



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**ANÁLISIS DEL CAMBIO CLIMÁTICO ENTRE 1900 Y 2020 EN LA
REGIÓN DE ATACAMA, CHILE**

POR

Cristóbal Rodrigo Henríquez Riquelme

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título de Ingeniero Civil

Profesora Guía
Alejandra Stehr Gesche

Septiembre 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Cristóbal Rodrigo Henríquez Riquelme

© 2024 Cristóbal Rodrigo Henríquez Riquelme

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

El cambio climático representa uno de los desafíos más apremiantes del siglo XXI, con impactos significativos en los sistemas naturales y humanos a nivel global. Las alteraciones en los patrones de temperatura, precipitación y eventos extremos están reconfigurando el panorama ambiental en diversas regiones del mundo. En este contexto, las zonas áridas y semiáridas, como la Región de Atacama, son particularmente vulnerables a estas transformaciones climáticas, dada su inherente escasez de recursos hídricos y la fragilidad de sus ecosistemas. La comprensión detallada de las tendencias climáticas locales se vuelve, por tanto, crucial para la planificación y adaptación a largo plazo.

Esta investigación se enfocó en la evaluación e identificación de tendencias de cambio climático en la región de Atacama entre 1900 y 2020. Utilizando datos de precipitaciones, caudales y temperaturas provenientes de la Dirección General de Aguas y los Anuarios Climatológicos, se aplicaron métodos estadísticos no paramétricos como los tests de Mann-Kendall, Sen y Pettitt para detectar y cuantificar tendencias significativas y cambios abruptos en las series temporales. Los resultados revelaron patrones claros: una tendencia general decreciente en los caudales, especialmente en la cuenca del río Copiapó; un aumento significativo en las temperaturas máximas y medias; y una tendencia predominantemente decreciente en las temperaturas mínimas. Las precipitaciones, aunque con alta variabilidad, mostraron algunas tendencias puntuales de disminución en invierno y aumento en otoño. Adicionalmente, se desarrolló un modelo de regresión para predecir caudales máximos instantáneos anuales, comparando enfoques lineales y no lineales. El modelo no lineal, demostró mayor precisión, especialmente en la predicción de eventos de caudal alto. Sin embargo, su aplicación se vio limitada por la disponibilidad de datos. Estos hallazgos no solo proporcionan una base sólida para comprender los cambios climáticos en la Región de Atacama, sino que también ofrecen herramientas valiosas para la gestión de los recursos hídricos y la planificación de infraestructura resiliente. La investigación destaca la urgencia de implementar estrategias de adaptación al cambio climático en esta región vulnerable, considerando las tendencias observadas en las variables hidrometeorológicas clave.

ABSTRACT

Climate change represents one of the most pressing challenges of the 21st century, with significant impacts on natural and human systems globally. Alterations in temperature patterns, precipitation, and extreme events are reshaping the environmental landscape in various regions of the world. In this context, arid and semi-arid zones, such as the Atacama Region, are particularly vulnerable to these climatic transformations, given their inherent scarcity of water resources and the fragility of their ecosystems. A detailed understanding of local climate trends therefore becomes crucial for long-term planning and adaptation.

This research focused on the evaluation and identification of climate change trends in the Atacama Region between 1900 and 2020. Using precipitation, streamflow, and temperature data from the Dirección General de Aguas and the Anuarios Climatológicos, non-parametric statistical methods such as the Mann-Kendall, Sen and Pettitt tests were applied to detect and quantify significant trends and abrupt changes in the time series. The results revealed clear patterns: a general decreasing trend in streamflows, especially in the Copiapó river basin; a significant increase in maximum and mean temperatures; and a predominantly decreasing trend in minimum temperatures. Precipitation, although highly variable, showed some specific trends of decrease in Winter and increase in autumn. Additionally, a regression model was developed to predict annual instantaneous maximum streamflows, comparing linear and non-linear approaches. The non-linear model demonstrated greater accuracy, especially in predicting high flow events. However, its application was limited by data availability. These findings not only provide a solid basis for understanding climate changes in the Atacama Region, but also offer valuable tools for water resource management and resilient infrastructure planning. The research highlights the urgency of implementing climate change adaptation strategies in this vulnerable Region, considering the observed trends in key hydrometeorological variables.

DEDICATORIA

A mis padres, fuentes inagotables de amor y paciencia, su paciencia infinita ha sido mi mejor maestra. A mi pareja, por su incondicional apoyo y por creer en mí en cada paso de este camino. A mis amigos, mi segunda familia, por acompañarme en risas y lágrimas, dentro y fuera de la universidad.

Y especialmente a mi tío Hugo, aunque ya no estés aquí, tu recuerdo perdura. Este logro también es tuyo, y aunque no puedas verlo, sé que de alguna manera lo celebras conmigo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a la Asociación Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), por el financiamiento otorgado mediante el Proyecto Anillo ATE220021 “ Climate change and the sociohydrology of floods”.

También quiero agradecer a mi profesora guía, Alejandra Stehr, por su dedicación, tiempo y paciencia a lo largo de toda mi investigación. Su orientación, buenos consejos y disposición fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Finalmente agradecer a la profesora Maricarmen Guerra, quien formó parte de la comisión evaluadora de este trabajo, por su disposición, tiempo y valiosos consejos. Su apoyo y contribución fueron esenciales para llevar a buen término este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivo general	2
1.3. Objetivos específicos.....	2
1.4. Metodología de trabajo.....	2
1.5. Principales resultados	4
1.6. Organización de la Memoria de Título.....	4
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
2.1. Introducción.....	6
2.2. Contexto climático de la región de Atacama.....	6
2.3. Impacto del cambio climático en la región.....	7
2.4. Pruebas estadísticas: Test de Man-Kendall y Test de Sen.....	8
2.5. Relación entre caudales medios diarios y caudales máximos instantáneos.....	9
2.6. Planteamiento del problema.	9
2.7. Conclusiones.....	10
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	11
3.1. Introducción.....	11
3.2. Área de estudio.	11
3.3. Estaciones hidrometeorológicas.	15
3.4. Análisis de tendencia.....	22

3.4.1.	Test de Mann-Kendall	22
3.4.2.	Test de Sen.....	24
3.4.3.	Test de Pettitt.....	25
3.5.	Modelo de regresión multivariable.....	26
3.5.1.	Calibración.....	26
3.5.2.	Validación.....	28
3.6.	Implementación del modelo de regresión.....	31
3.7.	Conclusiones.....	31
CAPÍTULO 4: RESULTADOS		32
4.1.	Introducción.....	32
4.2.	Análisis de tendencias.	32
4.2.1.	Precipitaciones.....	32
4.2.2.	Caudales.....	35
4.2.3.	Temperaturas.	43
4.3.	Modelo de regresión multivariable.....	49
4.3.1.	Calibración.....	50
4.3.2.	Validación.....	52
4.3.3.	Implementación del modelo en estaciones con periodos no aforados de caudales máximos instantáneos y análisis de tendencias.	54
4.4.	Conclusiones.....	56
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES		58
REFERENCIAS		60
ANEXO 1.1. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....		65
ANEXO 4.1. Mapas de resultados de análisis de tendencias recientes.....		66
ANEXO 4.2. Mapas de resultados de análisis de tendencias históricas.....		79

ANEXO 4.3. Resultados de métodos estadísticos en tendencias recientes.	92
ANEXO 4.4. Resultados de métodos estadísticos de tendencias históricas.	111
ANEXO 4.5. Magnitud de cambios significativos detectados por test de Pettitt.	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Distribución de uso de suelos y vegetación en la región de Atacama.....	13
Tabla 3.2. Distribución de climas de la región de Atacama según clasificación Köppen-Geiger (Sarricolea et al., 2017).....	13
Tabla 3.3. Estaciones meteorológicas DGA en la región de Atacama.	15
Tabla 3.4. Estaciones fluviométricas DGA en la región de Atacama.	16
Tabla 3.5. Estaciones pluviométricas DGA en la región de Atacama.....	17
Tabla 3.6. Estaciones meteorológicas de los anuarios climatológicos en la región de Atacama.	18
Tabla 3.7. Estaciones pluviométricas de los anuarios climatológicos en la región de Atacama.	18
Tabla 3.8. Proceso de construcción de variables hidrometeorológicas analizadas.....	21
Tabla 4.1. Características de estaciones pluviométricas en el análisis de tendencias recientes.	33
Tabla 4.2. Características de estaciones pluviométricas en el análisis de tendencias históricas.	34
Tabla 4.3. Características de estaciones fluviométricas en el análisis de tendencias recientes.	36
Tabla 4.4. Características de estaciones fluviométricas en el análisis de tendencias históricas.	40
Tabla 4.5. Características de estaciones climatológicas en el análisis de tendencias recientes.	43
Tabla 4.6. Características de estaciones climatológicas en el análisis de tendencias históricas.	46
Tabla 4.7. Características morfométricas de cuencas del modelo de regresión.	49
Tabla 4.8. Coeficientes asociados a variables independientes del modelo lineal.....	50
Tabla 4.9. Coeficientes asociados a variables independientes del modelo no lineal.....	51
Tabla 4.10. Bondad de ajuste para ambos modelos en la calibración.	51
Tabla 4.11. Bondad de ajuste para ambos modelos en la validación.	52
Tabla 4.12. Resultados de análisis de tendencias en estaciones rellenadas con el modelo de regresión no lineal.	56

Tabla A.4.3.1. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de precipitaciones máximas diarias.....	92
Tabla A.4.3.2. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de precipitaciones totales.....	95
Tabla A.4.3.3. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de caudales máximos instantáneos.....	99
Tabla A.4.3.4. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de caudales medios.....	103
Tabla A.4.3.5. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de temperaturas máximas extremas	107
Tabla A.4.3.6. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de temperaturas máximas media.....	108
Tabla A.4.3.7. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de temperaturas medias.....	108
Tabla A.4.3.8. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de temperaturas mínimas extremas.....	109
Tabla A.4.3.9. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de temperaturas mínimas medias.....	110
Tabla A.4.4.10. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricos de precipitaciones máximas diarias.....	111
Tabla A.4.4.11. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricos de precipitaciones totales.....	111
Tabla A.4.4.12. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricos de caudales máximos instantáneos.....	112
Tabla A.4.4.13. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricos de caudales medios.....	114
Tabla A.4.4.14. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricos de temperaturas máximas extremas.....	116
Tabla A.4.4.15. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricos de temperaturas máximas medias.....	116

Tabla A.4.4.16. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricos de temperaturas medias.....	117
Tabla A.4.4.17. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricos de temperaturas mínimas extremas.....	118
Tabla A.4.4.18. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricos de temperaturas mínimas medias.....	118
Tabla A.4.5.19. Magnitud de cambio significativo detectado en los caudales máximos instantáneos por test de Pettitt en el análisis de tendencias recientes.....	120
Tabla A.4.5.20. Magnitud de cambio significativo detectado en los caudales medios por test de Pettitt en el análisis de tendencias recientes.	121
Tabla A.4.5.21. Magnitud de cambio significativo detectado en los caudales máximos instantáneos por test de Pettitt en el análisis de tendencias históricas.....	122
Tabla A.4.5.22. Magnitud de cambio significativo detectado en los caudales medios por test de Pettitt en el análisis de tendencias históricas.	122
Tabla A.4.5.23. Magnitud de cambio significativo detectado en las temperaturas medias por test de Pettitt en el análisis de tendencias recientes.....	123
Tabla A.4.5.24. Magnitud de cambio significativo detectado en las temperaturas extremas por test de Pettitt en el análisis de tendencias recientes.	124
Tabla A.4.5.25. Magnitud de cambio significativo detectado en las temperaturas medias por test de Pettitt en el análisis de tendencias históricas.....	124
Tabla A.4.5.26. Magnitud de cambio significativo detectado en las temperaturas extremas por test de Pettitt en el análisis de tendencias históricas.	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. División hidrológica y administrativa de la región de Atacama.....	12
Figura 3.2. Clasificación de usos de suelos y regionalización climática en la región de Atacama.....	14
Figura 3.3. Ubicación geográfica de las estaciones hidrometeorológicas. La imagen a) son las estaciones que pertenecen a la Dirección General de Aguas y la imagen b) son las estaciones de los Anuarios Climatológicos.	20
Figura 4.1. Tendencias estacionales en precipitaciones totales (línea segmentada café) en la estación pluviométrica Caldera (DMC). Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa	35
Figura 4.2. Tendencias estacionales recientes en caudales máximos instantáneos (línea segmentada café) en la estación Río Copiapó En Pastillo. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.....	37
Figura 4.3. Tendencias estacionales recientes en caudales medios (línea segmentada café) en la estación Río Copiapó En La Puerta. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.	38
Figura 4.4. Tendencias estacionales recientes en caudales medios (línea segmentada café) en la estación Río Copiapó En Angostura. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.	38
Figura 4.5. Tendencias estacionales históricas en caudales máximos instantáneos (línea segmentada café) en la estación fluviométrica Río Copiapó En La Puerta.....	41
Figura 4.6. Tendencias estacionales históricas en caudales medios (línea segmentada café) en la estación fluviométrica Río Copiapó En La Puerta.....	41
Figura 4.7. Tendencias recientes estacionales en temperaturas máximas medias (línea segmentada color rojo), temperaturas medias (línea segmentada color verde) y temperaturas mínimas medias (línea segmentada color azul) en la estación Santa Juana. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.	44
Figura 4.8. Tendencias recientes estacionales en temperaturas máximas extremas (línea segmentada color rojo) y temperaturas mínimas extremas (línea segmentada color azul) en la estación Santa Juana. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.	44

Figura 4.9. Tendencias históricas estacionales en temperaturas máximas medias (línea segmentada color rojo), temperaturas medias (línea segmentada color verde) y temperaturas mínimas medias (línea segmentada color azul) en la estación climatológica Caldera. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.....	47
Figura 4.10. Tendencias históricas estacionales en temperaturas máximas extremas (línea segmentada color rojo) y temperaturas mínimas extremas (línea segmentada color azul) en la estación climatológica Caldera. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.....	47
Figura 4.11. Relación entre caudal máximo instantáneo anual observado y modelado en escala logarítmica.	53
Figura 4.12. Series de tiempo de caudales máximos instantáneos anuales observados y modelados.....	54
Figura 4.13. Implementación de modelos de regresión en estaciones no aforadas.....	55
Figura A.4.1.1. Mapa de tendencias anuales recientes de precipitaciones en la región de Atacama, Chile.	66
Figura A.4.1.2. Mapa de tendencias anuales recientes de caudales en la región de Atacama, Chile.....	67
Figura A.4.1.3. Mapa de tendencias anuales recientes de temperaturas extremas en la región de Atacama, Chile.....	68
Figura A.4.1.4. Mapa de tendencias anuales recientes de temperaturas medias en la región de Atacama, Chile	69
Figura A.4.1.5. Mapa de tendencias estacionales recientes de precipitaciones máximas diarias en la región de Atacama, Chile.....	70
Figura A.4.1.6. Mapa de tendencias estacionales recientes de precipitaciones totales en la región de Atacama, Chile.	71
Figura A.4.1.7. Mapa de tendencias estacionales recientes de caudales máximos instantáneos en la región de Atacama, Chile.....	72
Figura A.4.1.8. Mapa de tendencias estacionales recientes de caudales medios en la región de Atacama, Chile.....	73
Figura A.4.1.9. Mapa de tendencias estacionales recientes de temperaturas máximas extremas en la región de Atacama, Chile	74

Figura A.4.1.10. Mapa de tendencias estacionales recientes de temperaturas máximas medias en la región de Atacama, Chile.....	75
Figura A.4.1.11. Mapa de tendencias estacionales recientes de temperaturas medias en la región de Atacama, Chile.	76
Figura A.4.1.12. Mapa de tendencias estacionales recientes de temperaturas mínimas extremas en la región de Atacama, Chile	77
Figura A.4.1.13. Mapa de tendencias estacionales recientes de temperaturas mínimas medias en la región de Atacama, Chile.....	78
Figura A.4.2.14. Mapa de tendencias anuales históricas de precipitaciones en la región de Atacama, Chile.	79
Figura A.4.2.15. Mapa de tendencias anuales históricas de caudales en la región de Atacama, Chile.....	80
Figura A.4.2.16. Mapa de tendencias anuales históricas de temperaturas extremas en la región de Atacama, Chile.....	81
Figura A.4.2.17. Mapa de tendencias anuales históricas de temperaturas medias en la región de Atacama, Chile.....	82
Figura A.4.2.18. Mapa de tendencias estacionales históricas de precipitaciones máximas diarias en la región de Atacama, Chile.	83
Figura A.4.2.19. Mapa de tendencias estacionales históricas de precipitaciones totales en la región de Atacama, Chile.	84
Figura A.4.2.20. Mapa de tendencias estacionales históricas de caudales máximos instantáneos en la región de Atacama, Chile.	85
Figura A.4.2.21. Mapa de tendencias estacionales históricas de caudales medios en la región de Atacama, Chile.....	86
Figura A.4.2.22. Mapa de tendencias estacionales históricas de temperaturas máximas extremas en la región de Atacama, Chile.	87
Figura A.4.2.23. Mapa de tendencias estacionales históricas de temperaturas máximas medias la región de Atacama, Chile.	88
Figura A.4.2.24. Mapa de tendencias estacionales históricas de temperaturas medias en la región de Atacama, Chile.	89

Figura A.4.2.25. Mapa de tendencias estacionales históricas de temperaturas mínimas extremas la región de Atacama, Chile.....	90
Figura A.4.2.26. Mapa de tendencias estacionales históricas de temperaturas mínimas medias la región de Atacama, Chile.	91

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El cambio climático es innegable y sus impactos son cada vez más evidentes, siendo uno de los mayores desafíos de la humanidad hoy. Uno de los efectos más notorios es que se han incrementado, tanto en magnitud como en frecuencia, los eventos hidrológicos extremos como las sequías y las inundaciones en todo el mundo, esto es producido principalmente por la acumulación de gases de efecto invernadero como el CO_2 (IPCC, 2021). Lo anterior ha tenido como consecuencia que la temperatura del planeta ha aumentado desde el periodo preindustrial (1850 – 1900) al presente (2010 – 2019) entre $+0.8^{\circ}C$ a $+1.3^{\circ}C$ (IPCC, 2021), lo cual ha influido en el aumento de precipitaciones extremas (Fowler et al., 2021). En el caso de Chile se encontró que las precipitaciones extremas en las zonas costeras del norte, en el sur y en gran parte de la zona Austral del país presentan una acelerada intensificación (Lagos et al., 2021).

Se han registrado 227 eventos de inundación fluvial en Chile, donde el 71% de estos eventos son asociados a eventos pluviales, un 12% a procesos nivoglaciales, un 10% a procesos volcánicos y la proporción restante de crecidas fluviales de carácter catastrófico se vinculan a deslizamientos e intervenciones antrópicas (Rojas et al., 2015). Estos eventos tienen graves consecuencias en el medio ambiente, la economía y la sociedad. Para enfrentar los impactos del cambio climático en los eventos hidrológicos extremos, se vuelve una necesidad y obligación tomar medidas de adaptación y mitigación a estos sucesos.

El norte de Chile, particularmente la región de Atacama se caracteriza por ser una de las zonas más áridas del mundo, enfrentando una severa escasez hídrica que ha sido exacerbada por el cambio climático en las últimas décadas. Esta situación crítica pone en riesgo la disponibilidad de recursos hídricos vitales para el desarrollo de actividades económicas claves como la minería y la agricultura, además del abastecimiento de agua potable para la población. En este escenario, resulta fundamental comprender a profundidad la dinámica espacio temporal de las variables hidrometeorológicas fundamentales, como son las precipitaciones, caudales y temperaturas en la región de Atacama. Un análisis integral y de largo plazo que evalúe el comportamiento de estas variables es crucial para una gestión

eficiente de los recursos hídricos y la implementación de estrategias de adaptación frente al cambio climático en esta vulnerable zona del país.

El Anexo 1.1 muestra la contribución de la Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

1.2. Objetivo general

Evaluar el comportamiento espacio temporal de las variables hidrometeorológicas en la región de Atacama durante el periodo de 1900 a 2020.

1.3. Objetivos específicos

- Realizar un análisis de tendencias en las series hidrometeorológicas de precipitaciones, caudales y temperaturas en la región de Atacama, Chile, mediante la recopilación y examen de datos históricos.
- Establecer una relación predictiva entre los caudales máximos instantáneos anuales y los caudales medios diarios en las cuencas de la región de Atacama, considerando adicionalmente la influencia de parámetros morfométricos.
- Aplicar el modelo de regresión para reconstruir series de caudales máximos instantáneos y analizar sus tendencias.

1.4. Metodología de trabajo

Realizar un análisis de tendencias en las series hidrometeorológicas de precipitaciones, caudales y temperaturas en la región de Atacama, Chile, mediante la recopilación y examen de datos históricos:

Para recopilar los datos hidrometeorológicos de precipitaciones, caudales y temperatura, se deben identificar las estaciones hidrometeorológicas en la región de Atacama y recopilar los datos históricos. Se utilizaron los datos registrados por la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP), la cual cuenta con una gran cantidad de estaciones que miden estos datos de interés y los datos de los Anuarios Climatológicos de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), siendo esta última la que provee datos más

antiguos para las precipitaciones y temperaturas. Estas fuentes contienen información detallada y actualizada sobre las condiciones hidrometeorológicas en la región. Este enfoque permitirá establecer una línea temporal continua, integra y coherente para el análisis de tendencias a lo largo del tiempo. Luego se sistematizó la información, de manera que los datos recopilados sean organizados en una base de datos. Esta base será el insumo para llevar a cabo los siguientes objetivos específicos.

Las técnicas estadísticas por utilizar para detectar y cuantificar las tendencias en las series de tiempo de precipitaciones y caudales diarias son el test de Mann Kendall, el test de Sen y el test de Pettitt, los cuales fueron aplicados para analizar la estacionariedad en otros estudios (Douglas et al., 2000; Du et al., 2015; Ricchetti, 2018., Osorio, 2022).

Establecer una relación predictiva entre los caudales máximos instantáneos anuales y los caudales medios diarios en las cuencas de la región de Atacama, considerando adicionalmente la influencia de parámetros morfométricos.

En primer lugar, se recopilaron y procesaron los datos hidrométricos necesarios, incluyendo series históricas de caudales medios diarios y caudales máximos instantáneos de las estaciones de estudio en las cuencas de Atacama. Luego, se realizó una caracterización morfométrica de las cuencas, utilizando técnicas de análisis geoespacial y procesamiento de modelos digitales de elevación para obtener parámetros morfométricos relevantes, como el área de drenaje, pendiente media, cota máxima, entre otros. Posteriormente, se llevaron a cabo análisis exploratorios de los datos para examinar las relaciones entre las variables hidrológicas y morfométricas, y se seleccionarán las más relevantes para el desarrollo del modelo predictivo (Dawdy et al., 2012, Ferreira et al., 2012). Se aplicaron técnicas de regresión lineal y no lineal para ajustar modelos empíricos que permiten estimar caudales máximos instantáneos a partir de los caudales medios diarios máximos anuales y las características morfométricas seleccionadas. La calidad y capacidad predictiva de los modelos se evaluó mediante métricas de desempeño adecuadas (Kohavi, 1995; Fill et al., 2003).

Aplicar el modelo de regresión para reconstruir series de caudales máximos instantáneos y analizar sus tendencias.

Para lograr este objetivo se inició identificando los periodos históricos para los que no se dispone de registros de caudales máximos instantáneos en las estaciones de estudio de las cuencas analizadas, verificando la disponibilidad de datos de caudales medios diarios para estos periodos. Se procedió a aplicar el modelo de regresión desarrollado en el objetivo específico anterior, que relaciona los caudales máximos instantáneos con los caudales medios diarios máximos anuales y las características morfométricas de las cuencas. Los datos de caudales medios diarios máximos anuales y las características morfométricas de los periodos históricos no aforados se ingresaron en el modelo de regresión para generar las series sintéticas de caudales máximos instantáneos correspondientes. Posteriormente, se analizó sus tendencias utilizando los métodos estadísticos del primer objetivo específico.

1.5. Principales resultados

A pesar de que el análisis de tendencias en las series temporales se limitó a un número reducido de estaciones debido a la escasez de datos, se reveló una importante cantidad de tendencias significativas en las variables hidrometeorológicas de caudales y temperaturas. Se observó una tendencia general decreciente en los caudales, especialmente en la cuenca del río Copiapó. Las temperaturas mostraron un patrón de cambio consistente, con un aumento significativo en las temperaturas máximas y medias, mientras que las temperaturas mínimas presentaron una tendencia predominantemente decreciente. En cuanto a las precipitaciones, aunque caracterizadas por una alta variabilidad, se identificaron algunas tendencias puntuales, incluyendo una disminución en invierno y un aumento en otoño.

También se desarrolló un modelo de regresión para la predicción de caudales máximos instantáneos anuales. La comparación entre enfoques lineales y no lineales demostró que el modelo no lineal ofrece una mayor precisión, especialmente en la predicción de eventos de caudal alto. Sin embargo, su aplicación se vio limitada por la disponibilidad de datos en la región.

1.6. Organización de la Memoria de Título

Esta memoria de título consta de seis capítulos. En el capítulo 2 se hace una revisión bibliográfica sobre los estudios ya existentes sobre el contexto y los impactos climáticos en

la región de Atacama, donde se plantea el problema principal el cual es el motor de esta investigación. En el capítulo 3 se presenta la metodología utilizada en este trabajo para analizar las tendencias y cambios en las series temporales de las variables hidrometeorológicas y como se construirá la relación predictiva para estimar caudales máximos instantáneos anuales con la finalidad de analizar sus tendencias. En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de los tres métodos estadísticos propuestos para analizar las series temporales y los modelos predictivos con su precisión y aplicación. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta investigación, comparando los resultados con otros estudios en áreas cercanas a la región de Atacama.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Introducción

En el presente capítulo se presenta un análisis de resultados de investigación previas sobre cambio climático en la región de Atacama, Chile, centrándose especialmente en las variables hidrometeorológicas de precipitaciones, caudales y temperaturas. A través de una revisión bibliográfica de la literatura científica y estudios previos relacionados, se buscó establecer un fundamento teórico y conceptual que permita contextualizar los hallazgos de este estudio, identificar patrones históricos y comparar las tendencias detectadas con investigaciones anteriores para validar los resultados obtenidos.

2.2. Contexto climático de la región de Atacama.

La región de Atacama, ubicada en el norte de Chile entre los 25°17' y 29°30' de latitud sur y desde los 68°17' longitud oeste hasta el Océano Pacífico. Tiene una superficie de 75176 km², lo cual equivale al 9.94% del territorio chileno. Se caracteriza por un clima árido y semiárido, producto de la influencia de diversos factores como la latitud, la cordillera de los Andes, la corriente fría de Humboldt y la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (Julia C. et al., 2008). Esta combinación genera condiciones climáticas extremas, con precipitaciones anuales menores a 10 mm, temperaturas elevadas durante el día con una marcada oscilación térmica entre el día y la noche (Plan de Acción Regional de Cambio Climático Región de Atacama, 2020). El aire húmedo proveniente del mar da origen intensas neblinas costeras, popularmente conocida como camanchaca. Hacia el interior de la región, el clima es extremadamente seco, las tasas de humedad relativas son bajas excepto en zonas cultivadas y valles que permiten el ingreso de aire húmedo seco (Squeo et al., 2008)

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es un fenómeno climático que se caracteriza por un calentamiento anormal de las aguas superficiales del océano Pacífico ecuatorial, el cual ha permitido el aumento de precipitaciones cuando este efecto climático se ha hecho presente, permitiendo el desarrollo de vegetación en zonas usualmente desprovistas de ella (Squeo et al., 2008).

El desierto de Atacama corresponde a una de las áreas más áridas del mundo, con mayor radiación solar y gradiente altitudinal (Sarricolea y Romero, 2015). En esta zona la principal oferta hídrica para el desarrollo de las ciudades, yacimientos mineros, producción agrícola y ganadera se encuentra en las cordilleras y altiplanos andinos, dado que en el desierto atacama las precipitaciones anuales son nulas muchos años, e incluso en las zonas costeras las estaciones meteorológicas situadas en Arica (18°S), Iquique (19°C) y Antofagasta (23°C) poseen registros anuales de precipitaciones menores a 3 mm (Romero y Kampf, 2003).

En cuanto a las temperaturas, las temperaturas máximas superan los 40°C en verano, especialmente en zonas interiores y precordilleranas, generando olas de calor que impactan a diversos sectores, tales como la salud humana, la agricultura, la ganadería y el turismo. Por otro lado, las temperaturas mínimas descienden los 0°C, con registros que alcanzan los -10°C en zonas cordilleranas. Esta oscilación térmica también tiene un impacto negativo en la salud humana, agricultura y ganadería.

En la región de Atacama, esta uno de los tres grandes sistemas hidrográficos del territorio nacional, el Sistema Hidrográfico Pacífico Seco, que está constituido por las cuencas del Norte Grande y Norte Chico de Chile. Este se caracteriza por desarrollarse la zona más árida de Latinoamérica. El río Copiapó, uno de los ríos principales de la región, presenta un caudal medio anual bastante constante de 2.28 m³/s. Por otro lado, el río Huasco es el río con mayor caudal en la región, con un caudal medio anual de 6.6 m³/s (GORE Atacama, 2019).

2.3. Impacto del cambio climático en la región.

Meza (2013) analizó las tendencias históricas en las precipitaciones en la zona norte del país entre los años 1955 y 2010, encontrando una disminución estadísticamente significativa de aproximadamente 2 mm por cada década. Las sequías aumentaron en magnitud y frecuencia desde la última década del siglo XX en comparación al resto del periodo analizado. El autor atribuye estos cambios a la variabilidad climática natural del océano Pacífico y al aumento de los gases de efecto invernadero de origen antropogénico (Meza, 2013).

La región hiperárida del Desierto de Atacama ha experimentado evidencias del cambio climático, con condiciones atípicas como precipitaciones locales inusuales que han generado germinación de semillas y desarrollo de vegetación en áreas donde no se había visto este

fenómeno hace nueve décadas, generando desafíos para la infraestructura y la adaptación a estos cambios (Pino et al., 2022).

La región de Atacama será una de las zonas más afectadas por el cambio climático de todo el territorio chileno en las próximas décadas según un estudio realizada por Valdes-Pineda et al. (2016) sobre la gobernanza del agua en Chile. Las proyecciones de todos los modelos climáticos indican una disminución en las precipitaciones y un aumento de las temperaturas para la zona de estudio, con reducciones de hasta un 25% en las precipitaciones media anuales hacia finales del siglo y con aumento de la temperatura máxima diaria que podría superar los 3°C. El retiro de los glaciares se vería intensificado, pudiendo derivar a su total desaparición en pocas décadas. Esto generará complicaciones en sectores productivos por el acceso y uso de agua (Valdés-Pineda et al., 2014).

Las alteraciones en las temperaturas medias y en los regímenes de precipitaciones como resultado del cambio climático están teniendo graves consecuencias sobre la región de Atacama. La disminución sostenida de las lluvias y nevadas invernales están resultando en una reducción de la disponibilidad hídrica y un aumento de la aridez (Meza, 2013), exacerbados por olas de calor más frecuentes e intensas. Las estimaciones futuras, sobre la base de los modelos climáticos globales, indican que las tendencias no sólo continuarán, sino que se intensificarán a lo largo del presente siglo (IPCC, 2022).

Todos estos factores ocasionarían un estrés hídrico extremadamente severo en los ecosistemas y actividades económicas de Atacama (Valdes-Pineda et al., 2014).

2.4. Pruebas estadísticas: Test de Man-Kendall y Test de Sen.

Las tendencias y variabilidad en las series históricas de variables hidrometeorológicas contienen información valiosa sobre cómo el clima de una cuenca hidrográfica está cambiando con el tiempo (Kundzewicz y Robson, 2004). La detección de tendencias en los registros hidrometeorológicos es esencial para caracterizar los impactos hidrológicos del cambio climático tanto en el pasado reciente como para proyectar escenarios futuros (Sonali y Nagesh Kumar, 2013). Considerando la aridez y vulnerabilidad hídrica de la región de Atacama (Valdéz-Pineda et al., 2018), resulta fundamental aplicar pruebas estadísticas robustas para comprender la magnitud de las alteraciones de temperaturas, precipitaciones y caudales en esta zona.

El análisis de series temporales de variables hidrometeorológicas es fundamental para conocer como el cambio climático ha afectado en esta región a los recursos hídricos y condiciones atmosféricas. Las pruebas estadísticas no paramétricas como el Test de Man-Kendall y el Test de Sen son herramientas útiles para detectar cambios significativos a lo largo del tiempo y para determinar si estas tendencias son positivas o negativas.

2.5. Relación entre caudales medios diarios y caudales máximos instantáneos.

La relación entre los caudales medios diarios y los caudales máximos instantáneos ha sido objeto de estudio en diversas investigaciones, por su relevancia para la estimación de eventos extremos y el diseño de infraestructuras hidráulicas. Fill y Steiner (2003) desarrollaron una metodología para estimar caudales máximos instantáneos a partir de datos de caudales medios diarios, basada en la distribución de probabilidad de los caudales y la relación entre los coeficientes de variación de ambas series. Este enfoque ha sido aplicado y adaptado en otros estudios posteriores, como el de Taguas et al. (2008), quienes evaluaron la influencia de las características de las cuencas en la relación entre caudales máximos y medios en una región de España. Por otro lado, Sangal (1983) propuso una ecuación de regresión que considera el área de drenaje y el tiempo de concentración de la cuenca.

Estos estudios sientan las bases para el desarrollo de los modelos necesarios para los estudios de inundación, el diseño de obras hidráulicas y el manejo sostenible de recursos hídricos en cuencas no aforadas a partir de caudales medios diarios y características físicas de las cuencas, lo cual es especialmente relevante en regiones con escasez de datos fluviométricos como Atacama.

2.6. Planteamiento del problema.

El cambio climático antropogénico está modificando los patrones hidrológicos mundiales de manera sin precedentes (Vörösmarty et al. 2000). Latinoamérica se posiciona como uno de los puntos calientes donde se exacerbarán los impactos por eventos hidroclimáticos extremos (Marengo et al., 2014). El territorio chileno no es ajeno ante esta realidad, experimentándose alteraciones en los regímenes históricos de precipitaciones y temperaturas (Valdés-Pineda et al., 2014; Sarricolea et al., 2014).

La investigación de precipitaciones a lo largo de Chile realizada por Pablo Sarricolea y Javier Martin-Vide el año 2014 indica que la zona de estudio posee un coeficiente de concentración (CI) y un coeficiente de variación (CV) muy altos (P. Sarricolea, J. Martin-Vide 2014), esto quiere decir que las precipitaciones anuales se registran en un periodo corto de tiempo y que existe un elevado nivel de incertidumbre respecto a la variabilidad de las precipitaciones y sus proyecciones.

La región de Atacama en Chile presenta condiciones de aridez extrema, siendo una de las zonas más áridas del planeta. Esta característica hace que su clima y recursos hídricos sean altamente variables y vulnerables ante perturbaciones (Hartley y Chong, 2002).

Si bien se ha estimado una tendencia a la baja en las precipitaciones en el norte de Chile en las últimas décadas, sigue existiendo un alto grado de incertidumbre respecto a la variabilidad interanual e interdecadal de las lluvias en la región ante escenarios de cambio climático (Valdés-Pineda et al., 2018). Del mismo modo, no existe un análisis robusto de largo plazo sobre la evolución de temperaturas y caudales en la zona. Esta limitada comprensión dificulta la planificación a futuro del recurso hídrico para las actividades productivas y el consumo humano.

2.7. Conclusiones

En el presente capítulo, se abordó el contexto climático de la región de Atacama, destacando su carácter árido y semiárido. Se identificaron las características climáticas particulares de la región, como las bajas precipitaciones y las altas temperaturas, que hacen que sea especialmente vulnerable al cambio climático.

También se discutió el impacto del cambio climático en la región, con evidencias de disminución en las precipitaciones, aumento de temperaturas y consecuente reducción de la disponibilidad hídrica. Se destacó los desafíos que estos cambios representan para la planificación y gestión de los recursos hídricos en la región. Además, se discutió la importancia de aplicar pruebas estadísticas no paramétricas para analizar las tendencias en variables hidrometeorológicas en una zona donde no existe un estudio robusto del comportamiento del clima a lo largo de los años.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Introducción.

En este capítulo se detallan las metodologías empleadas para el análisis de tendencias en las variables hidrometeorológicas y el desarrollo de un modelo de regresión multivariable en la región de Atacama, Chile. Se aplicaron los tests de Mann-Kendall, Sen y Pettitt para identificar tendencias y cambios significativos en precipitaciones, caudales y temperaturas, las cuales son variables hidrológicas claves para entender el comportamiento de las cuencas y conocer cómo están respondiendo ante forzantes climáticos. Posteriormente, se desarrolló dos modelos de regresión multivariable que permiten predecir caudales máximos instantáneos anuales basándose en caudales medios diarios máximos anuales y características morfométricas de las cuencas, proporcionando una herramienta valiosa para la gestión de recursos hídricos en un contexto de cambio climático.

3.2. Área de estudio.

La región de Atacama, ubicada en el norte de Chile, se ubica entre los 25°17' y 29°30' de latitud sur. Está conformada por tres provincias y nueve comunas, encabezada la ciudad de Copiapó que es la capital regional. La región posee una superficie de 75176 km², equivalente a aproximadamente el 10% del territorio nacional; limita al norte con la región de Antofagasta y al sur con la región de Coquimbo. Según el Censo 2017¹, la población de la región alcanzaba los 286168 habitantes y una densidad de 3.81 habitantes por km². Entre las actividades económicas de la región, destaca la minería, asociada al mineral cobre y al hierro, y la agricultura, asociada al rubro de la agroexportación. Estas dos actividades de la región dependen intensamente de la oferta hídrica en la región.

De acuerdo con la clasificación de la Dirección General de Aguas (DGA), en la región existen diez grandes cuencas hidrográficas, las que a su vez se subdividen en 35 subcuencas y 110 subsubcuencas. Los sistemas hidrográficos de mayor importancia en la región son cuatro,

¹ INE, Estadísticas Regionales del XIX Censo Nacional de Población 2017.

los ríos Copiapó, Huasco, El Salado y Pan de Azúcar². En la Figura 3.1 se observa en la imagen a) las cuencas existentes y en la imagen b) las comunas de la región.

