación a las consideraciones metodológicas implementadas por la SMA, es posible señalar:

- Respecto de los polígonos definidos por la SMA como Humedal Centro y Humedal 1, no es posible determinar la existencia de humedales, ya que la información de campo da cuenta de vegetación predominantemente del tipo zonal con especies como *Parastrephia lucida* y *Lampaya medicinalis*, las cuales no dependen de manera estricta con aguas subterráneas, sino más bien su abastecimiento está definido por precipitaciones, por lo que no corresponde su inclusión en los análisis temporales efectuados.
- El error de bandeo presente en las imágenes de Landsat 7 ETM+ comienza mundialmente el 31 de mayo 2003 y genera pérdida de información (sin datos). Este bandeo al no pasar siempre por el mismo lugar (coordenadas geográficas) dificulta el cálculo de un error de incertidumbre.
- El grado de incertidumbre del análisis aumenta con el error de bandeo y este error se hace porcentualmente más grande cuando el sistema/sector analizado es más pequeño en superficie.
- Pese a lo anterior se realiza un análisis a nivel de píxel donde se cuantifica históricamente la cantidad de veces que un píxel tuvo información. El porcentaje de error de Landsat 7 ETM+ asociado a la falta de información en el área de estudio varía entre pixeles que -74,3% a -88,3%.
- El rango del NDVI  $\geq 0,0$  considerado por la SMA incorpora superficies que no corresponden a vegetación (cobertura de suelo) contribuyendo a un valor menor en la mediana histórica.
- El rango del NDVI  $\geq 0,0$  considerado por la SMA no permite visualizar el comportamiento natural del sistema en relación con la estacionalidad (mayor actividad en verano respecto del invierno).
- Dado los análisis expuestos en esta minuta, no se recomienda la utilización de imágenes Landsat 7 ETM+ en los sistemas analizados ni tampoco asumir el umbral propuesto por SMA, dado que, las imágenes de mediana resolución como Landsat no son una herramienta apropiada para la estimación de superficie con el nivel de precisión requerido en este proceso, es decir, con determinación de hectáreas por sistema vegetacional y lagunar.
- El análisis SMA utiliza un periodo trimestral para definir un valor de mediana de NDVI, el problema detectado, es que para el año 1997 se utilizan solo dos imágenes, número insuficiente para determinar un estadígrafo como la mediana, esto tiene como efecto que la incorporación de una imagen adicional podría generar un cambio importante en el resultado, por lo tanto, el análisis pierde robustez.
- En el caso de NDWI el análisis de SMA incorpora una mediana en el periodo entre 1985 y 1997, este valor incorpora no da cuenta de la tendencia histórica que presenta el sistema lacustre, el cual tiende a la disminución en ese periodo.

No obstante lo anterior, a efectos de comparar los resultados, se realiza un análisis equivalente bajo los supuestos planteados por la autoridad, con las siguientes consideraciones:

- Se incluye en el análisis de variación de superficie con vegetación y lacustre la existencia de fenómenos climáticos naturales, como la precipitación y temperatura
- Se reanaliza el set de imágenes considerado por la SMA (utilizando las mismas librerías) utilizando imágenes con una nubosidad menor al 30%, verificando la existencia de errores mediante una inspección visual de cada imagen.
- Exclusión de sectores denominados por la SMA como humedal centro y humedal 1, dado que la evidencia de campo indica que las formaciones allí presentes serían de tipo zonal, las cuales presentan especies que no utilizan aguas subterráneas como fuente hídrica.

Los resultados obtenidos en el análisis de la influencia de la meteorología en el comportamiento temporal de los distintos sistemas presentes en el salar de coposa permiten concluir:

- El producto CR2MET permite representar de buena forma los montos de precipitación registrados *in-situ* en la zona de estudio y, dado que cuenta con un producto de temperatura, se posiciona como una herramienta potente que permite caracterizar de manera coherente los patrones climáticos en los sistemas de interés.
- Los diferentes sistemas comparten patrones climáticos similares, los cuales muestran patrones de crecimiento (temperatura) y decrecimiento (precipitaciones) desde el año 1985 en adelante.
- En términos de precipitación, se estima una disminución sistemática de los montos anuales, mientras que la temperatura presenta una significativa tendencia creciente del orden de 0,2°C/década.
- Existen correlaciones significativas en términos estadísticos que permiten explicar, dependiendo de la variable y el sistema, entre el 12% y 40% de la varianza de la superficie, lo cual permite concluir sobre la relación y/o dependencia natural que existe entre el clima y la superficie vegetacional.
- Los cambios en las condiciones climáticas del periodo 1998-2008 respecto al periodo 1985-1997 podrían explicar el 23,5% de la mediana de la disminución de la superficie vegetacional en dicho subperiodo.

En términos de vegetación los resultados obtenidos en el presente trabajo se detallan a continuación:

- Al comparar el periodo asociado a los hechos infraccionales que motivan el presente análisis de efectos, es decir año 2008 con el año 2022, el resultado evidencia una ganancia neta de vegetación, reportando un aumento de 28,5 ha en el periodo, de acuerdo a la evaluación realizada sobre la base de la metodología planteada por la autoridad. Si se considera el informe SMA (Res. Ex 33/2022) el resultado de ganancia de superficie de humedales en el periodo 2008 – 2022 es aun mayor, con un total de 31,27 ha.



- En dicho periodo el único sector que evidencia una pérdida en la superficie con vegetación corresponde a Tankatankani con 0,73 hectáreas.
- La pérdida total neta de superficie vegetacional basada en la reconstrucción de metodología de la SMA (Res. Ex 33/2022) es de 36.3 ha al comparar el período 1997-2022, lo anterior considerando la influencia de la meteorología.
- La mayor pérdida de superficie vegetacional en dicho período se evidencia en el sistema San Pablo.

En relación a la superficie lacustre, es posible señalar:

- El análisis de espejo de agua con imágenes Landsat 7 ETM+ agrupado trimestralmente, y asociado a las estaciones pluviales y estivales, describe que los meses con mayor índice NDWI, corresponden naturalmente a los trimestres de enero-marzo y abril-junio. Sin embargo, el sistema Jachucoposa posee una dinámica más homogénea durante todo el año hidrológico.
- No se observan diferencias estadísticamente significativas entre aguas someras y profundas de la laguna Jachucoposa desde el año de la extracción al año 2021, tanto en periodo pluvial como estival.
- Según lo observado el periodo 2011-2021 se observa un incremento en la superficie lacustre en general (diferentes profundidades) en todos los trimestres analizados.

## 5 Referencias

- Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P.A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., Ayala, A., 2018. The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Boisier, J.P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., Rondanelli, R., 2018. CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile, in: 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the Conference Held 4-13 April, 2018 in Vienna, Austria, p.19739. p. 19739.
- Copernicus Climate Change Service (C3S), 2017. ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate [WWW Document]. Copernicus Clim. Chang. Serv. Clim. Data Store. URL <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- DGA, 2019a. Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en la macrozona sur y parte norte de la macrozona Austral, SIT N° 441.
- DGA, 2019b. Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de la parte sur de la Macrozona Austral e Isla de Pascua, SIT N° 444.
- DGA, 2018. Aplicación de La Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Norte y Centro.
- DGA, 2017. Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Pica-Téllez, A., Garreaud, R., Meza, F., Bustos, S., Falvey, M., Ibarra, M., Duarte, K., Ormazábal, R., Dittborn, R., Silva, I., 2020. Atlas de Riesgo Climático para Chile 181.
- Wilks, D., 2011. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press.
- Ali and Mohammed (2013), Gap-Filling Restoration Methods for ETM+ Sensor Images. *Iraqi Journal of Science*, 2013, Vol.54, No. .1, Pp.206-214
- Chander Gyanesh and Pat L. Scaramuzza "Cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM with the ResourceSat-1 (IRS-P6) AWiFS and LISS-III sensors", *Proc. SPIE 6407, GEOSS and Next-Generation Sensors and Missions*, 64070E (12 December 2006); <https://doi.org/10.1117/12.693742>
- DGA. (2011). Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile central, SIT N° 265, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile. Realizado por: GEOESTUDIOS LTDA.
- Holden Christopher E., Curtis E. Woodcock (2016) An analysis of Landsat 7 and Landsat 8 underflight data and the implications for time series investigations, *Remote Sensing of Environment*, Volume 185, 2016. Pages 16-36, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.052>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425716300803>)

Huete, A. R., & Liu, H. (1994). An error and sensitivity analysis of the atmospheric- and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, 897–905.

Leprieur, C., Kerr, Y. H., Mastorchio, S., & Meunier, J. C. (2000). Monitoring vegetation cover across semi-arid regions: Comparison of remote observations from various scales. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 281–300.

Li, Peng & Jiang, Luguang & Feng, Zhiming. (2013). Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors. *Remote Sensing*. 6. 310-329. 10.3390/rs6010310.

USGS (2020) Landsat 4-7 Collection 1 (C1) Surface Reflectance (LEDAPS) Product Guide, Version 3.0 August 2020. EROS Sioux Falls, South Dakota LSDS-1370

Roy, D. P., Kovalskyy, V., Zhang, H. K., Vermote, E. F., Yan, L., Kumar, S. S., & Egorov, A. (2016). Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote sensing of Environment*, 185, 57-70.

Teillet, P.M.; Barker, J. L.; Markham, B. L.; Irish, R. R.; Fedosejevs, G.; and Storey, J.C., "Radiometric crosscalibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets" (2001). NASA

## 6 Anexo

### 6.1 Error de bandeado Landsat 7

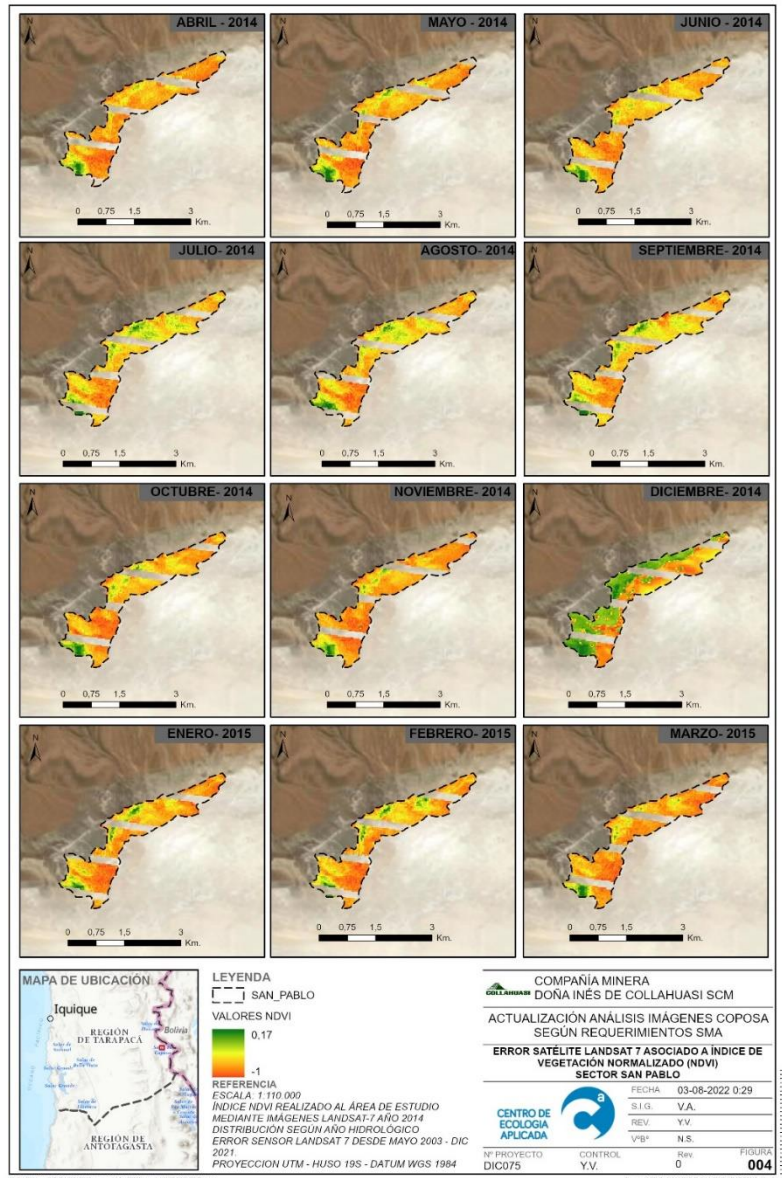


Figura 6-1 Ejemplo de error de sensor de Landsat 7, imágenes históricas de San Pablo

