

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE
TENDENCIAS OBSERVADAS EN EL RECURSO HÍDRICO
DE LA CUENCA DEL RÍO MAIPO Y SU EFECTO EN LA
DISPONIBILIDAD HIDRICA DE LA REGIÓN
METROPOLITANA



Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniera Ambiental

BÁRBARA BELÉN DE LA FUENTE ROBLES

Profesor Guía: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza

Concepción, Chile

2021



“ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE TENDENCIAS OBSERVADAS EN EL RECURSO HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO MAIPO Y SU EFECTO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA DE LA REGIÓN METROPOLITANA”

PROFESOR GUÍA: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza

PROFESOR COMISIÓN: Dra. Carolina Baeza Freer

PROFESOR COMISIÓN: Dr. Mauricio Aguayo Arias

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, noviembre 2021



100 AÑOS
DE
DESARROLLO
LIBRE DEL
ESPIRITU

ÍNDICE

| | |
|--|-----|
| ÍNDICE TABLAS | iii |
| ÍNDICE FIGURAS | iv |
| AGRADECIMIENTOS | vi |
| RESUMEN | vii |
| 1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO | 1 |
| 1.1. Disponibilidad del recurso hídrico en Chile | 1 |
| 1.2. Tendencias observadas en la disponibilidad del recurso hídrico nacional | 2 |
| 1.2.1. Tendencias en la precipitación..... | 3 |
| 1.2.2. Tendencias en el caudal | 5 |
| 1.3. Proyecciones esperadas en la disponibilidad del recurso hídrico nacional | 6 |
| 1.3.1. Proyecciones para las precipitaciones | 6 |
| 1.3.2. Proyecciones para el caudal | 7 |
| 1.4. Uso del recurso hídrico en Chile | 8 |
| 1.5. Relevancia del recurso hídrico en la cuenca del río Maipo | 11 |
| 1.5.1. Aporte al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible | 12 |
| 2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN | 14 |
| 3. OBJETIVOS | 14 |
| 3.1. Objetivo general..... | 14 |
| 3.2. Objetivos específicos | 14 |
| 4. METODOLOGÍA | 15 |
| 4.1. Descripción del Área de estudio | 15 |
| 4.1.1. Antecedentes climáticos | 16 |
| 4.1.2. Antecedentes hidrológicos | 18 |
| 4.1.3. Uso de suelo | 19 |
| 4.1.4. Uso de agua..... | 20 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2. Estimar las tendencias observadas en el registro fluviométrico de la cuenca del río Maipo | 22 |
| 4.2.1. Analizar la consistencia del registro fluviométrico de la cuenca del río Maipo | 22 |
| 4.2.2. Estimar tendencias significativas en el registro fluviométrico consistente de la cuenca del río Maipo | 23 |
| 4.3. Determinar patrones espacio-temporales de las tendencias presentes en los caudales de la cuenca del río Maipo..... | 23 |
| 4.3.1. Análisis de patrones espaciales | 23 |
| 4.3.2. Análisis de patrones temporales | 25 |
| 4.4. Determinar los efectos de las tendencias sobre la disponibilidad de agua para la Región Metropolitana | 26 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 27 |
| 5.1. Estimación de tendencias observadas en el registro fluviométrico de la cuenca del río Maipo | 27 |
| 5.1.1. Análisis de consistencia del registro fluviométrico | 27 |
| 5.1.2. Estimación de tendencias significativas en el registro fluviométrico consistente de la cuenca del río Maipo | 34 |
| 5.2. Analizar patrones espacio-temporales de las tendencias presentes en los caudales de la cuenca del río Maipo | 37 |
| 5.2.1. Análisis de patrones espaciales | 37 |
| 5.2.2. Análisis de patrones temporales | 39 |
| 5.3. Determinación de los efectos de las tendencias sobre la disponibilidad de agua para la Región Metropolitana | 52 |
| 6. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES..... | 62 |
| 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 64 |
| 8. ANEXOS | 70 |

ÍNDICE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Disponibilidad hídrica en Chile ($\text{m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ año}^{-1}$) | 2 |
| Tabla 2: Proyección de caudal para cuencas chilenas..... | 8 |
| Tabla 3: Derechos de aprovechamiento de aguas para la Región Metropolitana | 21 |
| Tabla 4. Análisis de consistencia..... | 28 |
| Tabla 5. Análisis de tendencia histórica de caudal (1970-2019). | 36 |
| Tabla 6. Resumen de estadística descriptiva de los clústeres identificados..... | 39 |
| Tabla 7. Estadísticos de la prueba de Pettitt. | 40 |
| Tabla 8. Volumen de extracción de derechos de aprovechamientos de aguas. | 53 |
| Tabla 9. Oferta hídrica actual y esperada para 2030, 2040 y 2050. | 54 |
| Tabla 10. Balance hídrico actual (2019) de cada estación fluviométrica..... | 57 |
| Tabla 11. Balance hídrico esperado (2050) de cada estación fluviométrica. | 59 |



ÍNDICE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Déficit o superávit pluviométrico promedio para los períodos 1966 – 1969 y 2010 – 2014 | 4 |
| Figura 2: Variación del área de isoterma 0°C bajo escenario de cambio climático | 7 |
| Figura 3: Disponibilidad hídrica en Chile. (a) Relación entre el caudal superficial y la demanda de agua ($m^3 s^{-1}$) para cada región administrativa. (b) Condiciones legales determinadas por el Gobierno de Chile para los ríos y acuíferos..... | 10 |
| Figura 4: Cuenca del río Maipo | 16 |
| Figura 5: Isotermas, isoyetas y evapotranspiración para la cuenca del río Maipo | 17 |
| Figura 6: Hidrograma de la estación Río Maipo en el Manzano (1950 – 2019). Cuenca alta del río Maipo. | 18 |
| Figura 7: Hidrograma de la estación Río Mapocho en los Almendros (1950 – 2019). Cuenca media del río Maipo. | 19 |
| Figura 8: Hidrograma de la estación Estero Puangue en Boquerón (1950 – 2019). Cuenca baja del río Maipo. | 19 |
| Figura 9. Uso de suelo de la cuenca del río Maipo. | 20 |
| Figura 10. Estaciones fluviométricas en la cuenca del río Maipo. (a) Total de estaciones fluviométricas. (b) Estaciones consistentes. | 30 |
| Figura 11. Información fluviométrica disponible y faltante. (a) Total de estaciones fluviométricas. (b) Estaciones consistentes. | 32 |
| Figura 12. Hidrogramas de datos observados y reconstruidos de estaciones fluviométricas consistentes (1970 – 2019). | 33 |
| Figura 13. Análisis de tendencia. (a) Test Z. (b) Valor-p..... | 35 |
| Figura 14. Pendiente de Sen (L/s año). | 35 |
| Figura 15. Método Elbow. (a) Caudal medio anual. (b) Tendencias..... | 37 |
| Figura 16. Análisis de clúster. (a) Caudal medio anual. (b) Tendencias. | 38 |
| Figura 17. Prueba de Pettitt para el registro fluviométrico. (a) Resultado de la prueba. (b) Año del cambio de tendencia..... | 41 |
| Figura 18. Índice de oscilación climática. (a) El Niño (ENSO). (b) Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). | 42 |
| Figura 19. Estacion fluviométrica: Estero Puangue en Ruta 78..... | 43 |
| Figura 20. Prueba de Pettitt: Estero Puangue En Ruta 78. | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 21. Localización estaciones fluviométricas con cambio de caudal entre 2006 – 2008..... | 44 |
| Figura 22. Prueba de Pettitt. (a) Río Maipo En San Alfonso. (b) Río Maipo En Cabimbao..... | 45 |
| Figura 23. Prueba de Pettitt: Río Mapocho En Los Almendros..... | 45 |
| Figura 24. Prueba de Pettitt. (a) Río Angostura En Valdivia De Paine. (b) Río Volcán En Queltehues..... | 46 |
| Figura 25. Prueba de Pettitt: Río Maipo En El Manzano..... | 47 |
| Figura 26. Localización estaciones fluviométricas: Río Colorado Antes Junta Río Olivares y Río Olivares Antes Junta Río Colorado..... | 48 |
| Figura 27. Prueba de Pettitt. (a) Río Colorado Antes Junta Río Olivares. (b) Río Olivares Antes Junta Río Colorado..... | 48 |
| Figura 28. Esquema Central Hidroeléctrica Alfalfal..... | 49 |
| Figura 29. Prueba de Pettitt: Quebrada Ramon en Recinto Emos..... | 50 |
| Figura 30. Prueba de Pettitt: Estero Polpaico en Chicauma..... | 50 |
| Figura 31. Prueba de Pettitt. (a) Estero Yerba Loca antes junta San Francisco. (b) Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca..... | 51 |
| Figura 32. Prueba de Pettitt. (a) Estero Pintue en Puente Pintue. (b) Zanjón de la Aguada Puente Particular..... | 51 |
| Figura 33. Derechos de aprovechamiento de aguas superficiales otorgados. .. | 53 |
| Figura 34. Porcentaje de reducción de caudal esperado para 2050..... | 55 |
| Figura 35. Balance hídrico actual (2019) de la cuenca del río Maipo..... | 58 |
| Figura 36. Balance hídrico esperado (2050) de la cuenca del río Maipo..... | 60 |

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a mi incondicional familia, quienes siempre me han brindado el apoyo y la seguridad en cada etapa de mi vida, especialmente a mis padres Lorena y José Fernando, son mi mayor fuente de inspiración y los admiro mucho. A mi hermana Antonella, mis abuelos Victoria, Antonio y Fernando por todo su cariño. Esto es para ustedes.

Agradecer a mi profesor guía Pedro Arriagada por todo el aprendizaje, apoyo y paciencia durante todo este camino y por creer y confiar siempre en mí y en mis capacidades. Al profesor Bruno Karelovic por la buena disposición y por entregarme las herramientas necesarias para cumplir con mi trabajo de tesis. A mi comisión y todos los profesores que contribuyeron a mi formación profesional.

A mis amigas y amigos; Javi Bravo, Pame, Migue, Gustavo, Yayo, Pauli, Sofí, Javi Silva, Mati Saavedra y Ale, por las buenas vibras durante toda la etapa universitaria y porque supieron cómo sacarme una sonrisa ante los momentos de estrés. Estoy muy agradecida de haberlos conocido. A mis amigos de toda la vida; Claudia, Belén, Senoceain, Javier, Seba y Joaco, que siempre buscaron la forma de poder despejarme durante esta última etapa. A mi compañera perruna Julieta que me ha brindado un apoyo emocional demasiado importante durante la pandemia y esta última etapa universitaria.

Agradecer de manera especial a mi pololo Matías, por todo el apoyo y cariño incondicional durante toda la carrera, por estar presente cuando lo necesitaba, en los momentos felices y también en los momentos donde pensaba desistir de este proceso. De verdad muchas gracias por haberte cruzado en mi camino, mi personita especial.

RESUMEN

En términos de recursos hídricos, Chile es considerado un país privilegiado dado que la disponibilidad hídrica media supera el valor promedio mundial, sin embargo, muestra una distribución latitudinal no homogénea en el territorio. Además, se han observado tendencias decrecientes para el registro fluviométrico en la zona centro-sur, producto del aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones, las cuales se intensificarían bajo efectos del cambio climático y el aumento de la demanda hídrica debido al desarrollo económico del país.

En el presente estudio se analizó la variabilidad espacial de las tendencias observadas en el recurso hídrico de la cuenca del río Maipo y su efecto en la disponibilidad de agua de la Región Metropolitana. Para ello, se estimaron las tendencias en el registro fluviométrico mediante la aplicación del Test de Mann Kendall y la Pendiente de Sen entre los años 1970 y 2019. Se analizó los patrones espaciales y temporales de las tendencias utilizando el algoritmo de k-medias y la prueba de homogeneidad de Pettitt, y se determinaron los efectos de las tendencias sobre la disponibilidad de agua a partir del registro de derechos de aprovechamiento de agua superficiales otorgados en la Región Metropolitana. Los resultados muestran una tendencia decreciente en el registro de caudal, con una tasa entre 6 y 1795 L/s año. No se pudo establecer patrones espaciales entre tendencias y caudales, sin embargo, si se presentaron patrones temporales en las tendencias en diferentes años, ocasionado por efectos climáticos y antropogénicos. Finalmente, se estima que para el año 2050 ocurra una reducción en la disponibilidad hídrica de la cuenca asociado a las tendencias, lo que podría ocasionar importantes efectos sobre los diferentes usos de agua, principalmente generación hidroeléctrica y agricultura.

1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

1.1. Disponibilidad del recurso hídrico en Chile

Desde la perspectiva del recurso hídrico, Chile cuenta con 1.251 ríos ubicados en 101 cuencas a lo largo del territorio, cuyas aguas drenan una superficie de 756.102 km². En ella encontramos 12.784 cuerpos de aguas, considerando lagos y lagunas, y 24.114 glaciares (Dirección General de Aguas, 2015). Bajo este contexto, Chile es considerado un país privilegiado en términos de recursos hídricos, dado que la disponibilidad hídrica media es de 47.914 m³ hab⁻¹ año⁻¹, la cual supera el valor del promedio de América Latina y El Caribe de 28.116 m³ hab⁻¹ año⁻¹ y del promedio mundial de 15.465 m³ hab⁻¹ año⁻¹ (Banco Mundial, 2021). No obstante, la disponibilidad del recurso hídrico en Chile esta espacialmente distribuida de manera irregular, como se muestra en la Tabla 1. Se aprecia que desde la región de Arica y Parinacota hasta la región Metropolitana la disponibilidad hídrica media alcanza los 800 m³ hab⁻¹ año⁻¹, cuyo valor es insuficiente para satisfacer las necesidades básicas del 60% de la población, así mismo la demanda hídrica es superior a la disponibilidad, por tanto, es cubierta por aguas subterráneas. Por otra parte, desde la región de O'Higgins hasta la región de Magallanes la disponibilidad hídrica media supera los 10.000 m³ hab⁻¹ año⁻¹, la cual comienza a superar la demanda debido a su clima húmedo, logrando cumplir el umbral establecido para el desarrollo sostenible (Valdés-Pineda et al., 2014). La Región Metropolitana, que concentra un 40.5% de la población del país (INE, 2017), tiene una disponibilidad hídrica media superficial que alcanza los 525 m³ hab⁻¹ año⁻¹. Esta amplia variabilidad latitudinal de la oferta de agua representa un desafío importante para el país en la gestión de los recursos hídricos, ya que se proyecta una tendencia a la baja en la disponibilidad del recurso debido a los efectos del cambio climático, más aún en aquellas zonas donde la demanda excede la disponibilidad. (Universidad de Chile, 2006).

Tabla 1: Disponibilidad hídrica en Chile ($\text{m}^3 \text{hab}^{-1} \text{año}^{-1}$).

| Región | Disponibilidad | Región | Disponibilidad |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Arica y Parinacota | 854 | Maule | 23.978 |
| Tarapacá | - | Biobío | 21.556 |
| Antofagasta | 52 | Araucanía | 46.273 |
| Atacama | 208 | Los Ríos | 136.207 |
| Coquimbo | 1.020 | Los Lagos | - |
| Valparaíso | 801 | Aysén | 2.993.535 |
| Metropolitana | 525 | Magallanes | 1.959.036 |
| O'Higgins | 6.829 | Promedio nacional | 53.953 |

Fuente: Adaptado del Banco Mundial (2011).

1.2. Tendencias observadas en la disponibilidad del recurso hídrico nacional

Chile presenta una serie de variables topográficas, latitudinal y altitudinal, que permiten describir el comportamiento de las variables hidrológicas de precipitación y caudal.

Las precipitaciones tienden a aumentar con la latitud y altitud (Quintana y Aceituno, 2006) y, se ven influenciadas por la variabilidad climática presente en el territorio chileno correspondiente al fenómeno del Niño – Oscilación del Sur (ENSO), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), Oscilación de Madden y Julian (MJO) y la Oscilación Antártica. (AAO) (Valdez – Pineda et al., 2014). En Chile se pueden identificar tres tipos de ciclos de precipitación anual: 1) En el Altiplano, a una altitud sobre 3000 m, se presenta un ciclo de bajas precipitaciones que varían entre 200 y 600 mm año⁻¹; mientras que en las zonas de menor altitud predomina un modelo de aridez extrema hasta los 27°S. 2) En la zona central (30 – 40°S) se presenta un ciclo anual bien definido conocido como clima mediterráneo, caracterizado por presentar el peak de precipitaciones en invierno y valores más bajos en verano. 3) En la zona Austral (40 – 56°S) se presenta un ciclo caracterizado por la presencia

de precipitaciones durante todo el año, llegando a los 5500 mm año⁻¹. (Valdez – Pineda et al., 2014).

Los ríos chilenos se caracterizan por ser cortos de longitud, de gran caudal, muy torrenciales y generalmente no son navegables; pero presentan un gran potencial para la generación de energía hidroeléctrica. (Valdés-Pineda et al., 2014). La Dirección General de Aguas (1987) presentó en su informe Balance Hídrico Nacional que la escorrentía anual en el país es de 928 km³ año⁻¹, correspondiente al 2,1% de la escorrentía mundial y el 7,9% de Sudamérica. En su mayoría, los ríos fluyen de Este a Oeste debido al cambio de altitud respectivo, a excepción de algunos ríos ubicados en las zonas áridas y semiáridas ubicadas al Norte, así como algunos ríos en el Sur. La latitud constituye un factor fundamental en el volumen de la escorrentía en los ríos, el cual va aumentando de Norte a Sur. (Valdés-Pineda et al., 2014).

1.2.1. Tendencias en la precipitación

El estudio de Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI (Universidad de Chile, 2006) indica que en la zona centro – sur (30 – 38°S) se presentó una tendencia creciente para el régimen pluviométrico hasta mediados de los años 70, donde se ha tenido una tendencia decreciente que se ha mantenido hasta ahora. Durante el período comprendido entre 1979 – 2008 se ha observado una tendencia decreciente de las precipitaciones en un 3,7% por década, tanto en zonas cordilleranas y costeras (Boisier et al., 2016). Ahora bien, abordando los años 2010 – 2015 esta tendencia decreciente de las precipitaciones ha generado un déficit del 71% de las estaciones meteorológicas ubicadas entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos (Figura 1), el cual constituye la sequía más larga que se ha registrado desde 1915 (Garreaud et al., 2017), denominándolo con el término de megasequía. (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015). La megasequía 2010 – 2015 que atraviesa la zona central de Chile ha registrado el mayor número de años consecutivos con

una baja de las precipitaciones y registra el mayor número de años consecutivos de déficit hídrico, superando los 1.000 mm/año debido a la disminución de los registros pluviométricos y al aumento progresivo de la evapotranspiración en un 13% en los últimos años. (INFODEP, 2016).

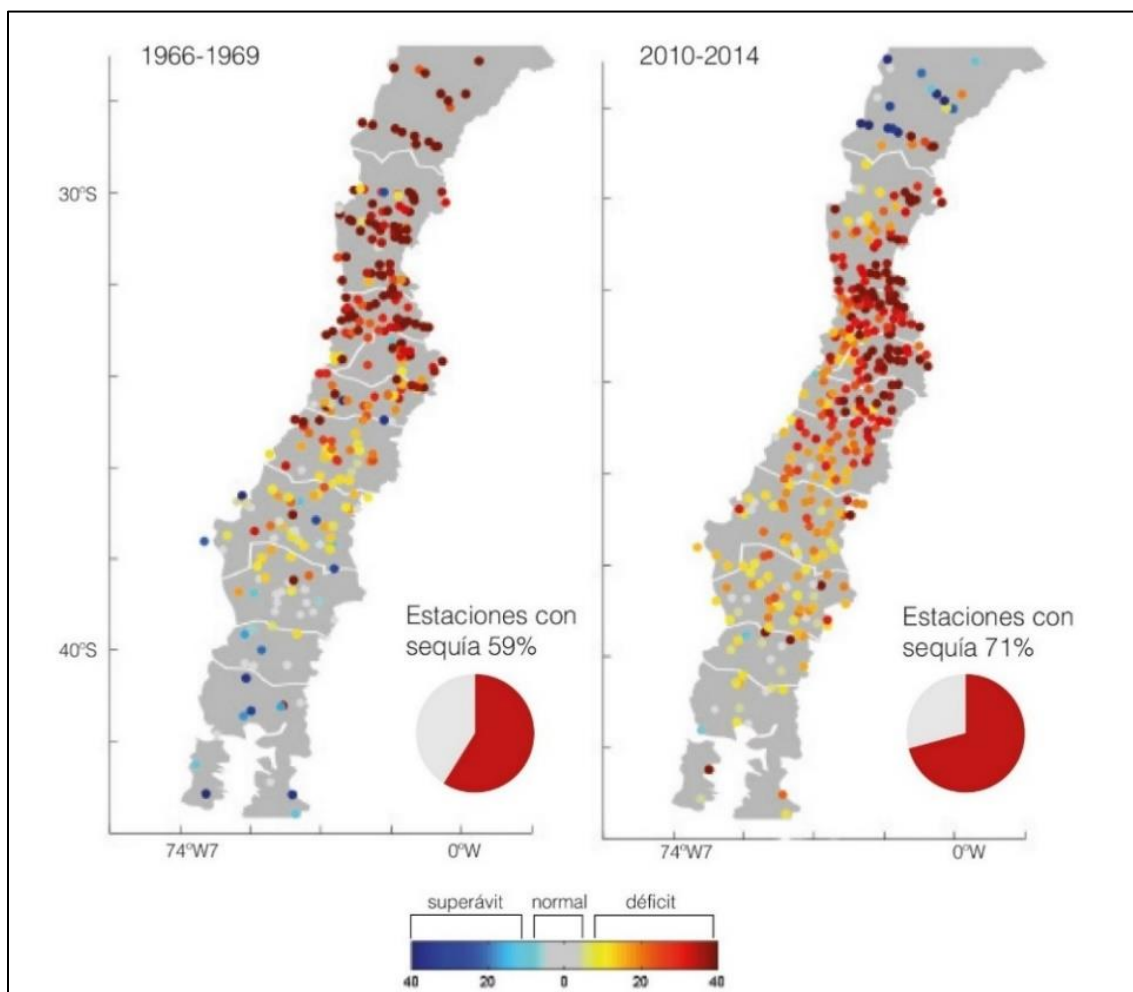


Figura 1: Déficit o superávit pluviométrico promedio para los períodos 1966 – 1969 y 2010 – 2014.

Fuente: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015.

1.2.2. Tendencias en el caudal

El aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones se estima una tendencia decreciente en cuanto a la disponibilidad hídrica en la Zona Norte y Centro del país (Dirección General de Aguas, 1999), evidenciándose en el informe “La Megasequía 2010 – 2015: Una lección para el futuro” de Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2015), señalando que se ha alcanzado un máximo de déficit de caudal en las regiones de Coquimbo y Valparaíso de un 70%, disminuyendo hacia el sur alcanzando valores cercanos al 25%. De manera análoga, un estudio abordado en 44 ríos situados en la zona centro – sur y sur de Chile (34 – 40°S) se encontraron tendencias decrecientes significativas de caudal en el período 1952 – 2003 (Rubio-Álvarez y McPhee, 2010), mientras que Cortés et al. (2011) recopiló una base de datos de 40 registros fluviométricos de los ríos situados en la zona centro – sur de Chile (30 – 40°s) en el período 1961 – 2006, observándose una tendencia negativa importante en los caudales medios mensuales en 23 de las 40 series analizadas. Además, se han observado alteraciones en el régimen pluvial en la cuenca del río Elqui con un incremento del 50% de las precipitaciones líquidas, producto de la elevación de la isoterma 0 °C en 500 metros, debido al aumento de la temperatura en 3 °C en la zona. (Fuenzalida et al., 1989). Esto convierte a esta zona un punto crítico, ya que gran parte del aporte de caudal de esta cuenca proviene del deshielo de las altas montañas andinas. Lo mismo ocurre en la cuenca del río Maipo, donde el aporte de agua para abastecer la región Metropolitana proviene mayoritariamente (67%) del deshielo de los glaciares durante la estación de verano. (Peña y Nazarala, 1987).

1.3. Proyecciones esperadas en la disponibilidad del recurso hídrico nacional

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2007) en su cuarto informe indica que el acelerado aumento de la temperatura promedio mundial se debe al incremento de las concentraciones de gases invernadero atmosféricos, atribuible principalmente a emisiones producto de actividades antropogénicas. Se ha observado un cambio de las condiciones climatológicas a nivel mundial, provocando un aumento en la frecuencia de los fenómenos extremos, por ejemplo, inundación y sequías (Stehr et al., 2010). En el caso de Sudamérica se esperan importantes cambios en los patrones de precipitación regional, proyectándose una disminución en las precipitaciones anuales para el sur de Sudamérica de alrededor de 3 a 18% entre los años 2020 y 2080 respectivamente (Hulme y Sheard, 1999). En el caso particular de Chile, existen diversos estudios donde se han utilizado diferentes escenarios de cambio climático establecidos por el IPCC, con la finalidad de estimar el comportamiento de las variables hidrológicas para fines del siglo XXI.

1.3.1. Proyecciones para las precipitaciones

Se estima para el año 2030 una disminución de las precipitaciones en un 5 y 15% entre estas cuencas, las cuales se intensificarían para el período 2031 – 2050, caso contrario es el de la región de Magallanes, donde se estima un aumento de las precipitaciones líquidas, producto al aumento de la isoterma 0 °C, ocasionando una disminución de la precipitación nival. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). Para fines de siglo XXI, Garreaud et al. (2011) estima que las precipitaciones disminuyan en la zona centro – sur del país entre un 60 y 70%, sobre todo entre las regiones del Maule y Los Lagos, mientras que para la zona austral se estima un aumento de estas en un 10 a 20% en comparación con el período 1960 – 1990.

1.3.2. Proyecciones para el caudal

Las proyecciones para el caudal indican una disminución significativa en las cuencas ubicadas entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos (30 – 42° latitud sur). Se espera un aumento en la elevación de la isoterma 0 °C (Figura 2), entre 300 y 500m para el período 2046 – 2065 (INFODEP, 2016), provocando una disminución de las reservas de agua en las cuencas nivales y nivo – pluviales, además del aumento del riesgo de desastre en condiciones de extrema precipitación y temperaturas, favoreciendo los fenómenos extremos de inundación y aluviones. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). Sumado a lo anterior, se espera un retroceso de los glaciares en el territorio nacional, lo que implica una serie de problemas de disponibilidad hídrica en los períodos secos. En la zona austral se estima un leve aumento de caudales, mientras en el norte grande y norte chico se espera una mayor ocurrencia de períodos de sequía y de eventos de lluvias extremas. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

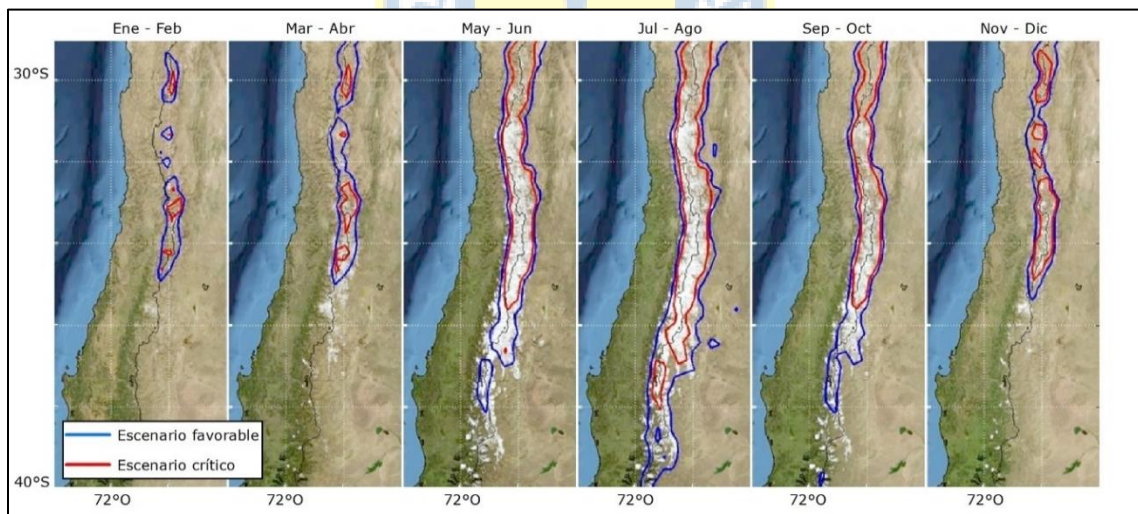


Figura 2: Variación del área de isoterma 0°C bajo escenario de cambio climático.