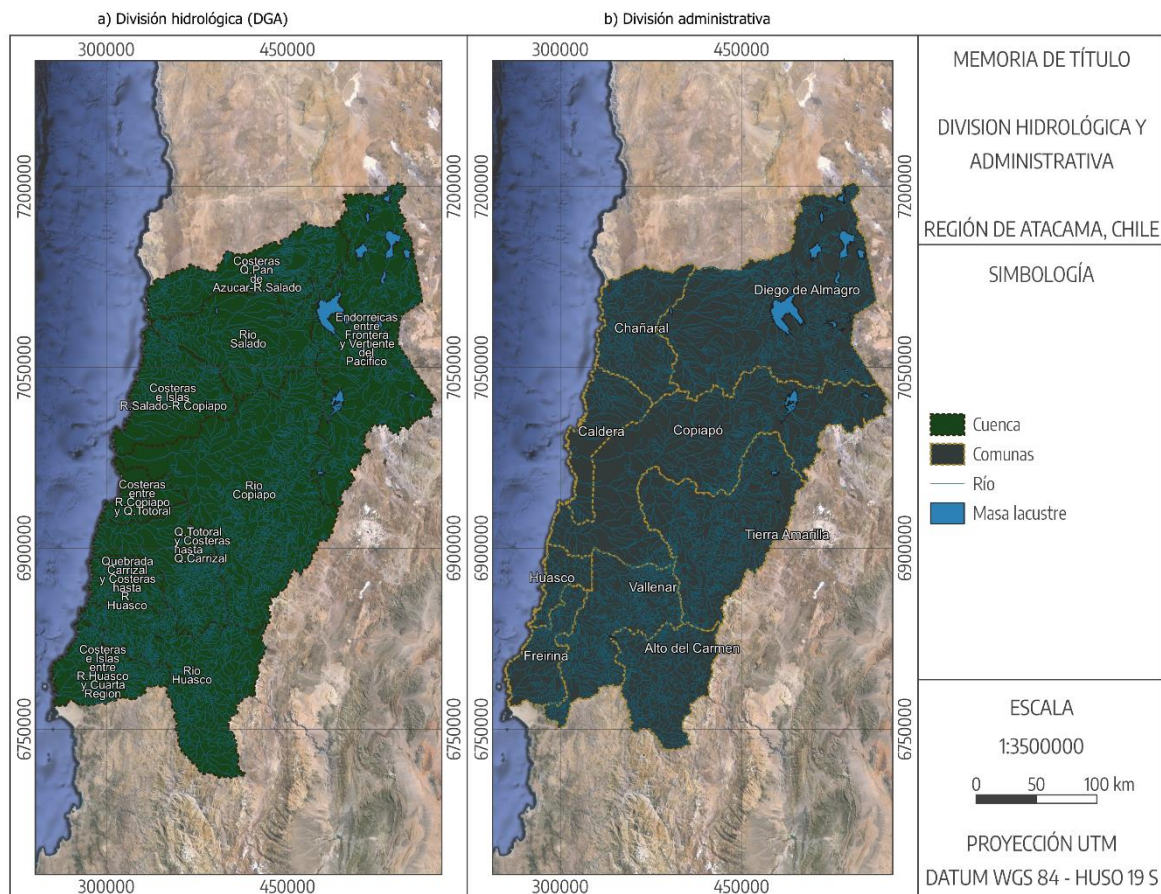


Figura 3.1. División hidrológica y administrativa de la región de Atacama.

En cuanto al uso de suelo en la región, la Corporación Nacional Forestal (CONAF) presentó su última actualización del catastro de uso de suelo y vegetación³ el 2018. La distribución de los diferentes tipos de uso de suelo se detalla en la Tabla 3.1. Por otro lado, la clasificación climática de la región fue extraída de un producto cartográfico con resolución de 1 km x 1 km desarrollado en una investigación de regionalización climática según la clasificación Köppen-Geiger para el territorio nacional (Sarricolea et al., 2017), donde su distribución se

² GORE Atacama, Informe Técnico Sistema Territorial Cuencas Hidrográficas Región de Atacama 2019.

³ CONAF, Catastro de Uso de Suelo y Vegetación 2018.

observa en la Tabla 3.2. Las distribuciones de las áreas geográficas de estos dos productos recién mencionados se observan en la Figura 3.2.

Tabla 3.1. Distribución de uso de suelos y vegetación en la región de Atacama.

Uso de suelo	Superficie (km ²)	Proporción de superficie respecto al total
Praderas y Matorrales	51646.45	68.28%
Áreas Desprovistas de Vegetación	21783.58	28.80%
Salares	994.65	1.32%
Áreas Urbanas e Industriales	461.95	0.61%
Terrenos Agrícolas	374.95	0.50%
Glaciares	92.04	0.12%
Humedales	89.25	0.12%
Cuerpos de Agua	82.12	0.11%
Bosques	35.01	0.05%

Tabla 3.2. Distribución de climas de la región de Atacama según clasificación Köppen-Geiger (Sarricolea et al., 2017).

Clasificación Köppen-Geiger	Denominación	Superficie (km ²)	Proporción de superficie respecto al total
BSk (s)	Clima semiárido de lluvia invernal	19951.30	26.54%
ET	Clima de tundra	19181.04	25.51%
BWk (s)	Clima desértico frío de lluvia invernal	15793.39	21.01%
BSk (s) (i)	Clima semiárido de lluvia invernal e influencia costera	8023.38	10.67%
BSk	Clima semiárido	5616.96	7.47%
ET (s)	Clima de tundra de lluvia invernal	4484.00	5.96%
ET (w)	Clima de tundra de lluvia estival	1546.92	2.06%
BWk	Clima desértico frío	521.58	0.69%
BWh (s)	Clima desértico cálido de lluvia invernal	409.91	0.55%
EF	Clima glacial	82.23	0.11%
BSk (w)	Clima semiárido de lluvia estival	11.55	0.02%

EF (w)	Clima glacial de lluvia estival	10.83	0.01%
BWh	Clima desértico cálido	6.23	0.01%
EF (s)	Clima glacial de lluvia invernal	0.77	0.00%

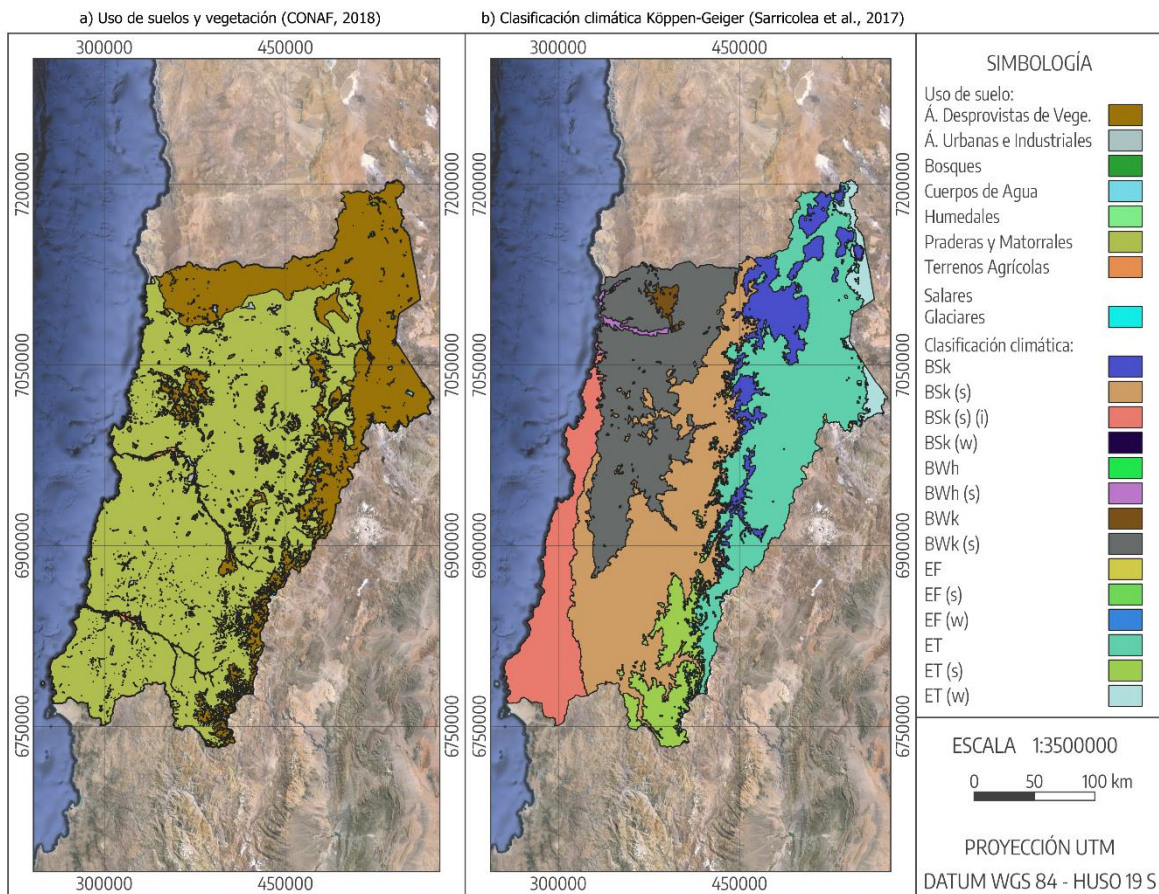


Figura 3.2. Clasificación de usos de suelos y regionalización climática en la región de Atacama.

De acuerdo con esta información, la región de Atacama se caracteriza por un predominio de climas áridos y semiáridos, con una gran parte de su superficie clasificada como clima semiárido de lluvia invernal (BSk (s)) y clima de tundra (ET), lo que refleja las condiciones extremas de aridez. En cuanto al uso de suelos, las praderas y matorrales dominan la superficie, utilizando más de dos tercios de toda la región, seguidos por áreas desprovistas de vegetación con poco menos de un tercio. Este patrón de uso de suelo es consistente con

las limitaciones impuestas por el clima árido, que restringe la disponibilidad de vegetación y, por ende, una vegetación densa. La combinación del clima extremo de la región con un uso de suelo adaptado a estas condiciones refleja por una parte la resiliencia del ecosistema, pero por otra parte subraya la vulnerabilidad de la región ante el cambio climático.

3.3. Estaciones hidrometeorológicas.

Los datos fueron recopilados desde dos fuentes principales para este estudio: la Dirección General de Aguas (DGA) y los Anuarios Climatológicos de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Los datos de la DGA se encuentran en formato digital en archivos Excel y se desarrolló una rutina en el lenguaje de programación R para incorporarlos a la base de datos de manera eficiente y precisa. En cambio, los datos de los anuarios se encontraban escaneados en formato PDF, por lo que se procedió a incorporarlos manualmente a la base de datos para su análisis.

Los datos de los anuarios climatológicos abarcan desde el año 1868 hasta el 2020. Sin embargo, estos contienen muchos años sin datos, especialmente a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX. Por otro lado, los datos de la DGA no son tan antiguos como los de los anuarios, pero sus registros son bastante más continuos y abarcan un mayor número de estaciones. Las ubicaciones geográficas de ambas fuentes se pueden observar en la Figura 3.3, donde la imagen a) pertenece a las estaciones de la Dirección General de Aguas y la figura b) son las estaciones de los anuarios climatológicos.

Para los datos provenientes de la DGA, se identificaron las siguientes estaciones cuyas características y ubicaciones se encuentran en las Tabla 3.3, Tabla 3.4 y Tabla 3.5.

Tabla 3.3. Estaciones meteorológicas DGA en la región de Atacama.

Estación Meteorológica	Ubicación		Elevación (msnm)	Fecha Inicio	Fecha Termino
	Latitud	Longitud			
Canto De Agua	-28.2	-70.9	330	1/2/1987	Vigente
Conay	-28.98	-70.15	1450	1/1/1965	Vigente
Conay En Albaricoque	-28.95	-70.12	1600	1/1/1999	Vigente
Copiapó	-27.35	-70.36	385	1/1/1971	Vigente
El Parral	-28.98	-70.20	1400	1/12/1992	Vigente
El Tránsito	-28.87	-70.28	1100	1/12/1992	Vigente
Freirina	-28.51	-71.08	100	1/5/1987	Vigente

Huasco Bajo	-28.46	-71.23	50	1/12/1992	Vigente
Iglesia Colorada	-28.15	-69.89	1550	1/6/1988	Vigente
La Compañía (Vallenar)	-28.58	-70.80	430	1/12/1992	Vigente
Lautaro Embalse	-27.98	-70.00	1110	2/5/1930	Vigente
Los Loros	-27.83	-70.12	940	1/6/1963	Vigente
Portezuelo El Gaucho	-28.63	-70.05	4000	1/4/2003	Vigente
San Félix	-28.93	-70.46	1150	1/7/1969	Vigente
Santa Juana	-28.67	-70.65	560	1/8/1961	Vigente
Vallenar Dmc	-28.59	-70.76	535	1/1/1997	23/11/2006

Tabla 3.4. Estaciones fluviométricas DGA en la región de Atacama.

Estación Fluviométrica	Ubicación		Elevación (msnm)	Fecha Inicio	Fecha Termino
	Latitud	Longitud			
Canal Mal Paso Después De Bocatoma	-27.52	-70.27	431	1/12/1988	Vigente
Río Astaburuaga En Cono	-27.47	-69.05	4130	1/1/1967	Vigente
Río Barros Negros Antes Junta Valle Ancho	-27.27	-69.00	3965	1/1/1967	Vigente
Río Carmen En El Colorado	-28.98	-70.52	0	1/12/1928	9/5/2002
Río Carmen En El Corral	-29.11	-70.42	2000	1/1/1991	Vigente
Río Carmen En Pte. La Majada	-28.91	-70.45	1075	1/9/1988	Vigente
Río Carmen En Ramadillas	-28.76	-70.48	825	1/1/1975	Vigente
Río Carmen En San Félix	-28.94	-70.46	812	1/1/1969	29/08/2001
Río Conay En Junta Laguna Grande	-28.88	-70.07	0	1/12/1928	1/6/1930
Río Conay En Las Lozas	-28.95	-70.10	1570	1/10/1984	Vigente
Río Copiapó En Angostura	-27.32	-70.84	48	1/1/1969	Vigente
Río Copiapó En Ciudad De Copiapó	-27.37	-70.34	0	1/1/1973	Vigente
Río Copiapó En El Bosque	-27.73	-69.66	0	1/12/1918	9/5/2002
Río Copiapó En La Puerta	-27.81	-70.13	915	1/12/1923	Vigente
Río Copiapó En Lautaro	-27.98	-70.00	1200	1/1/1969	Vigente
Río Copiapó En Mal Paso Aguas Abajo Canal	-27.52	-70.27	431	1/12/1988	Vigente
Río Copiapó En Mal Paso Aguas Arriba Canal	-27.53	-70.27	431	1/12/1927	29/08/2001
Río Copiapó En Pabellón	-27.65	-70.23	0	1/12/1927	9/5/2002
Río Copiapó En Pastillo	-28.00	-69.98	1300	1/9/1967	Vigente
Río Copiapó En San Antonio	-27.87	-70.07	850	1/1/1969	1/10/1987
Río Huasco Antes Junta Río Chollay-Conay	-28.98	-71.18	0	1/12/1928	1/6/1930
Río Huasco En Algodones	-28.73	-70.51	750	1/6/1986	Vigente
Río Huasco En Chanchoquin	-28.90	-70.28	0	1/12/1927	1/11/1930
Río Huasco En Chepica	-28.70	-70.55	600	1/6/1997	8/3/2022
Río Huasco En El Maitén	-28.71	-70.54	701	16/12/2019	Vigente
Río Huasco En Huasco Bajo	-28.47	-71.18	0	1/1/1972	Vigente
Río Huasco En Puente Nicolasa	-28.52	-71.01	167	1/1/1972	Vigente
Río Huasco En Santa Juana	-28.68	-70.65	575	1/12/1914	Vigente
Río Jorquera En Vertedero	-28.05	-69.96	1250	1/1/1968	Vigente
Río La Ola En Vertedero	-26.48	-69.06	0	1/4/1997	Vigente

Río Lamas En El Salto	-27.08	-68.93	4130	1/3/1997	Vigente
Río Manflas Ante Junta Con Río Copiapó	-28.13	-70.00	0	1/9/1985	1/2/1986
Río Manflas En Vertedero	-28.15	-69.99	1550	1/1/1969	Vigente
Río Pulido En Vertedero	-28.09	-69.94	1310	1/1/1968	Vigente
Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	-28.75	-70.48	812	1/1/1969	Vigente
Río Tránsito En Angostura Pinte	-28.95	-70.25	1000	1/1/1968	Vigente
Río Tránsito En El Tránsito	-28.87	-70.28	0	1/12/1929	1/8/1931
Río Tránsito En Los Tambos	-28.95	-70.22	1400	1/12/1958	1/12/1971
Río Valle Ancho Antes Junta Barros Negros	-27.27	-69.01	3950	1/1/1967	Vigente
Río Valle Ancho En La Barrera	-27.14	-69.00	3800	31/12/1979	Vigente
Río Villalobos En Vertedero	-27.21	-69.03	3850	1/12/1979	Vigente

Tabla 3.5. Estaciones pluviométricas DGA en la región de Atacama.

Estación Pluviométrica	Ubicación		Elevación (msnm)	Fecha Inicio	Fecha Termino
	Latitud	Longitud			
Caldera	-27.07	-70.82	15	1/2/1987	Vigente
Canto De Agua	-28.15	-70.86	330	1/2/1987	Vigente
Conay	-28.98	-70.15	1450	1/1/1965	Vigente
Conay En Albaricoque	-28.95	-70.12	1600	1/1/1999	Vigente
Copiapó	-27.35	-70.36	385	1/1/1971	Vigente
Domeyko	-28.95	-70.89	780	1/12/1992	Vigente
El Corral	-29.11	-70.41	1820	1/1/1996	Vigente
El Parral	-28.98	-70.20	1400	1/12/1992	Vigente
El Totoral	-27.90	-70.96	150	1/2/1987	Vigente
El Tránsito	-28.87	-70.28	1100	1/12/1992	Vigente
Elabor Campamento	-27.70	-70.20	750	1/1/1978	Vigente
Freirina	-28.51	-71.08	100	1/5/1987	Vigente
Glaciar Maranceles	-28.46	-69.72	3985	1/9/2019	Vigente
Huasco	-28.47	-71.22	15	1/1/1976	23/11/2006
Huasco Bajo	-28.46	-71.23	50	1/12/1992	Vigente
Iglesia Colorada	-28.15	-69.89	1550	1/6/1988	Vigente
Jorquera En La Guardia	-27.75	-69.67	2000	1/10/1966	Vigente
Junta Del Carmen	-28.76	-70.49	770	1/5/1948	Vigente
Junta Valerianos	-28.90	-70.06	1800	1/7/1969	23/11/2006
La Compañía (Vallenar)	-28.58	-70.80	430	1/12/1992	Vigente
Las Vegas	-26.68	-69.67	2250	1/1/1984	Vigente
Lautaro Embalse	-27.98	-70.00	1110	2/5/1930	Vigente
Los Loros	-27.83	-70.12	940	1/6/1963	Vigente
Los Tambos	-28.98	-70.19	1400	1/11/1958	23/11/2006
Manflas Hacienda	-28.13	-69.97	1410	1/7/1966	Vigente
Pastos Grandes	-27.12	-69.56	2260	1/9/1966	Vigente
Quebrada Potrerillos	-26.41	-69.61	2245	14/07/2021	Vigente

Río Carmen En El Corral	-29.11	-70.42	2000	1/1/1991	Vigente
Río Conay En Las Lozas	-28.95	-70.10	1570	31/12/1899	Vigente
Río Copiapó En La Puerta	-27.81	-70.13	915	1/12/1927	Vigente
Río Copiapó En Pastillo	-28.00	-69.98	1300	1/9/1967	Vigente
Río Huasco En Algodones	-28.73	-70.51	750	1/6/1986	Vigente
Río Manflas En Vertedero	-28.15	-69.99	1550	1/1/1969	Vigente
Río Pulido En Vertedero	-28.09	-69.94	1310	1/1/1968	Vigente
Salar De Pedernales	-26.35	-69.18	3395	18/11/2019	Vigente
San Félix	-28.93	-70.46	1150	1/7/1969	Vigente
Santa Juana	-28.67	-70.65	560	1/8/1961	Vigente
Torin En El Potro	-28.28	-69.75	2800	1/4/1968	23/11/2006
Vallenar Dga	-28.59	-70.74	420	1/1/1971	Vigente
Vallenar Dmc	-28.59	-70.76	535	1/1/1977	23/11/2006

En cuanto a los datos extraídos de los anuarios climatológicos, aunque no tenían información detallada sobre el inicio ni el termino de sus registros, si incluían la ubicación y altura de sus estaciones. Estas características se presentan en la Tabla 3.6 y Tabla 3.7.

Tabla 3.6. Estaciones meteorológicas de los anuarios climatológicos en la región de Atacama.

Estación Meteorológica	Ubicación		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
Caldera	-27.05	-70.85	14
Chañaral	-26.33	-70.62	9
Copiapó Chamonate	-27.30	-70.42	291
Desierto de Atacama	-27.02	-70.13	204
Faro de Caldera	-27.06	-70.88	28
Isla de Chañaral	-29.01	-71.61	48
La Serena La Florida	-29.90	-71.20	142
Potrerosillos	-26.33	-69.48	2850
Univ. De Atacama Copiapó	-27.36	-70.35	362
Vallenar	-28.58	-70.77	469

Tabla 3.7. Estaciones pluviométricas de los anuarios climatológicos en la región de Atacama.

Estación Pluviométrica	Ubicación		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
Caldera	-27.05	-70.85	14
Chañaral (Aeródromo)	-26.33	-70.62	9
Chañaral EAP	-26.35	-70.70	13

Conay Reten	-28.93	-70.10	1430
Copiapó	-27.35	-70.33	380
Copiapó Chamonate	-27.30	-70.42	291
Copiapó Particular	-27.37	-70.30	350
Copiapó SAG	-27.35	-70.33	380
El Parral	-28.97	-70.18	1265
El Pino	-28.48	-71.15	42
El Salvador Tenencia	-26.32	-69.62	2400
El Tránsito Escuela	-28.87	-70.27	1200
Freirina Tenencia	-28.50	-71.08	1200
Fundo San Félix	-26.32	-69.62	893
Inca de Oro Reten	-26.75	-69.92	1575
Incahuasi Reten	-29.22	-71.05	775
Isla San Félix	-26.28	-80.08	44
Juntas del Ríos Carmen	-28.75	-70.50	760
La Pampa El Parral	-28.98	-70.22	1200
Llanta Reten	-26.50	-69.85	1198
Los Loros Reten Sacram.	-27.83	-70.10	948
Los Tambos	-28.97	-70.23	1200
Negro Francisco	-27.47	-69.23	4136
Potrerosillos	-26.42	-69.45	2850
Pto. Huasco Subcomisaria	-28.47	-71.22	4
Pueblo Hundido (Diego de Almagro)	-26.37	-70.08	790
San Félix	-28.92	-70.45	470
San Félix Fundo	-28.93	-70.47	893
San Félix Reten	-28.92	-70.45	470
Sta Juana Camarón	-28.65	-70.70	N/D
Tranque Lautaro	-27.98	-70.02	1380
Vallenar	-28.58	-70.77	469
Vallenar Campex	-28.60	-70.80	420

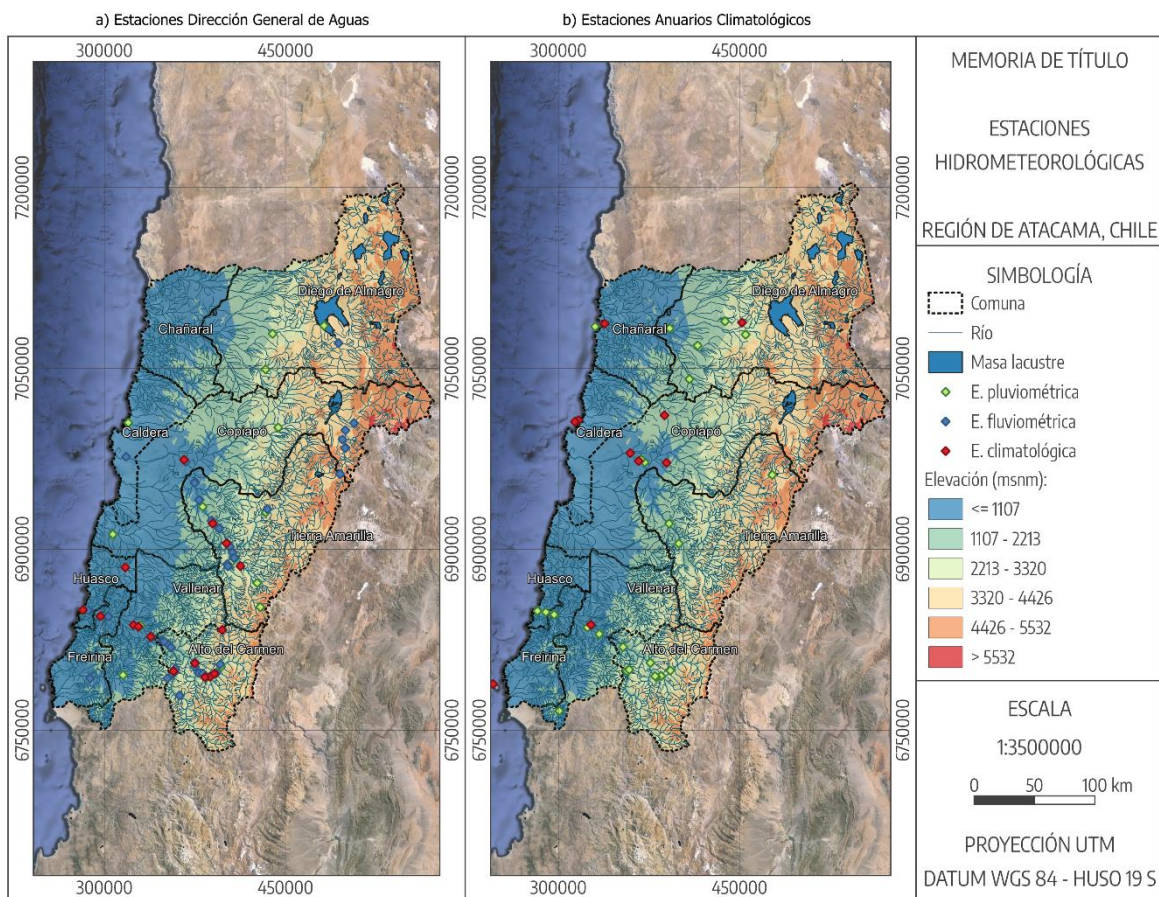


Figura 3.3. Ubicación geográfica de las estaciones hidrometeorológicas. La imagen a) son las estaciones que perteneces a la Dirección General de Aguas y la imagen b) son las estaciones de los Anuarios Climatológicos.

El análisis se realizó utilizando diferentes escalas de tiempo, incluyendo tanto una escala anual como estacional, esto implica que se consideraron datos agregados por año y por estación del año (verano (DEF), invierno (MAM), otoño (JJA) y primavera (SON)).

Si bien, se analizaron los datos de precipitaciones, caudales y temperaturas, estos se examinaron de acuerdo con una estructura específica. Las precipitaciones se desglosaron en precipitaciones totales y máximas diarias, mientras que los caudales se evaluaron mediante caudales medios y máximos instantáneos. En cuanto a las temperaturas, se analizaron las temperaturas medias, desglosadas en máximas medias, medias y mínimas medias; y las temperaturas extremas, divididas en temperaturas máximas extremas y mínimas extremas. El proceso de construcción de cada una de estas variables se observa en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Proceso de construcción de variables hidrometeorológicas analizadas.

Variable hidrometeorológica	Desglose	Metodología de construcción
Precipitaciones	Totales	Se sumaron los valores diarios de precipitación para cada mes, y luego se sumaron esos valores mensuales para obtener la precipitación total en las escalas estacionales y anual.
	Máximas diarias	Se identificó el valor máximo de precipitación en un solo día dentro de cada mes y luego se seleccionó el máximo de estos valores para obtener la precipitación máxima diaria en las escalas estacionales y anual.
Caudales	Medios	Se calcularon los promedios diarios de caudal para cada mes, y luego se promediaron los valores mensuales para obtener el caudal medio en las escalas estacionales y anual.
	Máximos instantáneos	Se seleccionó el valor máximo de caudal instantáneo registrado en un solo día de cada mes. El máximo de estos valores se utilizó para determinar el caudal máximo instantáneo en las escalas estacionales y anual.
Temperaturas	Máximas medias	Se promediaron las temperaturas máximas diarias para cada mes. Los promedios mensuales se calcularon para obtener la temperatura máxima media en las escalas estacionales y anual.
	Medias	Se promediaron las temperaturas medias diarias para cada mes. Luego, estos valores mensuales se promediaron para obtener la temperatura media en las escalas estacionales y anual.
	Mínimas medias	Se promediaron las temperaturas mínimas diarias para cada mes. Posteriormente, estos valores mensuales se promediaron para obtener la temperatura mínima media en las escalas estacionales y anual.
	Máximas extremas	Se seleccionó la temperatura máxima diaria más alta de cada mes. El máximo de estos valores se utilizó para determinar la temperatura máxima extrema en las escalas estacionales y anual.
	Mínimas extremas	Se seleccionó la temperatura mínima diaria más baja de cada mes. El mínimo de estos valores se utilizó para determinar la temperatura mínima extrema en las escalas estacionales y anual.

Los datos extraídos de la Dirección General de Aguas y de los Anuarios Climatológicos estaban a escala diaria y mensual, respectivamente, por lo que fue necesario una conversión

a escalas temporales mayores. Primero, se agregaron los datos a escala mensual y luego de mensual a anual (o estacional). Cada uno de estos pasos de agregación se realizó bajo la condición de que, en ambas conversiones, se mantuviera al menos el 90% de los datos disponibles en la escala a la que se estaba realizando la conversión.

3.4. Análisis de tendencia.

Para llevar a cabo un análisis de tendencias robusto y significativo, se realizaron dos estudios distintos con diferentes criterios de selección de datos:

- Análisis de tendencias recientes (1970 – 2019): Se seleccionaron registros comprendidos entre 1970 y finales de 2019. Este rango de tiempo se eligió con el fin de analizar un periodo extenso, consistente y relativamente reciente, lo que permite una evaluación más precisa de las tendencias actuales y recientes en las variables hidrometeorológicas para la región de Atacama. Se estableció un criterio de inclusión que requería que las estaciones tuvieran al menos un 80% de sus datos disponibles dentro del periodo de estudio
- Análisis de tendencias históricas extendidas: Este análisis amplía el periodo de estudio hacia el pasado manteniendo el año final en 2019 pero extendiendo el inicio hasta el primer registro disponible de cada estación estudiada en el análisis anterior. Adicionalmente, se incorporaron estaciones con registros significativos entre 1900 y 1970.

3.4.1. Test de Mann-Kendall

El test de Mann-Kendall es una prueba no paramétrica utilizada para detectar tendencias monotónicas en series temporales de datos hidrometeorológicos. Fue desarrollado inicialmente por Mann (1945) y posteriormente extendido por Kendall (1975). Esta prueba es especialmente útil para analizar datos que no siguen una distribución normal.

El procedimiento consiste en comparar cada valor de la serie con todos los valores subsiguientes. Se calcula la diferencia entre los pares de observaciones, y se asigna un signo positivo, negativo o cero dependiendo de si la diferencia es positiva, negativa o nula,

respectivamente. Finalmente, el estadístico de la prueba S se obtiene sumando todos estos signos.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3.1)$$

Donde

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{si } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{si } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{si } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Para las series temporales con un número grande de observaciones ($n > 10$), el estadístico S tiende a una distribución normal, cuya varianza está dada por la siguiente expresión:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3.3)$$

Donde t_i es el tamaño del empate del i -ésimo grupo.

El estadístico normalizado Z se calcula de la siguiente forma:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Este valor Z permite determinar la significancia de la tendencia observada en la serie temporal. Este valor se compara con la distribución normal estándar para obtener el valor p , que indica la probabilidad de observar un valor Z tan extremo como el calculado, bajo la hipótesis nula de que no existe una tendencia monótona en la serie de tiempo.

La hipótesis nula (H_0) es que no existe una tendencia en los datos, esto quiere decir que las observaciones son independientes y distribuidas de manera aleatoria. Por el otro lado, la hipótesis alternativa (H_1) es que existe una tendencia monotónica en la serie temporal.

Un valor p menor a un nivel de significancia predefinido indica que se puede rechazar la hipótesis nula, confirmando la presencia de una tendencia significativa en los datos.

La prueba de Mann-Kendall puede obtener dos resultados principales para una serie temporal: tendencia significativa, y ausencia de tendencia. La determinación de estos resultados depende del valor del estadístico Z .

- Tendencia significativa: Una tendencia significativa se detecta cuando el valor p , calculado a partir del estadístico Z , es menor que el nivel de significancia predefinido α . En este caso, se rechaza la hipótesis nula (H_0) de que no hay tendencia y se acepta la hipótesis alternativa (H_1) de que existe una tendencia. Dependiendo del signo del estadístico Z , la tendencia puede ser ascendente (si $Z > 0$) o descendente (si $Z < 0$).
- Ausencia de tendencia: La ausencia de tendencia se concluye cuando el valor p es mayor o igual que el nivel de significancia predefinido α . En este caso, no se puede rechazar la hipótesis nula (H_0), lo que sugiere que no hay suficiente evidencia para afirmar que existe una tendencia en la serie temporal.

3.4.2. Test de Sen

El test de Sen (1968), también conocido como el método de la pendiente de Sen, es una prueba no paramétrica utilizada para estimar la magnitud de una tendencia en una serie temporal. Este método es particularmente útil en estudios hidrológicos y climáticos donde los datos pueden no seguir una distribución normal.

Este método estima la pendiente de una tendencia en una serie temporal, donde obtiene las pendientes entre todos los pares posibles de puntos dados en una serie temporal, y luego calcula la mediana de todas estas pendientes.

Primero se obtiene las diferencias entre pares de datos, donde para cada par de datos x_i y x_j en la serie temporal, se obtiene su diferencia Δx y su respectiva diferencia de tiempo Δy .

Luego se obtiene las pendientes m_{ij} de la siguiente forma:

$$m_i = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.5)$$

Finalmente se procede a obtener la mediana de m , la cual será la pendiente de Sen de la serie temporal.

$$b_{sen} = \text{mediana} \left(m_1, m_2, \dots, m_{\frac{n(n-1)}{2}} \right) \quad (3.6)$$

3.4.3. Test de Pettitt

El test de Pettitt (1979) es una prueba no paramétrica utilizada para detectar cambios en la mediana de una serie temporal en un punto desconocido.

Esta prueba detecta un cambio en la mediana de una serie temporal calculando el estadístico U_k para cada posible punto de cambio k . La fórmula para obtener este estadístico es:

$$U_k = 2 \sum_{i=1}^k r_i - k(n+1) \quad (3.7)$$

Donde r_i es el rango de la observación X_i en la serie temporal.

El estadístico del test $\hat{U}$ es el valor absoluto máximo de U_k :

$$\hat{U} = \max |U_k| \quad (3.8)$$

El punto de cambio probable K se ubica donde $\hat{U}$ tiene su máximo. La probabilidad aproximada para la prueba se calcula según:

$$p = 2 \exp \left(-\frac{6\hat{U}^2}{T^3 + T^2} \right) \quad (3.9)$$

Donde T es el numero de observaciones.

La hipótesis nula (H_0) del test es que no hay cambio en la mediana de la serie temporal. La hipótesis alternativa (H_1) es que hay un cambio en la mediana en un punto específico de la serie.

La prueba de Pettitt puede obtener dos resultados principales para una serie temporal: presencia de un punto de cambio significativo y ausencia de un punto de cambio significativo.

La determinación de estos resultados depende del valor del estadístico $\hat{U}$.

- Presencia de un Punto de Cambio Significativo: Un punto de cambio significativo se detecta de forma análoga al test de Mann-Kendall, esto es cuando el valor p , calculado a partir del estadístico $\hat{U}$, es menor que el nivel de significancia predefinido α . En este caso, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1) de que hay un cambio en la mediana en un punto específico de la serie temporal.
- Ausencia de un punto de cambio significativo: La ausencia de un punto de cambio significativo se concluye cuando el valor p es mayor o igual que el nivel de significancia predefinido α . Esto sugiere que no hay suficiente evidencia para afirmar que existe un cambio en la mediana en la serie temporal.

3.5. Modelo de regresión multivariable.

Se propone un ajuste potencial multivariable para la estimación del caudal máximo instantáneo anual, definido según:

$$Q_{max} = k_0 * X_1^{k_1} * X_2^{k_2} * ... * X_N^{k_N} \quad (3.10)$$

Donde Q_{max} es el caudal máximo instantáneo anual, k_0 es el primer coeficiente de ajuste y k_n es el coeficiente asociado al parámetro X_n , con $n = 1, \dots, N$ parámetros.

3.5.1. Calibración

El proceso de calibración es fundamental para ajustar el modelo de regresión a los datos observados, de esta forma el modelo puede reflejar con precisión la relación entre las variables independientes y la variable dependiente. Calibrar el modelo implica ajustar los

coeficientes del mismo para minimizar las diferencias entre los valores observados y los valores predichos, mejorando la precisión y la fiabilidad del modelo predictivo.

Se utilizó el 50% de los datos disponibles de cada estación fluviométrica de la región de Atacama para calibrar el modelo de regresión multivariable.

Para la selección de las variables independientes X_n , se empleó el método “*stepwise*”, el cual es una técnica iterativa que añade o elimina variables predictoras en el modelo basado en su Criterio de Información Akaike, el cual es una medida de la calidad relativa de un modelo estadístico, cuyo principal objetivo es buscar un equilibrio entre la bondad de ajuste y su complejidad. Este método permite identificar las variables más relevantes que contribuyen a la capacidad predictiva del modelo empírico. Las variables seleccionadas incluyeron características hidrológicas y morfométricas de las cuencas, tales como el caudal medio diario del día que ocurrió el caudal máximo instantáneo anual, el caudal medio diario del día anterior, el caudal medio diario del día posterior, y parámetros morfométricos como al área de las cuencas, cota media, cota máxima, cota mínima y pendiente.

