



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



**Estimación de caudales máximos instantáneos a partir de caudales medios  
diarios en cuencas costeras de la zona centro-sur de Chile**

POR

**Pamela Estefanía Ortega Merino**

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

Profesor Guía  
Alejandra Stehr Gesche

Profesional Supervisor  
Maricarmen Guerra Paris

5 marzo 2025  
Concepción (Chile)

© 2025 Pamela Estefanía Ortega Merino

© 2025 Pamela Estefanía Ortega Merino

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

## RESUMEN

En el área de la hidrología, es fundamental la estimación de caudales de diseño que permitan la construcción de infraestructuras hidráulicas, que aseguren un adecuado funcionamiento en caso de ocurrir eventos de magnitudes extremas, previniendo así el colapso o fallas de las obras, con la finalidad de evitar potenciales daños a personas y pérdidas económicas. Sin embargo, en Chile se ha observado que los registros históricos de caudales máximos instantáneos anuales están incompletos o son escasos, lo que dificulta el estudio en diversas áreas del país. Las cuencas costeras no están exentas de esta problemática; por este motivo, se estudiaron las cuencas costeras ubicadas entre las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y la región del Biobío, con el propósito de estimar caudales máximos instantáneos anuales a partir de la información que se encuentra disponible.

En esta investigación, fueron empleados modelos empíricos mediante modelos de regresión para obtener caudales máximos instantáneos anuales y completar las series de registro; los modelos se ajustaron ingresando variables como caudales medios diarios máximos, parámetros morfométricos, precipitaciones medias y usos de suelo de las cuencas. Las variables más representativas en el ajuste fueron los caudales medios diarios máximos, seguido de las precipitaciones medias de días anteriores a la crecida máxima. Finalmente, luego de completar las series de registro de caudales máximos instantáneos anuales en las cuencas costeras durante el periodo de estudio, se aplicó el análisis de frecuencia con diferentes funciones de densidad de probabilidad eligiendo aquellas con mejor rendimiento en las pruebas de bondad de ajuste Chi-cuadrado y Kolmogórov-Smirnov, siendo las distribuciones Gumbel y Gamma de dos parámetros las de mejor ajuste, y con ellas se estimaron los caudales máximos instantáneos asociados a los periodos de retorno entre 2 y 100 años.

## **ABSTRACT**

In the field of hydrology, estimating design flows is essential for the construction of hydraulic infrastructures, that ensure proper functioning in the event of extreme magnitude occurrences, thereby preventing the collapse or failure of structures and avoiding potential harm to people and economic losses. However, in Chile, it has been observed that historical records of maximum annual instantaneous flows are incomplete or scarce, which complicates studies in various areas of the country. Coastal watersheds are not exempt from this issue; for this reason, coastal watersheds located between the regions of Libertador General Bernardo O'Higgins and Biobío, were studied with the aim of estimating maximum annual instantaneous flows based on the available information.

In this research, empirical models were employed using regression models to obtain maximum annual instantaneous flows and complete the record series; the models were adjusted by entering variables such as maximum daily average flows, morphometric parameters, average precipitation, and land use in the watersheds. The most representative variables in the adjustment were the maximum daily average flows, followed by the average precipitation from days prior to the maximum flood. Finally, after completing the record series of maximum annual instantaneous flows in the coastal watersheds during the study period, a frequency analysis was applied using different probability density functions, selecting those with the best performance in the Chi-square and Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit tests, with the Gumbel and two-parameter Gamma distributions showing the best fit, and with these, the maximum instantaneous flows associated with return periods between 2 and 100 years were estimated.

## DEDICATORIA

*Dedicado a*

*Mi familia, en especial a mis padres, Verónica y Juan Carlos, por su apoyo incondicional, y enseñarme que la constancia y resiliencia son esenciales en la vida; a mis hermanos por alegrarme cada día y aconsejarme cuando lo he necesitado; a mis amigas y amigos por acompañarme en esta hermosa etapa; y a todos quienes en algún momento estuvieron para mí.*

*Gracias por todo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Durante los años de estudio en la universidad he aprendido y adquirido habilidades que en el futuro serán herramientas sólidas en mi desarrollo profesional. Quiero agradecer a todos los profesionales quienes en las aulas de clase compartieron genuinamente su conocimiento, brindando sabiduría y contribuyendo a mi formación profesional. Agradezco a la profesora Alejandra Stehr Gesche, por compartir su conocimiento y ser parte de esta investigación como mi profesor guía. También agradezco a la profesora Maricarmen Guerra Paris, quien formó parte de la comisión evaluadora en la investigación.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

|            |  |    |
|------------|--|----|
| CAPITULO 1 | INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| 1.1        | Motivación .....   | 1  |
| 1.2        | Objetivo general .....                                     | 2  |
| 1.3        | Objetivos específicos.....                                 | 2  |
| 1.4        | Pregunta de investigación.....                             | 2  |
| 1.5        | Metodología de trabajo.....                                | 2  |
| 1.6        | Principales resultados y conclusiones .....                | 3  |
| 1.7        | Organización de documento.....                             | 4  |
| CAPITULO 2 | REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA...   | 5  |
| 2.1        | Introducción .....   | 5  |
| 2.2        | Revisión de antecedentes y planteamiento del problema..... | 5  |
| 2.3        | Evaluación del desempeño .....                             | 7  |
| 2.4        | Pruebas de bondad de ajuste.....                           | 9  |
| 2.5        | Conclusiones .....   | 10 |
| CAPITULO 3 | MATERIALES Y METODOS .....                                 | 11 |
| 3.1        | Introducción .....   | 11 |
| 3.2        | Área de estudio.....                                       | 11 |
| 3.3        | Análisis de tendencia.....                                 | 13 |
| 3.3.1      | Fuentes de información .....                               | 13 |
| 3.3.2      | Análisis de Consistencia.....                              | 13 |
| 3.3.3      | Prueba de Homogeneidad.....                                | 14 |
| 3.3.4      | Prueba de Mann – Kendall .....                             | 14 |
| 3.3.5      | Pendiente de Sen .....                                     | 15 |
| 3.4        | Ajuste del modelo.....                                     | 16 |

|                            |  |    |
|----------------------------|--|----|
| 3.4.1                      | Morfometría de las cuencas.....                                | 16 |
| 3.4.2                      | Uso de suelo .....   | 18 |
| 3.4.3                      | Precipitación media diaria y precipitación media anual.....    | 18 |
| 3.4.4                      | Caudal medio diario y caudal máximo instantáneo anual.....     | 19 |
| 3.4.5                      | Métodos Empíricos .....  | 19 |
| 3.5                        | Validación del modelo .....                                    | 20 |
| 3.5.1                      | Medidas de bondad de ajuste .....                              | 21 |
| 3.6                        | Estimación de caudales máximos instantáneos.....               | 21 |
| 3.6.1                      | Análisis de frecuencia .....                                   | 22 |
| 3.6.2                      | Periodo de retorno .....                                       | 22 |
| 3.6.3                      | Funciones de densidad de probabilidad .....                    | 22 |
| 3.6.4                      | Pruebas de bondad de ajuste.....                               | 23 |
| 3.7                        | Conclusión.....  | 23 |
| CAPITULO 4 RESULTADOS..... |  | 24 |
| 4.1                        | Introducción .....   | 24 |
| 4.2                        | Revisión de la serie de precipitaciones y caudales.....        | 24 |
| 4.2.1                      | Información pluviométrica disponible .....                     | 24 |
| 4.2.2                      | Información fluviométrica disponible.....                      | 28 |
| 4.2.3                      | Selección de la serie pluviométrica y fluviométrica .....      | 31 |
| 4.3                        | Análisis de tendencias en los registros de precipitación ..... | 33 |
| 4.3.1                      | Análisis de consistencia del registro pluviométrico.....       | 33 |
| 4.3.2                      | Homogeneidad en las series pluviométricas .....                | 35 |
| 4.3.3                      | Resultados prueba Mann – Kendall en series pluviométricas..... | 36 |
| 4.4                        | Análisis de tendencias en los registros de caudal.....         | 39 |
| 4.4.1                      | Análisis de consistencia del registro fluviométrico.....       | 39 |
| 4.4.2                      | Homogeneidad en las series fluviométricas .....                | 39 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 4.4.3  | Resultados prueba Mann – Kendall en series fluviométricas ..... | 39 |
| 4.5  | Ajustes del modelo .....  | 42 |
| 4.5.1  | Cuencas utilizadas en el ajuste del modelo .....                | 42 |
| 4.5.2  | Morfometría de las cuencas.....                                 | 42 |
| 4.5.3  | Uso de suelo .....  | 44 |
| 4.6  | Resultados ajuste de los modelos .....                          | 45 |
| 4.6.1  | Resultados validación de los modelos.....                       | 46 |
| 4.6.2  | Modelos Ajustados.....  | 51 |
| 4.7  | Resultados estimación caudales máximos instantáneos.....        | 52 |
| 4.7.1  | Relleno de datos diarios .....                                  | 52 |
| 4.7.2  | Análisis de frecuencia .....                                    | 54 |
| 4.8  | Conclusión.....   | 61 |
| CAPITULO 5 CONCLUSIONES .....  |   | 62 |
| REFERENCIAS .....  |   | 63 |
| ANEXO1: Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible .....  |   | 66 |
| ANEXO2: Curvas doble acumuladas de algunas estaciones pluviométricas estudiadas.....   |   | 67 |
| ANEXO3: Prueba de homogeneidad de Pettit en estaciones pluviométricos y fluviométricos.....  |   | 71 |
| ANEXO4: Prueba de Mann – Kendall en la estación Lebu Essbio antes y después del punto de cambio.<br>.....  |   | 77 |
| ANEXO5: Prueba de Mann – Kendall, tendencias significativamente decrecientes en precipitaciones<br>acumuladas anuales, precipitaciones máximas anuales en 24 hrs, caudales medios anuales y caudales<br>máximos instantáneos anuales. .... |   | 78 |
| ANEXO6: Datos de caudales máximos instantáneos anuales observados vs simulados con los<br>diferentes modelos de regresión.....   |   | 84 |
| ANEXO7: Histogramas de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en series sin relleno<br>de datos. ....  |   | 94 |
| ANEXO8: Funciones de densidad de probabilidad acumulada en series sin relleno de datos. ....   |   | 96 |

|  |    |
|--|----|
| ANEXO9: Funciones de densidad de probabilidad acumulada en series completas..... | 98 |
|--|----|

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| TABLA 3-1. CARACTERÍSTICAS DE RELIEVE DE LAS CUENCAS. ....   | 17 |
| TABLA 3-2. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS. ....  | 17 |
| TABLA 3-3. MODELOS DE REGRESIÓN. ....  | 20 |
| TABLA 3-4. INTERPRETACIÓN DE LAS PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE. ....   | 23 |
| TABLA 4-1. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SITUADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....   | 24 |
| TABLA 4-2. ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS SITUADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....   | 28 |
| TABLA 4-3. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS.....  | 31 |
| TABLA 4-4. ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS.....  | 32 |
| TABLA 4-5. PRUEBA DE PETTIT, VALOR P DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.....   | 35 |
| TABLA 4-6. SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA PRUEBA DE MANN – KENDALL. ....  | 37 |
| TABLA 4-7. PRUEBA DE PETTIT, VALOR P DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS.....   | 39 |
| TABLA 4-8. ABREVIACIÓN DE LAS CUENCAS. ....  | 42 |
| TABLA 4-9. CARACTERÍSTICAS DE RELIEVE DE LAS CUENCAS. ....   | 43 |
| TABLA 4-10. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS. ....   | 43 |
| TABLA 4-11. PORCENTAJE DE LOS USOS DE SUELO.....   | 44 |
| TABLA 4-12. MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE. ....  | 46 |
| TABLA 4-13. MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE, VALIDACIÓN. ....  | 47 |
| TABLA 4-14. MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE EN LA VALIDACIÓN 2, APLICANDO LOS MODELOS<br>EMPÍRICOS DE LA CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A PENCO. ....                              | 49 |
| TABLA 4-15. MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE EN LA VALIDACIÓN 2, APLICANDO LOS MODELOS<br>EMPÍRICOS DE LA CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL.....                                | 50 |
| TABLA 4-16. ECUACIONES DE LOS MODELOS AJUSTADOS. ....  | 51 |
| TABLA 4-17. RESULTADOS VALOR P DE LAS PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE POR CADA FUNCIÓN DE<br>DENSIDAD DE PROBABILIDAD, SERIE SIN RELLENO DE DATOS. ....                        | 56 |
| TABLA 4-18. RESULTADOS VALOR P DE LAS PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE POR CADA FUNCIÓN DE<br>DENSIDAD DE PROBABILIDAD, SERIE COMPLETA.....                                     | 57 |
| TABLA 4-19. RESULTADOS ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN DIFERENTES<br>PERIODOS DE RETORNO, EN LAS SERIES SIN EL RELLENO DE DATOS Y LAS SERIES COMPLETAS..... | 58 |

**ÍNDICE DE FIGURAS**

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 3-1. CUENCAS COSTERAS UBICADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO. ....  | 12 |
| FIGURA 3-2. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL DE LA CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A PENCO. ....   | 16 |
| FIGURA 3-3. USOS DE SUELO “CATASTRO_RV_R08_2015”, REGIÓN DEL BIOBÍO. ....  | 18 |
| FIGURA 4-1. INFORMACIÓN PORCENTUAL DISPONIBLE DE LAS 28 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS ANALIZADAS. EL ORDEN DE LAS ESTACIONES CORRESPONDE AL ORDEN DE LA TABLA 4-1, EN LA PRIMERA POSICIÓN SE ENCUENTRA LA ESTACIÓN PICHILEMU Y EN LA POSICIÓN VIGÉSIMO-OCTAVA SE ENCUENTRA LA ESTACIÓN TIRÚA. ....   | 26 |
| FIGURA 4-2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS PERTENECIENTES A LAS CUENCAS COSTERAS ENTRE LA REGIÓN LIBERTADOR GENERAL BERNARDO O’HIGGINS HASTA LA REGIÓN DEL BIOBÍO. ....   | 27 |
| FIGURA 4-3. INFORMACIÓN PORCENTUAL DISPONIBLE PARA LAS 15 ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS ANALIZADAS. EL ORDEN DE LAS ESTACIONES CORRESPONDE AL ORDEN DE LA TABLA 4-2, EN LA PRIMERA POSICIÓN SE ENCUENTRA LA ESTACIÓN ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA Y EN LA QUINCEAVA POSICIÓN SE ENCUENTRA LA ESTACIÓN RÍO LLEU-LLEU EN DESAGUE LAGO LLEU-LLEU. ....                                      | 29 |
| FIGURA 4-4. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS PERTENECIENTES A LAS CUENCAS COSTERAS ENTRE LA REGIÓN LIBERTADOR GENERAL BERNARDO O’HIGGINS HASTA LA REGIÓN DEL BIOBÍO. ....   | 30 |
| FIGURA 4-5. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y FLUVIOMÉTRICAS INCLUIDAS EN EL ANÁLISIS DEL ESTUDIO. ....  | 33 |
| FIGURA 4-6. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE LA ESTACIÓN LOLOL HACIENDA. ....   | 34 |
| FIGURA 4-7. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE LA ESTACIÓN ILOCA ESSAM. ....  | 34 |
| FIGURA 4-8. PUNTO DE CAMBIO ESTACIÓN LEBU ESSBIO. ....   | 36 |
| FIGURA 4-9. LA FIGURA MUESTRA LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS QUE PRESENTARON TENDENCIAS SIGNIFICATIVAS INDICANDO LOS RANGOS DE LA PENDIENTE DE SEN CALCULADA CON UN INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95% (A) RESULTADOS PRECIPITACIÓN ACUMULADA ANUAL (B) RESULTADOS PERIODO OTOÑO/INVIERNO (C) RESULTADOS PERIODO PRIMAVERA/VERANO (D) RESULTADOS PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL EN 24 HRS. .... | 38 |
| FIGURA 4-10. LA FIGURA MUESTRA LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS QUE PRESENTARON TENDENCIAS SIGNIFICATIVAS INDICANDO LOS RANGOS DE LA PENDIENTE DE SEN CALCULADA CON UN  |    |

|  |    |
|--|----|
| INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95% (A) RESULTADOS CAUDAL MEDIO ANUAL (B) RESULTADOS CAUDAL MEDIO PERIODO OTOÑO/INVIERNO (C) RESULTADOS CAUDAL MEDIO PERIODO PRIMAVERA/VERANO (D) RESULTADOS CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL. ....              | 41 |
| FIGURA 4-11. MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL DE LAS CUENCAS.....  | 43 |
| FIGURA 4-12. USOS DE SUELO EN LAS CUENCAS.....   | 45 |
| FIGURA 4-13. CUENCAS QUE FORMAN PARTE DE LA VALIDACIÓN 2. ....   | 48 |
| FIGURA 4-14. CUENCA QUE FORMA PARTE DE LA VALIDACIÓN 2. ....   | 49 |
| FIGURA 4-15. DATOS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS REGISTRADOS Y RELLENADOS (A) CUENCA ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA (B) CUENCA RÍO LOANCO EN DESEMBOCADURA (C) CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A PENCO (D) CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL. .... | 53 |
| FIGURA 4-16. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA Y FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD EN LA CUENCA ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA, EN LA SERIE COMPLETA.....   | 54 |
| FIGURA 4-17. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA Y FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD EN LA CUENCA RÍO LOANCO EN DESEMBOCADURA, EN LA SERIE COMPLETA.....  | 55 |
| FIGURA 4-18. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA Y FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD EN LA CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A PENCO, EN LA SERIE COMPLETA. ....   | 55 |
| FIGURA 4-19. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA Y FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD EN LA CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL, EN LA SERIE COMPLETA. ....  | 56 |
| FIGURA 4-20. CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN LA CUENCA ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA ASOCIADO A LOS PERIODOS DE RETORNO $T = 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50$ Y 100 AÑOS, SERIE COMPLETA. ....  | 59 |
| FIGURA 4-21. CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN LA CUENCA RÍO LOANCO EN DESEMBOCADURA ASOCIADO A LOS PERIODOS DE RETORNO $T = 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50$ Y 100 AÑOS, SERIE COMPLETA. ....   | 60 |
| FIGURA 4-22. CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN LA CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A PENCO ASOCIADO A LOS PERIODOS DE RETORNO $T = 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50$ Y 100 AÑOS, SERIE COMPLETA. ....   | 60 |
| FIGURA 4-23. CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN LA CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL ASOCIADO A LOS PERIODOS DE RETORNO $T = 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50$ Y 100 AÑOS, SERIE COMPLETA. ....  | 61 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|   |    |
|---|----|
| ANEXO 2-1. CURVA DOBLE ACUMULADA DE LA ESTACIÓN NILAHUE BARAHONA. ....  | 67 |
| ANEXO 2-2. CURVA DOBLE ACUMULADA DE LA ESTACIÓN GUALLECO. ....  | 68 |
| ANEXO 2-3. CURVA DOBLE ACUMULADA DE LA ESTACIÓN NONGUÉN ESSBIO. ....  | 68 |
| ANEXO 2-4. CURVA DOBLE ACUMULADA DE LA ESTACIÓN RAFAEL. ....  | 69 |
| ANEXO 2-5. CURVA DOBLE ACUMULADA DE LA ESTACIÓN ANDALIÉN. ....  | 69 |
| ANEXO 2-6. CURVA DOBLE ACUMULADA DE LA ESTACIÓN LAS PATAGUAS. ....  | 70 |
| ANEXO 2-7. CURVA DOBLE ACUMULADA DE LA ESTACIÓN CARRIEL SUR. ....   | 70 |
| ANEXO 3-1. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN CARRIEL SUR. ....   | 71 |
| ANEXO 3-2. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN CONTULMO. ....  | 71 |
| ANEXO 3-3. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN DICHATO. ....   | 72 |
| ANEXO 3-4. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN EL MEMBRILLO. ....  | 72 |
| ANEXO 3-5. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN GUALLECO. ....  | 73 |
| ANEXO 3-6. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN PUMANQUE. ....  | 73 |
| ANEXO 3-7. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN NILAHUE BARAHONA. ....  | 74 |
| ANEXO 3-8. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN RANGUILI. ....  | 74 |
| ANEXO 3-9. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN PUTU. ....  | 75 |
| ANEXO 3-10. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN CAÑETE. ....   | 75 |
| ANEXO 3-11. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN RÍO ANDALIÉN CAMINO A PENCO. ...   | 76 |
| ANEXO 3-12. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE PETTIT EN ESTACIÓN LEBU ESSBIO. ....  | 76 |
| ANEXO 4-1. (A) NO SE DETECTA TENDENCIA DURANTE EL PERIODO 1980 – 2006 (B) LA TENDENCIA<br>DECRECIENTE DESPUÉS DEL PUNTO DE CAMBIO. .... | 77 |
| ANEXO 4-2. PRUEBA MANN - KENDALL EN LA ESTACIÓN LEBU ESSBIO EN SU REGISTRO HISTÓRICO,<br>TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE. .... | 77 |
| ANEXO 5-1. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE, ESTACIÓN NILAHUE BARAHONA. ....  | 78 |
| ANEXO 5-2. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE EN PP MÁX 24 HRS, ESTACIÓN LOLOL<br>HACIENDA. ....                                  | 78 |
| ANEXO 5-3. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE, ESTACIÓN EL MEMBRILLO. ....  | 79 |
| ANEXO 5-4. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE, ESTACIÓN PUMANQUE. ....  | 79 |
| ANEXO 5-5. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE, ESTACIÓN RANGUILI. ....  | 80 |
| ANEXO 5-6. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE, ESTACIÓN LA PALMA. ....  | 80 |

|  |    |
|--|----|
| <i>ANEXO 5-7. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE, ESTACIÓN GUALLECO. ....</i>  | 81 |
| <i>ANEXO 5-8. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE, ESTACIÓN NONGUÉN ESSBIO. ....</i>  | 81 |
| <i>ANEXO 5-9. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE, ESTACIÓN RÍO ANDALIÉN CAMINO A PENCO. ....</i>   | 82 |
| <i>ANEXO 5-10. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE EN CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL, ESTACIÓN RÍO ANDALIÉN CAMINO A PENCO. ....</i>                               | 82 |
| <i>ANEXO 5-11. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE, ESTACIÓN RÍO LLEU-LLEU EN DESAGUE LAGO LLEU-LLEU. ....</i>  | 83 |
| <i>ANEXO 5-12. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE EN CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL, ESTACIÓN ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA. ....</i>                            | 83 |
| <i>ANEXO 5-13. TENDENCIA SIGNIFICATIVAMENTE DECRECIENTE EN CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL, ESTACIÓN RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL. ....</i>                                | 84 |
| <i>ANEXO 6-1. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL, CUENCA ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA. ....</i>                      | 84 |
| <i>ANEXO 6-2. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE, CUENCA ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA. ....</i>             | 85 |
| <i>ANEXO 6-3. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL LOGARÍTMICA, CUENCA ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA. ....</i>          | 85 |
| <i>ANEXO 6-4. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL LOGARÍTMICA MÚLTIPLE, CUENCA ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA. ....</i> | 86 |
| <i>ANEXO 6-5. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL EXPONENCIAL, CUENCA ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA. ....</i>          | 86 |
| <i>ANEXO 6-6. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL, CUENCA RÍO LOANCO EN DESEMBOCADURA. ....</i>                         | 87 |
| <i>ANEXO 6-7. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE, CUENCA RÍO LOANCO EN DESEMBOCADURA. ....</i>                | 87 |
| <i>ANEXO 6-8. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL LOGARÍTMICA, CUENCA RÍO LOANCO EN DESEMBOCADURA. ....</i>             | 88 |
| <i>ANEXO 6-9. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL LOGARÍTMICA MÚLTIPLE, CUENCA RÍO LOANCO EN DESEMBOCADURA. ....</i>    | 88 |
| <i>ANEXO 6-10. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL EXPONENCIAL, CUENCA RÍO LOANCO EN DESEMBOCADURA. ....</i>            | 89 |

|   |    |
|---|----|
| ANEXO 6-11. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL, CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A Penco. ....                      | 89 |
| ANEXO 6-12. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE, CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A Penco. ....             | 90 |
| ANEXO 6-13. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL LOGARÍTMICA, CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A Penco. ....          | 90 |
| ANEXO 6-14. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL LOGARÍTMICA MÚLTIPLE, CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A Penco. .... | 91 |
| ANEXO 6-15. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL EXPONENCIAL, CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A Penco. ....          | 91 |
| ANEXO 6-16. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL, CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL. ....                       | 92 |
| ANEXO 6-17. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE, CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL. ....              | 92 |
| ANEXO 6-18. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL LOGARÍTMICA, CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL. ....           | 93 |
| ANEXO 6-19. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN LINEAL LOGARÍTMICA MÚLTIPLE, CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL. ....  | 93 |
| ANEXO 6-20. CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO ANUAL OBSERVADO VS SIMULADO CON EL MÉTODO REGRESIÓN EXPONENCIAL, CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL. ....                  | 94 |
| ANEXO 7-1. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA Y FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD EN LA CUENCA ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA, SERIE SIN RELLENO DE DATOS. ....       | 94 |
| ANEXO 7-2. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA Y FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD EN LA CUENCA RÍO LOANCO EN DESEMBOCADURA, SERIE SIN RELLENO DE DATOS. ....          | 95 |
| ANEXO 7-3. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA Y FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD EN LA CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A Penco, SERIE SIN RELLENO DE DATOS. ....          | 95 |
| ANEXO 7-4. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA Y FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD EN LA CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL, SERIE SIN RELLENO DE DATOS. ....           | 96 |
| ANEXO 8-1. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA EN LA CUENCA ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA, SERIE SIN RELLENO DE DATOS. ....                                      | 96 |
| ANEXO 8-2. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA EN LA CUENCA RÍO LOANCO EN DESEMBOCADURA, SERIE SIN RELLENO DE DATOS. ....   | 97 |

---

|  |            |
|--|------------|
| <i>ANEXO 8-3. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA EN LA CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A PENCO, SERIE SIN RELLENO DE DATOS. ....</i> | <i>97</i>  |
| <i>ANEXO 8-4. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA EN LA CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL, SERIE SIN RELLENO DE DATOS. ....</i>  | <i>98</i>  |
| <i>ANEXO 9-1. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA EN LA CUENCA ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA, SERIE COMPLETA. ....</i>          | <i>98</i>  |
| <i>ANEXO 9-2. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA EN LA CUENCA RÍO LOANCO EN DESEMBOCADURA, SERIE COMPLETA. ....</i>             | <i>99</i>  |
| <i>ANEXO 9-3. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA EN LA CUENCA RÍO ANDALIÉN CAMINO A PENCO, SERIE COMPLETA. ....</i>             | <i>99</i>  |
| <i>ANEXO 9-4. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA EN LA CUENCA RÍO BUTAMALAL EN BUTAMALAL, SERIE COMPLETA. ....</i>              | <i>100</i> |

## CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación

En hidrología la estimación de caudales de diseño es esencial para la gestión de inundaciones y el diseño de infraestructuras hidráulicas (Jimeno-Sáez et al. 2017), garantizando que las infraestructuras sean adecuadas, previniendo su colapso o falla, y de este modo, evitar potenciales daños a las personas y pérdidas económicas. Los caudales máximos instantáneos de diseño son clave para resolver una serie de problemas de ingeniería (Ding & Haberlandt, 2017). Sin embargo, disponer de registros históricos de caudales máximos instantáneos anuales constituye una problemática importante, por la insuficiente o nula cantidad de información en las series de registros, o estas son demasiado cortas.

Las estaciones de monitoreo de caudales con registros generalmente cuentan con datos de caudales medios diarios, los que no reflejan adecuadamente la magnitud de los eventos extremos (Ding et al. 2015), ya que tienden a subestimar la magnitud de las crecidas. El uso de estos puede generar caudales de diseño poco representativos a diferencia de los caudales máximos instantáneos, especialmente en cuencas pequeñas, causando posibles diseños insuficientes en la capacidad de las infraestructuras (Fill & Steiner, 2003).

Se han estudiado diferentes métodos para estimar caudales máximos instantáneos anuales teniendo como base los datos de caudales medios diarios máximos anuales, contribuyendo en mejorar el conocimiento para la gestión del riesgo de crecidas (Ding et al. 2015). Asimismo, como los caudales máximos instantáneos son una variable hidrológica, se representan a través de sucesiones cronológicas y su comportamiento puede ser analizado en el tiempo, siendo posible determinar la magnitud de estos eventos asociado a diferentes periodos de retorno ( $T = 2, 5, 10, 20, 50$  y  $100$  años), y de esta manera, estimar caudales de diseño eficientes.

Esta investigación estudia las cuencas costeras de la zona centro-sur de Chile, proporcionando información de utilidad para conocer y comprender los comportamientos en aquellas cuencas. Además, la estimación de caudales máximos instantáneos anuales y de los caudales asociados a diferentes periodos de retorno resultará útil en futuros estudios sobre modelaciones hidráulicas de

eventos extremos, contribuyendo en una mejor gestión de recursos hídricos y en la reducción de riesgos de inundación.

## **1.2 Objetivo general**

Estimación de caudales máximos instantáneos anuales asociados a diferentes periodos de retorno a partir de modelos generados y análisis de frecuencia.

## **1.3 Objetivos específicos**

- I. Identificar tendencias en los datos históricos de precipitación y caudal en cuencas costeras ubicadas en la zona de estudio mediante análisis estadísticos.
- II. Generar modelos predictivos robustos que permitan estimar caudales máximos instantáneos anuales a partir de caudales medios diarios máximos anuales.
- III. Aplicar métodos estadísticos con el propósito de estimar caudales máximos instantáneos con diferentes periodos de retorno en las cuencas costeras de la zona centro-sur de Chile.

## **1.4 Pregunta de investigación**

¿Es posible estimar caudales máximos instantáneos en cuencas costeras de la zona centro-sur de Chile a partir de caudales medios diarios máximos?

## **1.5 Metodología de trabajo**

En el desarrollo de la memoria, se realiza una revisión bibliográfica sobre los diferentes métodos que estiman caudales máximos instantáneos anuales a partir de caudales medios diarios máximos y otras variables relevantes de las cuencas, determinando la metodología a utilizar dependiendo de la información que está disponible en las cuencas del área de estudio.

Seguidamente, se extraen y analizan los registros históricos de estaciones pluviométricas y fluviométricas ubicadas en las cuencas costeras de la zona centro-sur del país desde la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), para luego analizar sus comportamientos y determinar tendencias significativas.

Posterior al análisis de tendencia, la información recopilada de las estaciones fluviométricas se utiliza para ajustar y validar métodos empíricos que permiten estimar caudales máximos instantáneos anuales, eligiendo los modelos con mejores resultados en las medidas de bondad de ajuste.

Luego de esto, se completa la serie de caudales máximos instantáneos anuales en los años sin registro y se aplica un análisis de frecuencia utilizando funciones de distribución de probabilidad adecuados para valores extremos, eligiendo aquellas distribuciones con los mejores resultados en las pruebas de bondad de ajuste Chi-cuadrado y Kolmogórov-Smirnov, estimando finalmente los caudales máximos instantáneos asociado a periodos de retorno entre 2 y 100 años.

## **1.6 Principales resultados y conclusiones**

En los resultados del análisis de tendencia se observó una considerable disminución de las precipitaciones y de los caudales en las cuencas costeras, ninguna estación presentó tendencias significativas al aumento, ni siquiera en el caso de las magnitudes de los eventos extremos.

Con respecto al ajuste de los modelos, estos fueron realizados sólo en cuatro cuencas costeras por la poca disponibilidad de información presentada en las estaciones restantes, sin embargo, fue posible ajustar adecuadamente los modelos con óptimos resultados, logrando llenar los años sin información con

Finalmente, se estimaron los caudales máximos instantáneos para los diferentes periodos de retorno, mediante la aplicación del análisis de frecuencia, eligiendo aquellas distribuciones que más se ajustaron a los datos y tuvieron buenos resultados en las pruebas de bondad de ajuste Chi-cuadrado y Kolmogórov-Smirnov.

## **1.7 Organización de documento**

El presente documento consta de cinco capítulos. El primer capítulo menciona la motivación y proporciona los objetivos tanto general como específicos. El segundo capítulo resume el contexto general sobre el desarrollo de diversos métodos que determinan caudales máximos instantáneos anuales a partir de caudales medios diarios máximos anuales, incorporando múltiples variables representativas de las cuencas.

El tercer capítulo presenta el área de estudio y la metodología aplicada en la investigación, describiendo los métodos utilizados para el análisis de frecuencia y el desarrollo del ajuste de los modelos. También se detallan los programas utilizados.

En el cuarto capítulo se presentan los principales resultados del análisis de frecuencia, el ajuste de los modelos más representativos y la estimación de los caudales máximos instantáneos asociado a los periodos de retorno analizados.

El quinto capítulo muestra las conclusiones, destacando los principales resultados obtenidos, y la importancia de la investigación.

## **CAPITULO 2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se realizó una revisión de estudios que se encuentran en la literatura, que han implementado diversas metodologías para estimar caudales máximos instantáneos a partir de caudales medios diarios. Determinando aquellas que son más adecuadas a los objetivos, desafíos y dificultades de esta investigación.