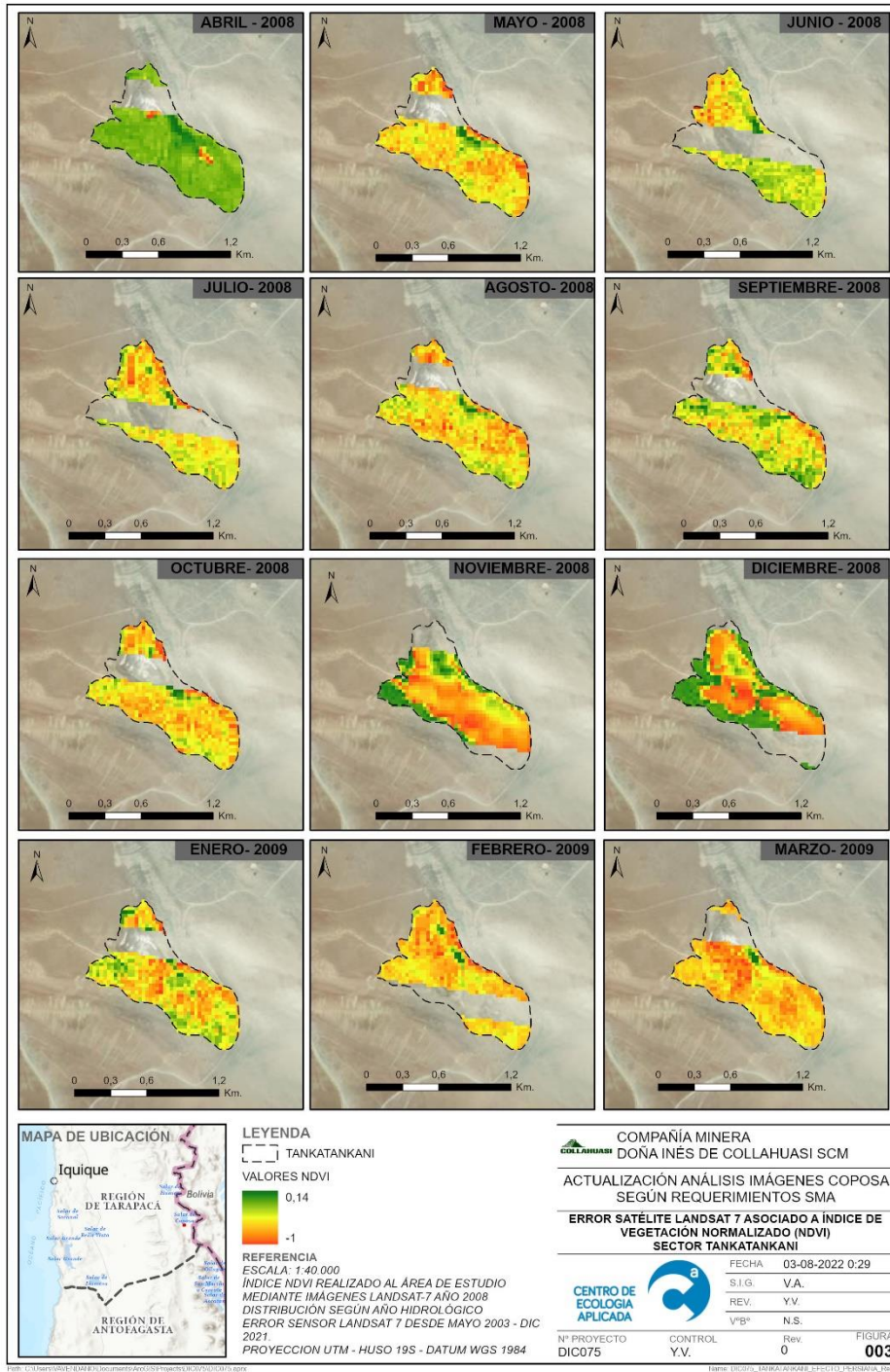


Figura 6-2 Ejemplo de error de sensor de Landsat 7, imágenes históricas de Tankatankani



## 6.2 Criterio para definir umbral de corte: Análisis semestral y anual

### d.- Tankatankani

Pese a exponer una pequeña variabilidad mensual, no se considera pertinente analizar este sector debido a que no existe presencia de agua parmente. (ver anexo detalles de valores mensuales por año).

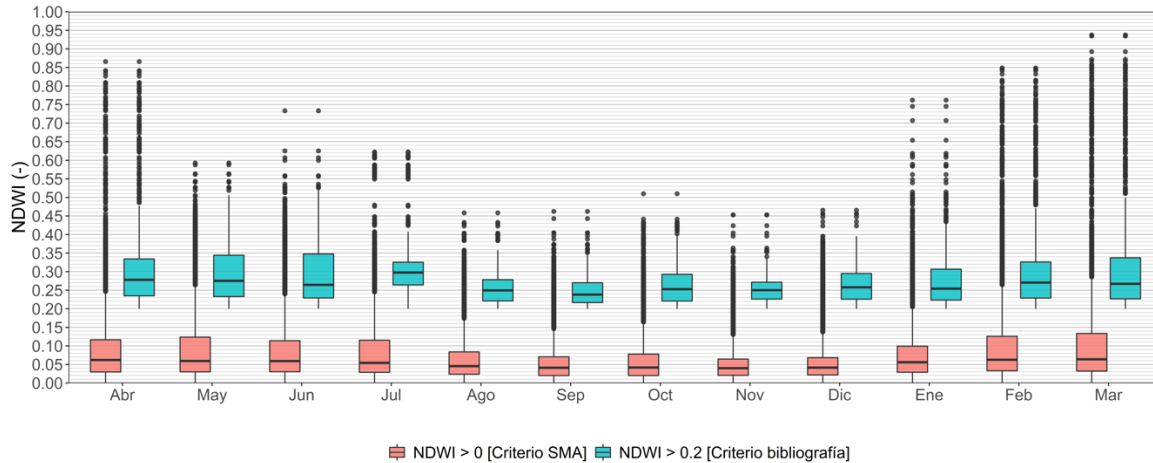


Figura 6-3 NDWI mensual en píxeles con  $NDWI \geq 0$  en sistema Tankatankani entre marzo 2000-abril 2022

### Análisis de variabilidad a nivel Anual

#### a.- Jachucoposa

El análisis de variabilidad anual según año hidrológico muestra para el sistema Jachucoposa en el umbral de corte 0,0, una tendencia parmente a la disminución del espejo de agua. Si bien en el año 2011, se observa un quiebre positivo estadísticamente significativo en el sistema, la mediana sigue estando bajo el umbral NDWI interpretado como espejo de agua. Solo el 25% de los valores más altos (P75%), es capaz de representar parcialmente la dinámica histórica del sistema.

Al generar el mismo análisis con el umbral de corte en 0,2, se observa que el sistema expone variaciones positivas y negativas a través del tiempo; esto además coherente con informes reportados con anterioridad.

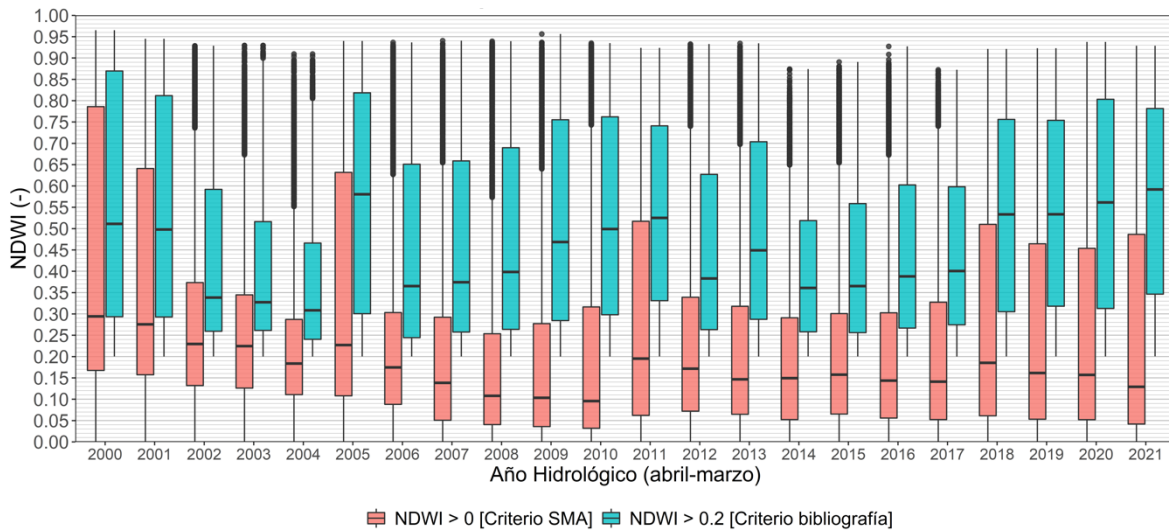


Figura 6-4 NDWI anual en píxeles con NDWI  $\geq 0$  en sistema Jachucoposa entre marzo 2000-abril 2022

#### b.- Coposito

El umbral de corte establecido en 0,0 establecido para el sistema Coposito (Figura 6-4), permite interpretar una tendencia parmente a la disminución del espejo de agua, sin embargo, los valores observados en la mediana se localizan siempre por debajo del umbral de corte reconocido como agua (0,2), por lo que el supuesto de umbral de análisis superior a 0,0 es un error metodológico grave.

Al generar el mismo análisis con el umbral de corte en 0,2, se observa que el sistema expone presencia de agua entre el año 2000 - 2008 y años 2011-2013, sin embargo, es importante recordar que, en los acápite mensuales y trimestrales, se demostró que durante estos años la presencia de espejos de agua siempre fue esporádica y no representaba una permanencia durante todos los meses del año. Pese a esta falta de recurrencia, determinada por presencia de precipitaciones estacionales, el umbral 0,2 permite mostrar la existencia histórica de espejos de agua que oscilan alrededor de NDWI 0,25, lo que reflejaría influencia de espejos de aguas someras.

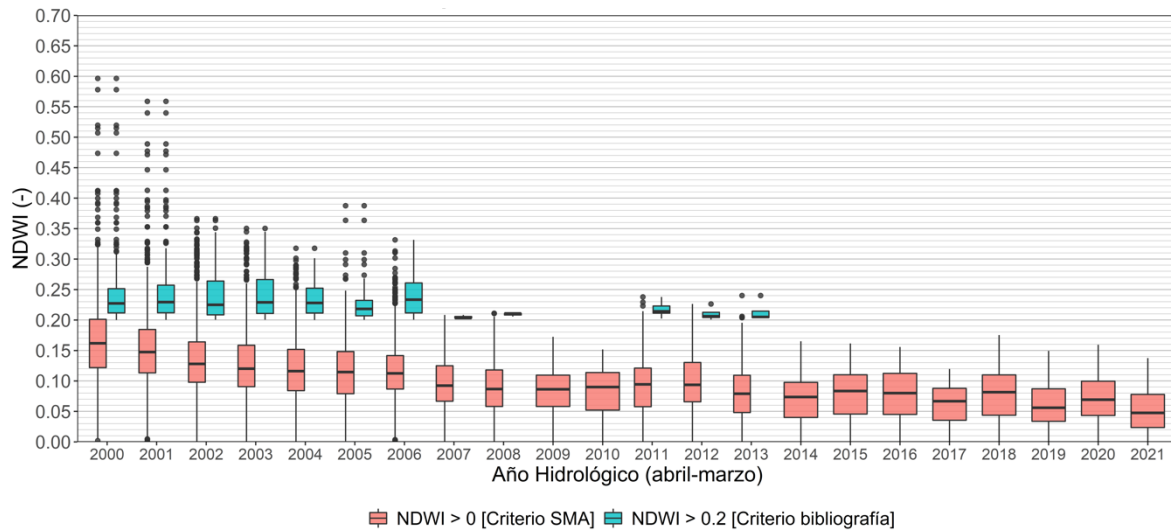


Figura 6-5 NDWI anual en píxeles con NDWI  $\geq 0$  en sistema Coposito entre marzo 2000-abril 2022

c.- San Pablo

No se considera pertinente analizar este sector debido a que no existe presencia de agua parmente. (ver anexo detalles de valores mensuales por año)

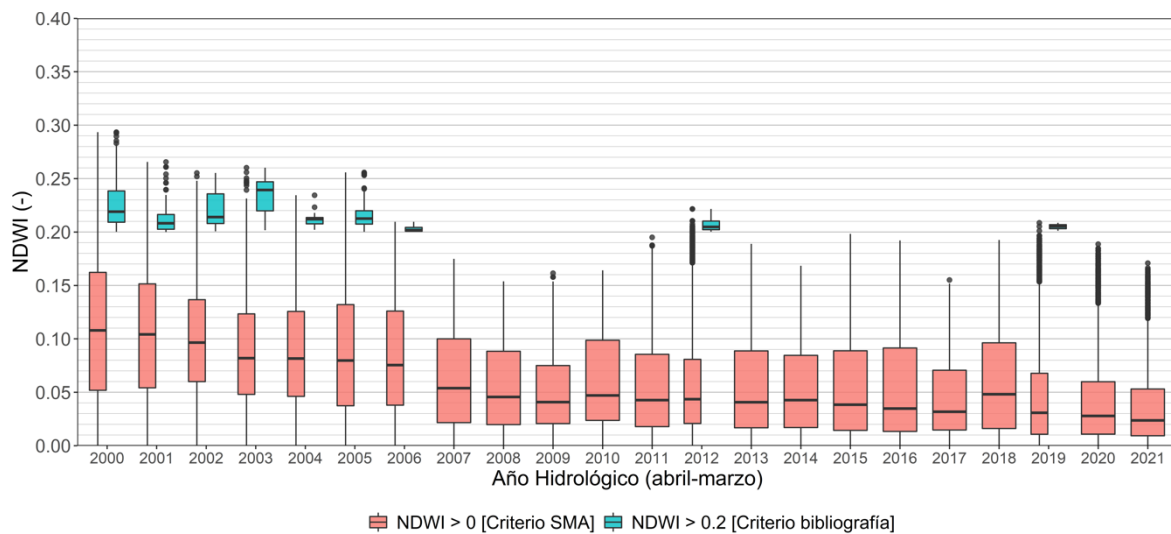


Figura 6-6 NDWI anual en píxeles con NDWI  $\geq 0$  en sistema San Pablo entre marzo 2000-abril 2022



d.- Tankatankani

No se considera pertinente analizar este sector debido a que no existe presencia de agua parmente. (ver anexo detalles de valores mensuales por año)