El modelo de regresión se calibró utilizando dos metodologías distintas para obtener los coeficientes k_0 y k_n . La primera metodología utiliza mínimos cuadrados ordinarios (OLS) por medio de la función `lm` (linear model) en R⁴, que minimiza la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los valores modelados. Debido a que el ajuste es potencial, es necesario transformar las variables dependientes e independientes a una escala logarítmica para linealizar el problema. Esto se hace aplicando logaritmos a ambos lados de la ecuación original, resultando en una forma lineal que puede ser tratada con técnicas de regresión lineal.

El método OLS busca ajustar un modelo lineal de la forma:

$$\ln(Q_{IMA}) = \ln(k_0) + k_1 * \ln(X_1) + k_2 * \ln(X_2) + \dots + k_N \quad (3.11)$$

Donde $\ln(Q_{IMA})$ es el logaritmo natural del caudal máximo instantáneo anual, $\ln(k_0)$ es el intercepto en la escala logarítmica, k_n son los coeficientes de las variables independientes logarítmicas $\ln(X_n)$ y ε es el término del error.

⁴ R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

La segunda metodología tiene la ventaja de que conserva la naturaleza no lineal del problema. Se utilizó la función nls (Nonlinear Least Squares) en R, la cual se utiliza para ajustar modelos de regresión no lineales mediante un proceso iterativo. Comienza con estimaciones iniciales de los parámetros y emplea el método de mínimos cuadrados no lineales para ajustar el modelo.

Este algoritmo minimiza la función objetivo:

$$S(\theta) = \sum (y_i - f(x_i, \theta))^2 \quad (3.12)$$

Donde $f(x_i, \theta)$ representa el modelo potencial y θ el vector de parámetros a estimar.

En cada iteración, el algoritmo aproxima la función no lineal por su expansión de Taylor de primer orden para linealizar temporalmente el modelo en torno a los valores actuales de los parámetros y resuelve un problema de mínimos cuadrados lineales mediante el algoritmo de Gauss-Newton. La actualización de los parámetros se realiza según:

$$\theta(k+1) = \theta(k) - (J^T J)^{-1} J^T r \quad (3.13)$$

Donde J es la matriz jacobiana de las derivadas parciales $df/d\theta$, y r es el vector de residuos. El proceso continua iterativamente hasta que las correcciones de los parámetros son mínimos y así alcanzar la convergencia.

3.5.2. Validación

El proceso de validación es esencial para evaluar la precisión y robustez del modelo calibrado en la etapa anterior. Validar el modelo implica aplicar el modelo calibrado a un conjunto independiente de datos y comparar las predicciones del modelo con las observaciones reales. La validación del modelo de regresión multivariable se llevó a cabo utilizando el 50% faltante de datos, aplicando el modelo calibrado a todas las estaciones disponibles.

Las métricas utilizadas para evaluar la bondad de ajuste incluyen el coeficiente de determinación (R^2), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el Percent Bias (PBIAS) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMS).

Coefficiente de determinación (R²):

Se utiliza para evaluar la calidad de ajuste del modelo a los datos observados, indicando que proporción de la variabilidad de una variable dependiente es explicada por las variables independientes del modelo, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$R^2 = 1 - \frac{S_E^2}{S_Y^2} \quad (3.14)$$

Donde S_E^2 corresponde a la variación de la variable dependiente no explicada por el modelo y S_Y^2 corresponde a la variación total de la variable dependiente, estas se obtienen por medio de las siguientes ecuaciones:

$$S_E^2 = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \quad (3.15)$$

$$S_Y^2 = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2 \quad (3.16)$$

Donde n es el número de observaciones, P_i es el valor predicho, O_i es el valor observado y $\bar{O}$ es la media de los valores observados.

Su valor varía entre 0, para un ajuste nulo y 1, para un ajuste perfecto. En general, valores de R^2 mayores a 0.70 permite afirmar que existe una buena concordancia entre dos series de valores.

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (1970) es una métrica utilizada para evaluar la precisión de modelos hidrológicos, esta se define como:

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.17)$$

Donde n es el número de observaciones, P_i es el valor predicho, O_i es el valor observado y $\bar{O}$ es la media de los valores observados.

NSE varía entre $-\infty$ y 1. Una eficiencia de 1 corresponde a un ajuste perfecto, una eficiencia de 0 indica que las predicciones del modelo son tan buenas como la media de los datos observados, y NSE menor a 0 indica que la media tiene mejor capacidad predictiva que el modelo. Valores mayores a 0.75 indican un muy buen ajuste, entre 0.75 y 0.35 se considera satisfactorio y menores a 0.35 se considera no satisfactorio.

Percent Bias (PBIAS):

El PBIAS mide la tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar los valores observados. Se calcula como:

$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3.18)$$

Donde P_i es el valor predicho y O_i es el valor observado. Un PBIAS cercano a 0 indica un modelo sin sesgo sistemático, mientras que valores positivos indican sobrestimación y valores negativos indican subestimación. Valores absolutos del PBIAS menores al 20% indican un buen ajuste, entre 20% y 40% se considera satisfactorio y mayores a 40% se considera no satisfactorio.

Error cuadrático medio (RMS):

El RMS proporciona una medida de la magnitud de los errores de predicción del modelo. Este se obtiene como:

$$RMS = \frac{1}{n} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (3.19)$$

Un RMS más bajo indica un mejor desempeño del modelo, ya que los errores de predicción son menores.

3.6. Implementación del modelo de regresión.

Para implementar el modelo de regresión construido, el cual busca satisfacer el tercer objetivo específico de esta investigación, se centra en la aplicación del modelo de regresión para reconstruir series de caudales máximos instantáneos y analizar sus tendencias. La metodología propuesta para este objetivo comienza con la selección del modelo de regresión óptimo, el cual se elige en función de las bondades de ajuste previamente evaluadas. Este modelo ajustado tiene el objetivo de generar las series de caudales máximos instantáneos anuales en estaciones que cuenten con todas las variables independientes requeridas.

Una vez construidas las series, se aplicarán los métodos estadísticos descritos anteriormente, para identificar y cuantificar las tendencias presentes en las series de caudales máximos.

3.7. Conclusiones.

En el presente capítulo, se detalló la metodología utilizada para analizar las tendencias hidrometeorológicas y desarrollar un modelo de regresión multivariable para predecir el caudal máximo instantáneo anual en la región de Atacama, Chile.

El análisis de tendencias, utilizando los tests de Mann-Kendall, Sen y Pettitt, permitirá identificar y cuantificar las tendencias en las series temporales de precipitaciones, caudales y temperaturas.

El modelo de regresión multivariable se calibró con el 50% de los datos disponibles y seleccionando las variables más relevantes con el método “*stepwise*”. La transformación logarítmica de las variables facilitó un ajuste lineal mediante la metodología de mínimos cuadrados ordinarios (OLS). Por otro lado, la metodología de mínimos cuadrados no lineales utilizando el algoritmo de Gauss-Jordan, proporciona una estimación alternativa de los coeficientes sin necesidad de linealizar el problema.

La validación del modelo, utilizando el ultimo 50% de los datos disponibles, determinó el desempeño predictivo, utilizando métricas de bondad de ajuste como el coeficiente de determinación R^2 , la eficiencia de Nash-Sutcliffe, el PBIAS y el RMSE.

Se aplicó el mejor modelo de regresión basado en sus bondades de ajuste para generar series de caudales máximos instantáneos anuales y finalmente poder realizar un análisis de tendencias en estas series.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Introducción.

En el presente capítulo se muestran los resultados del análisis de tendencias en las series hidrometeorológicas para las variables de precipitaciones, caudales y temperaturas. También se exhiben los resultados de la calibración y validación del modelo de regresión multivariable, incluyendo los coeficientes asociados a las variables independientes del modelo, los cuales fueron obtenidos mediante la metodología de mínimos cuadrados ordinarios y mínimos cuadrados no lineales. Por último, se presentan métricas de las bondades de ajuste obtenidas los cuales evalúan el desempeño del modelo.

4.2. Análisis de tendencias.

En esta sección se presentan los resultados del análisis de tendencias hidrometeorológicas, donde se utilizan los test de Mann-Kendall, Sen y Pettitt, los que permiten identificar y cuantificar tendencias significativas y puntos de cambio significativos en las series temporales.

En este análisis, para diferenciar la confianza asociada a cada estadístico, se utilizaron dos niveles de significancia para el test de Mann-Kendall, denotados a lo largo de este trabajo como $p < 0.05$ o nivel de confianza del 95% y $p < 0.10$ o nivel de confianza del 90%.

Para el test de Pettitt se definió un solo nivel de significancia, con un valor $p < 0.05$ o nivel de confianza del 95%.

4.2.1. Precipitaciones.

Para el análisis de precipitaciones, se examinaron dos métricas principales en cada escala de tiempo: precipitaciones totales y precipitaciones máximas.

Tendencias recientes:

De las 73 estaciones pluviométricas (provenientes de la Dirección General de Aguas y de los Anuarios Climatológicos), 12 estaciones cumplieron con el criterio establecido para el análisis de tendencias, que requiere al menos el 80% de sus datos entre 1970 y finales de 2019. Sus características se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características de estaciones pluviométricas en el análisis de tendencias recientes.

ID	Estación	Institución	Ubicación		Elevación (msnm)
			Latitud	Longitud	
1	Conay	DGA	-28.98	-70.15	1450
2	Copiapó	DGA	-27.35	-70.36	385
3	Elibor Campamento	DGA	-27.70	-70.20	750
4	Jorquera En La Guardia	DGA	-27.75	-69.67	2000
5	Junta Del Carmen	DGA	-28.76	-70.49	770
6	Lautaro Embalse	DGA	-27.98	-70.00	1110
7	Los Loros	DGA	-27.83	-70.12	940
8	Manflas Hacienda	DGA	-28.13	-69.97	1410
9	Pastos Grandes	DGA	-27.12	-69.56	2260
10	Santa Juana	DGA	-28.67	-70.65	560
11	San Félix	DGA	-28.93	-70.46	1150
12	Vallenar Dga	DGA	-28.59	-70.74	420

No se detectó ninguna tendencia significativa en ninguna de las dos métricas de precipitaciones para la escala de tiempo anual. Para las tendencias significativas estacionales, se identificaron tres tendencias significativas en los datos de precipitaciones máximas diarias, cada una en estaciones pluviométricas distintas: una tendencia ascendente y dos descendentes en invierno. En cuanto a los datos de precipitaciones totales, se detectaron cuatro tendencias significativas, también en estaciones diferentes: tres ascendentes en otoño y una descendente en invierno.

La mayor tendencia en magnitud es para la estación pluviométrica Los Loros bajo la métrica de precipitaciones totales con una magnitud de -0.197 mm/año, donde al fin de los 50 años de registro, esta zona de la región tendría un descenso teórico de 9.85 mm.

Ninguna estación pluviométrica tuvo un cambio significativo en su serie temporal según el test de Pettitt.

En la Figura A.4.1.5 y Figura A.4.1.6 del Anexo 4.1 se observan las ubicaciones geográficas de las estaciones pluviométricas con la dirección de las tendencias estacionales detectadas para precipitaciones máximas diarias y totales, respectivamente. Se observa en la Figura A.4.1.1 la ubicación de las mismas estaciones pluviométricas con respecto al estudio de tendencias anuales, donde no se detectaron tendencias significativas. Respecto a los resultados numéricos de los tres métodos estadísticos, estos se observan en la Tabla A.4.3.1 y Tabla A.4.3.2 para las precipitaciones máximas diarias y precipitaciones totales, respectivamente, en el Anexo 4.3.

Tendencias históricas:

Solo la estación pluviométrica Junta Del Carmen del análisis de tendencias recientes cumplía con el criterio de inclusión establecido para poder ser extendida. Por otro lado, se incorporó la estación Caldera de los Anuarios Climatológicos por poseer una importante cantidad de datos entre el año 1900 y 1970. Las características de estas estaciones se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Características de estaciones pluviométricas en el análisis de tendencias históricas.

ID	Estación	Institución	Ubicación		Elevación (msnm)	Año inicial	Año final
			Latitud	Longitud			
1	Caldera	DMC	-27.05	-70.85	14	1938	1970
2	Junta Del Carmen	DGA	-28.76	-70.49	770	1949	2019

En las precipitaciones máximas diarias, no se detectó tendencia significativa a nivel de estación pluviométrica y escala de tiempo. Por otro lado, en las precipitaciones totales se encontró dos tendencias significativas y ambas estacionales para la estación pluviométrica Caldera, una en invierno con un valor $p < 0.10$ descendente y la otra en primavera con un valor $p < 0.05$ también descendente. La Figura 4.1 presenta las dos únicas tendencias significativas detectadas.

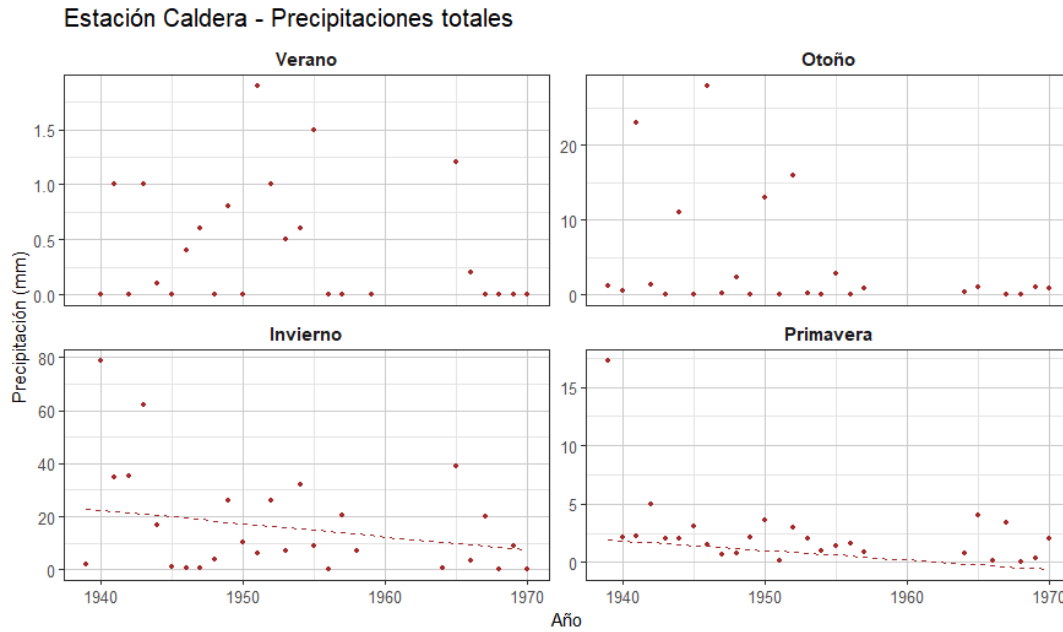


Figura 4.1. Tendencias estacionales en precipitaciones totales (línea segmentada café) en la estación pluviométrica Caldera (DMC). Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa

No se detectó ningún cambio significativo en las series temporales para ninguna estación pluviométrica según el test de Pettitt.

En la Figura A.4.2.18 y Figura A.4.2.19 del Anexo 4.2 se observan las ubicaciones geográficas de las estaciones pluviométricas con la dirección de las tendencias estacionales detectadas para precipitaciones máximas diarias y totales, respectivamente, donde solo fueron detectadas en las precipitaciones totales. Se observa en la Figura A.4.2.14 la ubicación de las mismas estaciones pluviométricas con respecto al estudio de tendencias anuales, donde no se detectaron tendencias significativas. Sobre los resultados numéricos, estos se presentan en la Tabla A.4.4.10 y Tabla A.4.4.11 para las precipitaciones máximas diarias y precipitaciones totales, respectivamente, en el Anexo 4.4.

4.2.2. Caudales.

Para el análisis de caudales, se examinaron dos métricas principales en cada escala de tiempo: caudales medios y caudales máximos instantáneos.

Tendencias recientes:

De las 41 estaciones fluviométricas (provenientes de la Dirección General de Aguas), 10 estaciones cumplieron con el criterio establecido para el análisis de tendencias, el cual consiste en tener al menos el 80% de los datos entre 1970 y finales de 2019. Sus características se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Características de estaciones fluviométricas en el análisis de tendencias recientes.

ID	Estación	Institución	Ubicación		Elevación (msnm)
			Latitud	Longitud	
1	Río Copiapó En Angostura	DGA	-27.32	-70.84	48
2	Río Copiapó En La Puerta	DGA	-27.81	-70.13	915
3	Río Copiapó En Lautaro	DGA	-27.98	-70.00	1200
4	Río Copiapó En Pastillo	DGA	-28.00	-69.98	1300
5	Río Huasco En Santa Juana	DGA	-28.68	-70.65	575
6	Río Jorquera En Vertedero	DGA	-28.05	-69.96	1250
7	Río Manflas En Vertedero	DGA	-28.15	-69.99	1550
8	Río Pulido En Vertedero	DGA	-28.09	-69.94	1310
9	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	DGA	-28.75	-70.48	812
10	Río Tránsito En Angostura Pinte	DGA	-28.95	-70.25	1000

Todas estas estaciones pertenecen a dos de los cuatro sistemas hidrográficos más importantes de la región: la cuenca del río Copiapó y la cuenca del río Huasco.

Para los caudales máximos instantáneos, se detectaron gran variabilidad direccional de tendencias, sin embargo, se detectó un patrón, donde las estaciones con tendencias significativas aguas arriba del embalse Lautaro en la cuenca del Río Copiapó fueron todas crecientes, y todo el resto de las tendencias significativas detectadas fueron decrecientes. Se presenta en la Figura 4.2 las tendencias detectadas de la estación Río Copiapó En Pastillo, la cual se encuentra aguas arriba del embalse Lautaro, donde presenta tres tendencias estacionales, siendo todas estas crecientes.

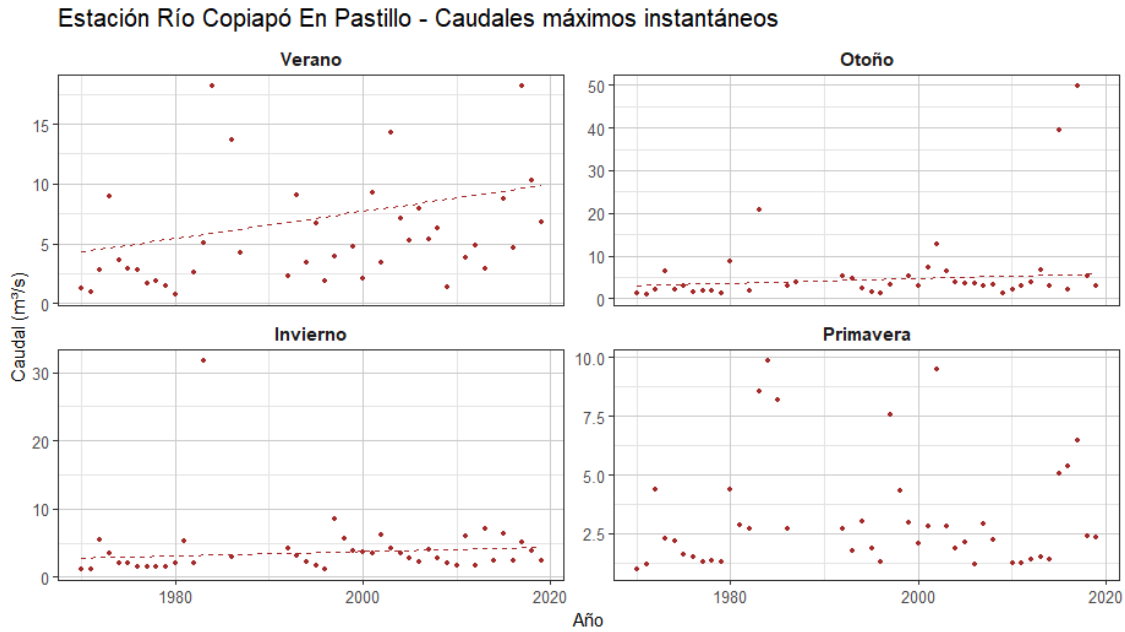


Figura 4.2. Tendencias estacionales recientes en caudales máximos instantáneos (línea segmentada café) en la estación Río Copiapó En Pastillo. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.

Por el lado de los caudales medios, todas las tendencias significativas detectadas fueron decrecientes con solo una excepción, correspondiendo para la estación Río Copiapó En Pastillo en invierno. Las estaciones fluviométricas Río Copiapó En La Puerta y Río Copiapó En Angostura cumplen con sus cuatro temporadas del año con tendencias significativas, como se puede observar en la Figura 4.3 y Figura 4.4.

Estación Río Copiapó En La Puerta - Caudales medios

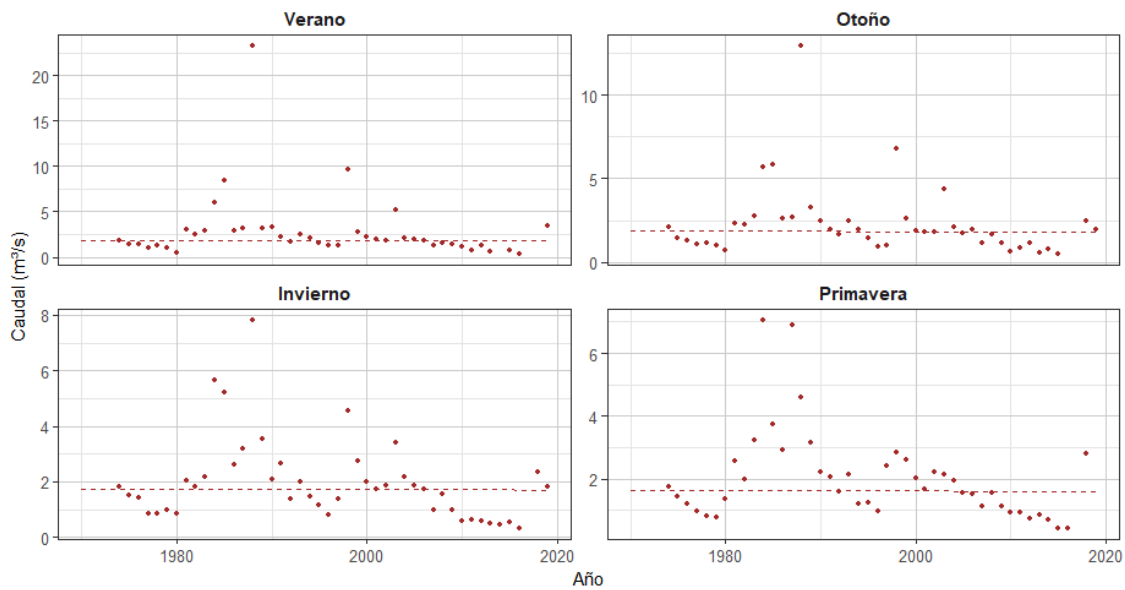


Figura 4.3. Tendencias estacionales recientes en caudales medios (línea segmentada café) en la estación Río Copiapó En La Puerta. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.

Estación Río Copiapó En Angostura - Caudales medios

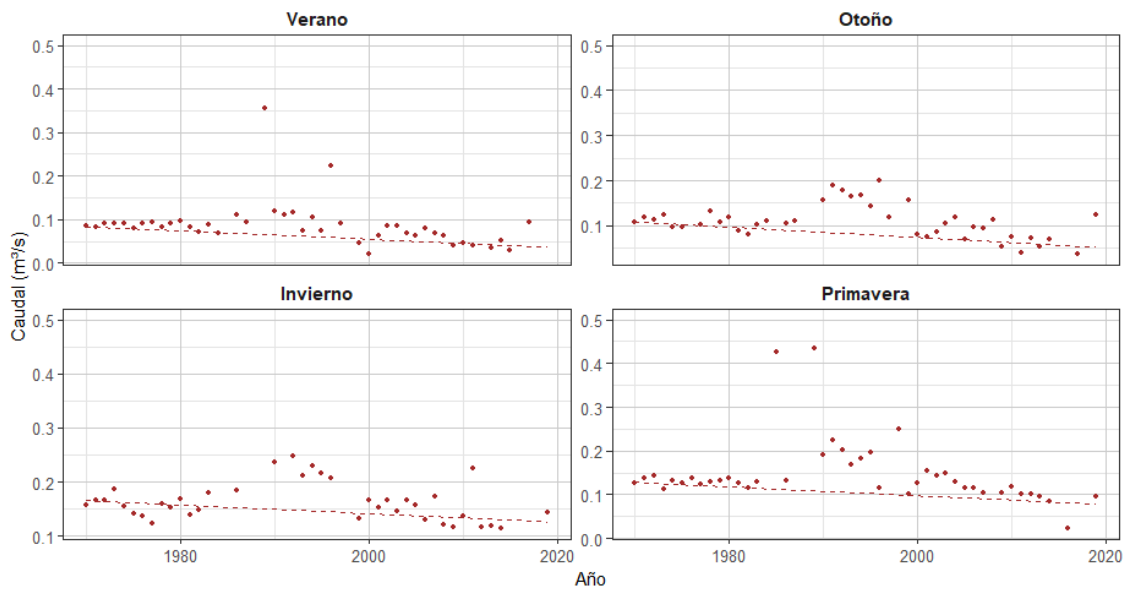


Figura 4.4. Tendencias estacionales recientes en caudales medios (línea segmentada café) en la estación Río Copiapó En Angostura. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.

La estación fluviométrica Río Huasco En Santa Juana presenta la mayor magnitud de tendencia significativa, con un valor de $-0.213 \text{ m}^3/\text{s/año}$ bajo la escala anual en la variable de caudales máximos instantáneos. Esta estación fluviométrica, al término de los 50 años del periodo del análisis, tendría un descenso teórico de $10.65 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se presentan las magnitudes de los cambios significativos detectados para los caudales máximos instantáneos por el test de Pettitt en la Tabla A.4.5.19 del Anexo 4.5, donde el cambio decreciente más importante es para la estación Río Huasco En Santa Juana en el año 2004, con una magnitud de $8.17 \text{ m}^3/\text{s}$, coincidiendo con la misma estación en la misma escala de tiempo junto a la misma métrica que la estación fluviométrica con la mayor magnitud de tendencia significativa detectada (siendo esta también decreciente). Por otro lado, el cambio creciente más importante detectado es para la estación Río Copiapó En Pastillo en la escala de tiempo anual en el año 1979 con una magnitud de $3.92 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta estación también es la que presenta más tendencias significativas estacionales de la métrica caudales máximos instantáneos.

La Tabla A.4.5.20 del Anexo 4.5 presenta las magnitudes de los cambios significativos detectados por el test de Pettitt en los datos de caudales medios, donde el cambio decreciente más importante es para la estación Río Copiapó En La Puerta en el año 2005 con una magnitud de $-1.22 \text{ m}^3/\text{s}$, coincidiendo con la única estación fluviométrica que está dentro de las tres tendencias significativas con mayor magnitud con métrica caudales medios. El cambio creciente más importante es para la estación Río Tránsito Antes Junta Río Carmen para el año 1979 con una magnitud de $1.66 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura A.4.1.7 y Figura A.4.1.8 del Anexo 4.1 se observan las ubicaciones geográficas de las estaciones fluviométricas con la dirección de las tendencias estacionales detectadas para caudales máximos instantáneos y medios, respectivamente. Se observa en la Figura A.4.1.2 la ubicación de las mismas estaciones fluviométricas con respecto al estudio de tendencias anuales. Con respecto a los resultados numéricos, estos se presentan en la Tabla A.4.3.3 y Tabla A.4.3.4 para los caudales máximos instantáneos y caudales medios, respectivamente, en el Anexo 4.3.

Tendencias históricas:

Para las tendencias históricas, hubo tres estaciones fluviométricas que cumplieron con el criterio de inclusión, las cuales son Río Copiapó En La Puerta, Río Copiapó En Lautaro y Río Tránsito Antes Junta Río Carmen. Por otro lado, la estación Río Carmen En Ramadillas fue incluida en el análisis debido a su importante cantidad de datos antes del año 1970. Las características de estas estaciones se observan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Características de estaciones fluviométricas en el análisis de tendencias históricas.

ID	Estación	Institución	Ubicación		Elevación (msnm)	Año inicial	Año final
			Latitud	Longitud			
1	Río Carmen En Ramadillas	DGA	-28.76	-70.48	825	1928	2018
2	Río Copiapó En Lautaro	DGA	-27.98	-70.00	1200	1932	2020
3	Río Copiapó En La Puerta	DGA	-27.81	-70.13	915	1928	2020
4	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	DGA	-28.75	-70.48	812	1929	2013

Los resultados del análisis de tendencias históricas de caudales máximos instantáneos y caudales medios se observan en la Tabla A.4.4.12 y Tabla A.4.4.13. La estación fluviométrica Río Copiapó En Ramadillas no mostró ninguna tendencia significativa para ninguna escala de tiempo.

En este análisis, hubo una consistencia direccional en las tendencias significativas detectadas, donde fueron absolutamente todas decrecientes, tanto para caudales máximos instantáneos como para caudales medios.

La estación fluviométrica Río Copiapó En La Puerta, tanto para los caudales máximos instantáneos como para los caudales medios, mostró tendencias significativas en todas sus escalas de tiempo (anuales y estacionales), siendo todas de ellas decrecientes. Estas tendencias junto a sus series de tiempo estacionales se observan en la Figura 4.5 y la Figura 4.6 para la variable de caudales máximos instantáneos y caudales medios, respectivamente.

Estación Río Copiapó En La Puerta - Caudales máximos instantáneos

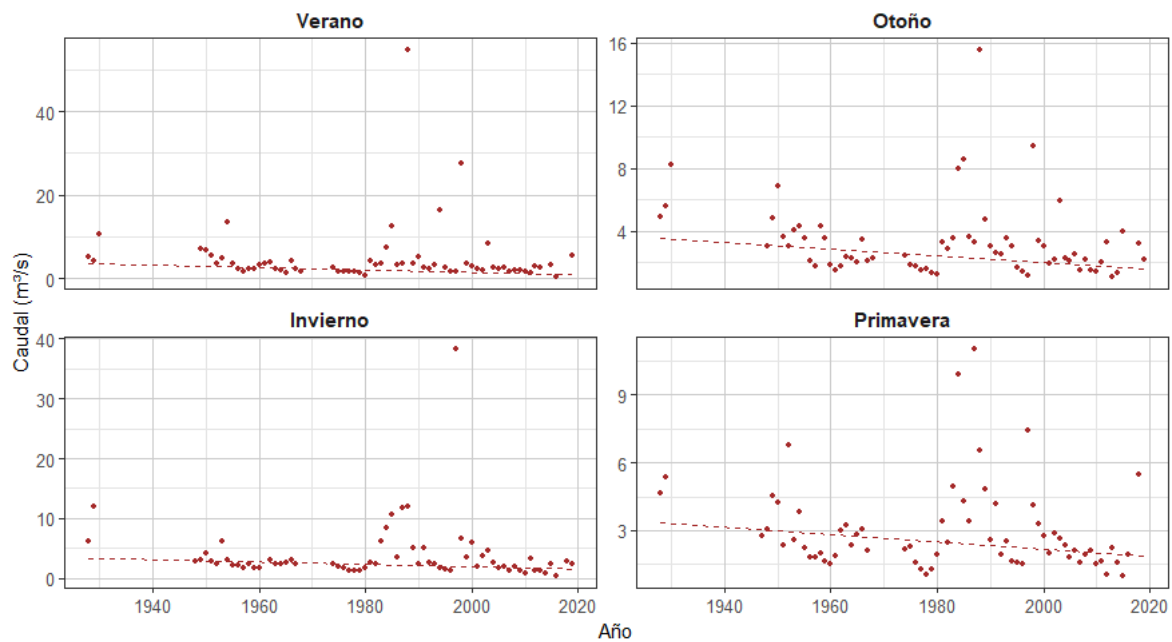


Figura 4.5. Tendencias estacionales históricas en caudales máximos instantáneos (línea segmentada café) en la estación fluviométrica Río Copiapó En La Puerta.

Estación Río Copiapó En La Puerta - Caudales medios

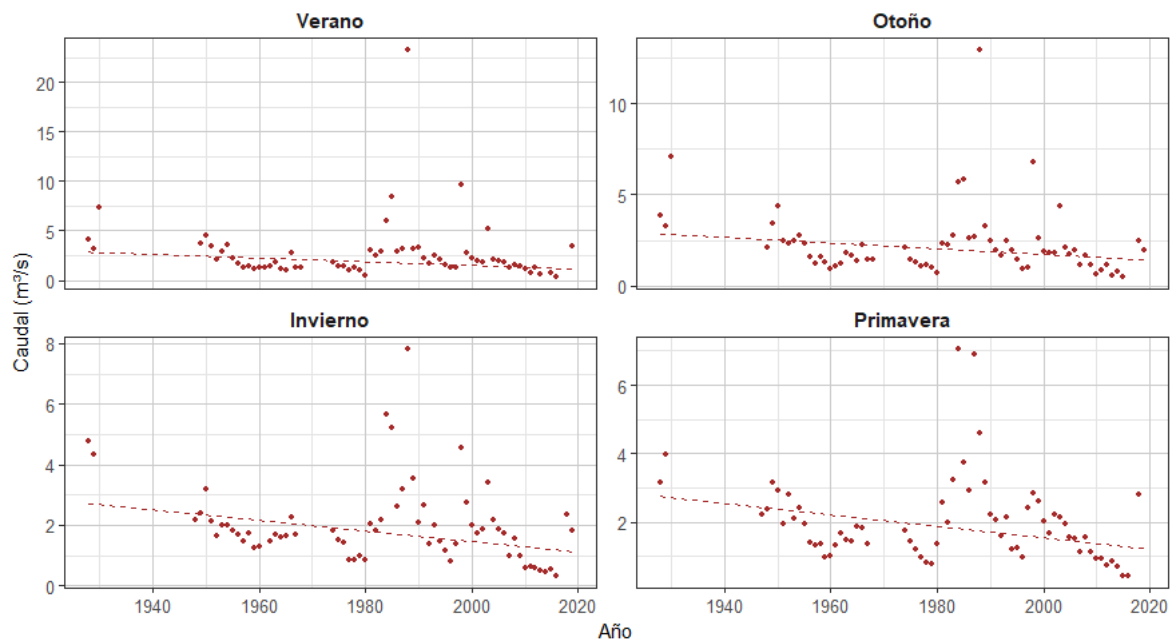


Figura 4.6. Tendencias estacionales históricas en caudales medios (línea segmentada café) en la estación fluviométrica Río Copiapó En La Puerta.

La estación fluviométrica Río Tránsito Antes Junta Río Carmen presenta la tendencia más importante en la escala anual con la métrica de caudales máximos instantáneos, con un valor de $-0.083 \text{ m}^3/\text{s/año}$, por lo que esta estación tendría un descenso teórico de su caudal de $7.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Tabla A.4.5.21 del Anexo 4.5 se observan las magnitudes de los cambios significativos en los caudales máximos instantáneos detectados por el test de Pettitt en el análisis de tendencias históricas. El cambio creciente más importante es para la estación Río Carmen En Ramadillas en la escala de tiempo invernal en el año 1979, donde la mediana de la serie temporal aumento con un valor de $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$. Por otro lado, el cambio decreciente más importante es para la estación fluviométrica Río Tránsito Antes Junta Río Carmen para el año 1954 en la escala anual, con un importante valor de $-10.29 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta estación, escala de tiempo y métrica coincide con la tendencia significativa con mayor magnitud.

Finalmente, en la Tabla A.4.5.22 del Anexo 4.5 se presentan las magnitudes de los cambios significativos detectados en los caudales medios en el análisis de tendencias históricas, donde el cambio creciente más importante es para la estación Río Carmen En Ramadillas en la escala de verano con un valor de $1.96 \text{ m}^3/\text{s}$. El cambio decreciente más importante es para la estación Río Tránsito Antes Junta Río Carmen en la escala estacional de verano nuevamente, esta vez en el año 1955 con un valor de $-3.15 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura A.4.2.20 y Figura A.4.2.21 del Anexo 4.2 se observan las ubicaciones geográficas de las estaciones fluviométricas con la dirección de las tendencias estacionales detectadas para caudales máximos instantáneos y medios, respectivamente. Se observa en la Figura A.4.2.15 la ubicación de las mismas estaciones fluviométricas con respecto a sus tendencias anuales. Los resultados numéricos para los caudales máximos instantáneos y los caudales medios se presentan en la Tabla A.4.4.12 y Tabla A.4.4.13, respectivamente, del Anexo 4.4

4.2.3. Temperaturas.

Para el análisis de temperaturas, se examinaron cinco métricas en cada escala de tiempo: temperaturas máximas extremas, temperaturas máximas medias, temperaturas medias, temperaturas mínimas extremas y temperaturas mínimas medias.

Tendencias recientes:

De las 26 estaciones climatológicas (provenientes de la DGA y de los Anuarios Climatológicos), dos estaciones presentan más del 80% de sus datos entre el año 1970 y finales de 2019. Sus características se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Características de estaciones climatológicas en el análisis de tendencias recientes.

ID	Estación	Institución	Ubicación		Elevación (msnm)
			Latitud	Longitud	
1	Lautaro Embalse	DGA	-27.98	-70.00	1110
2	Santa Juana	DGA	-28.67	-70.65	560

En las temperaturas se detectaron una importante cantidad de tendencias significativas, donde se encontró que las tendencias significativas en temperaturas máximas extremas, máximas medias y medias fueron todas crecientes. Las tendencias significativas en temperaturas mínimas extremas y mínimas medias fueron decrecientes, a excepción de la estación Caldera para una tendencia de temperatura mínima extrema de invierno que fue creciente.

La estación climatológica Santa Juana presenta una importante cantidad de tendencias, las cuales se observan en la Figura 4.7 y Figura 4.8, donde se detectó por el lado de las temperaturas máximas medias que en todas sus temporadas del año existen tendencias significativas crecientes y en las temperaturas medias también existen tendencias significativas en todas menos en otoño. Esto permite concluir un aumento de las temperaturas en esta zona de la región. Esto lo respaldan las tendencias en las temperaturas máximas extremas, donde se detectó tres tendencias significativas crecientes.