Fuente: Universidad de Chile, 2006.

La Tabla 2 entrega un resumen realizado por Riquelme (2018) correspondiente a estudios que se han enfocado en las proyecciones de caudal para las cuencas del centro – sur de Chile, bajo diferentes escenarios de cambio climático del IPCC (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5). En todos los estudios se estima una disminución en el caudal, por ejemplo, en las cuencas del río Malleco – Vergara (-80.96%), Illapel (-51.8%), la cuenca del río Lonquimay (-65%) y del río Juncal (-60%), estas últimas afectadas por el aumento de la isoterma 0 °C. En el caso particular de la cuenca del río Maipo, específicamente la subcuenca Maipo Alto que tiene aporte nival se estima una reducción de caudal en un 10%.

Tabla 2: Proyección de caudal para cuencas chilenas.

| Cuenca | Escenario favorable | Escenario critico |
|--|----------------------------|--------------------------|
| Limarí (Vicuña et al., 2010) | -23.5% | -45.5% |
| Illapel (RHMA, 2010) | - | -36.1 a -51.8% |
| Aconcagua (RHMA, 2010) | - | -20.1 a -43.5% |
| Juncal (Rafettli et al., 2016) | -40% | -60% |
| Maipo Alto (Migliavacca et al., 2015) | -21% | -10% |
| Maule Alto (CEPAL, 2012) | -27.9% | -36.6% |
| Laja (CEPAL, 2012) | -22.2% | -36.6% |
| Malleco – Vergara (Stehr, 2008) | - | -80.96% |
| Lonquimay (Stehr, 2008) | - | -65% |
| Cautín (RHMA, 2010) | - | -12.8 a -29.6% |

Fuente: Modificado de Riquelme (2018).

1.4. Uso del recurso hídrico en Chile

Durante el período 1980 – 2010, Chile ha experimentado un importante desarrollo económico basado en la exportación de los recursos naturales. (Banco Central de Chile, 2006, 2010). Este desarrollo se ha concentrado principalmente en la zona norte y centro del país, implicando una importante demanda hídrica. La relación entre la disponibilidad hídrica y la demanda es variable a lo largo del territorio nacional (Figura 3(a)), en la zona norte hasta Santiago se presenta una demanda excesiva en contraste a las bajas precipitaciones de la zona, que oscilan entre los

200 y 600 mm año-1. (Valdés-Pineda et al., 2014). Además, en las regiones de Antofagasta y Atacama se presenta una importante brecha en la relación disponibilidad – demanda, debido a un creciente aumento en la actividad minera. De manera análoga, se observa una mayor demanda del recurso hídrico en la zona central del país, abarcando las regiones de Valparaíso y Metropolitana, producto a las actividades silvoagropecuarias y minera. Ante esto, la demanda del agua potable ha sido cubierta principalmente por las aguas subterráneas, lo que ha incidido en un decaimiento considerable del recurso hídrico en la zona norte y central del país. (Valdés-Pineda et al., 2014). Por otra parte, la relación entre disponibilidad – demanda es muy favorable desde la región de O'Higgins al sur, donde la disponibilidad hídrica es superior a la demanda debido a que las precipitaciones anuales aumentan hacia el sur variando entre los 1000 – 2000 mm en la zona centro-sur y hasta los 5.000 mm en la zona austral. (Quintana & Aceituno, 2006). Esta amplia variabilidad latitudinal de la oferta de agua representa un desafío importante para el país en la gestión de los recursos hídricos, ya que se proyecta una tendencia a la baja en la disponibilidad del recurso debido a los efectos del cambio climático, más aún en aquellas zonas donde la demanda excede la disponibilidad. (Universidad de Chile, 2006).

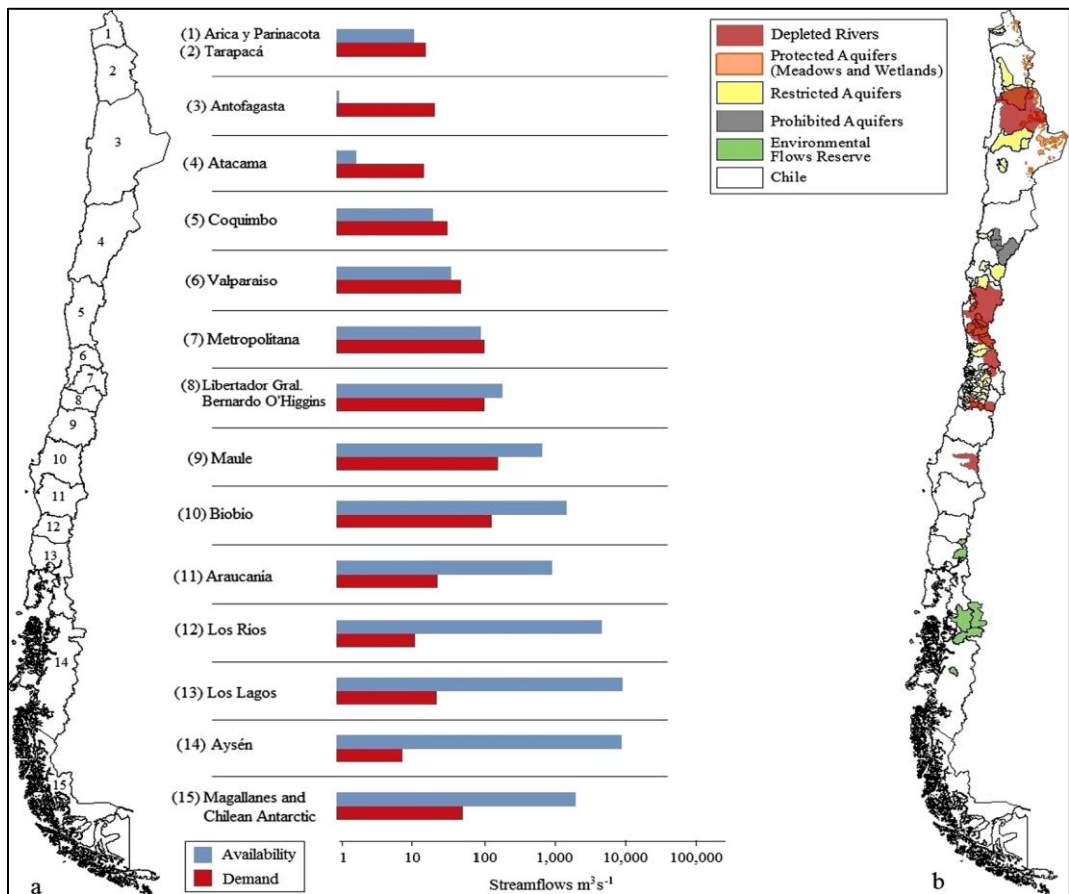


Figura 3: Disponibilidad hídrica en Chile. (a) Relación entre el caudal superficial y la demanda de agua ($m^3 s^{-1}$) para cada región administrativa. (b) Condiciones legales determinadas por el Gobierno de Chile para los ríos y acuíferos.
Fuente: Valdés-Pineda et al., 2014.

En la Figura 3(b) se observa la distribución geográfica de las zonas que han sido declaradas en escasez hídrica y las zonas protegidas para la conservación del recurso a lo largo del país. En color rojo se muestra las zonas donde se han agotado los ríos, por lo que no se pueden conceder derechos de agua de consumo permanente, concentrándose en aquellas regiones donde la relación disponibilidad – demanda es negativa; en color naranja y amarillo se muestra las zonas de los acuíferos que son protegidos y restringidos y el color verde corresponde a las zonas de reserva de caudales, donde no existen derechos de aguas otorgados.

Por otra parte, Ayala (2010) indicó que la demanda hídrica en Chile durante el año 2006 alcanzó los 4.710 m³/s, donde el 89% correspondió a usos no consuntivos y el 11% a usos consuntivos. De este último, la agricultura representa el 77.8%, el sector industrial y minero representan el 9.1% y 7.2% y el consumo de agua potable un 5.9%, el cual representa el 99.8% del abastecimiento de la población urbana y rural.

1.5. Relevancia del recurso hídrico en la cuenca del río Maipo

La cuenca hidrográfica del río Maipo es considerada una de cuencas más importantes del país, debido a que alberga el 40% de la población nacional y por la presencia de diferentes actividades productivas, como minería y agricultura. La cuenca se encuentra afectada por diversos factores climáticos, hidrológicos; ambientales, diversidad ecosistémica, fuerte actividades productivas, asentamientos humanos e importantes desarrollos hidroeléctricos en la cordillera. (García, 2008). En relación con los usos de agua de tipo consuntivo, se encuentra en primer lugar el uso agrícola con un 61,6% (1.269.824 mm³/año), seguido por el agua potable urbano con un 32,0% (659.893 mm³/año) y la demanda industrial con un 1,9. Por otra parte, la demanda de tipo no consuntiva se centra en el sector acuícola y la generación eléctrica, donde esta última predomina con un 98,8%, correspondiente a 5.603.549 mm³/año. (Dirección General de Aguas, 2017).

La cuenca presenta dos tipos de clima: Templado Mediterráneo con estación seca prolongada y Frío de altura en la Cordillera de los Andes, además de un régimen hidrológico con una fuerte componente nival en la zona alta y media (Dirección General de Aguas, 2004). La variabilidad climática de la cuenca ha sido explorada por los trabajos como los de Valdés-Pineda (2014, 2016 y 2018) para el caso de la precipitación; Meza (2005), Migliavacca et al. (2015), Arriagada et al. (2019), en el caso del caudal; y Núñez et al (2013) para ambas variables. Donde se concluye que la variabilidad climática se encuentra modulada por las oscilaciones de Madden-

Julian (Zhang, 2005), El Niño o ENSO (Philander, 1983) y la oscilación decadal del pacífico. (Mantua & Hare, 2002). Sin embargo, los efectos de esta variabilidad sobre problemas de relevancia como la disponibilidad de agua potable o para riego, son un área poco explorada en la cuenca.

Por otro lado, se ha observado una importante reducción en la disponibilidad hídrica de la cuenca. La Dirección General de Aguas (2018) reportó un déficit de precipitaciones de -15 y -61% para los años 2017 y 2018, respectivamente. En el caso del caudal, se observó una reducción de un 50% del volumen promedio para la temporada de deshielo (Septiembre – Marzo) para el período 2018 – 2019. Además, de un aumento del derretimiento de la cobertura nival relacionado con el fenómeno del Niño (ENSO) (Rutllant y Fuenzalida, 1991), corroborados con las mediciones realizadas a cinco glaciares de los Andes Secos Centrales. (Rivera et al, 2002). Pizarro-Tapia et al. (2011) indicó que las subcuencas del Maipo Alto y El Colorado presentan una tendencia positiva de las precipitaciones en los meses húmedos y una tendencia creciente de los caudales en los meses secos, atribuible a un mayor derretimiento glaciar entre 1960 y 2006.

Si bien existe evidencia que muestra una tendencia negativa (disminución) para el caudal superficial en algunas zonas de la cuenca del río Maipo, no se conoce la distribución espacial de esta tendencia en la cuenca, lo que dificulta generar medidas de prevención y gestión de la disponibilidad del recurso hídrico.

1.5.1. Aporte al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son una iniciativa constituida en el año 2015 por la Organización de Naciones Unidas (ONU), en conjunto con ONGs y habitantes del mundo, donde se propuso la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible enfocada en el ámbito económico, social y ambiental, compuesto por 17 objetivos y 169 metas. (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

Bajo esta perspectiva, la finalidad del presente estudio es aportar al cumplimiento de la Agenda 2030, enfocándose en el indicador 6.4 del Objetivo 6 Agua y Saneamiento de las ODS, entregando la situación actual de la cuenca del río Maipo en términos de disponibilidad hídrica y las proyecciones estimadas, con el propósito de ajustar la extracción de agua superficial en proporción a los recursos disponibles.



2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

La cuenca del río Maipo muestra una tendencia negativa en la disponibilidad del recurso hídrico lo que disminuirá los caudales presentes en la red hídrica de la cuenca, generando un problema de abastecimiento de agua en la región más poblada del país. Sin embargo, al no conocer la distribución espacial de esta tendencia, se hace difícil desarrollar políticas efectivas que permitan asegurar el abastecimiento futuro de agua. Por lo tanto, ¿Cómo se distribuye espacialmente la tendencia decreciente observada en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca del río Maipo?

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

- Analizar la variabilidad espacial de las tendencias observadas en el recurso hídrico de la cuenca del río Maipo y efecto en la disponibilidad de agua de la región Metropolitana.

3.2. Objetivos específicos

- Estimar tendencias en el registro fluviométrico de la cuenca del río Maipo.
- Determinar patrones espacio-temporales de las tendencias presentes en los caudales de la cuenca del río Maipo.
- Determinar los efectos de las tendencias sobre la disponibilidad de agua para la Región Metropolitana.



4. METODOLOGÍA

4.1. Descripción del Área de estudio

La cuenca del río Maipo se encuentra ubicada entre los paralelos 32°55' y 34°15' latitud sur, abarca la totalidad de la Región Metropolitana de Santiago, parte de la Región de Valparaíso en las provincias de San Antonio y Marga Marga y la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins en la provincia de Cachapoal (ver Figura 4). Nace en el extremo sur de la Cordillera de los Andes, en las laderas del Volcán Maipo a una altitud de 5.323 m.s.n.m., drenando una superficie de 15.380 km² y posee un cauce principal longitud de 250 km aproximados. (Dirección General de Aguas, 2016). La cuenca del río Maipo se puede dividir en tres zonas: zona alta, desde la Cordillera de los Andes hasta el puente ferrocarril Paine – Talagante; zona media, desde el fin de la zona alta hasta la confluencia de los ríos Maipo y Mapocho; y zona baja, desde la confluencia de los ríos Maipo y Mapocho, hasta el Océano Pacífico. (García, 2008).

La cuenca del río Maipo concentra una población total de 7.112.808 habitantes en la Región Metropolitana, donde el 96,3% se localizan en el área urbana y el 3,7% en el área rural, con una densidad poblacional de 461,99 hab/km². Además, la cuenca abarca las provincias de San Antonio (168.046 habitantes) y Marga Marga (341.893 habitantes) de la Región de Valparaíso y la provincia de Cachapoal (646.133 habitantes) de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins. (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017).

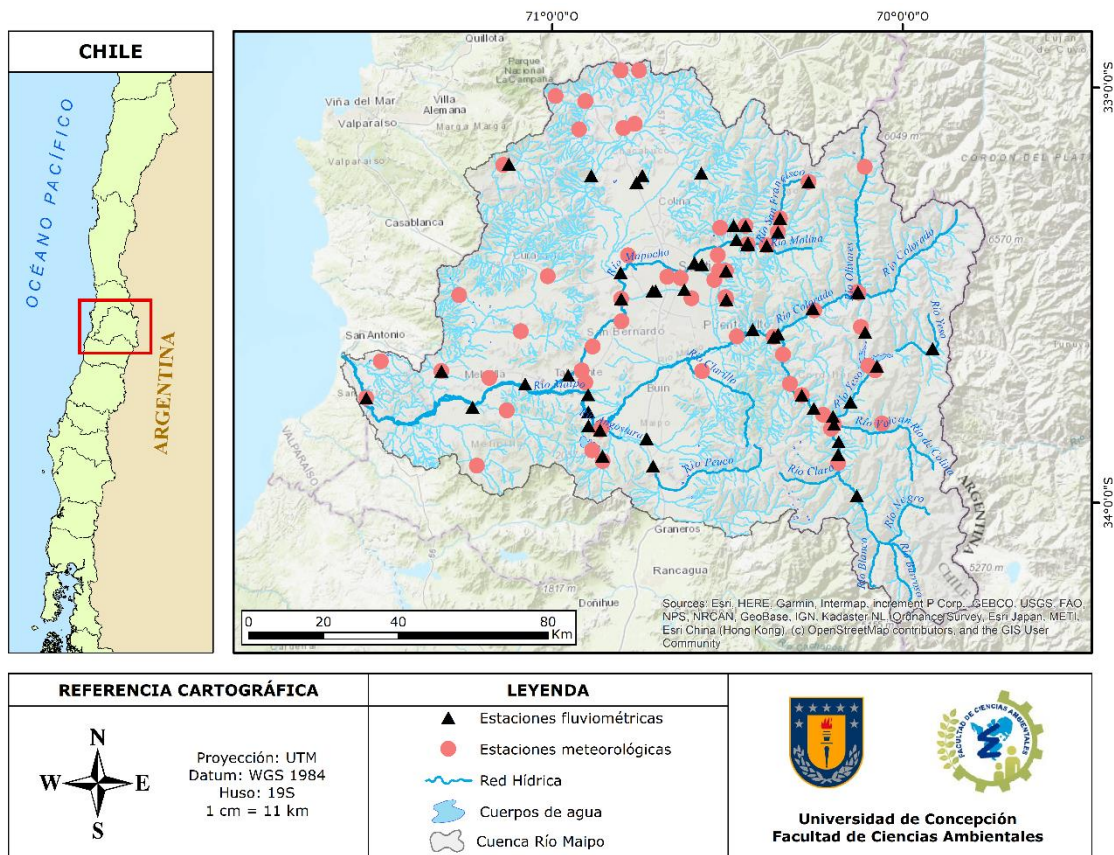


Figura 4: Cuenca del río Maipo.

Fuente: Elaboración propia en base a los registros de la DGA y CGIAR (2020).

4.1.1. Antecedentes climáticos

La cuenca del río Maipo presenta dos tipos de clima: Templado de tipo mediterráneo con estación seca prolongada y frío de altura en la Cordillera de los Andes. El primero se desarrolla prácticamente en la zona baja y media de la cuenca y está caracterizada por contrastes térmicos bastante fuertes, donde en temporada de invierno las temperaturas llegan a 0°C e inferior y en la temporada de verano superan los 30 °C durante el día. En cuanto a las precipitaciones, estas varían según la zona de la cuenca, donde en la zona alta, media y costera alcanzan valores medios anuales de 536 mm, 300 mm y 404 mm respectivamente. El segundo se localiza en la Cordillera de los Andes a una altitud superior a los 3.000 m.s.n.m., y

se caracteriza por las bajas temperaturas y la presencia de precipitaciones sólidas, lo que favorece la acumulación de nieve y campos de hielo permanentes (Dirección General de Aguas, 2004). Los valores registrados de precipitación para ambos climas son mayores durante las temporadas invernales.

La clasificación de Köppen para la cuenca del río Maipo se define un clima mediterráneo de verano cálido (Csb), caracterizado por presentar mayor precipitación en los meses de invierno que los meses de verano. (Beck, 2018).

De acuerdo con el Balance Hídrico de Chile (Dirección General de Aguas, 1987), las temperaturas promedio y la tasa de evapotranspiración disminuyen con la altitud, variando entre los 0 – 14 °C y 200 – 500 mm/año respectivamente, mientras que la precipitación aumenta a medida que asciende la altitud, variando entre los 300 – 2500 mm/año. (Figura 5).

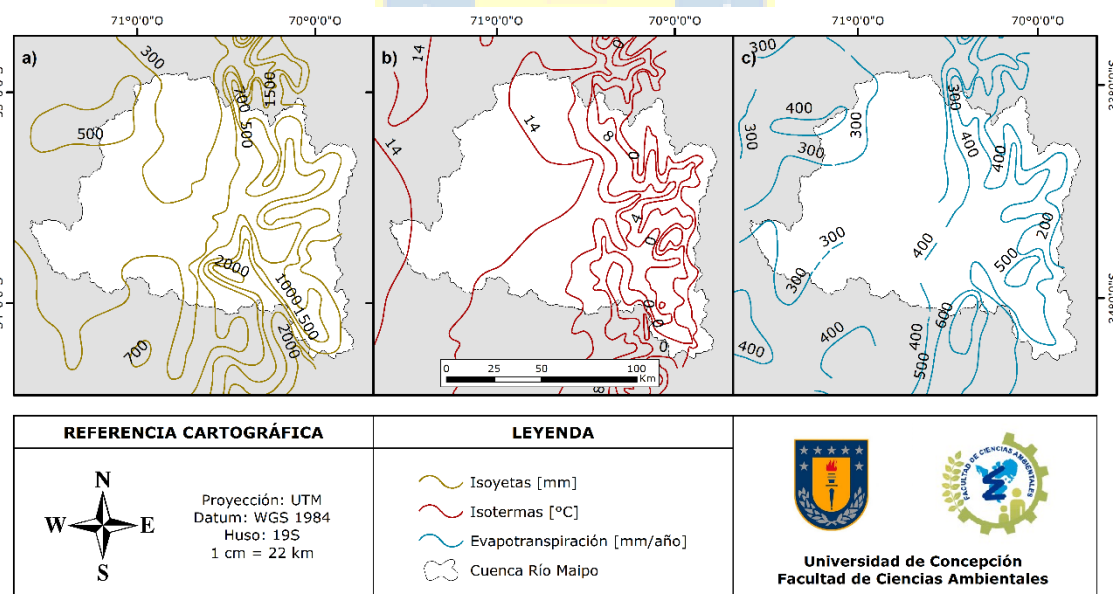


Figura 5: Isotermas, isoyetas y evapotranspiración para la cuenca del río Maipo.
Fuente: Elaboración propia en base a Balance Hídrico de Chile (1987).

4.1.2. Antecedentes hidrológicos

La cuenca del río Maipo posee 62 estaciones meteorológicas y 53 fluviométricas (ver Figura 4), las Tabla Anexo 1 y Tabla Anexo 2 muestran las estaciones meteorológicas y fluviométricas presentes en la cuenca. La cuenca se caracteriza por poseer tres regímenes hidrológicos: nival en la cuenca alta, nivo – pluvial en la cuenca media y pluvial en la cuenca baja. El régimen hidrológico nival (Figura 6) predomina en la Cordillera de los Andes, donde el peak de caudal se presenta en los meses de deshielo. El régimen nivo – pluvial predomina en la zona del valle central, caracterizado por presentar una fuerte influencia nival y una no despreciable influencia pluvial. La Figura 7 muestra dos crecidas anuales, una fuerte en los meses de deshielo y una leve en la temporada de invierno. (Dirección General de Aguas, 2004). El régimen hidrológico pluvial (Figura 8) se caracteriza por presentar el peak de caudal en los meses de invierno, debido a que la influencia de los deshielos es imperceptible.

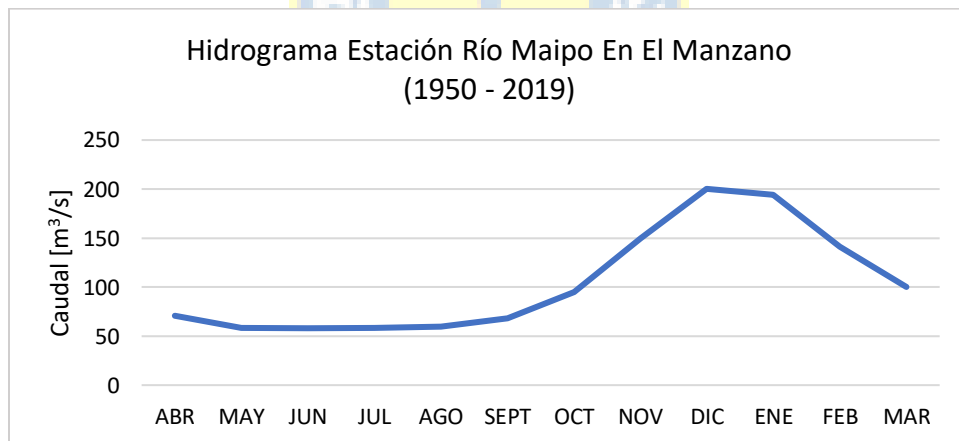


Figura 6: Hidrograma de la estación Río Maipo en el Manzano (1950 – 2019).
Cuenca alta del río Maipo.

Fuente: Elaboración propia en base a registros DGA.

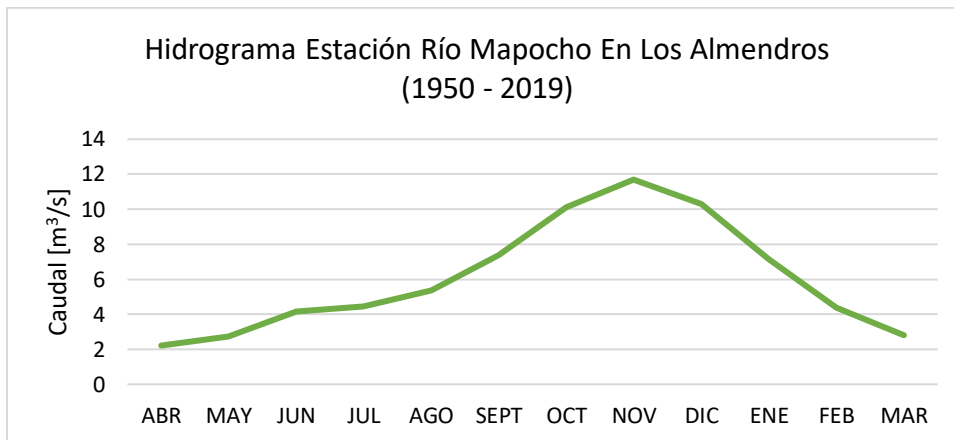


Figura 7: Hidrograma de la estación Río Mapocho en los Almendros (1950 – 2019). Cuenca media del río Maipo.

Fuente: Elaboración propia en base a registros DGA.