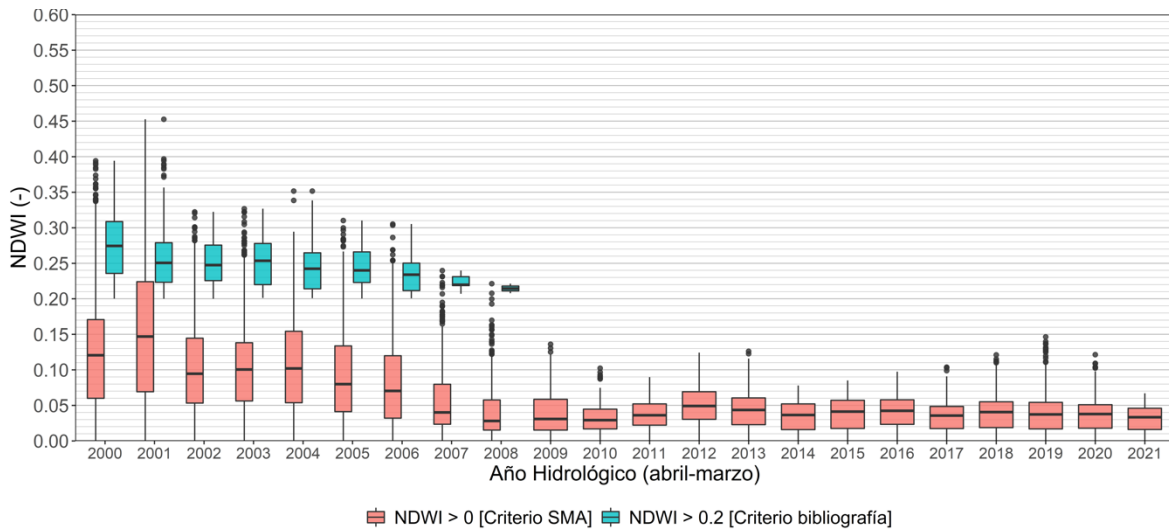


Figura 6-7 NDWI anual en píxeles con NDWI  $\geq 0$  en sistema Tankatankani entre marzo 2000-abril 2022

6.2.1 Análisis comparativo con valor de corte NDVI 0,0 y 0,1 Landsat 7 ETM+

Análisis de variabilidad a nivel Mensual

a.-Jachucoposa

El análisis con umbral de corte NDVI en 0,0, no representa la variabilidad mensual del sistema en la mediana de los valores. Esta variabilidad ya reconocida en imágenes de alta resolución queda sesgada al 10% más alto de los datos graficados.

Al adherir al análisis de vegetación, valores NDVI entre 0,0 y 0,1, compromete un mayor grado de incertidumbre, debido a que el índice NDVI por su composición matemática solo es capaz de discriminar vegetación (sobre 0,1), de cualquier otro elemento del suelo (bajo 0,1). En este sentido lo que se interpretaría con valores sobre 0,0 es la variación de = agua + otro componente el cual por alcances del método puede ser cualquier tipo de cobertura.

Sin embargo, al considerar el umbral propuesto en la bibliografía científica (NDVI sobre 0,1), se observa que los valores asociados a la mediana exponen levemente la variabilidad propia del sistema, validando lo reportados en anteriores informes.

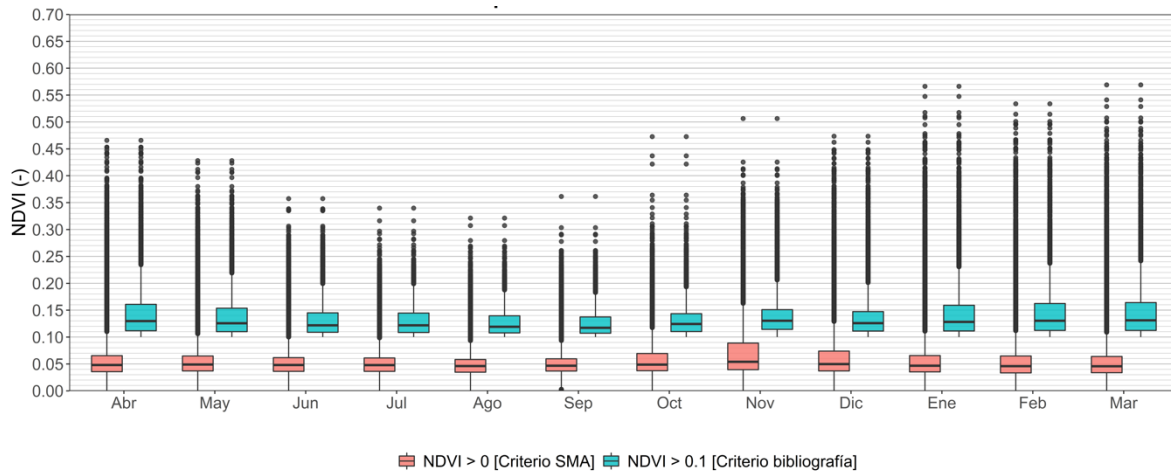


Figura 6-8 NDVI mensual en píxeles con  $NDVI \geq 0$  en sistema Jachucoposa entre marzo 2000-abril 2022

### b.- Coposito

Debido al tamaño del sector, y el notable efecto de bandeo, no se pueden establecer resultados concluyentes respecto este sistema. No obstante, se presentan los resultados del proceso de imágenes.

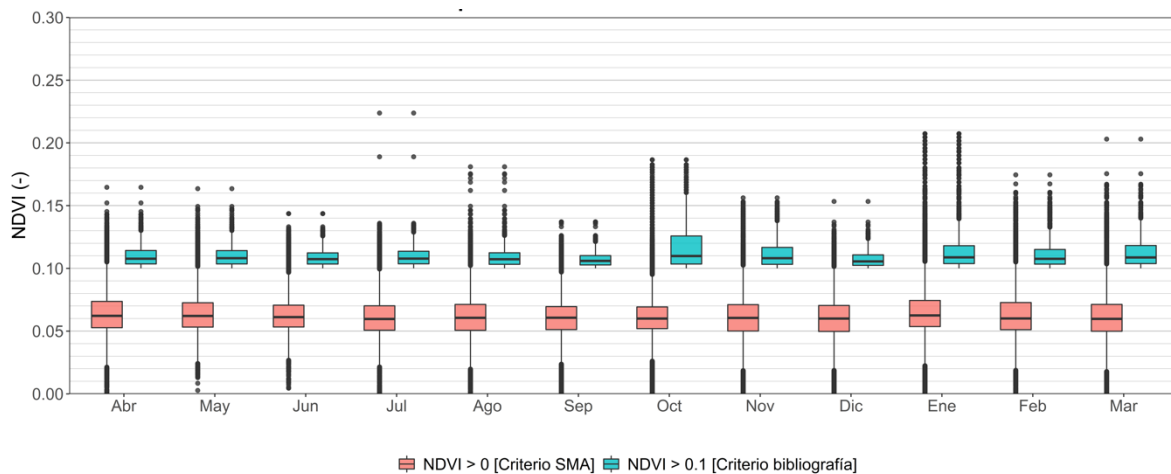


Figura 6-9 NDVI mensual en píxeles con  $NDVI \geq 0$  en sistema Coposito entre marzo 2000-abril 2022

### c.- San Pablo

Al igual que en Jachucoposa, considerar un umbral de corte  $NDVI \geq 0,1$ , permite representar la variabilidad del sistema en la mediana de los datos y con mayor énfasis en los valores asociados al 75% más alto. En este sistema se observa que los meses correspondientes entre diciembre y abril, exponen mayor grado de vigorosidad. Al incorporar un umbral de corte  $NDVI \geq 0,0$ , las cajas de boxplot no muestran variabilidad mensual, debido a que el rango de valores en que se encuentran corresponde a una cobertura distinta de vegetación siendo esta menos dinámica anualmente.

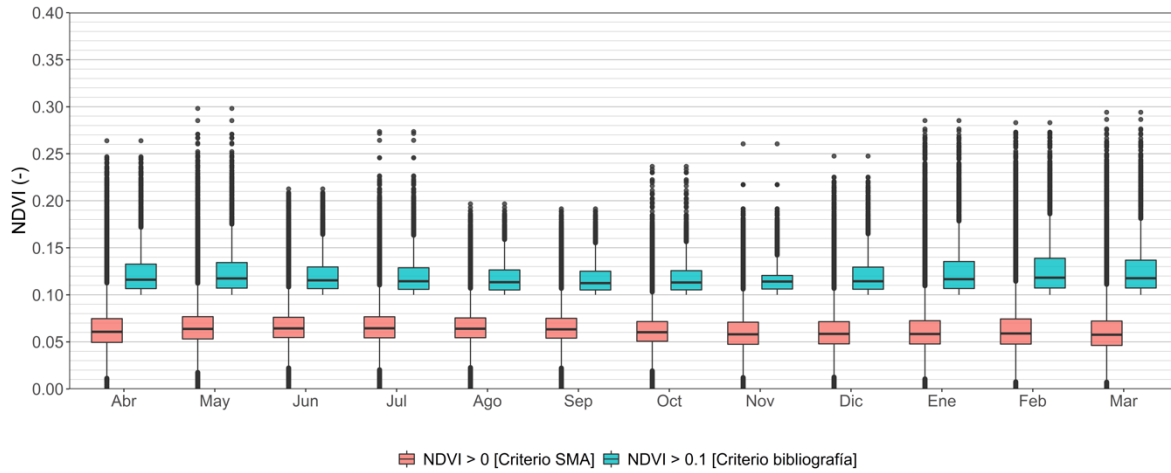


Figura 6-10 NDVI mensual en píxeles con NDVI  $\geq 0$  en sistema San Pablo entre marzo 2000-abril 2022

#### d.- Tankatankani

Al igual que en los otros sistemas, la variabilidad fenológica de Tankatankani es evidente cuando se utiliza el umbral de corte  $NDVI \geq 0,1$ , algo que no se observa al utilizar el umbral propuesto por SMA. Ya que incorpora a un análisis de vegetación (NDVI), valores que no lo son, sesgando el modelo a una disminución evidente dentro del sistema estudiado.

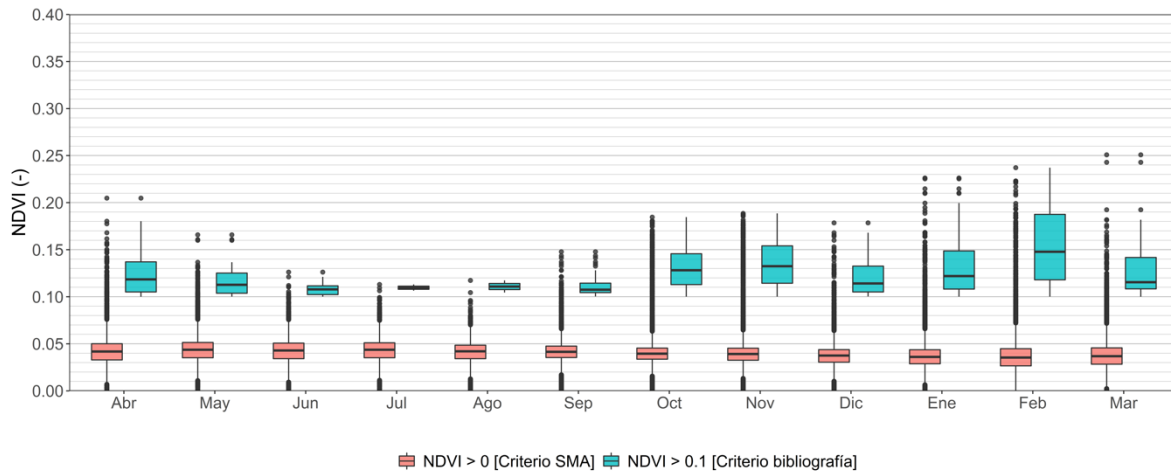


Figura 6-11 NDVI mensual en píxeles con NDVI  $\geq 0$  en sistema Tankatankani entre marzo 2000-abril 2022

### Análisis de variabilidad a nivel Anual

Para el criterio SMA, el análisis anual elaborado muestra para la mediana de los valores (50%) tendencia positiva, sin embargo, dicha mediana se encuentra siempre por debajo del umbral de 0,1, por lo cual ello no puede ser interpretado como un aumento de la vigorosidad, si no como una ganancia de cobertura de suelo distinta a vegetación y que por alcances del método utilizado no puede ser descrita formalmente.