### **2.2 Revisión de antecedentes y planteamiento del problema**

En hidrología la información fluviométrica es importante en la gestión de los recursos hídricos y la estimación de caudales de diseño en la construcción de infraestructuras hidráulicas. Un diseño adecuado contribuye a prevenir daños a las personas y pérdidas económicas. Para lograr un diseño eficiente de las obras, es necesario utilizar caudales máximos instantáneos en lugar de los caudales medios diarios máximos. Generalmente, las estaciones fluviométricas proporcionan caudales medios diarios en sus registros; sin embargo, el uso de estos datos en estudios de inundación puede subestimar las crecidas de diseño (Fill & Steiner, 2003), lo que provocaría diseños insuficientes en la capacidad de las infraestructuras.

La estimación del caudal máximo a partir de los caudales medios diarios siempre ha representado un desafío en hidrología (Sangal, 1983). A lo largo del tiempo, numerosos estudios han desarrollado e implementado diferentes metodologías para estimar estos valores, según Chen et al. (2017) en la literatura se han desarrollado tres grupos de métodos.

El primer grupo establece una relación entre caudales máximos instantáneos anuales, caudales medios diarios máximos y características geomorfológicas de las cuencas. Fuller (1914) fue el primer estudio conocido en desarrollar una relación entre caudales máximos instantáneos anuales a partir de caudales medios diarios máximos y el área de drenaje. Posteriores investigaciones no solo se limitaron al uso de un parámetro morfométrico, sino que incorporaron diversos descriptores físicos e hidrológicos de las cuencas, como Canuti & Moisello (1982); Silva & Tucci (1998); Ding et al. (2015). Seguido del

mismo enfoque, Taguas et al. (2008) incorporó la precipitación media anual, resultando útil su ecuación propuesta en la estimación de caudales máximos instantáneos anuales en cuencas mediterráneas en España.

El segundo grupo es aquel que genera modelos hidrológicos de desagregación de flujos y enfoque basado en aprendizaje automático. Este grupo requiere de una cantidad significativa de información y/o mayor esfuerzo en la construcción de los modelos para la estimación de caudales máximos, como lo menciona Chen et al. (2017), lo que dificulta el uso de este enfoque en cuencas con información limitada o que no disponen de registros de caudales. Las redes neuronales artificiales (ANN, por sus siglas en inglés) y los sistemas de inferencia neurodifusa adaptativa (ANFIS, por sus siglas en inglés) son algunos de los métodos tradicionales de este enfoque, estudios como el de Dastorani et al. (2013); Jimeno-Sáez et al. (2017); Senent-Aparicio et al. (2019); Khaliq (2024), han aplicado técnicas de aprendizaje automático.

El tercer grupo estima caudales máximos instantáneos en función de las secuencias de caudales medios diarios antes, durante y después de la crecida máxima, generando hidrograma de descarga del flujo. Estudios que pertenecen a este enfoque son Langbein (1944); Sangal (1983); Chen et al. (2017).

Por otro lado, en Chile por la escasa disponibilidad de registros fluviométricos, la Dirección General de Aguas (DGA) en el año 1995 desarrolló el “Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos sin información fluviométrica” (DGA, 1995). El manual permite estimar caudales máximos instantáneos a partir de precipitaciones diarias máximas de crecidas, coeficientes empíricos y curvas de frecuencias regionales, mediante las fórmulas de Verni y King modificada, versión generalizada de la formula original, el método DGA-AC y la fórmula racional, para periodos de retorno de hasta 100 años, proporcionando caudales de diseño para obras hidráulicas de pequeña a mediana envergadura.

En esta investigación, la estimación de caudales máximos instantáneos anuales se basará en modelos empíricos asociados con el primer grupo mencionado anteriormente, por la capacidad para generar buenas estimaciones en situaciones con datos limitados. Descartando los métodos del segundo grupo, que tienen como principal inconveniente un prolongado tiempo de desarrollo y requiere de capacidades computacionales mucho mayores para encontrar estructuras óptimas en las redes neuronales, lo que exige más recursos que las fórmulas empíricas (Jimeno-Sáez et al. 2017). Mientras

que basarse en el tercer grupo, es necesario conocer la forma de la tormenta y del hidrograma unitario de cada cuenca (Muñoz et al. 2012).

### 2.3 Evaluación del desempeño

En el desarrollo de los modelos que estiman caudales máximos instantáneos anuales, es fundamental evaluar su desempeño mediante diversas medidas de bondad de ajuste. Estas permiten determinar la similitud entre los valores simulados por los modelos y los valores observados. Aquellos modelos que presentan valores óptimos en las medidas de bondad de ajuste son considerados como los modelos más representativos. Algunas de las medidas de bondad de ajuste mayormente utilizadas en las investigaciones son el coeficiente de determinación, la eficiencia de Nash-Sutcliffe y el porcentaje de sesgo.

#### Coeficiente de determinación ( $R^2$ )

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) mide qué tan bien se ajusta la línea de regresión observada versus simulada a una coincidencia ideal (Gassman et al. 2007), el rango varía entre 0 y 1. Si el valor de  $R^2$  es 0 significa que no existe correlación y un  $R^2$  igual a 1 significa que la dispersión de la simulación es igual a la de la observación (Krause et al. 2005). Su ecuación es:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \mu_o)(S_i - \mu_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \mu_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \mu_s)^2}} \right]^2 \quad (2.1)$$

Donde,  $O_i$  es el caudal máximo instantáneo anual observado,  $S_i$  es el caudal máximo instantáneo anual simulado,  $\mu_o$  y  $\mu_s$  corresponden a la media de los valores observados y simulados, respectivamente.

### Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970) varía entre  $-\infty$  a 1 e indica qué tan bien los datos simulados coinciden con los datos observados en una línea de regresión con pendiente igual a 1. Un NSE igual a 1 refleja un ajuste perfecto entre los datos observados y simulados, en cambio, un NSE inferior a cero indica que el valor medio observado es mejor predictor que el valor simulado indicando un rendimiento inaceptable, y valores de NSE entre 0 y 1 se consideran aceptables (Moriassi et al. 2007). Su ecuación es:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \mu_o)^2} \quad (2.2)$$

Donde,  $O_i$  es el caudal máximo instantáneo anual observado,  $S_i$  es el caudal máximo instantáneo anual simulado y  $\mu_o$  es la media de los valores observados.

### Porcentaje de sesgo (PBIAS)

El porcentaje de sesgo mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que los datos observados expresado como un porcentaje (Moriassi et al. 2007). El valor óptimo de PBIAS es 0.0 (Arriagada et al. 2021), valores de pequeña magnitud indican buen ajuste del modelo. Los valores positivos de PBIAS indican sobreestimación y los valores negativos indican subestimación. Su ecuación es:

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n O_i - S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] * 100 \quad (2.3)$$

Donde,  $O_i$  es el caudal máximo instantáneo anual observado,  $S_i$  es el caudal máximo instantáneo anual simulado.

## 2.4 Pruebas de bondad de ajuste

En hidrología, el análisis de frecuencia es un método estadístico ampliamente utilizado, el cual establece una relación entre la magnitud de los eventos extremos y su frecuencia mediante funciones de densidad de probabilidad. La estimación de los caudales de magnitudes extremas en diversos periodos de retorno es el paso principal del análisis de frecuencia de crecidas, y su precisión influye directamente en la gestión y planificación de las estructuras hidráulicas, para conseguir estimaciones mayormente confiables en el análisis, se aplican pruebas de bondad de ajuste, que generalmente se utilizan para seleccionar la distribución más adecuada, en lugar de rechazar una distribución en particular (Shah & Pan, 2024). A continuación, se explican las pruebas de bondad de ajuste Chi-cuadrado y Kolmogórov-Smirnov, pruebas empleadas en esta investigación.

### Prueba Chi-cuadrado ( $\chi^2$ )

La prueba Chi-cuadrado ( $\chi^2$ ) es una prueba estadística que compara las frecuencias observadas con las esperadas, y detecta diferencias significativas entre ellas. Su estadístico de prueba es:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2.4)$$

Donde,  $K = 1 + 1.45 \ln(N)$ ,  $N$  es el tamaño de la muestra,  $K$  es la cantidad de agrupaciones,  $O_i$  y  $E_i$  son las frecuencias observadas y esperadas, respectivamente.

### Prueba Kolmogórov-Smirnov

La prueba de Kolmogórov-Smirnov es una prueba estadística no paramétrica, que evalúa si una muestra proviene de una distribución continua específica. Esta prueba compara una función teórica acumulada con la función empírica acumulada de una muestra. Su estadístico de prueba se define como:

$$D = \text{máx}|F_e(x_i) - F(x_i)| \quad (2.5)$$

Donde,  $i = 1, \dots, N$ .  $F_e(x_i)$  es la función empírica acumulada de la muestra y  $F(x_i)$  es la función teórica acumulada.

## 2.5 Conclusiones

En este capítulo se explicaron los tres enfoques que se han desarrollado en la literatura para determinar caudales máximos instantáneos a partir de caudales medios diarios máximos. El enfoque elegido en esta investigación corresponde al primer grupo que se basa en modelos empíricos, el segundo y tercer grupo requieren de una mayor capacidad computacional y contar con información más detallada para su desarrollo, siendo esto una problemática en zonas con registros limitados. Además, se menciona la importancia de la evaluación del desempeño de los modelos, y de las pruebas de bondad de ajuste que ayudan a estimar caudales de crecidas eficientes.

## CAPITULO 3

## MATERIALES Y METODOS

### 3.1 Introducción

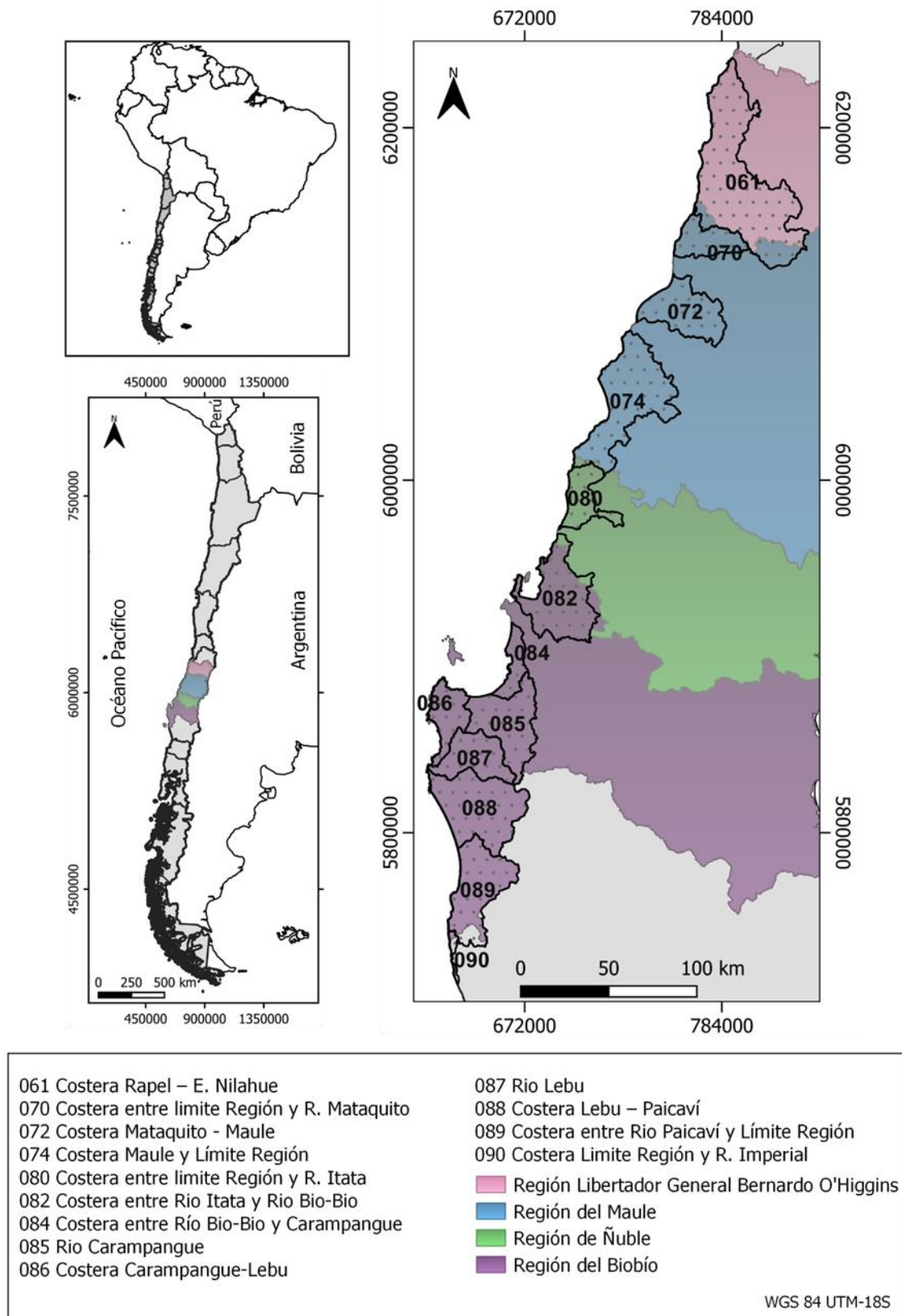
En este capítulo se da a conocer el área de estudio, detallando la ubicación de las diferentes cuencas costeras que se encuentran en la zona centro-sur de Chile desde la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins hasta la Región del Biobío. Se expone a su vez la metodología utilizada para detectar tendencias de caudales y precipitación en las series históricas disponibles. También dentro del capítulo se explica la metodología empleada en el ajuste de los modelos para la estimación de caudales máximos instantáneos anuales indicando los diferentes métodos empíricos utilizados, las variables de entrada, las medidas de bondad de ajuste utilizadas, y el análisis de frecuencia para estimar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno, proporcionando un marco teórico riguroso de trabajo.

### 3.2 Área de estudio

El área de estudio abarca desde la región Libertador General Bernardo O'Higgins hasta la región del Biobío, concretamente corresponde a cuencas costeras que se encuentran ubicadas entre los paralelos 33°54' hasta 38°48' Latitud Sur. Esta zona se distingue por su clima mediterráneo, con veranos cálidos y secos e inviernos lluviosos.

Las cuencas costeras ubicadas dentro de la zona de estudio presentan régimen hidrológico de tipo pluvial, este régimen se caracteriza por la caída de precipitación en forma líquida sobre la cuenca, y los caudales elevados se concentran en unos pocos días del mes cuando ocurren precipitaciones (Stowhas, 2017).

En la Figura 3-1 se muestra la zona de estudio indicando todas las cuencas costeras que se encuentran entre la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins a la Región del Biobío.



**Figura 3-1.** Cuencas costeras ubicadas en el área de estudio.

### 3.3 Análisis de tendencia

#### 3.3.1 Fuentes de información

La información de las series históricas de caudales y precipitaciones se extraen de las estaciones ubicadas en las cuencas costeras dentro del área de estudio, mediante la página oficial de la Dirección General de Aguas (DGA)<sup>1</sup> y de servicios climáticos de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC)<sup>2</sup>.

#### 3.3.2 Análisis de Consistencia

En hidrología es necesario verificar la calidad de la información disponible en las estaciones que forman parte de un estudio, porque al momento de las mediciones los registros no están exentos a cambios, ya sea por alteraciones provenientes de la instalación, cambio de técnicas de medición, cambios en la ubicación de la sección de aforo, errores instrumentales, errores de lectura, entre otros. Debido a esto, la importancia de detectar aquellos cambios es fundamental para asegurar que las variaciones en las tendencias sean atribuibles a causas meteorológicas y no a los cambios ocasionados por la medición de los registros.

El método de las curvas doble acumuladas permite determinar aquellas inconsistencias en el registro al observar cambios de pendiente. El método consiste en graficar en el eje de las abscisas la suma acumulada promedio de una o más estaciones patrón y en el eje de las ordenadas la suma acumulada de la estación a analizar. Se utiliza la siguiente expresión:

$$P_c = \frac{m_c}{m_i} P_m \quad (3.1)$$

Donde,

$P_c$  : Valor Corregido

$P_o$  : Valor Medido

---

<sup>1</sup> MOP. Estadísticas Estaciones DGA, *estadística hidrológica en línea*, <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>

<sup>2</sup> DMC. Servicios climáticos, *red de estaciones banco de datos*, <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/menuTematicoEstaciones>

$m_c$  : Pendiente Consistente

$m_i$  : Pendiente del periodo a Corregir (Pendiente Inconsistente)

### 3.3.3 Prueba de Homogeneidad

La prueba de Pettitt (Pettitt, 1979) es una prueba no paramétrica adaptada a la prueba de Mann – Whitney, permite detectar puntos de cambio o discontinuidades en series de tiempo  $\{x_n, 1 \leq n \leq T\}$ . La prueba de Pettitt usa un estadístico  $U_{n,T}$  utilizado para probar que dos muestras  $x_1, \dots, x_n$  y  $x_{n+1}, \dots, x_T$  sean de la misma población (Muñiz, 2021). De presentar diferencias el punto de cambio ocurriría en el año  $n$ . La prueba de Pettitt maneja el concepto clásico estadístico de la hipótesis nula  $H_0$ , hipótesis alternativa  $H_1$  y nivel de significancia  $\alpha$  (Zavala et al. 2013). La hipótesis nula es aceptada cuando el valor p es superior al nivel de significancia, indicando que la serie es homogénea. En cambio, la hipótesis nula es rechazada cuando el valor p es inferior al nivel de significancia designado, detectando punto de cambio. La prueba de Pettit fue realizada por medio del complemento de análisis de datos XLSTAT de Excel. El estadístico de prueba  $K_n$  es:

$$K_n = \max_{1 \leq n \leq T} |U_{n,T}| \quad (3.2)$$

Donde,  $U_{n,T} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j)$

### 3.3.4 Prueba de Mann – Kendall

La prueba de Mann – Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) es un método no paramétrico que permite detectar tendencias crecientes o decrecientes en series de tiempo  $\{x_n, 1 \leq n \leq T\}$ . El método se basa en el cálculo de la función  $S$ , y la significancia estadística de la prueba se calcula con la varianza de  $S$ . La hipótesis nula es aceptada cuando la significancia estadística  $Z_{mk}$  es igual a cero señalando que no se detectan tendencias. En cambio, Si  $Z_{mk}$  es positivo se observa tendencia creciente, mientras que si  $Z_{mk}$  es negativo se observa tendencia decreciente. Para detectar tendencia significativa hacia un nivel de significancia  $\alpha$  la hipótesis nula se rechaza si  $|Z_{mk}|$  es mayor que  $Z_{1-\alpha/2}$  (Alves et al. 2015).

La función  $S$  se expresa de la siguiente manera:

$$S = \sum_{i=1}^{T-1} \sum_{j=i+1}^T \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3.3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{T(T-1)(2T+5) - \sum_{n=1}^T t_n(n)(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3.4)$$

La significancia estadística se calcula con la varianza de  $S$ .

$$Z_{mk} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{array} \right\} \quad (3.5)$$

\*  $t_n$  representa el número de uniones en la muestra  $n$  (Muñiz, 2021).

### 3.3.5 Pendiente de Sen

La pendiente de Sen (1968) es un método no paramétrico utilizado para determinar la magnitud de la pendiente en casos en donde se detectan tendencias. Se estima calculando todas las pendientes considerando los pares de datos.

$$Q_i = \frac{x_i - x_k}{j - k} ; i = 1, 2, \dots, m \quad (3.6)$$

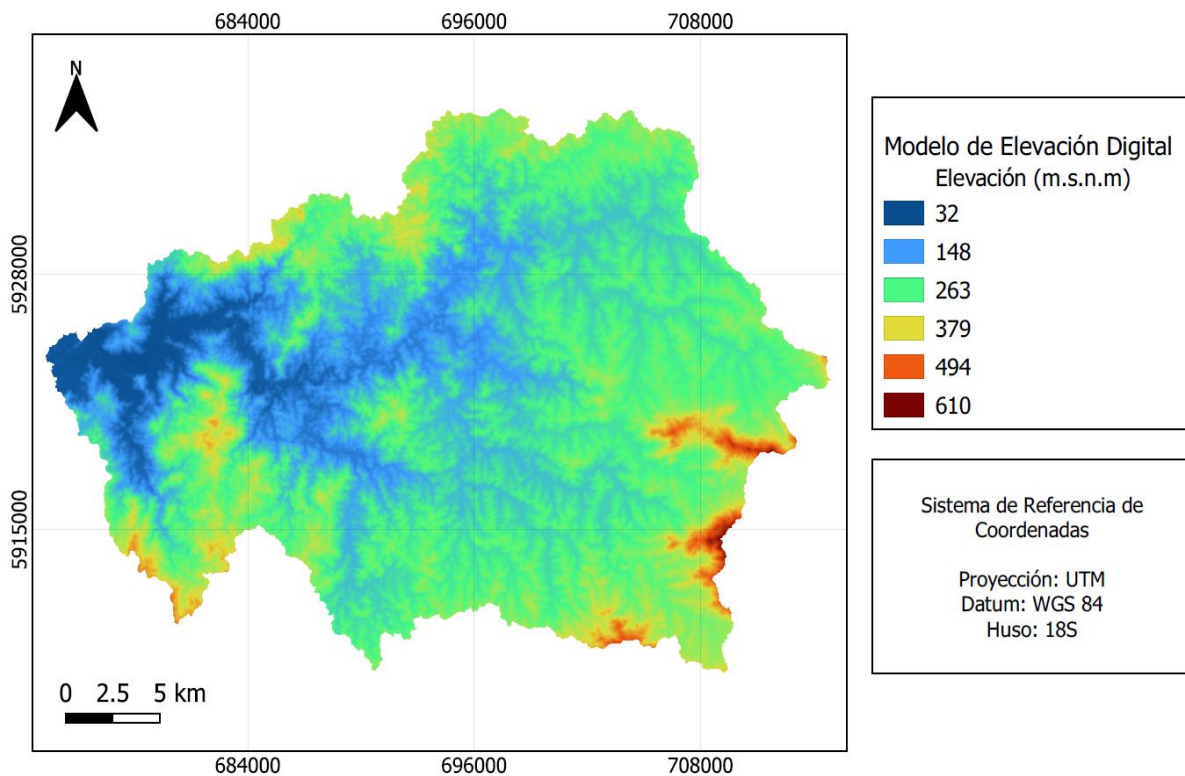
Donde,  $x_i$  y  $x_k$  son datos en el tiempo  $j$  y  $k$  ( $j > k$ ). Si la serie de tiempo tiene  $m$  valores, habrán  $M = m(m-1)/2$  pendientes estimadas  $Q_i$ , siendo el estimador de la pendiente de Sen la mediana de los  $M$  valores (Castro-Llanos & Carvajal-Escobar, 2013).

### 3.4 Ajuste del modelo

El ajuste del modelo se realizó para las estaciones fluviométricas que proporcionaron la mayor cantidad de información histórica disponible de caudales máximos instantáneos anuales y caudales medios diarios máximos anuales, considerando el 70% del registro para realizar el ajuste. A continuación, se presentan las distintas variables que se utilizan como datos de entrada en el ajuste de los modelos.

#### 3.4.1 Morfometría de las cuencas

El análisis de las características de relieve y parámetros morfométricos de las cuencas se obtuvieron utilizando modelos de elevación digital (DEM, en inglés) de alta resolución, obtenidos a través del satélite ALOS PALSAR de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Los DEM tienen una resolución de 12.5 x 12.5 m. En la Figura 3-2 se observa un modelo de elevación digital a modo ilustrativo.



**Figura 3-2.** Modelo de elevación digital de la cuenca Río Andalién camino a Penco.

Los parámetros utilizados se presentan en la Tabla 3-1 y Tabla 3-2. Estas variables se obtuvieron mediante QGIS a partir de los modelos de elevación digital.

**Tabla 3-1.** Características de relieve de las cuencas.

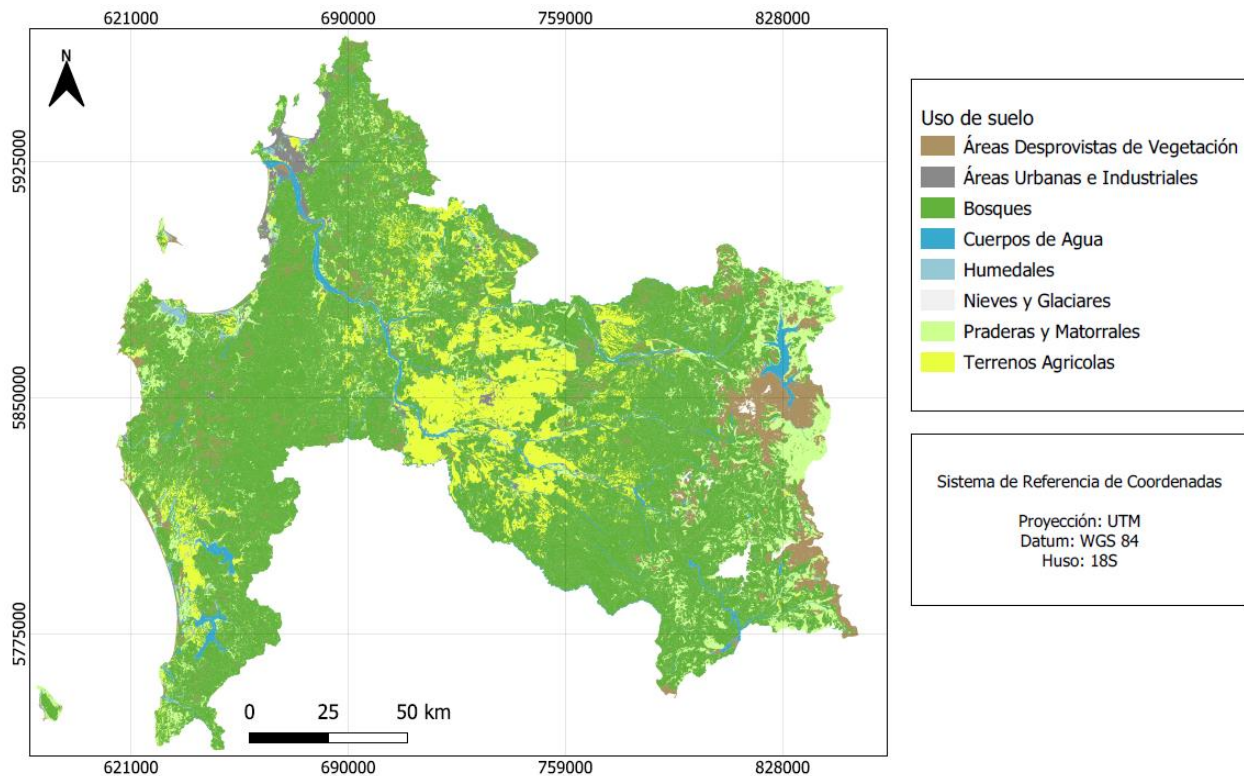
| Relieve         | Abreviación       | Unidad |
|-----------------|-------------------|--------|
| Cota máxima     | $C_{m\acute{a}x}$ | msnm   |
| Cota media      | $C_{media}$       | msnm   |
| Cota mínima     | $C_{min}$         | msnm   |
| Pendiente media | S                 | m/m    |

**Tabla 3-2.** Parámetros morfométricos.

| Parámetro                    | Abreviación | Ecuación  | Unidad          |
|------------------------------|-------------|---|-----------------|
| Área                         | A           | -   | km <sup>2</sup> |
| Perímetro                    | P           | -   | km              |
| Desnivel máximo de la cuenca | H           | $H = C_{m\acute{a}x} - C_{min}$                   | m               |
| Longitud de la cuenca        | L           | -   | km              |
| Longitud cauce principal     | $L_c$       | -   | km              |
| Longitud al centroide        | $L_{ca}$    | -   | km              |
| Índice de compacidad         | $I_c$       | $I_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$                  | -               |
| Factor de forma de Horton    | $K_f$       | $K_f = \frac{A}{L^2}$                             | -               |
| Índice de circularidad       | $K_c$       | $K_c = 4\pi \frac{A}{P^2}$                        | -               |
| Tiempo de concentración      | $t_c$       | $t_c = 0.95 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$ | hr              |

### 3.4.2 Uso de suelo

El uso de suelo se obtuvo desde el “Catastro de Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra” de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) para cada región perteneciente al área de estudio, descargado a partir de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) del Ministerio de Agricultura de Chile. Las coberturas cartográficas se encuentran en formato *shapefile*, como ejemplo en la Figura 3-3 se muestra los usos de suelo para la región del Biobío.



**Figura 3-3.** Usos de suelo “Catastro\_RV\_R08\_2015”, región del Biobío.

Los usos de suelo se calcularon de manera porcentual y se incorporaron como variables de entrada en el desarrollo del ajuste de los modelos para las cuencas que forman parte del estudio.

### 3.4.3 Precipitación media diaria y precipitación media anual

Las variables de precipitación ingresadas en el desarrollo del ajuste de los modelos corresponden a las precipitaciones medias diarias registradas hasta el séptimo día previo a la crecida máxima, obtenidos mediante la base de datos CAMELS-CL (Catchment Attributes and Meteorology for Large

Sample Studies, Chile Dataset) desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Las precipitaciones medias diarias se encuentran promediadas a escala de cuencas en base a productos grillados. En cuanto a la precipitación media acumulada anual, se calculó como la sumatoria de las precipitaciones medias diarias en los años del estudio.

#### **3.4.4 Caudal medio diario y caudal máximo instantáneo anual**

Los caudales medios diarios máximos y los caudales máximos instantáneos anuales se utilizaron en el desarrollo del ajuste de los modelos. Los datos se descargaron a través de la base de datos estadística hidrológica en línea de la Dirección General de Aguas (DGA)<sup>3</sup> descargando las series históricas de caudales medios diarios y caudales instantáneos (diarios) de las estaciones de monitoreo de caudal con el mayor porcentaje de registro durante el periodo de estudio. Mediante un código en el programa R se identificó el día en que se generó el caudal máximo instantáneo anual y su magnitud. A partir de esta información, se obtuvo la magnitud del caudal medio diario máximo del día en que se generó la crecida máxima anual.

El caudal máximo instantáneo anual corresponde a la variable de salida de los modelos, mientras que el caudal medio diario máximo anual pertenece a una de las variables de entrada para generar el ajuste de los modelos.

#### **3.4.5 Métodos Empíricos**

Los métodos empleados en el ajuste de los modelos se basan en modelos empíricos mediante modelos de regresión. Los modelos de regresión utilizados corresponden a regresión lineal, regresión lineal múltiple, regresión lineal logarítmica, regresión lineal logarítmica múltiple y regresión exponencial. En la Tabla 3-3 se muestran las ecuaciones de los modelos empleados para el ajuste de los modelos.

---

<sup>3</sup> MOP. Estadísticas Estaciones DGA, *estadística hidrológica en línea*, <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>

**Tabla 3-3.** Modelos de regresión.

| Modelo                                | Ecuación  |        |
|---------------------------------------|---|--------|
| Regresión lineal                      | $y = \beta_0 + \beta_1 x_1$                                   | (3.7)  |
| Regresión lineal múltiple             | $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_N x_N$             | (3.8)  |
| Regresión lineal logarítmica          | $\ln y = \beta_0 + \beta_1 \ln x_1$                           | (3.9)  |
| Regresión lineal logarítmica múltiple | $\ln y = \beta_0 + \beta_1 \ln x_1 + \dots + \beta_N \ln x_N$ | (3.10) |
| Regresión exponencial                 | $y = \alpha * e^{\tau x_1}$                                   | (3.11) |

Donde,  $y$  corresponde al caudal máximo instantáneo anual,  $x_1, x_2, \dots, x_N$  son las variables independientes ( $x_1$  corresponde al caudal medio diario máximo anual),  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_N$  son coeficientes de regresión,  $\alpha$  es el parámetro de escala y  $\tau$  es la tasa de cambio exponencial.

Se aplicó el enfoque *stepwise* del programa R en los modelos de regresión lineal múltiple y regresión lineal logarítmica múltiple. *Stepwise* se basa en agregar o eliminar variables predictoras iterativas en los modelos para identificar el subconjunto de variables independientes que ejercen una influencia significativa sobre la variable dependiente. Por otro lado, en los modelos de regresión lineal logarítmica y regresión lineal logarítmica múltiple es necesario que las variables independientes ( $x_1, x_2, \dots, x_N$ ) sean mayores a cero, de lo contrario, estas variables serían inválidas. Para evitar que ocurra, se asignó el valor de 0.0001 a cada variable que originalmente tenía un valor de cero.

### 3.5 Validación del modelo

Los modelos se validaron utilizando el 30% de la información disponible restante, valores que no fueron empleados en el desarrollo del ajuste de los modelos. La validación fue analizada gráficamente y aplicando medidas de bondad de ajuste, con la finalidad de determinar la similitud entre los caudales máximos instantáneos anuales observados y simulados. A su vez, se realiza una validación 2 que

consiste en emplear estaciones costeras cercanas con información disponible que pertenezcan a las cuencas analizadas.

### 3.5.1 Medidas de bondad de ajuste

Las medidas de bondad de ajuste permiten evaluar la similitud entre los valores observados y los valores simulados. Las medidas utilizadas en el análisis corresponden al coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS). La ecuación de cada una de ellas se encuentra en el capítulo 2.3.

Los valores umbral del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para un desempeño no satisfactorio, satisfactorio, bueno y muy bueno son:  $R^2 \leq 0.60$ ,  $0.60 < R^2 \leq 0.75$ ,  $0.75 < R^2 \leq 0.85$ ,  $R^2 > 0.85$  (Moriassi et al. 2015).