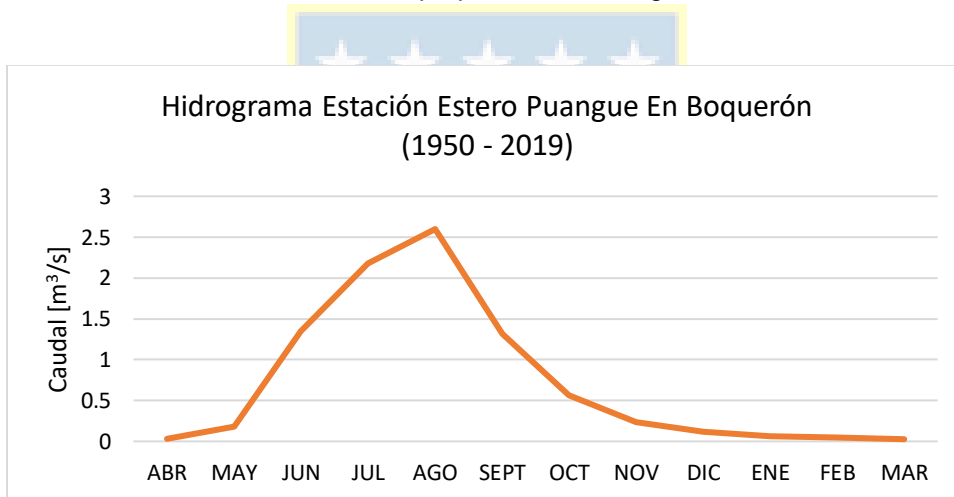


Figura 8: Hidrograma de la estación Estero Puangue en Boquerón (1950 – 2019). Cuenca baja del río Maipo.

Fuente: Elaboración propia en base a registros DGA.

4.1.3. Uso de suelo

La Figura 9 muestra los usos de suelo presentes en la cuenca del río Maipo. Los usos de suelo que predominan en el área de estudio corresponden a praderas y matorrales (28.3%), seguidos del bosque nativo y mixto (22.9%) y áreas desprovistas de vegetación (16.9%). En las cuencas baja y media predominan los terrenos destinados a agricultura, bosque y área urbana, esta última concentrada

en la provincia de Santiago. En relación con la agricultura de la zona, estas constituyen a cultivos de plantas forrajeras, frutales, viñas y parronales viníferos, cereales y hortalizas. (Dirección General de Aguas, 2004). Por otra parte, los terrenos correspondientes a nieves eternas y glaciares predominan en la cuenca alta del río Maipo (7.2%), recalcando la influencia nival sobre el régimen hidrológico de la cuenca.

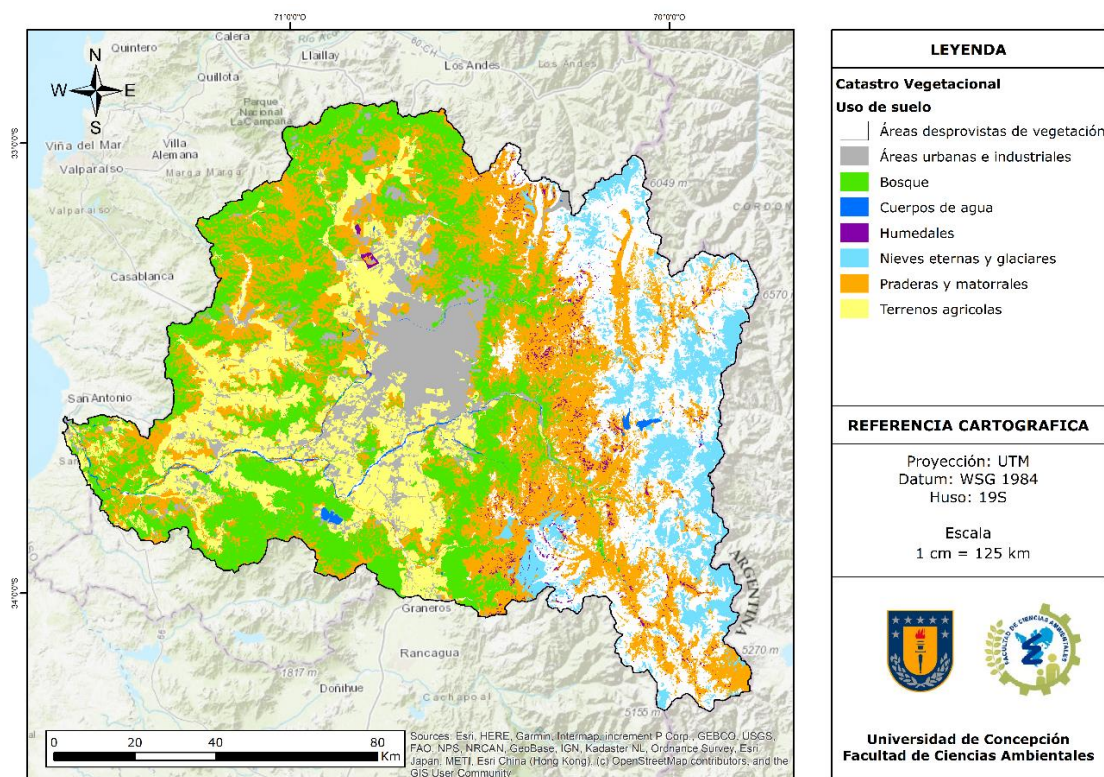


Figura 9. Uso de suelo de la cuenca del río Maipo.

Fuente: Elaboración propia en base a catastro de uso de suelo (IDE, 2021).

4.1.4. Uso de agua

De acuerdo con los registros de la Dirección General de Aguas (2021a), existe un total de 10.069 derechos de aprovechamiento de agua en la Región Metropolitana, los cuales 9.781 son derechos consuntivos y 288 no consuntivos. (Tabla 3).

Los principales usos consuntivos corresponden al riego (37%), donde la mayoría de los puntos de captación se localizan en los ríos Maipo y Mapocho. Por otra parte, el agua potable / saneamiento constituye el 8% de los derechos consuntivos otorgados, siendo las comunas que ejercen mayor demanda hídrica para consumo humano son el Gran Santiago, Peñaflores, Melipilla y Talagante.

Los principales usos no consuntivos presentes en la Región Metropolitana son energía hidroeléctrica (33%) y uso industrial (18%). Las principales centrales hidroeléctricas de pasada se localizan en la cuenca alta del río Maipo, correspondiente a las centrales Alfalfal, Maitenes, Queltehues y Volcán (AES Gener S.A.), la central Puntilla (Eléctrica Puntilla), la central Carena (Colbún S.A.) y la central Guayacán perteneciente a la empresa. (Energía Coyanco S.A.). Sin embargo, existen 4.725 derechos de aguas otorgados cuyo uso no ha sido especificado por sus solicitantes, generando una incertidumbre de la utilización real del recurso hídrico en la zona.

Tabla 3: Derechos de aprovechamiento de aguas para la Región Metropolitana.

| Uso de agua | Consuntivo | Porcentaje uso consuntivo | No Consuntivo | Porcentaje uso no consuntivo |
|---|------------|---------------------------|---------------|------------------------------|
| Bebida / Uso Doméstico / Saneamiento | 759 | 7.76% | 3 | 1.04 |
| Energía Hidroeléctrica | 5 | 0.05% | 94 | 32.64% |
| Otros usos | 743 | 7.6% | 16 | 5.56% |
| Piscicultura | 1 | 0.01% | 0 | 0% |
| Riego | 3614 | 36.95% | 11 | 3.82% |
| Uso Industrial | 39 | 0.4% | 53 | 18.4% |
| Uso Medicinal | 2 | 0.02% | 3 | 1.04% |
| Uso Minero | 1 | 0.01% | 0 | 0% |
| Sin especificar | 4617 | 47.2% | 108 | 37.5% |
| TOTAL | 9781 | 100% | 288 | 100% |

Fuente: Elaboración propia en base a registros DGA.

4.2. Estimar las tendencias observadas en el registro fluviométrico de la cuenca del río Maipo

4.2.1. Analizar la consistencia del registro fluviométrico de la cuenca del río Maipo

El análisis de la consistencia del registro fluviométrico se realizó mediante la recopilación de la información registrada en las estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (2021b) y el Explorador Climático del Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (2021), para el periodo 1970-2019 consistente con el cambio en los patrones climáticos detectado por Universidad de Chile (2006) y Boiseir et al. (2016). Además, se aplicaron cuatro criterios para la selección de las estaciones fluviométricas. (Sidibe et al., 2018; Arriagada et al., 2019):

- Estaciones fluviométricas que registren caudales en ríos naturales, es decir, se excluyen estaciones que registren el caudal en canales de riego u otras obras hidráulicas.
- Presenten al menos un 50% de información en el período que la estación fluviométrica estuvo o se mantiene vigente.
- Presenten al menos un 30% de información en el periodo 1970-2019 y,
- Vacíos de información menores a 3 años en el periodo de registro de la estación.

Debido a los importantes vacíos de información presentes en el periodo de estudio (Arriagada et al., 2021), se aplicó el algoritmo no paramétrico MissForest (Stekhoven y Bühlmann, 2012) para el relleno de caudales diarios en las estaciones que resulten consistentes. Este algoritmo es utilizado para la imputación de los

valores perdidos en datos de tipo mixto, basado en el Random Forest (Breiman, 2001) y fue validado por Arriagada et al. (2021) para el uso de relleno de datos de caudales diarios.

De acuerdo con Arriagada et al. (2021), se utilizó de criterio 1.000 árboles de regresión y un número máximo de 100 iteraciones para asegurar el cumplimiento del criterio de detención. El algoritmo fue implementado utilizando los paquetes “*hyfo*”, “*hydroGOF*”, “*lubridate*” y “*missForest*” del software R 4.1.0.

4.2.2. Estimar tendencias significativas en el registro fluviométrico consistente de la cuenca del río Maipo

La estimación de tendencias en el registro fluviométrico que resulte consistente entre 1970 y 2019 se determinó mediante el Test de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). Este test es una prueba estadística no paramétrica que se ha utilizado con frecuencia en el análisis de datos hidrometeorológicos y permite determinar si la tendencia observada es positiva o negativa. (Da Silva et al., 2015). No obstante, el Test de Mann-Kendall es muy sensible a las correlaciones en serie (Kulkarni y Storch, 1995) por lo que se utilizó la corrección propuesta por Yue y Wang (2004). Para evaluar la significancia de las tendencias estimadas se utilizó el Test Z y el Valor-p, con un intervalo de confianza del 95% y se utilizó la Pendiente de Sen (Sen, 1968) para evaluar la magnitud de las tendencias que resulten significativas. (Arriagada et al., 2019).

4.3. Determinar patrones espacio-temporales de las tendencias presentes en los caudales de la cuenca del río Maipo.

4.3.1. Análisis de patrones espaciales

El análisis de patrones espaciales de las tendencias presentes en la cuenca del río Maipo se realizó mediante la aplicación del Análisis de Clúster o Conglomerados. Este análisis consiste en agrupar la información de las estaciones fluviométricas en pequeños grupos o clústeres homogéneos, donde cada miembro de los grupos presente características o comportamientos similares. (Castro et al., 2012, Lin & Chen, 2006; Peña, 2002). Se utilizó el algoritmo k-medias, también conocido como *k-means* en inglés. A continuación, se describe el algoritmo de k-medias por Carrasco (2020):

- i. Inicialización: Se define el número de grupos o clúster que se quiere obtener (K) y K-centroides aleatorios para el grupo de estaciones en análisis.
 - Para cada estación se calcula la distancia hacia todos los centroides y se asigna al grupo que tenga el centroide más cercano.
 - Una vez agrupadas todas las estaciones, se calcula nuevamente las posiciones de los K centroides, ubicándolos en el centro de cada grupo.
- ii. Iteración: El algoritmo consiste en calcular la distancia del centroide y redistribuir todos los objetos hacia el centroide más cercano. Este proceso se repite hasta que los K centroides no cambian después de una iteración.

Para determinar el número óptimo de clústeres se utilizó el Método Elbow, el cual consiste en la determinación de la inercia, a través de la ecuación:

$$Inercia = \sum_{i=0}^n \|x_i - \mu\|^2 \quad (2)$$

Donde,

X_i : corresponde al valor de caudal de la estación i

μ : corresponde al valor del centroide del clúster perteneciente de la estación i

Luego se grafica el número de clúster (K) con la inercia y el valor optimo se obtiene cuando esta curva muestra un punto de inflexión o cambio de curvatura. (Vásquez, 2019).

Para este análisis se utilizó el registro de caudales anuales rellenados y sus tendencias para las estaciones que resultaron significativas, variando la cantidad de clústeres entre dos y siete grupos. El algoritmo de k-medias fue implementado en el software R 4.1.0, mientras que el análisis espacial de los clústeres se realizó con las herramientas de geoprocesamiento del software ArcGIS 10.4. Los clústeres fueron comparados además con el orden de Strahler de los ríos donde se encuentra cada estación fluviométrica.

4.3.2. Análisis de patrones temporales

El análisis de series temporales para las estaciones fluviométricas consistentes se realizó mediante la aplicación de la prueba de homogeneidad de Pettitt (Pettitt, 1979), con la finalidad de identificar el año de cambio en la media del registro de caudal $X = x_1, x_2, \dots, x_T$. El año de cambio t se identifica si x_n donde $n = 1, 2, \dots, t$ tiene una función de distribución común μ_1 y x_n donde $n = t + 1, t + 2, \dots, T$ tiene una función de distribución común μ_2 y se cumple que $\mu_1 \neq \mu_2$ (Ocampo, 2019). Para ello se prueba la hipótesis nula H_0 : ningún cambio ($t = T$) contra la hipótesis alternativa H_1 : cambio ($1 \leq t < T$) utilizando el estadístico de prueba K_T definido como:

$$K_T = \max_{1 \leq t < T} |U_{t,T}| \quad (3)$$

Donde,

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

La prueba de homogeneidad de Pettitt fue implementada en el complemento estadístico de Excel XLSTAT, mientras que el análisis espacial de los quiebres temporales en las tendencias presentes en el caudal se realizó con las herramientas de geoprocésamiento del software ArcGIS 10.4. y búsquedas bibliográficas en las fuentes de la Dirección General de Aguas y la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA).

4.4. Determinar los efectos de las tendencias sobre la disponibilidad de agua para la Región Metropolitana

Para analizar los efectos de las tendencias sobre la disponibilidad de agua, se realizó, en primer lugar, un levantamiento de información de los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados, cuya cobertura territorial se encuentre en la Región Metropolitana a través del sitio web de la Dirección General de Aguas (2021a), la cual se consideró como la demanda hídrica. Se consideraron para este estudio los derechos de agua que presenten coordenadas UTM y geográficas diferentes de 0 y cuya unidad de medida de extracción de caudal se exprese en unidad de volumen dividida por unidad de tiempo. Los derechos de agua se analizaron para cada cuenca de estaciones fluviométricas que presentaron tendencias significativas de caudal. La información entregada de los derechos de agua se manejó desde el software Excel, mientras que el análisis espacial se utilizó el software ArcGIS 10.4.

La determinación de la oferta hídrica histórica para la Región Metropolitana se consideró el caudal medio anual de cada estación fluviométrica, obtenido del

registro fluviométrico reconstruido mediante el algoritmo MissForest, el cual se comparó con el valor registrado del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2 (2021) durante el período 1970 – 2019.

La determinación de la oferta hídrica proyectada se determinó aplicando las tendencias significativas para cada estación fluviométrica, considerando 10, 20 y 30 años, mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{proyectado} = Q_{historico} - (|T| \times t), \text{ donde} \quad (4)$$

T: Pendiente de sen (m^3/s año)

t: años

Conociendo la demanda y oferta hídrica histórica y proyectada para la Región Metropolitana se determinó un Balance Hídrico para cada cuenca fluviométrica, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Balance\ Hidrico = Entradas - Salidas = Oferta - Demanda \quad (5)$$

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Estimación de tendencias observadas en el registro fluviométrico de la cuenca del río Maipo

5.1.1. Análisis de consistencia del registro fluviométrico

La Tabla 4 muestra el análisis de consistencia realizado a las estaciones fluviométricas, concluyendo que 48 de las 53 estaciones fluviométricas se encuentran midiendo cauces naturales, 38 de las 48 presentan más de un 50% de información registrada en el periodo de vigencia. 22 de las 38 presentan más de un

30% de información registrada entre 1970 y 2019 y presentan vacíos de información menores a 3 años. La Figura 10 muestra el total de estaciones fluviométricas (a) y las estaciones consistentes (b), se observa que en el caso de las estaciones consistentes se concentran en los ríos Maipo, Mapocho, Colorado, Angostura, Colina, Olivares y Volcán además de los esteros Arrayan, Polpaico, Puangue y Yerba Loca.

Tabla 4. Análisis de consistencia.

| Código estación | Nombre | Río Natural | Porcentaje periodo de registro | Porcentaje 1970 - 2019 | Max vacío de información (días) |
|------------------------|---|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--|
| 5735001 | Canal Colina En Peldehue | Si | 92% | 71% | 160 |
| 5735004 | Canal Colina En Sección Las Huacas | Si | 50% | 0% | 0 |
| 5740002 | Canal Maipo En Chocalan | Si | 100% | 0% | 0 |
| 5705002 | Canal Queltehue | No | 97% | 12% | 34 |
| 5730003 | Canal San Carlos En Desembocadura Rio Mapocho | No | 48% | 6% | 25 |
| 5730002 | Canal San Carlos En Príncipe De Gales | No | 98% | 5% | 11 |
| 5722006 | Estero Arrayan En Desembocadura (Ca) | Si | 66% | 0% | 0 |
| 5722001 | Estero Arrayan En La Montosa | Si | 83% | 78% | 48 |
| 5703006 | Estero Glaciar Echaurren | Si | 34% | 19% | 642 |
| 5716003 | Estero Pintue En Puente Pintue | Si | 90% | 31% | 274 |
| 5734001 | Estero Polpaico En Chicauma | Si | 78% | 64% | 254 |
| 5741001 | Estero Puangue En Boquerón | Si | 69% | 77% | 788 |
| 5746001 | Estero Puangue En Ruta 78 | Si | 98% | 65% | 143 |
| 5721001 | Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco | Si | 99% | 66% | 32 |
| 5721017 | Estero Yerba Loca En Piedra Carvajal | Si | 0% | 0% | 0 |
| 5730039 | Quebrada De Macul | Si | 0% | 0% | 0 |
| 5730008 | Quebrada Ramon En Recinto Emos | Si | 85% | 49% | 636 |

| | | | | | |
|----------------|---------------------------------------|----|------|-----|-----|
| 5713001 | Rio Angostura En Angostura | Si | 38% | 4% | 18 |
| 5716001 | Rio Angostura En Valdivia De Paine | Si | 99% | 76% | 29 |
| 5735003 | Rio Colina Sección Las Huacas | Si | 68% | 0% | 0 |
| 5707002 | Rio Colorado Antes Junta Rio Maipo | Si | 89% | 94% | 101 |
| 5705001 | Rio Colorado Antes Junta Rio Olivares | Si | 81% | 69% | 344 |
| 5707001 | Rio Colorado En Maitenes | Si | 50% | 0% | 0 |
| 5748001 | Rio Maipo En Cabimbao | Si | 53% | 75% | 118 |
| 5740001 | Rio Maipo En Chignigue (Juncal) | Si | 47% | 1% | 92 |
| 5710002 | Rio Maipo En El Canelo | Si | 30% | 0% | 0 |
| 5704001 | Rio Maipo En El Ingenio | Si | 96% | 0% | 0 |
| 5710001 | Rio Maipo En El Manzano | Si | 92% | 97% | 206 |
| 5717003 | Rio Maipo En El Rosario | Si | 75% | 5% | 1 |
| 5717002 | Rio Maipo En Isla De Maipo | Si | 96% | 0% | 0 |
| 5701001 | Rio Maipo En Las Hualtatas | Si | 91% | 62% | 223 |
| 5701002 | Rio Maipo En Las Melosas | Si | 46% | 36% | 740 |
| 5717005 | Rio Maipo En Naltahua | Si | 87% | 0% | 0 |
| 5704002 | Rio Maipo En San Alfonso | Si | 88% | 85% | 214 |
| 5737005 | Rio Mapocho En El Monte | Si | 61% | 0% | 0 |
| 5737019 | Rio Mapocho En El Trebal | Si | 90% | 6% | 50 |
| 5722003 | Rio Mapocho En Las Condes | Si | 100% | 0% | 0 |
| 5722002 | Rio Mapocho En Los Almendros | Si | 89% | 92% | 380 |
| 5730011 | Rio Mapocho En Pte. Pudahuel | Si | 100% | 0% | 0 |
| 5722004 | Rio Mapocho En Puente Nilhue | Si | 100% | 0% | 0 |
| 5737002 | Rio Mapocho Rinconada De Maipú | Si | 94% | 90% | 99 |
| 5720001 | Rio Molina Antes Junta San Francisco | Si | 32% | 21% | 44 |
| 5706001 | Rio Olivares Antes Junta Rio Colorado | Si | 92% | 79% | 365 |
| 5715001 | Rio Paine En Longitudinal | Si | 86% | 30% | 213 |

| | | | | | |
|---------|---|----|------|-----|-----|
| 5721016 | Rio San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca | Si | 88% | 31% | 366 |
| 5702001 | Rio Volcán En Queltehues | Si | 79% | 80% | 806 |
| 5703003 | Rio Yeso Antes Junta Rio Maipo | Si | 72% | 0% | 0 |
| 5703002 | Rio Yeso En Embalse El Yeso | Si | 48% | 5% | 884 |
| 5703004 | Rio Yeso En Manzanito | Si | 100% | 0% | 0 |
| 5703001 | Rio Yeso En Piuquenes | Si | 60% | 2% | 225 |
| 5730006 | Zanión De La Aguada En Pajaritos | Si | 44% | 0% | 0 |
| 5730004 | Zanión De La Aguada En Santa Rosa | Si | 98% | 0% | 0 |
| 5730005 | Zanión De La Aguada Puente Particular | Si | 92% | 30% | 183 |

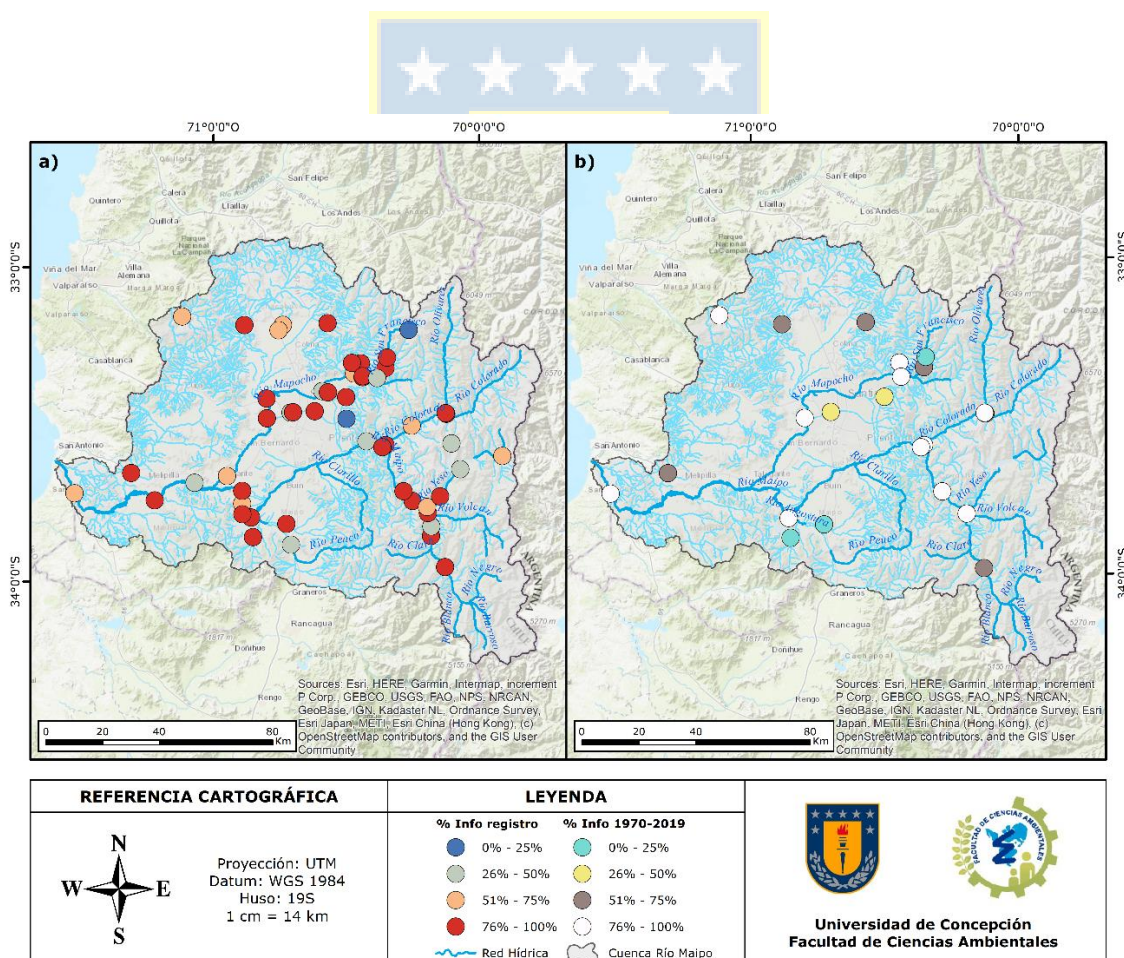


Figura 10. Estaciones fluviométricas en la cuenca del río Maipo. (a) Total de estaciones fluviométricas. (b) Estaciones consistentes.

La Figura 11 muestra el registro de caudales de las 53 estaciones fluviométricas identificadas en la cuenca del río Maipo y el registro de las estaciones que cumplieron los criterios del análisis de consistencia. Se observa que las estaciones que resultaron consistentes presentan numerosos vacíos de información de diferentes longitudes y en distintos años de registro. La Figura 12 muestra los hidrogramas observados y reconstruidos por el algoritmo *MissForest* durante el período de estudio 1970 – 2019 en las estaciones fluviométricas consistentes ubicadas en las desembocaduras de las subcuencas del río Maipo. En general, se observa un buen rendimiento del algoritmo en la reconstrucción de caudales diarios, presentando series temporales coincidentes con el comportamiento hidrológico de la cuenca. Esto permitiría analizar la variabilidad de caudales y su interacción con las variables de precipitación y temperatura en las cuencas chilenas. (Arriagada et al., 2021).