Al utilizar el umbral de corte 0,1, se puede observar la tendencia histórica que ha tenido la vegetación, resaltando el umbral de 75% de los valores donde se evidencian quiebres importantes en la vigorosidad del sistema.

#### a.- Jachucoposa

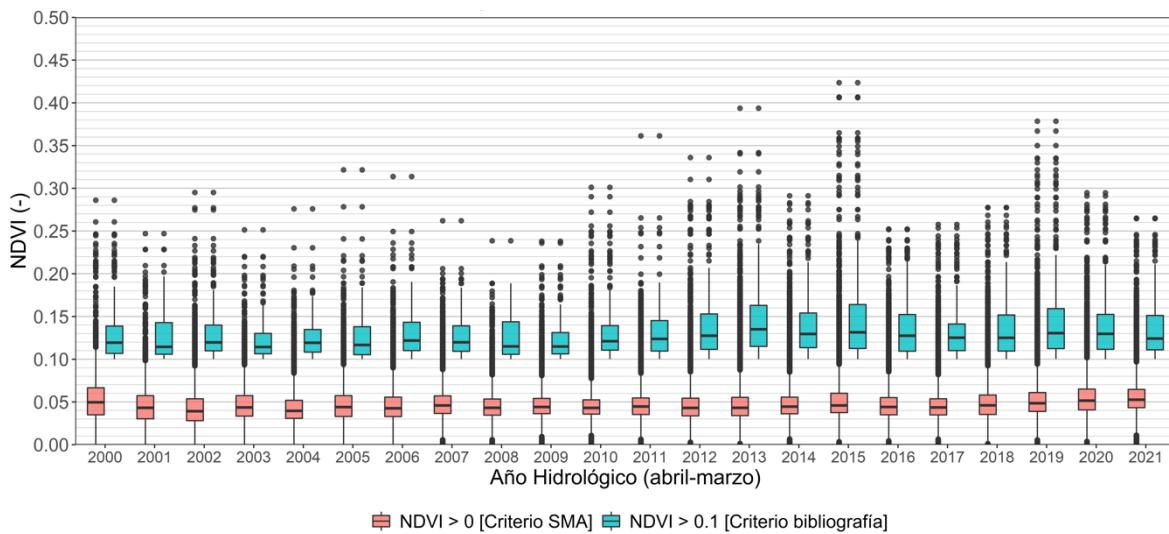


Figura 6-12 NDVI anual en píxeles con  $NDVI \geq 0$  en sistema Jachucoposa entre marzo 2000-abril 2022

#### b.- Coposito

El sistema Coposito para el umbral de corte  $NDVI \geq 0,0$  expone un aumento de la vigorosidad en su mediana, sin embargo, al igual que en Jachucoposa, los valores se encuentran por debajo de 0,1, por lo cual ello no puede ser interpretado como aumento de vigor, más bien significa una ganancia de cobertura de suelo distinta a vegetación<sup>9</sup>. Esta ganancia de cobertura de suelo al estar considerada dentro de un polígono de control refleja una disminución de vigor.

<sup>9</sup> Que por alcances del método no se puede determinar que es sin información de campo que lo valide.

Al utilizar el umbral de 0,1, discriminando valores de vegetación, se logra identificar variaciones anuales, sin embargo y dado el tamaño del sistema se reconoce que no se pueden establecer conclusiones determinantes debido a que el error de bandeo se maximiza.

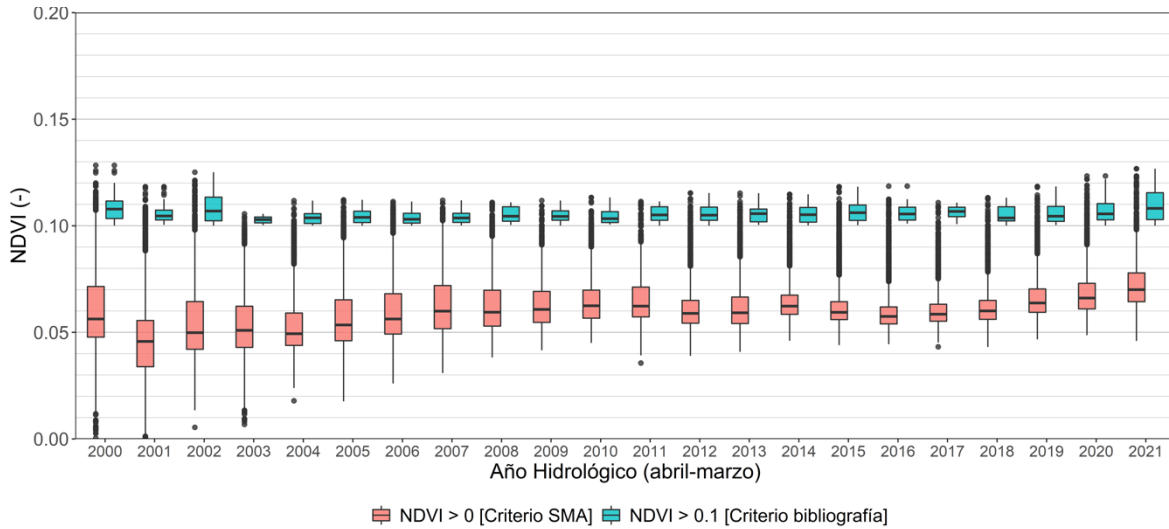


Figura 6-13 NDVI anual en píxeles con NDVI  $\geq 0$  en sistema Coposito entre marzo 2000-abril 2022

### c.- San Pablo

Para este sistema bajo el supuesto de SMA, la tendencia al aumento de la vigorosidad se mantiene en rangos  $NDVI \leq 0,1$ , que en la realidad corresponde a una ganancia de cobertura diferente a vegetación. Ello se refleja al utilizar el umbral  $NDVI \geq 0,1$  donde la tendencia de la vigorosidad detectada es negativa en el tiempo.

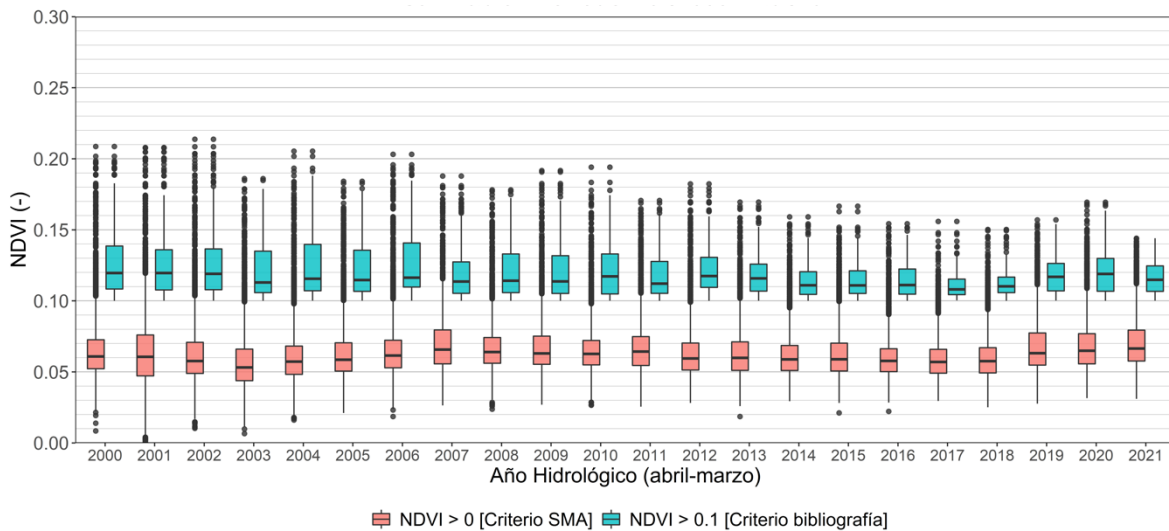


Figura 6-14 NDVI anual en píxeles con NDVI  $\geq 0$  en sistema San Pablo entre marzo 2000-abril 2022

d.- Tankatankani

Para este sistema bajo el supuesto de SMA, la tendencia al aumento de la vigorosidad se mantiene en todo el periodo analizado, pero siempre en rangos  $NDVI \leq 0,1$ , que en la realidad corresponde a una ganancia de cobertura diferente a vegetación. Ello se refleja al utilizar el umbral  $NDVI \geq 0,1$  donde la tendencia de la vigorosidad detectada es negativa en el tiempo, notando un efecto negativo después del año 2005.

Es importante advertir que este sistema al ser pequeño y similar a Coposito en términos de superficie, se ve igualmente fuertemente influenciado por el error de bandeo de Landsat 7 a partir del año 2003, reflejando una pérdida significativa de valores que es demostrada en el box plot de umbral  $NDVI \leq 0,1$ , por lo que los resultados quedan sesgados a esta carencia de información.

Ello justifica nuevamente, que la utilización de imágenes Landsat 7 ETM+ no es una vía correcta de análisis que permita establecer conclusiones determinantes sobre el estado vegetativo de este sistema.

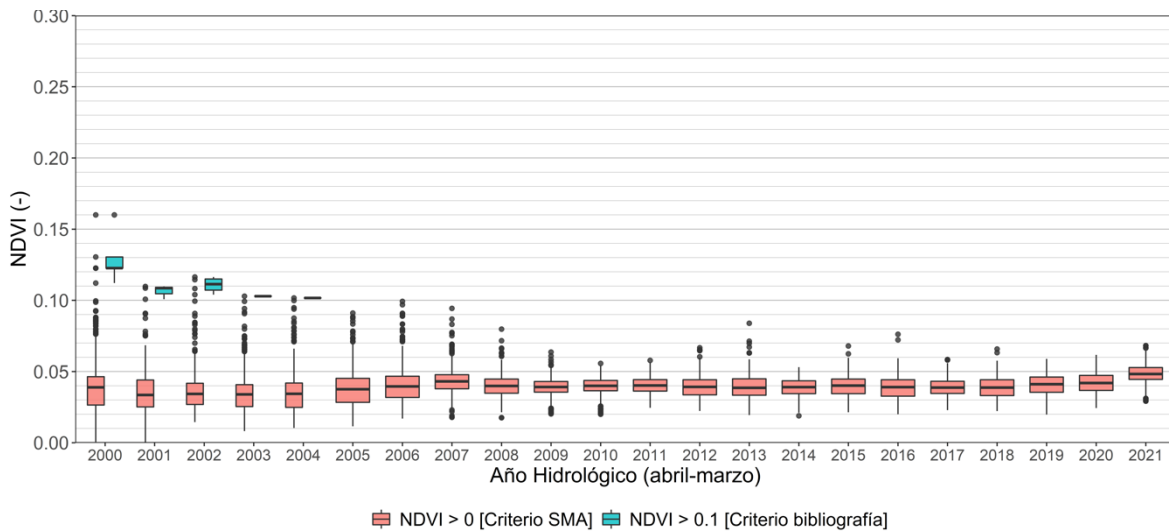


Figura 6-15 NDVI anual en píxeles con  $NDVI \geq 0$  en sistema Tankatankani entre marzo 2000-abril 2022