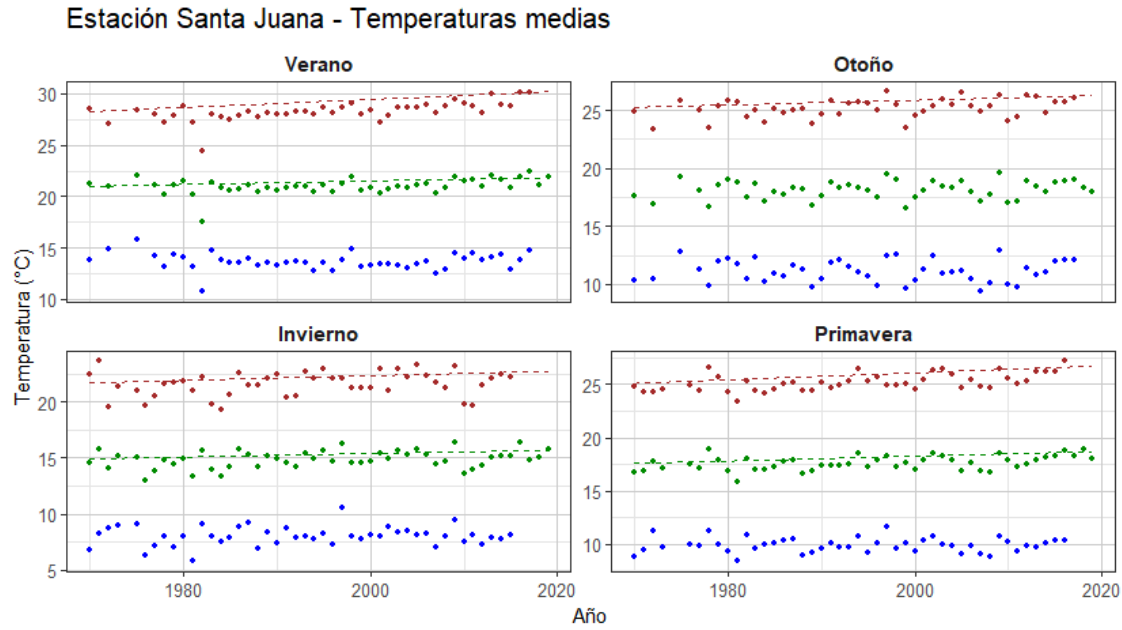


Figura 4.7. Tendencias recientes estacionales en temperaturas máximas medias (línea segmentada color rojo), temperaturas medias (línea segmentada color verde) y temperaturas mínimas medias (línea segmentada color azul) en la estación Santa Juana. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.

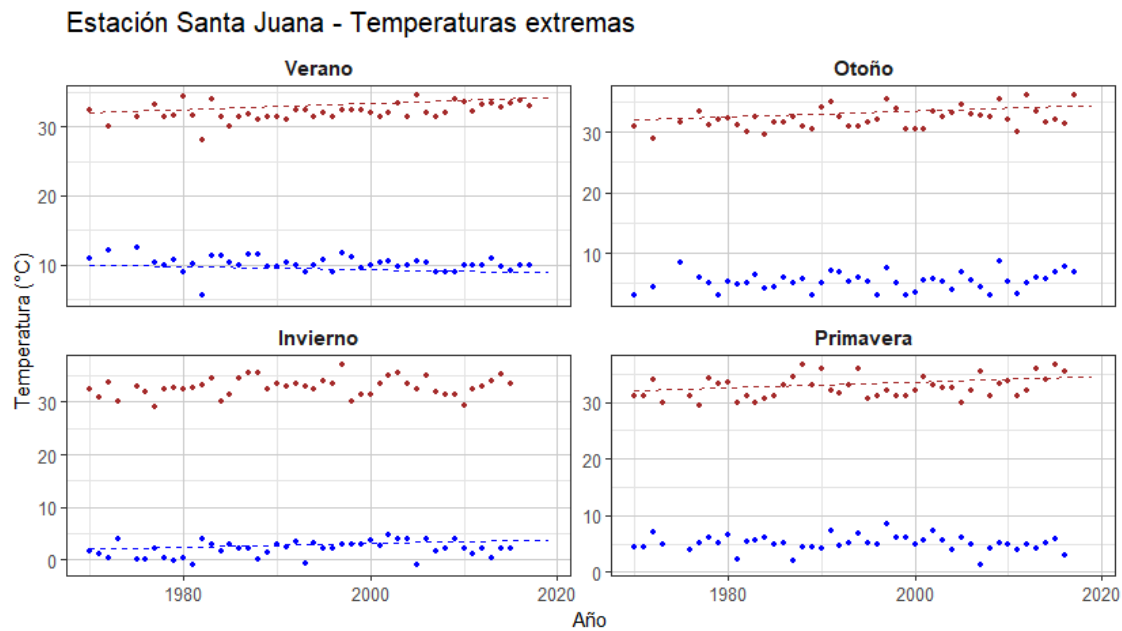


Figura 4.8. Tendencias recientes estacionales en temperaturas máximas extremas (línea segmentada color rojo) y temperaturas mínimas extremas (línea segmentada color azul) en la estación Santa Juana. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.

La estación climatológica Lautaro Embalse presenta la mayor tendencia en la métrica de temperaturas mínimas medias en la escala de tiempo primaveral, con un valor de -0.081 °C/año. Esta estación climatológica, al término de los 50 años del periodo del análisis, tendría un descenso teórico de 4.05 °C.

En la Tabla A.4.5.23 del Anexo 4.5 se observan los cambios significativos detectados en las series temporales de las temperaturas medias. El cambio creciente más importante se observa en la temperatura máxima media durante el invierno en la estación Lautaro Embalse en el año 2000, con una magnitud de cambio de 1.09 °C. Este aumento significativo en las temperaturas máximas medias invernales indica un claro patrón de calentamiento, lo cual es consistente con las tendencias significativas detectadas por el test de Mann-Kendall de incremento de temperaturas debido al cambio climático. Por otro lado, el cambio decreciente más notable se encuentra en la temperatura mínima media durante la primavera en la estación Lautaro Embalse en el año 1992, con una magnitud de cambio de -2.04 °C. Esta reducción significativa en las temperaturas mínimas medias primaverales sugiere una mayor variabilidad y extremos climáticos, siendo también consistente con las tendencias significativas de disminución de temperaturas mínimas medias primaverales.

Finalmente, en la Tabla A.4.5.24 del Anexo 4.5 se encuentran los cambios significativos detectados para las variables de las temperaturas extremas, donde la estación Santa Juana tiene un cambio creciente en el año 1996 en sus temperaturas máximas extremas veraniegas, con una magnitud de 1.00 °C. El otro cambio significativo detectado es para la estación Lautaro Embalse para el año 1990 en las temperaturas mínimas extremas veraniegas, cuya magnitud es de -1.80 °C. Estos dos cambios significativos también son coherentes con los resultados del test de Mann Kendall y sus direcciones de razón de cambio.

En la Figura A.4.1.10, Figura A.4.1.11 y Figura A.4.1.13 del Anexo 4.1 se observan las ubicaciones geográficas de las estaciones climatológicas con la dirección de las tendencias estacionales detectadas para temperaturas máximas medias, medias y mínimas medias, respectivamente. En la Figura A.4.1.4 se observan las tendencias detectadas y sus direcciones para las tendencias anuales en las temperaturas medias. Para el caso de las temperaturas

extremas, sus tendencias estacionales detectadas y sus respectivas direcciones se observan en la Figura A.4.1.9 y en la Figura A.4.1.12 para las temperaturas máximas extremas y mínimas extremas, respectivamente. En la Figura A.4.1.3 se presentan las tendencias anuales detectadas de las temperaturas extremas. Sobre los resultados numéricos de los métodos estadísticos utilizados, se observan en la Tabla A.4.3.6, Tabla A.4.3.7 y Tabla A.4.3.9 para las temperaturas máximas medias, medias y mínimas medias, respectivamente. Con respecto a las temperaturas extremas, estos resultados se presentan en la Tabla A.4.3.5 y Tabla A.4.3.8 para las temperaturas máximas extremas y mínimas extremas, respectivamente, del Anexo 4.3.

Tendencias históricas:

Ninguna estación climatológica cumplió con el criterio de inclusión predefinido para la extensión de sus series temporales. Sin embargo, se incluyeron otras dos estaciones al análisis de tendencias históricas debido a la importante cantidad de registros de temperaturas en sus series de tiempo, cuyas características se pueden observar en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Características de estaciones climatológicas en el análisis de tendencias históricas.

ID	Estación	Institución	Ubicación		Elevación (msnm)	Año inicial	Año final
			Latitud	Longitud			
1	Caldera	DMC	-27.05	-70.85	14	1900	1970
2	Potrerrillos	DMC	-26.33	-69.48	2850	1920	1970

La Figura 4.9 presenta la estación climatológica Caldera, la cual contiene la mayor cantidad de tendencias significativas estacionales detectadas en la métrica de temperaturas máximas medias. Se puede observar que sus temperaturas máximas medias presentan tendencias crecientes en todas las escalas de tiempo estacionales. Esta misma estación también presenta tendencias significativas en la métrica de temperaturas extremas en todas sus escalas de tiempo, tanto para temperaturas máximas extremas como para temperaturas mínimas extremas, como se puede observar en la Figura 4.10. Se puede observar como las tendencias en las temperaturas máximas extremas son todas crecientes y, por el contrario, en las temperaturas mínimas extremas son todas decrecientes.

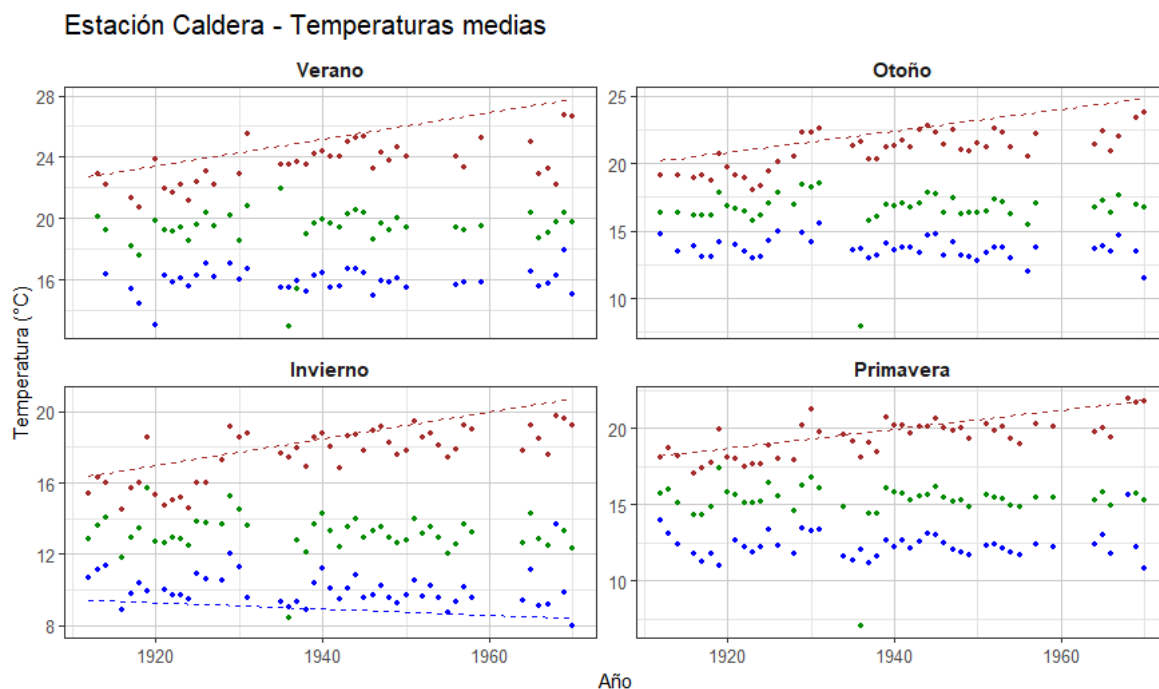


Figura 4.9. Tendencias históricas estacionales en temperaturas máximas medias (línea segmentada color rojo), temperaturas medias (línea segmentada color verde) y temperaturas mínimas medias (línea segmentada color azul) en la estación climatológica Caldera. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.

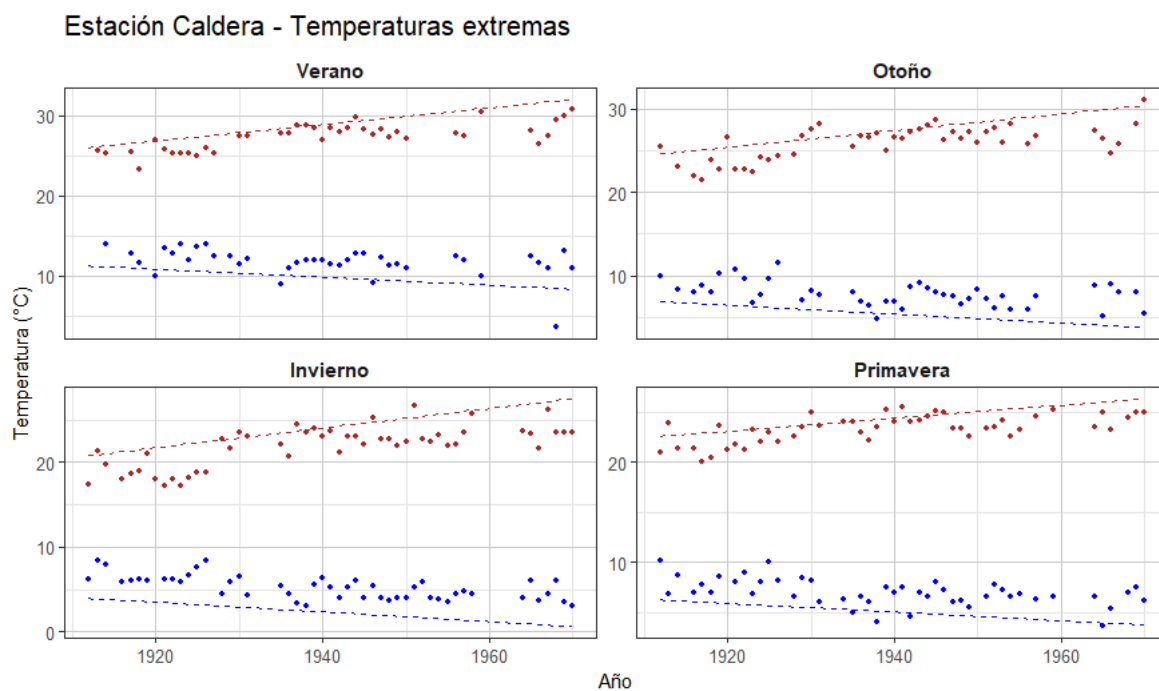


Figura 4.10. Tendencias históricas estacionales en temperaturas máximas extremas (línea segmentada color rojo) y temperaturas mínimas extremas (línea segmentada color azul) en la estación climatológica Caldera. Nota: en las series de tiempo sin línea segmentada, no se detectó una tendencia significativa.

La tendencia significativa con mayor magnitud es para la estación climatológica Caldera en las temperaturas mínimas extremas en la escala de tiempo de invierno, con un valor de -0.057 °C/año, por lo que esta estación tendría un descenso teórico de temperatura de 3.3 °C al termino de este periodo de análisis.

Finalmente, en la Tabla A.4.5.25 del Anexo 4.5 se muestran las magnitudes de los cambios significativos detectados por el test de Pettitt en las métricas de temperaturas medias en el análisis de tendencias históricas. Solo se detectaron cambios ascendentes en las medianas de estas series temporales. La más importante es en la estación climatológica Caldera en la escala de invierno para el año 1928, con una magnitud de 2.95 °C.

Se presentan las magnitudes de los cambios significativos detectados por el test de Pettitt en las temperaturas extremas en la Tabla A.4.5.26 del Anexo 4.5, donde el cambio significativo creciente más importante es para la estación de Caldera en la métrica de temperaturas máximas extremas en la escala de invierno para el año 1929, con una magnitud de 4.40 °C. Por el otro lado, el cambio significativo decreciente más importante es nuevamente para la estación climatológica Caldera en la métrica de temperaturas mínimas extremas para el año 1930 con un descenso de -2.20 °C. Esta última coincide con una de las tres tendencias con mayor magnitud detectadas en todas las métricas de temperaturas.

En la Figura A.4.2.23, Figura A.4.2.24 y Figura A.4.2.26 del Anexo 4.2 se observan las ubicaciones geográficas de las estaciones climatológicas con la dirección de las tendencias estacionales históricas detectadas para temperaturas máximas medias, medias y mínimas medias, respectivamente. En la Figura A.4.2.17 se observan las tendencias históricas detectadas y sus direcciones para las tendencias anuales en las temperaturas medias. Para el caso de las temperaturas extremas, sus tendencias estacionales detectadas y sus respectivas direcciones se observan en la Figura A.4.2.22 y en la Figura A.4.2.25 para las temperaturas máximas extremas y mínimas extremas, respectivamente. En la Figura A.4.2.16 se presentan las tendencias anuales detectadas de las temperaturas extremas. Los resultados numéricos del análisis de tendencias históricas en las temperaturas medias se observan en la Tabla A.4.4.15, Tabla A.4.4.16 y Tabla A.4.4.18 para las temperaturas máximas medias, medias y mínimas

medias, respectivamente. En la Tabla A.4.4.14 y Tabla A.4.4.17 se presentan los resultados numéricos de las temperaturas máximas extremas y mínimas extremas, respectivamente, en el Anexo 4.4.

4.3. Modelo de regresión multivariable.

Para abordar la predicción del caudal máximo instantáneo anual, se construyó un modelo de regresión multivariable considerando variables claves seleccionadas mediante el método “*stepwise*”. Este enfoque permitió identificar las variables más relevantes e influyentes en la predicción del caudal máximo instantáneo (Q_{max}), resultando en las siguientes variables independientes del modelo: el caudal medio diario del día que ocurre el caudal máximo instantáneo anual (Q_d), el caudal medio diario del día anterior que ocurre el caudal máximo instantáneo anual (Q_a) y el caudal medio diario del día posterior que ocurre el caudal máximo instantáneo anual (Q_p).

Se utilizó todo el conjunto de datos de caudales máximos instantáneos anuales de las estaciones fluviométricas de la región de Atacama. Además, como criterio de inclusión para que una estación formara parte del modelo de regresión, se estableció que cada estación debía tener un mínimo de 20 datos de todas las variables mencionadas (Q_{max} , Q_d , Q_a , y Q_p). Las 26 estaciones fluviométricas que cumplen con este criterio se muestran en la Tabla 4.7 junto a las características morfométricas de sus cuencas:

Tabla 4.7. Características morfométricas de cuencas del modelo de regresión.

Estación fluviométrica	Superficie (km ²)	Cota media (msnm)	Cota máxima (msnm)	Cota mínima (msnm)	Pendiente media (m/m)
Río Barros Negros Antes Junta Valle Ancho	86.03	4757.14	5963	4080	0.16
Río Carmen En El Corral	2434.3	3772.85	5485	1669	0.25
Río Carmen En Pte. La Majada	2756.5	3631.83	5485	1132	0.25
Río Carmen En Ramadillas	3038.86	3470.82	5485	786	0.25
Río Carmen En San Félix	2795.96	3614.36	5485	1095	0.25
Río Conay En Las Lozas	1725.48	3873.5	6113	1554	0.23
Río Copiapó En Angostura	18549.91	2714.43	5994	16	0.18

Río Copiapó En Ciudad De Copiapó	17114.61	2892.66	5994	137	0.18
Río Copiapó En La Puerta	8346.97	3476.55	5994	872	0.21
Río Copiapó En Lautaro	7568.17	3626.76	5994	1082	0.21
Río Copiapó En Mal Paso Aguas Arriba Canal	10160.3	3170.82	5994	517	0.2
Río Copiapó En Pastillo	7463.88	3650.19	5994	1136	0.21
Río Copiapó En San Antonio	7829.4	3573.61	5994	967	0.21
Río Huasco En Algodones	7199.71	3393.95	6113	717	0.25
Río Huasco En Puente Nicolasa	9327.28	2846.75	6113	146	0.22
Río Huasco En Santa Juana	7383.89	3344.28	6113	549	0.25
Río Jorquera En Vertedero	4197.98	3792.99	5994	1218	0.2
Río La Ola En Vertedero	12310.98	4119.54	6876	0	0.11
Río Lamas En El Salto	2271.85	4910.15	6876	4226	0.12
Río Manflas En Vertedero	981.57	3564.51	5680	1457	0.22
Río Pulido En Vertedero	2021.8	3566.14	5781	1295	0.23
Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	4103.29	3359.02	6113	778	0.24
Río Tránsito En Angostura Pinte	3044.28	3639.75	6113	1194	0.25
Río Valle Ancho Antes Junta Barros Negros	4044.4	4679.22	6777	3969	0.13
Río Valle Ancho En La Barrera	4500.24	4661.56	6777	3907	0.13
Río Villalobos En Vertedero	97.02	4398.41	6038	4002	0.14

4.3.1. Calibración.

El modelo de regresión potencial multivariable linealizado, denominado en adelante como “modelo lineal”, fue formulado según la siguiente ecuación:

$$\ln(Q_{max}) = \ln(k_0) + k_1 * \ln(Q_d) + k_2 * \ln(Q_a) + k_3 * \ln(Q_p) \quad (4.1)$$

Este modelo fue solucionado según mínimos cuadrados ordinarios al ser un modelo lineal, obteniendo los siguientes coeficientes:

Tabla 4.8. Coeficientes asociados a variables independientes del modelo lineal.

k_0	k_1	k_2	k_3
-------	-------	-------	-------

0.31	1.27	-0.21	-0.17
------	------	-------	-------

Por otro lado, el modelo de regresión potencial multivariable calibrado con la metodología de la función nls, denominado en adelante como “modelo no lineal”, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{max} = k_0 * Q_d^{k_1} * Q_a^{k_2} * Q_p^{k_3} \quad (4.2)$$

Los coeficientes obtenidos para la metodología recién mencionada son los siguientes:

Tabla 4.9. Coeficientes asociados a variables independientes del modelo no lineal.

k ₀	k ₁	k ₂	k ₃
1.45	1.42	-0.19	-0.32

La Tabla 4.10 presenta las medidas de bondad de ajuste obtenidas para todas las estaciones fluviométricas durante la etapa de calibración para ambos modelos calibrados.

Tabla 4.10. Bondad de ajuste para ambos modelos en la calibración.

Modelo	R ²	NS	PBIAS	RMS
Lineal	0.90	0.94	-9.85	0.19
No lineal	0.97	0.97	2.44	0.13

El modelo lineal tiene un ajuste satisfactorio, como lo indican sus métricas R² y NS, que reflejan una buena correlación entre los valores observados y predichos. Sin embargo, la métrica PBIAS sugiere que el modelo tiende a subestimar los resultados, lo que indica un sesgo negativo en las predicciones. En cambio, el modelo no lineal muestra un ajuste significativamente mejor, este mismo tiene valores más altos de R² y NS, junto con un PBIAS ligeramente mayor a cero, indicando que el modelo no lineal no solo tiende a ser más conservador y tiene una correlación más fuerte con los caudales observados, sino que también presenta menos sesgo y menor dispersión de los errores, como lo demuestra sus valores más bajos de RMS.

Los resultados obtenidos de la calibración del modelo de regresión multivariable mostraron diferencias claras entre los enfoques lineal y no lineal. El modelo lineal, el cual fue calibrado mediante OLS, proporcionó coeficientes que permitieron una predicción razonable del caudal máximo instantáneo anual. Sin embargo, los resultados mostraron que, aunque el ajuste es satisfactorio, existe un margen para mejorar la precisión. En cambio, el modelo no lineal, ajustado mediante la metodología de Gauss-Newton, demostró ser superior en términos de ajuste y precisión. Los coeficientes obtenidos con este método reflejaron una mejor captación de las dinámicas hidrológicas extremas presentes en los datos.

4.3.2. Validación.

La Tabla 4.11 presenta las medidas de bondad de ajuste obtenidas para todas las estaciones calibradas en la etapa de validación para ambos modelos.

Tabla 4.11. Bondad de ajuste para ambos modelos en la validación.

Modelo	R2	NS	PBIAS	RMS
Lineal	0.73	0.85	-17.53	0.24
No lineal	0.83	0.87	-6.48	0.23

El modelo lineal mostró un ajuste satisfactorio (R2 y NS), lo que refleja una buena correlación entre los valores observados y predichos. Sin embargo, el PBIAS sugiere que este modelo tiene una tendencia a subestimar los resultados, otorgándole un sesgo negativo en las predicciones. En cambio, el modelo no lineal nuevamente muestra un ajuste significativamente mejor. Este modelo presenta valores más altos de R2 y NSE, junto con un PBIAS más cercano a cero, sin embargo, esta vez el modelo no lineal igual presenta una tendencia pequeña a subestimar los resultados por tener su PBIAS negativo.

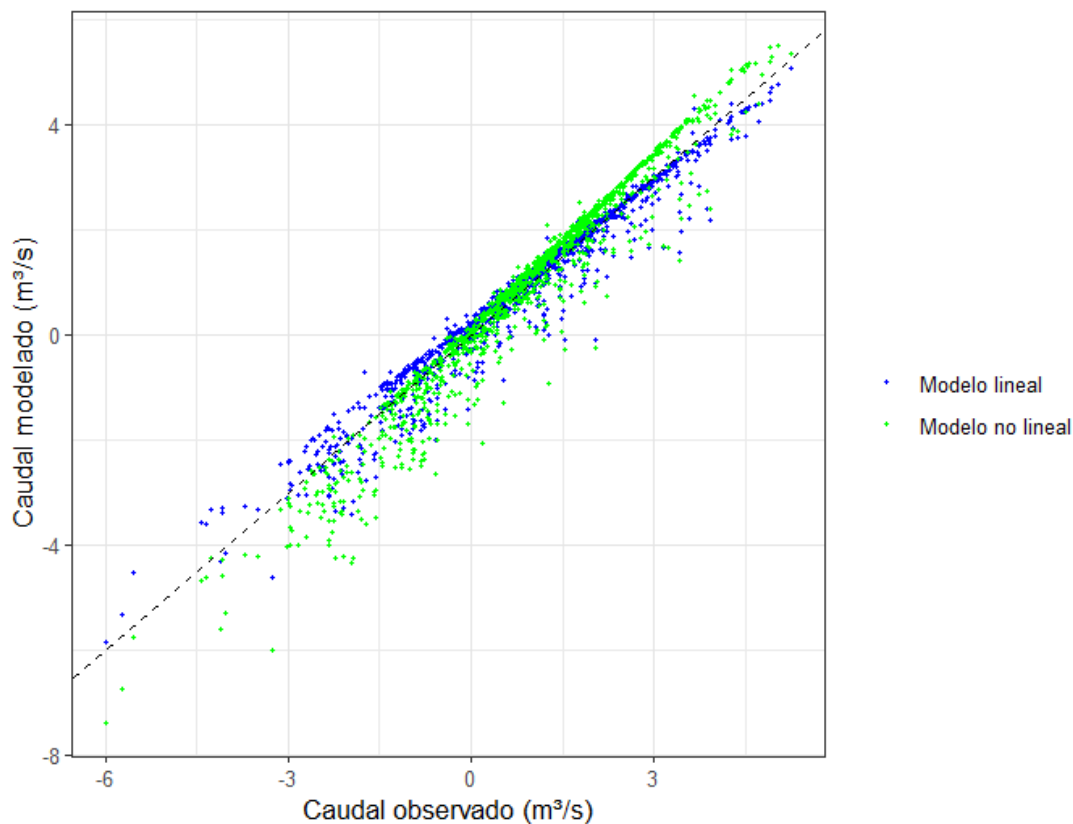


Figura 4.11. Relación entre caudal máximo instantáneo anual observado y modelado en escala logarítmica.

En la Figura 4.11 se observa la relación entre los caudales observados y los caudales modelados para ambos modelos, representados en una escala logarítmica. La figura muestra que el modelo no lineal tiene una alineación más cercana a la recta identidad (línea discontinua), lo cual indica un ajuste más preciso a los datos observados. Otra observación que es importante destacar es que el modelo no lineal es más conservador para los caudales más altos, en cambio, el modelo lineal tiende a subestimarlos, volviéndolo menos confiable para predecir eventos extremos.

La Figura 4.12 refuerza esta observación, mostrando la comparación entre los caudales registrados y los caudales modelados por ambos modelos para tres estaciones específicas: Río Carmen En El Corral, Río Carmen En Pte. La Majada y Río Copiapó En La Puerta. En cada uno de estos gráficos, se observa que el modelo no lineal presenta un comportamiento conservador para los caudales máximos instantáneos anuales, en especial en los años con

eventos hidrológicos extremos. Por otro lado, el modelo lineal tiende a subestimar estos máximos.

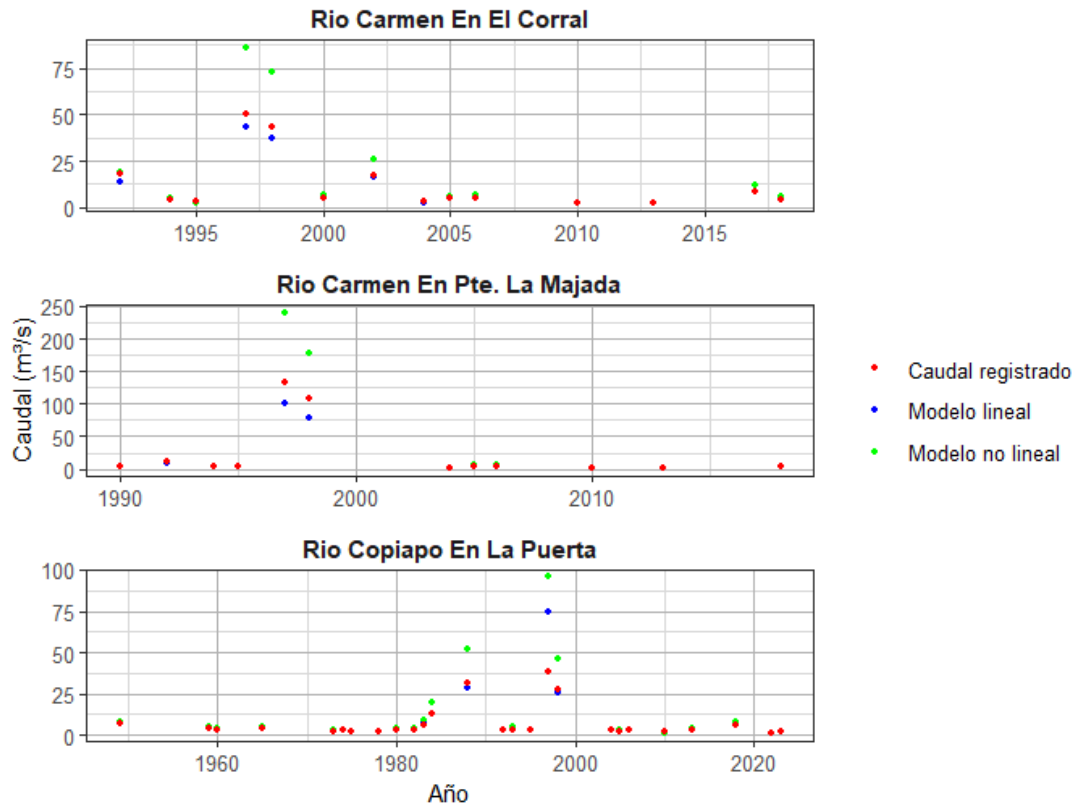


Figura 4.12. Series de tiempo de caudales máximos instantáneos anuales observados y modelados.

4.3.3. Implementación del modelo en estaciones con periodos no aforados de caudales máximos instantáneos y análisis de tendencias.

Para implementar el modelo de regresión multivariable en estaciones no aforadas, se desarrolló una rutina que consistió en identificar estaciones con datos de caudales medios diarios máximos anuales, así como los caudales de los días anteriores y posteriores al evento extremo, bajo el supuesto de que el caudal máximo instantáneo anual ocurre el mismo día del caudal medio máximo anual. Aplicando este criterio, se encontraron tres estaciones que cumplían: Río Astaburuaga En Cono, Río Carmen En Ramadillas y Río Manflas En Vertedero.

En la Figura 4.13, se presentan los resultados de la implementación del modelo en estas tres estaciones. La comparación entre el modelo lineal (en azul) y el modelo no lineal (en verde) permite observar cómo cada modelo se ajusta a los datos históricos de caudales registrados.

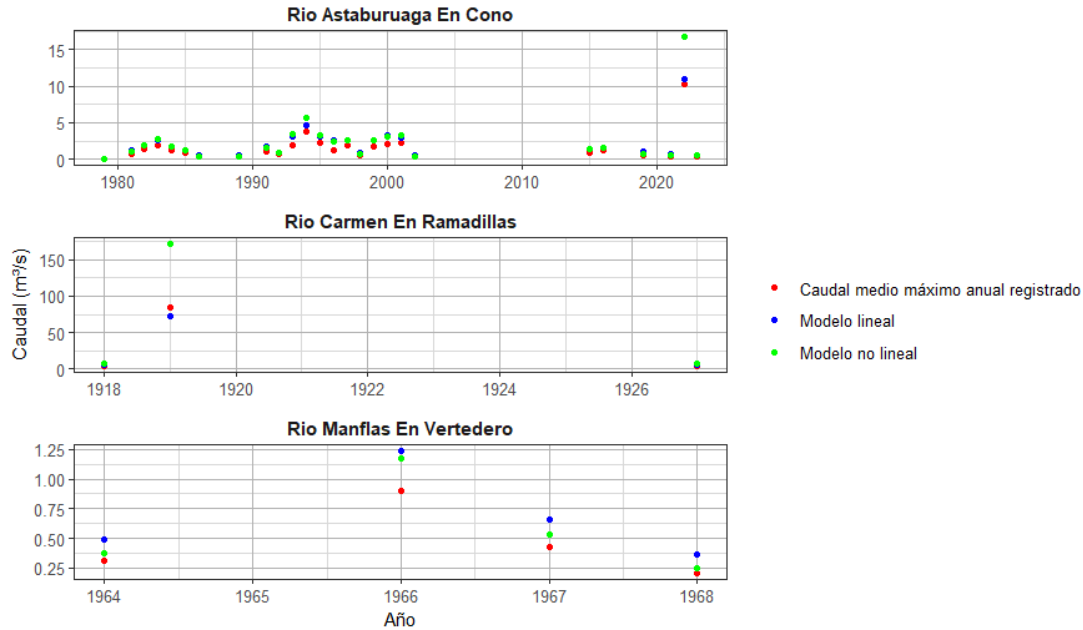


Figura 4.13. Implementación de modelos de regresión en estaciones no aforadas.

El modelo no lineal tiende a subestimar los caudales cuando estos son más bajos como se puede observar en la Figura 4.11, es por esto que, en la Figura 4.13, en la estación Río Manflas En Vertedero el modelo no lineal predice valores más bajos que el modelo lineal. Sin embargo, cuando el orden de magnitud de caudales medios aumenta ligeramente, el modelo no lineal se vuelve más conservador y proporciona estimaciones más precisas y seguras.

Se procede a utilizar el modelo no lineal para el análisis de tendencias dado el mejor desempeño que demostró en sus bondades de ajuste. Como las estaciones fluviométricas Río Carmen En Ramadillas y Río Manflas En Vertedero contienen solo 3 y 4 datos calculados, respectivamente, se realiza el análisis de tendencias únicamente en la estación Río Astaburuaga En Cono. Los resultados se presentan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Resultados de análisis de tendencias en estaciones rellenas con el modelo de regresión no lineal.

Estación	Valor P (Mann Kendall)	Año cambio	Valor P (Pettitt)	Año inicial	Año final	Cantidad de datos
Río Astaburuaga En Cono	52.6%	1992	28.9%	1979	2019	56%

Se observa que esta estación no presenta ninguna tendencia significativa, por lo que se puede determinar que su comportamiento en el periodo de análisis es estacionario. De la misma forma pasa el resultado del test de Pettitt, el cual concluye que no hay presencia de un cambio significativo en su serie temporal.

4.4. Conclusiones.

Se obtuvieron y analizaron series de tiempo de precipitaciones, caudales y temperaturas provenientes de la Dirección General de Aguas (DGA) y de los Anuarios Climatológicos (DMC). Estos datos fueron esenciales para detectar y cuantificar tendencias anuales y estacionales. Se seleccionaron únicamente las estaciones con más del 80% de datos disponibles para asegurar su robustez y representatividad de los resultados para el primer análisis de tendencias y para el segundo análisis se extendió los primeros registros de todas las estaciones analizadas en el primer análisis con la condición de que esta extensión adicional fuera de un mínimo de 10 años. A este último análisis, se incluyeron estaciones con registros entre 1900 y 1970. Posteriormente, se construyó un modelo de regresión multivariable, con dos metodologías distintas, aplicándose a las estaciones que contaban con más de 20 datos de cada variable, obteniendo resultados satisfactorios según las métricas de ajuste. Finalmente se utilizó el mejor modelo de regresión basado en sus métricas de bondad de ajuste para aplicarlo en las estaciones fluviométricas que contaran con todas las variables independientes seleccionadas con el objetivo de analizar sus tendencias.

El análisis de tendencias permitió identificar patrones significativos en las series temporales de las variables hidrometeorológicas. Los tests de Mann-Kendall, Sen y Pettitt revelaron tendencias importantes en las precipitaciones, caudales y temperaturas. Las precipitaciones, debido a su alta variabilidad e incertidumbre en la región, mostraron muy pocas tendencias

significativas, con algunas disminuciones en invierno y aumentos en otoño. Por otro lado, los caudales muestran una tendencia general decreciente, particularmente en la cuenca del río Copiapó, con la excepción de aumentos localizados aguas arriba del embalse Lautaro. Las temperaturas exhiben un patrón claro, tendencias crecientes en todas las métricas de temperaturas máximas extremas, máximas medias y medias, y en las métricas de temperaturas mínimas extremas y mínimas medias predominantemente decreciente. A pesar del número limitado de estaciones analizadas, los resultados muestran notable coherencia entre sí y los diferentes métodos estadísticos empleados, ya que el test de Mann Kendall y test de Pettitt son totalmente independientes entre sí.