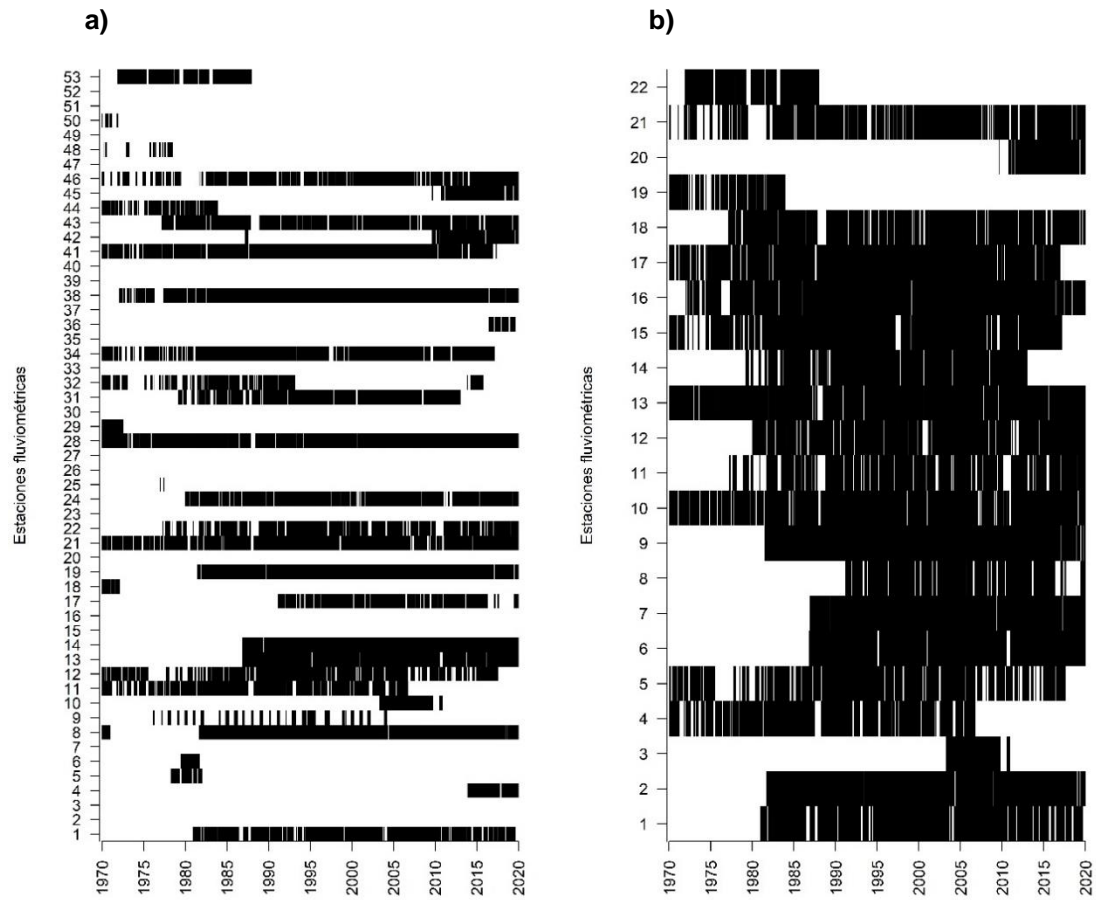


Figura 11. Información fluviométrica disponible y faltante. (a) Total de estaciones fluviométricas. (b) Estaciones consistentes.

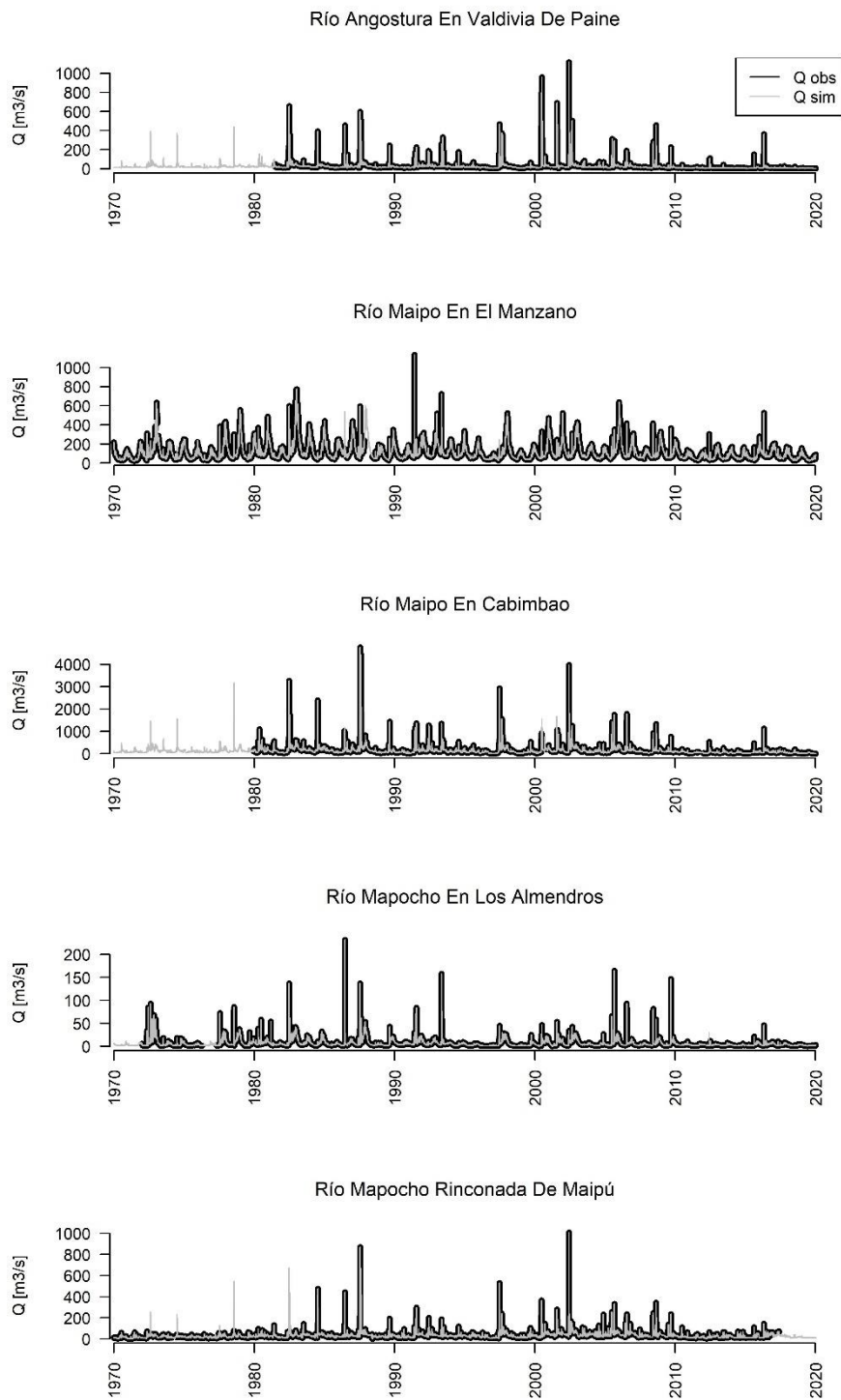


Figura 12. Hidrogramas de datos observados y reconstruidos de estaciones fluviométricas consistentes (1970 – 2019).

5.1.2. Estimación de tendencias significativas en el registro fluviométrico consistente de la cuenca del río Maipo

La Figura 13 muestra los resultados de los estadísticos Z (a) y valor-p (b) de la prueba de tendencia de Mann Kendall para las estaciones fluviométricas consistentes, concluyendo que 21 de las 22 estaciones muestran tendencias decrecientes significativas ($Z < -1.96$ y $\text{valor-p} < 0.05$) durante el periodo de estudio. La Figura 14 muestra el resultado de la Pendiente de Sen para las estaciones con tendencias significativas. La mayor tendencia de disminución (1795.2 L/s año) se encuentra en el río Maipo, ubicada a 12.9 km de la desembocadura de la cuenca. Las mayores tasas de disminución de caudal se concentran en los ríos Maipo, Volcán, Colorado, Angostura y Olivares, entre 1795.2 y 198.0 L/s año. Las menores tasas de disminución de caudal se concentran en los esteros Colina, Polpaico, Yerba Loca, Puangue, Pintue, además en el río San Francisco y Zanjón de la Aguada, entre 6.5 y 15.7 L/s año. El resumen de los estadísticos obtenidos del análisis de tendencias para las estaciones consistentes se muestra en la Tabla 5. La estación Río Mapocho Rinconada de Maipú no registro tendencia entre 1970 y 2019, por lo que esta destacada en color rojo.

Las tendencias decrecientes de caudal en la cuenca del río Maipo resultan ser contradictorias con Pizarro-Tapia et al. (2011), donde se identificó un aumento de caudal en la subcuenca del Colorado en los meses secos ya que existe un mayor aporte de agua producto del derretimiento nival. Sin embargo, esta tendencia se registró previo a la sequía que se está presentando en la zona central del país, por ende, esta tendencia puede verse modificada ante los efectos del cambio climático. Asimismo, Migliavacca et al. (2015) estima una disminución de los caudales en la parte alta de la cuenca, ocasionado por la elevación de la isoterma 0°C y la disminución de las precipitaciones en la zona central del país, resultando consistente con el comportamiento de las tendencias identificadas en el presente estudio.

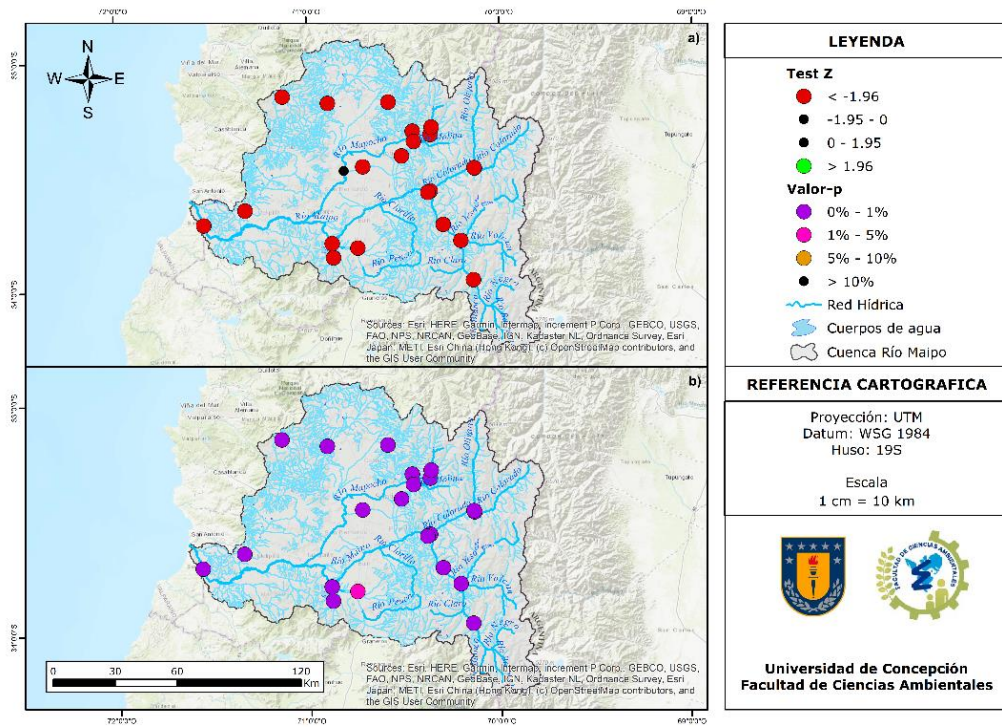


Figura 13. Análisis de tendencia. (a) Test Z. (b) Valor-p.

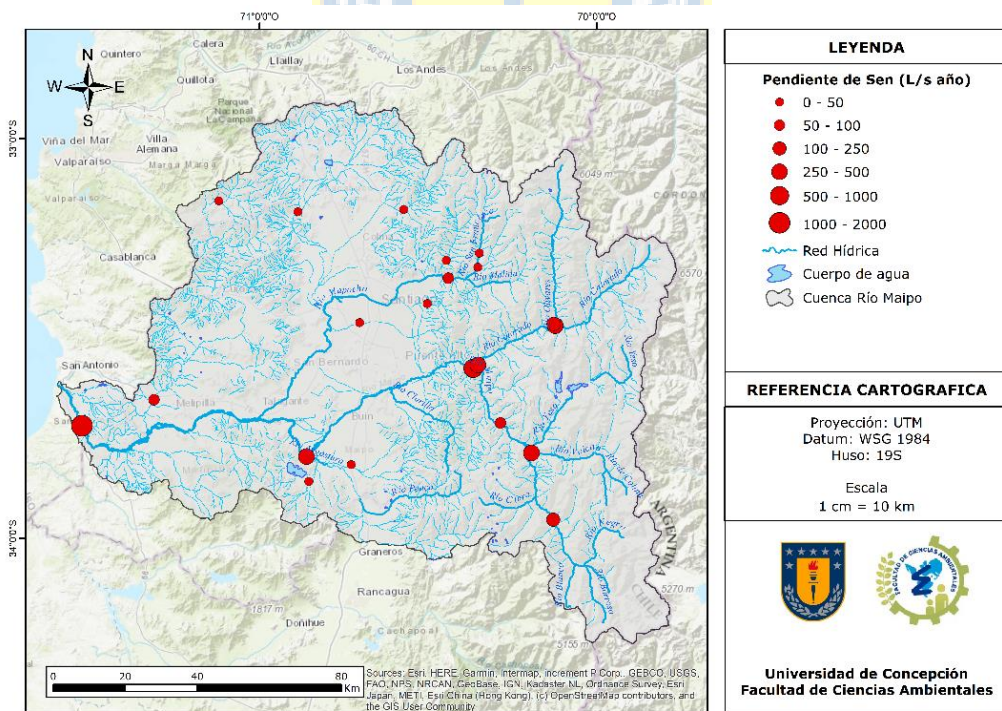


Figura 14. Pendiente de Sen (L/s año).

Tabla 5. Análisis de tendencia histórica de caudal (1970-2019).

| Código estación | Nombre | Test Z | Valor-p | Pendiente de Sen (L/s) |
|------------------------|---|---------------|----------------|-------------------------------|
| 5735001 | Canal Colina En Peldehue | -4.14 | < 0.01% | 15.7 |
| 5722001 | Estero Arrayan En La Montosa | -5.07 | < 0.01% | 21.5 |
| 5716003 | Estero Pintue En Puente Pintue | -8.92 | < 0.01% | 9.2 |
| 5734001 | Estero Polpaico En Chicauma | -6.10 | < 0.01% | 12.5 |
| 5741001 | Estero Puangue En Boquerón | -5.80 | < 0.01% | 11.1 |
| 5746001 | Estero Puangue En Ruta 78 | -7.13 | < 0.01% | 80.0 |
| 5721001 | Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco | -4.92 | < 0.01% | 12.1 |
| 5730008 | Quebrada Ramon En Recinto Emos | -3.40 | 0.07% | 44.4 |
| 5716001 | Rio Angostura En Valdivia De Paine | -3.61 | 0.03% | 316.9 |
| 5707002 | Rio Colorado Antes Junta Rio Maipo | -3.70 | 0.02% | 302.7 |
| 5705001 | Rio Colorado Antes Junta Rio Olivares | -7.78 | < 0.01% | 358.1 |
| 5748001 | Rio Maipo En Cabimbao | -4.44 | < 0.01% | 1795.2 |
| 5710001 | Rio Maipo En El Manzano | -3.39 | 0.07% | 898.4 |
| 5701001 | Rio Maipo En Las Hualtatas | -3.11 | 0.19% | 185.5 |
| 5704002 | Rio Maipo En San Alfonso | -3.44 | 0.06% | 92.8 |
| 5722002 | Rio Mapocho En Los Almendros | -4.77 | < 0.01% | 79.9 |
| 5737002 | Rio Mapocho Rinconada De Maipú | 0.75 | 45.36% | 86.2 |
| 5706001 | Rio Olivares Antes Junta Rio Colorado | -5.19 | < 0.01% | 198.0 |
| 5715001 | Rio Paine En Longitudinal | -2.06 | 3.92% | 33.3 |
| 5721016 | Rio San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca | -7.17 | < 0.01% | 9.4 |
| 5702001 | Rio Volcán En Queltehues | -2.60 | 0.92% | 495.3 |
| 5730005 | Zanjón De La Aguada Puente Particular | -6.44 | < 0.01% | 6.5 |

5.2. Analizar patrones espacio-temporales de las tendencias presentes en los caudales de la cuenca del río Maipo

5.2.1. Análisis de patrones espaciales

El análisis de patrones espaciales de los caudales medios anuales y sus tendencias para las 21 estaciones fluviométricas consistentes y significativas se realizó mediante la aplicación del algoritmo de k-medias. La Figura 15 muestra los resultados del método Elbow para el registro de caudales medios anuales (a) y sus tendencias (b), variando entre dos y siete grupos, donde el valor de la inercia disminuye con el aumento del número de clúster, alcanzando el menor valor cuando el número de clúster es cuatro y se mantiene constante a medida que aumenta la cantidad de conglomerados. Dado esto, se concluye que el número óptimo de clúster es cuatro para ambas variables.

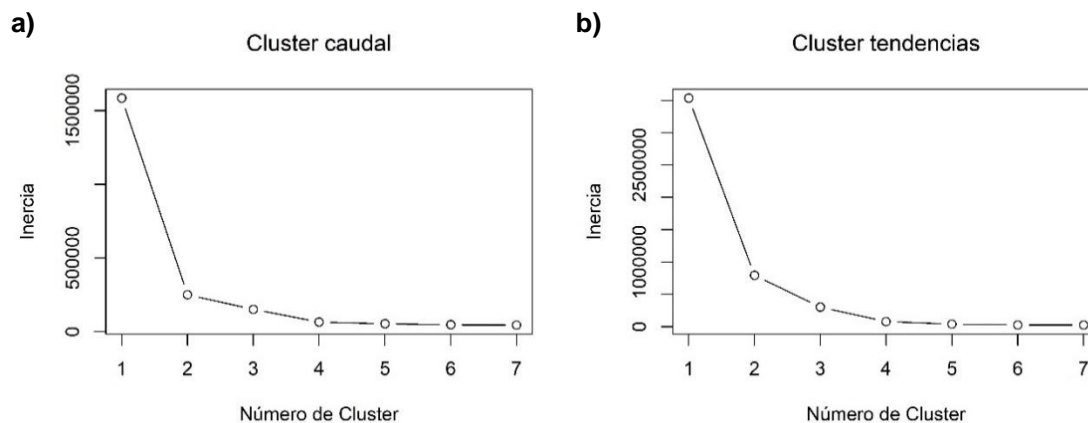


Figura 15. Método Elbow. (a) Caudal medio anual. (b) Tendencias.

La Figura 16 muestra los clústeres seleccionados por el método Elbow. Se aprecia para el registro fluviométrico medio anual (a), el primer grupo se encuentra distribuido tanto en la subcuenca Río Maipo Bajo y Maipo Alto. Lo mismo ocurre con el cuarto grupo, el cual se distribuye en la parte media y baja de la cuenca. Caso

contrario ocurre con las tendencias de caudal (b), donde el primer grupo se concentra en una estación correspondiente a la mayor tasa de disminución. Asimismo, el cuarto grupo se concentra en las subcuencas Río Maipo Medio y Alto, asociados a los principales ríos de la cuenca. (Maipo, Angostura, Colorado, Olivares y Volcán).

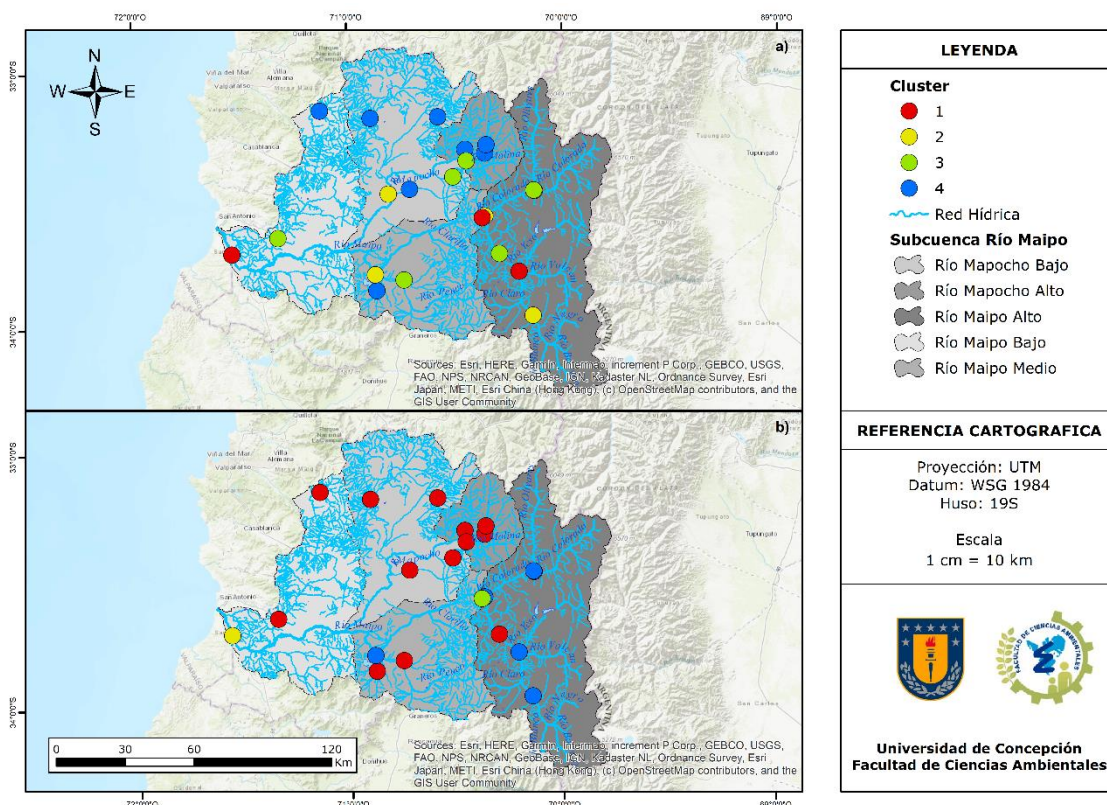


Figura 16. Análisis de clúster. (a) Caudal medio anual. (b) Tendencias.

La Tabla 6 muestra el número de estaciones, la estadística descriptiva y el orden de Strahler asociados a los clústeres identificados para el registro fluviométrico anual y las tendencias. Se aprecia en los clústeres del registro fluviométrico que en los grupos n°1, 2 y 3 están asociados a flujos de agua que presentan un orden de Strahler entre cuatro y cinco. Por otra parte, en los clústeres de las tendencias de caudal se observa que el grupo n°2 es el único que presenta orden 6 correspondiente a la estación aledaña a la desembocadura de la cuenca, mientras

que los grupos n°1 y 4 presentan una amplia variabilidad de cauces que presentan ordenes entre tres y cinco. Bajo estas características, se concluye que no se puede establecer un patrón espacial entre tendencias y caudales utilizando el análisis de clúster.

Tabla 6. Resumen de estadística descriptiva de los clústeres identificados.

| Caudal medio anual (m³/s) | | | | | |
|---|--------------------------------|------------|------------|-----------------------------|-----------------|
| Clúster | Estadística descriptiva | | | | Strahler |
| | n | Max | Min | \bar{x} | |
| 1 | 3 | 125.5 | 7.6 | 81.8 | 4, 5, 6 |
| 2 | 3 | 30.9 | 20.8 | 27.5 | 4, 5 |
| 3 | 7 | 75.5 | 0.3 | 17.2 | 2, 3, 4, 5 |
| 4 | 8 | 5.9 | 0.4 | 1.6 | 2, 3 |

| Tendencias (L/s año) | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------------|------------|------------|-----------------------------|-----------------|
| Clúster | Estadística descriptiva | | | | Strahler |
| | n | Max | Min | \bar{x} | |
| 1 | 13 | 92.8 | 6.5 | 33.0 | 2, 3, 4, 5 |
| 2 | 1 | 1795.2 | 1795.2 | 1795.2 | 6 |
| 3 | 1 | 898.4 | 898.4 | 898.4 | 5 |
| 4 | 6 | 495.3 | 185.5 | 309.4 | 3, 4, 5 |

5.2.2. Análisis de patrones temporales

Los resultados de la prueba de homogeneidad de Pettitt para las 21 estaciones consistentes se observan en la

Tabla 7. Se aprecia que existen cambios en las tendencias de caudal en diferentes años 1979, 1987, 1992, 1993, 2002, 2006, 2008 y 2009. Por otro lado, la estación Canal Colina en Peldehue no presentó un cambio en la tendencia (valor-p \geq 5%), indicando que la tendencia registrada se ha mantenido homogénea entre los años 1970 y 2019.

Tabla 7. Estadísticos de la prueba de Pettitt.

| Código estación | Nombre | Año | Valor-p |
|-----------------|---|-------------|--------------|
| 5735001 | Canal Colina En Peldehue | 2008 | 16.6% |
| 5722001 | Estero Arrayan En La Montosa | 2008 | 3.2% |
| 5716003 | Estero Pintue En Puente Pintue | 2002 | 0.1% |
| 5734001 | Estero Polpaico En Chicauma | 1992 | < 0.1% |
| 5741001 | Estero Puangue En Boquerón | 2006 | 0.3% |
| 5746001 | Estero Puangue En Ruta 78 | 1987 | 2.2% |
| 5721001 | Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco | 1993 | 0.9% |
| 5730008 | Quebrada Ramon En Recinto Emos | 1979 | 4.1% |
| 5716001 | Rio Angostura En Valdivia De Paine | 2006 | 0.1% |
| 5707002 | Rio Colorado Antes Junta Rio Maipo | 2006 | 0.1% |
| 5705001 | Rio Colorado Antes Junta Rio Olivares | 1993 | < 0.1% |
| 5748001 | Rio Maipo En Cabimbao | 2006 | 0.2% |
| 5710001 | Rio Maipo En El Manzano | 2006 | 1.1% |
| 5701001 | Rio Maipo En Las Hualtatas | 2006 | 3.0% |
| 5704002 | Rio Maipo En San Alfonso | 2006 | 0.2% |
| 5722002 | Rio Mapocho En Los Almendros | 2009 | 3.6% |
| 5706001 | Rio Olivares Antes Junta Rio Colorado | 1993 | < 0.1% |
| 5715001 | Rio Paine En Longitudinal | 2006 | 1.1% |
| 5721016 | Rio San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca | 1993 | < 0.1% |
| 5702001 | Rio Volcán En Queltehues | 2008 | 0.8% |
| 5730005 | Zanjón De La Aguada Puente Particular | 2002 | < 0.1% |

La Figura 17 muestra la distribución espacial de las estaciones que presentaron un cambio en la tendencia (a) y los años identificados por la prueba de Pettitt (b). Se aprecia que la estación que no presento variación en la tendencia observada se ubica en la subcuenca Río Mapocho Bajo. Por otra parte, se determinaron cambios de tendencia en 20 estaciones, de las cuales 11 ocurrieron entre los años 2006 y 2009 distribuidas en lo largo y ancho de la cuenca, lo cual puede ser atribuido a algún evento climático.

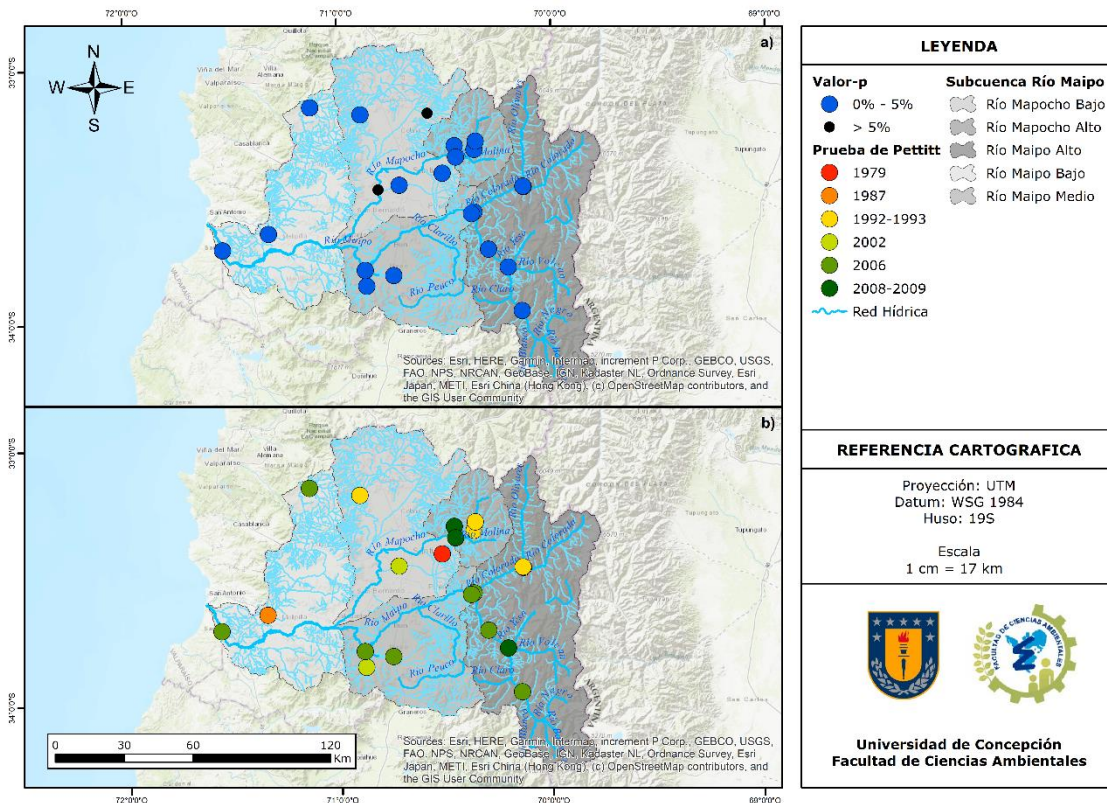


Figura 17. Prueba de Pettitt para el registro fluviométrico. (a) Resultado de la prueba. (b) Año del cambio de tendencia.