Detalles de valores mensuales por año NDWI

a.- Jachucoposa

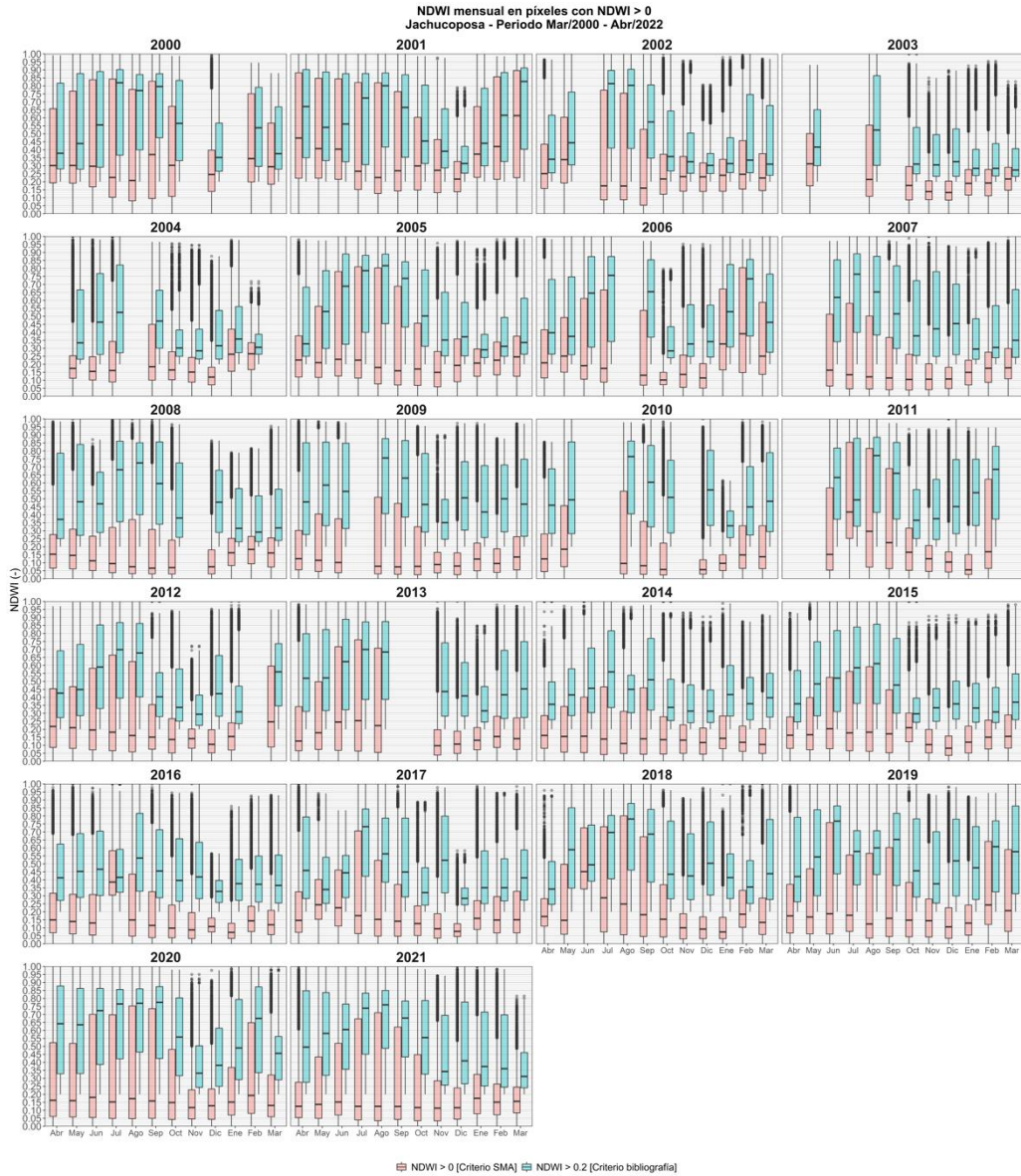


Figura 6-16 NDWI mensuales por año en píxeles con NDWI ≥ 0 en sistema Jachucoposa entre marzo 2000-abril 2022



-Coposito

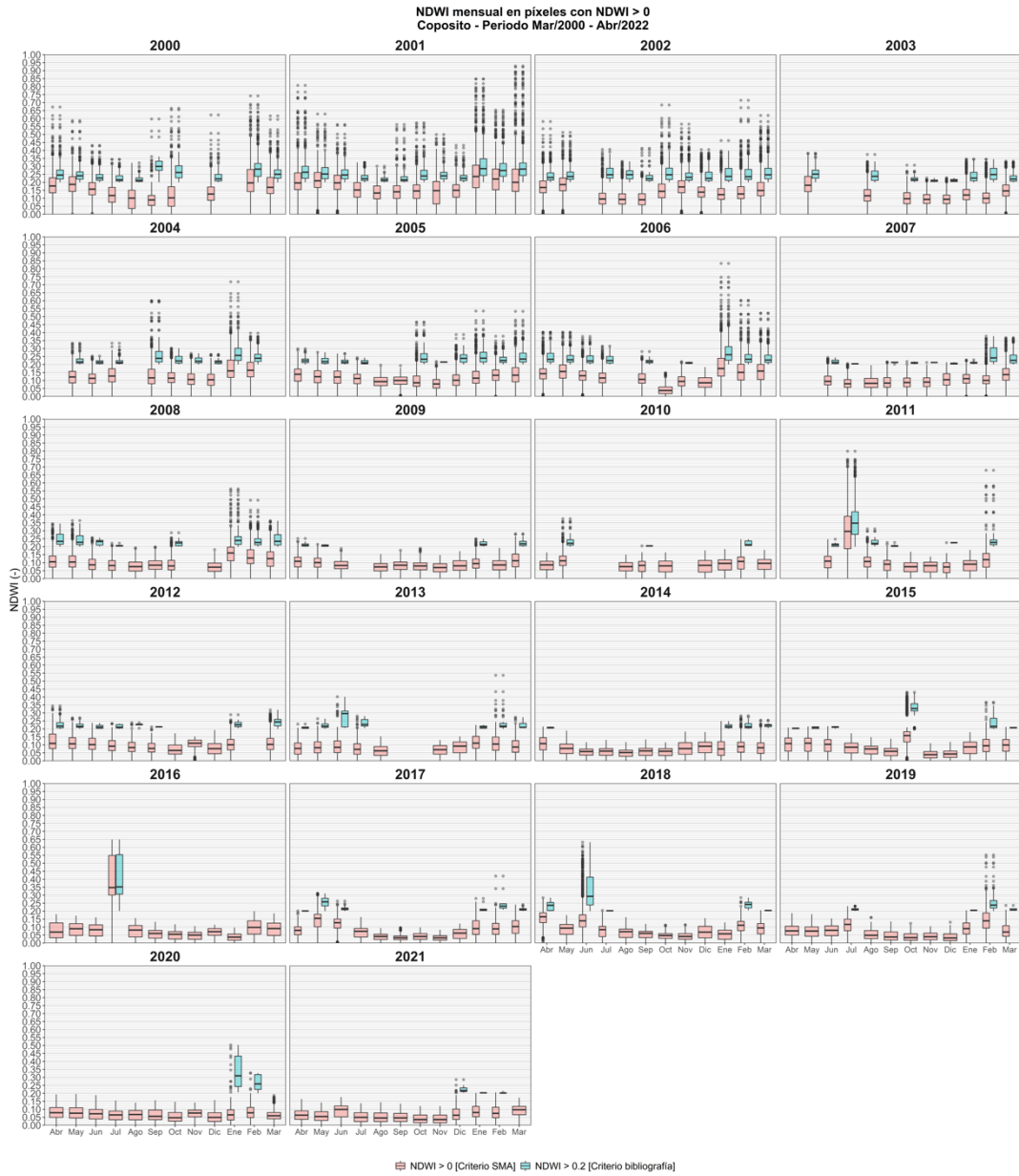


Figura 6-17 NDWI mensuales por año en píxeles con NDWI ≥ 0 en sistema Coposito entre marzo 2000-abril 2022

c.- San Pablo

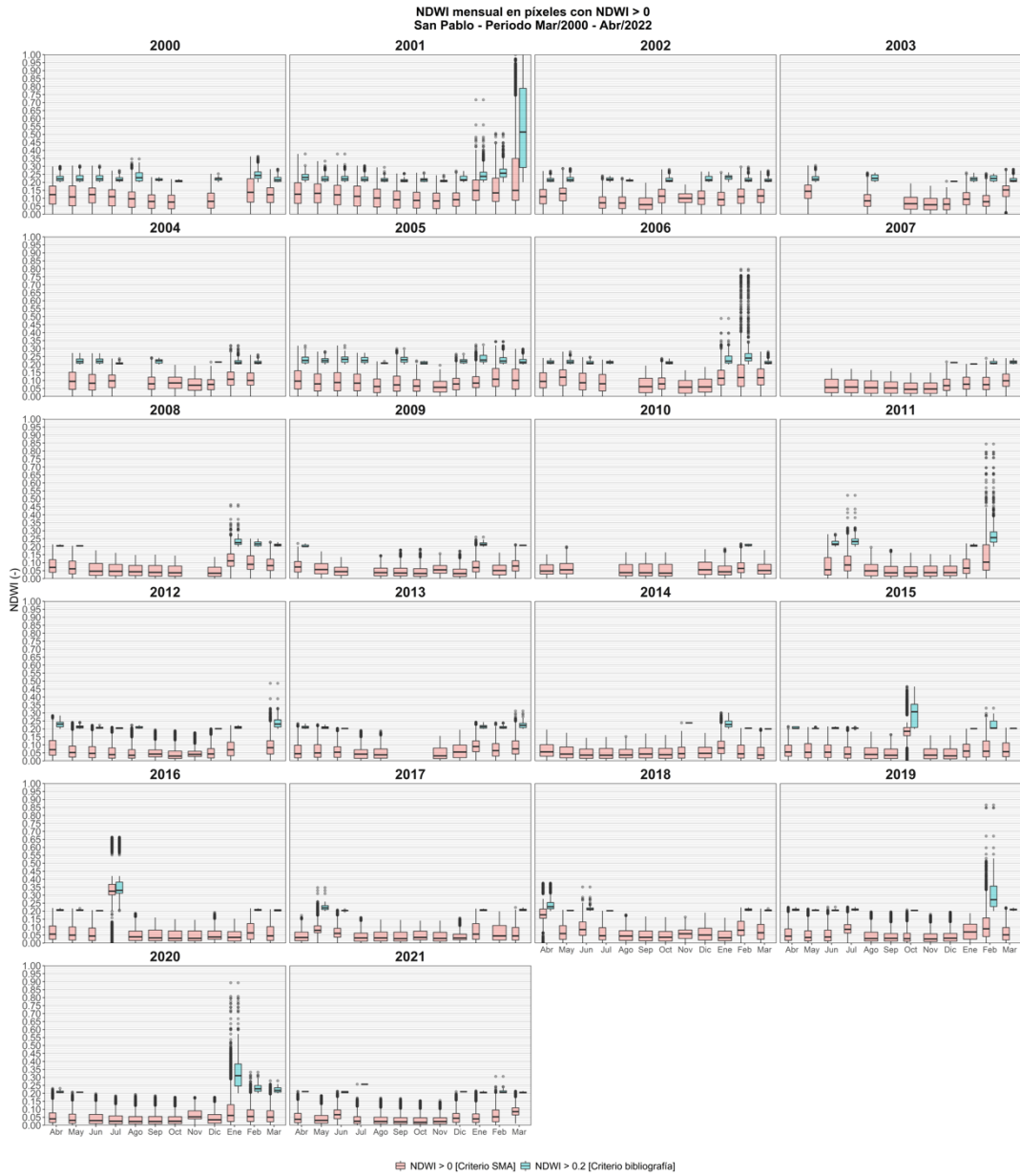


Figura 6-18 NDWI mensuales por año en píxeles con NDWI ≥ 0 en sistema San Pablo entre marzo 2000-abril 2022

d.- Tankatankani

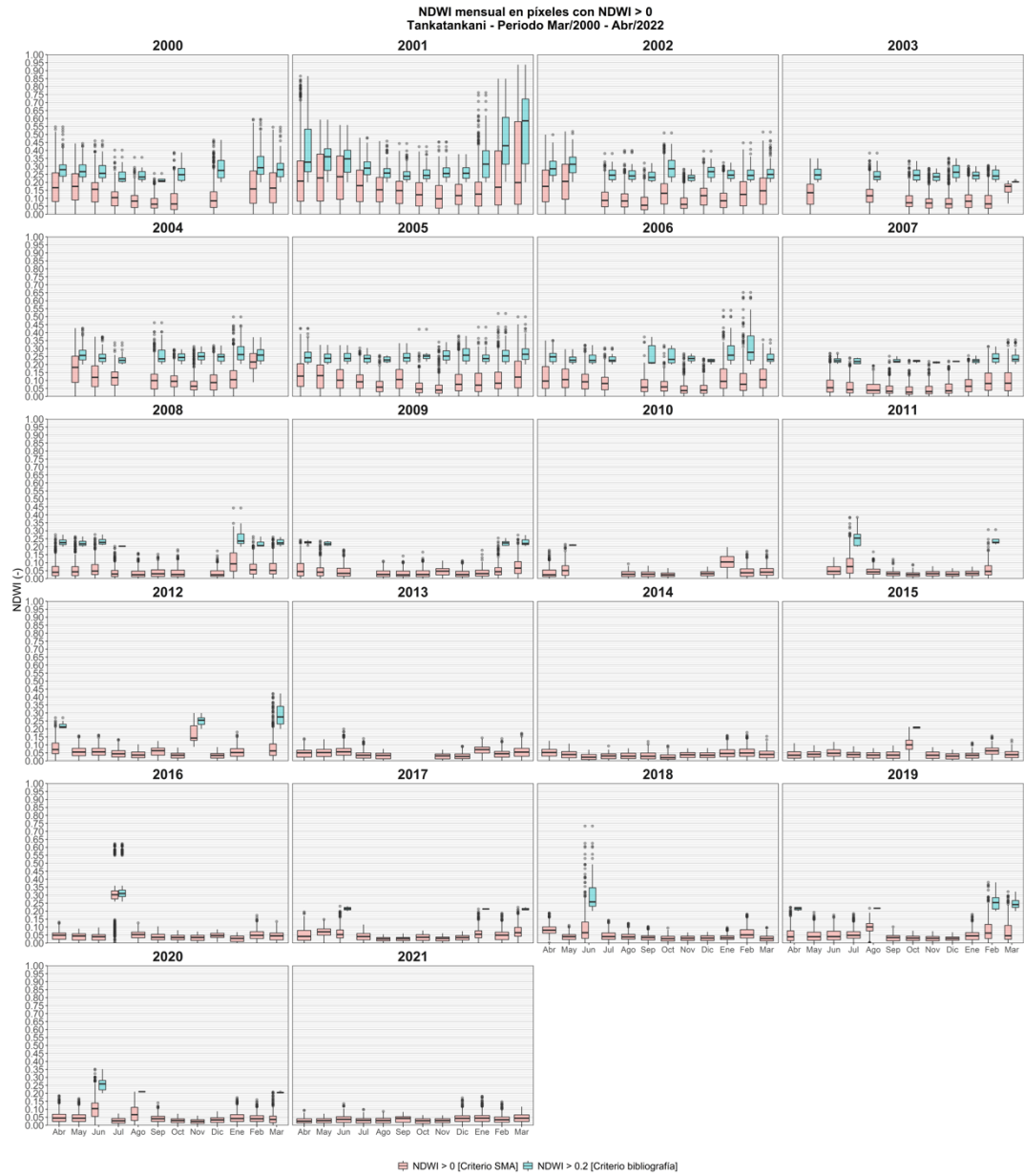


Figura 6-19 NDWI mensuales por año en píxeles con NDWI  $\geq 0$  en sistema Tankatankani entre marzo 2000-abril 2022