En cuanto a los modelos de regresión, tanto el modelo lineal como el no lineal demostraron ser herramientas valiosas para predecir el caudal máximo instantáneo anual. Los resultados mostraron que el modelo no lineal, el cual fue ajustado mediante la metodología de iterativa de la función nls, ofrece una mayor precisión y menor sesgo en comparación con el modelo lineal ajustado con la función lm. El modelo no lineal fue especialmente eficaz en la predicción de eventos de caudal alto, ya que este mostró una alineación más cercana a los valores observados y una menor dispersión de errores.

La aplicación del modelo no lineal se vio limitada debido a la escasez de estaciones con los datos necesarios para su implementación (tener caudales medios diarios y no caudales máximos instantáneos). La única estación donde se pudo aplicar el modelo no arrojó resultados concluyentes respecto a sus tendencias.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

La comprensión de los patrones climáticos emergentes se vuelve crítica para el diseño efectivo de obras e infraestructura, especialmente cuando las condiciones ambientales son extremas y altamente variables. Las tendencias y proyecciones en variables climáticas son aspectos esenciales que deben considerarse en la planificación y construcción de todo tipo de proyectos, desde embalses y canales de riego hasta carreteras, puentes y edificios. El conocimiento de las tendencias en precipitaciones y caudales es fundamental para dimensionar adecuadamente estructuras hidráulicas como presas y sistemas de drenaje. Una subestimación de los caudales máximos futuros podría llevar a fallas catastróficas mientras que un sobredimensionamiento innecesario implicaría costos excesivos.

Más allá de los aspectos técnicos, el análisis de los patrones climáticos también permite anticipar los impactos que las obras de infraestructura podrían tener sobre el medio ambiente y la población. Una planificación resiliente debe contemplar estos factores, minimizando los riesgos y buscando soluciones que se adapten a los escenarios climáticos futuros.

La Región de Atacama, con su clima extremadamente árido y su marcada variabilidad hidrológica, presenta un entorno donde la adaptación al cambio climático es particularmente crucial. Los resultados obtenidos confirman la existencia de un cambio climático, donde se destaca la tendencia decreciente en los caudales, especialmente en la cuenca del río Copiapó, así como el aumento en las temperaturas máximas extremas, máximas medias y medias, agravando la escasez hídrica y afectando sectores económicos claves para la región como lo son la minería y la agricultura, y disminución en las temperaturas mínimas extremas y temperaturas mínimas. La creciente amplitud térmica en la región podría afectar negativamente a los ecosistemas locales y a sus habitantes. Estos resultados son en su mayoría consistentes con investigaciones de cambio climático. Aunque no existen estudios que se enfoquen exclusivamente en las tendencias de las variables hidrometeorológicas de la Región de Atacama, si hay investigaciones que incluyen esta región dentro de su área de estudio o se centran en zonas cercanas con características climáticas similares. Existen estudios que demuestran que los registros de temperaturas máximas presentan una tendencia general positiva en la macrozona norte de Chile (Souvignat et al., (2012), Schulz et al.,

(2011)) y otros estudios de muestran que, de todas las tendencias de caudales detectadas, la mayoría de estas son decrecientes (Osorio, 2022). Por el lado de las precipitaciones, existe una gran variabilidad direccional de tendencias (Sarricolea et al., 2017), siendo consistente con la naturaleza inestable de esta variable en la zona norte, con coeficientes de variación e índices de irregularidad temporal muy altos.

El desarrollo de modelos de regresión multivariable permitió predecir caudales máximos instantáneos anuales, revelando que los modelos no lineales ofrecen una mayor precisión, especialmente en la predicción de eventos de caudal muy alto. Sin embargo, su aplicación se vio limitada por la falta de estaciones con los datos necesario, lo que resalta la importancia de continuar mejorando y desarrollando herramientas alternativas de predicción de eventos hidrológicos extremos.

Paras futuras investigaciones, se proponen varias líneas de trabajo que podrían ampliar y robustecer los hallazgos de este estudio. Una dirección prometedora sería la utilización de datos grillados de precipitaciones y temperaturas, lo que permitiría un análisis climático más completo y detallado de todas las cuencas de la región de Atacama. Este enfoque ayudaría a superar las limitaciones de la distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas y la escasez de datos en la región. En cuanto al modelo de regresión para la estimación de caudales máximos instantáneos, se sugiere explorar variables independientes alternativas a caudales medios diarios. Esta modificación podría aumentar la aplicabilidad del modelo a un mayor número de estaciones fluviométricas. Se propone considerar características morfométricas de las cuencas, como la longitud del cauce principal, el periodo de concentración, o parámetros hidrológicos como las precipitaciones con periodo de retorno de 100 años.

REFERENCIAS

Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (Eds.). (2013). Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales. Cambridge University Press.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology. McGraw-Hill.

Consejo Regional de Cambio Climático Región de Atacama (CORECC-Atacama). (2020). Plan de Acción Regional de Cambio Climático Región de Atacama 2020-2030.

Dawdy, D.R., Griffis, V.W., & Gupta, V.K. (2012). Regional flood-frequency analysis: How we got here and where we are going. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(9), 953-959.

Espinoza, P. S., & Martin-Vide, J. (2014). Spatial analysis of rainfall daily trends and concentration in Chile. *Investigaciones Geográficas*, 47, 53. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2014.32995>

Fowler, H.J., Lenderink, G., Prein, A.F. et al (2021). Anthropogenic intensification of shortduration rainfall extremes. *Nat Rev Earth Environ* 2, 107–122. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>

Fill, H. D., & Steiner, A. A. (2003). Estimating instantaneous peak flow from mean daily flow data. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(6), 365-369. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2003\)8:6\(365\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2003)8:6(365))

Hailegeorgis, T. T., & Alfredsen, K. (2017). Regional flood frequency analysis and prediction in ungauged basins including estimation of major uncertainties for mid-Norway. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 9, 104-126. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.11.004>

IPCC (2021). “Cambio climático 2021, informe de síntesis”. Informe del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.

Juliá, C., Montecinos, S., & Maldonado, A. (2008). Características Climáticas de la Región de Atacama. En F. A. Squeo, G. Arancio, & L. Letelier (Eds.), Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama (pp. 25-44). Ediciones Universidad de La Serena.

Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2(12), 1137-1143.

Kundzewicz, Z. W. y Robson, A. (2004). Change detection in hydrological records—a review of the methodology. Hydrological Sciences Journal, 49(1), 7-19.
<https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.7.53993>

Lagos, M., Pinto, D., Torrez, L. & Rondanelli, R. (2021). ¿Son las precipitaciones extremas estacionarias en Chile? XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile

Marengo, J. A., Chou, S. C., Torres, R. R., Giarolla, A., Alves, L. M. & Lyra, A. (2014). Climate change in Central and South America: Recent trends, future projections, and impacts on regional agriculture.

Meza, F.J. (2013). Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: An application of the Standardized Precipitation Index. Weather and Climate Extremes, 1, 51-58.

Osorio, D. (2022). Estudio de tendencias de caudales extremos en cuencas en régimen natural (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil). Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Paredes, M., Gateño, F., Lagos & M., Mendoza, P. (2021). Comparación entre enfoques estacionario y no estacionario para la estimación de precipitaciones de diseño en cuencas de Chile continental. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.

Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change point problem. Journal of the Royal Statistical Society Series C, Applied Statistics 28, 126-135.

Pino V., & Chávarri V., E. (2022). Evidencias de cambio climático en la región hiperárida de la Costa sur de Perú, cabecera del Desierto de Atacama. Tecnología y Ciencias Del Agua 2022, 13(1), 01-34. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-08>

Romero, H., & Kampf, S. (2003). Impacts of Climate Fluctuations and Climate Changes on the Sustainable Development of the Arid Norte Grande in Chile. In Climate and Water, 83-115. Springer Netherlands.

Saenger, V. (2023). Simulación de caudales en cuencas del centro-sur de Chile. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/11429>

Sangal, B. P. (1983). Practical method of estimating peak flow. Journal of Hydraulic Engineering, 109(4), 549-563. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:4\(549\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:4(549))

Sarricolea, P., & Romero, H. (2015). Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. Norte Grande Geography Journal, 62, 169–183. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022015000300010>

Sarricolea, P., Meseguer, O., & Romero, H. (2017). Tendencias de la precipitación en el Norte Grande de Chile y su relación con las proyecciones de cambio climático. *Diálogo Andino*, 54, 41–50. <https://doi.org/10.4067/s0719-26812017000300041>

Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association* 63, 1379–1389.

Sonali, P. & Nagesh Kumar, D. (2013). Review of trend detection methods and their application to detect temperature changes in India. *Journal of Hydrology*, 476, 212–227. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.034>

Souvignet, M., Oyarzún, R., Verbist, K.M.J., Gaese, H. & Heinrich, J., (2012). Hydro-meteorological trends in semi-arid north-central Chile (29–32°S): water resources implications for a fragile Andean region. *Hydrological Sciences Journal*, 57 (3), 479–495.

Squeo FA, G Arancio & JR Gutiérrez (2008). Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena. XVI + 456 pp.

Taguas, E. V., Ayuso, J. L., Pena, A., Yuan, Y., & Pérez, R. (2008). Evaluating and modelling the hydrological and erosive behaviour of an olive orchard microcatchment under no-tillage with bare soil in Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(16), 2351–2364. <https://doi.org/10.1002/esp.1775>

Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P. A., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., & Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal Of Hydrology*, 519, 2538–2567. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>

Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *science*, 289(5477), 284-288. <https://science.sciencemag.org/content/289/5477/284>

Wilby, R. L., Clifford, N. J., De Luca, P., Harrigan, S., Hillier, J. K., Hodgkins, R., ... & Wood, P. J. (2017). The 'dirty dozen' of freshwater science: detecting then reconciling hydrological data biases and errors. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 4(3), e1209. <https://doi.org/10.1002/wat2.1209>

ANEXO 1.1. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ☐ ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ☐ ODS-2 : Hambre cero.
- ☐ ODS-3 : Salud y bienestar.
- ☐ ODS-4 : Educación de calidad.
- ☐ ODS-5 : Igualdad de género.
- ☐ ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ☐ ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ☐ ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ☐ ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ☐ ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ☒ ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ☐ ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ☒ ODS-13 : Acción por el clima.
- ☐ ODS-14 : Vida Submarina.
- ☒ ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ☐ ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ☐ ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación

La investigación sobre análisis de cambio climático en la región de Atacama presentada en este trabajo contribuye a los ODS, en particular, a ODS-11, ODS-13 y ODS-15.

Para el ODS-11, ciudades y comunidades sostenibles. Este estudio proporciona información de los patrones climáticos y tendencias hídricas que son fundamentales para planificar infraestructuras resilientes en áreas urbanas, reduciendo el riesgo de desastres naturales y promoviendo el desarrollo sostenible.

Respecto al ODS-13, acción por el clima. Esta investigación ofrece evidencia científica para la formulación de políticas de adaptación y mitigación al cambio climático. Esto apoya directamente las iniciativas locales y regionales, promoviendo la resiliencia en sectores clave como la agricultura y la minería.
--

Para el ODS-15, vida de ecosistemas terrestres. Este trabajo proporciona datos sobre los cambios en los patrones de precipitación y caudales, que son cruciales para la conservación de los ecosistemas áridos de la región. Esta información contribuye al desarrollo de estrategias que promuevan la conservación y manejo sostenible de los ecosistemas.
--

ANEXO 4.1. Mapas de resultados de análisis de tendencias recientes.

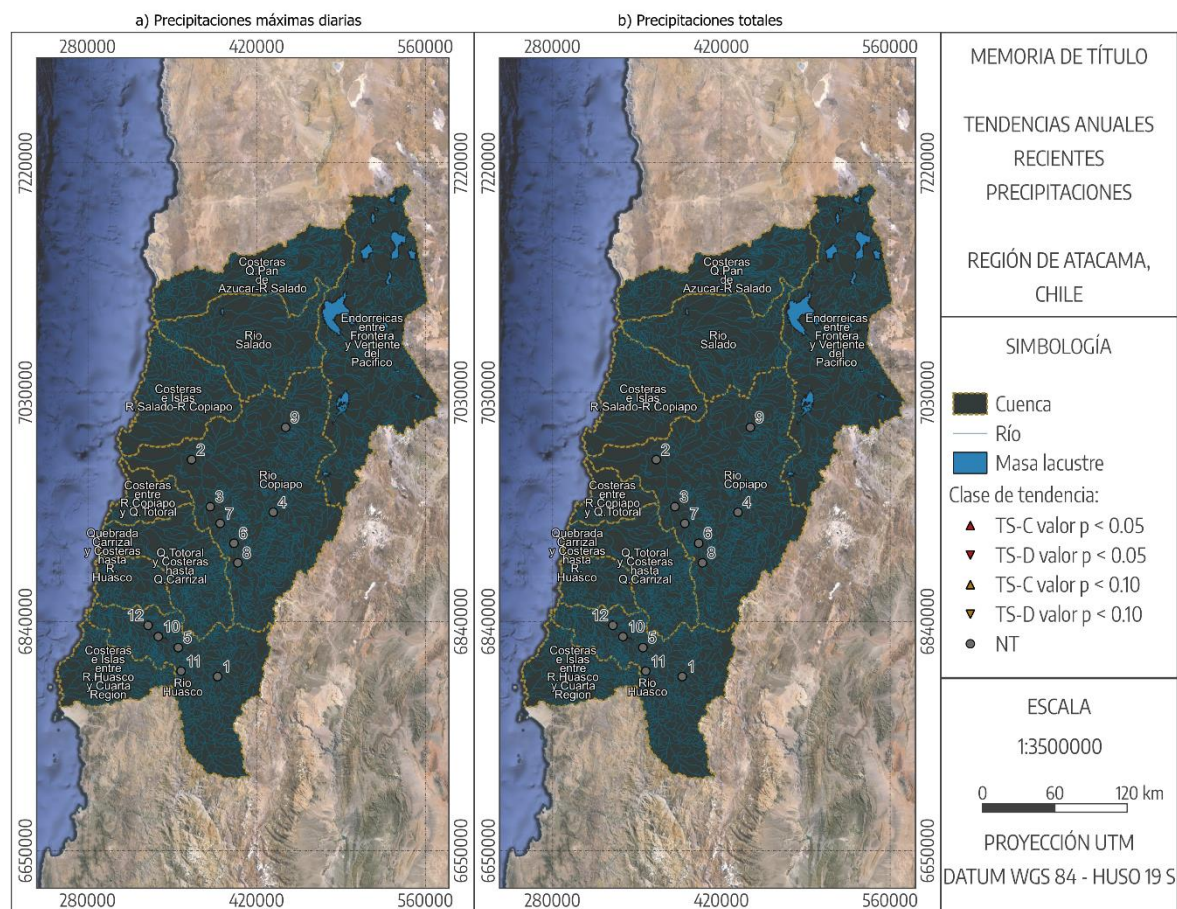


Figura A.4.1.1. Mapa de tendencias anuales recientes de precipitaciones en la región de Atacama, Chile.

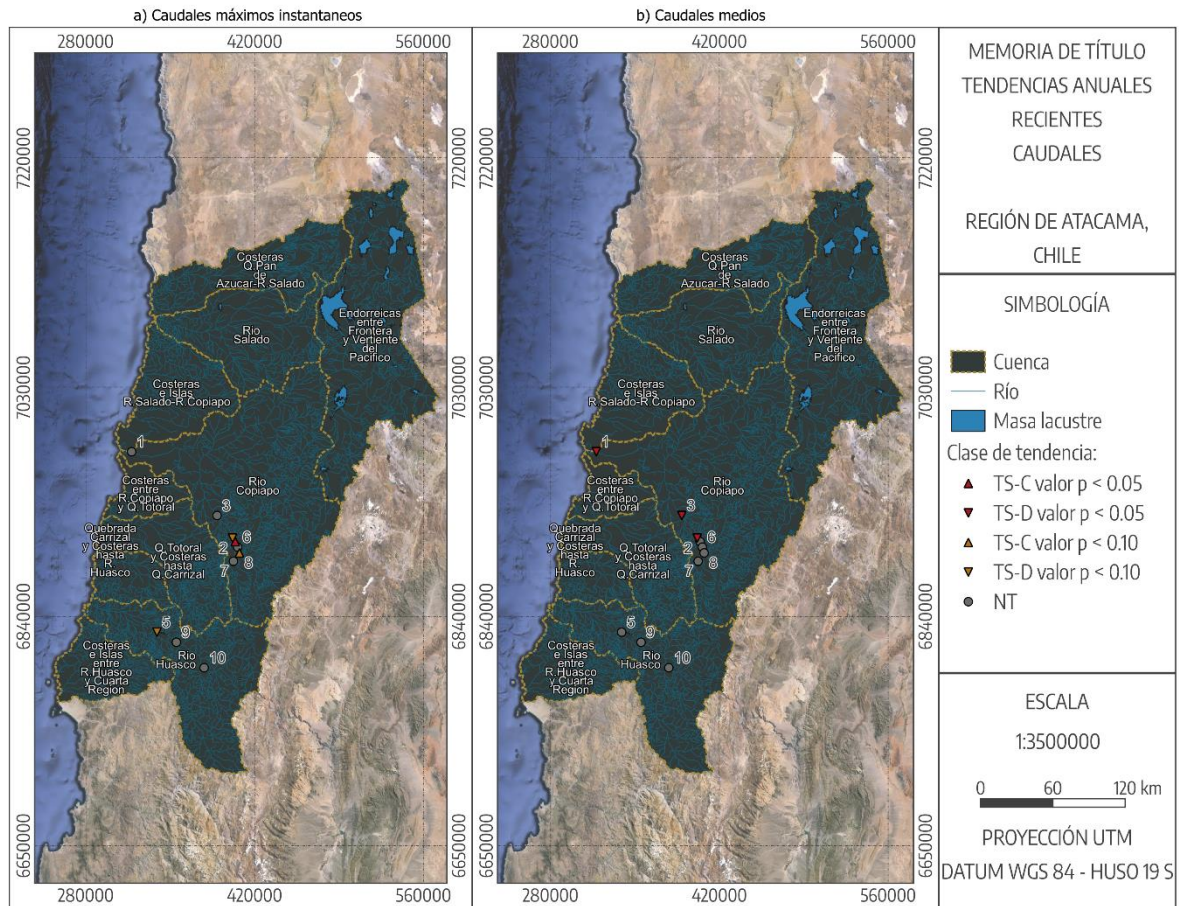


Figura A.4.1.2. Mapa de tendencias anuales recientes de caudales en la región de Atacama, Chile.

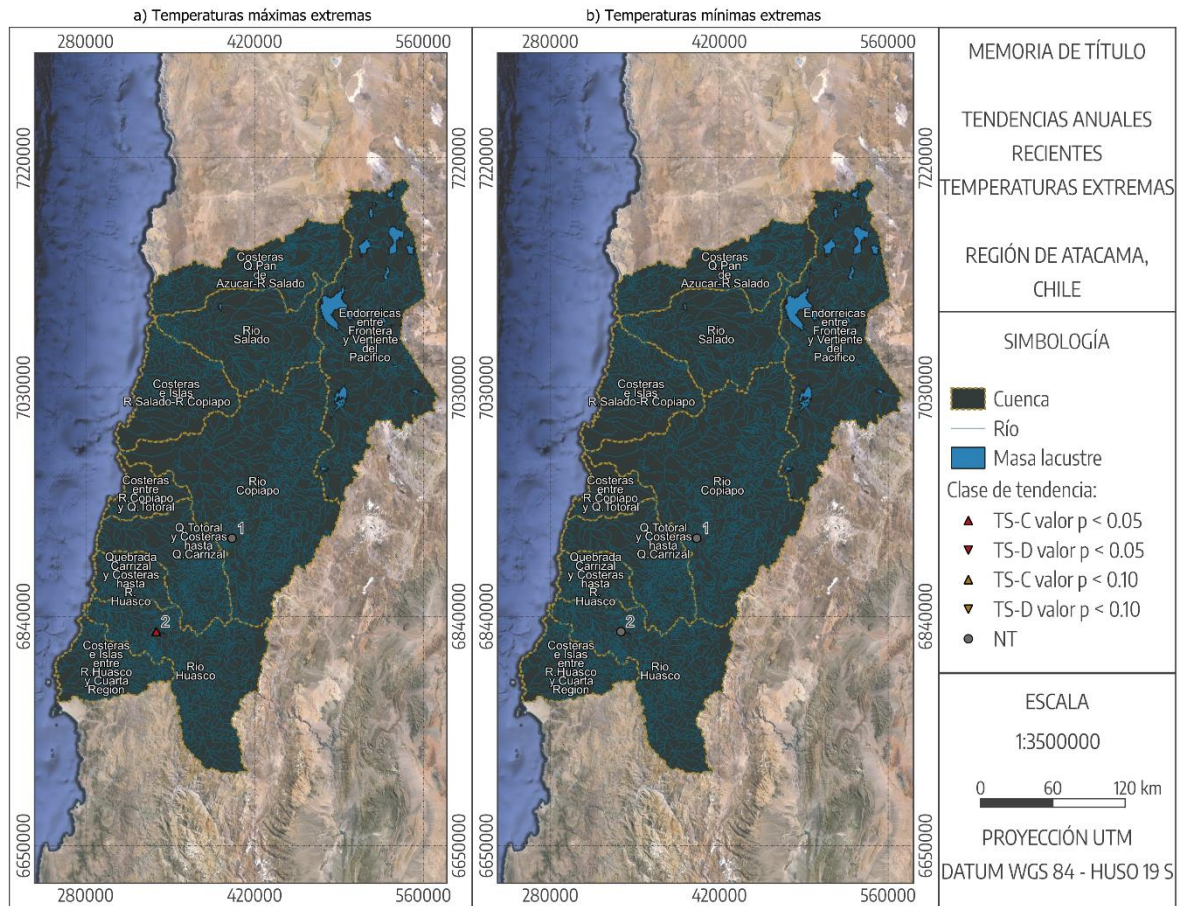


Figura A.4.1.3. Mapa de tendencias anuales recientes de temperaturas extremas en la región de Atacama, Chile.

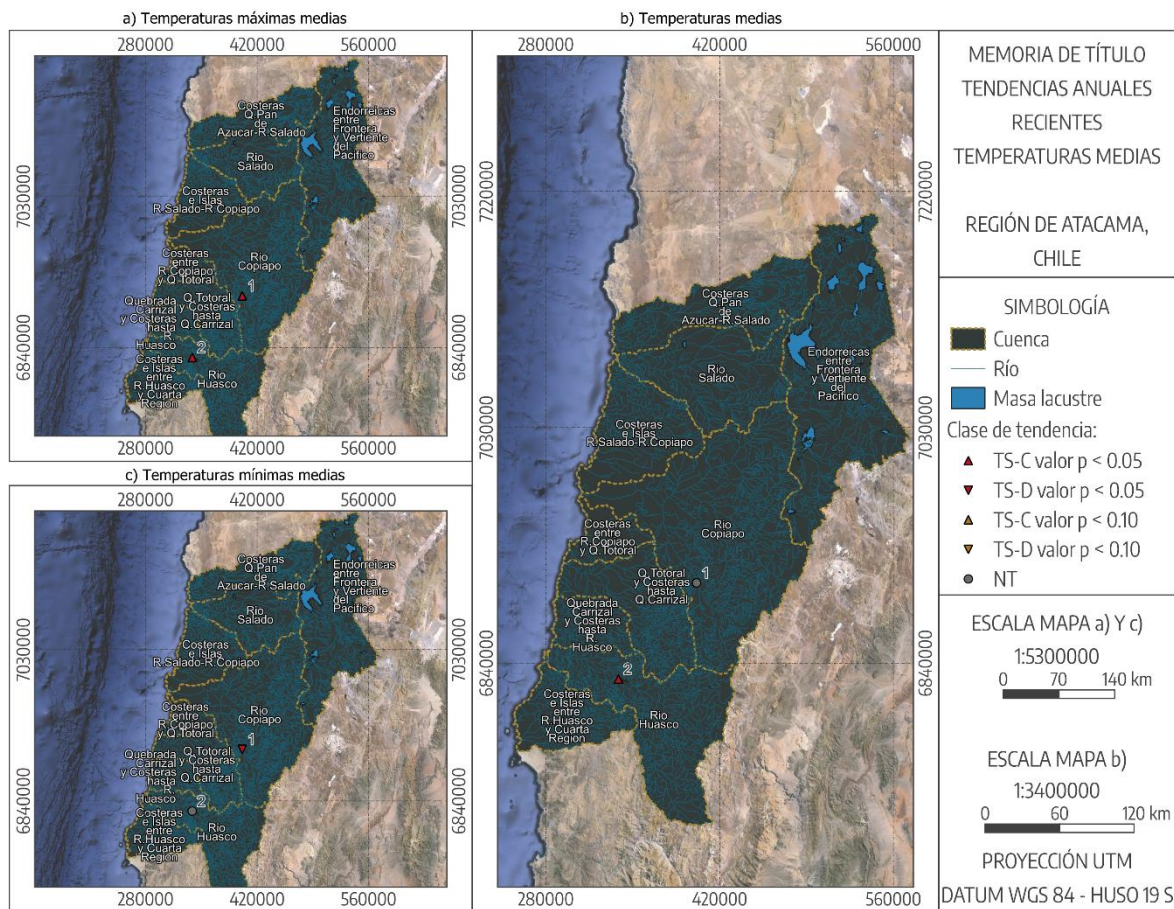


Figura A.4.1.4. Mapa de tendencias anuales recientes de temperaturas medias en la región de Atacama, Chile

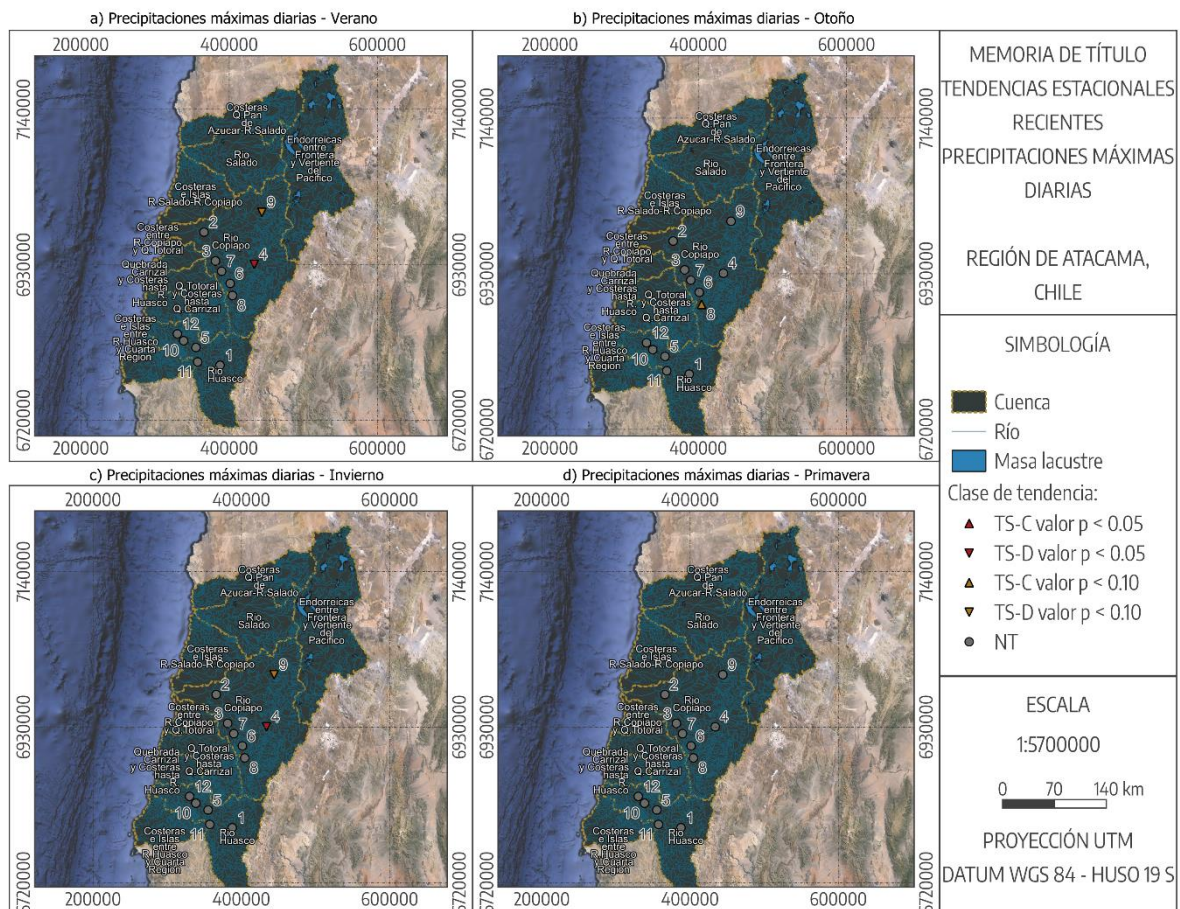


Figura A.4.1.5. Mapa de tendencias estacionales recientes de precipitaciones máximas diarias en la región de Atacama, Chile.

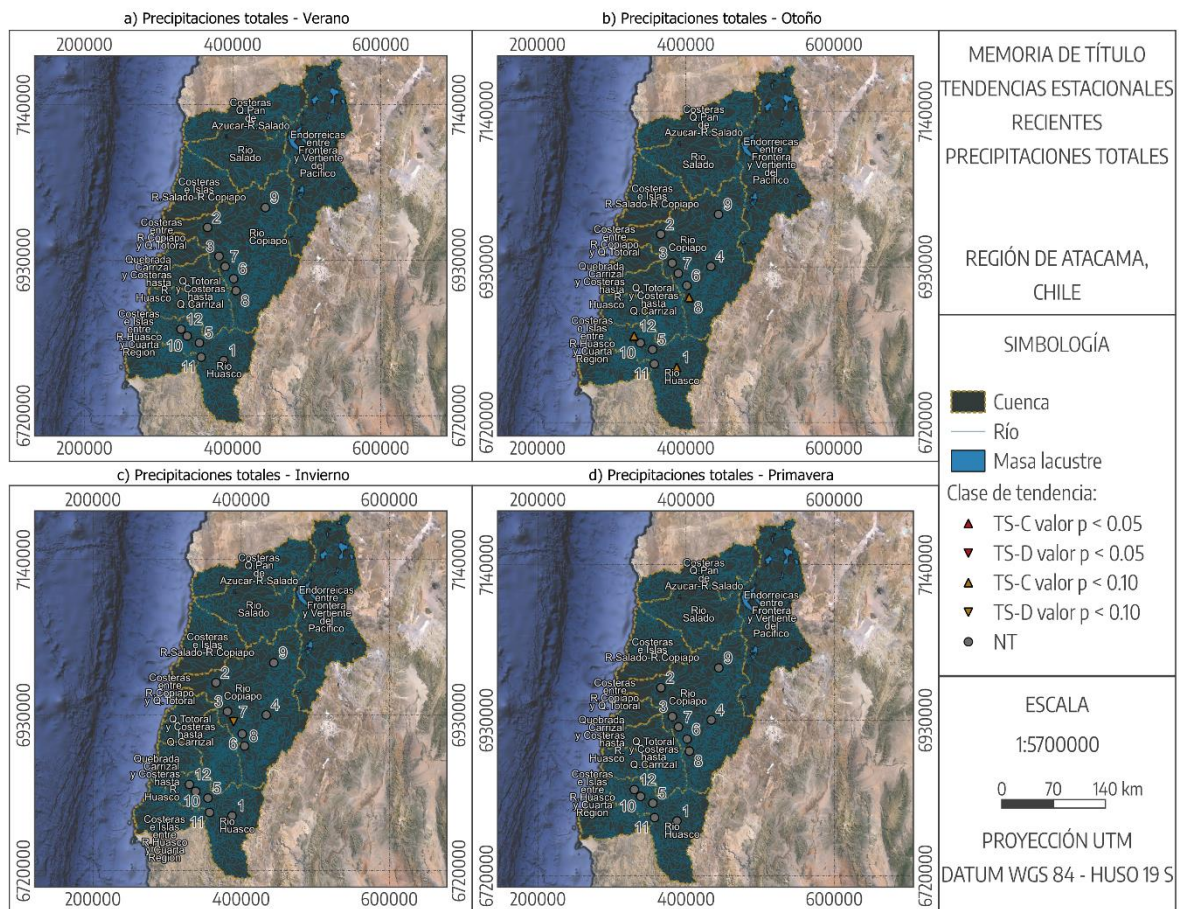


Figura A.4.1.6. Mapa de tendencias estacionales recientes de precipitaciones totales en la región de Atacama, Chile.

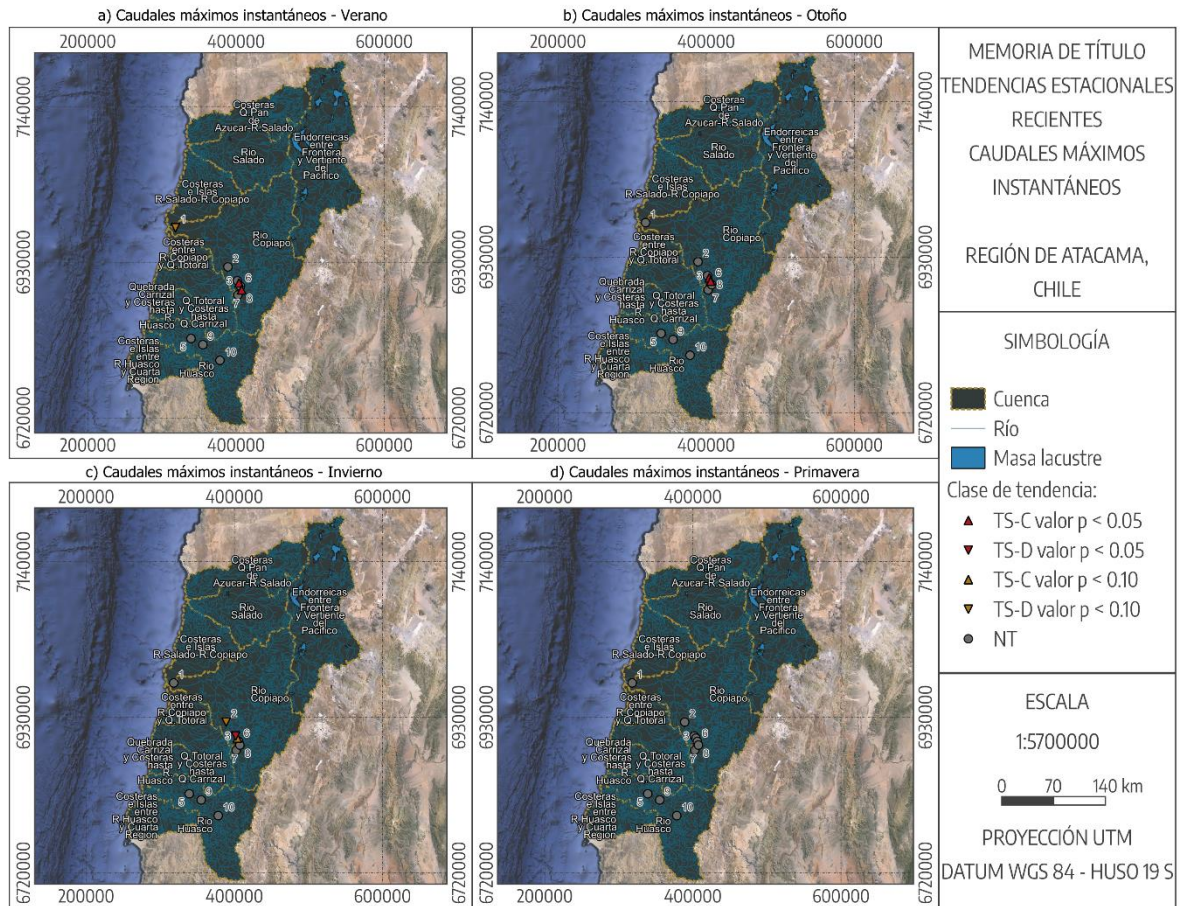


Figura A.4.1.7. Mapa de tendencias estacionales recientes de caudales máximos instantáneos en la región de Atacama, Chile.

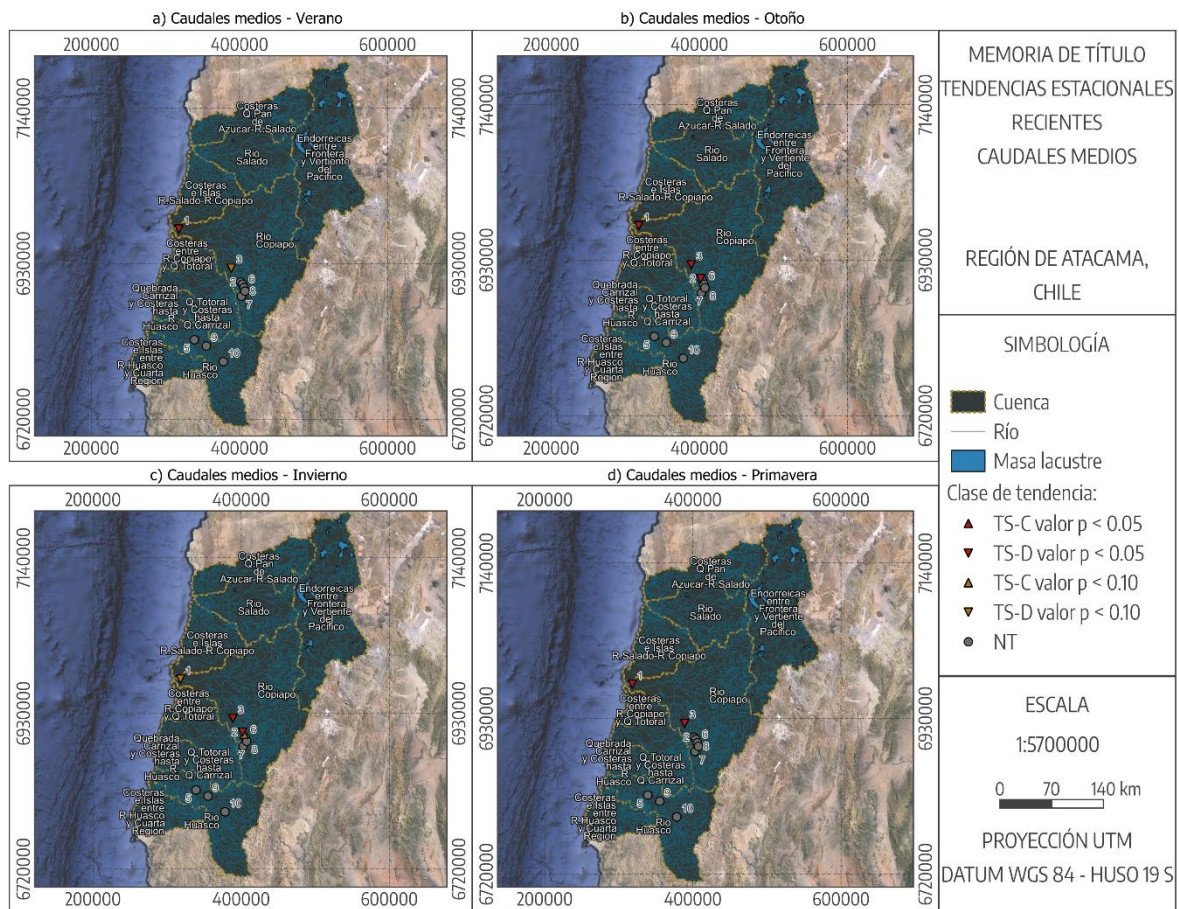


Figura A.4.1.8. Mapa de tendencias estacionales recientes de caudales medios en la región de Atacama, Chile.