5.2.1.1. Cambios de tendencia por efectos climáticos

La variabilidad climática de la cuenca del río Maipo se encuentra modulada por las oscilaciones de El Niño o ENSO y la Oscilación decadal del Pacífico (PDO) (ver Figura 18), incidiendo fuertemente en la variabilidad de las precipitaciones y caudales (Núñez et al., 2013; Valdés-Pineda et al., 2018) y, por ende posiblemente en los cambios de las tendencias en diferentes zonas de la cuenca.

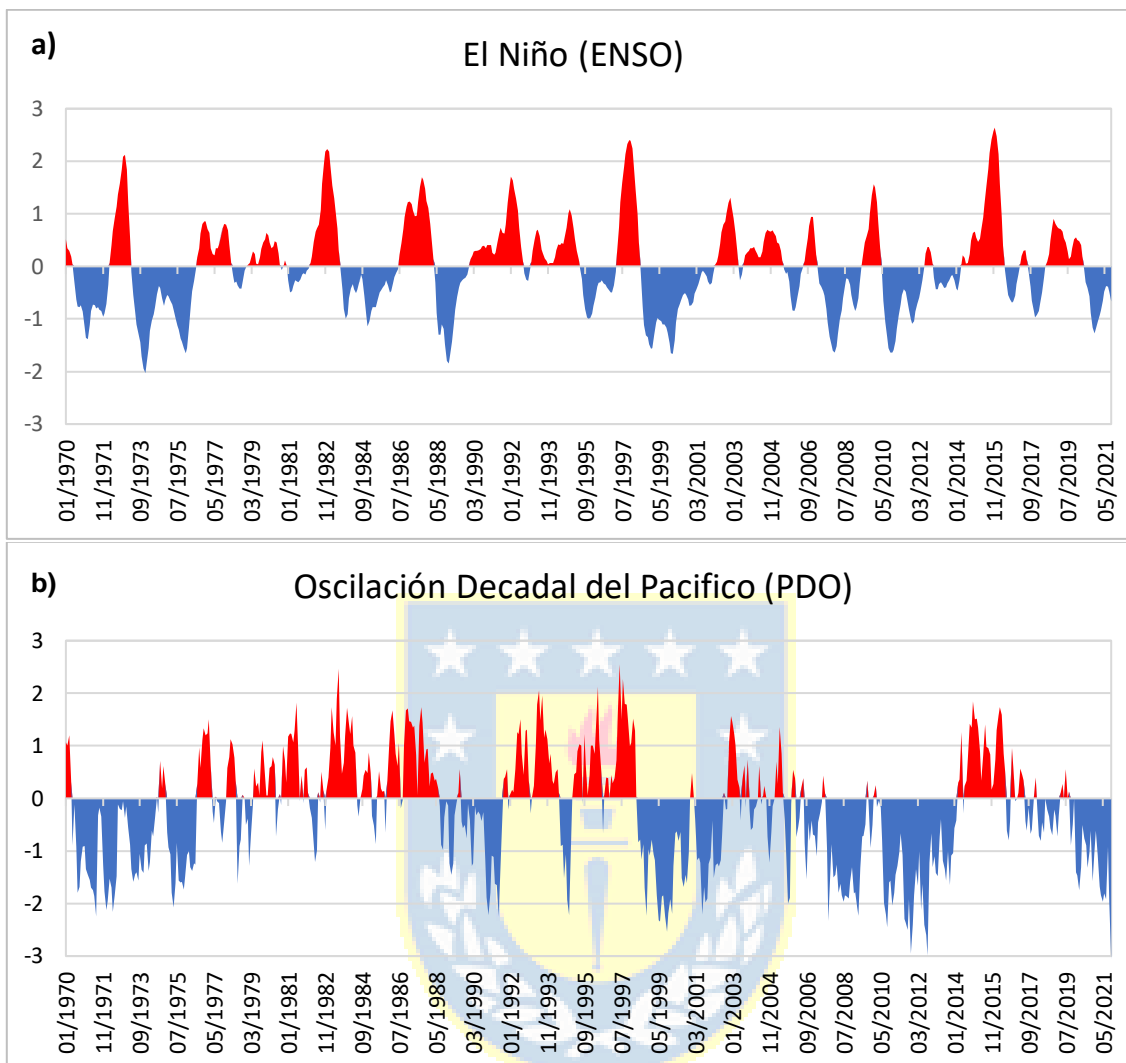


Figura 18. Índice de oscilación climática. (a) El Niño (ENSO). (b) Oscilación Decadal del Pacífico (PDO).

Fuente: NOAA, 2021.

La Figura 19 muestra la ubicación de la estación Estero Puangue en Ruta 78, ubicada a 9 km del río Maipo, la cual registro una tendencia negativa de caudal de 80 L/s año. De acuerdo con el análisis estadístico de la prueba de Pettitt (ver Figura 20), la estación presentó un cambio en la tendencia en el año 1987, el cual es atribuido por la variabilidad climática de la cuenca. En la Figura 18 se observa un periodo de fase fría para El Niño entre los años 1988 y 1990 mientras que para la

PDO entre los años 1988 y 1991, incidiendo en una disminución de las precipitaciones en la zona y por ende una disminución de caudal en la cuenca.

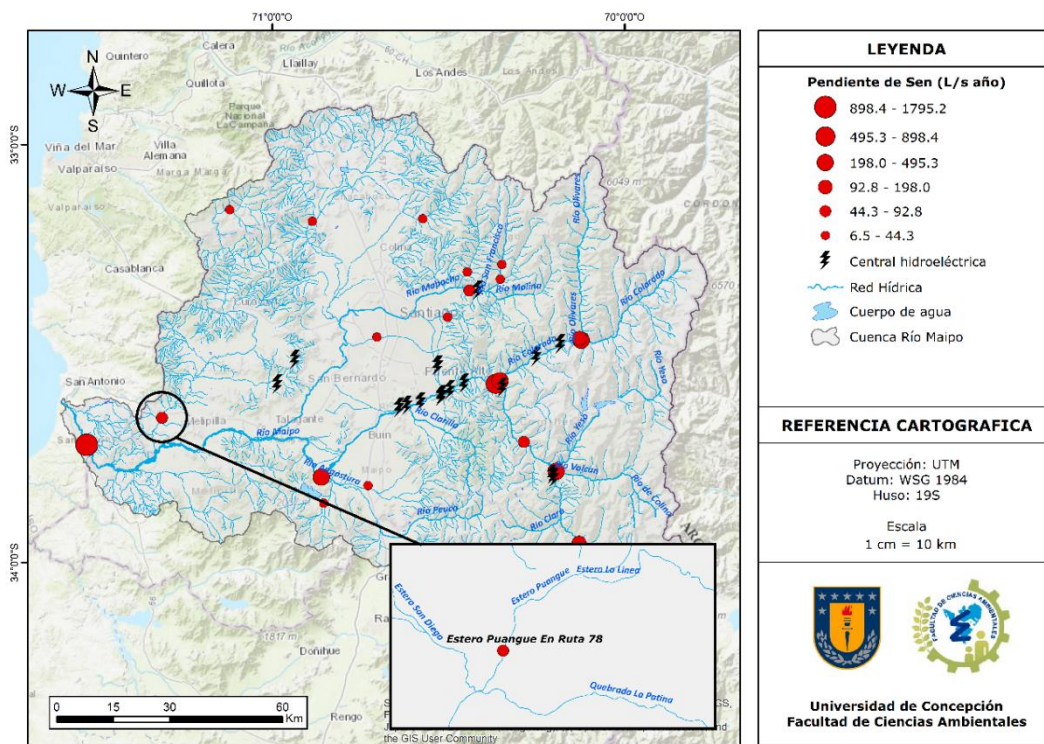


Figura 19. Estación fluviométrica: Estero Puangue en Ruta 78.

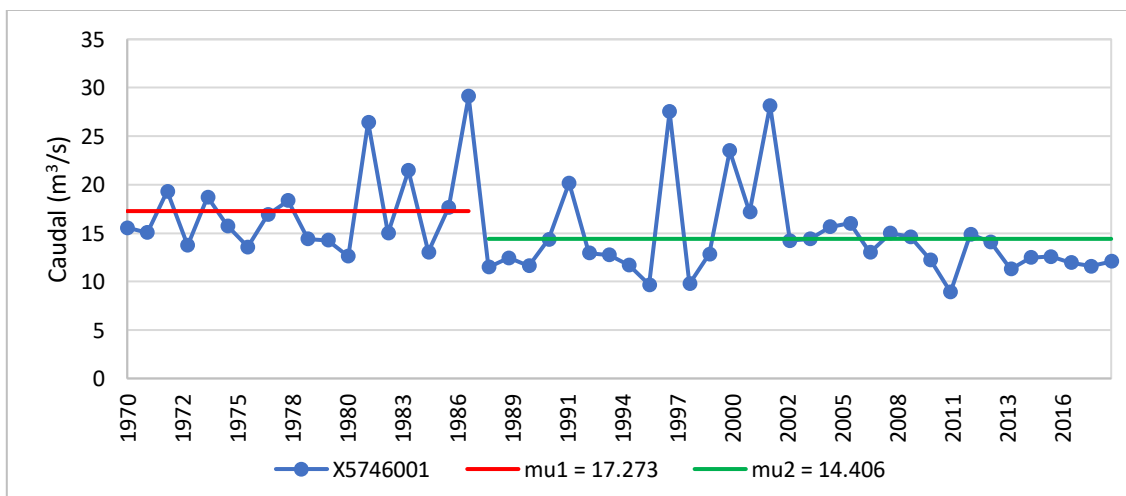


Figura 20. Prueba de Pettitt: Estero Puangue En Ruta 78.

Asimismo, se registró cambios en las tendencias en las estaciones fluviométricas Estero Arrayan en la Montosa, Estero Puangue en Boquerón, Río Angostura en Valdivia de Paine, Río Colorado antes junta Río Maipo, Río Maipo en Cabimbao, Río Maipo en el Manzano, Río Maipo en las Hualtatas, Río Maipo en San Alfonso, Río Mapocho en los Almendros, Río Paine en Longitudinal y Río Volcán en Queltehues durante el periodo 2006 – 2009, las cuales presentaron tendencias negativas de caudal variando entre 11.1 y 1795.2 L/s año. Se aprecia en la Figura 21 la no existencia de agrupación espacial de las estaciones que presentaron el cambio de tendencia en el periodo mencionado, lo que explicaría la razón de que el cambio se atribuye a un evento global.

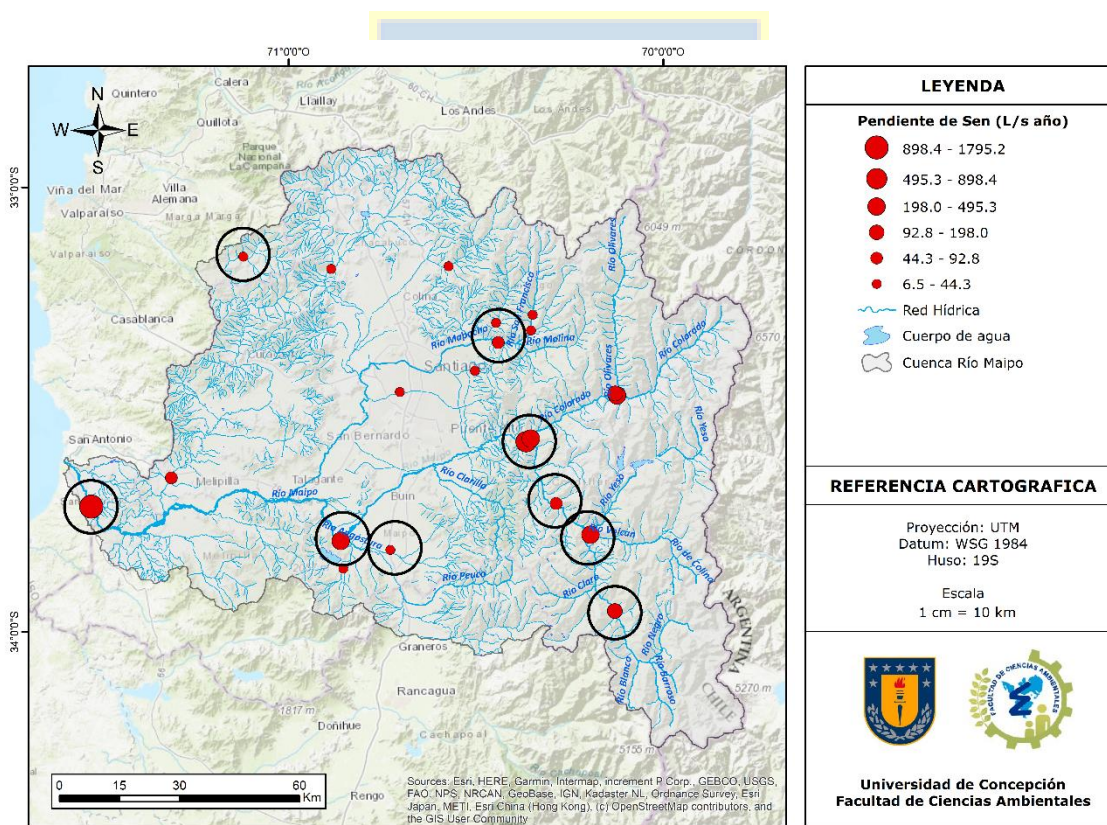


Figura 21. Localización estaciones fluviométricas con cambio de caudal entre 2006 – 2008.

De acuerdo con el análisis estadístico de la Prueba de Pettitt, las estaciones ubicadas en el río Maipo (ver Figura 22) presentaron una disminución de caudal variando entre 3.9 y 79.1 m³/s, mientras que la estación ubicada en el río Mapocho (ver Figura 23) presentó un cambio de 3.8 m³/s. El río Angostura y Volcán presentaron una disminución del régimen hídrico de 13.9 y 30.2 m³/s respectivamente (ver Figura 24). Se aprecia en los cuatro ríos mencionados un patrón de caudal similar a partir de los años 2006 y 2008, lo cual se puede atribuir a un evento común de escala global.

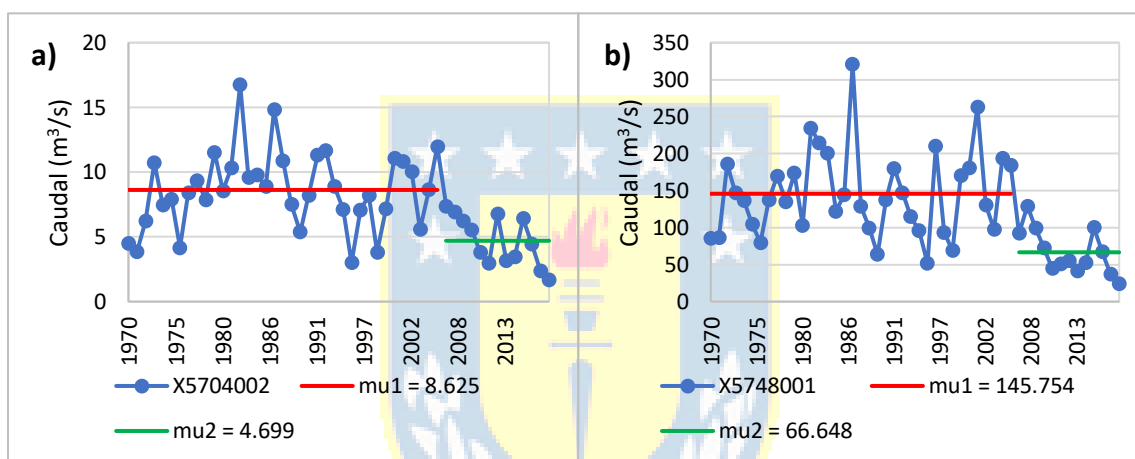


Figura 22. Prueba de Pettitt. (a) Río Maipo En San Alfonso. (b) Río Maipo En Cabimbao.

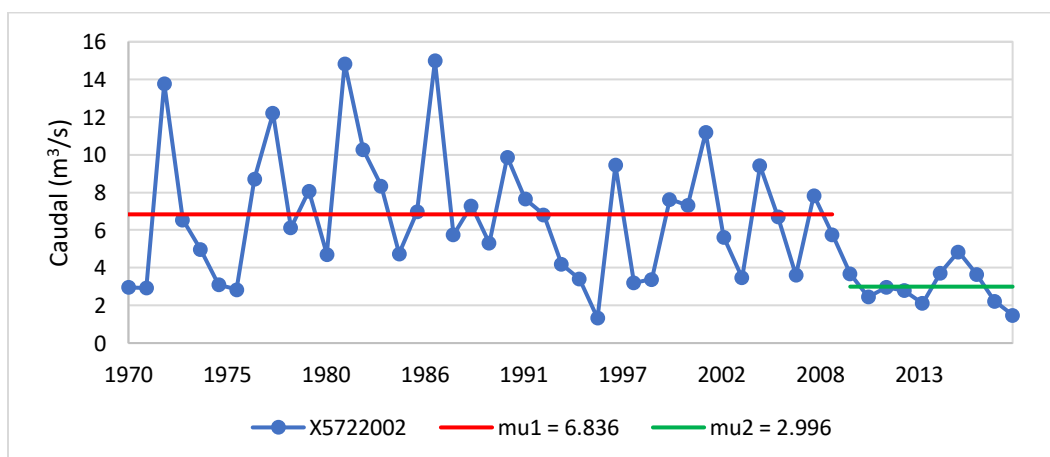


Figura 23. Prueba de Pettitt: Río Mapocho En Los Almendros.

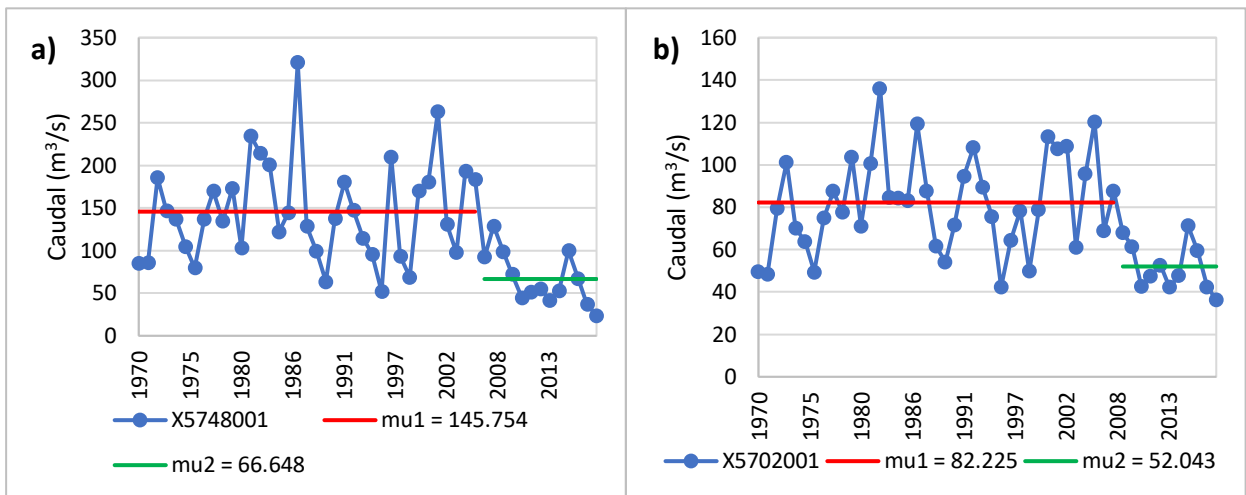


Figura 24. Prueba de Pettitt. (a) Río Angostura En Valdivia De Paine. (b) Río Volcán En Queltehue.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis estadístico de Pettitt, los patrones de comportamiento de caudal y la amplia distribución geográfica de las estaciones fluviométricas que presentaron un salto de caudal durante los años 2006 – 2008, un evento descartado corresponde la instalación de las centrales hidroeléctricas de pasada aledañas y el impacto sinérgico generado por la operación de estas, dado que no se evidencia un cambio importante en el registro fluviométrico durante los años que comenzaron a operar las centrales. No obstante, para la estación Río Maipo En El Manzano (Figura 25) se observa una leve variación de caudal entre los años 2008 y 2011, por lo que se puede atribuir a la construcción y operación de la central hidroeléctrica aledaña (C.H. Guayacán) ubicada a 2.1 kilómetros de la estación, la cual comenzó a operar el año 2010. (Figura Anexo 3).

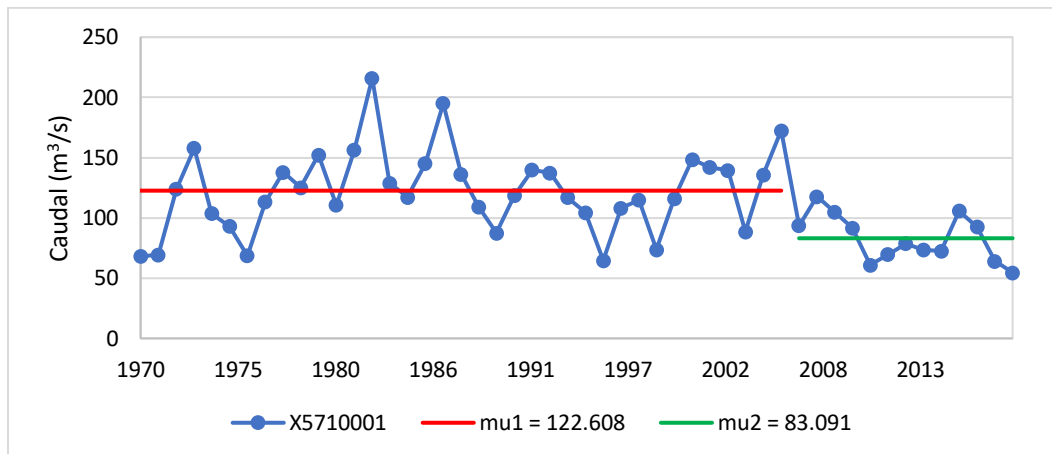


Figura 25. Prueba de Pettitt: Río Maipo En El Manzano.

Un posible evento a escala global que podría haber variado el régimen hidrológico corresponde a las oscilaciones climáticas moduladas en la cuenca del río Maipo. Analizando sus índices climáticos (Figura 18), se aprecia en el año 2006 el comienzo de una fase fría para ambas oscilaciones climáticas, donde se evidencia una disminución de las precipitaciones en la cuenca, influyendo en la disminución de caudal.

5.2.1.2. Cambios de tendencia por efectos antropogénicos

Se registró un cambio de tendencia por efectos antropogénicos en las estaciones fluviométricas Río Colorado Antes Junta Río Olivares y Río Olivares Antes Junta Río Colorado (ver Figura 26), las cuales presentaron una tendencia anual de 358.1 L/s y 198 L/s respectivamente. Se aprecia la localización de una central hidroeléctrica a 5 km de las estaciones, correspondiente a la Central Hidroeléctrica de Pasada Alfalfal, con fecha de operación en 1991. De acuerdo con el análisis estadístico de la Prueba de Pettitt (ver Figura 27), la estación ubicada en el río Colorado presentó una disminución de caudal de 11.36 m³/s, mientras que la estación ubicada en el río Olivares presentó un cambio de 7.42 m³/s, ambas identificadas el año 1993.

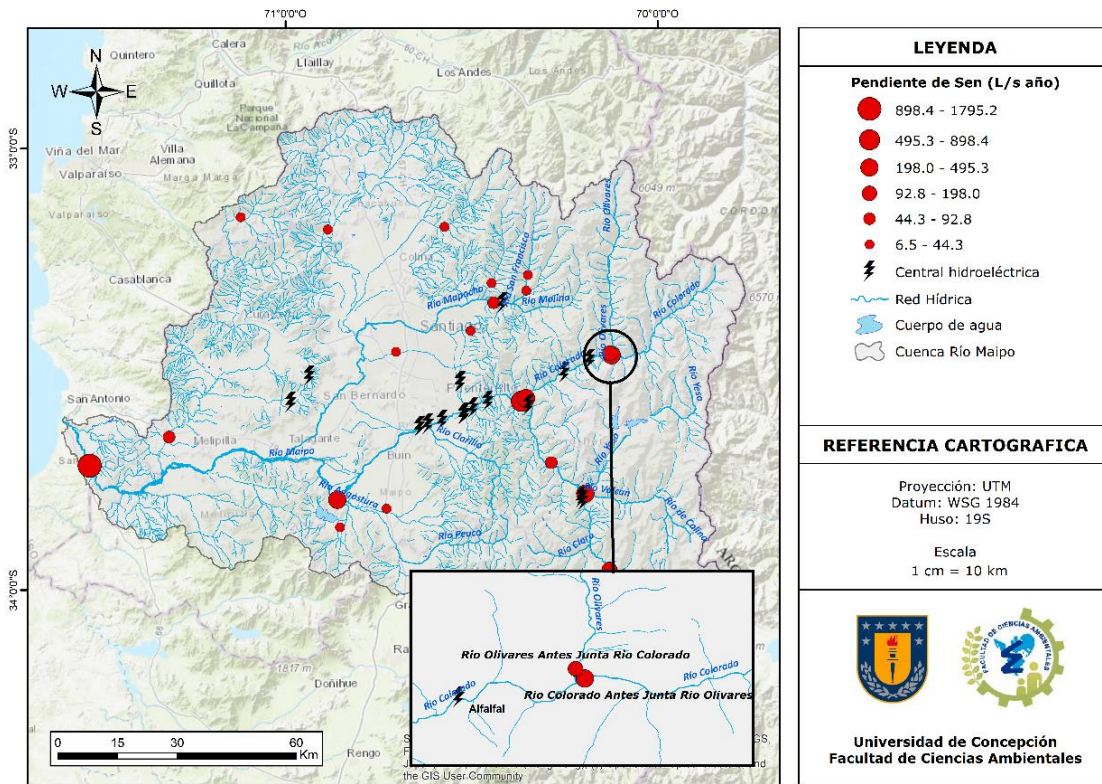


Figura 26. Localización estaciones fluviométricas: Río Colorado Antes Junta Río Olivares y Río Olivares Antes Junta Río Colorado.