Con respecto a los valores umbral de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) para un desempeño no satisfactorio, satisfactorio, bueno y muy bueno son:  $NSE \leq 0.50$ ,  $0.50 < NSE \leq 0.70$ ,  $0.70 < NSE \leq 0.80$ ,  $NSE > 0.80$  (Moriassi et al. 2015).

Los valores umbral del porcentaje de sesgo (PBIAS) para un desempeño no satisfactorio, satisfactorio y bueno son:  $PBIAS > 40\%$ ,  $20\% < PBIAS < 40\%$ ,  $PBIAS < 20\%$  (Van Liew et al. 2005).

### 3.6 Estimación de caudales máximos instantáneos

La estimación de caudales máximos instantáneos asociado a diferentes periodos de retorno (T) se obtienen mediante análisis de frecuencia. En el programa Python se aplicó el análisis de frecuencia utilizando diferentes funciones de distribución, las cuales deben ser evaluadas por las pruebas de bondad de ajuste Chi-Cuadrado y Kolmogórov-Smirnov, y a partir de los resultados, determinar cuál distribución es la más adecuada.

### 3.6.1 Análisis de frecuencia

El análisis de frecuencia es una técnica estadística que se basa en analizar datos históricos aplicando a ellos modelos probabilísticos que permiten establecer la probabilidad en que la magnitud de un evento hidrológico se repita o exceda sólo una vez en el futuro asociado a un cierto periodo de retorno (Stowhas, 2017).

### 3.6.2 Periodo de retorno

El periodo de retorno ( $T$ ) corresponde al recíproco de la probabilidad de excedencia (probabilidad que la magnitud de un evento hidrológico  $x$  exceda un umbral específico). En el estudio, se evaluaron periodos de retorno entre 2 y 100 años.

$$P_{ex} = P(x > \chi) = \frac{1}{T} \quad (3.12)$$

Donde,

$P_{ex}$  : Probabilidad de excedencia

$x$  : Evento hidrológico

$\chi$  : Valor umbral

$T$  : Periodo de retorno

### 3.6.3 Funciones de densidad de probabilidad

Las funciones de densidad de probabilidad permiten representar la distribución de una serie de datos en el análisis de frecuencia, en donde los caudales asociados a diferentes periodos de retorno ( $T$ ) son estimados a partir del ajuste generado entre los datos y las distribuciones de probabilidad.

En el estudio se emplearon distribuciones de probabilidad que generalmente son utilizadas en el análisis de valores extremos, estas son:

- Distribución Gumbel
- Distribución Weibull
- Distribución Pearson tipo III
- Distribución Log-Pearson tipo III
- Distribución Gamma de dos parámetros

### 3.6.4 Pruebas de bondad de ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste utilizadas en el análisis de frecuencia corresponden a las pruebas Chi-Cuadrado ( $\chi^2$ ) y Kolmogórov-Smirnov, estas pruebas permiten establecer con un determinado nivel de confianza cuál distribución (o distribuciones) son apropiadas para la serie de datos. Si la distribución de probabilidad es aceptada significa que la distribución se ajusta a la serie de datos (hipótesis nula  $H_0$ ), en cambio, si la distribución no es aceptada ésta no representa la serie de datos. En el estudio, el nivel de confianza utilizado para ambas pruebas es del 95%, utilizando la biblioteca de Python SciPy, particularmente, las funciones `chisquare` y `kstest`. En la Tabla 3-4 se observa la interpretación de resultados de las pruebas de bondad de ajuste.

**Tabla 3-4.** Interpretación de las pruebas de bondad de ajuste.

| Pruebas  | Interpretación   |
|--|--|
| Chi-Cuadrado ( $\chi^2$ ) y Kolmogórov-Smirnov | $p \geq 0.05$ , Existe evidencia suficiente para aceptar $H_0$ |
|  | $p < 0.05$ , Existe evidencia suficiente para no aceptar $H_0$ |

## 3.7 Conclusión

En el presente capítulo se abordó el área de estudio, se describieron las técnicas y procedimientos para el análisis de los datos, y los métodos empleados en el análisis de tendencia, ajuste y validación de los modelos para la estimación de caudales máximos instantáneos anuales. A su vez, se mencionaron las funciones de densidad de probabilidad utilizadas en el análisis de frecuencia para valores extremos, con la finalidad de estimar los caudales máximos instantáneos en periodos de retorno entre 2 a 100 años.

## CAPITULO 4 RESULTADOS

### 4.1 Introducción

En este capítulo se presentan las estaciones consideradas en el análisis, así como los resultados de las tendencias identificadas en las estaciones pluviométricas y fluviométricas pertenecientes a las cuencas costeras situadas dentro del área de estudio. También se incluyen los modelos ajustados y validados que permiten calcular los caudales máximos instantáneos anuales. Además, se presentan los resultados de las estimaciones de los caudales máximos instantáneos asociado a diferentes periodos de retorno, obtenidos mediante el análisis de frecuencia.

### 4.2 Revisión de la serie de precipitaciones y caudales

#### 4.2.1 Información pluviométrica disponible

Las estaciones pluviométricas ubicadas en las cuencas costeras del área de estudio se presentan en la Tabla 4-1, observando la cantidad de información porcentual disponible entre el periodo 1980 – 2021, el código, nombre, coordenadas latitudinal y longitudinal de cada estación.

**Tabla 4-1.** Estaciones pluviométricas situadas en el área de estudio.

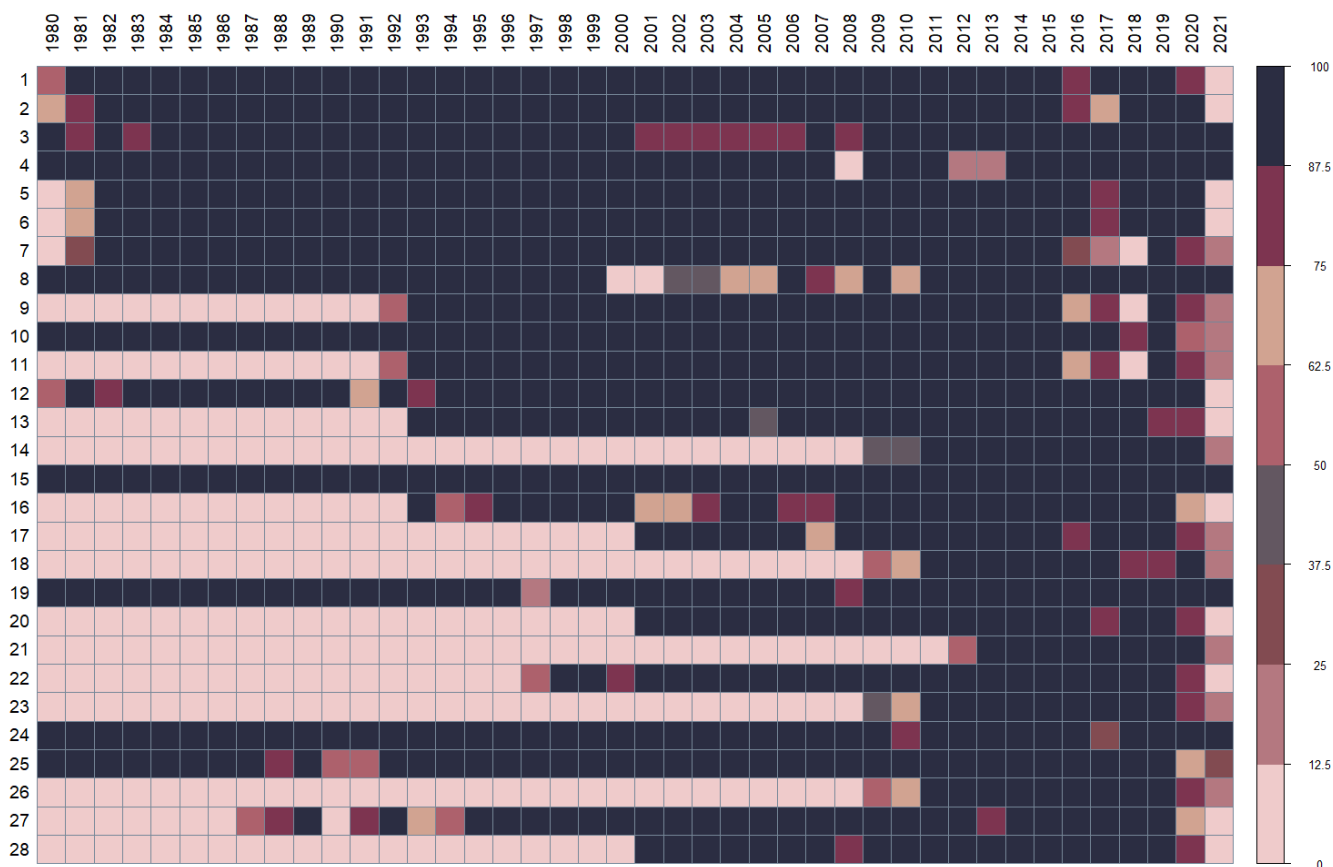
| N° | Código Estación | Nombre Estación  | Latitud     | Longitud    | Información disponible (%) 1980 - 2021 |
|----|-----------------|------------------|-------------|-------------|--|
| E1 | 6120001         | Pichilemu        | 34° 23' 07" | 72° 00' 27" | <b>96.5</b>                            |
| E2 | 6132002         | Nilahue Barahona | 34° 34' 25" | 71° 45' 59" | <b>94.4</b>                            |
| E3 | 340019          | Pumanque         | 34° 37' 1"  | 71° 40' 25" | <b>95.0</b>                            |
| E4 | 340035          | Lolol Hacienda   | 34° 42' 39" | 71° 35' 44" | <b>93.4</b>                            |
| E5 | 6130001         | El Membrillo     | 34° 48' 31" | 71° 36' 45" | <b>93.0</b>                            |
| E6 | 6130002         | Ranguili         | 34° 51' 59" | 71° 44' 58" | <b>93.6</b>                            |

|     |         |   |             |             |              |
|-----|---------|---|-------------|-------------|--------------|
| E7  | 6130003 | La Palma                                      | 34° 57' 07" | 71° 35' 08" | <b>87.0</b>  |
| E8  | 340027  | Iloca Essam                                   | 34° 57' 8"  | 72° 11' 2"  | <b>89.0</b>  |
| E9  | 7210001 | Putu  | 35° 13' 08" | 72° 16' 60" | <b>64.2</b>  |
| E10 | 7200001 | Gualleco                                      | 35° 14' 49" | 71° 58' 55" | <b>96.0</b>  |
| E11 | 7340002 | La Estrella                                   | 35° 46' 59" | 72° 11' 26" | <b>64.4</b>  |
| E12 | 8210002 | Dichato                                       | 36° 32' 44" | 72° 55' 52" | <b>94.0</b>  |
| E13 | 8140001 | Rafael  | 36° 38' 11" | 72° 50' 56" | <b>64.0</b>  |
| E14 | 8210003 | Estero Bellavista en Tomé                     | 36° 38' 22" | 72° 56' 57" | 26.0         |
| E15 | 360019  | Carriel Sur, Concepción Ap.                   | 36° 46' 50" | 73° 3'59"   | <b>100.0</b> |
| E16 | 8220005 | Las Pataguas                                  | 36° 47' 33" | 72° 53' 32' | <b>61.0</b>  |
| E17 | 8220006 | Andalién                                      | 36° 48' 47" | 72° 56' 20" | 46.5         |
| E18 | 8220008 | Estero Nonguén Frente U. Bio Bio              | 36° 49' 12" | 73° 00' 58" | 26.2         |
| E19 | 360023  | Nonguén Essbio                                | 36° 52' 38" | 72° 59' 37" | <b>96.7</b>  |
| E20 | 8520000 | Carampangue                                   | 37° 15' 21" | 73° 14' 33" | 46.0         |
| E21 | 8700002 | Río Curanilahue en Curanilahue                | 37° 28' 50" | 73° 20' 13" | 20.0         |
| E22 | 8700001 | Curanilahue                                   | 37° 29' 06" | 73° 19' 54" | 55.0         |
| E23 | 8700003 | Estero Plegarias Antes De Jta Río Curanilahue | 37° 29' 16" | 73° 20' 38" | 27.0         |
| E24 | 370018  | Lebu Essbio                                   | 37° 36' 55" | 73° 39' 27" | <b>97.0</b>  |
| E25 | 8821005 | Cañete  | 37° 47' 51" | 73° 23' 29" | <b>94.0</b>  |
| E26 | 8821006 | Río Leiva En Puente camino a Contulmo         | 37° 48' 46" | 73° 23' 32" | 26.0         |

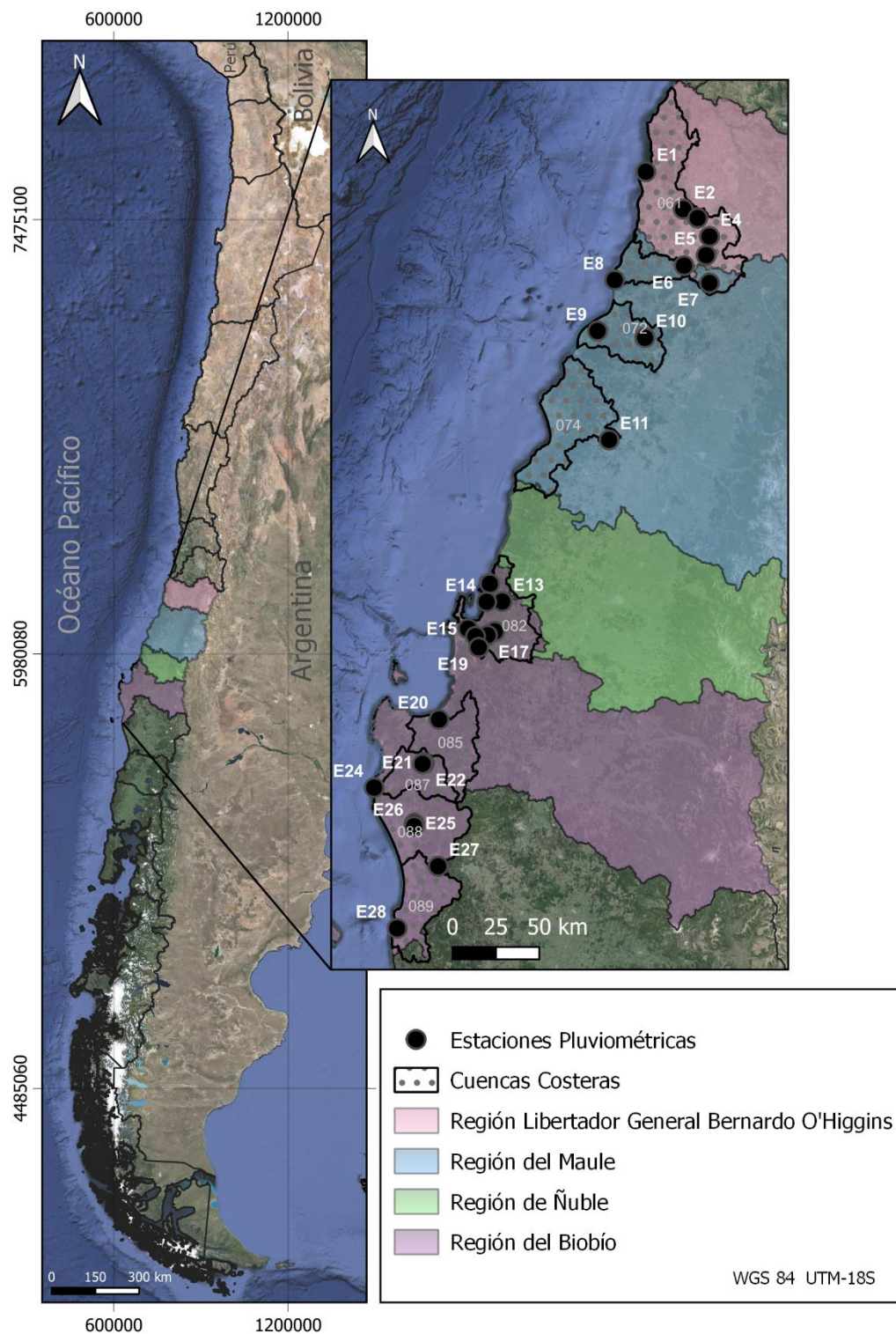
|     |         |          |             |             |             |
|-----|---------|----------|-------------|-------------|-------------|
| E27 | 8822008 | Contulmo | 38° 01' 06" | 73° 13' 49" | <b>73.0</b> |
| E28 | 8930000 | Tirúa    | 38° 20' 41" | 73° 29' 33" | 47.0        |

De la Tabla 4-1 se observa la información porcentual disponible de la precipitación diaria durante el periodo de estudio, resaltando aquellos porcentajes de las estaciones que proporcionan el mayor registro de datos (superior al 60%) en el periodo analizado.

En la Figura 4-1 se muestra la disponibilidad de datos de las estaciones pluviométricas, cada celda simboliza un año y el color indica el valor porcentual de datos registrados en aquel año. Mientras que en la Figura 4-2 se señalan las ubicaciones geográficas de las estaciones.



**Figura 4-1.** Información porcentual disponible de las 28 estaciones pluviométricas analizadas. El orden de las estaciones corresponde al orden de la Tabla 4-1, en la primera posición se encuentra la estación Pichilemu y en la posición vigésimo-octava se encuentra la estación Tirúa.



**Figura 4-2.** Ubicación geográfica de las estaciones pluviométricas pertenecientes a las cuencas costeras entre la región Libertador General Bernardo O'Higgins hasta la región del Biobío.

### 4.2.2 Información fluviométrica disponible

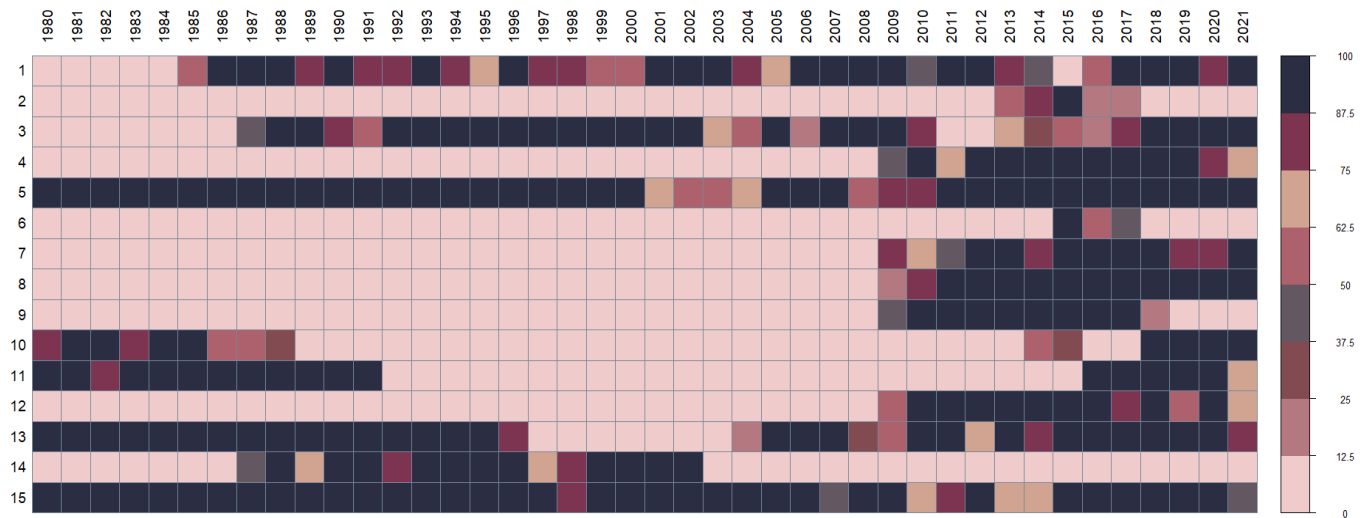
Las estaciones fluviométricas ubicadas en las cuencas costeras del área de estudio se presentan en la Tabla 4-2, observando la cantidad de información porcentual disponible entre el periodo 1980 – 2021, el código, nombre, coordenadas latitudinal y longitudinal de cada estación.

**Tabla 4-2.** Estaciones fluviométricas situadas en el área de estudio.

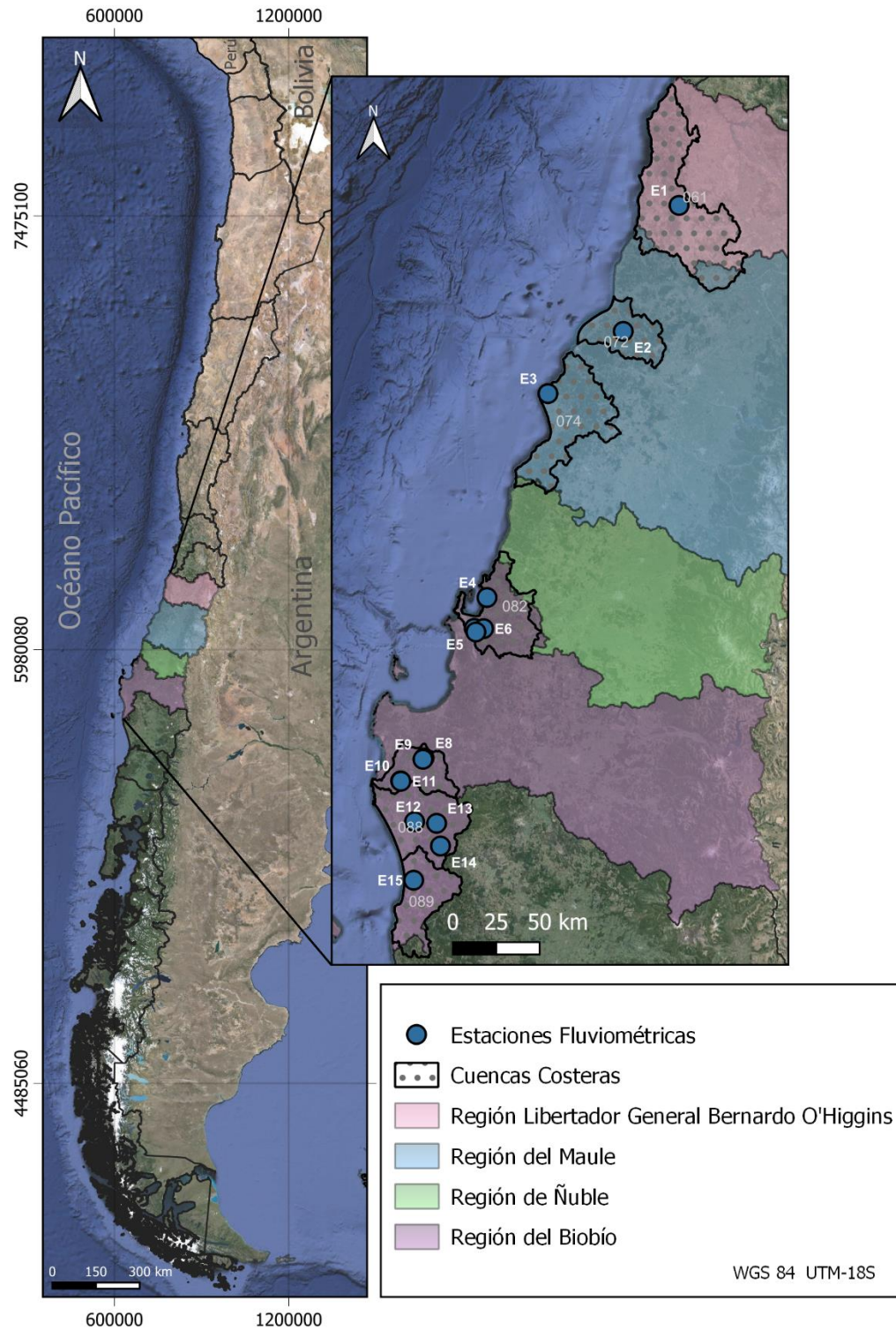
| N°  | Código Estación | Nombre Estación                               | Latitud     | Longitud    | Información disponible (%) 1980 - 2021 |
|-----|-----------------|---|-------------|-------------|--|
| E1  | 6132001         | Estero Nilahue en Santa Teresa                | 34° 34' 25" | 71° 47' 38" | <b>72.0</b>                            |
| E2  | 7200002         | Río Huenchullami en Coipue                    | 35° 14' 16" | 72° 07' 18" | 15.2                                   |
| E3  | 7400001         | Río Loanco en desembocadura                   | 35° 34' 17" | 72° 35' 19" | <b>64.6</b>                            |
| E4  | 8210003         | Estero Bellavista en Tomé                     | 36° 38' 22" | 72° 56' 57" | 28.2                                   |
| E5  | 8220001         | Río Andalién camino a Penco                   | 36° 48' 06" | 73° 01' 40" | <b>92.8</b>                            |
| E6  | 8220010         | Río Andalién antes ex Peaje Chaimavida        | 36° 48' 07" | 72° 58' 01" | 13.5                                   |
| E7  | 8220008         | Estero Nonguén frente U. del Bio Bio          | 36° 49' 12" | 73° 00' 58" | 27.2                                   |
| E8  | 8700002         | Río Curanilahue en Curanilahue                | 37° 28' 50" | 73° 20' 13" | 27.9                                   |
| E9  | 8700003         | Estero Plegarias antes de jta Río Curanilahue | 37° 29' 16" | 73° 20' 38" | 29.6                                   |
| E10 | 8720001         | Río Lebu en las Corrientes (En Los Alamos)    | 37° 36' 07" | 73° 29' 16" | 27.7                                   |
| E11 | 8820001         | Río Caramavida en Caramavida                  | 37° 36' 14" | 73° 29' 09" | 41.0                                   |
| E12 | 8821006         | Río Leiva en Puente camino a Contulmo         | 37° 48' 46" | 73° 23' 32" | 27.2                                   |
| E13 | 8821002         | Río Butamalal en Butamalal                    | 37° 49' 10" | 73° 14' 51" | <b>74.7</b>                            |
| E14 | 8822002         | Río Elicura en Puente Elicura                 | 37° 56' 14" | 73° 13' 09" | 43.0                                   |
| E15 | 8910001         | Río Lleu-Lleu en desagüe Lago Lleu-Lleu       | 38° 07' 04" | 73° 23' 29" | <b>94.1</b>                            |

De la Tabla 4-2 se observa la información porcentual de caudal medio diario durante el periodo de estudio, resaltando aquellos porcentajes de las estaciones que proporcionan el mayor registro de datos (superior al 60%) en el periodo analizado.

En la Figura 4-3 se muestra la disponibilidad de datos de las estaciones fluviométricas, cada celda simboliza un año y el color indica el valor porcentual de datos registrados en aquel año. Mientras que en la Figura 4-4 se señalan las ubicaciones geográficas de las estaciones.



**Figura 4-3.** Información porcentual disponible para las 15 estaciones fluviométricas analizadas. El orden de las estaciones corresponde al orden de la Tabla 4-2, en la primera posición se encuentra la estación Estero Nilahue en Santa Teresa y en la quinceava posición se encuentra la estación Río Lleu-Lleu En Desague Lago Lleu-Lleu.



**Figura 4-4.** Ubicación geográfica de las estaciones fluviométricas pertenecientes a las cuencas costeras entre la región Libertador General Bernardo O'Higgins hasta la región del Biobío.

### 4.2.3 Selección de la serie pluviométrica y fluviométrica

En hidrología es necesario disponer de una serie amplia de registro para determinar de manera óptima la presencia de tendencias significativas. Las estaciones que formaron parte del análisis de tendencia son aquellas que durante el periodo 1980 – 2021 registraron más del 60% de información, descartando las estaciones que no cumplieron con aquel porcentaje en su serie de registro.

Al evaluar la serie histórica de las 28 estaciones pluviométricas ubicadas en el área de estudio, sólo 19 cumplieron con el criterio anteriormente mencionado. En la Tabla 4-3 se muestran las estaciones pluviométricas que formaron parte del análisis de tendencia.

**Tabla 4-3.** Estaciones pluviométricas seleccionadas.

| N°  | Estación Pluviométrica | N°  | Estación Pluviométrica      |
|-----|------------------------|-----|-----------------------------|
| E1  | Pichilemu              | E11 | La Estrella                 |
| E2  | Nilahue Barahona       | E12 | Dichato                     |
| E3  | Pumanque               | E13 | Rafael                      |
| E4  | Lolol Hacienda         | E15 | Carriel Sur, Concepción Ap. |
| E5  | El Membrillo           | E16 | Las Pataguas                |
| E6  | Ranguili               | E19 | Nonguén Essbio              |
| E7  | La Palma               | E24 | Lebu Essbio                 |
| E8  | Iloca Essam            | E25 | Cañete                      |
| E9  | Putu                   | E27 | Contulmo                    |
| E10 | Gualleco               |     |                             |

Con respecto a las estaciones fluviométricas ubicadas dentro del área de estudio, se evaluó la serie histórica de las 15 estaciones, de las cuales sólo 5 cumplieron con el criterio de registro. En la Tabla 4-4 se muestran las estaciones fluviométricas que formaron parte del estudio.

**Tabla 4-4.** Estaciones fluviométricas seleccionadas.

| N°  | Estación Fluviométrica                  |
|-----|---|
| E1  | Estero Nilahue en Santa Teresa          |
| E3  | Río Loanco en desembocadura             |
| E5  | Río Andalién camino a Penco             |
| E13 | Río Butamalal en Butamalal              |
| E15 | Río Lleu-Lleu en desague Lago Lleu-Lleu |

En la Figura 4-5 se observa la ubicación geográfica de las estaciones pluviométricas y fluviométricas que cumplieron con el criterio de registro.

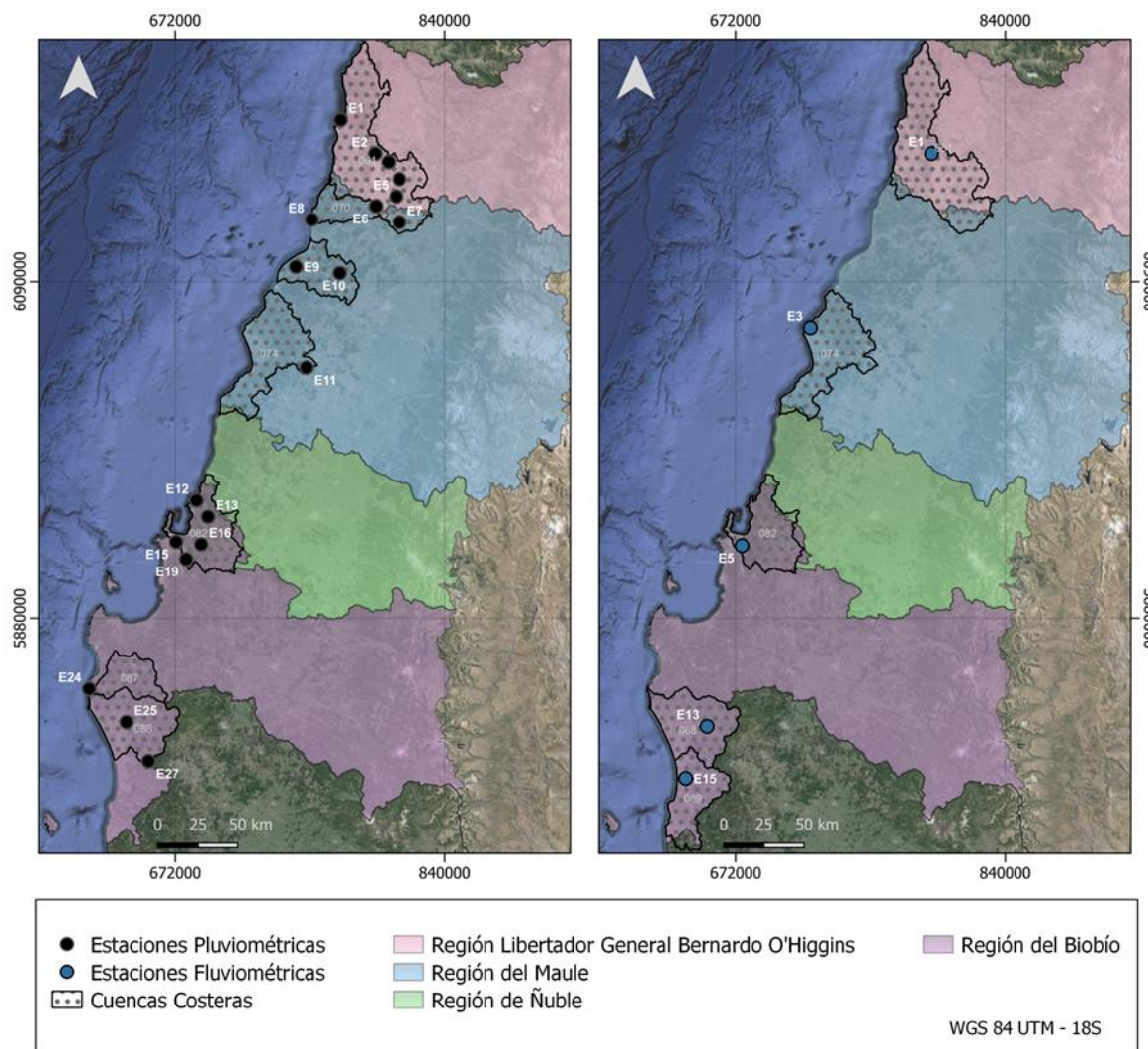


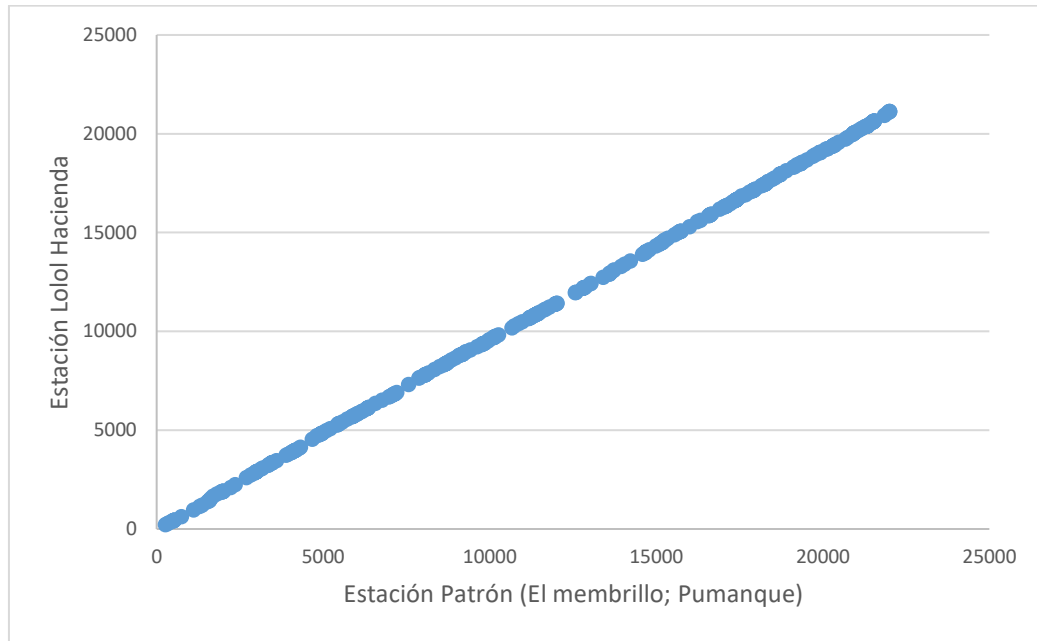
Figura 4-5. Estaciones pluviométricas y fluviométricas incluidas en el análisis del estudio.