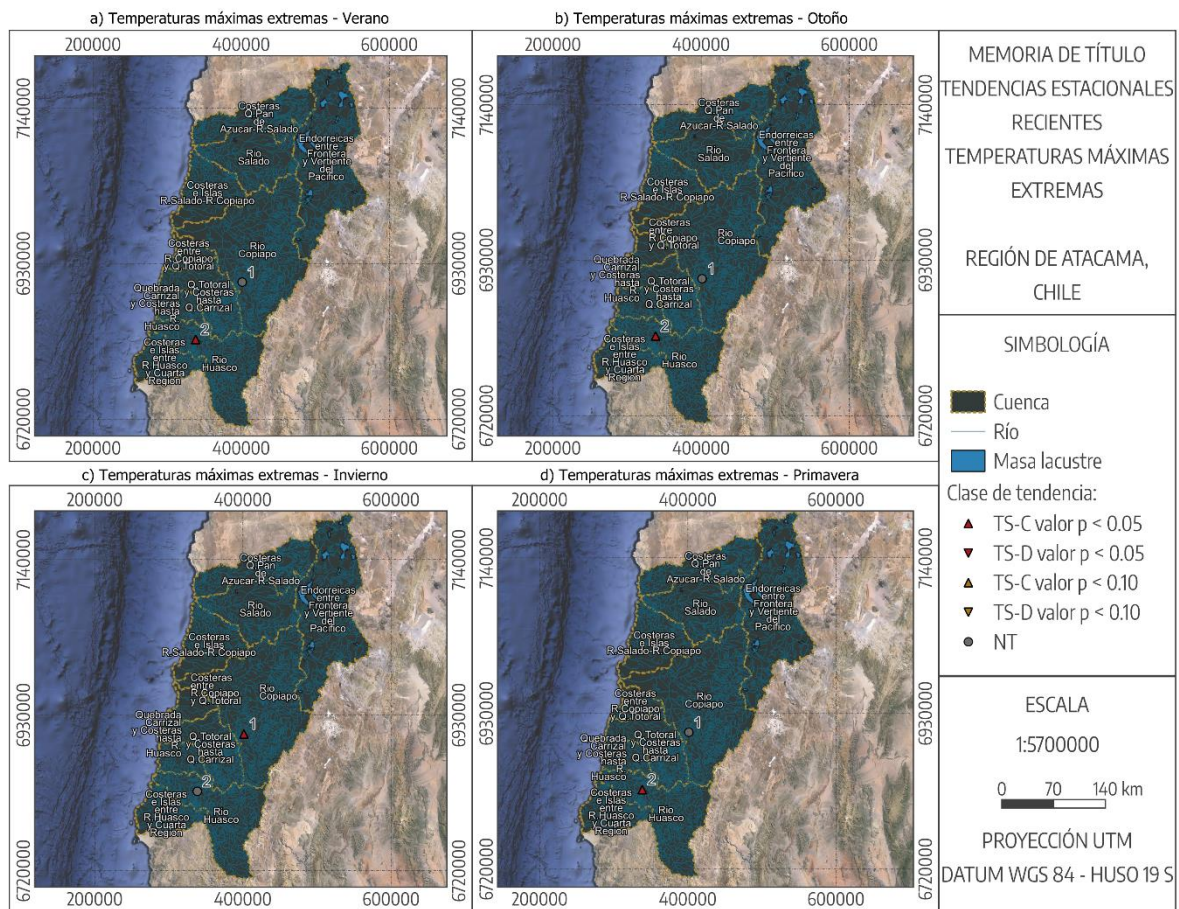


Figura A.4.1.9. Mapa de tendencias estacionales recientes de temperaturas máximas extremas en la región de Atacama, Chile

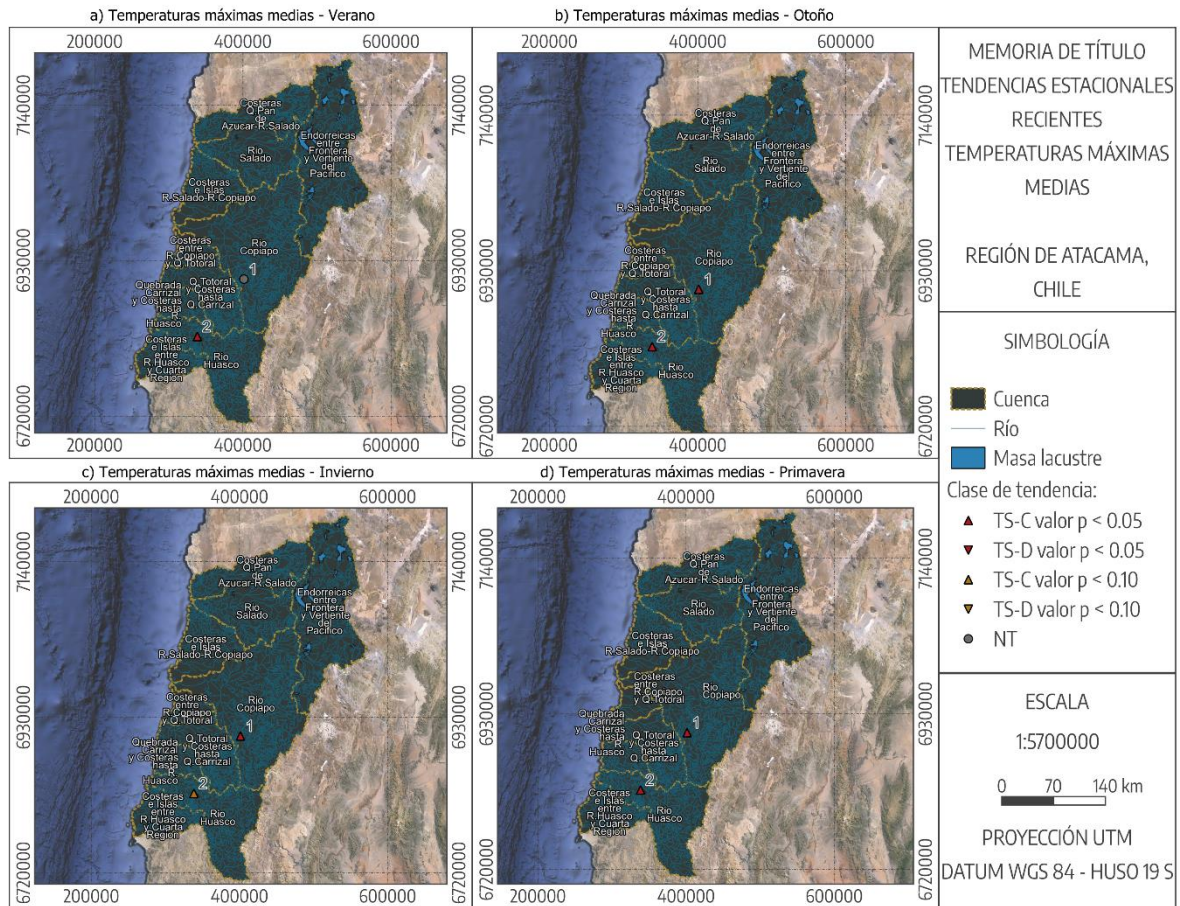


Figura A.4.1.10. Mapa de tendencias estacionales recientes de temperaturas máximas medias en la región de Atacama, Chile.

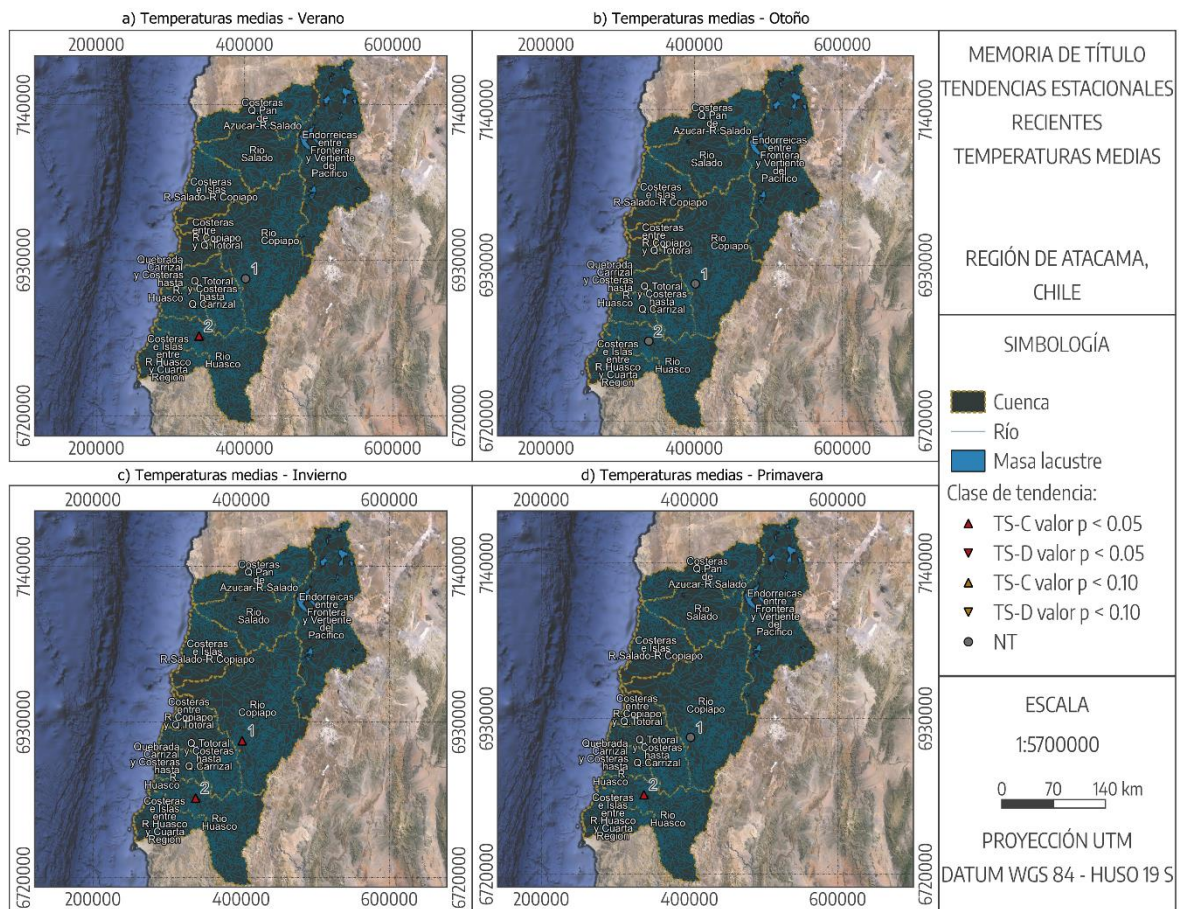


Figura A.4.1.11. Mapa de tendencias estacionales recientes de temperaturas medias en la región de Atacama, Chile.

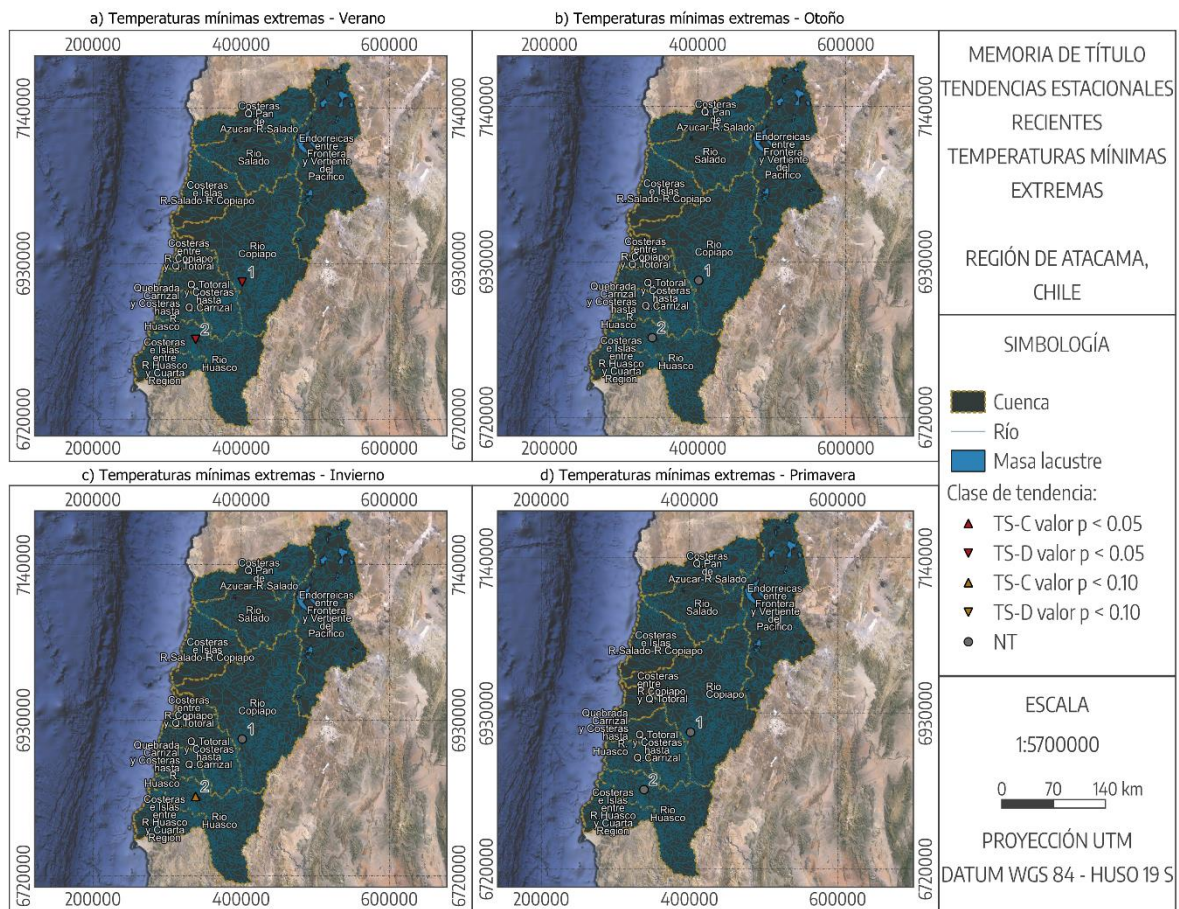


Figura A.4.1.12. Mapa de tendencias estacionales recientes de temperaturas mínimas extremas en la región de Atacama, Chile

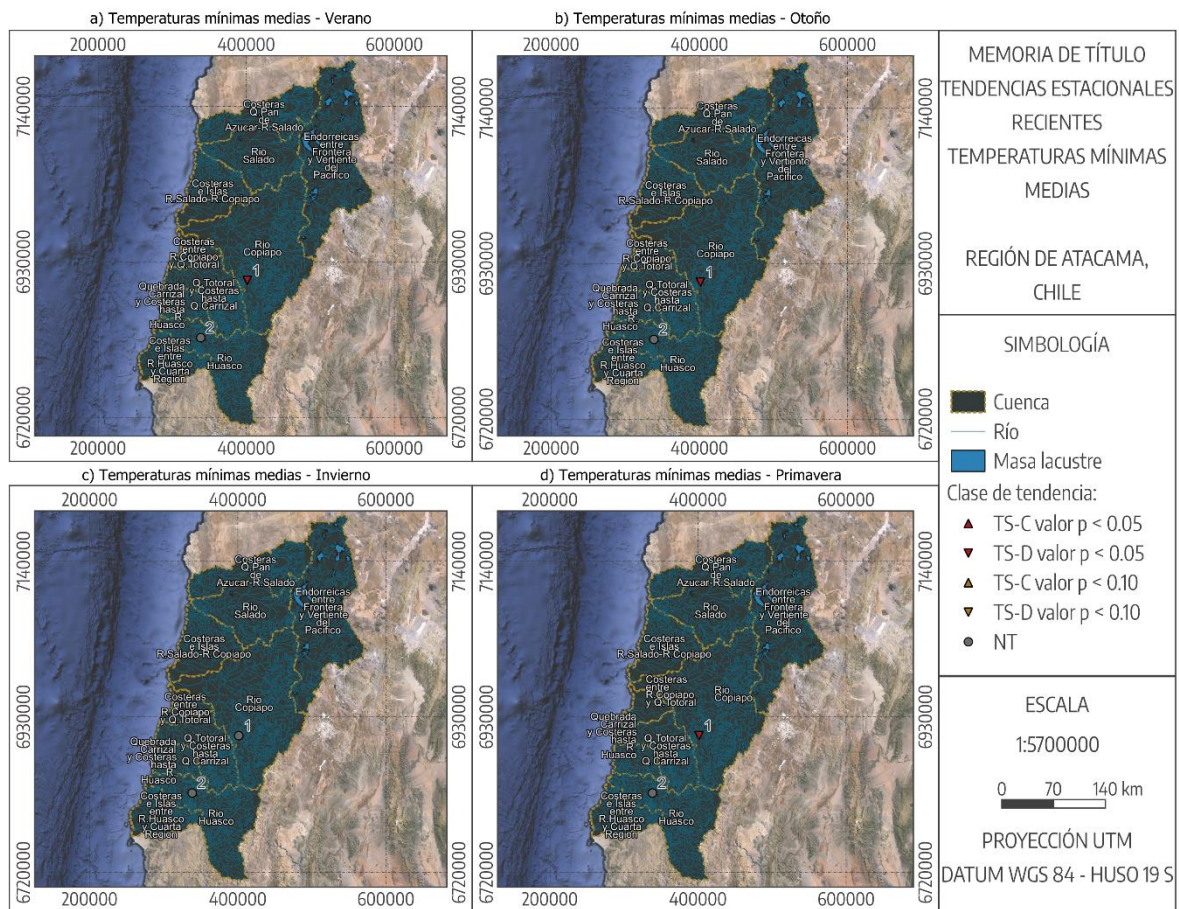


Figura A.4.1.13. Mapa de tendencias estacionales recientes de temperaturas mínimas medias en la región de Atacama, Chile.

ANEXO 4.2. Mapas de resultados de análisis de tendencias históricas.

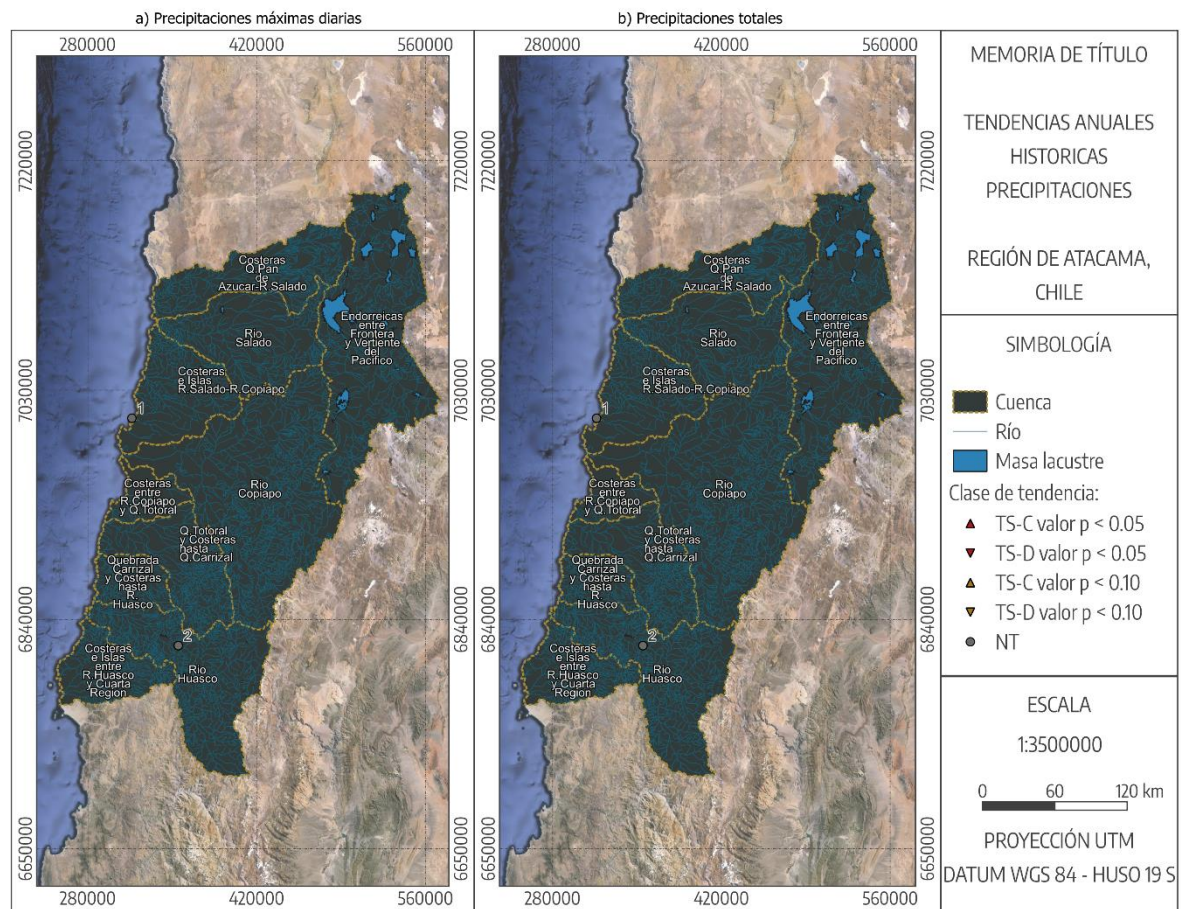


Figura A.4.2.14. Mapa de tendencias anuales históricas de precipitaciones en la región de Atacama, Chile.

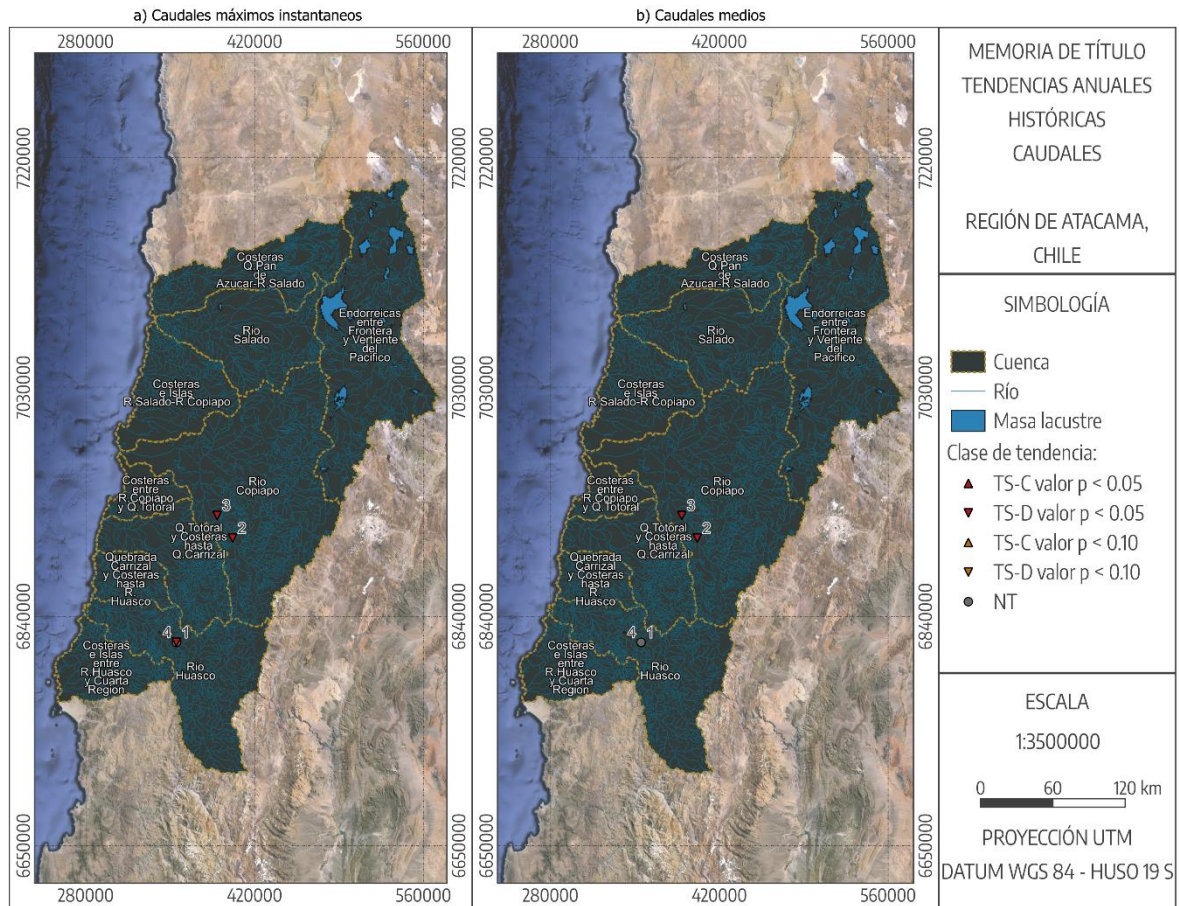


Figura A.4.2.15. Mapa de tendencias anuales históricas de caudales en la región de Atacama, Chile.

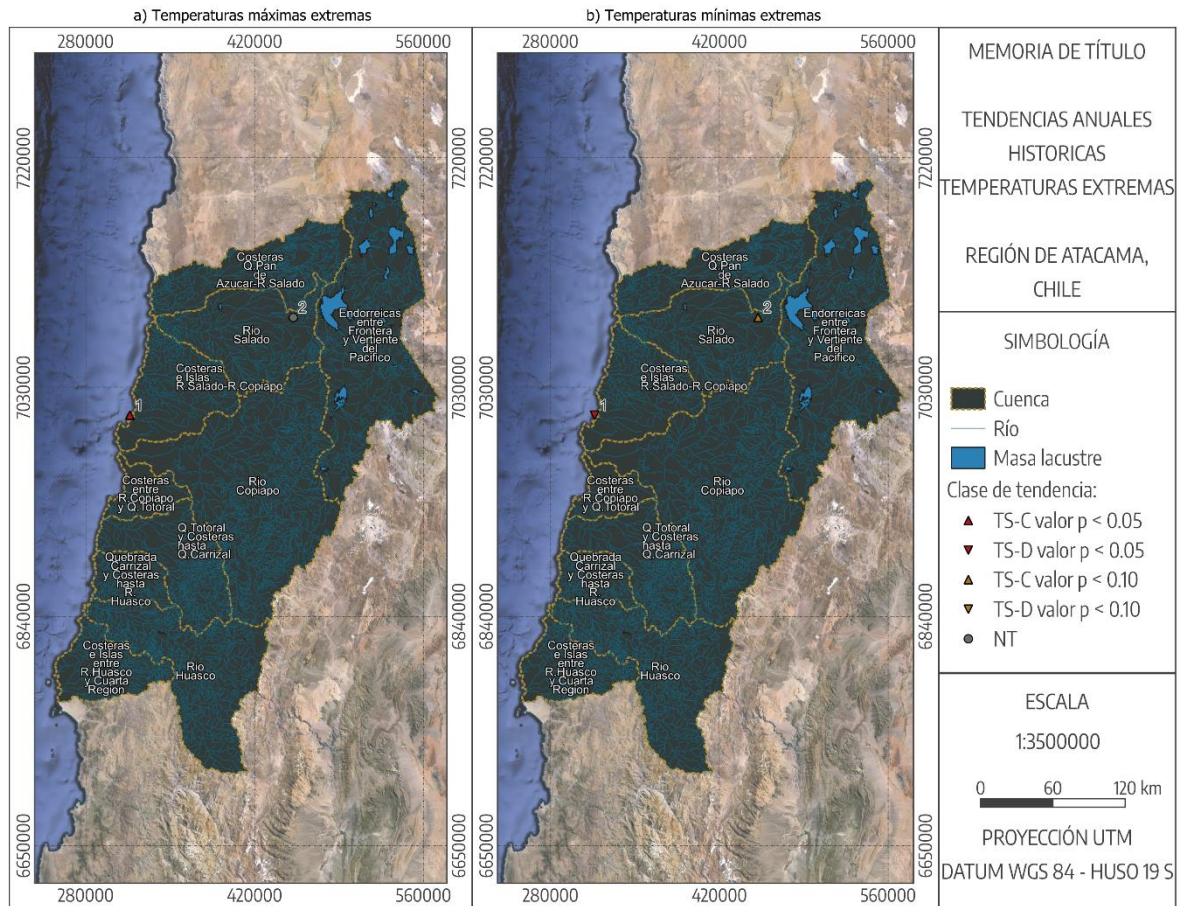


Figura A.4.2.16. Mapa de tendencias anuales históricas de temperaturas extremas en la región de Atacama, Chile

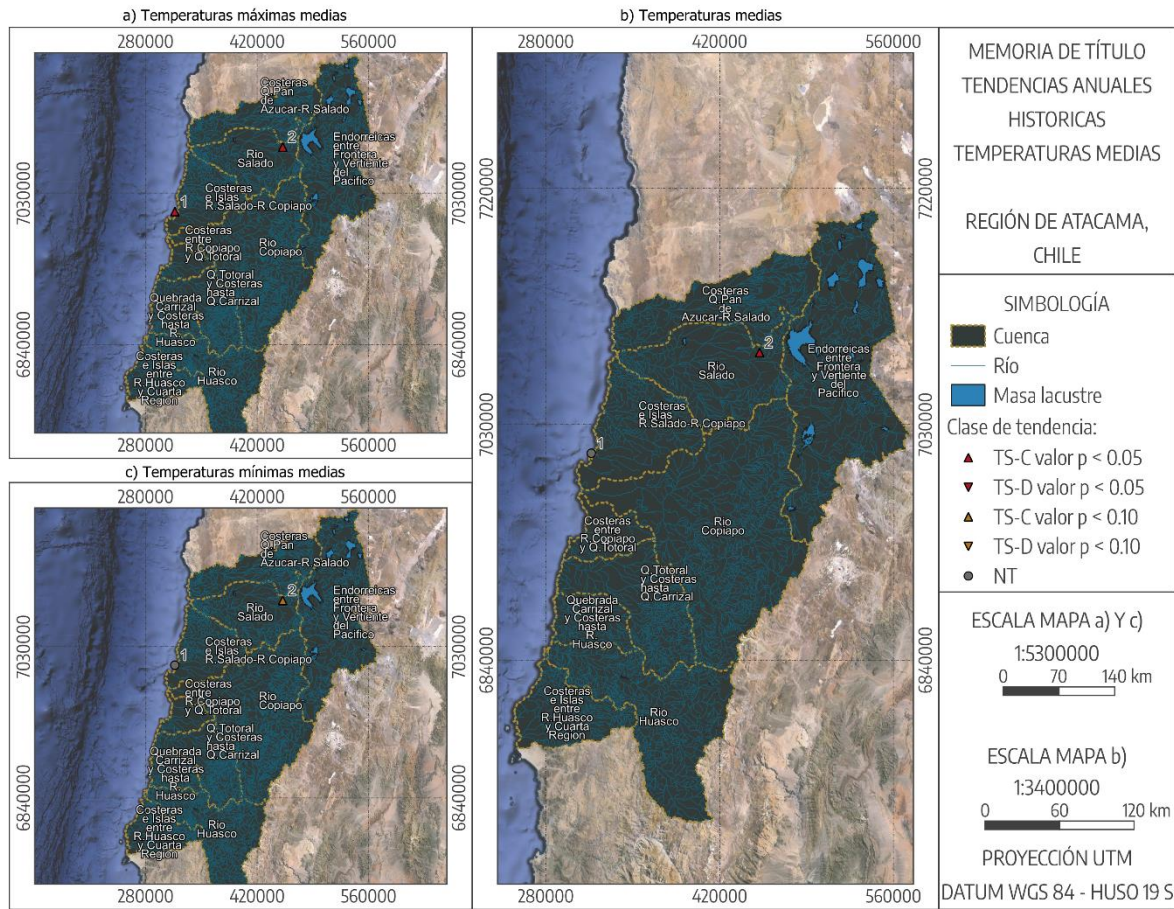


Figura A.4.2.17. Mapa de tendencias anuales históricas de temperaturas medias en la región de Atacama, Chile.

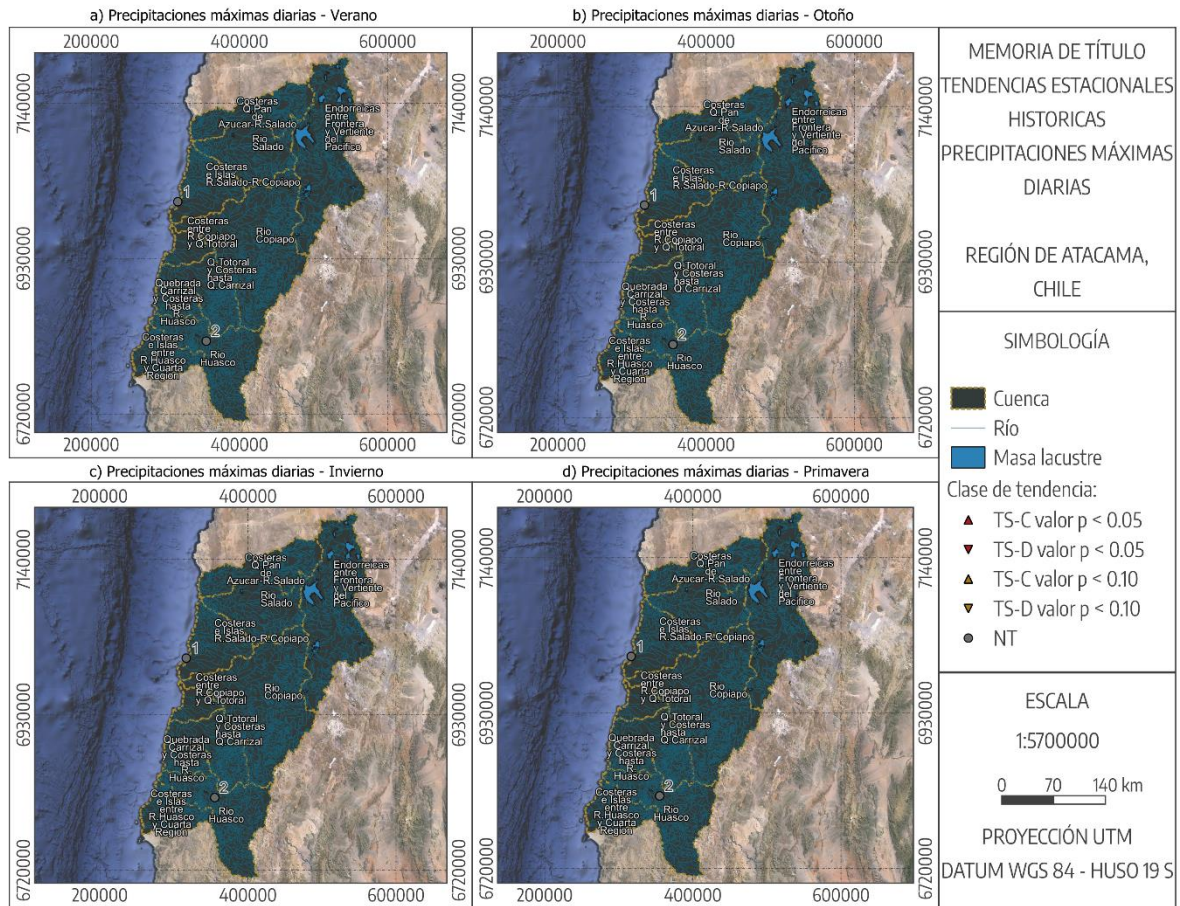


Figura A.4.2.18. Mapa de tendencias estacionales históricas de precipitaciones máximas diarias en la región de Atacama, Chile.