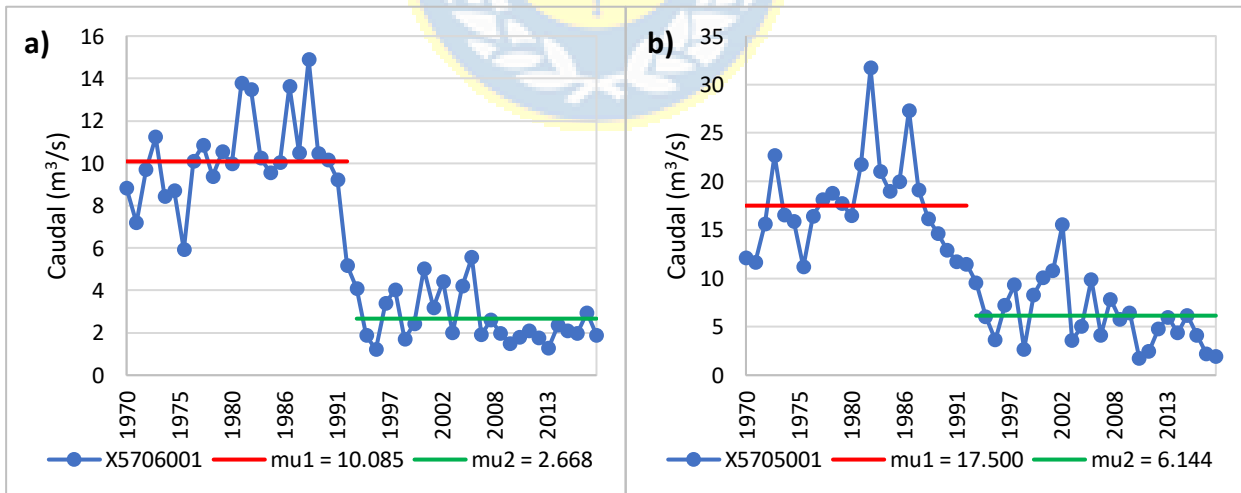


Figura 27. Prueba de Pettitt. (a) Río Colorado Antes Junta Río Olivares. (b) Río Olivares Antes Junta Río Colorado.

El año de cambio del régimen hídrico en las estaciones mencionadas podría tener relación con el inicio de operación de la central hidroeléctrica Alfalfal. A pesar de presentar dos años de diferencia entre el año de inicio de operación de la central y el año de cambio de caudal para las estaciones ubicadas en los ríos Colorado y Olivares, el impacto ambiental de la generación hidroeléctrica asociado al cambio del régimen hidrológico y mecánica fluvial del río ocurre desde la etapa de construcción de la central, siendo un impacto irreversible e instantáneo. (Ordoñez, 2011). Además, se aprecia para la estación Río Colorado Antes Junta Río Olivares una progresiva disminución de caudal a partir de 1989 hasta 1996, lo cual podría estar asociado el período de construcción de la central. Es importante mencionar que la central hidroeléctrica se ubica a 5 km aguas debajo de las estaciones, sin embargo, la Figura 28 muestra que la ubicación de las bocatoma se localizan aguas arriba de las estaciones fluviométricas en los ríos Olivares y Colorado, lo cual podría ser la principal razón del cambio del régimen hidrológico en los ríos el año 1993.

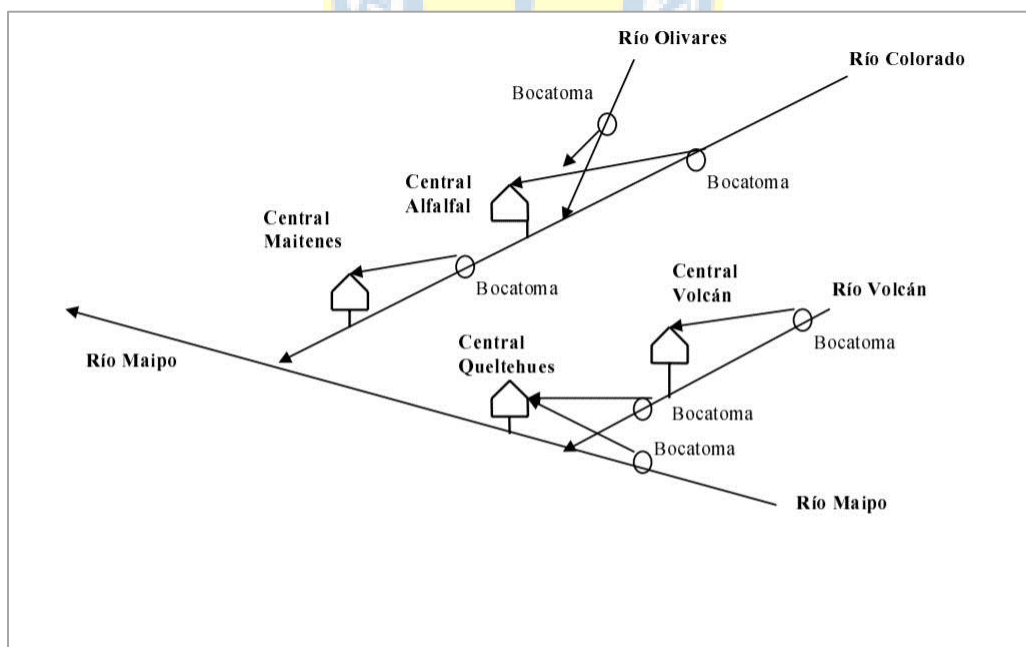


Figura 28. Esquema Central Hidroeléctrica Alfalfal.

Fuente: Minder (1997).

5.2.1.3. Cambios de tendencia no posible de identificar su causa

De las 21 estaciones fluviométricas que presentaron cambios de tendencia, en 6 no se encontraron causas climáticas ni antropogénicas que expliquen el cambio. Dichas estaciones presentaron cambios de tendencia en los años 1979, 1992, 1993 y 2002 en las estaciones Quebrada Ramón en Recinto Emos (Figura 29), Estero Polpaico en Chicauma (Figura 30), Estero Yerba Loca antes junta San Francisco y Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca (Figura 31), Estero Pintue en Puente Pintue y Zanjón de la Aguada Puente Particular respectivamente (Figura 32).

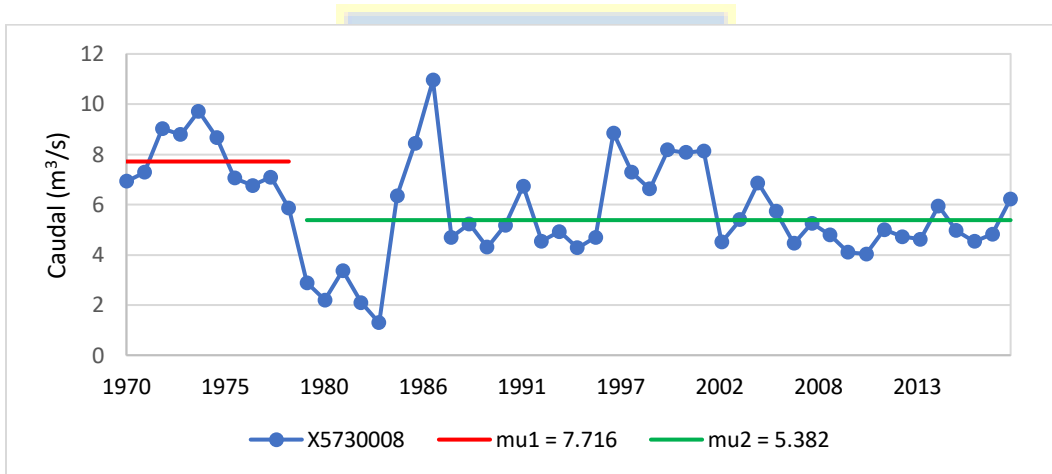


Figura 29. Prueba de Pettitt: Quebrada Ramon en Recinto Emos.

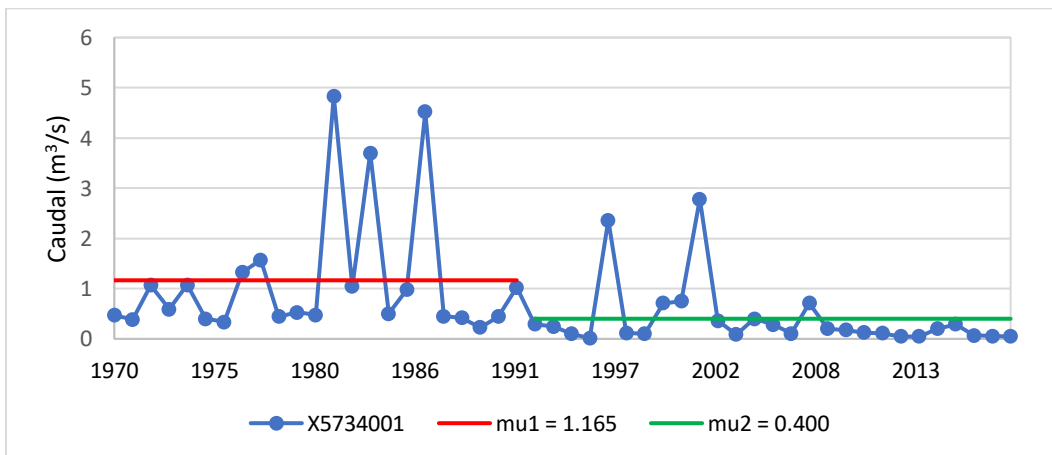


Figura 30. Prueba de Pettitt: Estero Polpaico en Chicauma.

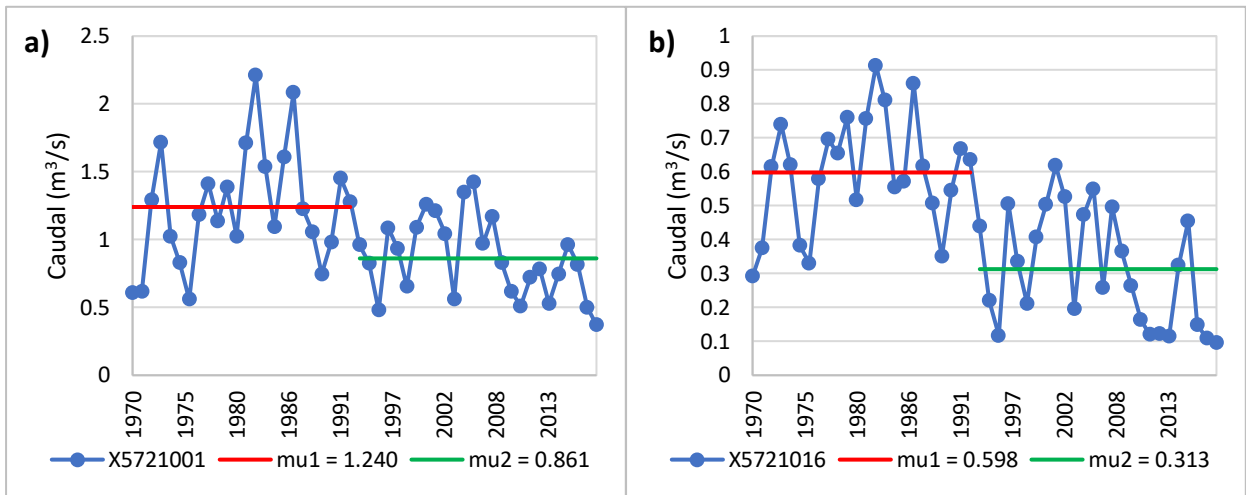


Figura 31. Prueba de Pettitt. (a) Estero Yerba Loca antes junta San Francisco. (b) Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca.

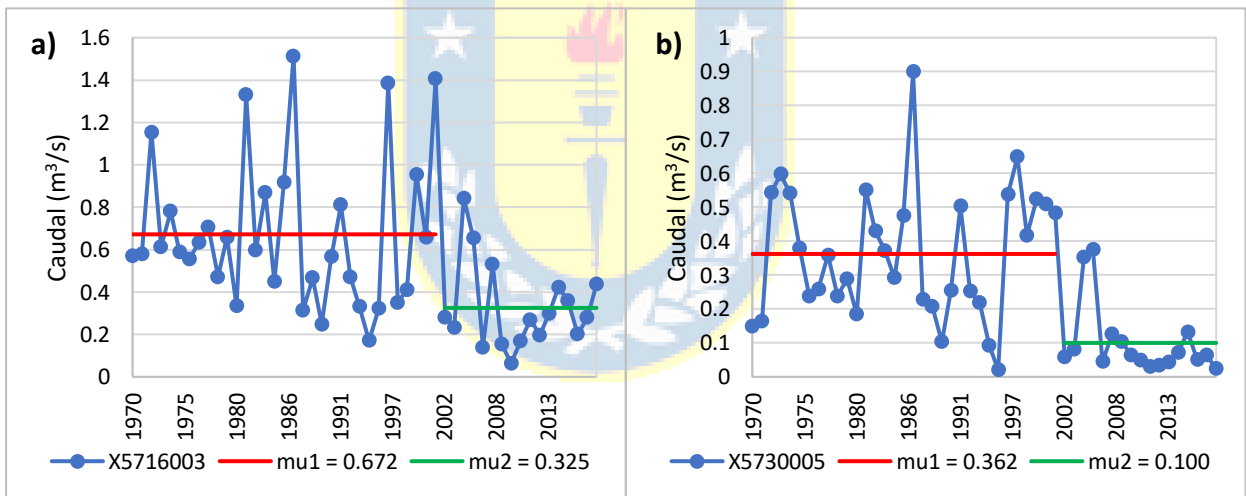


Figura 32. Prueba de Pettitt. (a) Estero Pintue en Puente Pintue. (b) Zanjón de la Aguada Puente Particular.

5.3. Determinación de los efectos de las tendencias sobre la disponibilidad de agua para la Región Metropolitana

De acuerdo con la información entregada por la Dirección General de Aguas (2021a) con fecha al 26 de agosto del presente año, se registraron 2.170 derechos de aprovechamiento de aguas superficiales otorgados en la Región Metropolitana, de los cuales 659 fueron considerados para el presente estudio. La Figura 33 muestra la localización de los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales en la cuenca del río Maipo. Se observa claramente una amplia distribución de los derechos de aguas en cada cuenca de estación fluviométrica del río Maipo, sin embargo, las estaciones Estero Puangue en Boquerón y Quebrada Ramón en Recinto Emos no registraron derechos de aguas asociados a sus cuencas.

La Tabla 8 presenta los volúmenes de extracción de derechos de aguas superficiales asociados a las cuencas de las estaciones fluviométricas que presentaron tendencias de caudal significativas. Se observa que las estaciones ubicadas en el Río Maipo presentaron los volúmenes de extracción más altos, siendo la estación Río Maipo en Cabimbao la que presenta la mayor demanda hídrica de 947.9 m³/s equivalente a 30.1 MMm³/año. Por otra parte, las estaciones ubicadas en canales, esteros y quebradas presentaron los volúmenes de extracción más bajos, variando entre 0.1 (Estero Polpaico en Chicauma) y 3.5 m³/s (Canal Colina en Peldehue).

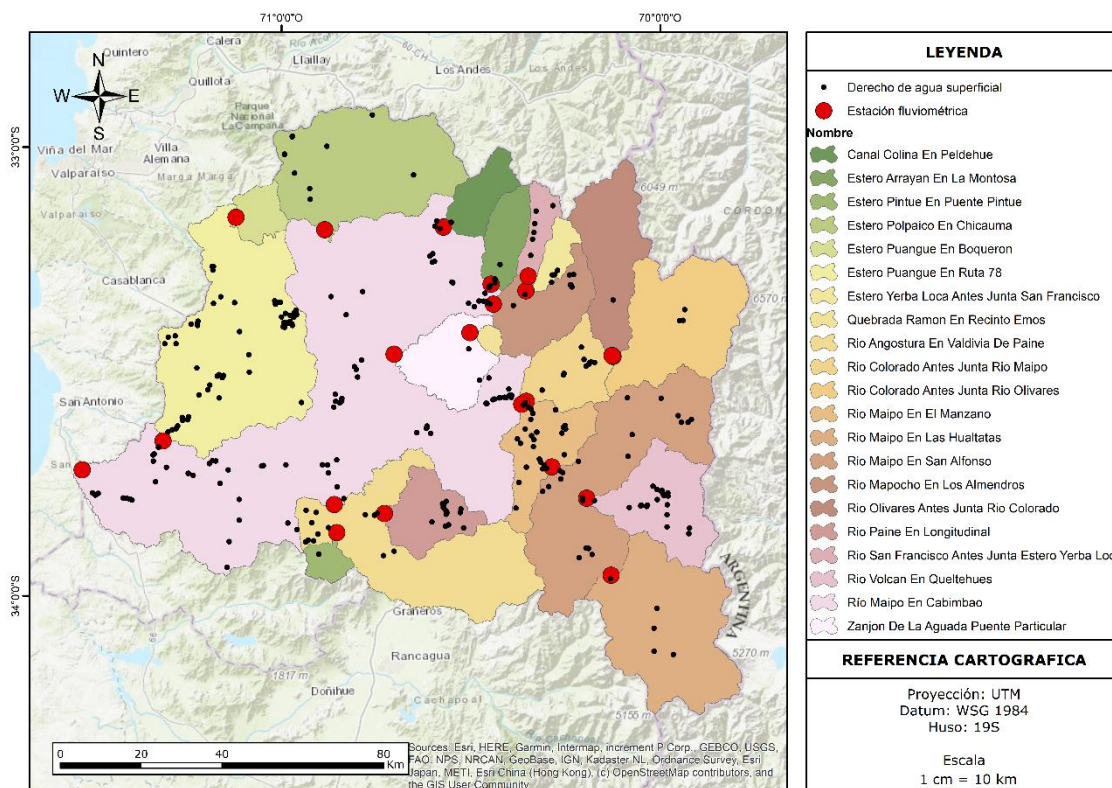


Figura 33. Derechos de aprovechamiento de aguas superficiales otorgados.

Tabla 8. Volumen de extracción de derechos de aprovechamientos de aguas superficiales asociados a cuencas fluviométricas.

| Código estación | Nombre | Demanda (m ³ /s) |
|-----------------|---|-----------------------------|
| 5735001 | Canal Colina En Peldehue | 3.5 |
| 5722001 | Estero Arrayan En La Montosa | 3.1 |
| 5716003 | Estero Pintue En Puente Pintue | 0.1 |
| 5734001 | Estero Polpaico En Chicauma | 0.1 |
| 5741001 | Estero Puangue En Boquerón | NA* |
| 5746001 | Estero Puangue En Ruta 78 | 1.7 |
| 5721001 | Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco | 0.1 |
| 5730008 | Quebrada Ramon En Recinto Emos | NA* |
| 5716001 | Rio Angostura En Valdivia De Paine | 0.8 |
| 5707002 | Rio Colorado Antes Junta Rio Maipo | 72.1 |
| 5705001 | Rio Colorado Antes Junta Rio Olivares | 9.0 |
| 5748001 | Rio Maipo En Cabimbao | 947.9 |
| 5710001 | Rio Maipo En El Manzano | 853.9 |
| 5701001 | Rio Maipo En Las Hualtatas | 30.6 |

| | | |
|----------------|---|----------|
| 5704002 | Rio Maipo En San Alfonso | 559.6 |
| 5722002 | Rio Mapocho En Los Almendros | 6.5 |
| 5706001 | Rio Olivares Antes Junta Rio Colorado | 8.5 |
| 5715001 | Rio Paine En Longitudinal | 0.5 |
| 5721016 | Rio San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca | 0.8 |
| 5702001 | Rio Volcán En Queltehues | 49.5 |
| 5730005 | Zanjón De La Aguada Puente Particular | 5.8.E-04 |

**NA: No registraron derechos de agua asociados a su cuenca fluviométrica.*

Los resultados de la oferta hídrica actual y esperada para los años 2030, 2040 y 2050 de cada estación fluviométrica consistente se presenta en la Tabla 9, mientras que los porcentajes de reducción de caudal esperado para el año 2050 se muestran en la Figura 34. De manera análoga con la demanda hídrica, las estaciones fluviométricas que presentan una mayor magnitud de caudal medio anual se localizan en el río Maipo, seguido por los ríos Mapocho, Colorado y Angostura. Por otra parte, las estaciones que presentaron una magnitud menor de caudal medio anual se localizan principalmente en esteros, quebradas y pequeños ríos. Este resultado es consistente con el registro del Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (2021) durante el período de estudio, observado en la Tabla Anexo 4.

Tabla 9. Oferta hídrica actual y esperada para 2030, 2040 y 2050.

| Código estación | Nombre | Actual | 2030 | 2040 | 2050 |
|------------------------|--|---------------|-------------|-------------|-------------|
| 5735001 | Canal Colina En Peldehue | 1.8 | 1.7 | 1.5 | 1.3 |
| 5722001 | Esteros Arrayan En La Montosa | 1.5 | 1.3 | 1.1 | 0.9 |
| 5716003 | Esteros Pintue En Puente Pintue | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 |
| 5734001 | Esteros Polpaico En Chicauma | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 0.4 |
| 5741001 | Esteros Puangue En Boquerón | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 |
| 5746001 | Esteros Puangue En Ruta 78 | 15.5 | 14.7 | 13.9 | 13.1 |
| 5721001 | Esteros Yerba Loca Antes Junta San Francisco | 1.0 | 0.9 | 0.8 | 0.7 |
| 5730008 | Quebrada Ramon En Recinto Emos | 0.3 | -0.2 | -0.6 | -1.1 |
| 5716001 | Rio Angostura En Valdivia De Paine | 20.8 | 17.6 | 14.5 | 11.3 |
| 5707002 | Rio Colorado Antes Junta Rio Maipo | 30.9 | 27.9 | 24.8 | 21.8 |
| 5705001 | Rio Colorado Antes Junta Rio Olivares | 11.6 | 8.0 | 4.4 | 0.8 |
| 5748001 | Rio Maipo En Cabimbao | 125.5 | 107.5 | 89.6 | 71.6 |
| 5710001 | Rio Maipo En El Manzano | 112.2 | 103.2 | 94.3 | 85.3 |

| | | | | | |
|----------------|---|------|------|------|------|
| 5701001 | Rio Maipo En Las Hualtatas | 30.8 | 28.9 | 27.1 | 25.2 |
| 5704002 | Rio Maipo En San Alfonso | 75.5 | 74.6 | 73.7 | 72.8 |
| 5722002 | Rio Mapocho En Los Almendros | 6.1 | 5.3 | 4.5 | 3.7 |
| 5706001 | Rio Olivares Antes Junta Rio Colorado | 6.2 | 4.2 | 2.2 | 0.3 |
| 5715001 | Rio Paine En Longitudinal | 5.2 | 4.8 | 4.5 | 4.2 |
| 5721016 | Rio San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.2 |
| 5702001 | Rio Volcán En Quelltehues | 7.6 | 2.6 | -2.3 | -7.3 |
| 5730005 | Zanjón De La Aguada Puente Particular | 5.9 | 5.8 | 5.7 | 5.7 |

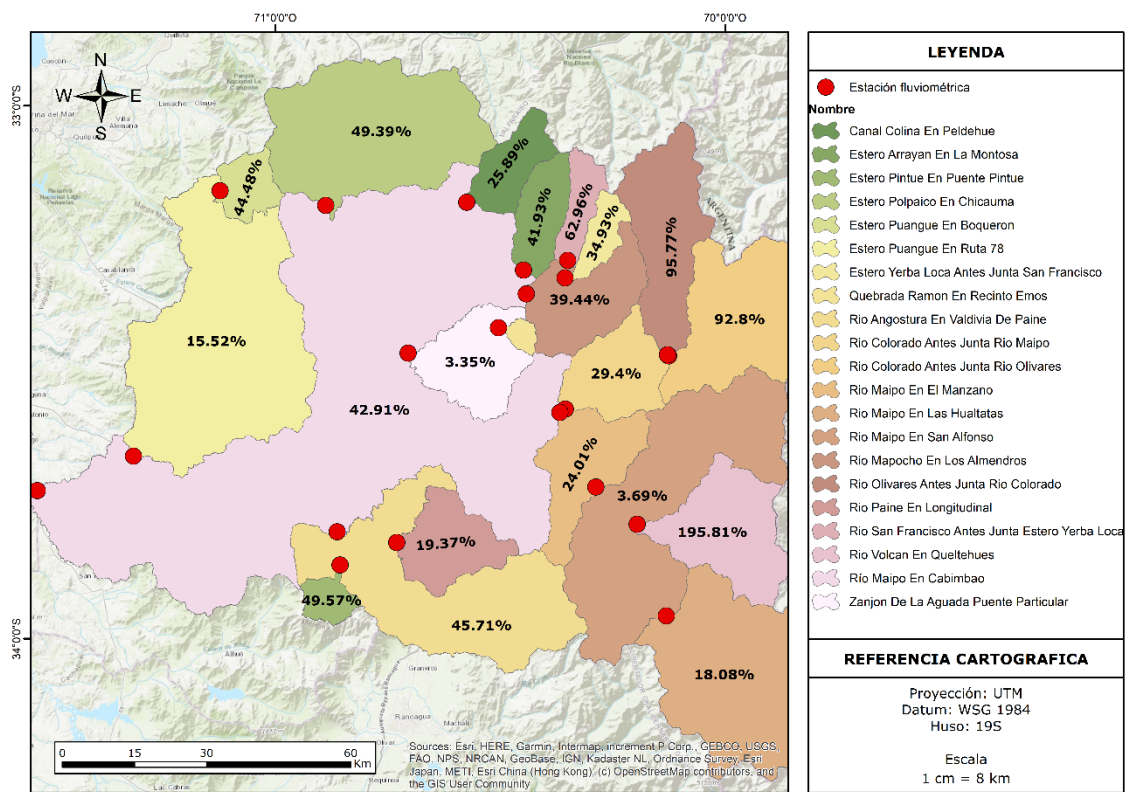


Figura 34. Porcentaje de reducción de caudal esperado para 2050.

Debido al régimen nivo-pluvial presente en la cuenca del río Maipo, se espera que las tendencias de caudal tengan un efecto diferente sobre el caudal medio anual en la cuenca alta, media y baja, los cuales dependerán del aporte hídrico mediante precipitaciones y almacenamiento de nieve en la cordillera. Se aprecia una importante reducción de caudal para el año 2050 en todas las estaciones fluviométricas de la cuenca del río Maipo, siendo la estación Quebrada Ramón En

Recinto Emos y Río Volcán en Queltehues las que presentan una mayor reducción de -486.3% y -195.8% respectivamente, esto quiere decir, que en dichas estaciones existiría una sobreexplotación del recurso hídrico, no pudiendo abastecer los actuales derechos de aguas entregados debido a la disminución esperada de la oferta hídrica. Las estaciones localizadas en la cuenca alta del río Maipo presentaran importantes reducciones de caudal, el cual se puede atribuir al aumento de la isoterma 0°C previsto para el período 2046 – 2065, incidiendo en la reducción de los depósitos de aguanieve en la Cordillera de los Andes, haciendo que las precipitaciones en la época invernal escurran rápidamente hacia la desembocadura. (Universidad de Chile, 2006; INFODEP, 2016).