### 4.3 Análisis de tendencias en los registros de precipitación

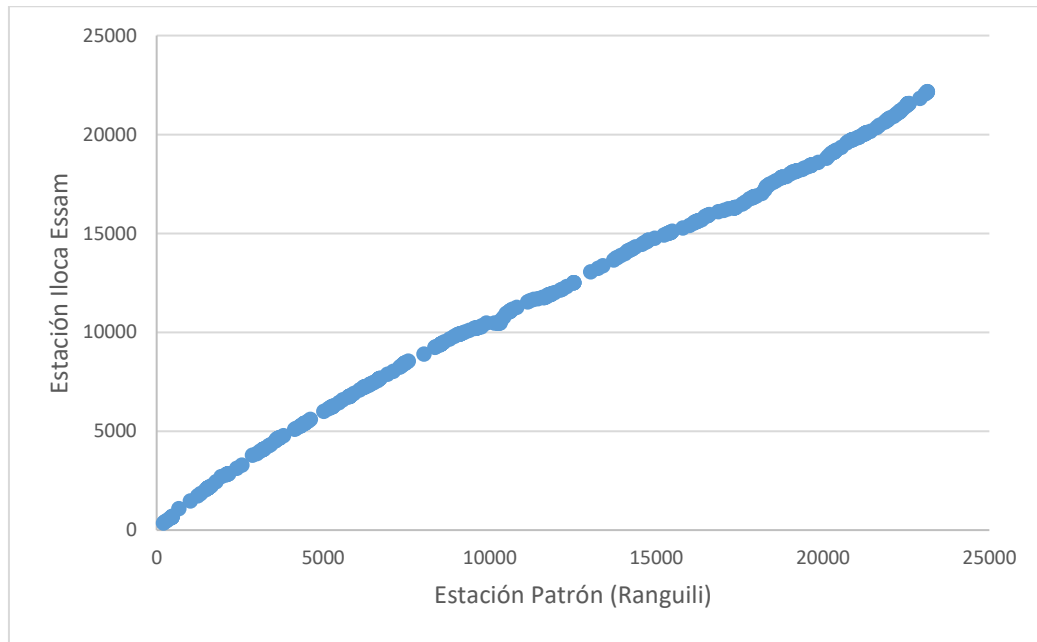
#### 4.3.1 Análisis de consistencia del registro pluviométrico

El análisis de consistencia en la serie de precipitaciones se llevó a cabo considerando la precipitación acumulada mensual en base a los meses con más de 20 días de registro (en mm) durante el periodo 1980 - 2021. El análisis fue aplicado a las 19 estaciones pluviométricas que presentaron el mayor porcentaje de información en sus registros (ver Tabla 4-3). Las estaciones Iloca Essam y Rafael fueron eliminadas por presentar inconsistencias con respecto a su estación patrón. En la Figura 4-6 se muestra la curva doble acumulada de la estación Lolol Hacienda, observando la consistencia de la estación con sus respectivas estación patrón, a diferencia de la Figura 4-7 que muestra las inconsistencias de

la estación Iloca Essam con su estación patrón. En el Anexo 2 se presentan los gráficos del análisis de consistencia de las estaciones pluviométricas.



**Figura 4-6.** Análisis de consistencia de la estación Lolol Hacienda.



**Figura 4-7.** Análisis de consistencia de la estación Iloca Essam.

### 4.3.2 Homogeneidad en las series pluviométricas

La prueba de homogeneidad de Pettitt (Pettitt, 1979) se realizó a las 17 estaciones pluviométricas consistentes. La variable utilizada en la prueba de homogeneidad es la precipitación acumulada anual durante el periodo de estudio, con un nivel de significancia del 5%. Los resultados se muestran en la Tabla 4-5.

**Tabla 4-5.** Prueba de Pettit, valor p de las estaciones pluviométricas.

| <b>Código</b> | <b>Nombre Estación</b>         | <b>valor p</b> |
|---------------|--------------------------------|----------------|
| 6120001       | Pichilemu                      | 0.35           |
| 6132002       | Nilahue Barahona               | 0.20           |
| 340019        | Pumanque                       | 0.21           |
| 340035        | Lolol Hacienda                 | 0.19           |
| 6130001       | El Membrillo                   | 0.06           |
| 6130002       | Ranguili                       | 0.18           |
| 6130003       | La Palma                       | 0.18           |
| 7210001       | Putu                           | 0.78           |
| 7200001       | Gualleco                       | 0.27           |
| 7340002       | La Estrella                    | 0.84           |
| 8210002       | Dichato                        | 0.07           |
| 360019        | Carriel Sur,<br>Concepción Ap. | 0.69           |
| 8220005       | Las Pataguas                   | 0.86           |
| 360023        | Nonguén Essbio                 | 0.09           |
| 370018        | Lebu Essbio                    | 0.01           |
| 8821005       | Cañete                         | 0.91           |
| 8822008       | Contulmo                       | 0.39           |

Se observa que la estación Lebu Essbio presentó un valor p inferior al nivel de significancia, a diferencia de las estaciones restantes que su valor es superior, resultando ser homogéneas.

En la Figura 4-8 se muestra el punto de cambio de la estación Lebu Essbio durante los años 2006 – 2007, resultado de la prueba de homogeneidad de Pettitt. Sin embargo, no fue posible determinar la causa de la ruptura, ya que podría atribuirse tanto a variaciones climáticas como a cambios en la estación.

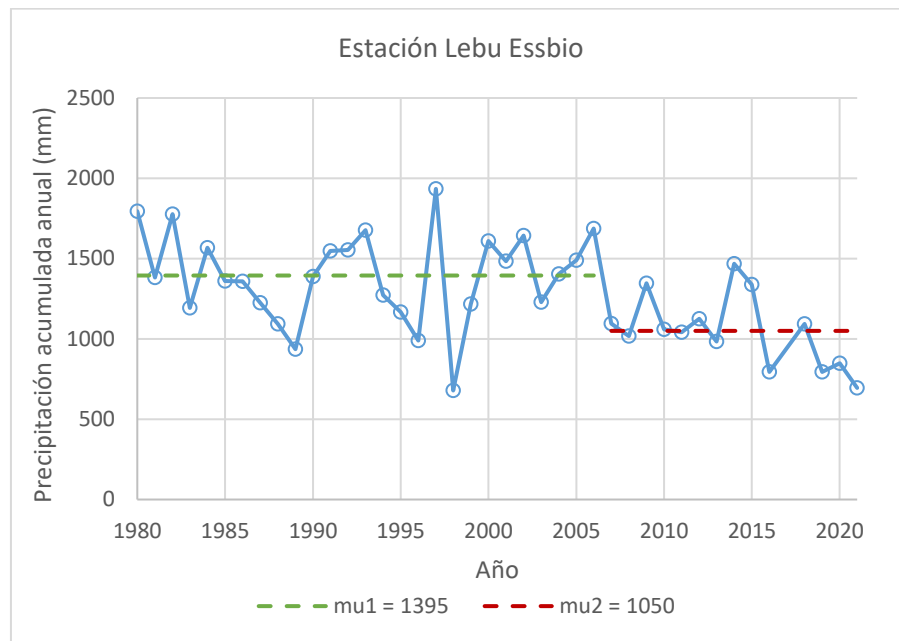


Figura 4-8. Punto de cambio estación Lebu Essbio.

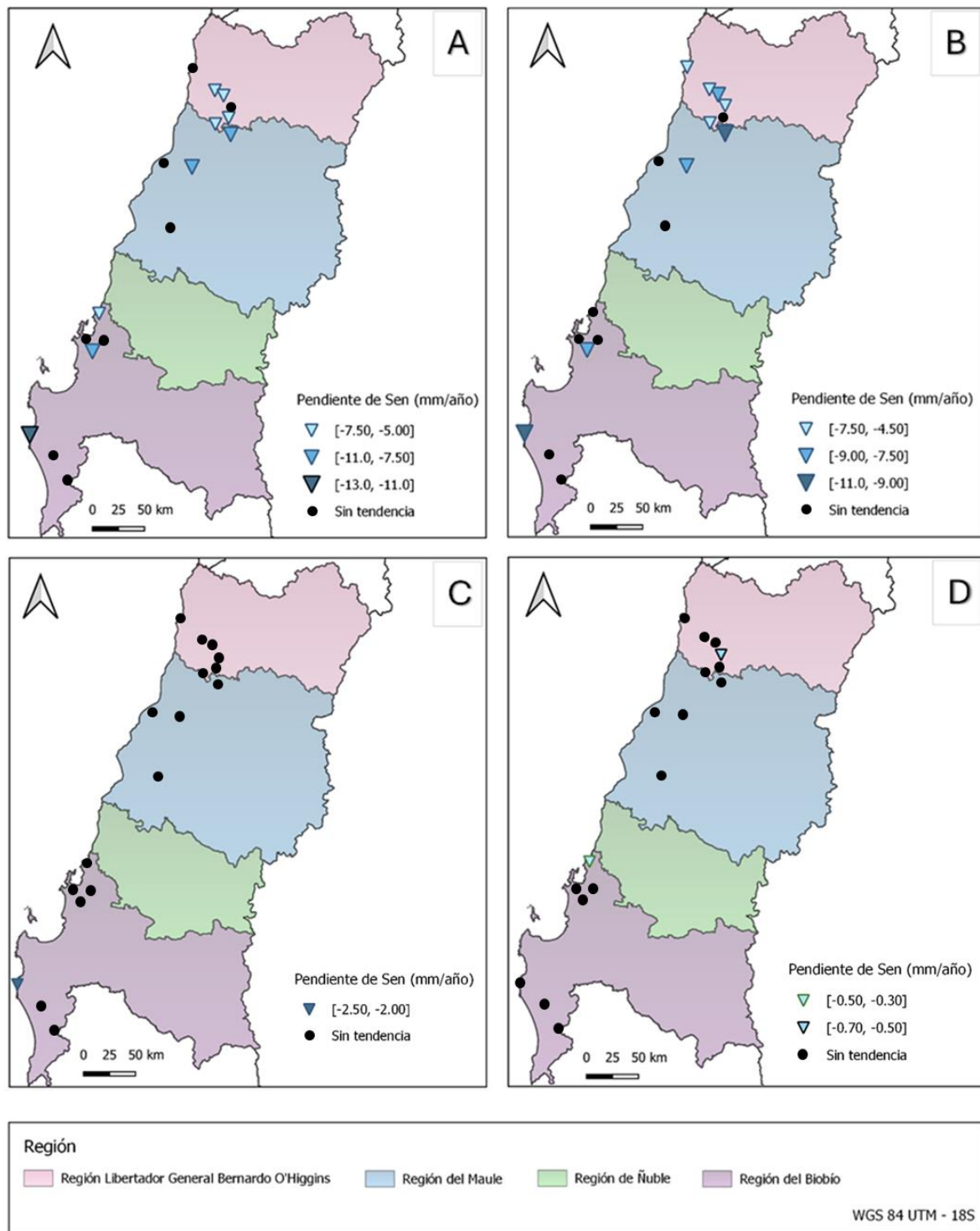
### 4.3.3 Resultados prueba Mann – Kendall en series pluviométricas

Las tendencias se determinaron mediante la prueba de Mann – Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), y la magnitud de las tendencias se obtuvo utilizando el método de la pendiente de Sen con un intervalo de confianza del 95%. Dentro de las variables analizadas se encuentra la precipitación acumulada anual, precipitación acumulada en el periodo otoño/invierno, precipitación acumulada en el periodo primavera/verano y precipitación máxima anual en 24 hrs. En el estudio las estaciones con tendencias significativas son aquellas que presentaron una significancia estadística  $|Z_{mk}| \geq 1.96$ , considerando un nivel de significancia del 5%. La Tabla 4-6 indica las significancias estadísticas:

**Tabla 4-6.** Significancia estadística prueba de Mann – Kendall.

| <b>Significancia</b>                | <b><math>Z_{mk}</math></b> |
|-------------------------------------|----------------------------|
| Sin tendencia significativa         | $-1.96 < Z_{mk} < +1.96$   |
| Tendencia creciente significativa   | $\geq +1.96$               |
| Tendencia decreciente significativa | $\leq -1.96$               |

Las tendencias observadas para la precipitación acumulada anual durante el periodo de estudio mostraron que las estaciones Nilahue Barahona, Pumanque, El Membrillo, Ranguili, La Palma, Gualleco, Dichato, Nonguén Essbio y Lebu Essbio presentaron tendencias significativamente decrecientes. Las estaciones restantes no mostraron tendencias y ninguna presentó tendencias al aumento en sus series de registro (ver Figura 4-9A). La estación Lebu Essbio no presentó tendencias hasta el año en que se produjo el punto de cambio encontrado en la prueba de homogeneidad, posterior a aquel año la tendencia decrece hasta la actualidad (ver Anexo 4). En el periodo otoño/invierno las estaciones Pichilemu, Nilahue Barahona, Pumanque, Lolol Hacienda, Ranguili, La Palma, Gualleco, Nonguén Essbio y Lebu Essbio presentaron tendencias significativamente decrecientes. Las estaciones restantes no presentaron tendencias (ver Figura 4-9B). Con respecto a las tendencias en el periodo primavera/verano la estación Lebu Essbio fue la única estación en presentar tendencia decreciente significativa con pendiente de sen igual a  $-2.36$  mm/año, mientras que las estaciones restantes no presentaron tendencias (ver Figura 4-9C). En cuanto a los resultados de las precipitaciones máximas anuales en 24 hrs, las estaciones Lolol Hacienda y Dichato mostraron tendencias decrecientes significativas con pendiente de sen de  $-0.54$  mm/año y  $-0.41$  mm/año respectivamente, en cambio las estaciones restantes no presentaron tendencias (ver Figura 4-9D).



**Figura 4-9.** La figura muestra las estaciones pluviométricas que presentaron tendencias significativas indicando los rangos de la pendiente de Sen calculada con un intervalo de confianza del 95% (A) Resultados precipitación acumulada anual (B) Resultados periodo Otoño/Invierno (C) Resultados periodo Primavera/Verano (D) Resultados precipitación máxima anual en 24 hrs.

## 4.4 Análisis de tendencias en los registros de caudal

### 4.4.1 Análisis de consistencia del registro fluviométrico

Por la limitada cantidad de información registrada en las estaciones fluviométricas dentro de las cuencas costeras y a la lejanía entre ellas, no fue posible llevar a cabo el análisis de consistencia.

### 4.4.2 Homogeneidad en las series fluviométricas

La prueba de homogeneidad de Pettitt se realizó analizando la variable de caudal medio anual con un nivel de significancia del 5%. Los resultados se muestran en la Tabla 4-7, observando que ninguna estación presentó puntos de cambio.

**Tabla 4-7.** Prueba de Pettit, valor p de las estaciones fluviométricas.

| Código Estación | Nombre Estación                         | valor p |
|-----------------|---|---------|
| 6132001         | Estero Nilahue en Santa Teresa          | 0.43    |
| 7400001         | Río Loanco en desembocadura             | 0.37    |
| 8220001         | Río Andalién camino a Penco             | 0.08    |
| 8821002         | Río Butamalal en Butamalal              | 0.77    |
| 8910001         | Río Lleu-Lleu en desague Lago Lleu-Lleu | 0.09    |

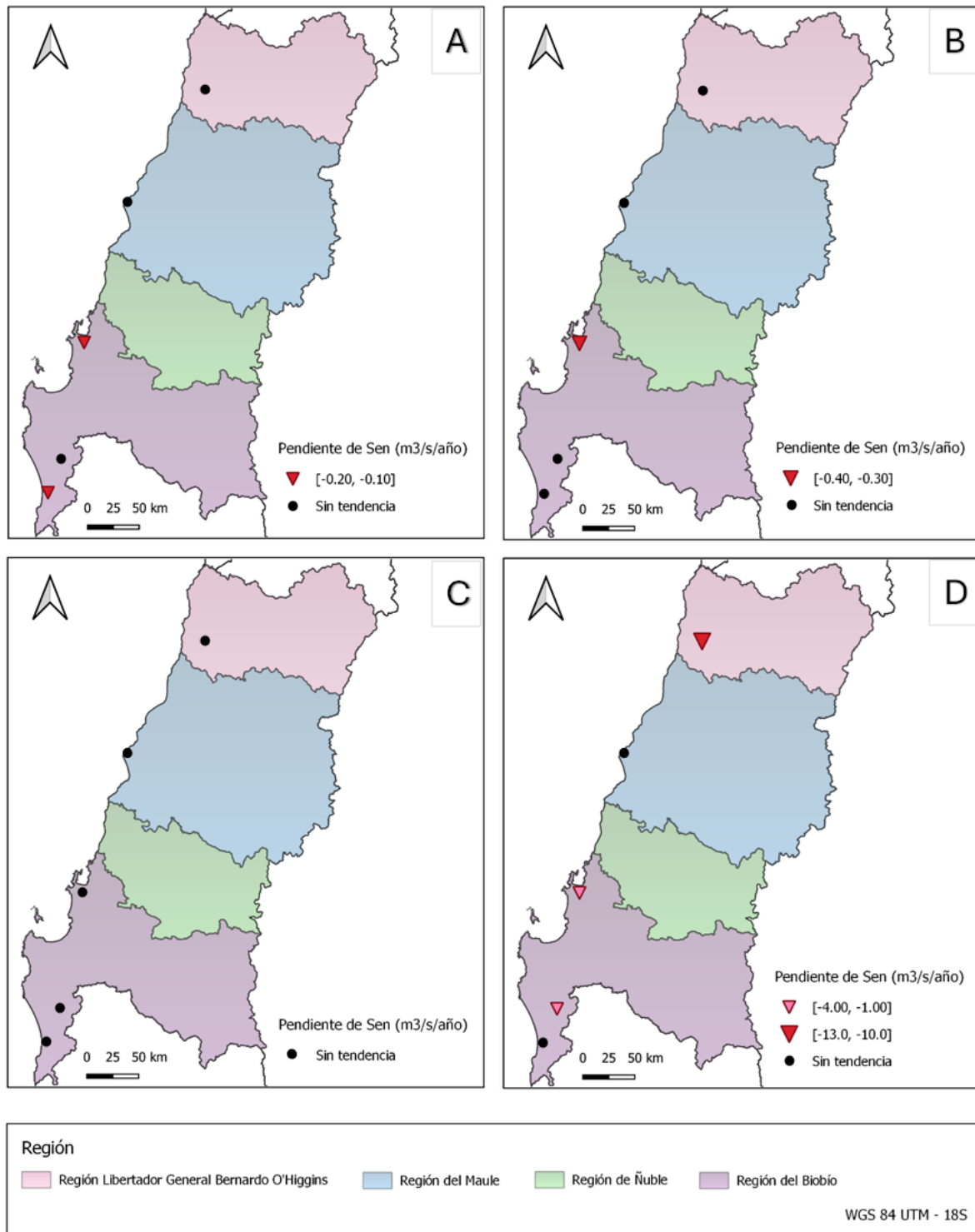
### 4.4.3 Resultados prueba Mann – Kendall en series fluviométricas

Las tendencias se determinaron mediante la prueba de Mann – Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), y la magnitud de las tendencias se obtuvo mediante el método de la pendiente de Sen con un intervalo de confianza del 95%. Dentro de las variables analizadas se encuentra el caudal medio anual, caudal medio periodo otoño/invierno, caudal medio periodo primavera/verano y el caudal máximo

instantáneo anual. Las significancias estadísticas utilizadas para evaluar si las tendencias son significativas se muestra en la Tabla 4-6.

Las tendencias de los caudales medios anuales mostraron que las estaciones Río Andalién camino a Penco y Río Lleu-Lleu en desague Lago Lleu-Lleu presentaron tendencias significativamente decrecientes, en cambio las estaciones restantes no mostraron tendencias y ninguna presentó tendencias al aumento (ver Figura 4-10A). Las tendencias de caudal medio en el periodo otoño/invierno muestran que sólo la estación Río Andalién camino a Penco ubicada en la ciudad de Concepción presentó tendencia significativamente decreciente, en cambio las cuatro estaciones restantes no presentaron tendencias (ver Figura 4-10B). En el periodo primavera/verano ninguna estación presentó tendencias (Figura 4-10C). Con respecto a las tendencias observadas en los caudales máximos instantáneos anuales, las estaciones Estero Nilahue en Santa Teresa, Río Andalién camino a Penco y Río Butamalal en Butamalal presentaron tendencias significativamente decrecientes. En cambio, las estaciones restantes no presentaron tendencias (ver Figura 4-10D). Los gráficos de las tendencias significativamente decrecientes se muestran en el Anexo 5.

Es importante señalar que el caudal máximo instantáneo anual de la estación Río Lleu-Lleu en desague Lago Lleu-Lleu concordaba con el caudal medio diario máximo en su serie histórica, esto se debe a que las series de caudales instantáneos de la DGA solo contaba con un registro diario. Por esta razón, la estación se excluye del análisis posterior, que abarca tanto los ajustes de los modelos como la estimación de caudales máximos instantáneos asociados a diferentes periodos de retorno.



**Figura 4-10.** La figura muestra las estaciones fluviométricas que presentaron tendencias significativas indicando los rangos de la pendiente de Sen calculada con un intervalo de confianza del 95% (A) Resultados caudal medio anual (B) Resultados caudal medio periodo Otoño/Invierno (C) Resultados caudal medio periodo Primavera/Verano (D) Resultados caudal máximo instantáneo anual.

## 4.5 Ajustes del modelo

Los ajustes de los modelos fueron realizados en aquellas estaciones fluviométricas con mayor cantidad de información histórica disponible de caudales máximos instantáneos anuales y caudales medios diarios durante el periodo de estudio. Los modelos se ajustaron utilizando el 70% de los datos disponibles de cada estación.

### 4.5.1 Cuencas utilizadas en el ajuste del modelo

Las cuencas que formaron parte del estudio de ajuste del modelo y en la estimación de caudales máximos instantáneos anuales corresponden a las cuencas costeras Estero Nilahue en Santa Teresa, Río Loanco en desembocadura, Río Andalién camino a Penco y Río Butamalal en Butamalal. Aquellas cuencas fueron delimitadas en función de la ubicación de cada estación fluviométrica que formó parte de este capítulo del estudio como punto de aforo. En la Figura 4-11 se observan detalladamente las cuencas.

### 4.5.2 Morfometría de las cuencas

Las características de relieve y los parámetros morfométricos se obtuvieron mediante los modelos de elevación digital y el programa QGIS, los DEM de cada cuenca evaluada se muestran en la Figura 4-11. Los parámetros morfométricos se presentan en la Tabla 4-9 y Tabla 4-10. La abreviación de cada cuenca se muestra en la Tabla 4-8.

**Tabla 4-8.** Abreviación de las cuencas.

| Cuenca                         | Abreviación |
|--------------------------------|-------------|
| Estero Nilahue en Santa Teresa | ENT         |
| Río Loanco en desembocadura    | RLD         |
| Río Andalién camino a Penco    | RAP         |
| Río Butamalal en Butamalal     | RBB         |

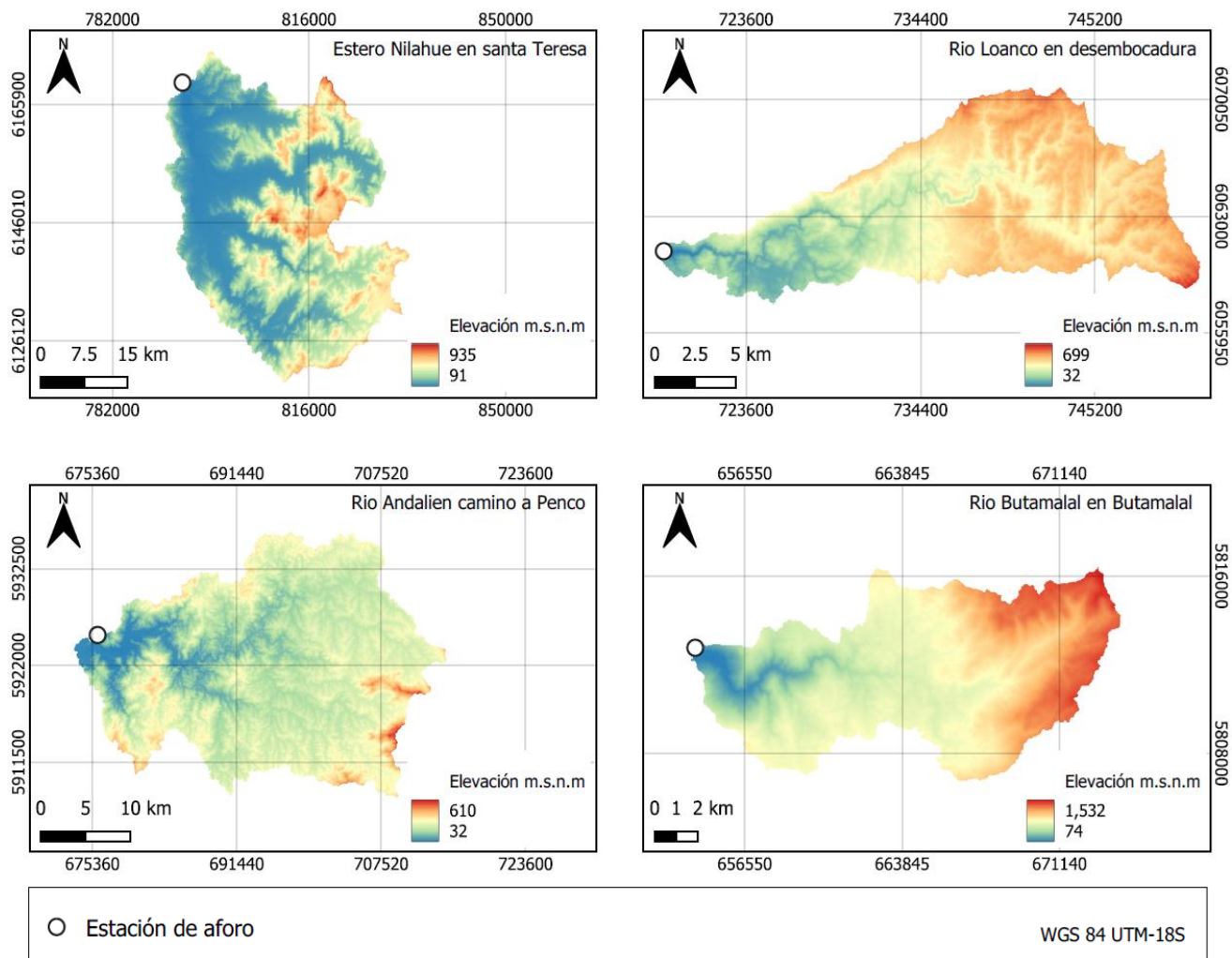


Figura 4-11. Modelos de elevación digital de las cuencas.

Tabla 4-9. Características de relieve de las cuencas.

| Relieve                   | ENT   | RLD   | RAP   | RBB    |
|---------------------------|-------|-------|-------|--------|
| $C_{\text{máx}}$ (msnm)   | 935.0 | 699.0 | 610.0 | 1532.0 |
| $C_{\text{media}}$ (msnm) | 315.7 | 379.3 | 240.2 | 825.2  |
| $C_{\text{min}}$ (msnm)   | 91.0  | 32.0  | 32.0  | 74.0   |
| S (m/m)                   | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.3    |

Tabla 4-10. Parámetros morfométricos.

| Parámetro morfométrico | ENT    | RLD   | RAP   | RBB    |
|------------------------|--------|-------|-------|--------|
| A (km <sup>2</sup> )   | 1441.6 | 223.7 | 751.8 | 117.0  |
| P (km)                 | 255.4  | 108.3 | 180.1 | 69.1   |
| H (m)                  | 844.0  | 667.0 | 578.0 | 1458.0 |

|                      |      |      |      |      |
|----------------------|------|------|------|------|
| L <sub>c</sub> (km)  | 97.1 | 49.9 | 74.1 | 26.1 |
| L <sub>ca</sub> (km) | 42.0 | 28.4 | 45.1 | 14.6 |
| I <sub>c</sub>       | 1.9  | 2.0  | 1.9  | 1.8  |
| K <sub>f</sub>       | 0.1  | 0.1  | 0.1  | 0.2  |
| K <sub>c</sub>       | 0.3  | 0.2  | 0.3  | 0.3  |
| t <sub>c</sub> (hr)  | 14.0 | 7.1  | 11.8 | 2.5  |

### 4.5.3 Uso de suelo

El uso de suelo se expresa de manera porcentual, la Tabla 4-11 muestra los diferentes usos de suelo por cada cuenca, observando la predominancia de los bosques, seguido por las praderas y matorrales, y terreno agrícola. En la cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa los usos de suelo mencionados anteriormente se distribuyen de manera proporcional, en cambio para las cuencas restantes los bosques predominan significativamente en comparación con los diferentes usos de suelo. En la Figura 4-12 se puede apreciar los distintos usos de suelo asociados a un color en específico en cada cuenca analizada.

**Tabla 4-11.** Porcentaje de los usos de suelo.

| Uso de suelo (%)               | ENT  | RLD  | RAP  | RBB  |
|--------------------------------|------|------|------|------|
| Área urbana e industrial       | 0.2  | 0.2  | 4.4  | 0.1  |
| Bosques                        | 34.1 | 89.1 | 69.3 | 86.3 |
| Cuerpos de agua                | 0.2  | 0.1  | 0.2  | 0.0  |
| Praderas y matorrales          | 33.2 | 2.3  | 14.9 | 11.7 |
| Terreno agrícola               | 32.1 | 8.3  | 10.6 | 1.5  |
| Área desprovista de vegetación | 0.0  | 0.0  | 0.3  | 0.5  |
| Humedales                      | 0.0  | 0.0  | 0.4  | 0.0  |
| Otros                          | 0.1  | 0.0  | 0.0  | 0.0  |

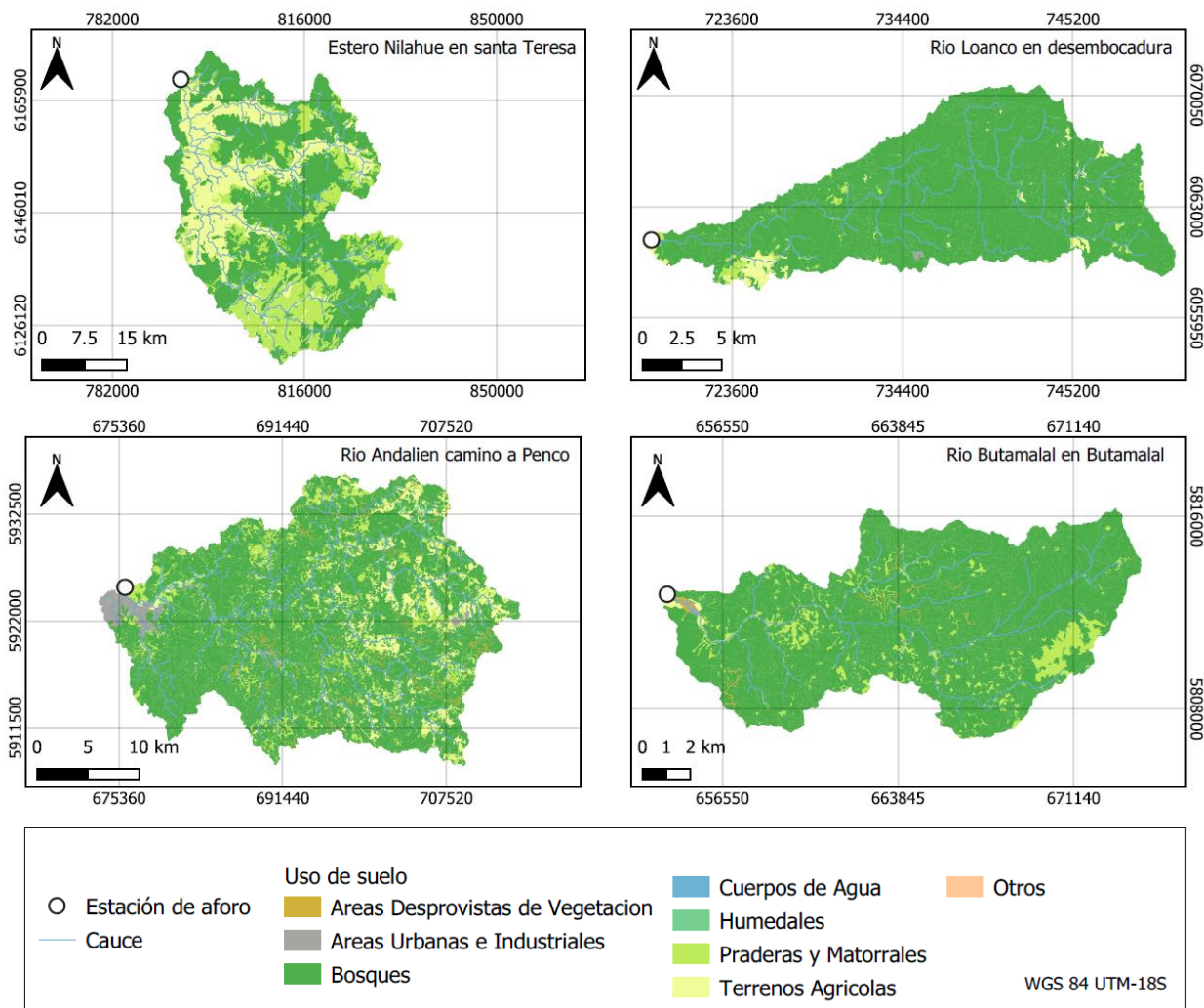


Figura 4-12. Usos de suelo en las cuencas.