Detalles de valores mensuales por año NDVI

a.- Jachucoposa



Figura 6-20 NDVI mensuales por año en píxeles con NDVI ≥ 0 en sistema Jachucoposa entre marzo 2000-abril 2022

b.-Coposito

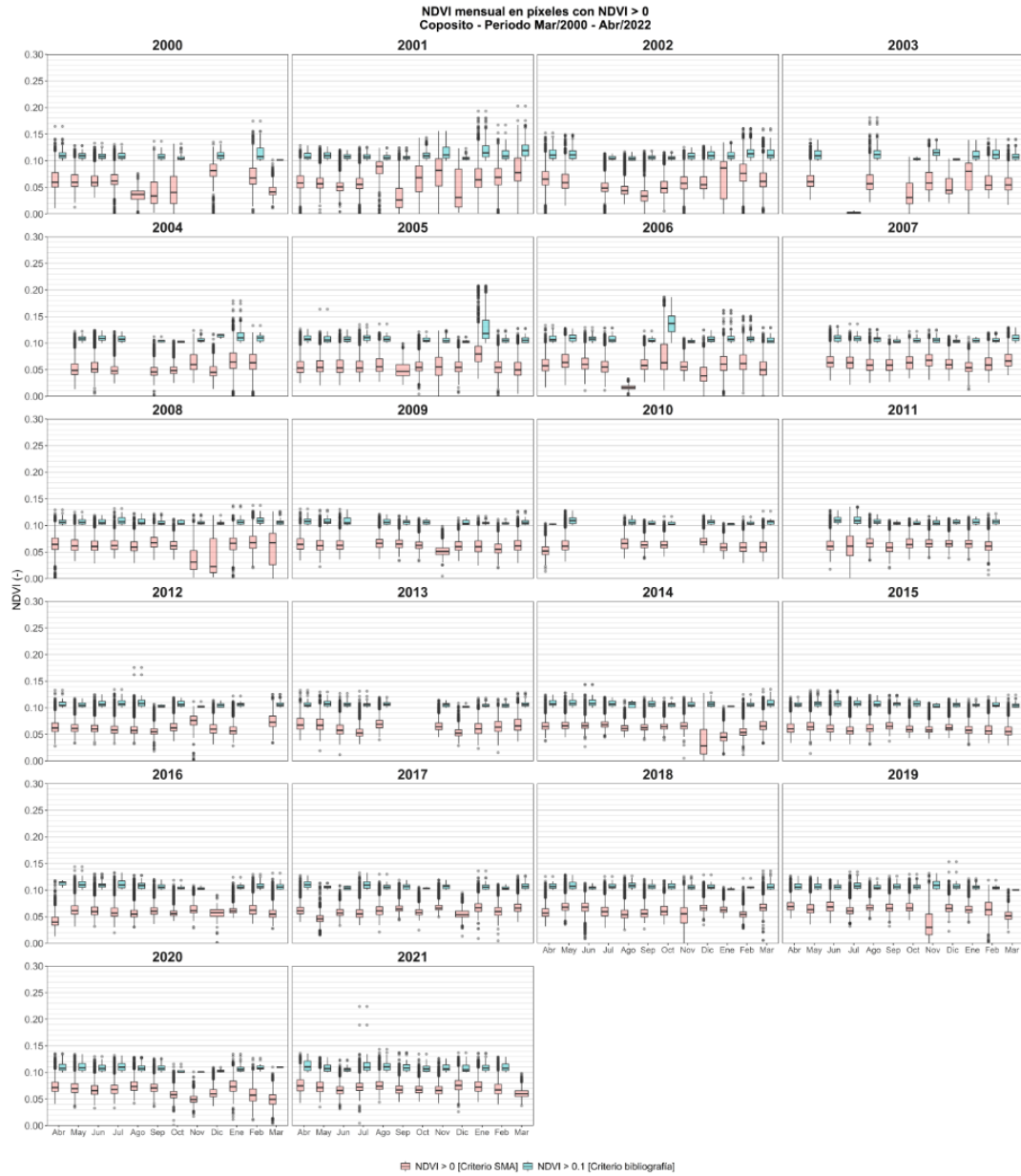


Figura 6-21 NDVI mensuales por año en píxeles con NDVI  $\geq 0$  en sistema Coposito entre marzo 2000-abril 2022

c.- San Pablo

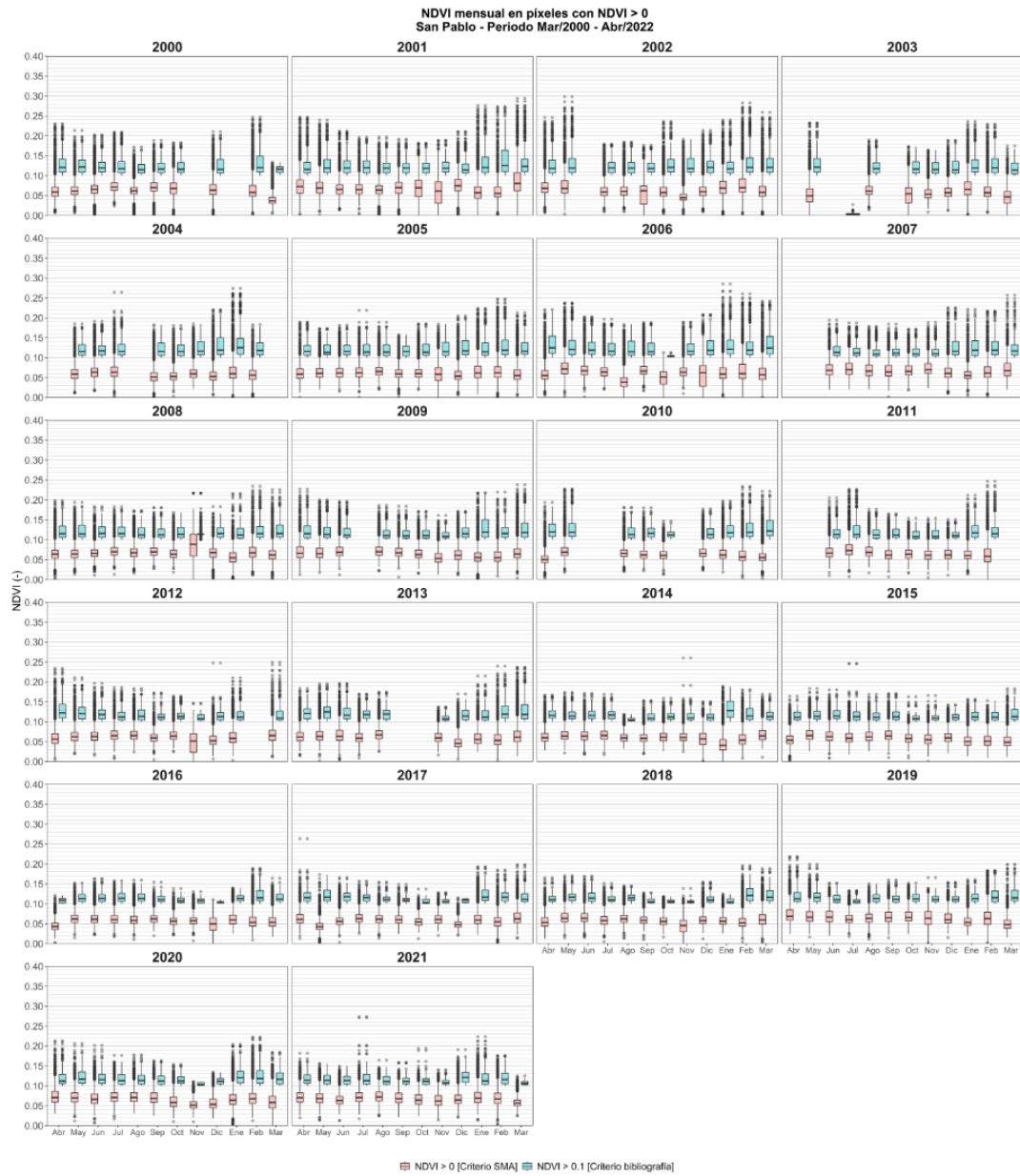


Figura 6-22 NDVI mensuales por año en píxeles con NDVI  $\geq 0$  en sistema San Pablo entre marzo 2000-abril 2022

d.- Tankatankani

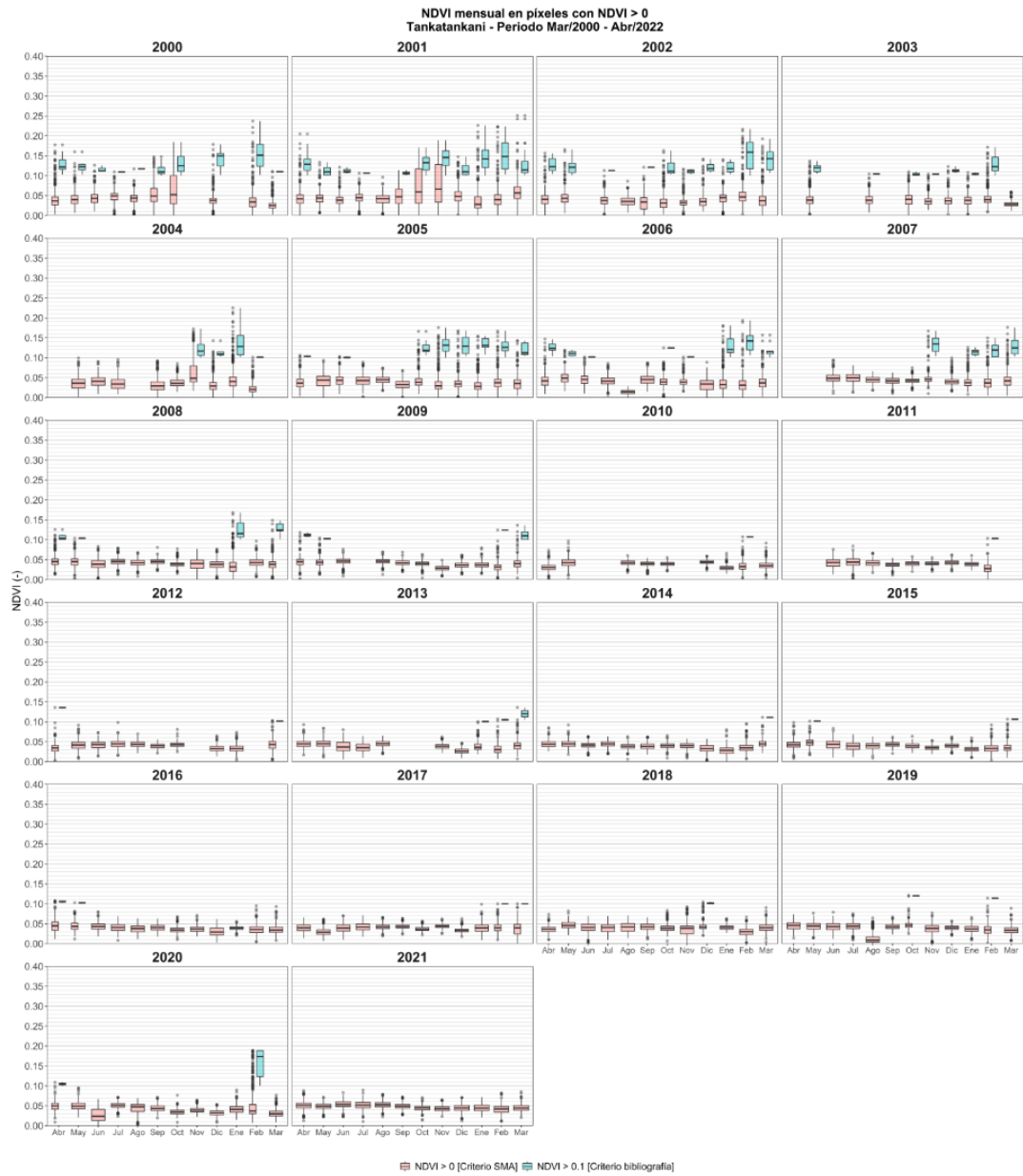


Figura 6-23 NDVI mensuales por año en píxeles con NDVI  $\geq 0$  en sistema Tankatankani entre marzo 2000-abril 2022

### 6.3 Detalle de consideraciones estadísticas análisis meteorológico

.Así, la Figura 6-24 muestra los resultados de superficie vegetal estimada mediante NDVI para el sistema Cposito “cruda” y aplicando una transformación a escala logarítmica y Box-Cox (Wilks, 2011) para evaluar cualitativamente el caso que se ajusta mejor a una distribución normal.