Los resultados obtenidos del balance hídrico actual para la cuenca del río Maipo se muestra en la Tabla 10 y la distribución espacial en la Figura 35. En términos generales, se observa que en gran parte de la cuenca se presenta un balance hídrico positivo, indicando que los tramos de ríos y esteros son capaces de satisfacer la demanda hídrica en la zona. Sin embargo, en la parte alta de cuenca se aprecia un balance hídrico negativo en ocho estaciones fluviométricas, asociadas a la disminución de los aportes de aguanieve y la sobredemanda hídrica presente. El río mayormente comprometido por esa sobredemanda de recursos corresponde al río Maipo, alcanzando un déficit hídrico de 403.9 m³/s en la estación Río Maipo en San Alfonso. Los principales usos de agua que se ven potencialmente afectados por el déficit hídrico en la parte alta de la cuenca son energía hidroeléctrica (52%), riego (12%) y agua potable (7%). Por otro lado, se aprecian tres estaciones localizadas en la parte alta de la cuenca correspondiente a las estaciones Río Maipo en las Hualtatas, Río Colorado antes junta Río Olivares y Estero Yerba Loca antes junta San Francisco, las cuales presentaron un balance hídrico positivo de 0.17, 2.57 y 0.98 m³/s respectivamente, siendo concordantes con la cantidad y magnitud de los derechos de aguas superficiales asociados a sus cuencas.

Tabla 10. Balance hídrico actual (2019) de cada estación fluviométrica.

| Código estación | Nombre | Balance hídrico (m³/s) |
|------------------------|---|--|
| 5735001 | Canal Colina En Peldehue | -1.64 |
| 5722001 | Estero Arrayan En La Montosa | -1.60 |
| 5716003 | Estero Pintue En Puente Pintue | 0.47 |
| 5734001 | Estero Polpaico En Chicauma | 0.70 |
| 5741001 | Estero Puangue En Boquerón | NA* |
| 5746001 | Estero Puangue En Ruta 78 | 13.80 |
| 5721001 | Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco | 0.98 |
| 5730008 | Quebrada Ramon En Recinto Emos | NA* |
| 5716001 | Rio Angostura En Valdivia De Paine | 20.56 |
| 5707002 | Rio Colorado Antes Junta Rio Maipo | -23.69 |
| 5705001 | Rio Colorado Antes Junta Rio Olivares | 2.57 |
| 5748001 | Rio Maipo En Cabimbao | 47.15 |
| 5710001 | Rio Maipo En El Manzano | -110.04 |
| 5701001 | Rio Maipo En Las Hualtatas | 0.17 |
| 5704002 | Rio Maipo En San Alfonso | -403.94 |
| 5722002 | Rio Mapocho En Los Almendros | 0.45 |
| 5706001 | Rio Olivares Antes Junta Rio Colorado | -2.28 |
| 5715001 | Rio Paine En Longitudinal | 4.70 |
| 5721016 | Rio San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca | -0.38 |
| 5702001 | Rio Volcán En Queltehues | -41.92 |
| 5730005 | Zanjón De La Aguada Puente Particular | 5.86 |

*NA: No registraron derechos de agua asociados a su cuenca fluviométrica.

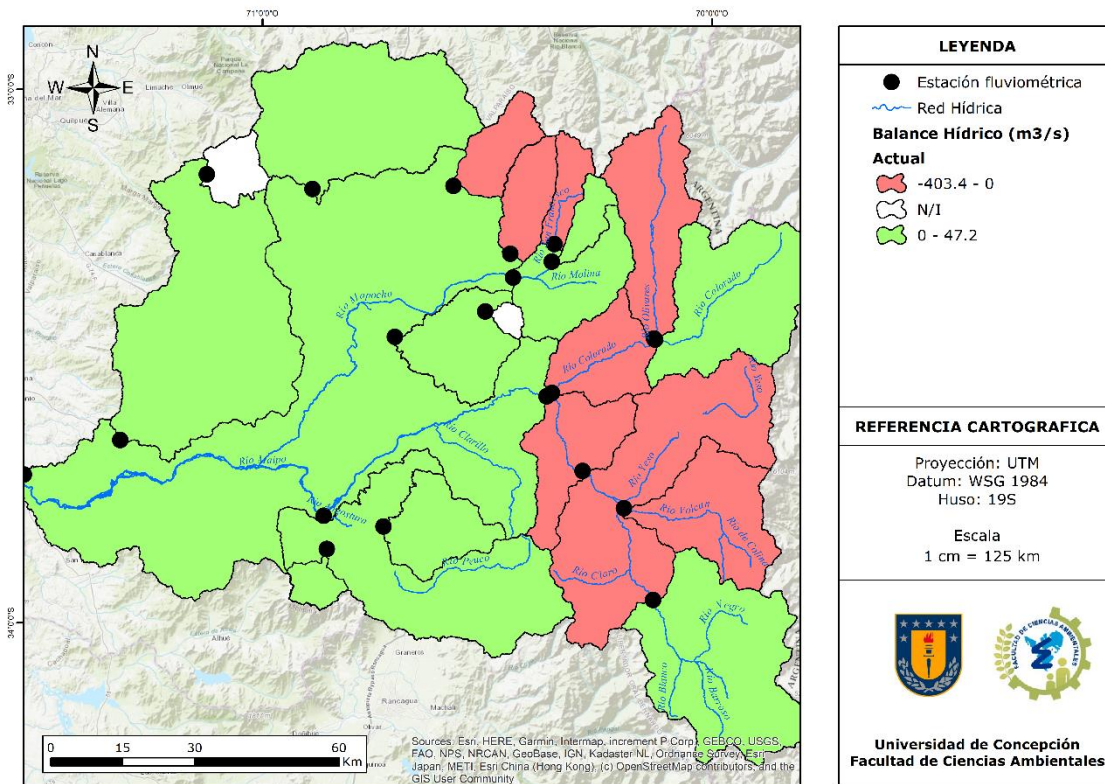


Figura 35. Balance hídrico actual (2019) de la cuenca del río Maipo.

Producto de la disminución de caudal medio anual esperado para el año 2050, se observa una disminución del balance hídrico en general para las 21 estaciones fluviométricas (ver Tabla 11 y Figura 36). Se presenta, al igual que el balance actual, un importante déficit hídrico en la parte alta de la cuenca, principalmente en los ríos Maipo (-406.7 m³/s), Volcán (56.8 m³/s) y Colorado (-32.8 m³/s). Por otro lado, las estaciones que presentan mayores efectos de las tendencias sobre su disponibilidad hídrica en la parte alta de la cuenca son Río Colorado antes junta Río Olivares y Río Maipo en las Hualtatas, presentando una reducción del 419% y 3258% respectivamente. Asimismo, en la parte baja de la cuenca la estación Río Maipo en Cabimbao presentó una reducción del balance hídrico en un 114%, el cual se puede relacionar con las proyecciones en la precipitación para las zonas costeras, alcanzando importantes descensos entre las regiones de Valparaíso y Biobío. Se espera para la zona costera de la Región Metropolitana una reducción

en las precipitaciones, variando entre 16.2% y 50% para el año 2050 (INFODEP, 2016). Los resultados del balance hídrico esperado para los años 2030 y 2040 se presentan en la Tabla Anexo 5, mientras que la distribución espacial del balance en las Figura Anexo 6 y Figura Anexo 7.

Tabla 11. Balance hídrico esperado (2050) de cada estación fluviométrica.

| Código estación | Nombre | Balance hídrico (m³/s) | Porcentaje de reducción (%) |
|------------------------|---|--|------------------------------------|
| 5735001 | Canal Colina En Peldehue | -2.11 | 29% |
| 5722001 | Estero Arrayan En La Montosa | -2.24 | 40% |
| 5716003 | Estero Pintue En Puente Pintue | 0.20 | 59% |
| 5734001 | Estero Polpaico En Chicauma | 0.33 | 53% |
| 5741001 | Estero Puangue En Boquerón | NA* | NA* |
| 5746001 | Estero Puangue En Ruta 78 | 11.40 | 17% |
| 5721001 | Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco | 0.62 | 37% |
| 5730008 | Quebrada Ramon En Recinto Emos | NA* | NA* |
| 5716001 | Rio Angostura En Valdivia De Paine | 11.05 | 46% |
| 5707002 | Rio Colorado Antes Junta Rio Maipo | -32.77 | 38% |
| 5705001 | Rio Colorado Antes Junta Rio Olivares | -8.18 | 419% |
| 5748001 | Rio Maipo En Cabimbao | -6.70 | 114% |
| 5710001 | Rio Maipo En El Manzano | -136.99 | 24% |
| 5701001 | Rio Maipo En Las Hualtatas | -5.39 | 3258% |
| 5704002 | Rio Maipo En San Alfonso | -406.72 | 1% |
| 5722002 | Rio Mapocho En Los Almendros | -1.95 | 532% |
| 5706001 | Rio Olivares Antes Junta Rio Colorado | -8.21 | 261% |
| 5715001 | Rio Paine En Longitudinal | 3.70 | 21% |
| 5721016 | Rio San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca | -0.66 | 74% |
| 5702001 | Rio Volcán En Queltehues | -56.78 | 35% |
| 5730005 | Zanjón De La Aguada Puente Particular | 5.66 | 3% |

*NA: No registraron derechos de agua asociados a su cuenca fluviométrica.

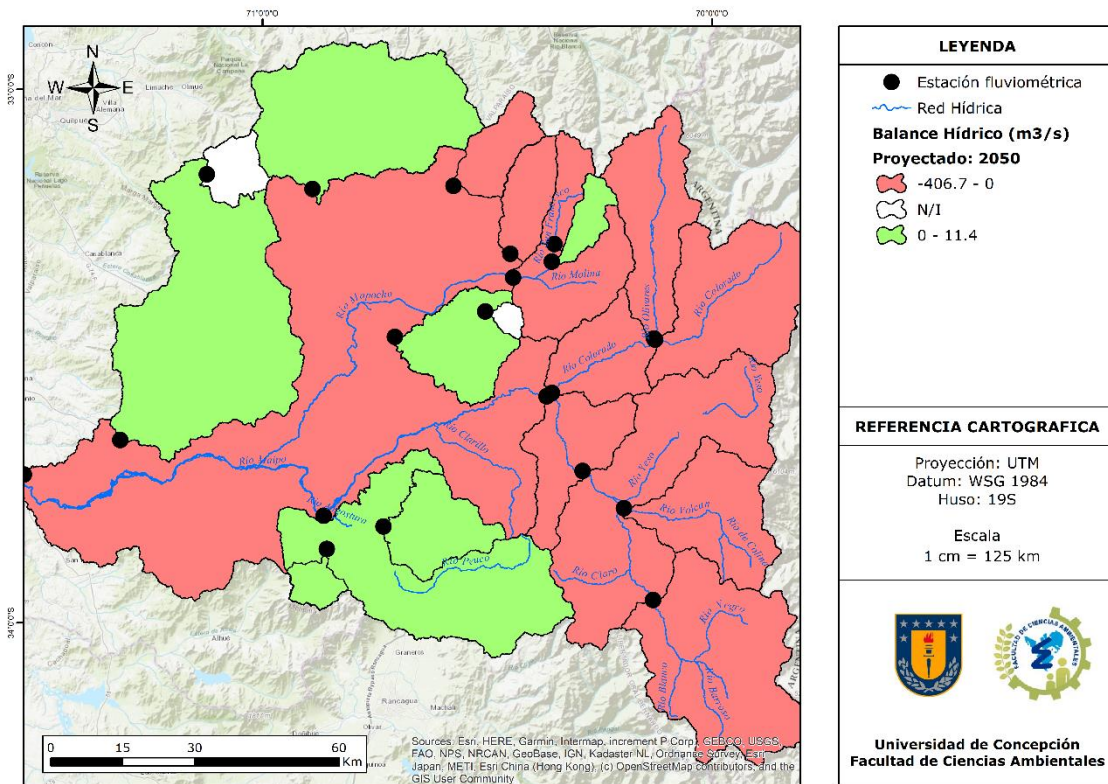


Figura 36. Balance hídrico esperado (2050) de la cuenca del río Maipo.

Observando el comportamiento espacial de los derechos de agua, las magnitudes de caudal anual y las tendencias en la cuenca del río Maipo, se aprecia que los efectos sobre la disponibilidad hídrica se reflejan especialmente en la zona alta y en el río Maipo.

La generación de energía hidroeléctrica se concentra en la zona alta y media de la cuenca, principalmente en el río Maipo, Colorado y Olivares, zona donde se encontraron importantes tendencias de reducción de caudal medio anual y el mayor déficit hídrico en la cuenca. Precisamente en las estaciones Río Colorado antes Junta Río Olivares y Río Olivares antes Junta Río Maipo aledañas a la central hidroeléctrica de pasada Alfalfal, el cual opera con una potencia de 178 MW, la más alta presente en la cuenca.

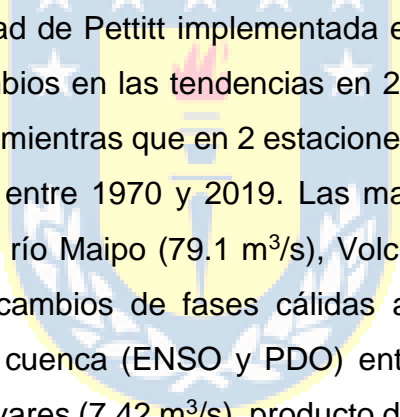
De acuerdo con los registros de derechos de aprovechamiento de aguas para la región metropolitana (ver Tabla 3), la agricultura/riego constituye la mayor demanda hídrica consuntiva (36.95%), concentrándose principalmente en la parte media y baja de la cuenca (Figura 9), donde se encontraron reducciones de caudal superiores al 40%. Los cultivos que se verán mayormente afectados por la disminución de la disponibilidad hídrica corresponden a las plantaciones forrajeras, cereales y frutales, como los durazneros, nectarines, nogales, ciruelos, entre otros. (Dirección General de Aguas, 2004). INFODEP (2016) indica que el mayor descenso de precipitaciones para este siglo se proyecta entre las regiones de Valparaíso y Biobío, incidiendo directamente en la disponibilidad hídrica en los cauces donde se extrae agua para riego. Asimismo, el aumento de la isoterma 0 °C en la cuenca reduciría el almacenamiento de aguanieve afectando los aportes de agua en los períodos secos, donde se requiere para la actividad agrícola de la zona.

Finalmente, la disponibilidad de agua potable podría verse levemente afectada por el déficit hídrico de la cuenca ya que este tipo de uso de registra en la zona alta de la cuenca, atribuible a la cuenca fluviométrica de la estación Río Maipo en San Alfonso que presenta una reducción de caudal del 3.7% para 2050. Sin embargo, la disminución de las precipitaciones y del almacenamiento de nieve ha generado un significativo descenso en la principal reserva de agua para consumo humano de la Región Metropolitana (Embalse El Yeso), reduciendo su capacidad en un 40% entre 2016 y 2019, por lo que es importante tomar medidas de emergencia para asegurar la disponibilidad de agua en la región más poblada del país.

6. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Mediante el Test de Mann Kendall y la Pendiente de Sen se logró determinar la existencia y magnitud de las tendencias para el registro fluviométrico de la cuenca del río Maipo entre 1970 y 2019. Se encontraron tendencias decrecientes significativas en el registro fluviométrico en 21 estaciones, con una tasa anual entre 6.5 y 1795.2 L/s.

No se pudo establecer un patrón espacial entre las tendencias y caudales en relación con la distribución de las subcuencas del río Maipo y con el orden de Strahler.



La prueba de homogeneidad de Pettitt implementada en las series temporales de caudal anual presentó cambios en las tendencias en 20 estaciones fluviométricas de la cuenca del río Maipo, mientras que en 2 estaciones la tendencia registrada se ha mantenido homogénea entre 1970 y 2019. Las mayores tasas de cambio de caudal se registraron en el río Maipo (79.1 m³/s), Volcán (30.2 m³/s) y Angostura (13.9 m³/s), asociados a cambios de fases cálidas a frías en las oscilaciones climáticas presentes en la cuenca (ENSO y PDO) entre 2006 – 2008; y los ríos Colorado (11.36 m³/s) y Olivares (7.42 m³/s), producto de la instalación de la central hidroeléctrica de pasada Alfalfal en 1993.

En relación con la disponibilidad hídrica actual, se determinó un balance hídrico negativo en la zona alta de la cuenca, asociada a la disminución de los aportes de agua (precipitación y nieve) y el aumento en la demanda hídrica. Por otra parte, se observaron 3 estaciones fluviométricas ubicadas en la zona alta que presentaron un balance hídrico positivo.

Se proyecta para el 2050 una reducción del balance hídrico de la cuenca, producto a la disminución del caudal medio anual asociado a las tendencias. El río Maipo

presentó el mayor déficit hídrico en la cuenca, principalmente en la zona alta y baja. No se estimó déficit hídrico en las estaciones fluviométricas de la zona media.

Los efectos de las tendencias sobre los usos de agua en la cuenca del río Maipo son diferentes. Se estima que la generación de energía hidroeléctrica se vea más afectada a la disminución de caudal, debido a que las zonas más vulnerables se concentran en la parte alta. Para la agricultura espera que se vea mayormente afectada en la zona media de la cuenca, debido a la reducción de aporte pluvial en los ríos donde se extrae agua para riego.

Finalmente, se recomienda realizar futuros estudios que analicen la variabilidad de las tendencias en la cuenca del río Maipo a escala estacional, con la finalidad de conocer los meses más críticos ante un descenso de las precipitaciones y la reducción de acumulación aguanieve en la cordillera. Además, se recomienda considerar las series temporales de precipitación y temperatura en un modelo hidrológico para determinar los futuros cambios de caudal acorde a al comportamiento hidrometeorológico de la cuenca.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arriagada, P., Dieppois, B., Sidibe, M., Link, O., 2019. Impacts of climate change and climate variability on hydropower potential in data-scarce regions subjected to multi-decadal variability. *Energies* 12.

Arriagada, P., Karelovic, B., Link, O., 2021. Automatic gap-filling of daily streamflow time series in data-scarce regions using a machine learning algorithm. *J. Hydrol.* 598, 126454.

Ayala, L. 2010. Aspectos técnicos de la gestión integrada de las aguas (GIRH) – “Primera etapa diagnóstico”. Informe preparado para el diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Santiago, Chile.

Banco Central de Chile, 2006. Cuentas Nacionales de Chile 2003 – 2006. Santiago, Chile.

Banco Central de Chile, 2010. Síntesis estadística de Chile 2005 – 2009. Santiago, Chile.

Banco Mundial, 2011. Chile. Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Región para América Latina y el Caribe.

Banco Mundial, 2021. Indicadores del desarrollo mundial. [<https://databank.bancomundial.org/source/world-development-indicators>]. (accessed 09.08.2021).

Boisier, J.P., Rondanelli, R., Garreaud, R., Muñoz, F., 2016. Anthropogenic Contribution to the Southeast Pacific Precipitation Decline and Recent (2010-2015) Mega-Drought in Chile. *Geophys. Res. Lett.* 43, 413–421.

Breiman, L., 2001. Random Forests. *Mach. Learn.* 45, 5–32.

Carrasco, G., 2020. Clúster no Jerárquicos versus Cart y Biplot. Universidad de Salamanca.

Castro, L.M., Carvajal, Y., Ávila, J., 2012. Análisis clúster como técnica de análisis exploratorio de registros múltiples en datos meteorológicos. *Ing. Recur. Nat. y del Ambient.* 11, 11–20.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015. Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2021. Datos de caudales [<https://www.cr2.cl/datos-de-caudales/>]. (accessed 05.28.2021).

CGIAR-CSI SRTM, 2020. Datos SRTM [<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>]. CGIAR (accessed 07.21.2020).

Cortés, G., Vargas, X., McPhee, J., 2011. Climatic sensitivity of streamflow timing in the extratropical western Andes Cordillera. J. Hydrol. 405, 93–109.

Da Silva, R.M., Santos, C.A.G., Moreira, M., Corte-Real, J., Silva, V.C.L., Medeiros, I.C., 2015. Rainfall and river flow trends using Mann–Kendall and Sen’s slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. Nat. Hazards 77, 1205–1221.

Dirección General de Aguas, 1987. Balance Hídrico de Chile. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas, 1999. Política Nacional de Recursos Hídricos. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas, 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del Río Maipo. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas, 2015. Atlas del Agua: Chile 2016. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas, 2017. Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas, 2018. Pronóstico de caudales de deshielo. Temporada de riego 2018 – 2019. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas, 2021a. Derechos de aprovechamiento de aguas [https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx]. MOP. (accessed 08.26.21).

Dirección General de Aguas, 2021b. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea [<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>]. MOP (accessed 09.21.21).

Fuenzalida, H., Villagrán, C., Bernal, P., Fuentes, E., Santibáñez, F., Peña, H., Montecino, V., Hajek, E., Rutllant, J., 1989. Cambio climático global y eventuales efectos en Chile. *Ambient. y Desarro.* V, 37–42.

García, R., 2008. Gestión de cuencas y Cambio Climático: El caso del Maipo.

Garreaud, R., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M., 2017. The 2010 - 2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–37.

Garreaud, R.D., 2011. Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Rev. Tierra Adentro-INIA* 14.

Hulme, M., Sheard, N., 1999. Escenarios de Cambio Climático para Argentina. Norwich, United Kingdom: Climate Research Unit, University East Anglia.

INFODEP, 2016. El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. Informe para ODEPA. Santiago, Chile.

Instituto Nacional de Estadísticas, 2017. Censo de Población y Vivienda 2017. Santiago, Chile.

IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Kendall, M.G., 1975. Rank correlation methods, Charles Griffin.

Kulkarni, A., Storch, H. Von, 1995. Monte Carlo experiments on the effect of serial correlation on the Mann-Kendall test of trend. *Meteorol. Zeitschrift* 4, 82–85.

- Lin, G.F., Chen, L.H., 2006. Identification of homogeneous regions for regional frequency analysis using the self-organizing map. *J. Hydrol.* 324, 1–9.
- Mann, H.B., 1945. Non-Parametric Test Against Trend. *Econometrica* 13, 245–259.
- Mantua, N.J., Hare, S., 2002. The Pacific Decadal Oscillation. *J. Oceanogr.* 58, 35–44.
- Meza, F.J., 2005. Variability of reference evapotranspiration and water demands. Association to ENSO in the Maipo river basin, Chile. *Glob. Planet. Change* 47, 212–220.
- Migliavacca, F., Confortola, G., Soncini, A., Senese, A., Diolaiuti, G.A., Smiraglia, C., Barcaza, G., Bocchiola, D., 2015. Hydrology and potential climate changes in the Río Maipo (Chile). *Geogr. Fis. e Din. Quat.* 38, 155–168.
- Minder, E., 1997. Modelación hidrológica en el sistema interconectado central. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente, 2017. Plan de Acción Nacional de Cambio climático 2017-2022. Santiago, Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente, 2021. ¿Qué son los ODS? [<https://ods.mma.gob.cl/que-son-los-ods/>]. (accessed 10.26.21)
- NOAA, 2021. Teleconnections. [<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/>]. (accessed 08.26.21).
- Núñez, J., Rivera, D., Oyarzún, R., Arumí, J.L., 2013. Influence of Pacific Ocean multidecadal variability on the distributional properties of hydrological variables in north-central Chile. *J. Hydrol.* 501, 227-240.
- Ocampo, A., 2019. Evaluación de no estacionaridad de series de tiempo hidroclimatológicas en Colombia: Caso aplicado al Eje Cafetero. Universidad de los Andes.
- Ordoñez, R., 2011. Metodología de identificación de impactos ambientales en pequeñas centrales hidroeléctricas de pasada en cauces naturales, estudio de caso. Universidad de Chile.

- Peña, D., 2002. *Análisis de Datos Multivariantes*, 2002, McGraw-Hill, Madrid.
- Peña, H., Nazarala, B., 1987. Snowmelt-runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects. *IAHS Publ.* 166, 161–172.
- Pettitt, A. N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126–135.
- Philander, S., 1983. El Niño Southern Oscillation phenomena. *Nature* 302, 295–301.
- Pizarro-Tapia, R., Cabrera-Jofre, C., Morales-Calderón, C., Flores-Villanelo, J.P., 2011. Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial influencia glaciaria en la producción de agua (1963-2006). *Tecnol. y Ciencias del Agua* 2, 5–19.
- Quintana, J., Aceituno, P., 2006. Trends and Interdecadal Variability of Rainfall in Chile. *Proc. 8 ICSHMO* 371–372.
- Riquelme, K., 2018. Evaluación del efecto del cambio climático en los caudales futuros de la cuenca del río Duqueco. *Universidad de Concepción*.
- Rivera, A., Acuna, C., Casassa, G., Bown, F., 2002. Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise. *Ann. Glaciol.* 34, 367–372.
- Rubio-Álvarez, E., McPhee, J., 2010. Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952-2003. *Water Resour. Res.* 46, 1–16.
- Rutllant, J., Fuenzalida, H., 1991. Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the southern oscillation. *Int. J. Climatol.* 11, 63–76.
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.* 63, 1379–1389.

Sidibe, M., Dieppois, B., Mahé, G., Paturel, J.E., Amoussou, E., Anifowose, B., Lawler, D., 2018. Trend and variability in a new, reconstructed streamflow dataset for West and Central Africa, and climatic interactions, 1950–2005. *J. Hydrol.* 561, 478–493.

Stehr, A., Debels, P., Arumi, J.L., Alcayaga, H., Romero, F., 2010. Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: Experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. *Tecnol. y Ciencias del Agua* 1, 37–58.

Stekhoven, D.J., Bühlmann, P., 2012. Missforest-Non-parametric missing value imputation for mixed-type data. *Bioinformatics* 28, 112–118.

Universidad de Chile, 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe para CONAMA.

Valdés-Pineda, R., Cañón, J., Valdés, J.B., 2018. Multi-decadal 40- to 60-year cycles of precipitation variability in Chile (South America) and their relationship to the AMO and PDO signals. *J. Hydrol.* 556, 1153–1170.

Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., 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. *J. Hydrol.* 519, 2538–2567.

Valdés-Pineda, R., Valdés, J.B., Díaz, H.F., Pizarro-Tapia, R., 2016. Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean–atmosphere circulation patterns. *Int. J. Climatol.* 36, 2979–3001.

Vásquez, A., 2019. Método eficiente de clustering de fibras cerebrales basado en distribución de puntos. Universidad de Concepción.

Yue, S., Wang, C.Y. 2004. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management* 18(3), 201-218.

Zhang, C., 2005. Madden Julian Oscillation. *Rev. Geophys.* 43.