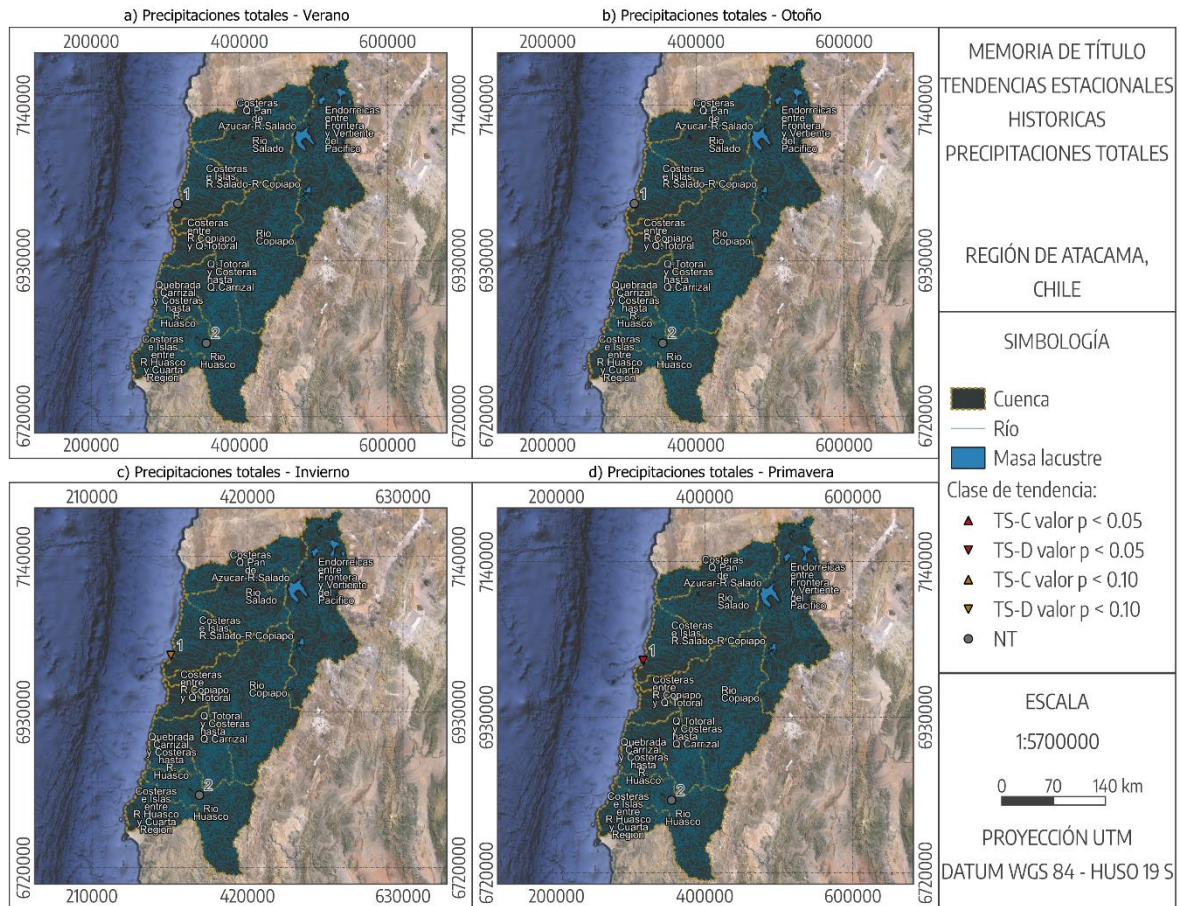


Figura A.4.2.19. Mapa de tendencias estacionales históricas de precipitaciones totales en la región de Atacama, Chile.

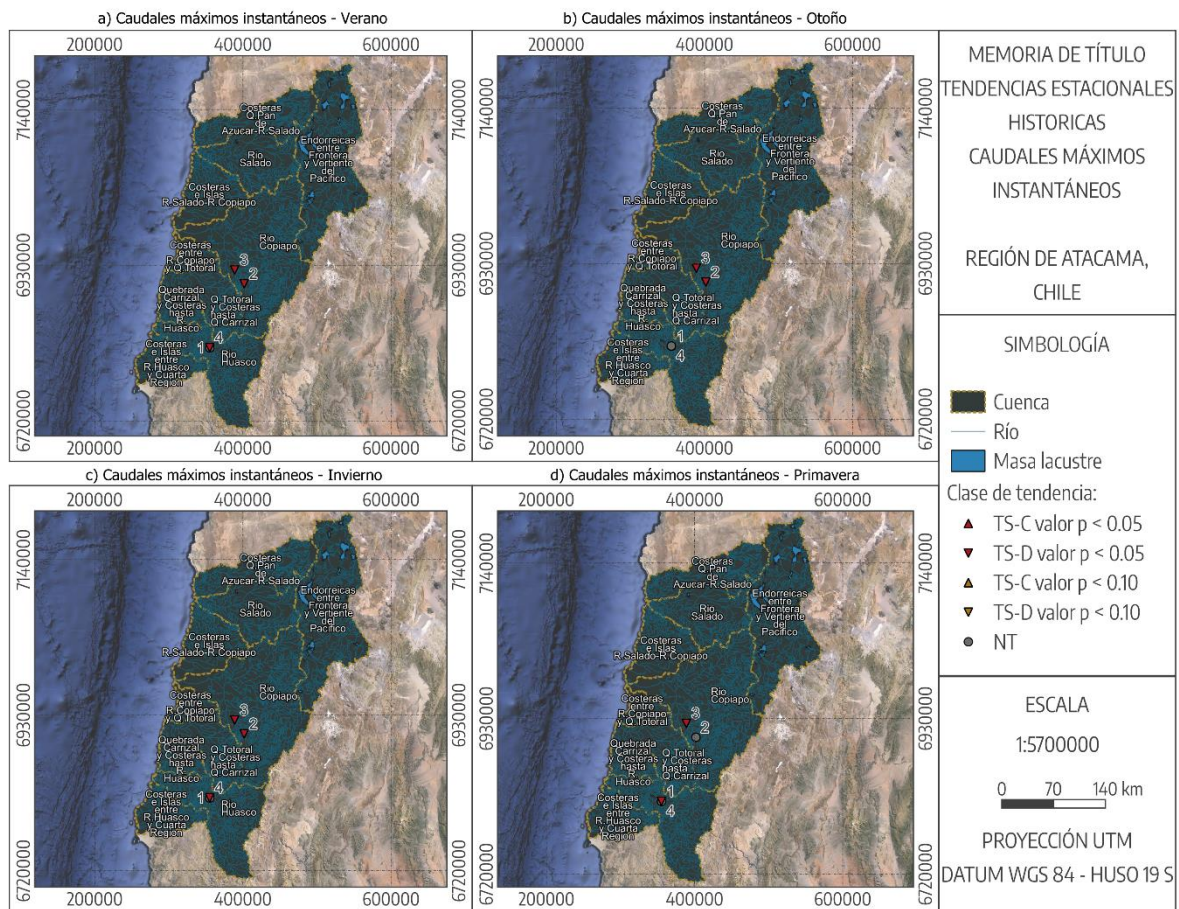


Figura A.4.2.20. Mapa de tendencias estacionales históricas de caudales máximos instantáneos en la región de Atacama, Chile.

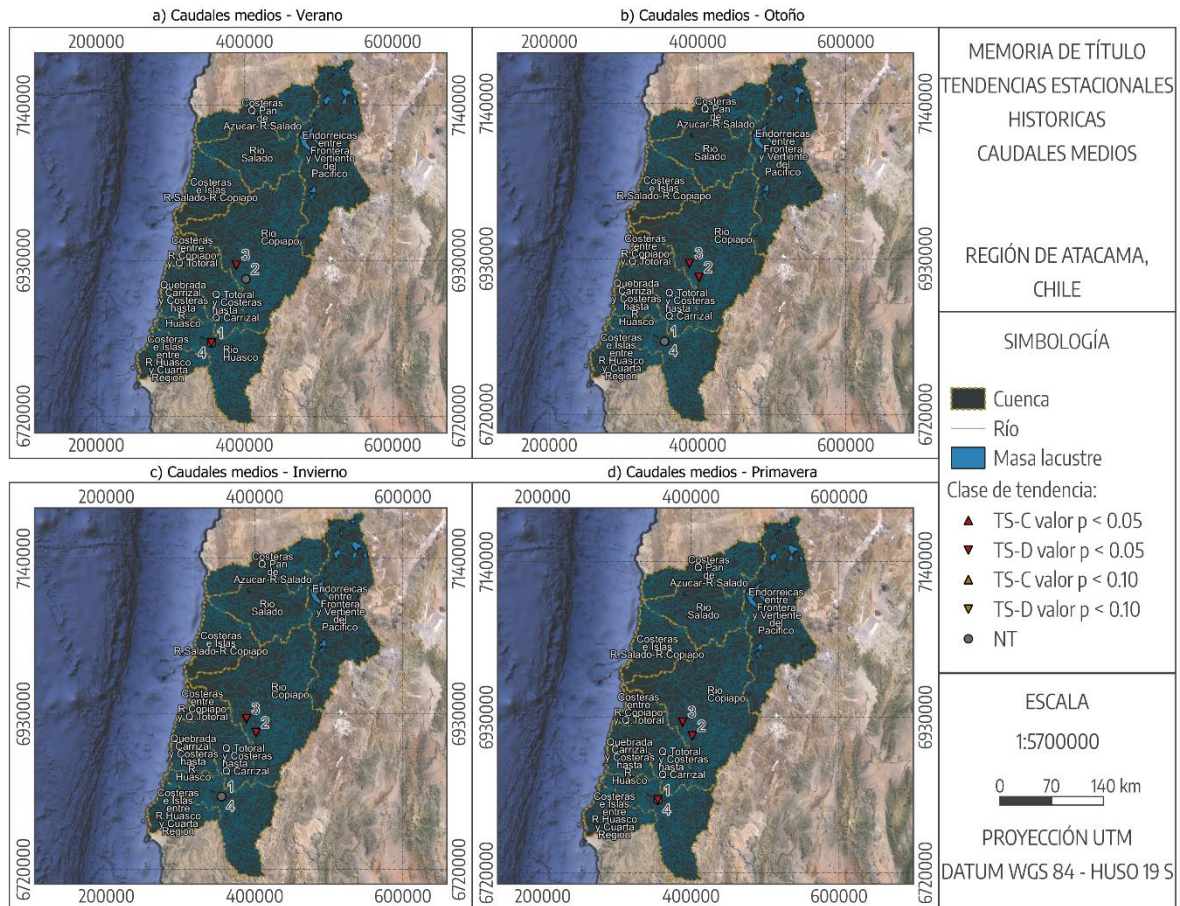


Figura A.4.2.21. Mapa de tendencias estacionales históricas de caudales medios en la región de Atacama, Chile.

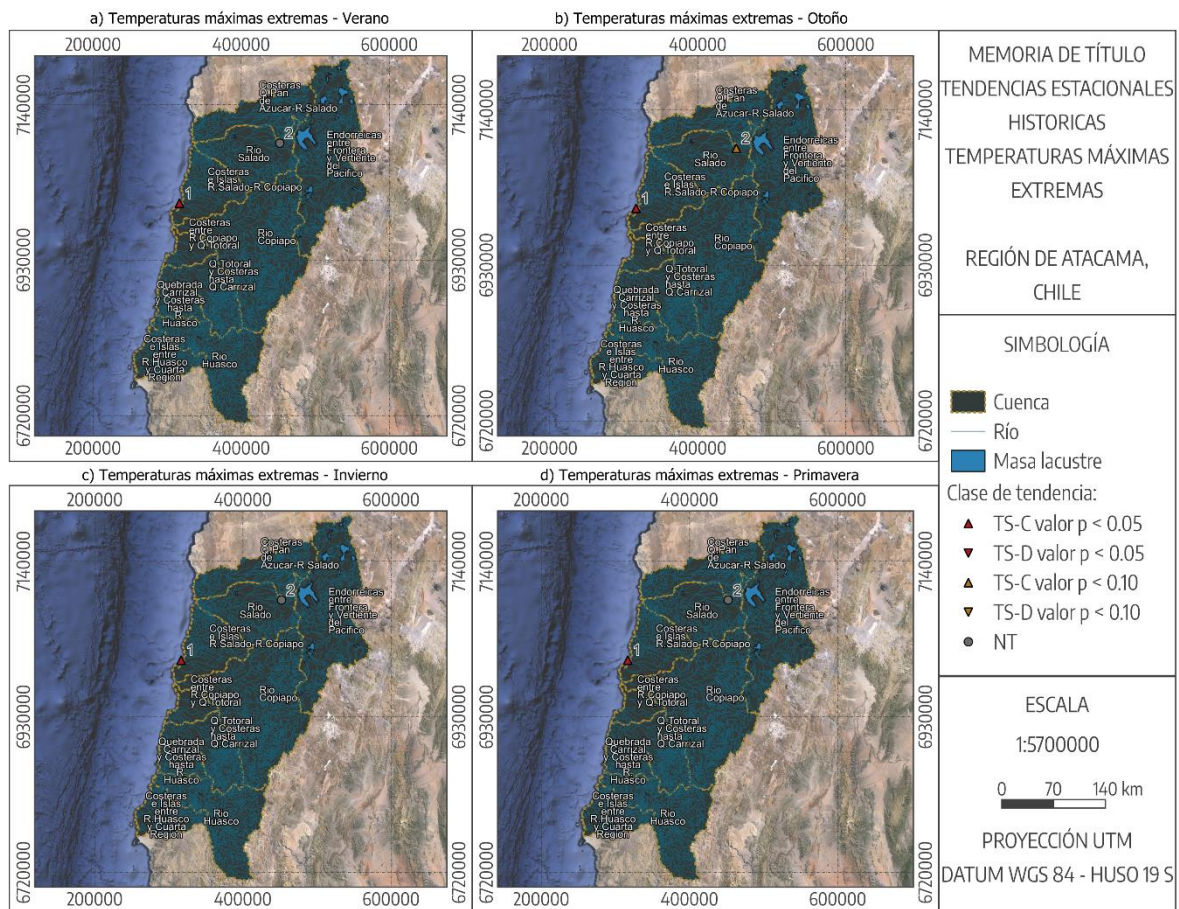


Figura A.4.2.22. Mapa de tendencias estacionales históricas de temperaturas máximas extremas en la región de Atacama, Chile.

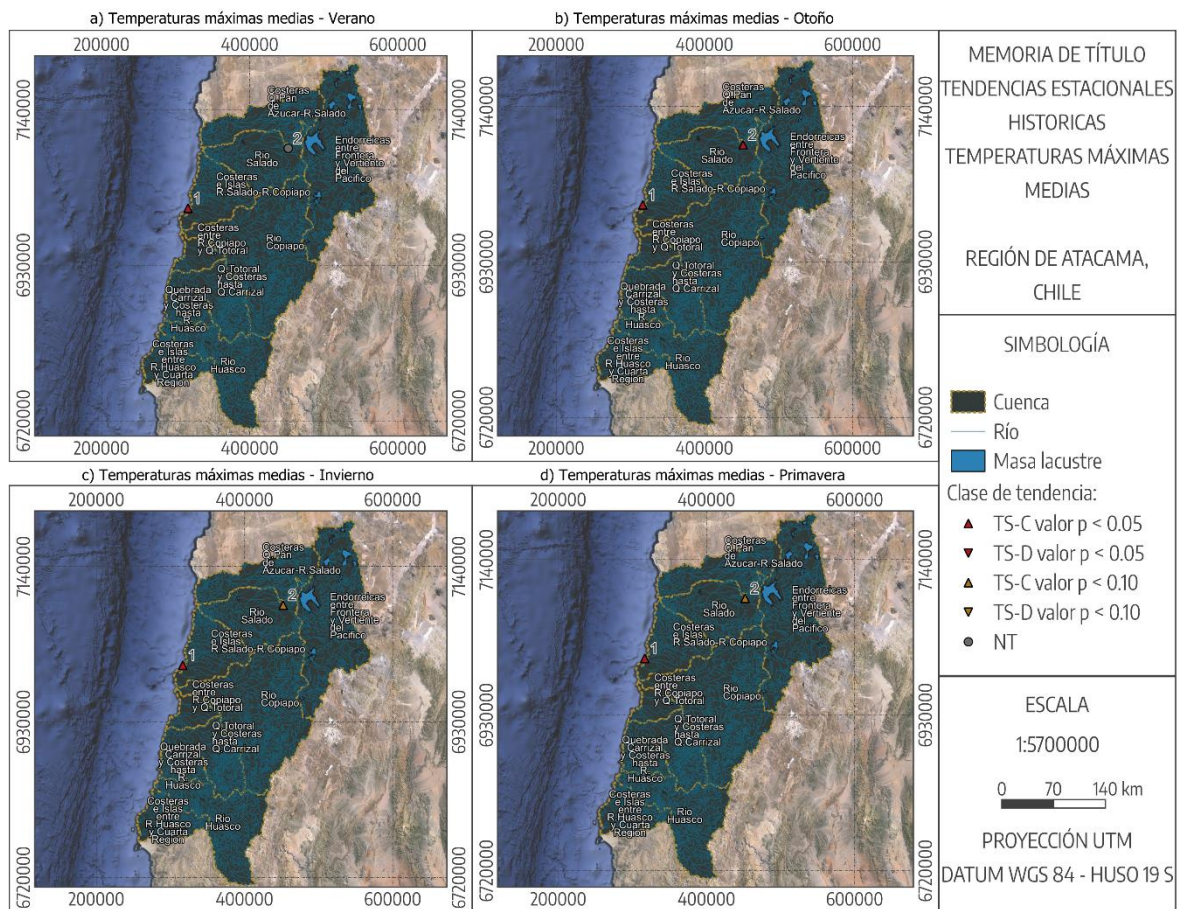


Figura A.4.2.23. Mapa de tendencias estacionales históricas de temperaturas máximas medias la región de Atacama, Chile.

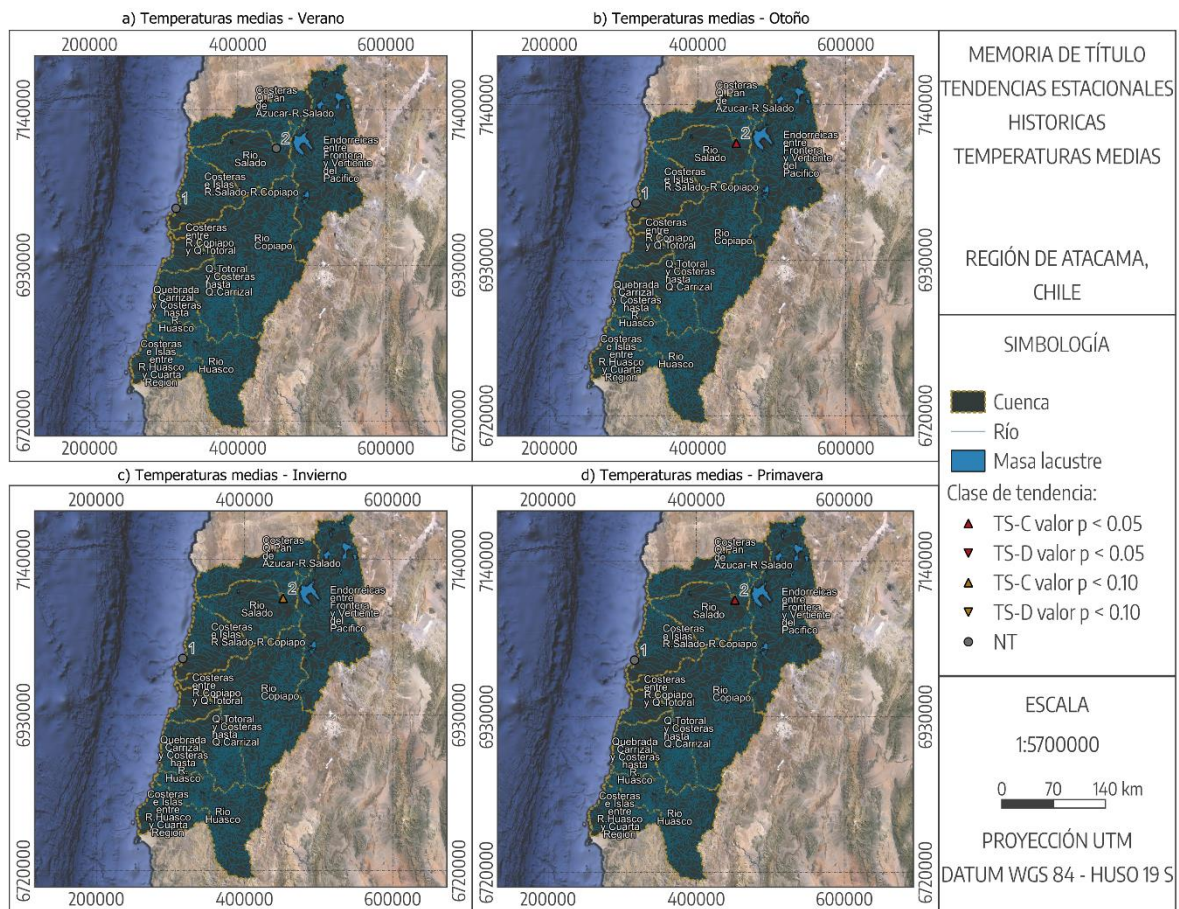


Figura A.4.2.24. Mapa de tendencias estacionales históricas de temperaturas medias en la región de Atacama, Chile.

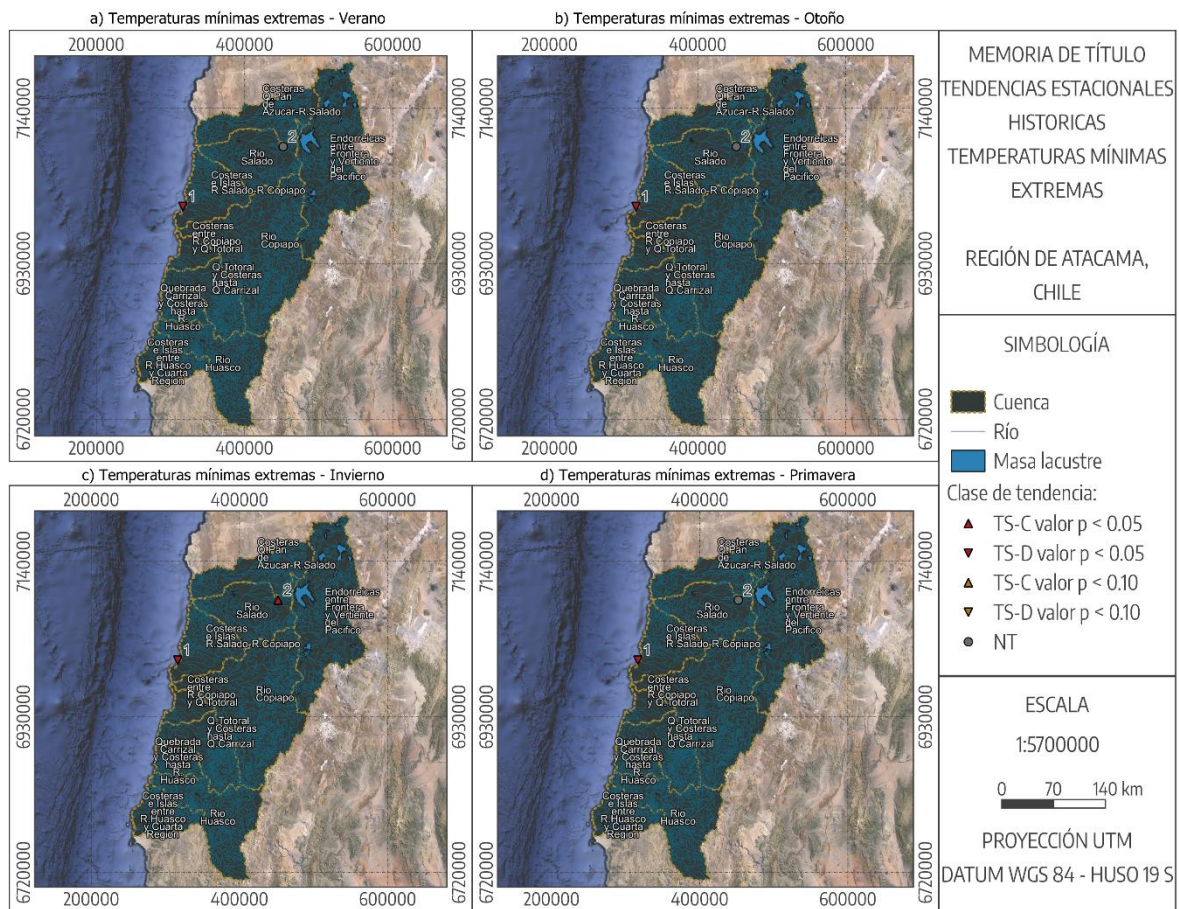


Figura A.4.2.25. Mapa de tendencias estacionales históricas de temperaturas mínimas extremas la región de Atacama, Chile.

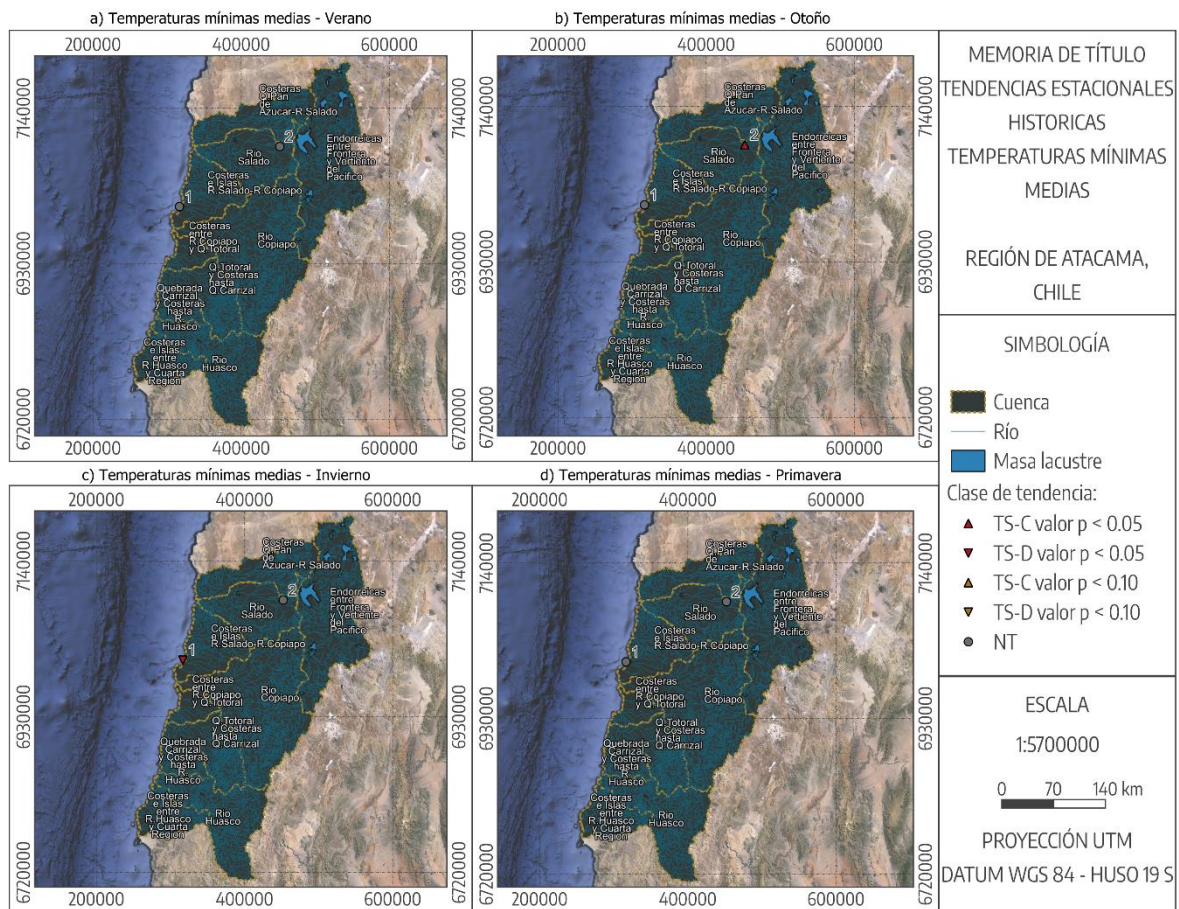


Figura A.4.2.26. Mapa de tendencias estacionales históricas de temperaturas mínimas medias la región de Atacama, Chile.

ANEXO 4.3. Resultados de métodos estadísticos en tendencias recientes.*Tabla A.4.3.1. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de precipitaciones máximas diarias.*

I D	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. de datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (mm/año)	Año cambi o	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Precipitación máx. diaria	Conay	94%	54.5%	-0.11	1992	89%
2	Anual	Precipitación máx. diaria	Copiapó	96%	21.8%	-0.05	1992	49%
3	Anual	Precipitación máx. diaria	Elbor Campamento	84%	76.9%	0.00	1992	100%
4	Anual	Precipitación máx. diaria	Jorquera En La Guardia	98%	23.4%	-0.16	1992	31%
5	Anual	Precipitación máx. diaria	Junta Del Carmen	98%	58.7%	-0.11	1992	72%
6	Anual	Precipitación máx. diaria	Lautaro Embalse	98%	95.2%	0.00	1993	100%
7	Anual	Precipitación máx. diaria	Los Loros	90%	27.7%	-0.16	1992	39%
8	Anual	Precipitación máx. diaria	Manflas Hacienda	94%	93.4%	0.00	1982	100%
9	Anual	Precipitación máx. diaria	Pastos Grandes	96%	34.5%	-0.08	1987	49%
10	Anual	Precipitación máx. diaria	Santa Juana	94%	59.5%	-0.08	1992	76%
11	Anual	Precipitación máx. diaria	San Félix	96%	99.3%	0.00	1992	100%
12	Anual	Precipitación máx. diaria	Vallenar Dga	92%	62.9%	-0.07	1992	81%
1	Invierno	Precipitación máx. diaria	Conay	88%	49.8%	-0.12	2004	37%
2	Invierno	Precipitación máx. diaria	Copiapó	84%	92.2%	0.00	1979	100%

3	Invierno	Precipitación máx. diaria	Elibor Campamento	82%	64.9%	0.00	1992	100%
4	Invierno	Precipitación máx. diaria	Jorquera En La Guardia	92%	8.5%	-0.19	1993	23%
5	Invierno	Precipitación máx. diaria	Junta Del Carmen	96%	26.5%	-0.12	1993	41%
6	Invierno	Precipitación máx. diaria	Lautaro Embalse	98%	31.9%	-0.08	1992	49%
7	Invierno	Precipitación máx. diaria	Los Loros	90%	9.7%	-0.16	1992	23%
8	Invierno	Precipitación máx. diaria	Manflas Hacienda	94%	10.8%	-0.17	1993	23%
9	Invierno	Precipitación máx. diaria	Pastos Grandes	84%	17.5%	-0.10	1987	48%
10	Invierno	Precipitación máx. diaria	Santa Juana	86%	91.6%	0.00	1979	100%
11	Invierno	Precipitación máx. diaria	San Félix	90%	96.1%	0.00	2004	100%
12	Invierno	Precipitación máx. diaria	Vallenar Dga	84%	55.1%	-0.10	1992	82%
1	Otoño	Precipitación máx. diaria	Conay	94%	17.8%	0.08	1999	19%
2	Otoño	Precipitación máx. diaria	Copiapó	90%	68.8%	0.00	1974	100%
3	Otoño	Precipitación máx. diaria	Elibor Campamento	84%	78.7%	0.00	1998	100%
4	Otoño	Precipitación máx. diaria	Jorquera En La Guardia	98%	22.1%	0.07	1998	58%
5	Otoño	Precipitación máx. diaria	Junta Del Carmen	100 %	48.5%	0.00	2009	96%
6	Otoño	Precipitación máx. diaria	Lautaro Embalse	98%	19.0%	0.00	1998	18%

7	Otoño	Precipitación máx. diaria	Los Loros	90%	37.6%	0.00	2009	50%
8	Otoño	Precipitación máx. diaria	Manflas Hacienda	96%	6.6%	0.06	1998	14%
9	Otoño	Precipitación máx. diaria	Pastos Grandes	96%	56.0%	0.00	1991	100%
10	Otoño	Precipitación máx. diaria	Santa Juana	92%	12.4%	0.00	2008	32%
11	Otoño	Precipitación máx. diaria	San Félix	94%	40.6%	0.00	1999	100%
12	Otoño	Precipitación máx. diaria	Vallenar Dga	92%	12.5%	0.01	1999	26%
1	Primavera	Precipitación máx. diaria	Conay	90%	58.4%	0.00	1988	100%
2	Primavera	Precipitación máx. diaria	Copiapó	90%	70.6%	0.00	2007	100%
3	Primavera	Precipitación máx. diaria	Elibor Campamento	84%	72.7%	0.00	2007	100%
4	Primavera	Precipitación máx. diaria	Jorquera En La Guardia	96%	93.0%	0.00	1978	100%
5	Primavera	Precipitación máx. diaria	Junta Del Carmen	94%	99.1%	0.00	1988	100%
6	Primavera	Precipitación máx. diaria	Lautaro Embalse	96%	100.0%	0.00	2007	100%
7	Primavera	Precipitación máx. diaria	Los Loros	90%	80.0%	0.00	1988	100%
8	Primavera	Precipitación máx. diaria	Manflas Hacienda	94%	52.0%	0.00	1998	100%
9	Primavera	Precipitación máx. diaria	Pastos Grandes	92%	69.6%	0.00	1995	78%
10	Primavera	Precipitación máx. diaria	Santa Juana	92%	59.5%	0.00	1981	69%

11	Primavera	Precipitación máx. diaria	San Félix	94%	75.5%	0.00	2007	100%
12	Primavera	Precipitación máx. diaria	Vallenar Dga	88%	16.4%	0.00	1995	37%
1	Verano	Precipitación máx. diaria	Conay	94%	26.9%	0.00	2001	100%
2	Verano	Precipitación máx. diaria	Copiapó	88%	59.3%	0.00	1987	100%
3	Verano	Precipitación máx. diaria	Elibor Campamento	82%	13.9%	0.00	2016	100%
4	Verano	Precipitación máx. diaria	Jorquera En La Guardia	98%	11.3%	0.00	1997	30%
5	Verano	Precipitación máx. diaria	Junta Del Carmen	98%	33.7%	0.00	1992	100%
6	Verano	Precipitación máx. diaria	Lautaro Embalse	98%	77.3%	0.00	1994	100%
7	Verano	Precipitación máx. diaria	Los Loros	88%	81.3%	0.00	1992	100%
8	Verano	Precipitación máx. diaria	Manflas Hacienda	96%	73.3%	0.00	1986	100%
9	Verano	Precipitación máx. diaria	Pastos Grandes	90%	94.6%	0.00	2002	100%
10	Verano	Precipitación máx. diaria	Santa Juana	90%	27.2%	0.00	1991	100%
11	Verano	Precipitación máx. diaria	San Félix	92%	55.0%	0.00	1993	100%
12	Verano	Precipitación máx. diaria	Vallenar Dga	84%	47.9%	0.00	1991	100%

Tabla A.4.3.2. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de precipitaciones totales.