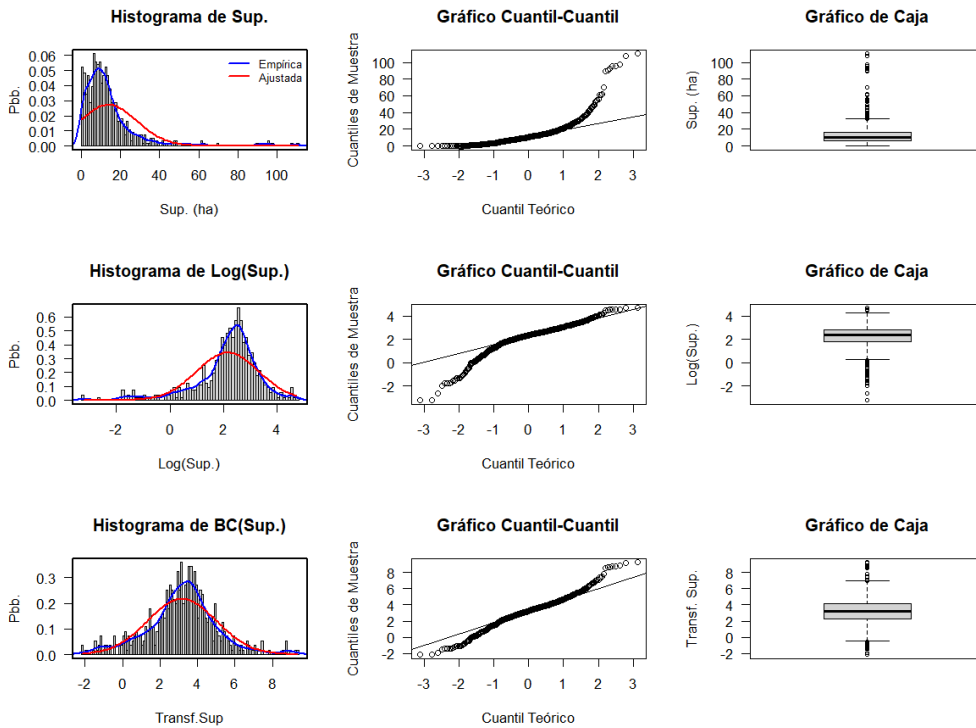


Figura 6-24: Ajustes para la normalización del predictando Superficie en el salar Cposito.

En la Figura 6-24 se puede observar que el predictando logra acercarse a una distribución normal cuando se aplica la transformación Box-Cox, lo cual es transversal para los cuatro sistemas estudiados. Así, se aplica una transformación de Box-Cox al predictando y se ajustan las regresiones lineales a dicha transformación. Cabe mencionar que la transformación de Box-Cox de una variable “x” corresponde a aplicar una relación exponencial y un cierto factor “λ” (ajustado para cada caso) según se muestra a continuación:

$$T(x) = \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}$$



Cabe mencionar que para recuperar la variable original “x”, o bien expresar el resultado en la escala original de la variable, se debe despejar la expresión anterior.

Una vez ajustado y calculados los coeficientes de la curva MLR, se procede a evaluar la habilidad predictiva del modelo. Para esto, se utiliza el método *set approach*, que consiste en extraer un porcentaje de la muestra y utilizar el modelo para predecirla. Para cuantificar de buena forma la incertidumbre del desempeño del modelo, este proceso se repite de manera aleatoria 10.000. La Figura 6-25 muestra los resultados de la validación de la estimación de superficie para Coposito, donde el error se presenta en término de la raíz del error cuadrático medio normalizado por la desviación estándar de las observaciones. Así, se concluye que el error predictivo del modelo está en torno a 2,1 veces la desviación estándar de la observación, resultado que se repite para el resto de los sistemas analizados.

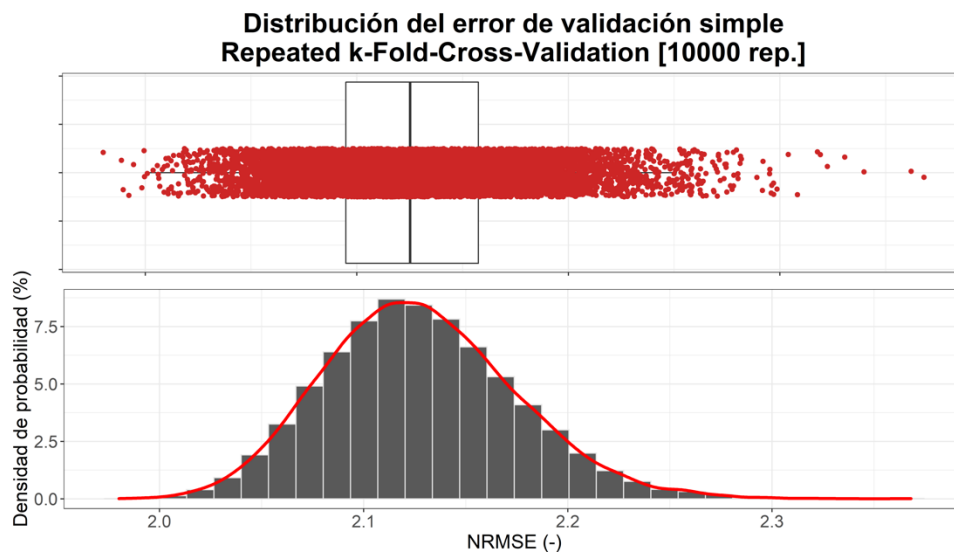


Figura 6-25: Distribución del error de validación del índice NDVI en el salar Coposito.

A partir de los modelos ajustados para cada sistema, la Figura 6-26 y Figura 3-13 resumen los resultados obtenidos expresados en términos de gráficos de dispersión y serie de tiempo respectivamente. La Figura 6-26 muestra que existe una buena correlación entre los datos de referencia y los estimados mediante MLR, pero existe un sesgo que propicia una sobreestimación de los valores por debajo de, aproximadamente, el percentil 20% de la referencia. Por el contrario, los valores por sobre dicho punto, que se expresa en términos gráficos en la intersección de las rectas, subestiman la referencia. Sin embargo, a pesar de dichas diferencias, los modelos logran explicar entre un 23% y 44% de la varianza de la superficie vegetal de los sistemas de interés.

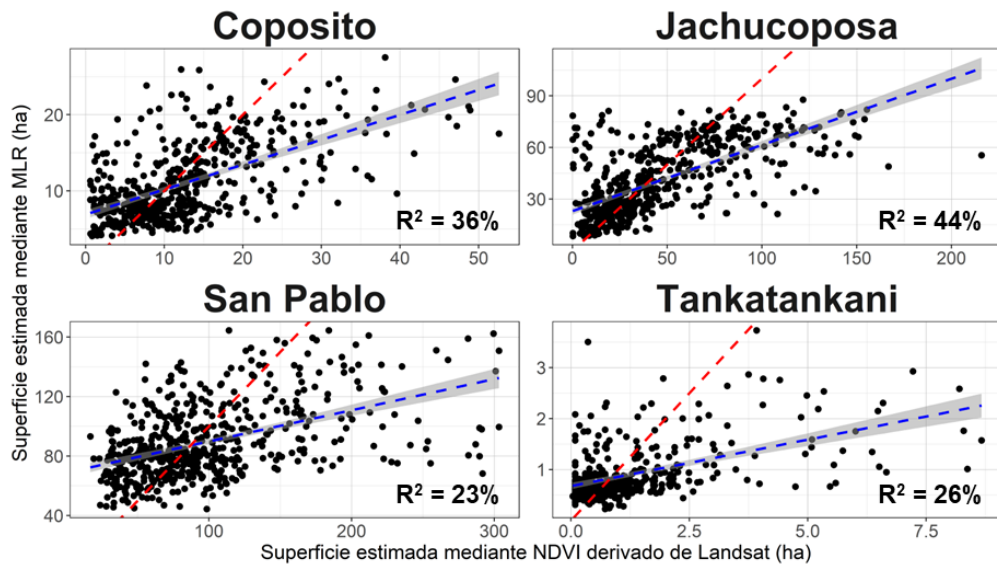


Figura 6-26: Dispersión de la superficie estimada mediante Landsat y estimada mediante modelos de regresión lineal múltiple (MLR). La línea segmentada color rojo representa la curva 1:1 de ajuste perfecto y sesgo nulo, mientras que la línea segmentada color azul representa la regresión lineal entre los puntos. Asimismo, la banda gris en torno a la línea segmentada azul da cuenta del intervalo de confianza al 95% del ajuste.

## 6.4 Análisis de significancia estadísticas laguna Jachucoposa

Tabla 6-1 Análisis significancia estadística de cambio de aguas profundas laguna Jachucoposa

<b>T1</b>	<b>NDWI &gt;=0,4</b>	<b>Rows, columns:</b> 23, 2	<b>Degrees freedom:</b> 22	<b>Chi<sup>2</sup>:</b> 841.25	<b>p (no assoc.):</b> 1.0336E-163	<b>Monte Carlo p:</b> -1
<b>Fisher's exact</b>						
Not available						
<b>Other statistics</b>						
<b>Cramer's V:</b>	0.12992	<b>Contingency C:</b>	0.12884			
<b>T2</b>	<b>NDWI &gt;=0,4</b>	<b>Rows, columns:</b> 23, 2	<b>Degrees freedom:</b> 22	<b>Chi<sup>2</sup>:</b> 181.71	<b>p (no assoc.):</b> 4.1366E-27	<b>Monte Carlo p:</b> -1
<b>Fisher's exact</b>						
Not available						
<b>Other statistics</b>						
<b>Cramer's V:</b>	0.059254	<b>Contingency C:</b>	0.05915			
<b>T3</b>	<b>NDWI &gt;=0,4</b>	<b>Rows, columns:</b> 23, 2	<b>Degrees freedom:</b> 22	<b>Chi<sup>2</sup>:</b> 292.86	<b>p (no assoc.):</b> 3.4207E-49	<b>Monte Carlo p:</b> -1
<b>Fisher's exact</b>						
Not available						
<b>Other statistics</b>						
<b>Cramer's V:</b>	0.075786	<b>Contingency C:</b>	0.075569			
<b>T4</b>	<b>NDWI &gt;=0,4</b>	<b>Rows, columns:</b> 23, 2	<b>Degrees freedom:</b> 22	<b>Chi<sup>2</sup>:</b> 390.24	<b>p (no assoc.):</b> 4.2307E-69	<b>Monte Carlo p:</b> -1
<b>Fisher's exact</b>						
Not available						
<b>Other statistics</b>						
<b>Cramer's V:</b>	0.089525	<b>Contingency C:</b>	0.089169			
		<b>0,2&lt;=NDWI&lt;=0,4</b>	<b>Rows, columns:</b> 23, 2	<b>Degrees freedom:</b> 22	<b>Chi<sup>2</sup>:</b> 564.8	<b>p (no assoc.):</b> 2.0888E-105
<b>Fisher's exact</b>						
Not available						
<b>Other statistics</b>						
<b>Cramer's V:</b>	0.10625	<b>Contingency C:</b>	0.10566			
		<b>0,2&lt;=NDWI&lt;=0,4</b>	<b>Rows, columns:</b> 23, 2	<b>Degrees freedom:</b> 22	<b>Chi<sup>2</sup>:</b> 112	<b>p (no assoc.):</b> 4.8488E-14
<b>Fisher's exact</b>						
Not available						
<b>Other statistics</b>						
<b>Cramer's V:</b>	0.048148	<b>Contingency C:</b>	0.048092			
		<b>0,2&lt;=NDWI&lt;=0,4</b>	<b>Rows, columns:</b> 23, 2	<b>Degrees freedom:</b> 22	<b>Chi<sup>2</sup>:</b> 387.98	<b>p (no assoc.):</b> 1.2374E-68
<b>Fisher's exact</b>						
Not available						
<b>Other statistics</b>						
<b>Cramer's V:</b>	0.088474	<b>Contingency C:</b>	0.08813			
		<b>0,2&lt;=NDWI&lt;=0,4</b>	<b>Rows, columns:</b> 23, 2	<b>Degrees freedom:</b> 22	<b>Chi<sup>2</sup>:</b> 548.63	<b>p (no assoc.):</b> 5.0617E-102
<b>Fisher's exact</b>						
Not available						
<b>Other statistics</b>						
<b>Cramer's V:</b>	0.10559	<b>Contingency C:</b>	0.105			