#### 4.6 Resultados ajuste de los modelos

Para determinar el modelo que mejor se ajusta a cada cuenca, se aplicaron los diferentes modelos de regresión (ver Tabla 3-3), y el proceso *stepwise* de R que obtiene únicamente las variables más representativas en los métodos de regresión lineal múltiple y regresión lineal logarítmica múltiple. Posteriormente, se calcularon las medidas de bondad de ajuste para determinar la similitud entre los valores observados y simulados. La Tabla 4-12 muestra los resultados de las medidas de bondad de ajuste del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y porcentaje de sesgo (PBIAS) por cada método, resaltando aquellos modelos que mostraron ser adecuados.

**Tabla 4-12.** Medidas de bondad de ajuste.

| <b>Modelo</b>                         | <b>Medida bondad de ajuste</b> | <b>ENT</b>  | <b>RLD</b>   | <b>RAP</b>   | <b>RBB</b>   |
|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Regresión lineal                      | R <sup>2</sup>                 | 0.94        | 0.85         | 0.93         | 0.62         |
|                                       | NSE                            | 0.94        | 0.85         | 0.93         | 0.62         |
|                                       | PBIAS                          | -4.36       | 0.00         | 0.00         | -4.05        |
| Regresión lineal múltiple             | R <sup>2</sup>                 | <b>0.97</b> | <b>0.97</b>  | <b>0.96</b>  | <b>0.81</b>  |
|                                       | NSE                            | <b>0.97</b> | <b>0.97</b>  | <b>0.96</b>  | <b>0.81</b>  |
|                                       | PBIAS                          | <b>8.71</b> | <b>8.00</b>  | <b>2.31</b>  | <b>3.16</b>  |
| Regresión lineal logarítmica          | R <sup>2</sup>                 | <b>0.98</b> | <b>0.90</b>  | <b>0.96</b>  | <b>0.74</b>  |
|                                       | NSE                            | <b>0.93</b> | <b>0.86</b>  | <b>0.93</b>  | <b>0.63</b>  |
|                                       | PBIAS                          | <b>0.24</b> | <b>-1.83</b> | <b>-0.17</b> | <b>-2.04</b> |
| Regresión lineal logarítmica múltiple | R <sup>2</sup>                 | <b>0.99</b> | <b>0.98</b>  | <b>0.97</b>  | <b>0.86</b>  |
|                                       | NSE                            | <b>0.97</b> | <b>0.93</b>  | <b>0.93</b>  | <b>0.84</b>  |
|                                       | PBIAS                          | <b>0.20</b> | <b>-0.28</b> | <b>-0.04</b> | <b>-1.40</b> |
| Regresión lineal exponencial          | R <sup>2</sup>                 | 0.78        | 0.81         | 0.77         | 0.65         |
|                                       | NSE                            | -0.01       | 0.51         | -0.28        | 0.49         |
|                                       | PBIAS                          | 4.06        | -0.74        | 2.33         | -2.28        |

Los modelos regresión lineal múltiple, regresión lineal logarítmica y regresión lineal logarítmica múltiple mostraron un desempeño superior en comparación con los modelos restantes en las cuatro cuencas. La variable que ejerce la mayor influencia en la estimación del caudal máximo instantáneo anual es el caudal medio diario máximo anual, seguido por las precipitaciones medias de días anteriores a la crecida, variable influyente en los modelos ya que las cuencas son netamente de régimen pluvial. En el Anexo 6 se observa de manera gráfica los valores observados y simulados por cada modelo.

#### 4.6.1 Resultados validación de los modelos

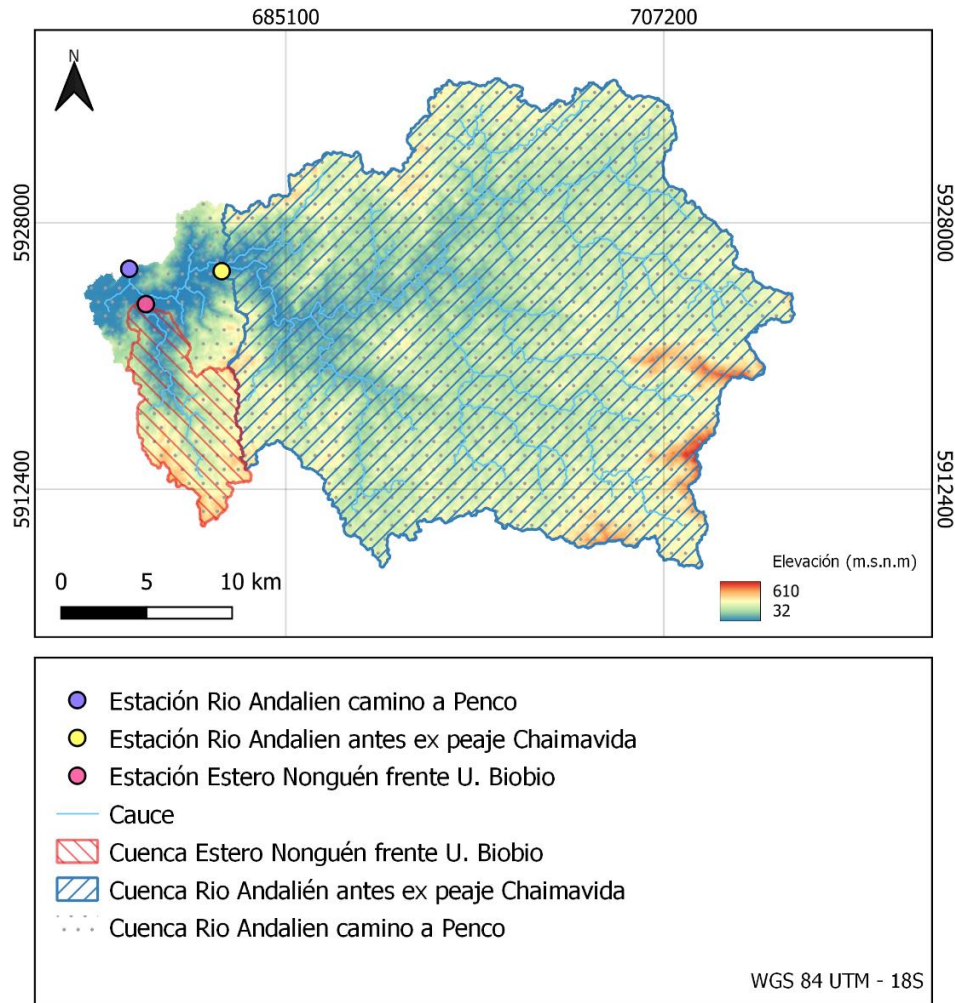
Los resultados de las medidas de bondad de ajuste en la validación de los modelos se muestran en la Tabla 4-13.

**Tabla 4-13.** Medidas de bondad de ajuste, validación.

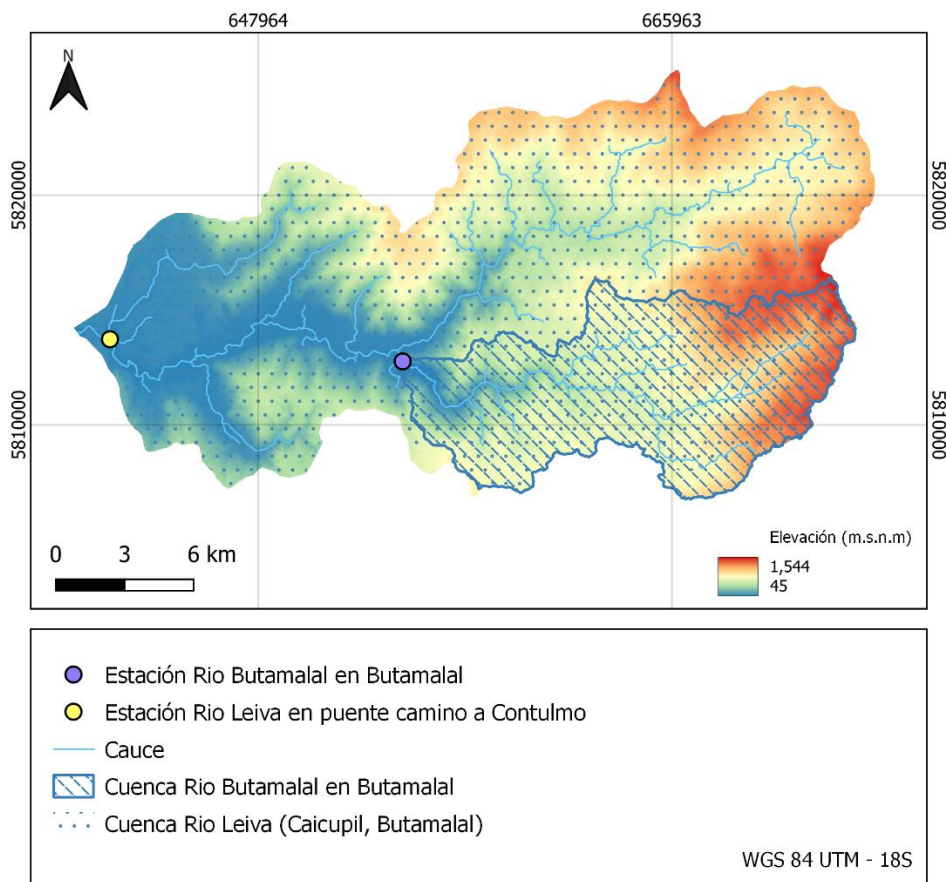
| Modelo                                | Medida bondad de ajuste | ENT          | RLD         | RAP         | RBB         |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Regresión lineal                      | R <sup>2</sup>          | 0.93         | 0.63        | 0.98        | 0.93        |
|                                       | NSE                     | 0.84         | 0.23        | 0.91        | 0.90        |
|                                       | PBIAS                   | 17.6         | -25.2       | 12.9        | 3.59        |
| Regresión lineal múltiple             | R <sup>2</sup>          | 0.76         | <b>0.77</b> | 0.91        | 0.84        |
|                                       | NSE                     | 0.72         | <b>0.72</b> | 0.63        | 0.73        |
|                                       | PBIAS                   | -11.9        | <b>5.57</b> | 27.9        | 13.6        |
| Regresión lineal logarítmica          | R <sup>2</sup>          | <b>0.93</b>  | 0.63        | <b>0.98</b> | <b>0.93</b> |
|                                       | NSE                     | <b>0.92</b>  | 0.23        | <b>0.97</b> | <b>0.92</b> |
|                                       | PBIAS                   | <b>-0.42</b> | -26.6       | <b>3.31</b> | <b>2.30</b> |
| Regresión lineal logarítmica múltiple | R <sup>2</sup>          | <b>0.94</b>  | 0.85        | 0.97        | 0.69        |
|                                       | NSE                     | <b>0.92</b>  | 0.41        | 0.97        | 0.67        |
|                                       | PBIAS                   | <b>-3.72</b> | -26.4       | 3.15        | -3.70       |
| Regresión lineal exponencial          | R <sup>2</sup>          | 0.96         | 0.61        | 0.96        | 0.90        |
|                                       | NSE                     | 0.35         | -0.35       | 0.73        | 0.88        |
|                                       | PBIAS                   | 36.1         | -37.9       | 14.2        | 4.22        |

De manera simultánea, se realizó una validación 2 para la cuenca Río Andalién camino a Penco y Río Butamalal en Butamalal.

En la Figura 4-13 se observa la estación fluviométrica Río Andalién antes ex peaje Chaimavida, que cuenta con registros desde el año 2015 y la estación Estero Nonguén frente U. del Biobío, que proporciona información desde el año 2009, ambas estaciones fueron utilizadas en la validación 2 para la cuenca Río Andalién camino a Penco. En la Figura 4-14 se muestra la estación fluviométrica Río Leiva en puente camino a Contulmo utilizada en la validación 2 de la cuenca Río Butamalal en Butamalal, aquella estación tiene registros desde el año 2009. En la Tabla 4-14 y Tabla 4-15 se muestran los resultados obtenidos de la validación 2. Para las cuencas Estero Nilahue en Santa Teresa y Río Loanco en desembocadura no fue posible realizar la validación 2, debido a la escasa disponibilidad de estaciones fluviométricas cercanas existentes.



**Figura 4-13.** Cuencas que forman parte de la validación 2.



**Figura 4-14.** Cuenca que forma parte de la validación 2.

**Tabla 4-14.** Medidas de bondad de ajuste en la validación 2, aplicando los modelos empíricos de la cuenca Río Andalién camino a Penco.

| Modelo                       | Medida bondad de ajuste | Río Andalién antes ex peaje Chaimavida | Estero Nonguén frente U. del Biobio |
|------------------------------|-------------------------|--|-------------------------------------|
| Regresión lineal             | R <sup>2</sup>          | 0.96                                   | 0.84                                |
|                              | NSE                     | 0.02                                   | -1.20                               |
|                              | PBIAS                   | 19.6                                   | 60.6                                |
| Regresión lineal múltiple    | R <sup>2</sup>          | 0.81                                   | 0.19                                |
|                              | NSE                     | -1.59                                  | -11.5                               |
|                              | PBIAS                   | 28.2                                   | 119                                 |
| Regresión lineal logarítmica | R <sup>2</sup>          | <b>0.96</b>                            | <b>0.84</b>                         |
|                              | NSE                     | <b>0.60</b>                            | <b>0.59</b>                         |
|                              | PBIAS                   | <b>10.3</b>                            | <b>-15.6</b>                        |
|                              | R <sup>2</sup>          | 0.95                                   | 0.82                                |
|                              | NSE                     | 0.40                                   | 0.53                                |

|   |                |      |       |
|---|----------------|------|-------|
| Regresión lineal<br>logarítmica<br>múltiple | PBIAS          | 11.9 | -15.4 |
| Regresión lineal<br>exponencial             | R <sup>2</sup> | 0.96 | 0.84  |
|   | NSE            | 0.25 | -20.1 |
|   | PBIAS          | 16.6 | 194   |

**Tabla 4-15.** Medidas de bondad de ajuste en la validación 2, aplicando los modelos empíricos de la cuenca Río Butamalal en Butamalal.

| Modelo                                      | Medida<br>bondad de ajuste | Río Leiva en puente<br>camino<br>a Contulmo |
|---|----------------------------|---|
| Regresión lineal                            | R <sup>2</sup>             | 0.83  |
|   | NSE                        | 0.74  |
|   | PBIAS                      | -6.56                                       |
| Regresión lineal<br>múltiple                | R <sup>2</sup>             | 0.74  |
|   | NSE                        | 0.68  |
|   | PBIAS                      | -7.19                                       |
| Regresión lineal<br>logarítmica             | R <sup>2</sup>             | <b>0.84</b>                                 |
|   | NSE                        | <b>0.72</b>                                 |
|   | PBIAS                      | <b>-6.93</b>                                |
| Regresión lineal<br>logarítmica<br>múltiple | R <sup>2</sup>             | 0.81  |
|   | NSE                        | 0.52  |
|   | PBIAS                      | -16.1                                       |
| Regresión lineal<br>exponencial             | R <sup>2</sup>             | 0.80  |
|   | NSE                        | 0.1   |
|   | PBIAS                      | 15.9  |

Los resultados de la Tabla 4-13 muestran que en la cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa los modelos con mejor desempeño son la regresión lineal logarítmica y regresión lineal logarítmica múltiple, en ambos sus resultados son de bueno a muy bueno, en comparación a los otros modelos que muestran medidas de NSE con menor desempeño. En la validación para la cuenca Río Loanco en desembocadura el modelo con mejor desempeño resultó ser el modelo de regresión lineal múltiple, a diferencia de los otros modelos, que presentaron magnitudes inferiores de NSE y magnitudes elevadas de PBIAS con signo negativo.

Con respecto a la validación para la cuenca Río Andalién camino a Penco los modelos con mejor desempeño son la regresión lineal logarítmica y regresión lineal logarítmica múltiple, obteniendo resultados de bueno a muy bueno en ambos modelos, mientras que en la validación 2 (Tabla 4-14) los mejores resultados van de satisfactorio, bueno a muy bueno para el modelo de regresión lineal logarítmica, siendo este el modelo de mejor desempeño en ambas validaciones.

En la cuenca Río Butamalal en Butamalal el modelo regresión lineal logarítmica muestra el mejor desempeño en ambas validaciones. En la primera validación (Tabla 4-13) el rendimiento es de bueno a muy bueno, mientras que en la validación 2 (Tabla 4-15) el rendimiento es bueno.

#### 4.6.2 Modelos Ajustados

En la Tabla 4-16 se presentan los resultados con mejor desempeño, tanto en el ajuste de los modelos como en ambas validaciones. Los modelos permiten estimar caudales máximos instantáneos anuales a partir de caudales medios diarios máximos anuales.

**Tabla 4-16.** Ecuaciones de los modelos ajustados.

| Modelo                                | Cuenca     | Ecuación   |
|---------------------------------------|------------|--|
| Regresión lineal logarítmica múltiple | <b>ENT</b> | $y = 1.68 \cdot 10^{-1} + 1.02 \ln(qmd) - 3.03 \cdot 10^{-2} \ln(pp2) - 7.68 \cdot 10^{-3} \ln(pp5) + 9.12 \cdot 10^{-3} \ln(pp7)$ |
| Regresión lineal múltiple             | <b>RLD</b> | $y = 5.79 \cdot 10 + 1.53qmd - 5.48pp2 + 3.57pp4 - 3.92pp5 - 2.26pp7 + 2.06prom\_anual$  |
| Regresión lineal logarítmica          | <b>RAP</b> | $y = 3.57 \cdot 10^{-1} + 9.63 \cdot 10^{-1} \ln(qmd)$   |
| Regresión lineal logarítmica          | <b>RBB</b> | $y = 1.33 + 7.39 \cdot 10^{-1} \ln(qmd)$   |

Donde,  $y$  es el caudal máximo instantáneo anual,  $qmd$  es el caudal medio diario máximo del día en que ocurre la crecida máxima,  $pp2$ ,  $pp4$ ,  $pp5$  y  $pp7$  son las precipitaciones medias diarias en los días

previos a la crecida máxima anual y *prom\_anual* la precipitación promedio acumulada anual de la cuenca.

El modelo más adecuado para la cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa resultó ser el método de regresión lineal logarítmica múltiple, para la cuenca Río Loanco en desembocadura el método de regresión lineal múltiple, mientras que para las cuencas Río Andalién camino a Penco y Río Butamalal en Butamalal el método más adecuado resultó ser el método de regresión lineal logarítmica. El caudal medio diario máximo formó parte de las variables de entrada en las cuatro cuencas ajustadas siendo esta la variable más importante en el desarrollo del ajuste de los modelos, seguido de las precipitaciones medias de días anteriores a la crecida, y la precipitación acumulada anual.

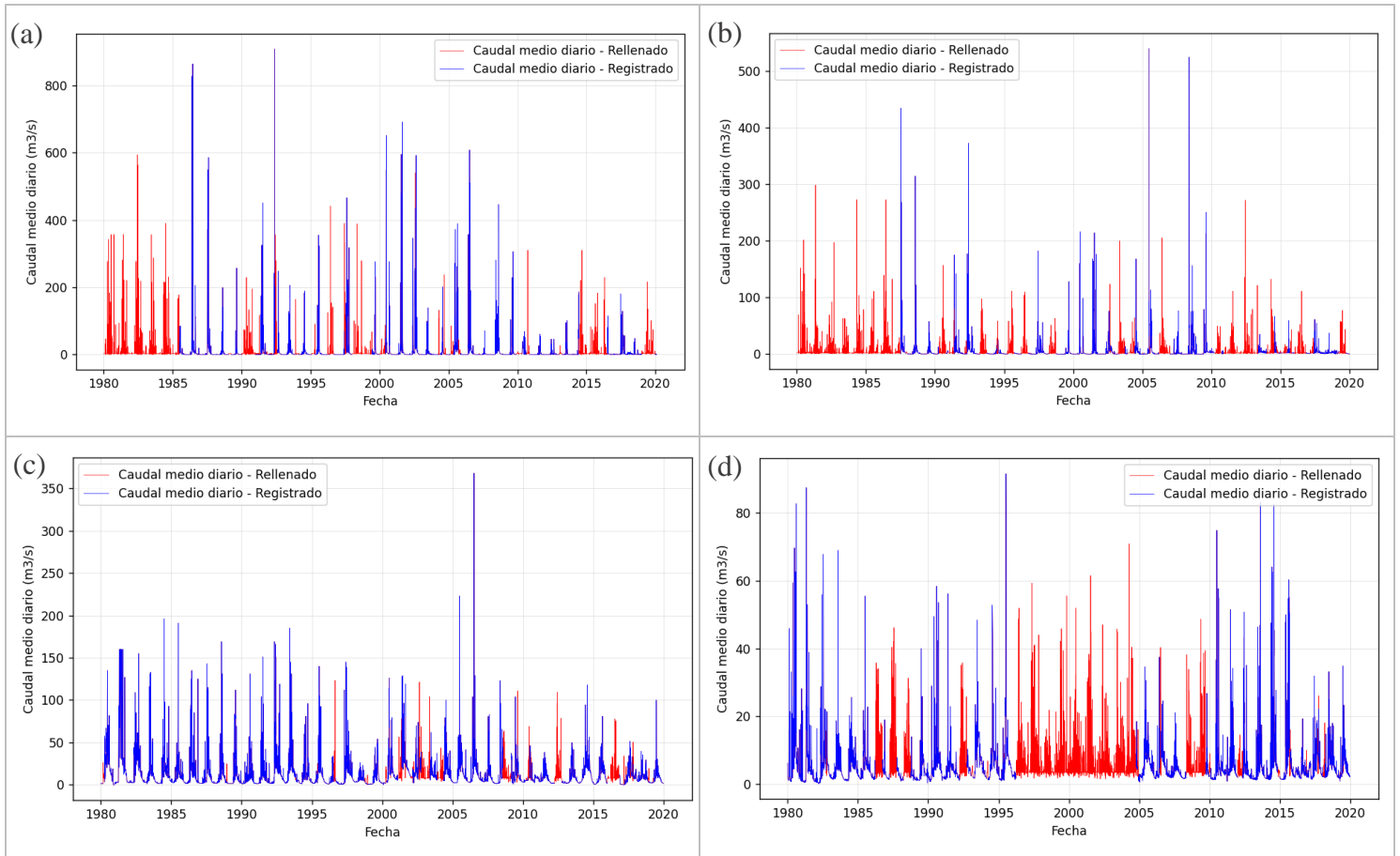
#### **4.7 Resultados estimación caudales máximos instantáneos**

Las estimaciones de los caudales máximos instantáneos asociados a los periodos de retorno 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años para las cuencas ENT, RLD, RAP y RBB (ver Tabla 4-8), se obtuvieron aplicando un análisis de frecuencia mediante el programa Python. Se seleccionó la serie de tiempo de 42 años, entre 1980 a 2021 para el análisis.

##### **4.7.1 Relleno de datos diarios**

Las series históricas de las estaciones fluviométricas no están completas, con años sin información tanto de caudales medios diarios como de caudales instantáneos, por esta razón, se aplicó un relleno de datos de caudales medios diarios para las cuatro cuencas, considerando la precipitación media de cada cuenca como variable de entrada junto con los caudales medios diarios registrados. Las estaciones por rellenar tienen escasa o nulas estaciones vecinas dificultando el relleno de datos por este medio, así que mediante el algoritmo de aprendizaje automático estocástico no paramétrico MissForest implementado en el lenguaje de programación Python de la biblioteca missingpy se realizó el relleno de datos, ingresando las series completas de precipitaciones medias diarias de las cuencas desde 1980 a 2020 obtenidas de la base de datos CAMELS-CL (Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies, Chile Dataset) desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). A su vez, los caudales medios diarios registrados fueron ingresados también como variables de entrada, sin embargo, las series no están completas existiendo espacios vacíos por

rellenar. Antes de la aplicación del algoritmo se evaluó la correlación entre ambas variables sin desfase y aplicando un desfase de 1 y 2 días, obteniendo una correlación satisfactoria con un desfase de 2 días para la cuenca ENT y 1 día para las cuencas RLD, RAP y RBB. En la Figura 4-15 se muestran los datos registrados (color azul) y los datos rellenados (color rojo).

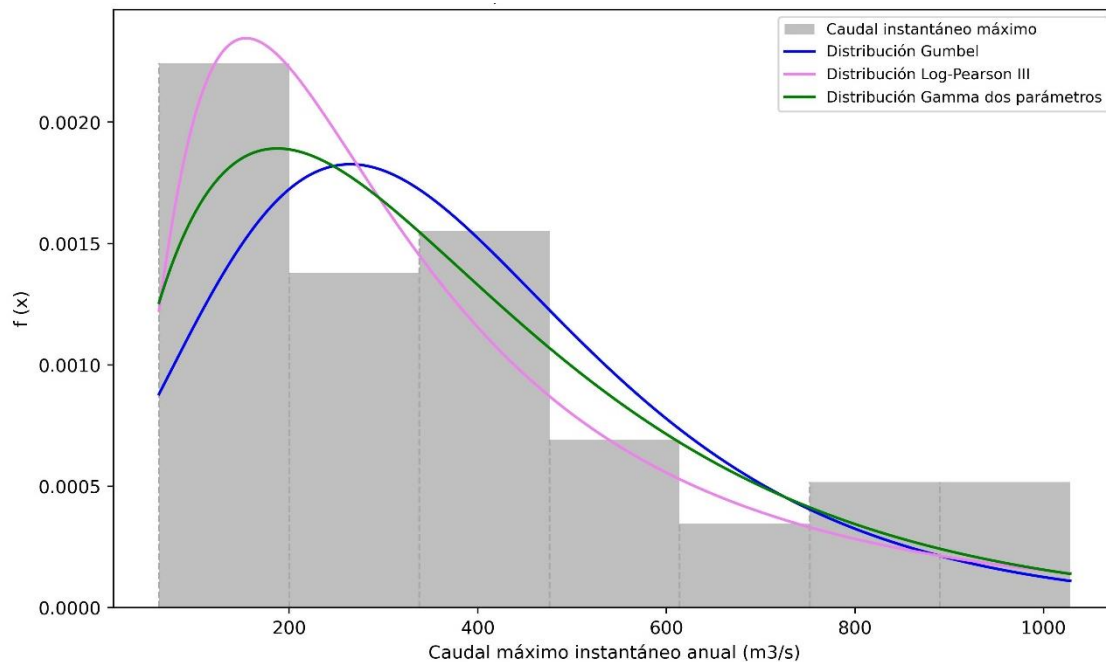


**Figura 4-15.** Datos de caudales medios diarios registrados y rellenados (a) Cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa (b) Cuenca Río Loanco en desembocadura (c) Cuenca Río Andalién camino a Penco (d) Cuenca Río Butamalal en Butamalal.

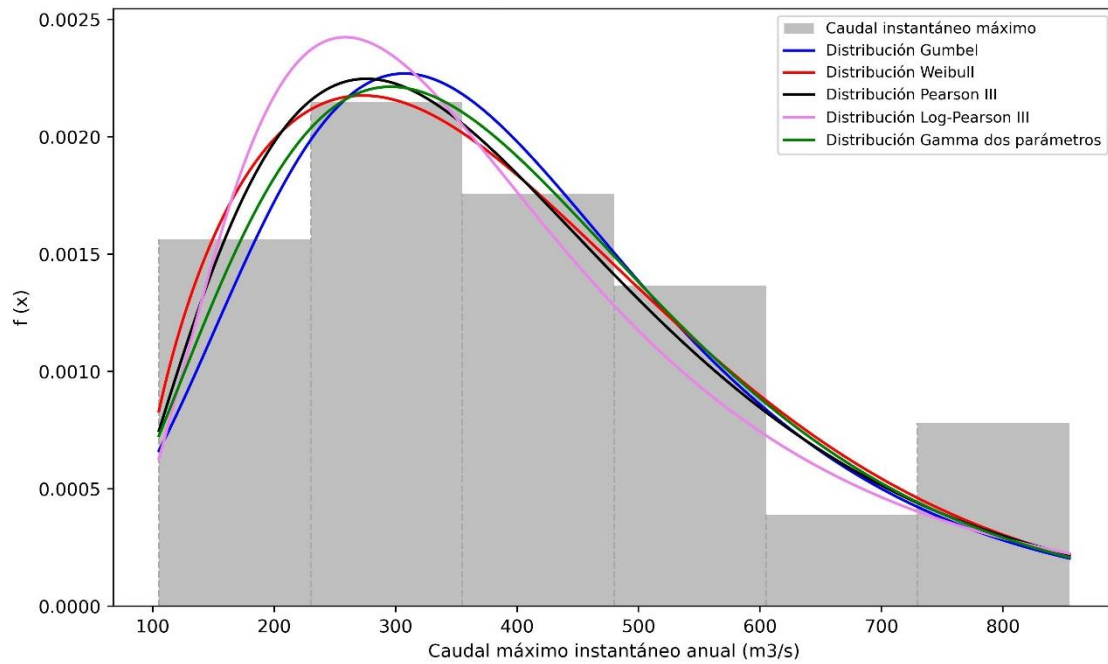
Posterior al relleno de datos de las series, se determinaron los valores de caudales medios diarios máximos en los años faltantes y se les aplicaron las ecuaciones de la Tabla 4-16 para determinar el caudal máximo instantáneo anual en los años sin registro.

### 4.7.2 Análisis de frecuencia

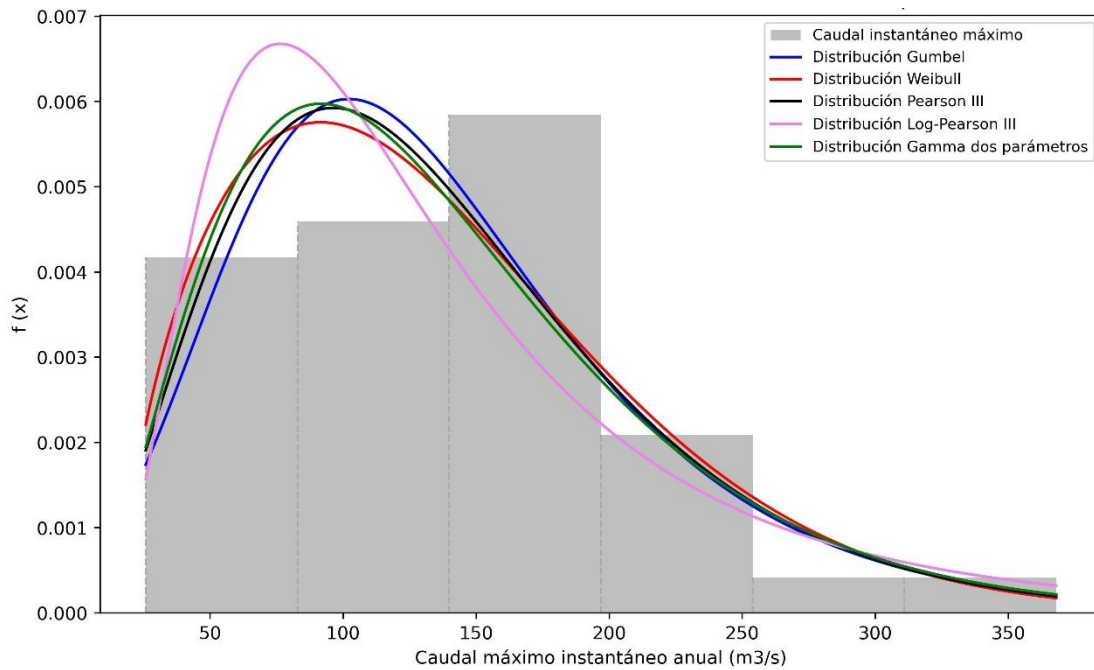
El análisis de frecuencia se aplicó para las series sin el relleno de datos y las series completas de caudales máximos instantáneos anuales entre los años 1980 a 2021. Las funciones de densidad de probabilidad utilizadas en el análisis se indican en el capítulo 3.6.3. Por cada distribución se evaluaron los estadísticos Chi-cuadrado y Kolmogórov-Smirnov, seleccionando la distribución con mejor ajuste en ambas pruebas para estimar los caudales máximos instantáneos para los periodos de retorno entre 2 y 100 años. En las siguientes figuras se muestran los histogramas de frecuencia con las funciones de densidad de probabilidad utilizadas en el análisis, en la Figura 4-16 sólo se observan tres distribuciones, ya que las distribuciones restantes no se lograron ajustar a los datos. En el anexo 7 se muestran los histogramas de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad para las series sin el relleno de datos, en el Anexo 8 y Anexo 9 se observan las funciones de densidad de probabilidad acumuladas para las series sin relleno de datos y las series completas, respectivamente.