8. ANEXOS

Tabla Anexo 1. Estaciones meteorológicas presentes en la cuenca del río Maipo.

| Nombre estación | Altura (m.s.n.m) | Latitud | Longitud | Registro temporal |
|---|-----------------------------|----------------|-----------------|------------------------------|
| Angostura En Valdivia De Paine | 350 | 33° 80' 44" | 70° 87' 83" | 1988 - 2015 |
| Antupiren | 904 | 33° 49' 64" | 70° 51' 64" | 1979 - 2017 |
| Caleu | 1120 | 33° 00' 53" | 70° 99' 33" | 1957 - 2016 |
| Campus San Joaquín U.C. | 570 | 33° 49' 75" | 70° 61' 42" | 1978 - 1981 |
| Carmen De Las Rosas | 165 | 33° 75' 97" | 71° 15' 14" | 1930 - 2017 |
| Cerrillos De Leyda | 182 | 33° 63' 44" | 71° 51' 06" | 1932 - 2017 |
| Cerro Calan | 848 | 33° 39' 50" | 70° 53' 67" | 1978 - 1905 |
| Colliguay | 490 | 33° 16' 86" | 71° 14' 67" | 1950 - 2017 |
| El Vergel | 340 | 33° 69' 58" | 70° 92' 36" | 1988 - 2017 |
| El Yeso Embalse | 2475 | 33° 67' 67" | 70° 08' 86" | 1977 - 1993 |
| Estero Arrayan En La Montosa | 880 | 33° 32' 56" | 70° 45' 61" | 2013 - 2019 |
| Estero Puangue En Ruta 78 | 93 | 33° 66' 14" | 71° 33' 72" | 1989 - 1905 |
| Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco | 1350 | 33° 34' 14" | 70° 36' 36" | 2009 - 1905 |
| Estero Yerba Loca En Piedra Carvajal | 3250 | 33° 22' 14" | 70° 27' 36" | 2011 - 1905 |
| Eulogio Sánchez Tobalaba Ad. | 650 | 33° 45' 44" | 70° 54' 78" | 1975 - 2018 |
| Fundo Las Bateas | 810 | 32° 94' 72" | 70° 80' 64" | 1985 - 2017 |
| Fundo Marruecos | 430 | 33° 55' 03" | 70° 81' 67" | 1989 - 2017 |
| Glaciar Echaurren | 3850 | 33° 57' 22" | 70° 12' 83" | 1999 - 2002 |
| Glaciar San Francisco en Aguas Panimávida | 2220 | 33° 80' 53" | 70° 07' 00" | 2011 - 1905 |
| Huechún Andina | 590 | 33° 07' 58" | 70° 76' 86" | 1994 - 2017 |
| Huechún Embalse | 556 | 33° 08' 56" | 70° 80' 17" | 1988 - 2017 |
| Ibacache Alto | 169 | 33° 47' 97" | 71° 28' 11" | 1988 - 2017 |
| La Dehesa | 920 | 33° 32' 92" | 70° 52' 86" | 1991 - 2007 |
| La Ermita Central En Bocatoma | 1350 | 33° 34' 14" | 70° 36' 36" | 1987 - 2011 |
| La Obra Recinto Emos | 796 | 33° 59' 14" | 70° 48' 53" | 1995 - 2017 |
| Laguna Aculeo | 360 | 33° 88' 58" | 70° 87' 75" | 1988 - 2017 |

| | | | | |
|---|------|-------------|-------------|-------------|
| Laguna Aculeo Los Castaños | 354 | 33° 85' 92" | 70° 90' 69" | 2014 - 2014 |
| Laguna Negra | 2780 | 33° 66' 58" | 70° 10' 78" | 2000 - 1905 |
| Las Melosas | 1527 | 33° 89' 94" | 70° 19' 81" | 1962 - 2004 |
| Los Guindos | 125 | 33° 89' 08" | 71° 24' 08" | 1989 - 2017 |
| Los Panguiles | 190 | 33° 43' 86" | 71° 02' 56" | 1980 - 1993 |
| Maitenes Bocatoma | 1143 | 33° 53' 11" | 70° 26' 17" | 1988 - 2017 |
| Mallarauco | 176 | 33° 56' 97" | 71° 10' 61" | 1992 - 2017 |
| Melipilla | 168 | 33° 68' 03" | 71° 19' 97" | 1971 - 1993 |
| Peñaflor | 370 | 33° 60' 97" | 70° 90' 00" | 1971 - 1979 |
| Pirque | 659 | 33° 67' 36" | 70° 58' 69" | 1975 - 1993 |
| Pudahuel Santiago | 482 | 33° 39' 19" | 70° 79' 44" | 1967 - 1905 |
| Quebrada De Macul | 950 | 33° 50' 17" | 70° 51' 44" | 2003 - 1905 |
| Quebrada Ramon | 730 | 33° 43' 28" | 70° 53' 44" | 1980 - 2008 |
| Quebrada Ramon En Recinto Emos | 845 | 33° 43' 31" | 70° 51' 42" | 2007 - 2017 |
| Queltehues | 1450 | 33° 81' 64" | 70° 21' 72" | 1978 - 1978 |
| Quinta Normal Santiago | 527 | 33° 44' 50" | 70° 68' 28" | 1969 - 1905 |
| Rincón De Los Valles | 955 | 32° 94' 75" | 70° 75' 36" | 1957 - 2017 |
| Río Angostura En Valdivia De Paine | 342 | 33° 81' 11" | 70° 88' 36" | 2015 - 2017 |
| Río Colorado Antes Junta Río Olivares | 1500 | 33° 49' 00" | 70° 13' 42" | 2016 - 1905 |
| Río Maipo En Cabimbao | 35 | 33° 72' 19" | 71° 55' 50" | 2009 - 1905 |
| Río Maipo En El Manzano | 850 | 33° 59' 39" | 70° 37' 92" | 2011 - 1905 |
| Río Maipo En San Alfonso | 1092 | 33° 73' 47" | 70° 30' 08" | 2010 - 2017 |
| Río Mapocho En Los Almendros | 966 | 33° 37' 03" | 70° 45' 08" | 1999 - 2016 |
| Río Mapocho Rinconada De Maipú | 440 | 33° 49' 61" | 70° 81' 67" | 2001 - 2017 |
| Río Molina Antes Junta San Francisco | 1158 | 33° 37' 33" | 70° 39' 61" | 2009 - 1905 |
| Río Olivares Antes Junta Río Colorado | 1500 | 33° 48' 78" | 70° 13' 67" | 2016 - 1905 |
| Río San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca | 1550 | 33° 30' 86" | 70° 35' 72" | 2013 - 1905 |
| Río Volcán En Queltehues | 1365 | 33° 80' 56" | 70° 20' 89" | 2016 - 1905 |

| | | | | |
|-----------------------------------|------|-------------|-------------|-------------|
| Rungue Embalse | 700 | 33° 01' 94" | 70° 90' 81" | 1977 - 1993 |
| San Alfonso | 1040 | 33° 70' 67" | 70° 33' 42" | 1962 - 1973 |
| San Gabriel | 1266 | 33° 78' 25" | 70° 23' 94" | 1977 - 2017 |
| San José De Maipo Reten | 943 | 33° 63' 61" | 70° 35' 31" | 1971 - 2017 |
| Talagante | 325 | 33° 66' 69" | 70° 93' 33" | 1971 - 1972 |
| Terraza Oficinas Centrales DGA | 560 | 33° 44' 86" | 70° 64' 44" | 2011 - 1905 |
| Til-Til | 580 | 33° 08' 69" | 70° 92' 78" | 1943 - 1972 |
| Valle Olivares | 2787 | 33° 18' 69" | 70° 11' 22" | 2014 - 1905 |

Fuente: Elaboración propia en base a registros DGA.



Tabla Anexo 2. Estaciones fluviométricas presentes en la cuenca del río Maipo.

| Nombre estación | Altura (m.s.n.m) | Latitud | Longitud | Registro temporal |
|---|-----------------------------|----------------|-----------------|------------------------------|
| Canal Colina En Peldehue | 860 | 33° 19' 67" | 70° 58' 08" | 1980 - 2019 |
| Canal Colina En Sección Las Huacas | 0 | 33° 20' 00" | 70° 75' 00" | 1930 - 1934 |
| Canal Maipo En Chocalan | 0 | 33° 75' 00" | 71° 25' 00" | 1929 - 1930 |
| Canal Queltehue | 3080 | 33° 87' 83" | 70° 19' 78" | 2013 - 2019 |
| Canal San Carlos En Desembocadura Río Mapocho | 580 | 33° 41' 25" | 70° 60' 47" | 1961 - 1982 |
| Canal San Carlos En Príncipe De Gales | 579 | 33° 41' 67" | 70° 58' 33" | 1979 - 1981 |
| Estero Arrayan En Desembocadura (Ca) | 870 | 33° 35' 83" | 70° 48' 28" | 1942 - 1945 |
| Estero Arrayan En La Montosa | 880 | 33° 32' 56" | 70° 45' 61" | 1952 - 2019 |
| Estero Glaciar Echaurren | 3000 | 33° 58' 47" | 70° 11' 61" | 1976 - 2004 |
| Estero Pintue En Puente Pintue | 0 | 33° 87' 36" | 70° 87' 81" | 2003 - 2010 |
| Estero Polpaico En Chicauma | 500 | 33° 19' 83" | 70° 89' 56" | 1943 - 2006 |
| Estero Puangue En Boquerón | 488 | 33° 16' 69" | 71° 13' 06" | 1929 - 2017 |
| Estero Puangue En Ruta 78 | 93 | 33° 66' 14" | 71° 33' 72" | 1986 - 2018 |
| Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco | 1350 | 33° 34' 14" | 70° 36' 36" | 1986 - 2019 |
| Estero Yerba Loca En Piedra Carvajal | 3250 | 33° 22' 14" | 70° 27' 36" | 2013 - 2018 |
| Quebrada De Macul | 950 | 33° 50' 17" | 70° 51' 44" | 2013 - 2016 |
| Quebrada Ramon En Recinto Emos | 845 | 33° 43' 31" | 70° 51' 42" | 1991 - 2019 |
| Río Angostura En Angostura | 450 | 33° 90' 00' | 70° 73' 33" | 1918 - 1972 |
| Río Angostura En Valdivia De Paine | 342 | 33° 81' 11" | 70° 88' 36" | 1981 - 2017 |

| | | | | |
|---------------------------------------|------|-------------|-------------|-------------|
| Río Colina Sección Las Huacas | 0 | 33° 21' 67" | 70° 76' 67" | 1930 - 1939 |
| Río Colorado Antes Junta Río Maipo | 890 | 33° 58' 75" | 70° 36' 69" | 1940 - 2019 |
| Río Colorado Antes Junta Río Olivares | 1500 | 33° 49' 00" | 70° 13' 42" | 1977 - 2019 |
| Río Colorado En Maitenes | 0 | 33° 52' 64" | 70° 26' 64" | 1916 - 1936 |
| Río Maipo En Cabimbao | 35 | 33° 72' 19" | 71° 55' 50" | 1939 - 2019 |
| Río Maipo En Chignigue (Juncal) | 200 | 33° 69' 69" | 71° 09' 69" | 1976 - 1977 |
| Río Maipo En El Canelo | 0 | 33° 57' 47" | 70° 43' 97" | 1914 - 1931 |
| Río Maipo En El Ingenio | 0 | 33° 76' 67" | 70° 26' 67" | 1913 - 1940 |
| Río Maipo En El Manzano | 850 | 33° 59' 39" | 70° 37' 92" | 1946 - 2018 |
| Río Maipo En El Rosario | 345 | 33° 76' 67" | 70° 91' 67" | 1963 - 1972 |
| Río Maipo En Isla De Maipo | 0 | 33° 80' 00" | 70° 91' 67" | 1929 - 1930 |
| Río Maipo En Las Hualtatas | 1820 | 33° 97' 81" | 70° 14' 56" | 1979 - 2013 |
| Río Maipo En Las Melosas | 1527 | 33° 84' 81" | 70° 19' 61" | 1962 - 2015 |
| Río Maipo En Naltahua | 300 | 33° 72' 56" | 70° 91' 61" | 1948 - 1960 |
| Río Maipo En San Alfonso | 1092 | 33° 73' 47" | 70° 30' 08" | 1942 - 2017 |
| Río Mapocho En El Monte | 0 | 33° 67' 78" | 70° 97' 25" | 1947 - 1952 |
| Río Mapocho En El Trebal | 429 | 33° 32' 42" | 70° 49' 02" | 2016 - 2019 |
| Río Mapocho En Las Condes | 0 | 33° 36' 67" | 70° 45' 00" | 1943 - 1948 |
| Río Mapocho En Los Almendros | 966 | 33° 37' 03" | 70° 45' 08" | 1948 - 2019 |
| Río Mapocho En Pte. Pudahuel | 450 | 33° 43' 33" | 70° 81' 67" | 1928 - 1931 |
| Río Mapocho En Puente Nilhue | 0 | 33° 36' 67" | 70° 45' 00" | 1928 - 1940 |
| Río Mapocho Rinconada De Maipú | 440 | 33° 49' 61" | 70° 81' 67" | 1959 - 2017 |

| | | | | |
|---|------|-------------|-------------|-------------|
| Río Molina Antes Junta San Francisco | 1158 | 33° 37' 33" | 70° 39' 61" | 1987 - 2019 |
| Río Olivares Antes Junta Río Colorado | 1500 | 33° 48' 78" | 70° 13' 67" | 1977 - 2019 |
| Río Paine En Longitudinal | 375 | 33° 83' 33" | 70° 75' 00" | 1962 - 1983 |
| Río San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca | 1550 | 33° 30' 86" | 70° 35' 72" | 2009 - 2019 |
| Río Volcán En Queltehues | 1365 | 33° 80' 56" | 70° 20' 89" | 1914 - 2018 |
| Río Yeso Antes Junta Río Maipo | 1250 | 33° 78' 64" | 70° 21' 17" | 1913 - 1958 |
| Río Yeso En Embalse El Yeso | 2475 | 33° 66' 67" | 70° 08' 33" | 1945 - 1978 |
| Río Yeso En Manzanito | 0 | 33° 75' 25" | 70° 16' 11" | 1943 - 1951 |
| Río Yeso En Piuquenes | 2550 | 33° 62' 58" | 69° 92' 25" | 1969 - 1971 |
| Zanjón De La Aguada En Pajaritos | 430 | 33° 47' 92" | 70° 72' 61" | 1968 - 1969 |
| Zanjón De La Aguada En Santa Rosa | 0 | 33° 47' 64" | 70° 63' 47" | 1928 - 1939 |
| Zanjón De La Aguada Puente Particular | 450 | 33° 47' 83" | 70° 71' 72" | 1971 - 1987 |

Fuente: Elaboración propia en base a registros DGA.

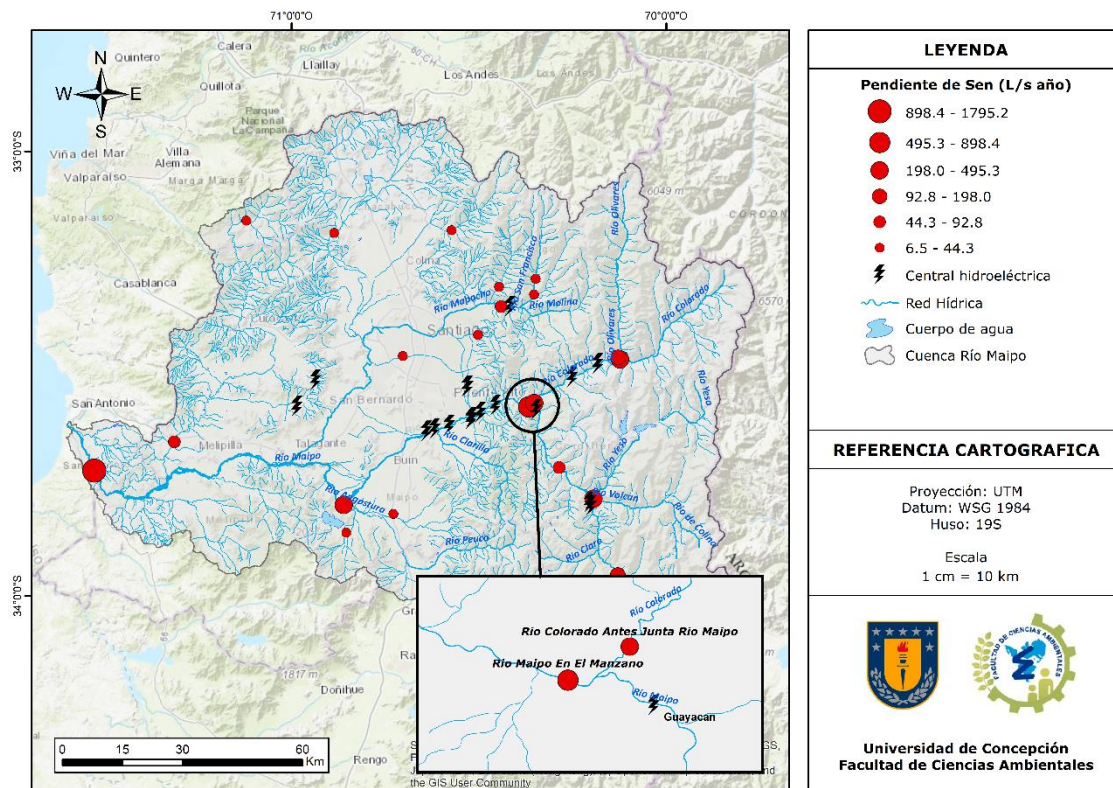


Figura Anexo 3. Localización estación fluviométrica: Río Maipo En El Manzano.



Tabla Anexo 4. Caudal medio anual simulado y observado.

| Código estación | Nombre estación | Caudal anual (m ³ /s) | | Error |
|-----------------|---|----------------------------------|-----------|--------|
| | | Simulado | Observado | |
| 5735001 | Canal Colina En Peldehue | 1.82 | 1.8 | 1.0% |
| 5705002 | Canal Queltehue | 15.13 | 14.7 | 2.9% |
| 5722001 | Estero Arrayan En La Montosa | 1.54 | 1.5 | 2.5% |
| 5716003 | Estero Pintue En Puente Pintue | 0.56 | 0.4 | 39.2% |
| 5734001 | Estero Polpaico En Chicauma | 0.76 | 0.8 | 5.4% |
| 5741001 | Estero Puangue En Boquerón | 0.75 | 0.7 | 6.9% |
| 5746001 | Estero Puangue En Ruta 78 | 15.47 | 14.9 | 3.8% |
| 5721001 | Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco | 1.04 | 1 | 4.2% |
| 5730008 | Quebrada Ramon En Recinto Emos | 0.27 | 0.2 | 36.9% |
| 5716001 | Rio Angostura En Valdivia De Paine | 20.80 | 21 | 1.0% |
| 5707002 | Rio Colorado Antes Junta Rio Maipo | 30.88 | 30.7 | 0.6% |
| 5705001 | Rio Colorado Antes Junta Rio Olivares | 11.58 | 10.2 | 13.5% |
| 5748001 | Rio Maipo En Cabimbao | 125.50 | 125.4 | 0.1% |
| 5710001 | Rio Maipo En El Manzano | 112.23 | 110.4 | 1.7% |
| 5701001 | Rio Maipo En Las Hualtatas | 30.78 | 32.2 | 4.4% |
| 5704002 | Rio Maipo En San Alfonso | 75.54 | 75.6 | 0.1% |
| 5722002 | Rio Mapocho En Los Almendros | 6.08 | 6.3 | 3.5% |
| 5737002 | Rio Mapocho Rinconada De Maipú | 30.31 | 30.3 | 0.03% |
| 5706001 | Rio Olivares Antes Junta Rio Colorado | 6.20 | 5.7 | 8.8% |
| 5715001 | Rio Paine En Longitudinal | 5.16 | 5.1 | 1.2% |
| 5721016 | Rio San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca | 0.45 | 0.2 | 124.9% |
| 5702001 | Rio Volcán En Queltehues | 7.59 | 7.9 | 3.9% |
| 5730005 | Zanjón De La Aguada Puente Particular | 5.86 | 6.3 | 7.0% |

Tabla Anexo 5. Balance hídrico esperado de cada estación fluviométrica para 2030 y 2040.

| Código estación | Nombre | Balance hídrico m ³ /s | |
|-----------------|---|-----------------------------------|---------|
| | | 2030 | 2040 |
| 5735001 | Canal Colina En Peldehue | -1.80 | -1.95 |
| 5722001 | Estero Arrayan En La Montosa | -1.81 | -2.03 |
| 5716003 | Estero Pintue En Puente Pintue | 0.38 | 0.29 |
| 5734001 | Estero Polpaico En Chicauma | 0.58 | 0.45 |
| 5741001 | Estero Puangue En Boquerón | NA* | NA* |
| 5746001 | Estero Puangue En Ruta 78 | 13.00 | 12.20 |
| 5721001 | Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco | 0.86 | 0.74 |
| 5730008 | Quebrada Ramon En Recinto Emos | NA* | NA* |
| 5716001 | Rio Angostura En Valdivia De Paine | 17.39 | 14.22 |
| 5707002 | Rio Colorado Antes Junta Rio Maipo | -26.72 | -29.75 |
| 5705001 | Rio Colorado Antes Junta Rio Olivares | -1.02 | -4.60 |
| 5748001 | Rio Maipo En Cabimbao | 29.20 | 11.25 |
| 5710001 | Rio Maipo En El Manzano | -119.03 | -128.01 |
| 5701001 | Rio Maipo En Las Hualtatas | -1.68 | -3.54 |
| 5704002 | Rio Maipo En San Alfonso | -404.87 | -405.80 |
| 5722002 | Rio Mapocho En Los Almendros | -0.35 | -1.15 |
| 5706001 | Rio Olivares Antes Junta Rio Colorado | -4.25 | -6.23 |
| 5715001 | Rio Paine En Longitudinal | 4.36 | 4.03 |
| 5721016 | Rio San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca | -0.47 | -0.57 |
| 5702001 | Rio Volcán En Queltehues | -46.87 | -51.82 |
| 5730005 | Zanjón De La Aguada Puente Particular | 5.79 | 5.73 |

*NA: No registraron derechos de agua asociados a su cuenca fluviométrica.

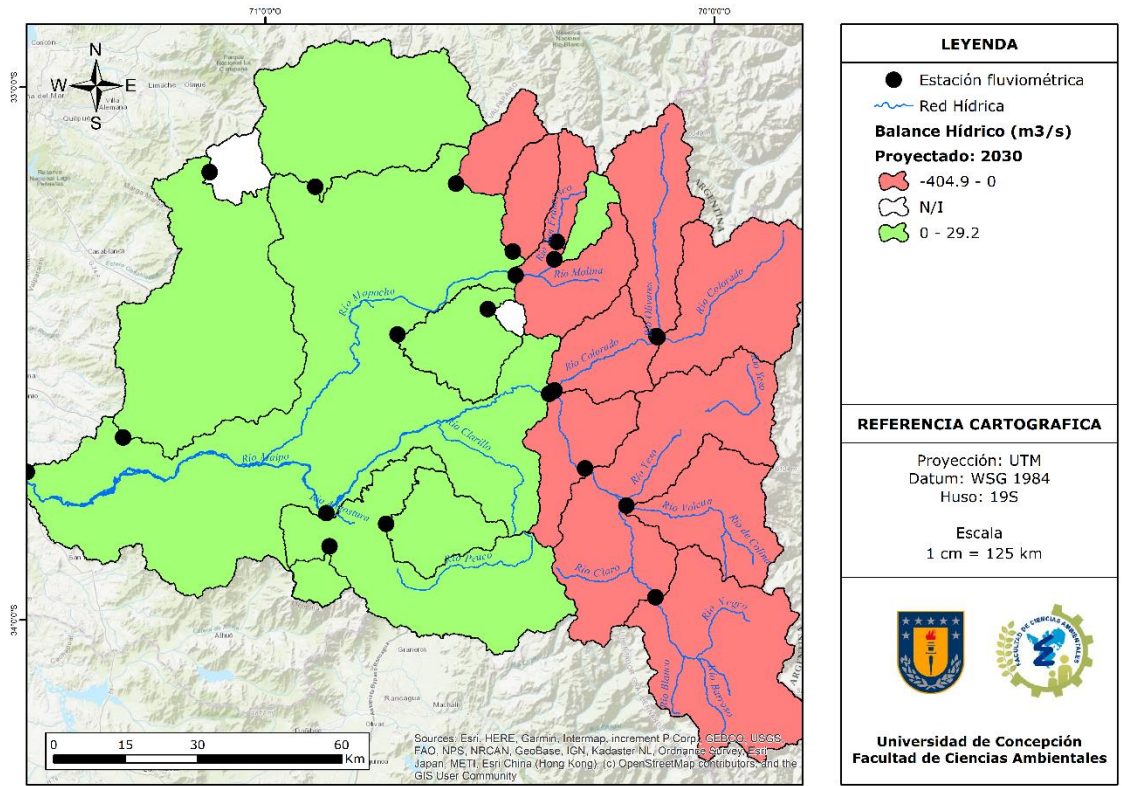


Figura Anexo 6. Balance hídrico esperado (2030) para la cuenca del río Maipo.

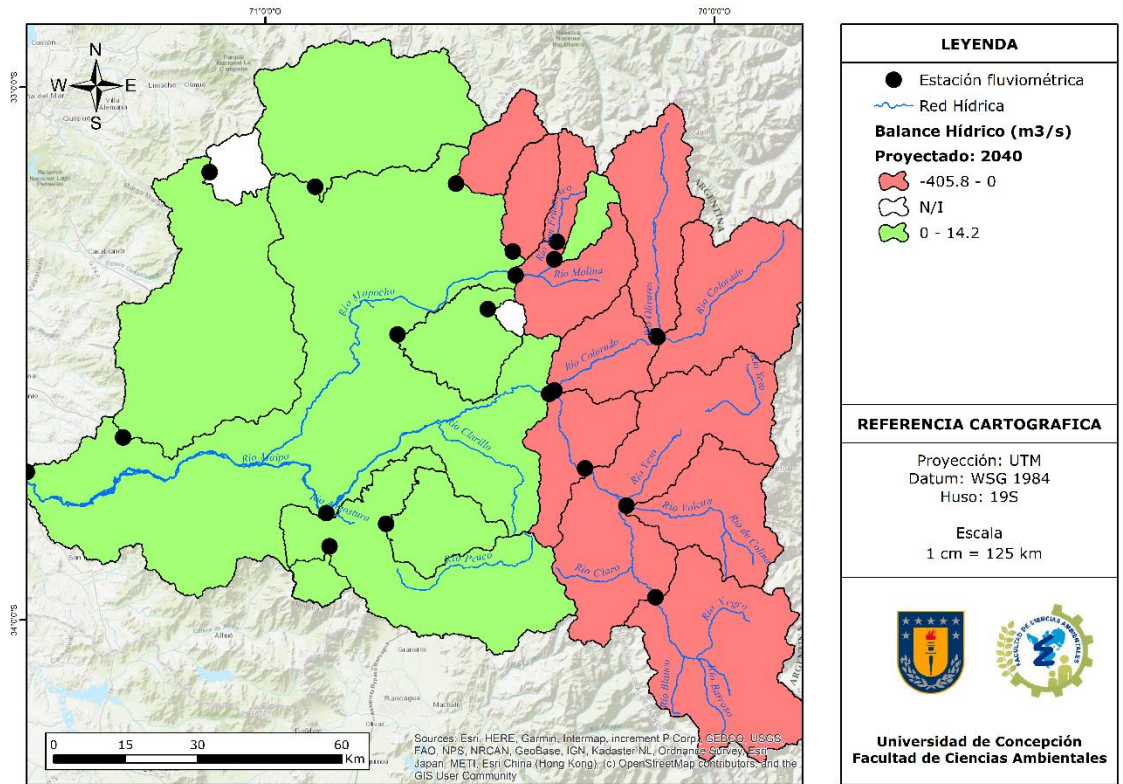


Figura Anexo 7. Balance hídrico esperado (2040) para la cuenca del río Maipo.