Tabla 6-2 Análisis significancia estadística aguas someras y profundas laguna Jachucoposa

Año	T1		T2		T3		T4	
	NDWI >=0,4	0,2<=NDWI<=0,4	NDWI >=0,4	0,2<=NDWI<=0,4	NDWI >=0,4	0,2<=NDWI<=0,4	NDWI >=0,4	0,2<=NDWI<=0,4
1999	305.2	229.5	353.8	97.8	282.1	245.9	220.8	241.8
2000	396.0	185.9	272.2	78.5	384.7	196.6	203.6	171.1
2001	173.9	272.3	296.1	111.0	243.4	265.5	184.4	206.8
2002	92.6	267.2	249.5	81.7	272.3	232.2	131.4	300.2
2003	164.9	317.5	237.6	147.2	126.1	127.8	79.2	135.4
2004	140.5	287.8	187.7	137.4	254.4	149.0	65.0	186.7
2005	303.2	182.1	270.3	79.9	218.0	182.3	164.5	150.8
2006	105.8	169.0	223.1	83.3	203.7	95.5	69.7	114.5
2007	101.2	189.9	193.8	80.6	139.2	115.2	89.3	80.6
2008	105.3	85.1	161.4	61.5	169.5	98.1	87.4	91.5
2009	112.7	99.3	196.7	66.9	177.4	131.9	80.6	59.0
2010	175.1	82.7	189.2	71.8	186.3	72.1	93.2	56.2
2011	217.4	166.8	315.4	106.3	225.9	146.3	91.8	116.1
2012	108.2	108.5	237.7	94.1	205.9	131.2	87.0	110.9
2013	86.0	106.9	281.2	94.6	151.0	147.3	87.7	79.1
2014	83.4	154.1	189.6	108.0	183.6	140.2	69.8	136.0
2015	80.1	97.7	232.3	104.3	145.7	105.4	56.9	122.8
2016	124.2	160.3	197.3	107.2	193.1	199.3	86.2	90.0
2017	104.5	115.8	230.3	81.5	218.0	156.7	73.4	93.2
2018	212.2	127.3	294.8	84.2	201.7	123.7	97.5	71.9
2019	181.6	114.5	242.2	80.4	215.8	93.2	118.3	112.5
2020	117.0	153.2	243.5	73.0	187.7	93.8	111.9	129.8
2021	125.3	135.2	237.9	62.5	185.8	95.5	122.8	135.9

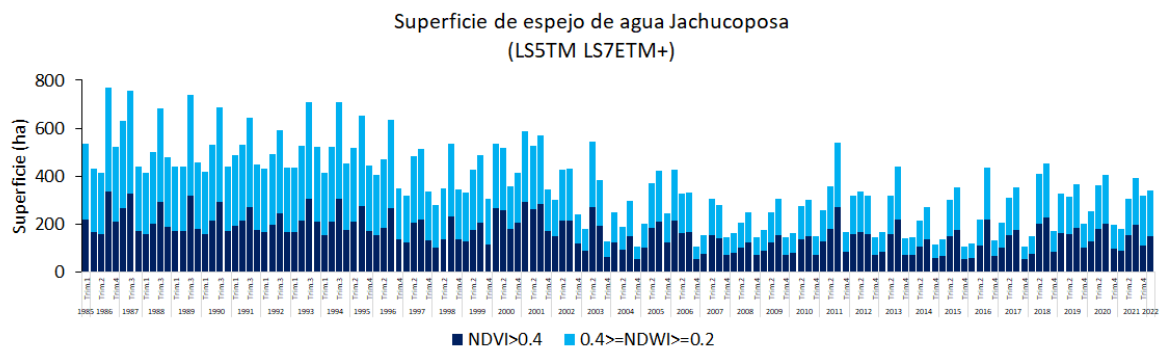


Figura 6-27 Variabilidad histórica de superficie lagunar sistema Jachucoposa (aguas someras y aguas profundas)

## **Plan de Enriquecimiento y Gestión de Condiciones de Hábitat**

La presente acción considera la definición de actividades necesarias para la implementación del Plan de Enriquecimiento y Gestión de condiciones de hábitat en aquellos sectores donde se verifica pérdida de vegetación (30 hectáreas), divididos entre los sectores de San Pablo y Tankatankani (en adelante "Plan de enriquecimiento y gestión").

El plan de enriquecimiento y gestión se propone implementar en tres etapas, donde la primera etapa corresponde a desarrollo de Estudios iniciales, Diseño conceptual y Diseño plan piloto; una segunda etapa correspondiente a la implementación y operación del Plan Piloto en el sector de Tankatankani (1,9 há); mientras la tercera etapa corresponde a la implementación del plan en las 28,1 hectáreas restantes de manera de alcanzar la implementación del plan en las 30 hectáreas. Todas las etapas serán implementadas en conjunto con la Asociación Indígena Aymara Salar de Coposa (AIASC).

La definición del sector de Tankatankani para la implementación del plan piloto responde a las ventajas comparativas que presente este sector respecto de los demás sitios (San Pablo), específicamente en lo que respecta a la infraestructura para la conducción de agua que se requiere habilitar, la cual se implementará a partir de la infraestructura que actualmente se dispone en el sector de Jachucoposa, lo que permite acotar los plazos de implementación de la medida.

Considerando que el sector de Coposito corresponde a un sector de control de vegetación, asociado a la medida de riego que se ejecuta en el sector de Jachucoposa desde 2008, la implementación del Plan de Enriquecimiento y Gestión en este sector se podrá implementar previa aprobación por parte de la autoridad (SMA/SEA).

Las superficies de implementación del Plan de Enriquecimiento y Gestión de condiciones de hábitat corresponden a las siguientes:

- Tankatankani, 1,9 hectáreas (Plan piloto).
- San Pablo, 28,1 hectáreas.

Entre las actividades a desarrollar en cada sector<sup>1</sup> se consideran las siguientes:

- a) Levantamiento en conjunto con la comunidad de la memoria histórica de lo que existía en cada sector.

---

<sup>1</sup> El detalle de las medidas a implementar será definido en función de los estudios de detalle que se desarrollen en la primera etapa del Plan de Enriquecimiento y Gestión, especialmente los resultados de la identificación y cuantificación de individuos por especie que se requerirá reproducir o manejar.

- b) Habilitación de flujo de agua al inicio de cada área.
- c) Construcción de diques de retención en el cauce.
- d) Instalación de cintas con manta de capilaridad en la periferia de las áreas.
- e) Implementar (donde sea necesario) entubamiento u otras técnicas, que permitan reducir la velocidad de escurrimiento del agua, apoyándola en algunos sectores para poder distribuirla en una mayor superficie.
- f) Construcción de pequeños diques con champas sobre los cursos de escurrimiento natural y la vegetación existentes.
- g) Rescate de materia orgánica de los sectores (mejorador de suelo o enmienda).
- h) Aplicación de enmiendas según sea necesario.
- i) Habilitación de mecanismos que permitan disminuir los efectos de la erosión eólica.
- j) Instalación de tubos piezométrico-someros para control y monitoreo continuo de nivel freático en sectores de aplicación de agua.
- k) Proyecto de propagación de especies.

A continuación se presenta un detalle del Plan de Enriquecimiento y Gestión de condiciones de hábitat.

Etapa	Plazo de ejecución	Forma de implementación
<b>Primera Etapa: Estudios iniciales, Diseño conceptual de la medida y de plan piloto</b>	<p><b>Plazo total primera etapa:</b> 10 meses desde la aprobación del PdC</p> <p><u>Desglose de las subetapas:</u></p> <p><b>I. Estudios iniciales y Diseño conceptual:</b> 3 meses durante la temporada estival 2022-2023.</p> <p><b>II. Diseño de detalle:</b> 4 meses desde el término de la etapa de estudios y diseño conceptual.</p> <p><b>III. Definición de plan de monitoreo:</b> comienza en paralelo al diseño de detalle y se extiende por 7 meses.</p>	<p><b>I. Estudios iniciales y Diseño conceptual del Plan de enriquecimiento y gestión</b></p> <p>a. Contempla el desarrollo de estudios iniciales relacionados con levantamiento de información de terreno tales como:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Topografía de detalle: Se consideran trabajos de micro topografía para estimar movimientos de agua como relleno de suelos y/o cuello plantas tipo cojín.</li> <li>2. Vegetación específica (COT) para polígonos de trabajo: Coberturas reales dentro de polígonos de trabajo, estados sanitarios, etc.</li> <li>3. Estudio de suelos detallado: Para la descripción detallada de suelos, definición de mapa de</li> </ol>

Etapa	Plazo de ejecución	Forma de implementación
		<p>suelos y su relación con COT de detalle de los polígonos de trabajo y control. Definición de enmiendas para aplicación y/o empréstito.</p> <p>4. Análisis de recurrencia histórica de la vegetación en cada sector, que permita definir con mayor certeza los sectores específicos donde se implemente el Plan de Enriquecimiento y Gestión.</p> <p>Se contempla realizar un diseño conceptual de la acción, para lo que se considera definir en conjunto con la AIASC, a través del CMAP, los sectores específicos de San Pablo y Tankatankani, a mejorar, estimación preliminar de caudal requerido, especies objetivo, acciones de manejo requeridas.</p> <p><b><u>II. Diseño de detalle del Plan Piloto de enriquecimiento y gestión</u></b></p> <p>a. El diseño de detalle de la medida consiste en identificar los requerimientos específicos para la implementación de un plan piloto de la medida en el sector de Tankatankani, incluyendo, definir y diseñar el sistema de transporte, alimentación, almacenamiento y conducción de agua; la identificación y cuantificación de individuos por especie que se requerirá reproducir o manejar, definición y diseño de medidas específicas a implementar.</p> <p><b><u>III. Definición de plan de monitoreo</u></b></p>

Etapa	Plazo de ejecución	Forma de implementación
		<p>b. Considera la definición de plan de monitoreo específico, considerando la identificación y marcado de parcelas y transectos en cada sector.</p>
<p><b>Segunda Etapa: Implementación de y operación del Plan Piloto</b></p>	<p><b>Plazo total segunda etapa:</b> 4 meses durante la temporada estival 2023-2024.</p> <p><u>Desglose de las subetapas:</u></p> <p><b>IV. Implementación obras requeridas para el piloto</b></p> <p><b>V. Inicio de etapa de operación de plan piloto</b></p>	<p><b><u>IV. Implementación obras requeridas para el piloto</u></b></p> <p>c. Considera la implementación de actividades específicas que permitan el inicio de ejecución del Plan de enriquecimiento y gestión, de acuerdo al diseño de detalle definido por el CMAP.</p> <p>Al respecto, esta etapa comprende la Construcción e instalación de obras de transporte, almacenamiento y conducción de agua.</p> <p><b><u>V. Inicio de etapa de operación de plan piloto</u></b></p> <p>d. Corresponde al inicio de la etapa de operación del plan piloto.</p> <p>Al respecto, esta etapa comprende las siguientes actividades generales, las que se encuentran sujetas al diseño de detalle, considerando la estacionalidad, y cronograma o carta gantt que se establezca en dicha etapa (diseño de detalle):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementación de actividades de manejo y monitoreo definidas en etapas anteriores.</li> <li>• Análisis de resultados preliminares de implementación (aspectos de diseño, hidráulicos, irrigación, pero no de resultados en vegetación).</li> </ul>





Etapa	Plazo de ejecución	Forma de implementación

### **Tercera Etapa**

La tercera etapa del Plan de Enriquecimiento y Gestión de condiciones de hábitat será implementada en el sector de San Pablo. Entre las actividades que se considera desarrolla en cada uno de los sectores corresponde a los siguientes:

1. Diseño de detalle del Plan
2. Plan de monitoreo del Plan
3. Implementación obras requeridas para el Plan
4. Implementación del Plan
5. Operación del Plan

Preliminarmente se considera que el agua para la implementación del Plan de Enriquecimiento y Gestión se obtenga desde el sector de Coposa Sur, sin embargo, el traslado de agua hacia el sector de San Pablo requiere del estudio en detalle de las características físico-químicas de los distintos pozos que se dispone como potencial fuente de abastecimiento, para posteriormente desarrollar el diseño (e implementación) de la infraestructura que permitirá la implementación del Plan.

En consideración de lo anterior, la tercera etapa se extiende más allá de los plazos contemplados en el Plan de Acciones y Metas del Programa de Cumplimiento Ambiental. El plazo aproximado de implementación para el sector de San Pablo es de 24 meses, posteriores a la implementación del Plan Piloto.