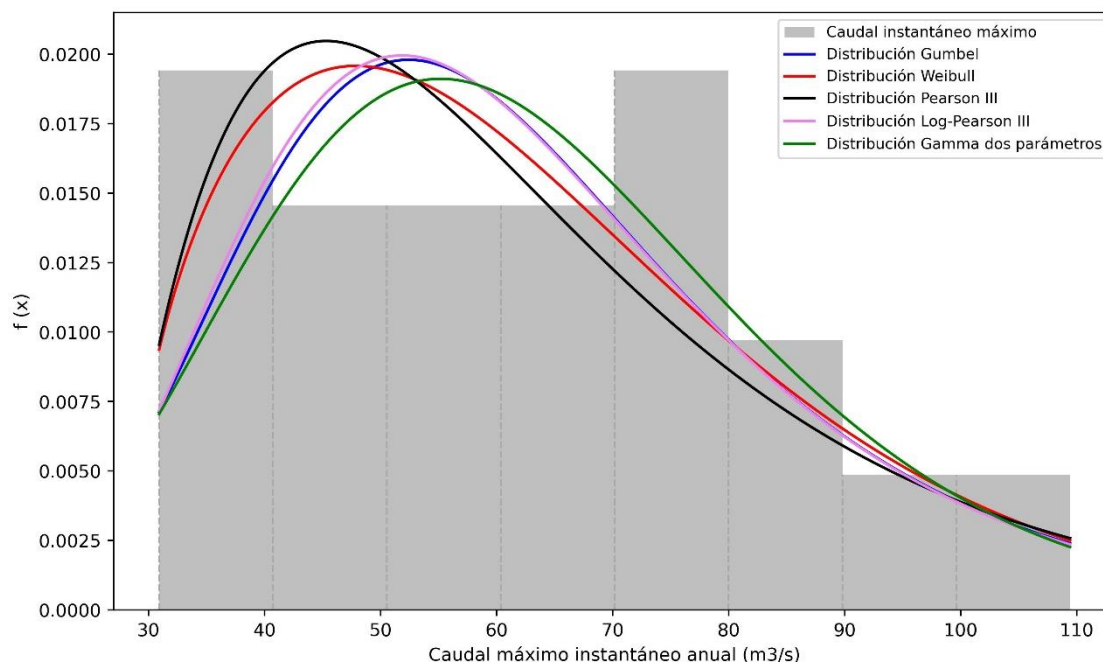
**Figura 4-16.** Histograma de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en la cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa, en la serie completa.



**Figura 4-17.** Histograma de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en la cuenca Río Loanco en desembocadura, en la serie completa.



**Figura 4-18.** Histograma de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en la cuenca Río Andalién camino a Penco, en la serie completa.



**Figura 4-19.** Histograma de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en la cuenca Río Butamalal en Butamalal, en la serie completa.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas de bondad de ajuste por cada función de densidad de probabilidad a un nivel de significancia del 5%, con la serie sin relleno de datos y con la serie completa en la Tabla 4-17 y Tabla 4-18, respectivamente.

**Tabla 4-17.** Resultados valor p de las pruebas de bondad de ajuste por cada función de densidad de probabilidad, serie sin relleno de datos.

| <b>Función de densidad de probabilidad</b> | <b>Prueba de bondad de ajuste</b> | <b>ENT</b> | <b>RLD</b> | <b>RAP</b> | <b>RBB</b> |
|--|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Distribución Gumbel                        | Chi-cuadrado ( $\chi^2$ )         | 0.03       | 0.61       | 0.70       | 0.17       |
|  | Kolmogórov-Smirnov                | 0.65       | 0.85       | 0.70       | 0.60       |
| Distribución Weibull                       | Chi-cuadrado ( $\chi^2$ )         | 0.07       | 0.33       | 0.61       | 0.34       |
|  | Kolmogórov-Smirnov                | 0.61       | 0.78       | 0.58       | 0.64       |
| Distribución Pearson tipo III              | Chi-cuadrado ( $\chi^2$ )         | 0.18       | 0.08       | 0.44       | 0.01       |
|  | Kolmogórov-Smirnov                | 0.91       | 0.23       | 0.43       | 0.06       |

|                                   |                           |      |      |      |      |
|-----------------------------------|---------------------------|------|------|------|------|
| Distribución Log-Pearson tipo III | Chi-cuadrado ( $\chi^2$ ) | 0.15 | 0.52 | 0.35 | 0.20 |
|                                   | Kolmogórov-Smirnov        | 0.89 | 0.74 | 0.34 | 0.59 |
| Distribución Gamma dos parámetros | Chi-cuadrado ( $\chi^2$ ) | 0.14 | 0.68 | 0.67 | 0.19 |
|                                   | Kolmogórov-Smirnov        | 0.95 | 0.87 | 0.62 | 0.64 |

**Tabla 4-18.** Resultados valor p de las pruebas de bondad de ajuste por cada función de densidad de probabilidad, serie completa.

| Función de densidad de probabilidad | Prueba de bondad de ajuste | ENT  | RLD  | RAP  | RBB  |
|-------------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|
| Distribución Gumbel                 | Chi-cuadrado ( $\chi^2$ )  | 0.08 | 0.55 | 0.70 | 0.21 |
|                                     | Kolmogórov-Smirnov         | 0.87 | 0.97 | 0.63 | 0.48 |
| Distribución Weibull                | Chi-cuadrado ( $\chi^2$ )  | 0.06 | 0.60 | 0.65 | 0.38 |
|                                     | Kolmogórov-Smirnov         | 0.38 | 0.96 | 0.64 | 0.45 |
| Distribución Pearson tipo III       | Chi-cuadrado ( $\chi^2$ )  | 0.04 | 0.60 | 0.67 | 0.37 |
|                                     | Kolmogórov-Smirnov         | 0.27 | 0.95 | 0.61 | 0.36 |
| Distribución Log-Pearson tipo III   | Chi-cuadrado ( $\chi^2$ )  | 0.15 | 0.53 | 0.26 | 0.22 |
|                                     | Kolmogórov-Smirnov         | 0.62 | 0.79 | 0.31 | 0.45 |
| Distribución Gamma dos parámetros   | Chi-cuadrado ( $\chi^2$ )  | 0.22 | 0.59 | 0.61 | 0.18 |
|                                     | Kolmogórov-Smirnov         | 0.94 | 0.97 | 0.55 | 0.61 |

Observando los resultados de las figuras y de las pruebas de bondad de ajuste, se obtuvo que las distribuciones de probabilidad que mejor se ajustaron a los datos en cada estación analizada son la distribución Gamma de dos parámetros para las cuencas Estero Nilahue en Santa Teresa, Río Loanco en desembocadura y Río Butamalal en Butamalal, mientras que la distribución Gumbel tuvo un mejor ajuste en la cuenca Río Andalién camino a Penco. En la Tabla 4-19 se muestran los caudales máximos instantáneos estimados a partir de las series sin el relleno de datos y las series completas, para los periodos de retorno (T) entre 2 y 100 años obtenidos con las funciones de densidad de probabilidad

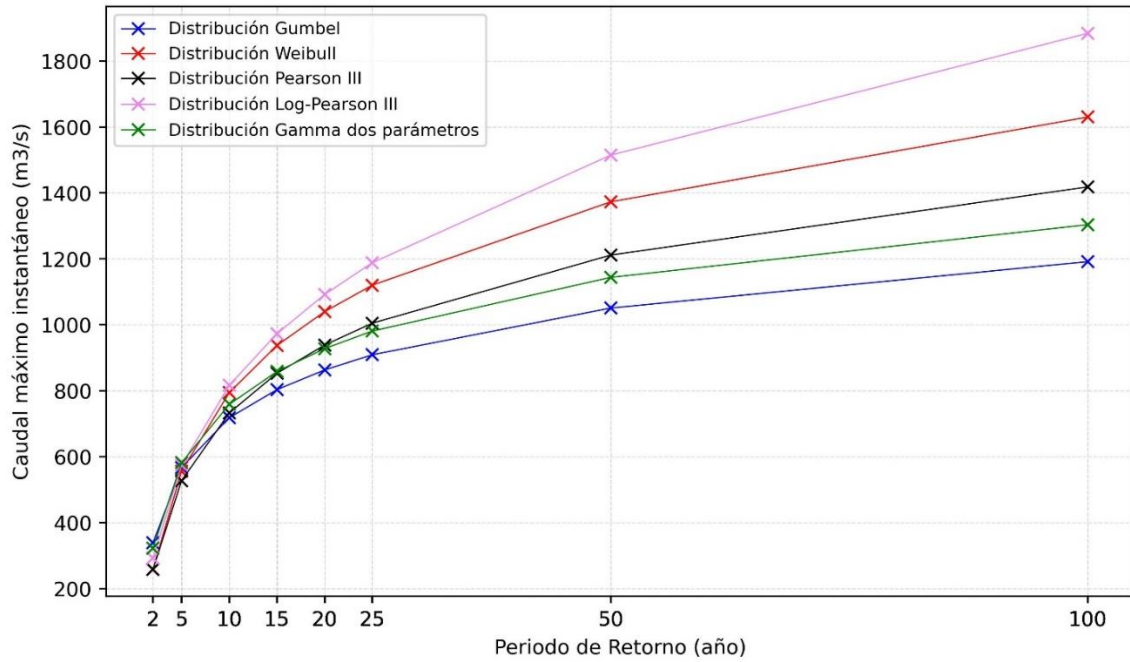
de mejor ajuste. La diferencia entre los valores estimados al ajustar las series con y sin relleno de datos resultaron ser mínimas en cada una de las cuencas estudiadas, con las distribuciones indicadas en dicha tabla.

**Tabla 4-19.** Resultados estimación de caudales máximos instantáneos en diferentes periodos de retorno, en las series sin el relleno de datos y las series completas.

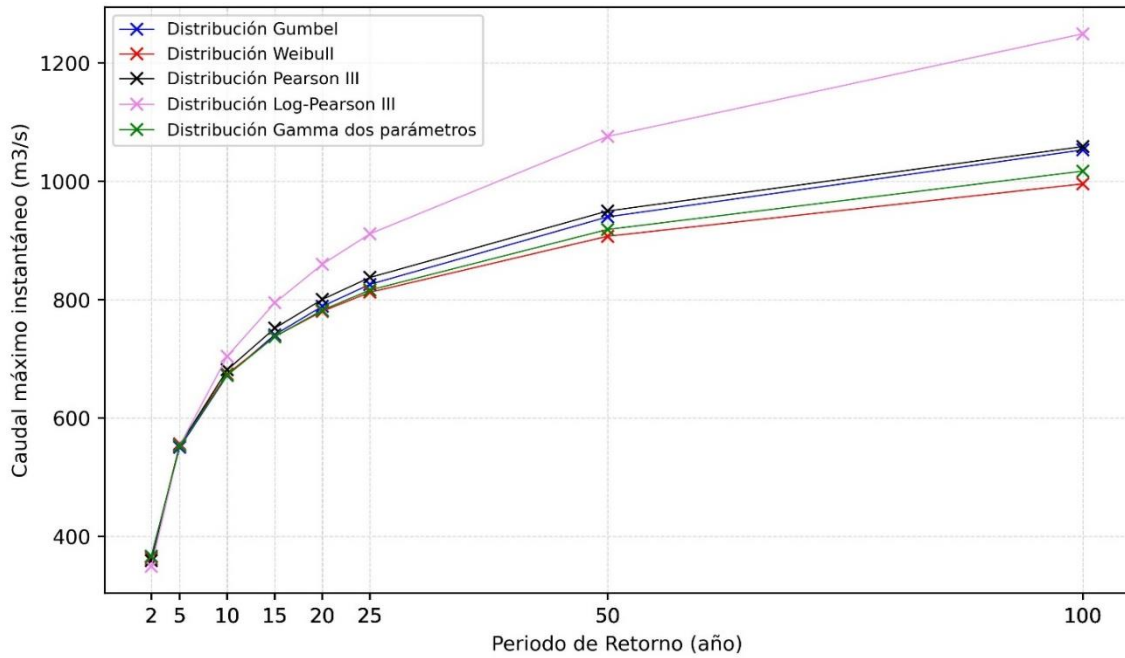
| Cuenca                         | Función de densidad de probabilidad | T (años) | Caudal máximo instantáneo (m <sup>3</sup> /s) |                |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------|---|----------------|
|                                |                                     |          | Serie sin relleno de datos                    | Serie completa |
| Estero Nilahue en Santa Teresa | Distribución Gamma dos parámetros   | 2        | 305.94  | 323.03         |
|                                |                                     | 5        | 584.36  | 581.92         |
|                                |                                     | 10       | 779.18  | 758.79         |
|                                |                                     | 15       | 889.92  | 858.40         |
|                                |                                     | 20       | 967.45  | 927.83         |
|                                |                                     | 25       | 1027.10                                       | 981.09         |
|                                |                                     | 50       | 1210.14                                       | 1143.86        |
|                                |                                     | 100      | 1390.52                                       | 1303.46        |
| Río Loanco en desembocadura    | Distribución Gamma dos parámetros   | 2        | 341.16  | 365.54         |
|                                |                                     | 5        | 561.91  | 553.23         |
|                                |                                     | 10       | 707.17  | 672.35         |
|                                |                                     | 15       | 787.76  | 737.44         |
|                                |                                     | 20       | 843.53  | 782.16         |
|                                |                                     | 25       | 886.12  | 816.14         |
|                                |                                     | 50       | 1015.37                                       | 918.53         |
|                                |                                     | 100      | 1141.01                                       | 1017.13        |
| Río Andalién camino a Penco    | Distribución Gumbel                 | 2        | 121.77  | 124.49         |
|                                |                                     | 5        | 192.41  | 193.65         |
|                                |                                     | 10       | 239.17  | 239.44         |
|                                |                                     | 15       | 265.56  | 265.27         |
|                                |                                     | 20       | 284.03  | 283.36         |
|                                |                                     | 25       | 298.26  | 297.29         |
|                                |                                     | 50       | 342.09  | 340.21         |
|                                |                                     | 100      | 385.60  | 382.81         |
| Río Butamalal en Butamalal     | Distribución Gamma dos parámetros   | 2        | 58.80   | 60.34          |
|                                |                                     | 5        | 81.63   | 80.29          |
|                                |                                     | 10       | 95.58   | 92.25          |
|                                |                                     | 15       | 103.08  | 98.63          |

|  |     |        |        |
|--|-----|--------|--------|
|  | 20  | 108.19 | 102.95 |
|  | 25  | 112.05 | 106.21 |
|  | 50  | 123.59 | 115.91 |
|  | 100 | 134.58 | 125.09 |

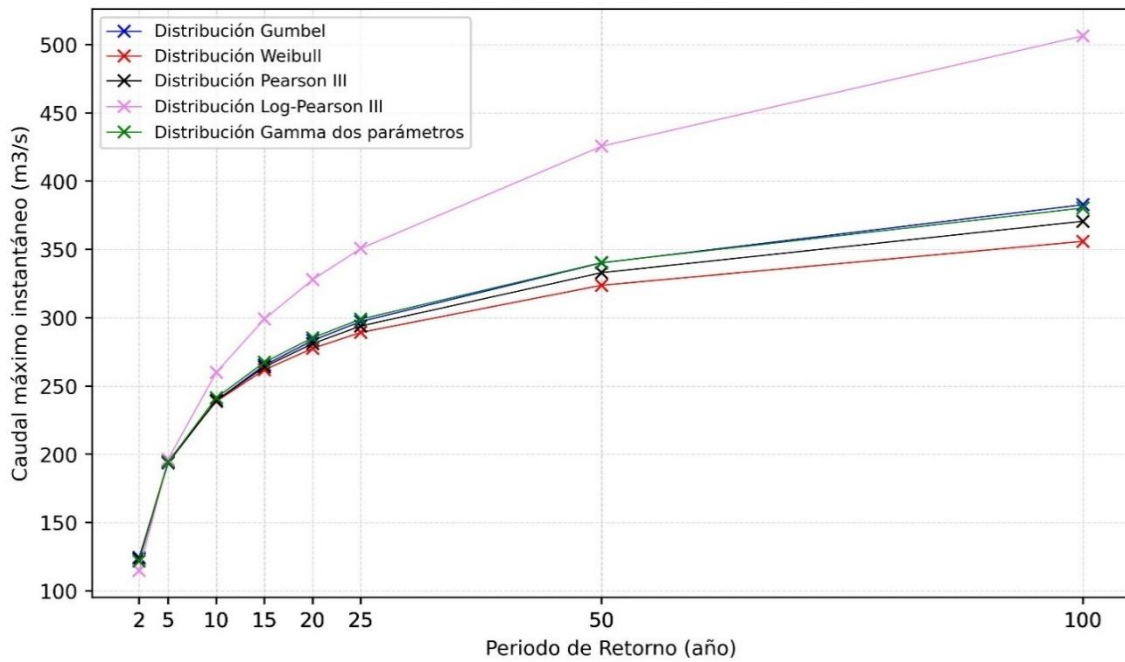
En las siguientes figuras se presentan de manera gráfica los resultados de los caudales máximos instantáneos para cada función de densidad de probabilidad analizada en las series completas.



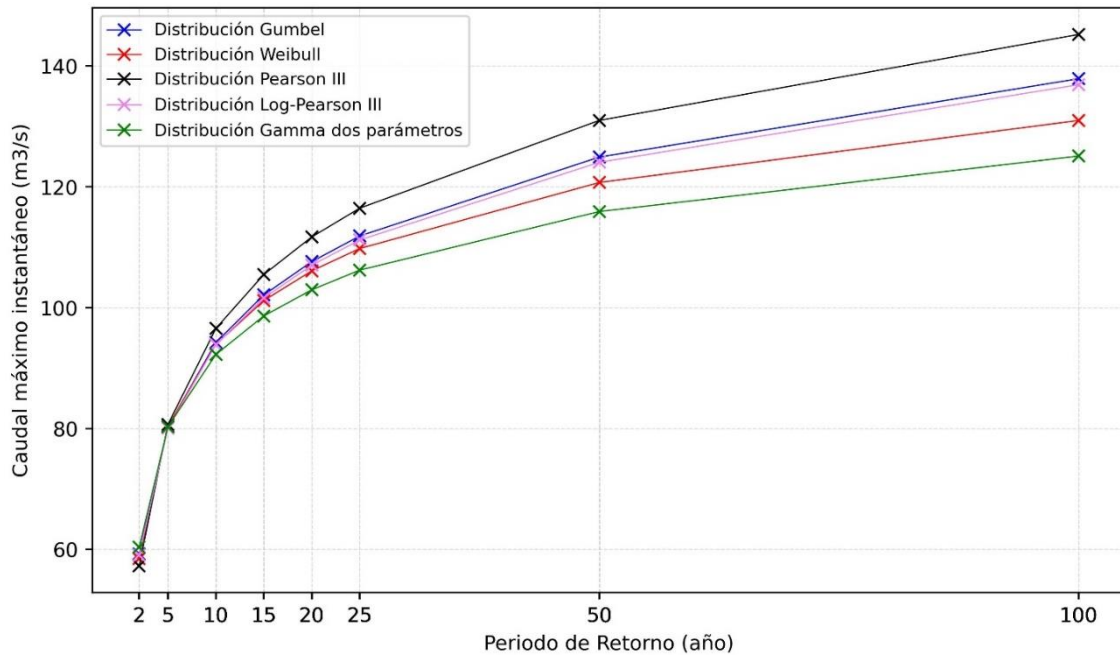
**Figura 4-20.** Caudales máximos instantáneos en la cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa asociado a los periodos de retorno  $T = 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50$  y  $100$  años, serie completa.



**Figura 4-21.** Caudales máximos instantáneos en la cuenca Río Loanco en desembocadura asociado a los periodos de retorno  $T = 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50$  y  $100$  años, serie completa.



**Figura 4-22.** Caudales máximos instantáneos en la cuenca Río Andalién camino a Penco asociado a los periodos de retorno  $T = 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50$  y  $100$  años, serie completa.



**Figura 4-23.** Caudales máximos instantáneos en la cuenca Río Butamalal en Butamalal asociado a los periodos de retorno  $T = 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50$  y  $100$  años, serie completa.

#### 4.8 Conclusión

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos a partir de los análisis realizados en las cuencas costeras. En cuanto al análisis de tendencia, se identificaron cambios significativamente decrecientes tanto en precipitaciones como en caudales, y ninguna estación presentó tendencias al aumento. Por otro lado, se ajustaron modelos empíricos que permitieron calcular caudales máximos instantáneos anuales a partir de caudales medios diarios máximos, precipitaciones medias de días anteriores a la crecida máxima y precipitaciones anuales acumuladas, con el objetivo de completar las series de caudales máximos instantáneos durante el periodo de estudio y aplicar el análisis de frecuencia. Logrando estimar los caudales máximos instantáneos de cada cuenca en los periodos de retorno entre 2 y 100 años.

## CAPITULO 5 CONCLUSIONES

En la presente memoria se han investigado las cuencas costeras ubicadas entre las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y la región del Biobío. Se les aplicó un análisis de tendencia para los caudales y las precipitaciones, con la finalidad de comprender el comportamiento a lo largo del tiempo e identificar tendencias significativas. Por otro lado, se estimaron caudales máximos instantáneos asociado a diferentes periodos de retorno en aquellas cuencas costeras con mayor cantidad de información en sus registros históricos.

Respecto a los resultados obtenidos del análisis de tendencia se muestra una notoria disminución de caudales y de precipitaciones en las cuencas estudiadas, mostrando tendencias significativamente decrecientes mayoritariamente en las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y del Biobío, y ninguna estación presentó tendencias significativas al aumento. Se evidenció que desde 1980 – 2021 el comportamiento de los caudales y precipitaciones han ido disminuyendo en las cuencas costeras, incluyendo los valores extremos.

La estimación de caudales máximos instantáneos anuales se realizó utilizando modelos empíricos, mediante métodos de regresión. Fue posible completar las series de registro entre los años 1980 – 2021 en las cuatro estaciones fluviométricas con mayor registro histórico de caudales, con la finalidad de aplicar el análisis de frecuencia y obtener los caudales máximos instantáneos en los periodos de retorno entre 2 y 100 años. Los resultados del análisis de frecuencia presentaron diferencias entre los valores estimados al ajustar las series con y sin relleno de datos, sin embargo, estas diferencias resultaron ser mínimas en cada cuenca estudiada.

A pesar de la limitada disponibilidad de información en las cuencas costeras, fue posible realizar la investigación. Lo que constituye un paso fundamental en el estudio de las cuencas, proporcionando una mayor comprensión de estas. Este trabajo establece una base sólida para estudios posteriores, proporcionando caudales de crecidas que pueden ser incorporados en estudios de modelación de inundaciones.

**REFERENCIAS**

- Alves, T. L. B., Azevedo, P. D., & Farias, A. D. (2015). *Comportamento da precipitação pluvial e sua relação com o relevo nas microrregiões do Cariri Oriental e Ocidental do estado da Paraíba. Revista Brasileira de Geografia Física*, 8(6), 1601-1614.
- Arriagada, P., Karelovic, B., & Link, O. (2021). *Automatic gap-filling of daily streamflow time series in data-scarce regions using a machine learning algorithm. Journal of Hydrology*, 598. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126454>
- Canuti, P., & Moisello, U. (1982). *Relationship between the yearly maxima of peak and daily discharge for some basins in Tuscany. Hydrological Sciences Journal*, 27(2), 111–128. <https://doi.org/10.1080/02626668209491094>
- Castro-Llanos, D. A. y Carvajal-Escobar, Y. (2013). *Análisis de tendencia en la precipitación pluvial anual y mensual en el departamento del Valle del Cauca. Memorias*, 11(20), 9-18.
- Chen, B., Krajewski, W. F., Liu, F., Fang, W., & Xu, Z. (2017). *Estimating instantaneous peak flow from mean daily flow. Hydrology Research*, 48(6), 1474–1488. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.200>
- DGA. (1995). *Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos sin información fluviométrica. Santiago: Dirección General de Aguas.*
- Dastorani, M. T., Koochi, J. S., Darani, H. S., Talebi, A., & Rahimian, M. H. (2013). *River instantaneous peak flow estimation using daily flow data and machine-learning-based models. Journal of Hydroinformatics*, 15(4), 1089–1098. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.245>
- Ding, J., Haberlandt, U., & Dietrich, J. (2015). *Estimation of the instantaneous peak flow from maximum daily flow: A comparison of three methods. Hydrology Research*, 46(5), 671–688. <https://doi.org/10.2166/nh.2014.085>
- Ding, J., & Haberlandt, U. (2017). *Estimation of instantaneous peak flow from maximum mean daily flow by regionalization of catchment model parameters. Hydrological Processes*, 31(3), 612–626. <https://doi.org/10.1002/hyp.11053>
- Fuller, W. E. (1914). *Flood flows. Transactions of the American Society of Civil Engineers* 77, 564–617. <https://doi.org/10.1061/taceat.0002552>

- Fill, H. D., Asce, M., & Steiner, A. A. (2003). *Estimating Instantaneous Peak Flow from Mean Daily Flow Data*. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2003\)8:6\(365\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2003)8:6(365))
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). *The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions*. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(4), 1211-1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Jimeno-Sáez, P., Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., Pulido-Velazquez, D., & María Cecilia, J. (2017). *Estimation of instantaneous peak flow using machine-learning models and empirical formula in Peninsular Spain*. *Water (Switzerland)*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/w9050347>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. Griffin, London.
- Krause, P., Boyle, D. P., and Bäse, F. (2005). *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*, *Adv. Geosci.*, 5, 89–97, <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Khaliq, M. N. (2024). *Estimation of instantaneous peak flows in Canadian rivers: An evaluation of conventional, nonlinear regression, and machine learning methods*. *Water Science and Technology*, 89(9), 2225–2239. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.096>
- Langbein, W. (1944). *Peak discharge from daily records*. *Water Resources Bulletin* 145.
- Mann, H. B. (1945). *Nonparametric tests against trend*. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900, <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Muñoz, E., Arumí, J. L., & Vargas, J. (2012). *A design peak flow estimation method for medium-large and data-scarce watersheds with frontal rainfall*. *Journal of the American Water Resources Association*, 48(3), 439–448. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00622.x>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., Daggupati, P. (2015). *Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria*. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 58(6), 1763-1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>

- Muñiz, L. (2021). *Implementación de algunos procedimientos computacionales en aplicaciones para la detección de puntos de cambio*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970). *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles*. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Pettitt, A. (1979). *A non-parametric approach to the change-point problem*. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135.
- Sen, P.K. (1968). *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.
- Sangal, B. P., & Asce, F. (1983). *Practical method of estimating peak flow*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(4), 549–563. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:4\(549\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:4(549))
- Silva, E. A., & Tucci, C. E. M. (1998). *Relação entre as vazões máximas diárias e instantâneas*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 3(1), 133–151.
- Stowhas, L. (2017). *Fundamentos de hidrología aplicada*. Editorial USM.
- Senent-Aparicio, J., Jimeno-Sáez, P., Bueno-Crespo, A., Pérez-Sánchez, J., & Pulido-Velázquez, D. (2019). *Coupling machine-learning techniques with SWAT model for instantaneous peak flow prediction*. *Biosystems Engineering*, 177, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.022>
- Shah, A. I., & Pan, N. Das. (2024). *Evaluation of probability distribution methods for flood frequency analysis in the Jhelum Basin of North-Western Himalayas, India*. *Cleaner Water*, 2, 100044. <https://doi.org/10.1016/J.CLWAT.2024.100044>
- Taguas, E. V., Ayuso, J. L., Pena, A., Yuan, Y., Sanchez, M. C., Giraldez, J. V., & Pérez, R. (2008). *Testing the relationship between instantaneous peak flow and mean daily flow in a Mediterranean Area Southeast Spain*. *CATENA*, 75(2), 129–137. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2008.04.015>
- Van Liew, M. W., Arnold, J. G., & Bosch, D. D. (2005). *Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model*. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 48(3): 1025-1040. <https://doi.org/10.13031/2013.18514>
- Zavala, M., Flores, M., Arellano, F., & Bautista, C. (2013). *Análisis de homogeneidad a los datos climatológicos del distrito de riego 034 Zacatecas*. *Ciencias Naturales y Exactas Handbook: Congreso Interdisciplinario de Cuerpos Académicos* (pp. 11-23). ECORFAN.

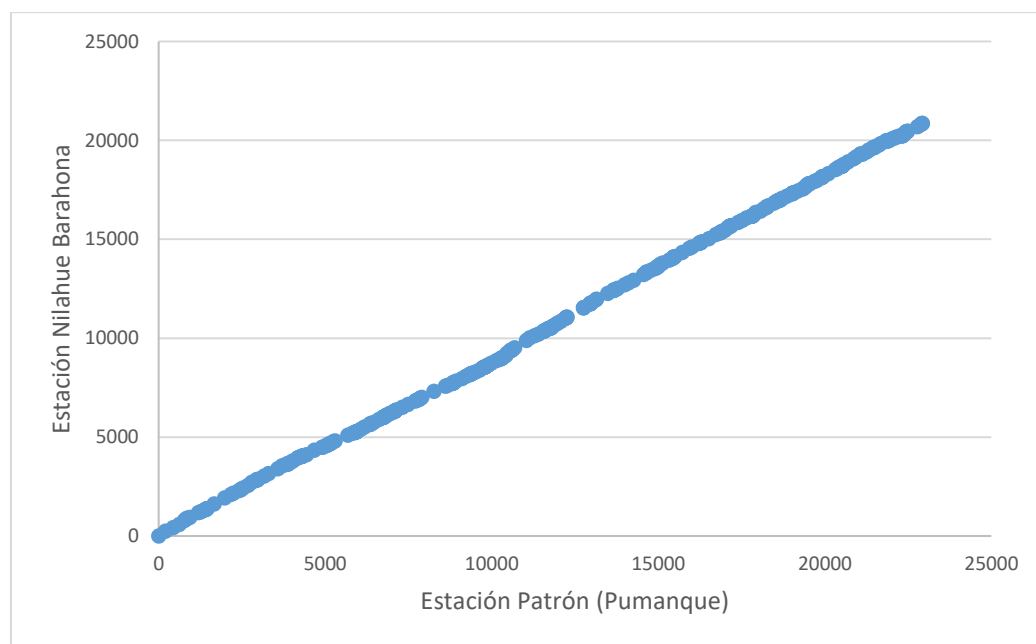
## 1. ANEXO1: Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

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

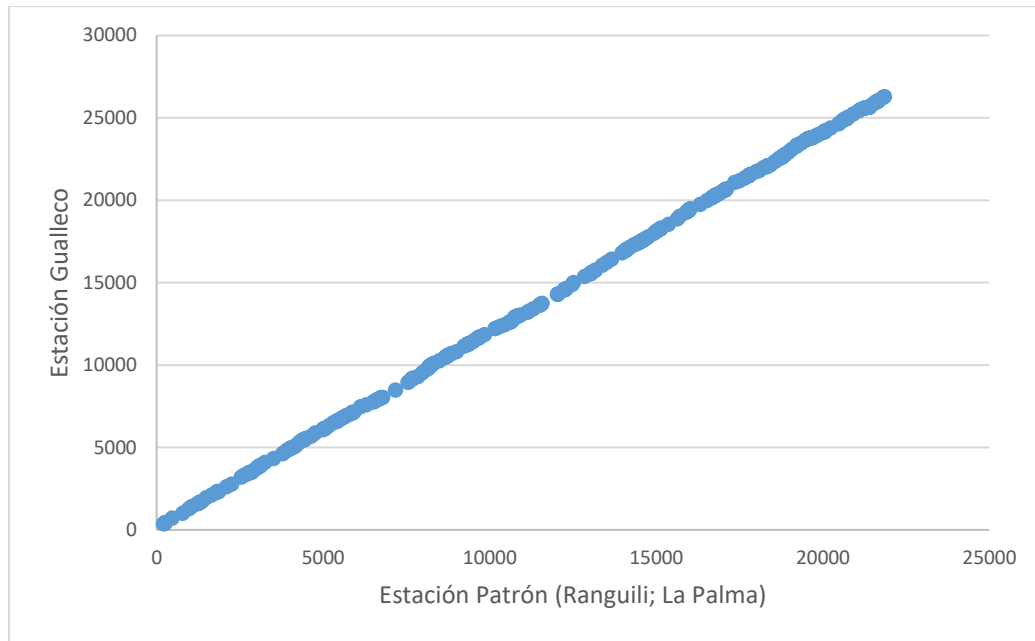
- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación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

**Vinculación**

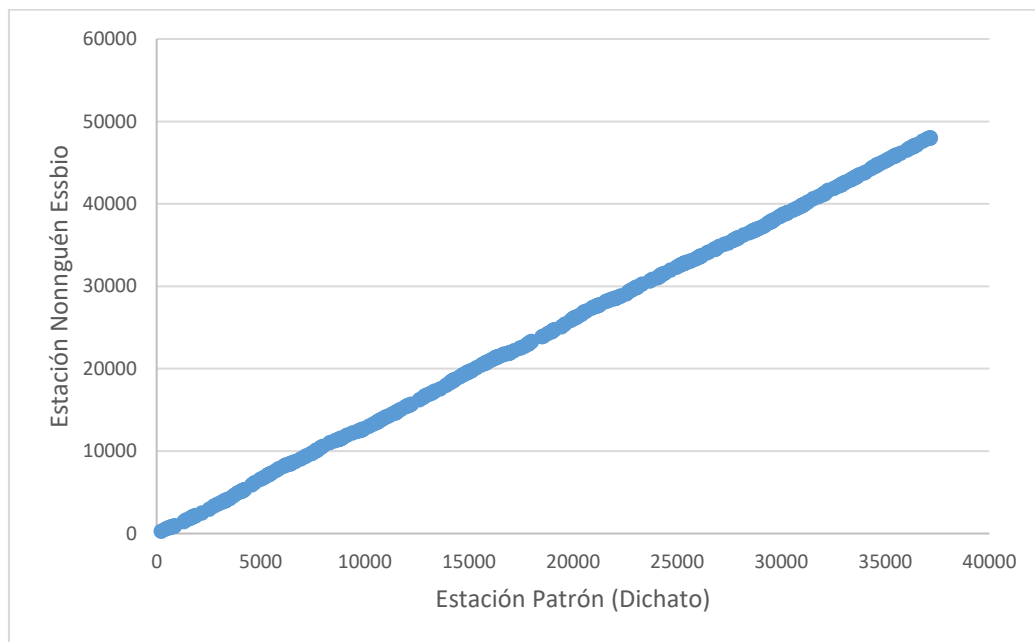
ODS-9. Industria, innovación e infraestructura: El estudio de la estimación de caudales máximos instantáneos a partir de caudales medios diarios desempeña un papel fundamental en el diseño de infraestructuras hidráulicas, especialmente en situaciones donde las series de registros históricos de caudales máximos instantáneos son insuficientes. Además, estimar adecuados caudales máximos instantáneos en diferentes periodos de retorno contribuye a diseñar infraestructuras hidráulicas capaces de prevenir el colapso y/o fallas de éstas en caso de que ocurran eventos de magnitudes extremas.