I D	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. de datos	Valor P (Mann)	Slope sen (mm/año)	Año cambio	Valor P
-----	------------------	----------	----------	----------------	----------------	--------------------	------------	---------

					Kendall)			(Pettitt)
1	Anual	Precipitación total	Conay	94%	52.7%	-0.36	1992	80.3%
2	Anual	Precipitación total	Copiapó	88%	70.8%	0.02	1979	100.0%
3	Anual	Precipitación total	Elibor Campamento	84%	75.2%	0.00	1992	100.0%
4	Anual	Precipitación total	Jorquera En La Guardia	96%	88.0%	0.02	2002	100.0%
5	Anual	Precipitación total	Junta Del Carmen	96%	88.0%	-0.03	1992	95.4%
6	Anual	Precipitación total	Lautaro Embalse	98%	69.8%	0.07	1982	100.0%
7	Anual	Precipitación total	Los Loros	88%	39.0%	-0.19	1992	54.9%
8	Anual	Precipitación total	Manflas Hacienda	94%	60.1%	0.16	1982	98.3%
9	Anual	Precipitación total	Pastos Grandes	88%	91.9%	-0.03	1987	100.0%
10	Anual	Precipitación total	Santa Juana	92%	84.2%	-0.04	1992	100.0%
11	Anual	Precipitación total	San Félix	96%	86.6%	-0.07	1979	100.0%
12	Anual	Precipitación total	Vallenar Dga	86%	85.1%	0.09	1992	100.0%
1	Invierno	Precipitación total	Conay	88%	37.9%	-0.44	2002	40.7%
2	Invierno	Precipitación total	Copiapó	84%	88.7%	0.00	1979	100.0%
3	Invierno	Precipitación total	Elibor Campamento	82%	69.9%	0.00	1992	100.0%
4	Invierno	Precipitación total	Jorquera En La Guardia	92%	38.2%	-0.11	1993	82.7%
5	Invierno	Precipitación total	Junta Del Carmen	96%	32.2%	-0.17	2000	51.3%
6	Invierno	Precipitación total	Lautaro Embalse	98%	55.6%	-0.03	1993	77.2%
7	Invierno	Precipitación total	Los Loros	90%	8.8%	-0.20	1992	33.9%
8	Invierno	Precipitación total	Manflas Hacienda	94%	21.5%	-0.18	2002	42.9%

9	Invierno	Precipitación total	Pastos Grandes	84%	29.4%	-0.10	1987	100.0 %
10	Invierno	Precipitación total	Santa Juana	86%	95.8%	0.00	1979	100.0 %
11	Invierno	Precipitación total	San Félix	90%	68.1%	-0.08	2005	91.7%
12	Invierno	Precipitación total	Vallenar Dga	84%	56.5%	-0.15	1992	89.2%
1	Otoño	Precipitación total	Conay	94%	7.8%	0.18	1999	14.6%
2	Otoño	Precipitación total	Copiapó	90%	60.6%	0.00	2009	100.0 %
3	Otoño	Precipitación total	Elibor Campamento	84%	68.1%	0.00	1998	92.1%
4	Otoño	Precipitación total	Jorquera En La Guardia	98%	25.2%	0.09	1998	64.0%
5	Otoño	Precipitación total	Junta Del Carmen	100 %	43.0%	0.00	2009	88.1%
6	Otoño	Precipitación total	Lautaro Embalse	98%	12.8%	0.02	1998	11.2%
7	Otoño	Precipitación total	Los Loros	90%	34.3%	0.00	2009	53.6%
8	Otoño	Precipitación total	Manflas Hacienda	96%	5.3%	0.08	1998	12.9%
9	Otoño	Precipitación total	Pastos Grandes	96%	39.5%	0.00	1991	100.0 %
10	Otoño	Precipitación total	Santa Juana	92%	13.5%	0.00	2008	37.2%
11	Otoño	Precipitación total	San Félix	94%	32.8%	0.00	1999	100.0 %
12	Otoño	Precipitación total	Vallenar Dga	92%	5.9%	0.01	1999	30.2%
1	Primavera	Precipitación total	Conay	90%	52.7%	0.00	1988	100.0 %
2	Primavera	Precipitación total	Copiapó	90%	70.6%	0.00	2007	100.0 %
3	Primavera	Precipitación total	Elibor Campamento	84%	72.7%	0.00	2007	100.0 %
4	Primavera	Precipitación total	Jorquera En La Guardia	96%	81.4%	0.00	1978	100.0 %
5	Primavera	Precipitación total	Junta Del Carmen	94%	95.5%	0.00	1988	100.0 %

6	Primavera	Precipitación total	Lautaro Embalse	96%	97.5%	0.00	1988	100.0 %
7	Primavera	Precipitación total	Los Loros	90%	80.0%	0.00	1988	100.0 %
8	Primavera	Precipitación total	Manflas Hacienda	94%	52.7%	0.00	2003	100.0 %
9	Primavera	Precipitación total	Pastos Grandes	92%	76.3%	0.00	1995	85.1%
10	Primavera	Precipitación total	Santa Juana	92%	56.6%	0.00	1981	60.3%
11	Primavera	Precipitación total	San Félix	94%	78.9%	0.00	1981	100.0 %
12	Primavera	Precipitación total	Vallenar Dga	88%	19.3%	0.00	1995	44.2%
1	Verano	Precipitación total	Conay	94%	26.9%	0.00	2001	100.0 %
2	Verano	Precipitación total	Copiapó	88%	59.3%	0.00	1987	100.0 %
3	Verano	Precipitación total	Elibor Campamento	82%	13.9%	0.00	2016	100.0 %
4	Verano	Precipitación total	Jorquera En La Guardia	98%	9.0%	0.00	1997	27.6%
5	Verano	Precipitación total	Junta Del Carmen	98%	33.7%	0.00	1992	100.0 %
6	Verano	Precipitación total	Lautaro Embalse	98%	73.8%	0.00	1994	100.0 %
7	Verano	Precipitación total	Los Loros	88%	81.3%	0.00	1992	100.0 %
8	Verano	Precipitación total	Manflas Hacienda	96%	71.4%	0.00	1986	100.0 %
9	Verano	Precipitación total	Pastos Grandes	90%	94.6%	0.00	2002	100.0 %
10	Verano	Precipitación total	Santa Juana	90%	27.2%	0.00	1991	100.0 %
11	Verano	Precipitación total	San Félix	92%	55.0%	0.00	1993	100.0 %
12	Verano	Precipitación total	Vallenar Dga	84%	49.4%	0.00	1991	100.0 %

Tabla A.4.3.3. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de caudales máximos instantáneos.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. de datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (mm/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Angostura	90%	28.6%	0.00	2000	3.8%
2	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	94%	5.6%	-0.04	1992	3.9%
3	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	84%	69.6%	-0.01	1979	19.3%
4	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Pastillo	80%	0.6%	0.13	1979	4.4%
5	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Huasco En Santa Juana	80%	9.6%	-0.21	2004	4.4%
6	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Jorquera En Vertedero	94%	23.7%	0.01	1982	0.9%
7	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Manflas En Vertedero	82%	77.9%	0.00	1979	18.2%
8	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Pulido En Vertedero	96%	6.1%	0.07	1979	9.9%
9	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	86%	53.0%	-0.05	2003	22.6%
10	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito En Angostura Pinte	90%	68.1%	-0.03	2008	50.7%
1	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Angostura	92%	44.3%	0.00	2000	5.3%

2	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	96%	1.8%	-0.03	1993	3.3%
3	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	90%	8.0%	-0.03	2004	2.6%
4	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Pastillo	86%	5.2%	0.03	1980	4.6%
5	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Huasco En Santa Juana	86%	36.8%	-0.05	2003	3.8%
6	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Jorquera En Vertedero	96%	68.9%	0.00	1982	3.6%
7	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Manflas En Vertedero	94%	53.9%	0.00	2005	11.1%
8	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Pulido En Vertedero	100%	56.4%	0.00	1982	16.2%
9	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	90%	93.0%	0.00	1979	2.9%
10	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito En Angostura Pinte	92%	62.9%	0.01	1980	2.9%
1	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Angostura	92%	37.3%	0.00	1999	35.7%
2	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	96%	24.1%	-0.01	1993	1.6%
3	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	88%	31.7%	-0.01	1980	35.1%
4	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Pastillo	84%	1.9%	0.06	1979	5.7%

5	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Huasco En Santa Juana	86%	57.2%	-0.02	1982	36.4%
6	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Jorquera En Vertedero	96%	3.7%	0.01	1983	3.9%
7	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Manflas En Vertedero	88%	14.0%	0.01	1979	2.7%
8	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Pulido En Vertedero	96%	14.7%	0.03	1979	16.8%
9	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	86%	98.3%	0.00	1979	14.0%
10	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito En Angostura Pinte	86%	26.7%	0.04	1979	6.4%
1	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Angostura	90%	27.8%	0.00	1999	7.0%
2	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	94%	73.4%	0.00	1979	45.3%
3	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	88%	10.8%	-0.02	2004	13.1%
4	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Pastillo	88%	56.4%	0.01	1979	18.5%
5	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Huasco En Santa Juana	90%	20.0%	-0.07	2004	15.2%
6	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Jorquera En Vertedero	98%	63.5%	0.00	1982	2.7%
7	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Manflas	90%	77.7%	0.00	1979	14.4%

			En Vertedero					
8	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Pulido En Vertedero	100%	29.6%	0.01	1979	6.5%
9	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	90%	25.2%	-0.04	2008	18.6%
10	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito En Angostura Pinte	98%	82.9%	-0.01	2008	55.6%
1	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Angostura	90%	6.3%	0.00	1998	3.1%
2	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	96%	45.0%	-0.01	1993	33.1%
3	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	86%	57.9%	-0.01	1980	17.4%
4	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Pastillo	82%	0.4%	0.11	1982	0.9%
5	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Huasco En Santa Juana	86%	69.1%	0.02	1982	17.4%
6	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Jorquera En Vertedero	96%	52.8%	0.00	1983	22.9%
7	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Manflas En Vertedero	84%	65.7%	0.00	1980	8.2%
8	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Pulido En Vertedero	94%	2.9%	0.05	1980	6.2%
9	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	86%	42.0%	-0.03	2003	27.5%

10	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito En Angostura Pinte	86%	72.2%	-0.02	1980	64.4%
----	--------	-------------------------	---------------------------------	-----	-------	-------	------	-------

Tabla A.4.3.4. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de caudales medios.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. de datos	Valor P (Mann Kendall)	Pendiente Sen (m3/s/año)	Año del punto de cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Caudal medio	Río Copiapó En Angostura	90%	0.1%	0.00	1998	0.0%
2	Anual	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	94%	3.0%	-0.01	1993	0.1%
3	Anual	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	84%	0.7%	-0.04	2005	1.0%
4	Anual	Caudal medio	Río Copiapó En Pastillo	80%	10.0%	0.02	1980	16.6%
5	Anual	Caudal medio	Río Huasco En Santa Juana	80%	31.1%	-0.04	2006	18.1%
6	Anual	Caudal medio	Río Jorquera En Vertedero	94%	95.6%	0.00	1980	7.3%
7	Anual	Caudal medio	Río Manflas En Vertedero	82%	59.8%	0.00	1979	13.5%
8	Anual	Caudal medio	Río Pulido En Vertedero	96%	21.0%	0.01	1980	4.5%
9	Anual	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	88%	78.5%	-0.01	1979	15.0%
10	Anual	Caudal medio	Río Tránsito	90%	76.2%	0.01	1979	10.5%

			En Angostura Pinte					
1	Invierno	Caudal medio	Río Copiapó En Angostura	92%	8.5%	0.00	1998	0.3%
2	Invierno	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	96%	0.0%	-0.02	1991	0.0%
3	Invierno	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	90%	1.5%	-0.03	2005	1.1%
4	Invierno	Caudal medio	Río Copiapó En Pastillo	86%	8.2%	0.02	1980	5.3%
5	Invierno	Caudal medio	Río Huasco En Santa Juana	86%	37.9%	-0.03	2006	13.2%
6	Invierno	Caudal medio	Río Jorquera En Vertedero	96%	21.0%	0.00	1982	1.0%
7	Invierno	Caudal medio	Río Manflas En Vertedero	94%	81.2%	0.00	1979	10.6%
8	Invierno	Caudal medio	Río Pulido En Vertedero	100%	34.0%	0.00	1980	3.5%
9	Invierno	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	90%	50.0%	0.01	1979	2.7%
10	Invierno	Caudal medio	Río Tránsito En Angostura Pinte	92%	30.7%	0.02	1980	2.9%
1	Otoño	Caudal medio	Río Copiapó En Angostura	92%	1.2%	0.00	1999	0.0%
2	Otoño	Caudal medio	Río Copiapó	96%	2.0%	-0.01	1993	0.1%

			En Lautaro					
3	Otoño	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	88%	3.0%	-0.02	2006	4.5%
4	Otoño	Caudal medio	Río Copiapó En Pastillo	84%	15.9%	0.02	1982	23.8%
5	Otoño	Caudal medio	Río Huasco En Santa Juana	86%	85.1%	-0.01	1982	19.3%
6	Otoño	Caudal medio	Río Jorquera En Vertedero	96%	79.7%	0.00	1980	28.8%
7	Otoño	Caudal medio	Río Manflas En Vertedero	88%	17.2%	0.00	1980	3.2%
8	Otoño	Caudal medio	Río Pulido En Vertedero	96%	20.4%	0.01	1980	8.7%
9	Otoño	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	86%	80.2%	0.01	1979	11.8%
10	Otoño	Caudal medio	Río Tránsito En Angostura Pinte	86%	57.2%	0.01	1977	10.5%
1	Primavera	Caudal medio	Río Copiapó En Angostura	90%	0.3%	0.00	2003	0.1%
2	Primavera	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	94%	36.9%	0.00	1992	3.2%
3	Primavera	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	88%	0.4%	-0.04	2004	1.1%
4	Primavera	Caudal medio	Río Copiapó En Pastillo	88%	87.9%	0.00	2003	83.0%

5	Primavera	Caudal medio	Río Huasco En Santa Juana	90%	70.3%	-0.02	1977	41.7%
6	Primavera	Caudal medio	Río Jorquera En Vertedero	98%	54.1%	0.00	1980	3.4%
7	Primavera	Caudal medio	Río Manflas En Vertedero	90%	61.8%	0.00	1979	10.5%
8	Primavera	Caudal medio	Río Pulido En Vertedero	100%	62.8%	0.00	1980	22.7%
9	Primavera	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	90%	60.4%	-0.01	2003	14.4%
10	Primavera	Caudal medio	Río Tránsito En Angostura Pinte	98%	69.8%	0.01	1979	21.2%
1	Verano	Caudal medio	Río Copiapó En Angostura	92%	0.3%	0.00	1998	0.0%
2	Verano	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	98%	59.9%	0.00	1993	45.6%
3	Verano	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	86%	5.2%	-0.04	2005	7.7%
4	Verano	Caudal medio	Río Copiapó En Pastillo	84%	25.1%	0.02	1980	36.2%
5	Verano	Caudal medio	Río Huasco En Santa Juana	88%	22.1%	0.04	1982	9.6%
6	Verano	Caudal medio	Río Jorquera En Vertedero	96%	97.9%	0.00	1980	24.4%
7	Verano	Caudal medio	Río Manflas	86%	73.8%	0.00	1980	3.3%

			En Vertedero					
8	Verano	Caudal medio	Río Pulido En Vertedero	94%	15.3%	0.01	1980	9.0%
9	Verano	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	88%	59.2%	-0.01	2006	24.3%
10	Verano	Caudal medio	Río Tránsito En Angostura Pinte	86%	80.2%	-0.01	1980	43.3%

Tabla A.4.3.5. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de temperaturas máximas extremas

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. de datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (°C/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Temperatura máx. extrema	Lautaro Embalse	90%	45.9%	0.00	2005	14.1%
2	Anual	Temperatura máx. extrema	Santa Juana	84%	3.4%	0.04	1985	21.5%
1	Invierno	Temperatura máx. extrema	Lautaro Embalse	90%	2.5%	0.05	1994	8.4%
2	Invierno	Temperatura máx. extrema	Santa Juana	90%	19.9%	0.03	1985	22.6%
1	Otoño	Temperatura máx. extrema	Lautaro Embalse	92%	19.5%	0.02	2004	37.9%
2	Otoño	Temperatura máx. extrema	Santa Juana	88%	1.9%	0.05	2001	5.2%
1	Primavera	Temperatura máx. extrema	Lautaro Embalse	86%	40.6%	0.01	2008	14.0%
2	Primavera	Temperatura máx. extrema	Santa Juana	90%	2.3%	0.05	1985	9.6%
1	Verano	Temperatura máx. extrema	Lautaro Embalse	90%	84.4%	0.00	1983	46.0%

2	Verano	Temperatura máx. extrema	Santa Juana	88%	0.1%	0.05	1996	1.3%
---	--------	--------------------------------	----------------	-----	------	------	------	------

Tabla A.4.3.6. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de temperaturas máximas media.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. de datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (°C/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Temperatura máx. media	Lautaro Embalse	90%	0.1%	0.03	1993	2.1%
2	Anual	Temperatura máx. media	Santa Juana	84%	0.0%	0.03	1992	0.1%
1	Invierno	Temperatura máx. media	Lautaro Embalse	90%	0.1%	0.05	2000	1.3%
2	Invierno	Temperatura máx. media	Santa Juana	90%	9.1%	0.02	1992	19.6%
1	Otoño	Temperatura máx. media	Lautaro Embalse	92%	4.9%	0.02	2005	7.4%
2	Otoño	Temperatura máx. media	Santa Juana	88%	3.0%	0.02	1990	11.7%
1	Primavera	Temperatura máx. media	Lautaro Embalse	86%	0.3%	0.02	1993	1.0%
2	Primavera	Temperatura máx. media	Santa Juana	90%	0.0%	0.03	1992	0.2%
1	Verano	Temperatura máx. media	Lautaro Embalse	90%	15.0%	0.02	2008	22.6%
2	Verano	Temperatura máx. media	Santa Juana	88%	0.0%	0.04	2002	0.0%

Tabla A.4.3.7. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de temperaturas medias.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. de datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (°C/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Temperatura media	Lautaro Embalse	96%	88.0%	0.00	2014	21.4%
2	Anual	Temperatura media	Santa Juana	90%	0.0%	0.02	1992	1.2%
1	Invierno	Temperatura media	Lautaro Embalse	96%	0.9%	0.03	2012	17.1%

2	Invierno	Temperatura media	Santa Juana	98%	4.5%	0.02	1985	13.6%
1	Otoño	Temperatura media	Lautaro Embalse	96%	65.0%	0.00	1991	58.6%
2	Otoño	Temperatura media	Santa Juana	92%	29.8%	0.01	1990	75.6%
1	Primavera	Temperatura media	Lautaro Embalse	92%	13.5%	-0.02	1992	3.1%
2	Primavera	Temperatura media	Santa Juana	96%	0.1%	0.02	1993	2.8%
1	Verano	Temperatura media	Lautaro Embalse	96%	34.2%	-0.01	1990	11.2%
2	Verano	Temperatura media	Santa Juana	92%	2.1%	0.02	2008	1.6%

Tabla A.4.3.8. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de temperaturas mínimas extremas.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. de datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (°C/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Temperatura mín. extrema	Lautaro Embalse	90%	87.5%	0.00	2006	80.3%
2	Anual	Temperatura mín. extrema	Santa Juana	84%	10.1%	0.03	1989	13.3%
1	Invierno	Temperatura mín. extrema	Lautaro Embalse	90%	70.2%	0.01	2006	100.0%
2	Invierno	Temperatura mín. extrema	Santa Juana	90%	6.8%	0.04	1981	6.1%
1	Otoño	Temperatura mín. extrema	Lautaro Embalse	92%	62.8%	0.00	1995	100.0%
2	Otoño	Temperatura mín. extrema	Santa Juana	88%	19.8%	0.02	2012	63.6%
1	Primavera	Temperatura mín. extrema	Lautaro Embalse	86%	32.5%	-0.02	2006	69.2%
2	Primavera	Temperatura mín. extrema	Santa Juana	90%	57.6%	-0.01	2003	31.1%

1	Verano	Temperatura mín. extrema	Lautaro Embalse	90%	2.9%	-0.06	1990	1.5%
2	Verano	Temperatura mín. extrema	Santa Juana	88%	2.1%	-0.02	1988	11.7%

Tabla A.4.3.9. Resultados numéricos del análisis de tendencias recientes de temperaturas mínimas medias.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. de datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (°C/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Temperatura mín. media	Lautaro Embalse	90%	0.1%	-0.05	1993	0.0%
2	Anual	Temperatura mín. media	Santa Juana	84%	77.8%	0.00	2008	100.0%
1	Invierno	Temperatura mín. media	Lautaro Embalse	90%	51.2%	-0.01	2006	40.1%
2	Invierno	Temperatura mín. media	Santa Juana	90%	64.6%	0.00	1985	100.0%
1	Otoño	Temperatura mín. media	Lautaro Embalse	92%	0.2%	-0.05	1994	0.0%
2	Otoño	Temperatura mín. media	Santa Juana	88%	99.2%	0.00	2011	100.0%
1	Primavera	Temperatura mín. media	Lautaro Embalse	86%	0.0%	-0.08	1992	0.0%
2	Primavera	Temperatura mín. media	Santa Juana	90%	64.6%	0.00	2008	100.0%
1	Verano	Temperatura mín. media	Lautaro Embalse	90%	0.0%	-0.06	1993	0.0%
2	Verano	Temperatura mín. media	Santa Juana	88%	53.7%	-0.01	2008	39.9%

ANEXO 4.4. Resultados de métodos estadísticos de tendencias históricas.*Tabla A.4.4.10. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricas de precipitaciones máximas diarias.*

I D	Escala de tiempo	Variable	Estació n	Cant. De datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (mm/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Precipitació n máx. diaria	Caldera	66%	52.5%	-0.05	1955	100.0%
2	Anual	Precipitació n máx. diaria	Junta Del Carmen	99%	18.1%	-0.12	1992	32.4%
1	Invierno	Precipitació n máx. diaria	Caldera	82%	31.5%	-0.19	1955	76.8%
2	Invierno	Precipitació n máx. diaria	Junta Del Carmen	97%	12.1%	-0.10	1992	23.0%
1	Otoño	Precipitació n máx. diaria	Caldera	75%	53.7%	0.00	1952	100.0%
2	Otoño	Precipitació n máx. diaria	Junta Del Carmen	100%	56.6%	0.00	2009	100.0%
1	Primaver a	Precipitació n máx. diaria	Caldera	79%	39.4%	-0.02	1965	100.0%
2	Primaver a	Precipitació n máx. diaria	Junta Del Carmen	97%	49.4%	0.00	1988	88.4%
1	Verano	Precipitació n máx. diaria	Caldera	78%	38.5%	0.00	1955	21.6%
2	Verano	Precipitació n máx. diaria	Junta Del Carmen	99%	18.4%	0.00	1992	100.0%

Tabla A.4.4.11. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricas de precipitaciones totales.

I D	Escala de tiempo	Variable	Estació n	Cant. De datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (mm/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Precipitació n total	Caldera	91%	80.8%	0.03	1925	9.5%
2	Anual	Precipitació n total	Junta Del Carmen	99%	51.1%	-0.14	1992	83.0%
1	Invierno	Precipitació n total	Caldera	84%	9.5%	-0.50	1944	27.7%

2	Invierno	Precipitación total	Junta Del Carmen	97%	14.2%	-0.17	1992	30.6%
1	Otoño	Precipitación total	Caldera	78%	23.7%	-0.02	1952	60.3%
2	Otoño	Precipitación total	Junta Del Carmen	100%	51.3%	0.00	2009	100.0%
1	Primavera	Precipitación total	Caldera	81%	1.8%	-0.08	1945	17.6%
2	Primavera	Precipitación total	Junta Del Carmen	97%	45.1%	0.00	1988	86.3%
1	Verano	Precipitación total	Caldera	81%	35.7%	0.00	1955	34.5%
2	Verano	Precipitación total	Junta Del Carmen	99%	19.3%	0.00	1992	100.0%

Tabla A.4.4.12. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricos de caudales máximos instantáneos.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. De datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (m3/s/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Carmen En Ramadillas	66%	86.3%	0.01	1979	17.1%
2	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	80%	0.6%	-0.03	1988	0.6%
3	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	70%	2.7%	-0.03	2003	6.0%
4	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	91%	3.3%	-0.08	1954	2.9%
1	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Carmen En Ramadillas	68%	43.0%	0.01	1979	2.5%
2	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	85%	0.0%	-0.03	1973	0.2%

3	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	72%	2.0%	-0.02	2004	2.8%
4	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	91%	4.6%	-0.03	1955	2.0%
1	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Carmen En Ramadillas	67%	79.9%	0.01	1955	8.9%
2	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	82%	0.0%	-0.03	1989	0.0%
3	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	74%	0.6%	-0.02	1959	3.6%
4	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	88%	18.4%	-0.02	1955	2.2%
1	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Carmen En Ramadillas	69%	99.5%	0.00	1955	16.8%
2	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	82%	24.9%	-0.01	1954	34.1%
3	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	74%	1.7%	-0.02	1991	11.7%
4	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	93%	0.1%	-0.05	1955	0.2%
1	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Carmen En Ramadillas	65%	84.4%	0.00	1980	15.1%
2	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	82%	2.9%	-0.02	1993	11.6%

3	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	72%	1.6%	-0.03	1955	7.3%
4	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	88%	0.6%	-0.05	1954	0.9%

Tabla A.4.4.13. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricas de caudales medios.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. De datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (m ³ /s/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Caudal medio	Río Carmen En Ramadillas	66%	52.8%	0.01	1979	3.1%
2	Anual	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	80%	0.0%	-0.01	1989	0.0%
3	Anual	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	70%	0.2%	-0.02	2005	1.2%
4	Anual	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	91%	15.5%	-0.01	1955	4.0%
1	Invierno	Caudal medio	Río Carmen En Ramadillas	68%	11.4%	0.02	1979	0.3%
2	Invierno	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	85%	0.0%	-0.02	1991	0.0%
3	Invierno	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	72%	0.5%	-0.02	2005	2.1%
4	Invierno	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	91%	80.9%	0.00	1979	4.4%

1	Otoño	Caudal medio	Río Carmen En Ramadillas	67%	61.4%	0.01	1978	4.5%
2	Otoño	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	82%	0.0%	-0.02	1989	0.0%
3	Otoño	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	74%	0.9%	-0.02	1955	5.0%
4	Otoño	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	88%	56.9%	-0.01	1950	10.6%
1	Primavera	Caudal medio	Río Carmen En Ramadillas	64%	57.4%	0.01	1979	2.6%
2	Primavera	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	82%	0.9%	-0.01	1992	1.2%
3	Primavera	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	74%	0.3%	-0.02	2004	2.4%
4	Primavera	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	93%	4.8%	-0.02	1954	2.5%
1	Verano	Caudal medio	Río Carmen En Ramadillas	60%	72.3%	0.00	1980	4.7%
2	Verano	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	83%	15.2%	-0.01	1955	31.0%
3	Verano	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	72%	1.4%	-0.02	1955	7.6%
4	Verano	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	90%	2.7%	-0.02	1955	4.5%

Tabla A.4.4.14. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricas de temperaturas máximas extremas.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. De datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (°C/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Temperatura máx. extrema	Caldera	80%	0.1%	0.06	1928	0.0%
2	Anual	Temperatura máx. extrema	Potreriillos	65%	16.2%	0.02	1957	23.5%
1	Invierno	Temperatura máx. extrema	Caldera	83%	0.0%	0.12	1929	0.0%
2	Invierno	Temperatura máx. extrema	Potreriillos	67%	95.4%	0.00	1932	89.3%
1	Otoño	Temperatura máx. extrema	Caldera	76%	0.0%	0.10	1928	0.0%
2	Otoño	Temperatura máx. extrema	Potreriillos	69%	5.4%	0.04	1946	14.4%
1	Primavera	Temperatura máx. extrema	Caldera	80%	0.0%	0.07	1928	0.0%
2	Primavera	Temperatura máx. extrema	Potreriillos	69%	89.0%	0.00	1937	100.0%
1	Verano	Temperatura máx. extrema	Caldera	67%	0.0%	0.10	1931	0.0%
2	Verano	Temperatura máx. extrema	Potreriillos	63%	41.1%	0.00	1957	64.2%

Tabla A.4.4.15. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricas de temperaturas máximas medias.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. De datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (°C/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Temperatura máx. media	Caldera	80%	0.0%	0.06	1928	0.0%
2	Anual	Temperatura máx. media	Potreriillos	65%	0.2%	0.03	1943	1.5%
1	Invierno	Temperatura máx. media	Caldera	83%	0.0%	0.08	1928	0.0%

2	Invierno	Temperatura máx. media	Potreriillos	67%	8.3%	0.03	1943	15.6%
1	Otoño	Temperatura máx. media	Caldera	76%	0.0%	0.08	1928	0.0%
2	Otoño	Temperatura máx. media	Potreriillos	69%	1.4%	0.03	1944	9.0%
1	Primavera	Temperatura máx. media	Caldera	80%	0.0%	0.06	1928	0.0%
2	Primavera	Temperatura máx. media	Potreriillos	69%	7.9%	0.02	1956	18.5%
1	Verano	Temperatura máx. media	Caldera	67%	0.0%	0.09	1930	0.0%
2	Verano	Temperatura máx. media	Potreriillos	63%	42.6%	0.01	1957	75.6%

Tabla A.4.4.16. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricas de temperaturas medias.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. De datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (°C/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Temperatura media	Caldera	80%	100.0%	0.00	1924	34.0%
2	Anual	Temperatura media	Potreriillos	71%	0.1%	0.03	1938	3.2%
1	Invierno	Temperatura media	Caldera	83%	30.9%	-0.01	1935	53.0%
2	Invierno	Temperatura media	Potreriillos	73%	6.1%	0.02	1929	10.6%
1	Otoño	Temperatura media	Caldera	76%	41.1%	0.01	1924	24.2%
2	Otoño	Temperatura media	Potreriillos	73%	0.5%	0.03	1943	5.8%
1	Primavera	Temperatura media	Caldera	80%	83.3%	0.00	1935	100.0%
2	Primavera	Temperatura media	Potreriillos	73%	0.6%	0.03	1942	5.9%
1	Verano	Temperatura media	Caldera	69%	27.8%	0.01	1924	58.4%
2	Verano	Temperatura media	Potreriillos	67%	11.6%	0.02	1930	26.3%

Tabla A.4.4.17. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricas de temperaturas mínimas extremas.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. De datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (°C/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Temperatura mín. extrema	Caldera	76%	0.0%	-0.05	1930	0.0%
2	Anual	Temperatura mín. extrema	Potreriillos	85%	10.0%	0.09	1931	8.2%
1	Invierno	Temperatura mín. extrema	Caldera	81%	0.0%	-0.06	1930	0.0%
2	Invierno	Temperatura mín. extrema	Potreriillos	85%	2.3%	0.15	1931	3.8%
1	Otoño	Temperatura mín. extrema	Caldera	73%	0.5%	-0.05	1935	1.7%
2	Otoño	Temperatura mín. extrema	Potreriillos	88%	18.2%	0.08	1941	25.6%
1	Primavera	Temperatura mín. extrema	Caldera	78%	0.1%	-0.04	1930	0.0%
2	Primavera	Temperatura mín. extrema	Potreriillos	85%	63.8%	0.03	1939	100.0%
1	Verano	Temperatura mín. extrema	Caldera	68%	1.0%	-0.05	1929	2.8%
2	Verano	Temperatura mín. extrema	Potreriillos	88%	82.8%	0.00	1921	100.0%

Tabla A.4.4.18. Resultados numéricos del análisis de tendencias históricas de temperaturas mínimas medias.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Cant. De datos	Valor P (Mann Kendall)	Slope sen (°C/año)	Año cambio	Valor P (Pettitt)
1	Anual	Temperatura mín. media	Caldera	76%	42.9%	0.00	1910	29.1%
2	Anual	Temperatura mín. media	Potreriillos	75%	9.4%	0.01	1956	6.6%
1	Invierno	Temperatura mín. media	Caldera	81%	3.5%	-0.02	1930	8.7%

2	Invierno	Temperatura mín. media	Potreriillos	75%	35.1%	0.01	1929	73.1%
1	Otoño	Temperatura mín. media	Caldera	73%	20.2%	-0.01	1947	30.3%
2	Otoño	Temperatura mín. media	Potreriillos	76%	1.9%	0.02	1956	6.8%
1	Primavera	Temperatura mín. media	Caldera	78%	71.2%	0.00	1931	100.0%
2	Primavera	Temperatura mín. media	Potreriillos	75%	35.8%	0.01	1956	32.3%
1	Verano	Temperatura mín. media	Caldera	68%	99.0%	0.00	1920	100.0%
2	Verano	Temperatura mín. media	Potreriillos	71%	59.5%	-0.01	1928	34.0%

ANEXO 4.5. Magnitud de cambios significativos detectados por test de Pettitt.*Tabla A.4.5.19. Magnitud de cambio significativo detectado en los caudales máximos instantáneos por test de Pettitt en el análisis de tendencias recientes.*

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Año cambio	Magnitud cambio (m3/s)
4	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Pastillo	1979	3.92
4	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Pastillo	1982	3.31
9	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	1979	2.73
10	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito En Angostura Pinte	1980	2.13
4	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Pastillo	1980	1.89
6	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Jorquera En Vertedero	1982	0.78
6	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Jorquera En Vertedero	1982	0.62
6	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Jorquera En Vertedero	1982	0.45
6	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Jorquera En Vertedero	1983	0.43
7	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Manflas En Vertedero	1979	0.42
1	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Angostura	1998	-0.08
1	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Angostura	2000	-0.11
2	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	1993	-0.56
2	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	1993	-0.89
3	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	2004	-0.93
2	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	1992	-2.22
5	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Huasco En Santa Juana	2003	-4.12
5	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Huasco En Santa Juana	2004	-8.17

Tabla A.4.5.20. Magnitud de cambio significativo detectado en los caudales medios por test de Pettitt en el análisis de tendencias recientes.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Año cambio	Magnitud cambio (m ³ /s)
9	Invierno	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	1979	1.66
10	Invierno	Caudal medio	Río Tránsito En Angostura Pinte	1980	1.34
8	Anual	Caudal medio	Río Pulido En Vertedero	1980	0.50
8	Invierno	Caudal medio	Río Pulido En Vertedero	1980	0.49
6	Primavera	Caudal medio	Río Jorquera En Vertedero	1980	0.41
6	Invierno	Caudal medio	Río Jorquera En Vertedero	1982	0.31
7	Otoño	Caudal medio	Río Manflas En Vertedero	1980	0.22
7	Verano	Caudal medio	Río Manflas En Vertedero	1980	0.21
1	Anual	Caudal medio	Río Copiapó En Angostura	1998	-0.03
1	Verano	Caudal medio	Río Copiapó En Angostura	1998	-0.03
1	Primavera	Caudal medio	Río Copiapó En Angostura	2003	-0.03
1	Invierno	Caudal medio	Río Copiapó En Angostura	1998	-0.04
1	Otoño	Caudal medio	Río Copiapó En Angostura	1999	-0.04
2	Primavera	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	1992	-0.38
2	Anual	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	1993	-0.48
2	Otoño	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	1993	-0.53
2	Invierno	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	1991	-0.57
3	Otoño	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	2006	-0.86
3	Primavera	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	2004	-1.07

3	Invierno	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	2005	-1.17
3	Anual	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	2005	-1.22

Tabla A.4.5.21. Magnitud de cambio significativo detectado en los caudales máximos instantáneos por test de Pettitt en el análisis de tendencias históricas.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Año cambio	Magnitud cambio (m3/s)
1	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Carmen En Ramadillas	1979	1.62
3	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	2004	-0.93
2	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	1989	-1.32
2	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	1988	-1.36
2	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En Lautaro	1973	-1.43
3	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Copiapó En La Puerta	1959	-1.88
4	Otoño	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	1955	-3.28
4	Primavera	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	1955	-4.59
4	Invierno	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	1955	-4.86
4	Verano	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	1954	-5.27
4	Anual	Caudal máx. instantáneo	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	1954	-10.29

Tabla A.4.5.22. Magnitud de cambio significativo detectado en los caudales medios por test de Pettitt en el análisis de tendencias históricas.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Año cambio	Magnitud cambio (m3/s)
1	Verano	Caudal medio	Río Carmen En Ramadillas	1980	1.96
1	Otoño	Caudal medio	Río Carmen En Ramadillas	1978	1.59

1	Anual	Caudal medio	Río Carmen En Ramadillas	1979	1.49
1	Invierno	Caudal medio	Río Carmen En Ramadillas	1979	1.24
4	Invierno	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	1979	1.08
1	Primavera	Caudal medio	Río Carmen En Ramadillas	1979	1.04
2	Primavera	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	1992	-0.37
2	Anual	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	1989	-0.53
2	Otoño	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	1989	-0.62
2	Invierno	Caudal medio	Río Copiapó En Lautaro	1991	-0.85
3	Primavera	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	2004	-0.97
3	Invierno	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	2005	-1.04
3	Anual	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	2005	-1.15
3	Otoño	Caudal medio	Río Copiapó En La Puerta	1955	-1.35
4	Primavera	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	1954	-2.71
4	Anual	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	1955	-2.92
4	Verano	Caudal medio	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	1955	-3.15

Tabla A.4.5.23. Magnitud de cambio significativo detectado en las temperaturas medias por test de Pettitt en el análisis de tendencias recientes.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Año cambio	Magnitud cambio (°C)
1	Invierno	Temperatura máx. media	Lautaro Embalse	2000	1.09
2	Primavera	Temperatura máx. media	Santa Juana	1992	0.85
2	Anual	Temperatura máx. media	Santa Juana	1992	0.84

2	Verano	Temperatura media	Santa Juana	2008	0.77
2	Verano	Temperatura máx. media	Santa Juana	2002	0.76
1	Primavera	Temperatura máx. media	Lautaro Embalse	1993	0.74
1	Anual	Temperatura máx. media	Lautaro Embalse	1993	0.62
2	Primavera	Temperatura media	Santa Juana	1993	0.58
2	Anual	Temperatura media	Santa Juana	1992	0.47
1	Primavera	Temperatura media	Lautaro Embalse	1992	-0.65
1	Otoño	Temperatura mín. media	Lautaro Embalse	1994	-1.38
1	Anual	Temperatura mín. media	Lautaro Embalse	1993	-1.58
1	Verano	Temperatura mín. media	Lautaro Embalse	1993	-1.87
1	Primavera	Temperatura mín. media	Lautaro Embalse	1992	-2.04

Tabla A.4.5.24. Magnitud de cambio significativo detectado en las temperaturas extremas por test de Pettitt en el análisis de tendencias recientes.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Año cambio	Magnitud cambio (°C)
2	Verano	Temperatura máx. extrema	Santa Juana	1996	1.00
1	Verano	Temperatura mín. extrema	Lautaro Embalse	1990	-1.80

Tabla A.4.5.25. Magnitud de cambio significativo detectado en las temperaturas medias por test de Pettitt en el análisis de tendencias históricas.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Año cambio	Magnitud cambio (°C)
1	Invierno	Temperatura máx. media	Caldera	1928	2.95
1	Otoño	Temperatura máx. media	Caldera	1928	2.48

1	Anual	Temperatura máx. media	Caldera	1928	2.30
1	Primavera	Temperatura máx. media	Caldera	1928	2.05
1	Verano	Temperatura máx. media	Caldera	1930	1.87
2	Anual	Temperatura media	Potreriillos	1938	0.57
2	Anual	Temperatura máx. media	Potreriillos	1943	0.46

Tabla A.4.5.26. Magnitud de cambio significativo detectado en las temperaturas extremas por test de Pettitt en el análisis de tendencias históricas.

ID	Escala de tiempo	Variable	Estación	Año cambio	Magnitud cambio (°C)
1	Invierno	Temperatura máx. extrema	Caldera	1929	4.40
1	Otoño	Temperatura máx. extrema	Caldera	1928	3.80
1	Verano	Temperatura máx. extrema	Caldera	1931	2.85
1	Anual	Temperatura máx. extrema	Caldera	1928	2.50
2	Invierno	Temperatura mín. extrema	Potreriillos	1931	2.50
1	Primavera	Temperatura máx. extrema	Caldera	1928	2.40
1	Otoño	Temperatura mín. extrema	Caldera	1935	-0.90
1	Verano	Temperatura mín. extrema	Caldera	1929	-1.15
1	Primavera	Temperatura mín. extrema	Caldera	1930	-1.50
1	Invierno	Temperatura mín. extrema	Caldera	1930	-1.80
1	Anual	Temperatura mín. extrema	Caldera	1930	-2.20

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Cristóbal Rodrigo Henríquez Riquelme
Título de la memoria : Análisis de cambio climático entre 1900 y 2020 en la región de Atacama, Chile
Fecha de la presentación oral :

Profesor(es) Guía : Alejandra Stehr Gesche
Profesor(es) Revisor(es) : Maricarmen Guerra Paris
Concepto :
Calificación :

Resumen

El cambio climático es uno de los mayores desafíos del siglo XXI, afectando tanto a los sistemas naturales como a los humanos a nivel global. Las zonas áridas, como la región de Atacama, son particularmente vulnerables debido a la escasez de recursos hídricos y la fragilidad de sus ecosistemas. Esta investigación se centró en analizar las tendencias de cambio climático en la región de Atacama entre 1900 y 2020, utilizando datos de precipitaciones, caudales y temperaturas. Se aplicaron métodos estadísticos no paramétricos, revelando una disminución general en los caudales, un aumento en las temperaturas máximas y medias, y tendencias predominantemente decrecientes en las temperaturas mínimas. Además, se desarrolló un modelo de regresión para predecir caudales máximos, aunque su aplicación estuvo limitada por la disponibilidad de datos. Estos resultados son cruciales para entender los cambios climáticos en la región y ofrecen herramientas valiosas para la gestión de recursos hídricos y la planificación de infraestructura resiliente, subrayando la necesidad de estrategias de adaptación en esta región vulnerable.