**2. ANEXO2: Curvas doble acumuladas de algunas estaciones pluviométricas estudiadas.**

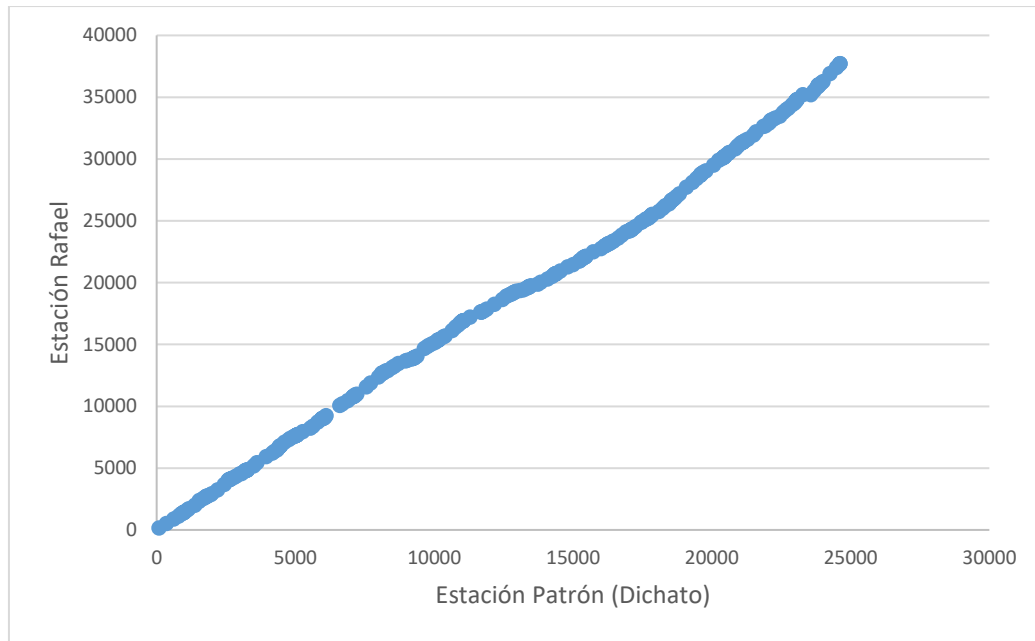
**Anexo 2-1.** Curva doble acumulada de la estación Nilahue Barahona.



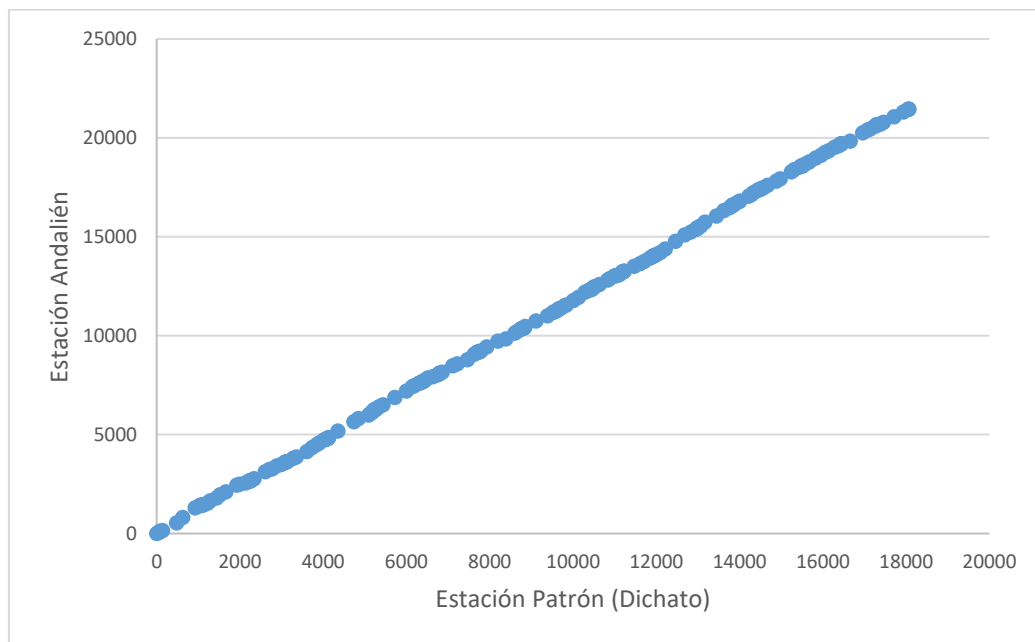
*Anexo 2-2. Curva doble acumulada de la estación Gualleco.*



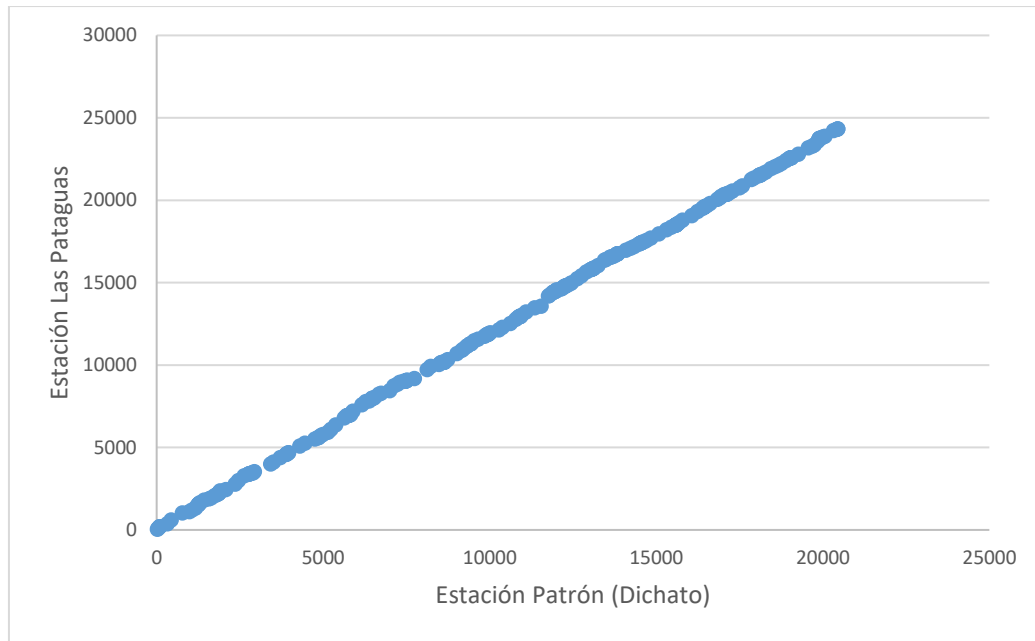
*Anexo 2-3. Curva doble acumulada de la estación Nonguén Essbio.*



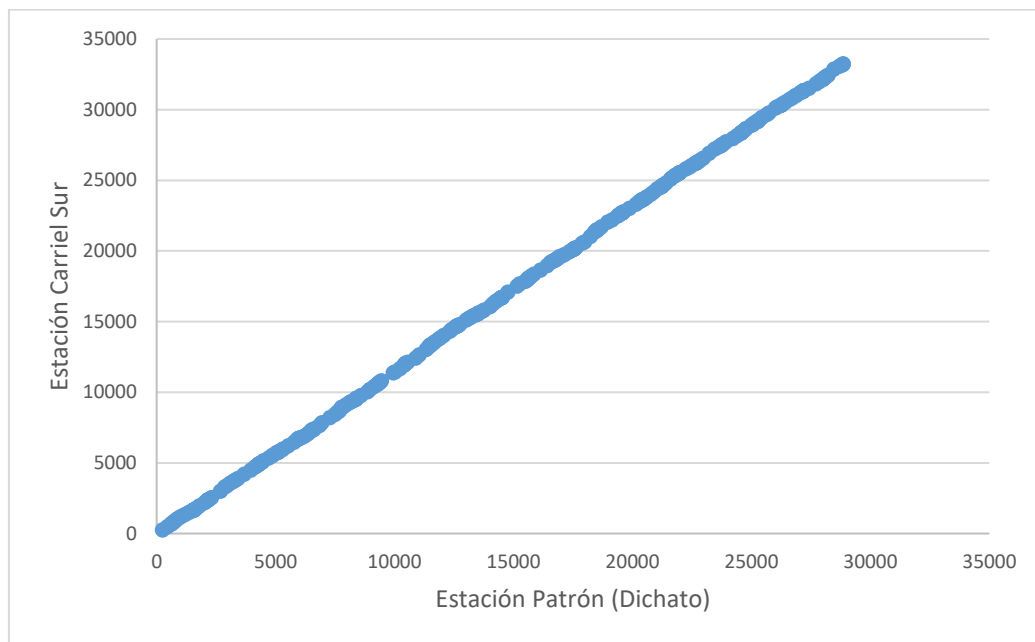
**Anexo 2-4.** *Curva doble acumulada de la estación Rafael.*



**Anexo 2-5.** *Curva doble acumulada de la estación Andalién.*

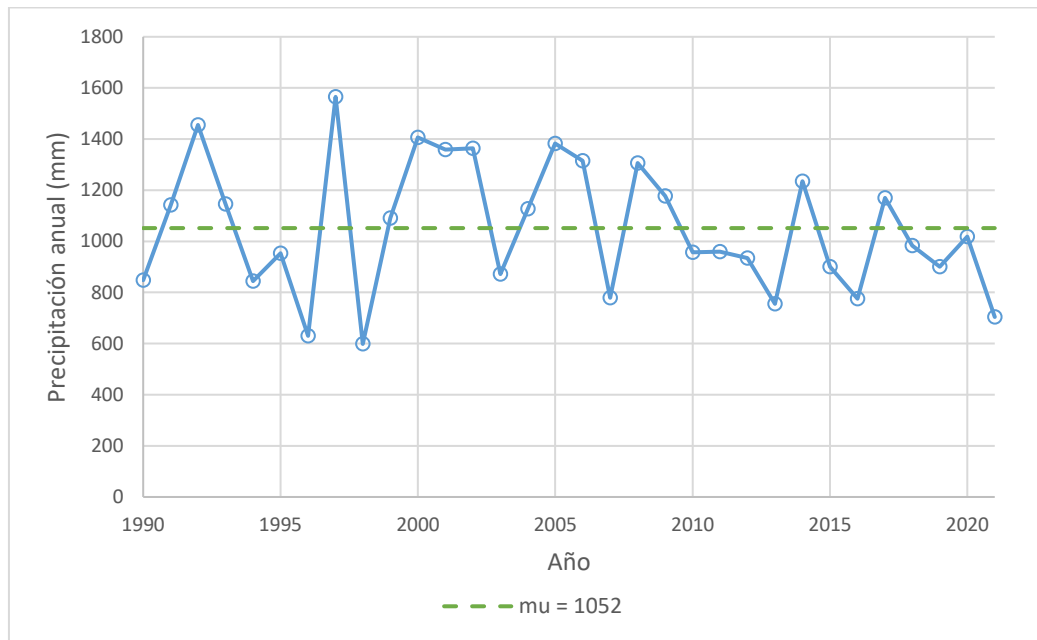


**Anexo 2-6.** Curva doble acumulada de la estación Las Pataguas.

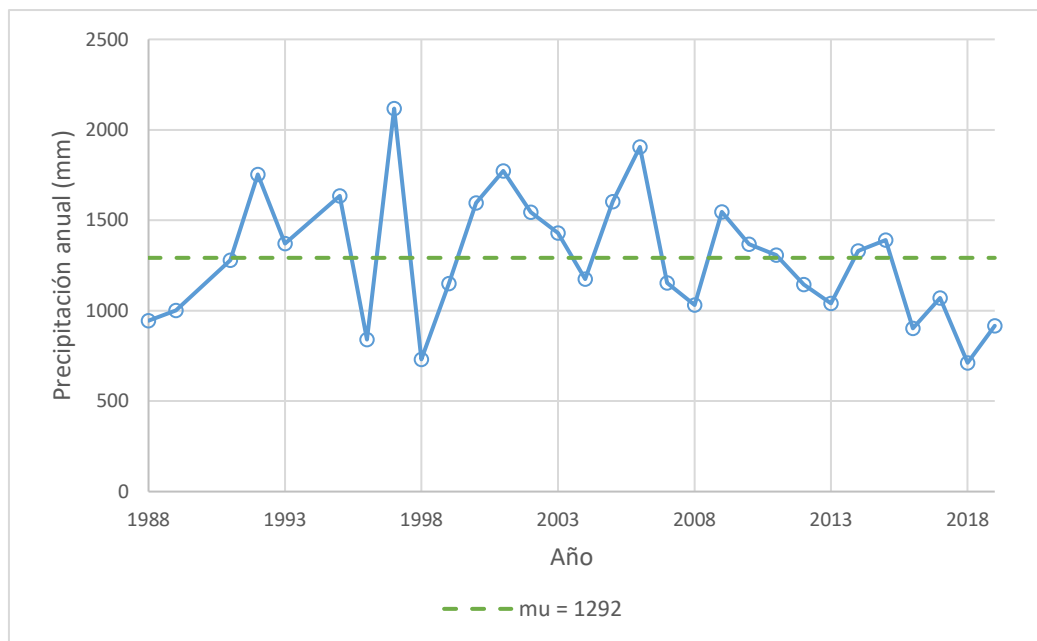


**Anexo 2-7.** Curva doble acumulada de la estación Carriel Sur.

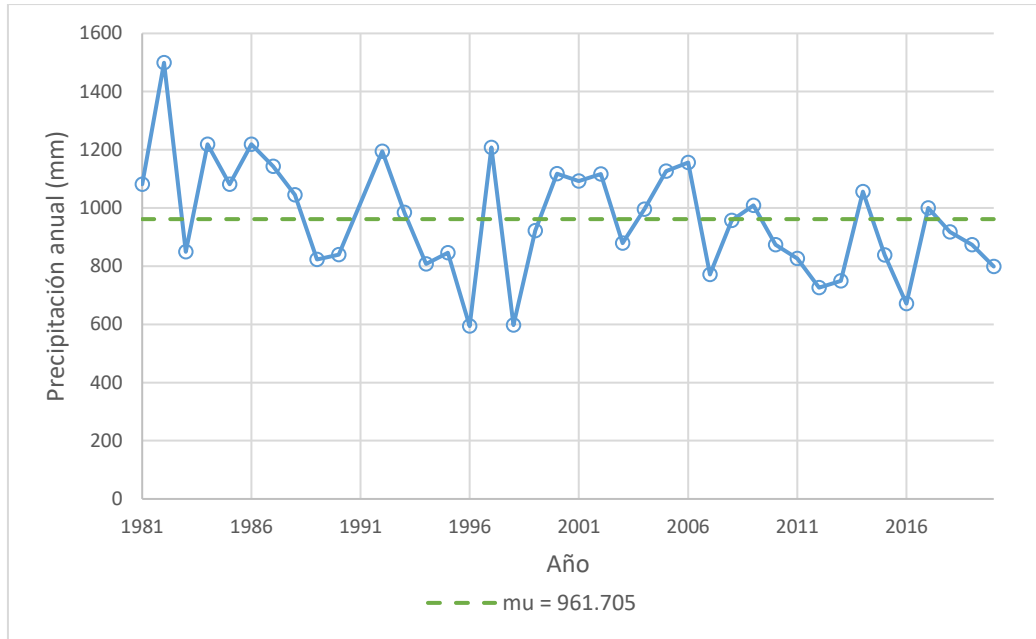
3. ANEXO3: Prueba de homogeneidad de Pettit en estaciones pluviométricos y fluviométricos.



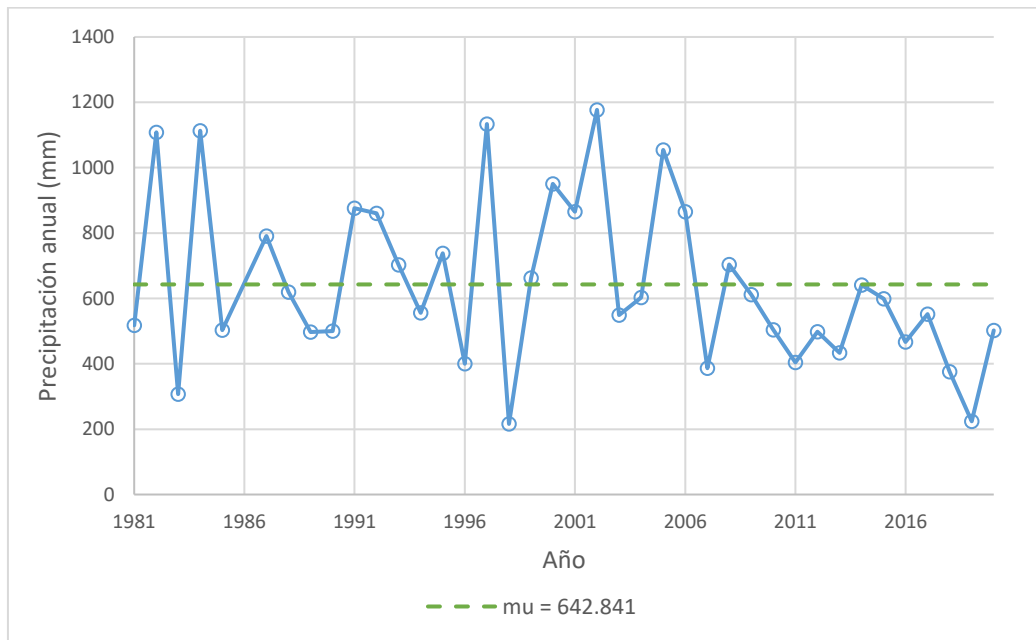
Anexo 3-1. Prueba de homogeneidad de Pettit en estación Carriel Sur.



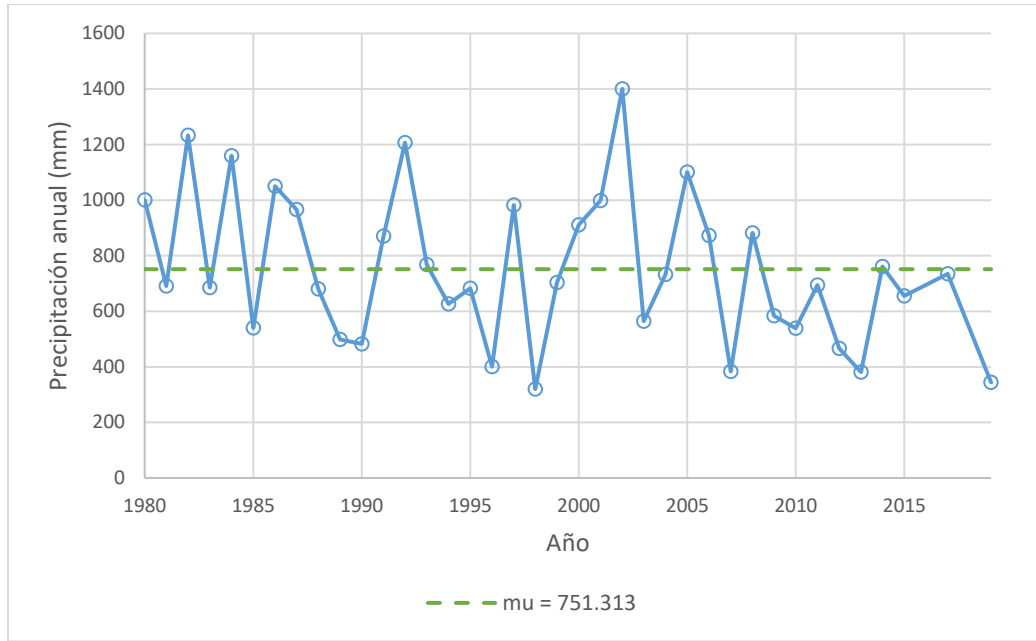
Anexo 3-2. Prueba de homogeneidad de Pettit en estación Contulmo.



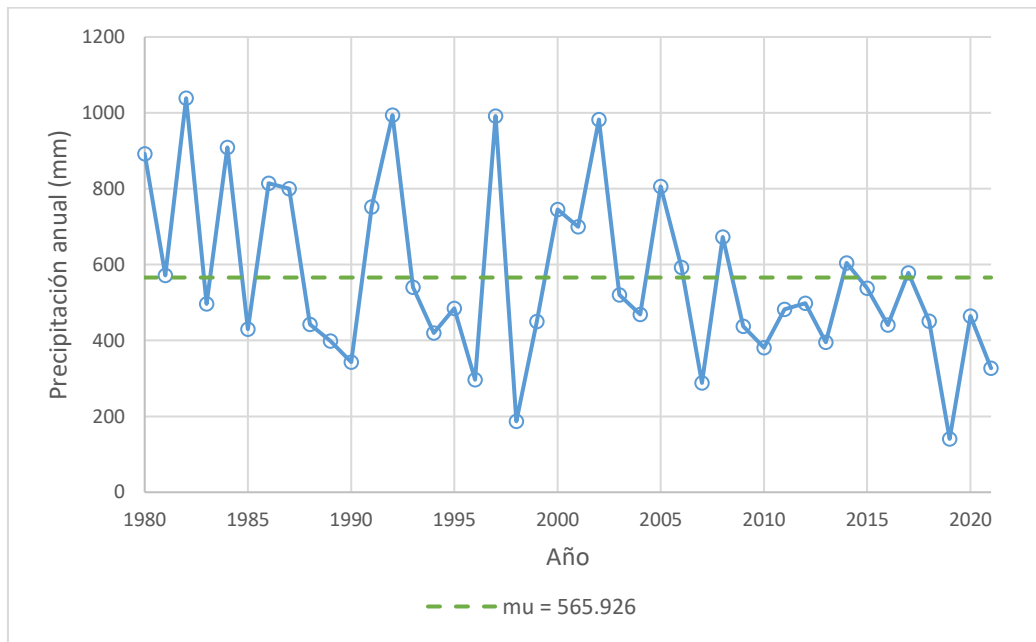
**Anexo 3-3.** Prueba de homogeneidad de Pettit en estación Dichato.



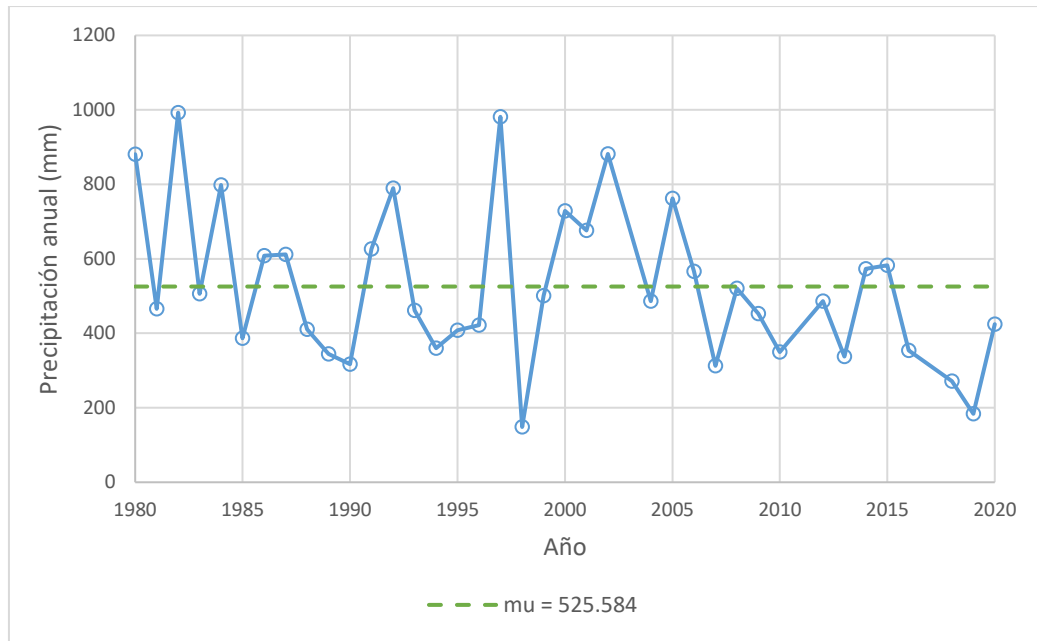
**Anexo 3-4.** Prueba de homogeneidad de Pettit en estación El Membrillo.



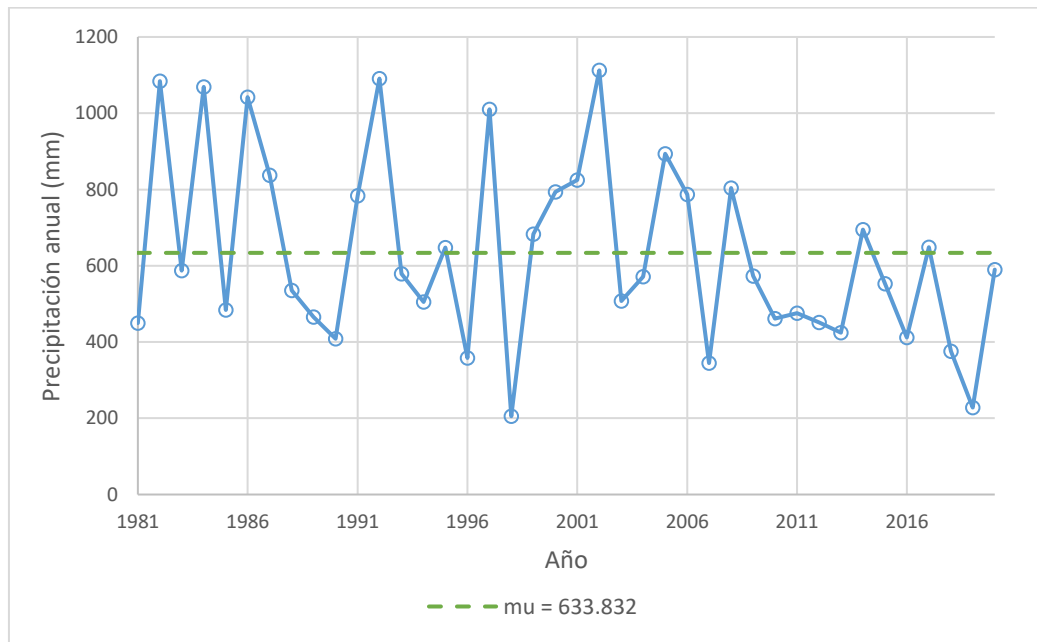
**Anexo 3-5.** Prueba de homogeneidad de Pettit en estación Gualleco.



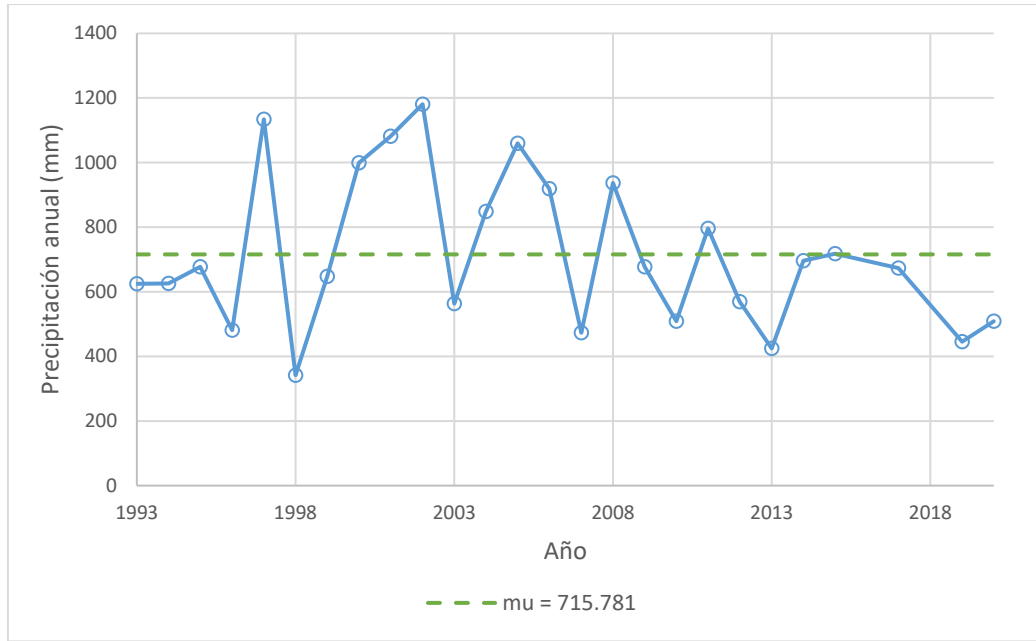
**Anexo 3-6.** Prueba de homogeneidad de Pettit en estación Pumanque.



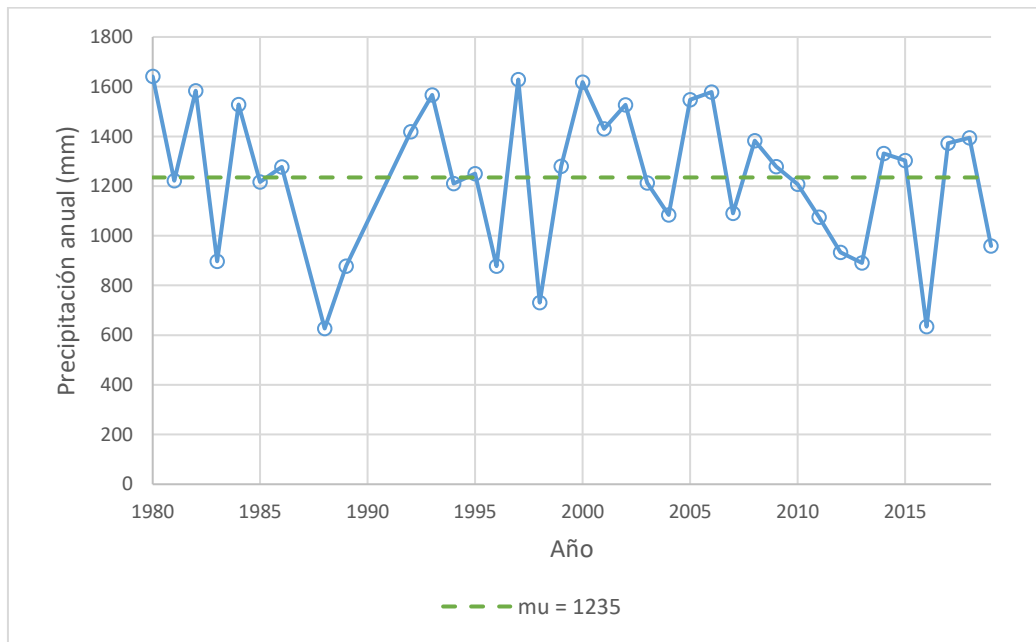
**Anexo 3-7. Prueba de homogeneidad de Pettit en estación Nilahue Barahona.**



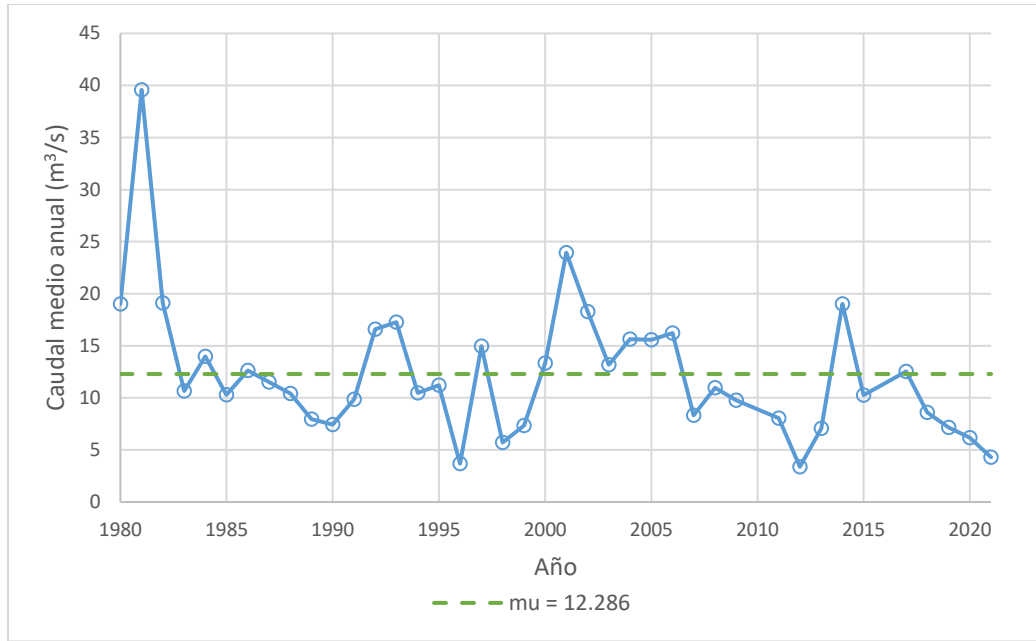
**Anexo 3-8. Prueba de homogeneidad de Pettit en estación Ranguli.**



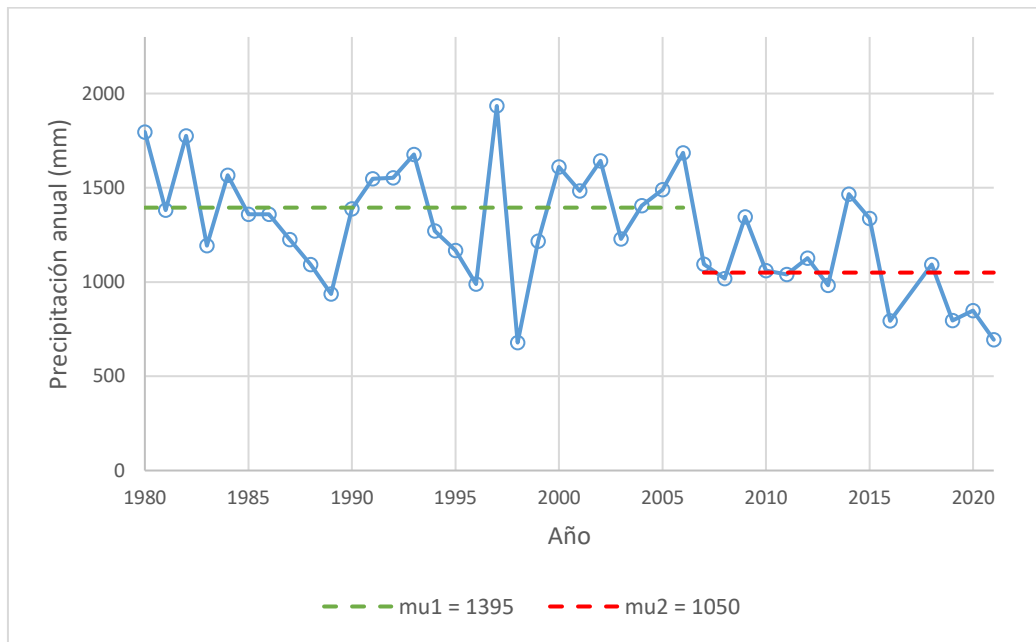
**Anexo 3-9.** Prueba de homogeneidad de Pettit en estación Putu.



**Anexo 3-10.** Prueba de homogeneidad de Pettit en estación Cañete.

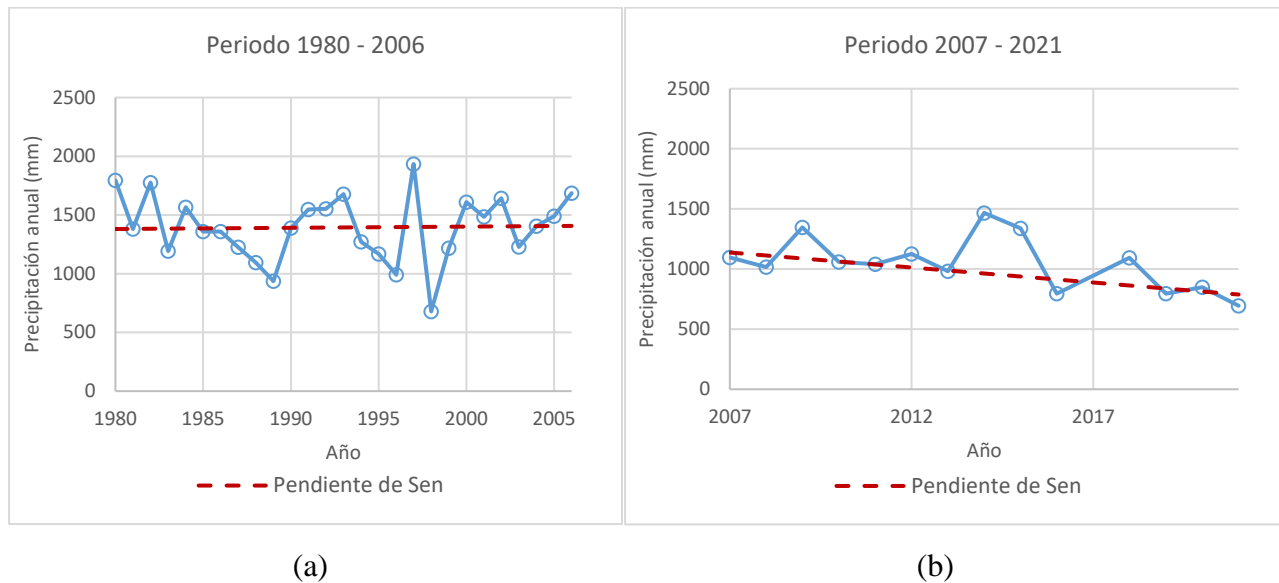


**Anexo 3-11.** Prueba de homogeneidad de Pettit en estación Río Andalién camino a Penco.

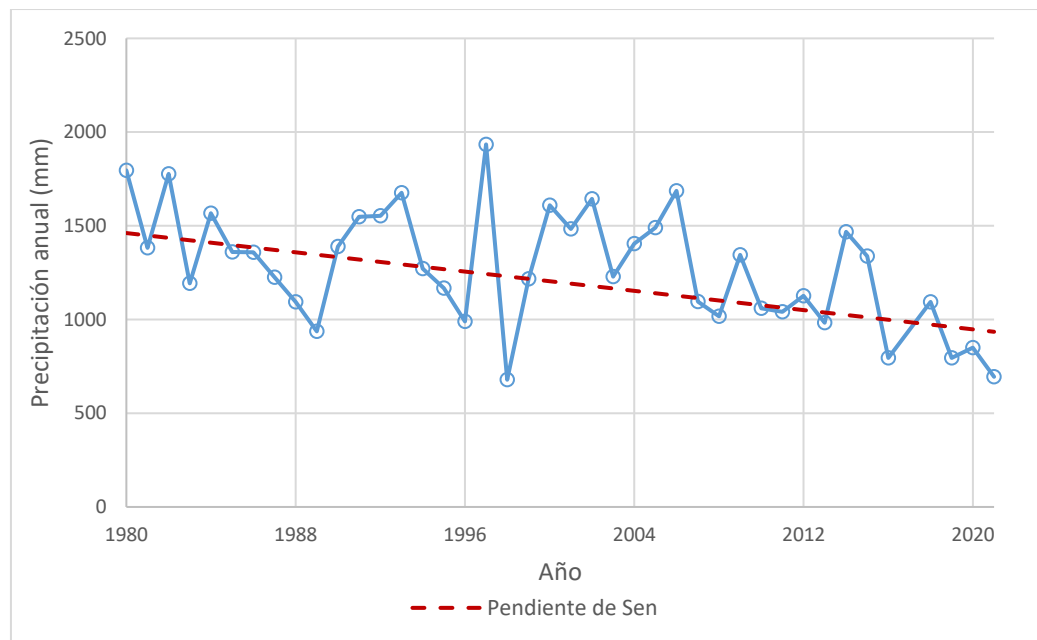


**Anexo 3-12.** Prueba de homogeneidad de Pettit en estación Lebu Essbio.

#### 4. ANEXO4: Prueba de Mann – Kendall en la estación Lebu Essbio antes y después del punto de cambio.

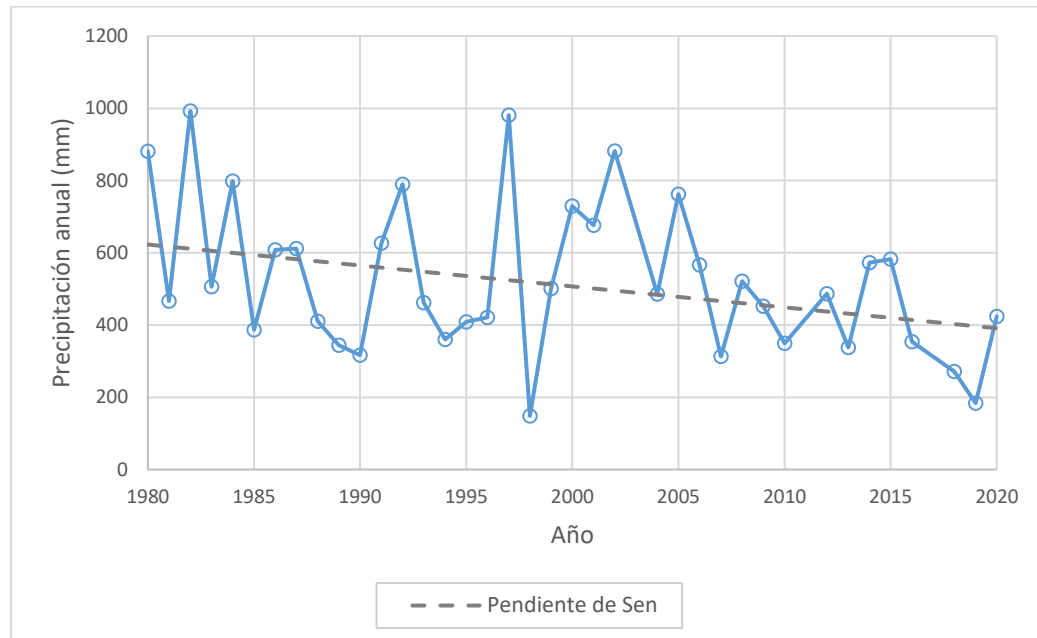


**Anexo 4-1.** (a) No se detecta tendencia durante el periodo 1980 – 2006 (b) La tendencia decreciente después del punto de cambio.

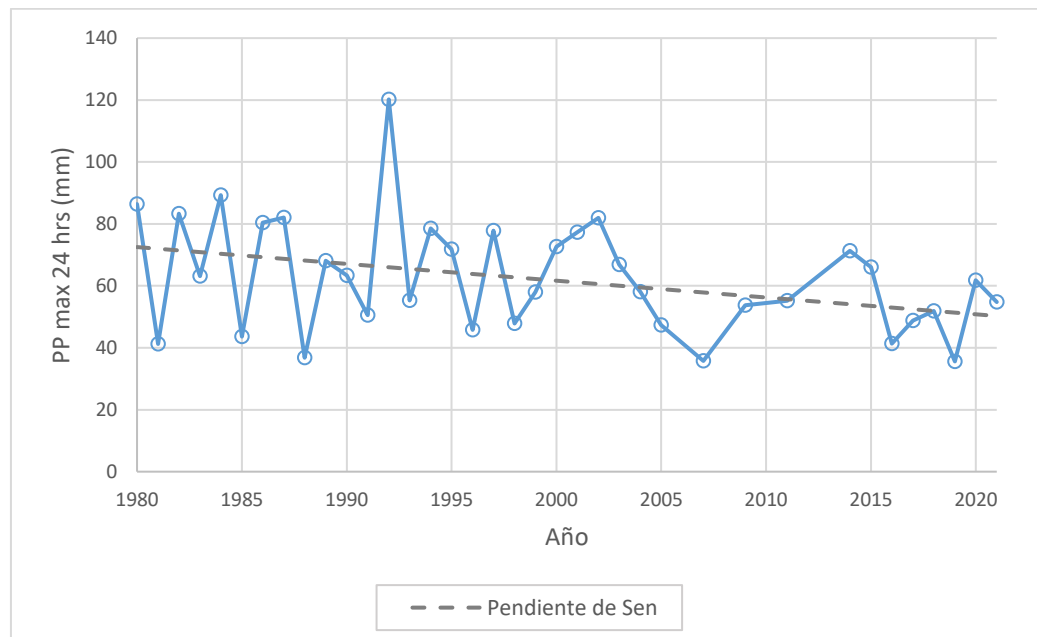


**Anexo 4-2.** Prueba Mann - Kendall en la estación Lebu Essbio en su registro histórico, tendencia significativamente decreciente.

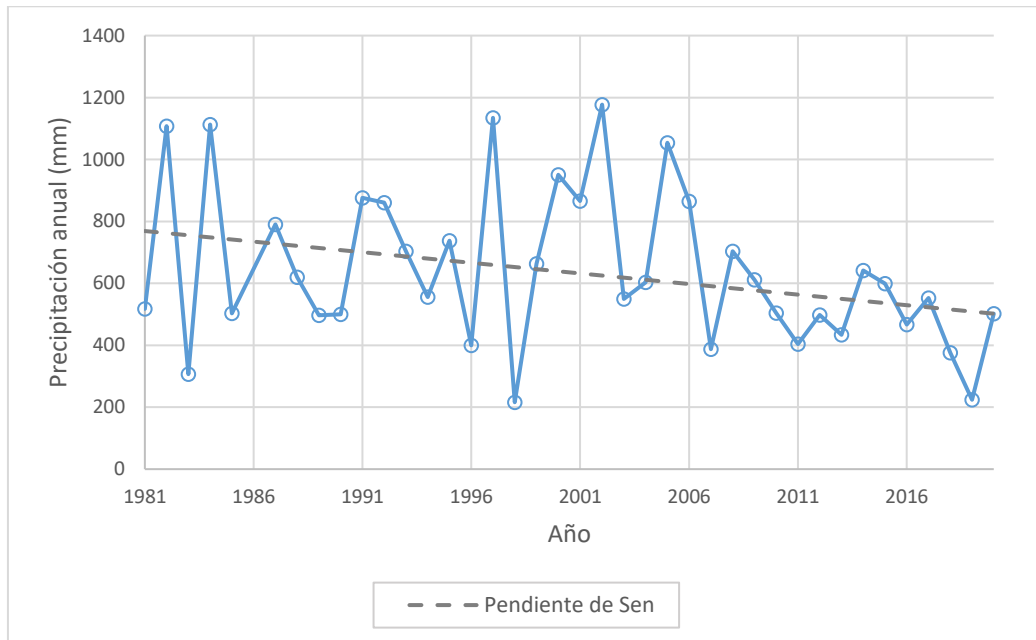
5. ANEXO5: Prueba de Mann – Kendall, tendencias significativamente decrecientes en precipitaciones acumuladas anuales, precipitaciones máximas anuales en 24 hrs, caudales medios anuales y caudales máximos instantáneos anuales.



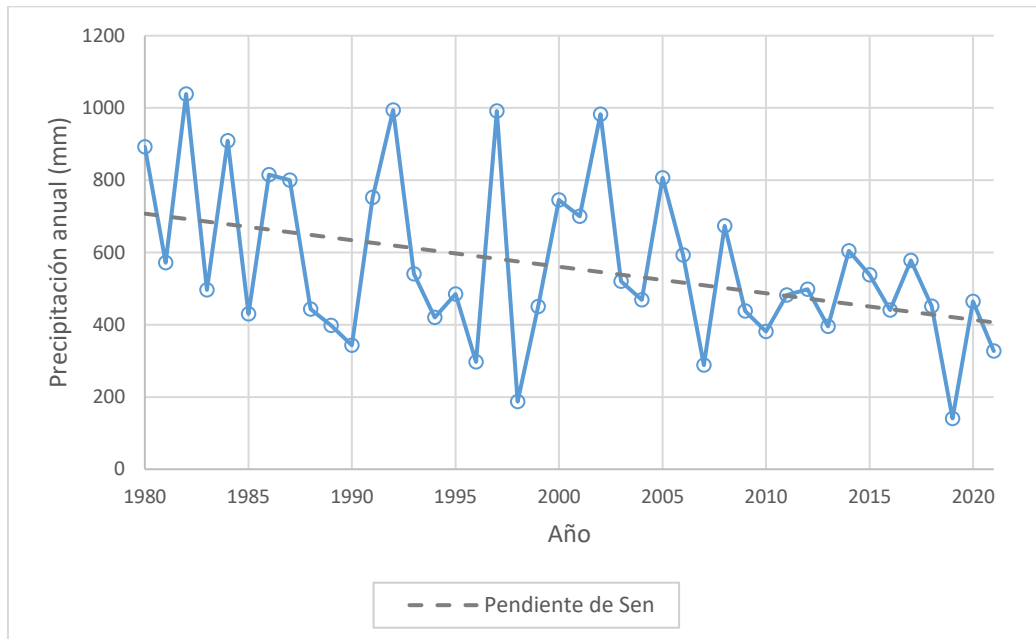
Anexo 5-1. Tendencia significativamente decreciente, estación Nilahue Barahona.



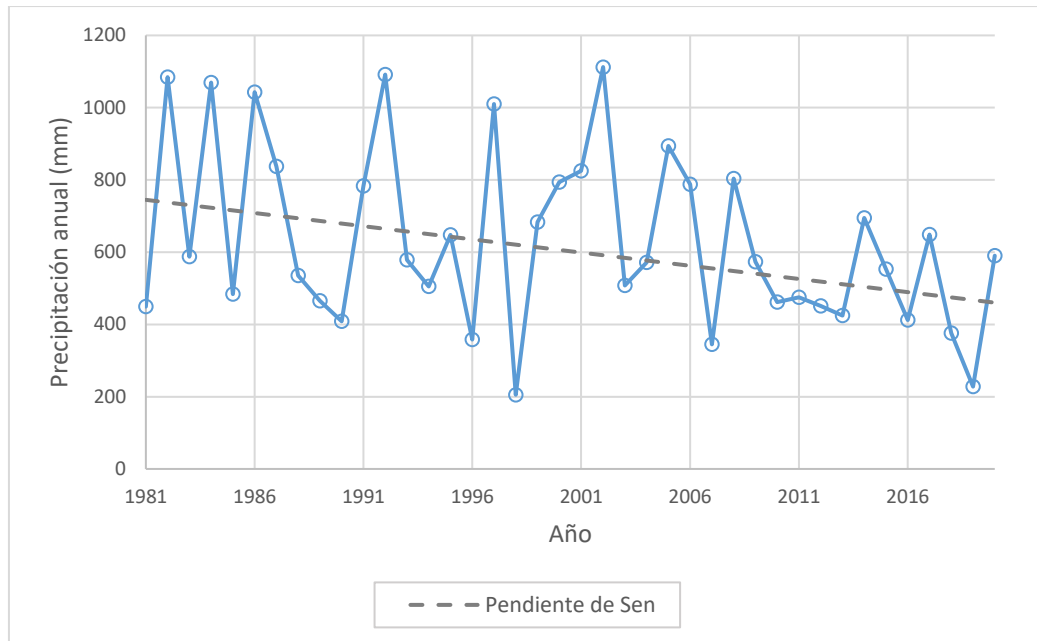
Anexo 5-2. Tendencia significativamente decreciente en PP máx 24 hrs, estación Lolol Hacienda.



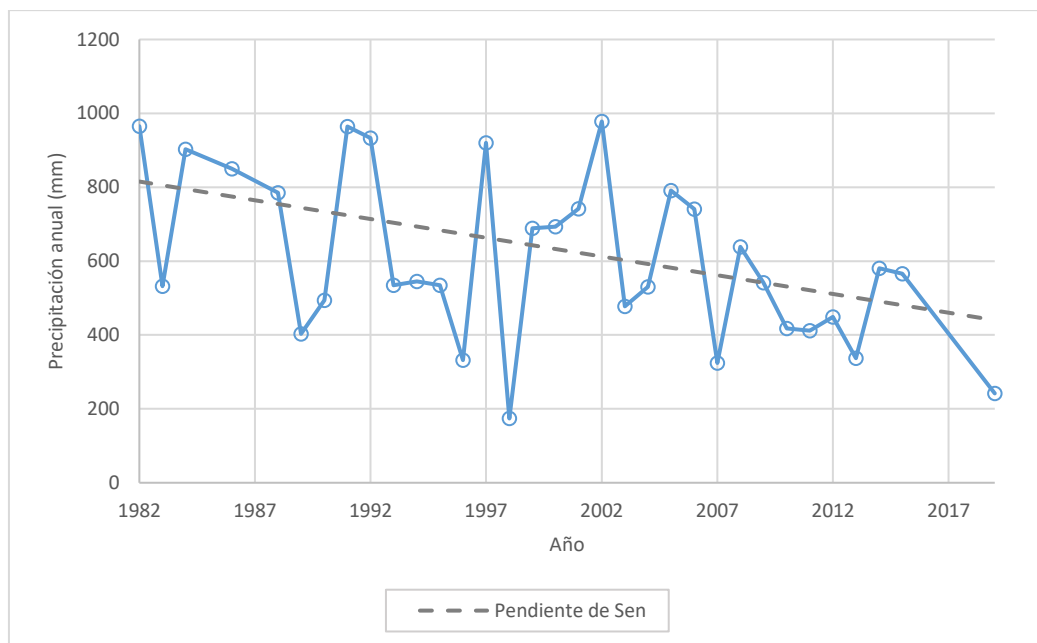
**Anexo 5-3.** *Tendencia significativamente decreciente, estación El Membrillo.*



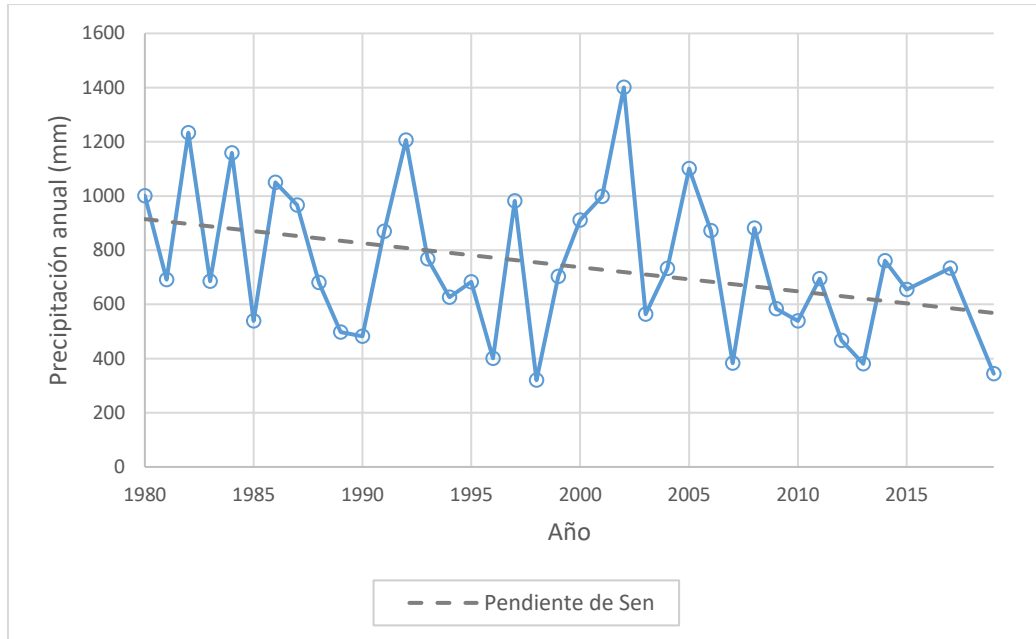
**Anexo 5-4.** *Tendencia significativamente decreciente, estación Pumanque.*



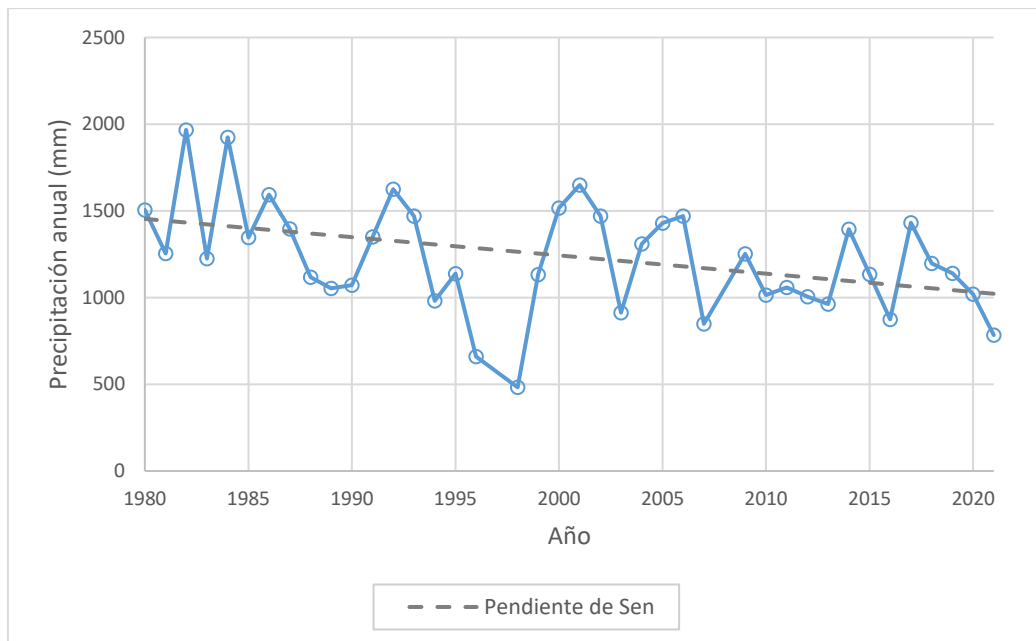
**Anexo 5-5.** *Tendencia significativamente decreciente, estación Ranguili.*



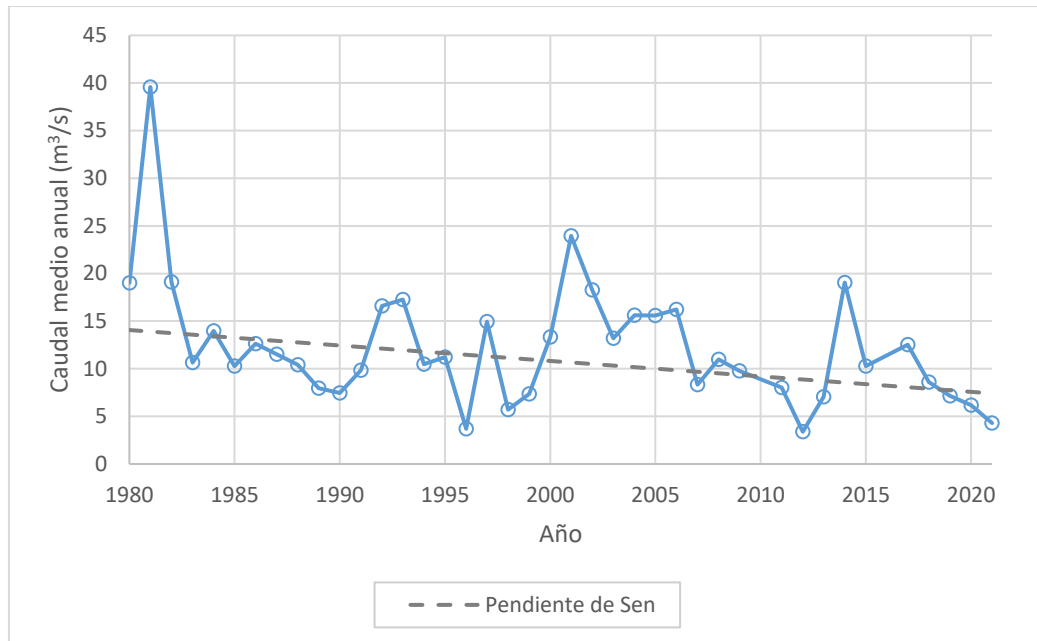
**Anexo 5-6.** *Tendencia significativamente decreciente, estación La Palma.*



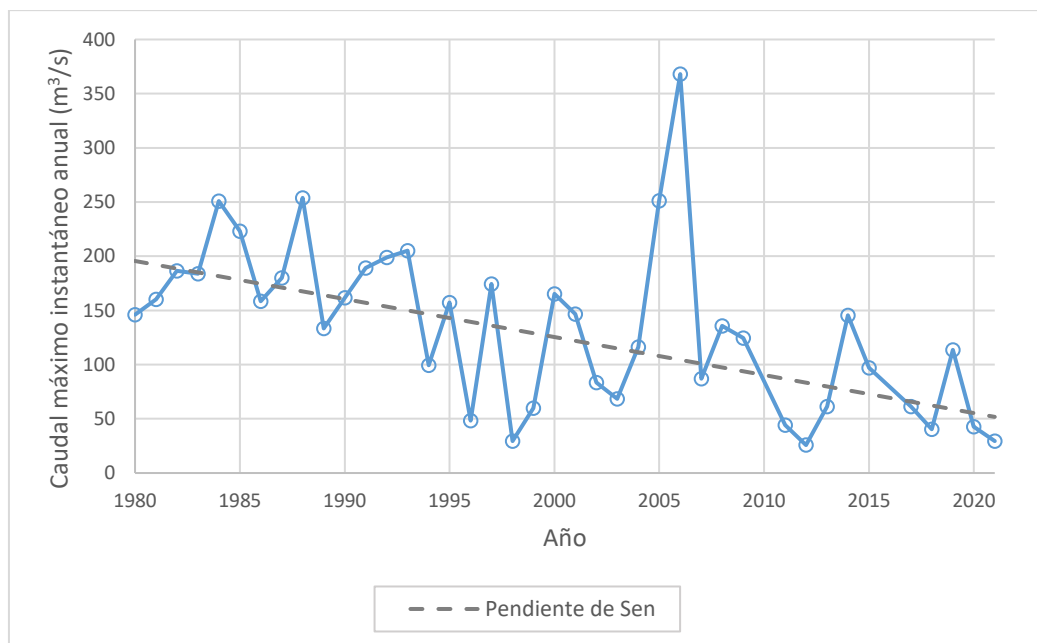
**Anexo 5-7.** Tendencia significativamente decreciente, estación Gualleco.



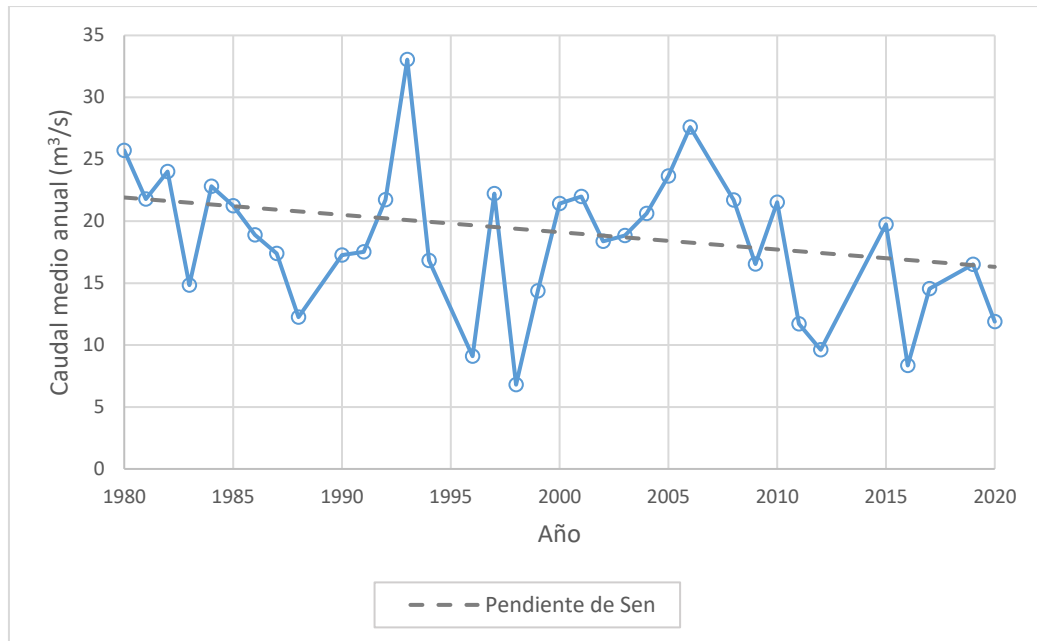
**Anexo 5-8.** Tendencia significativamente decreciente, estación Nonguén Essbio.



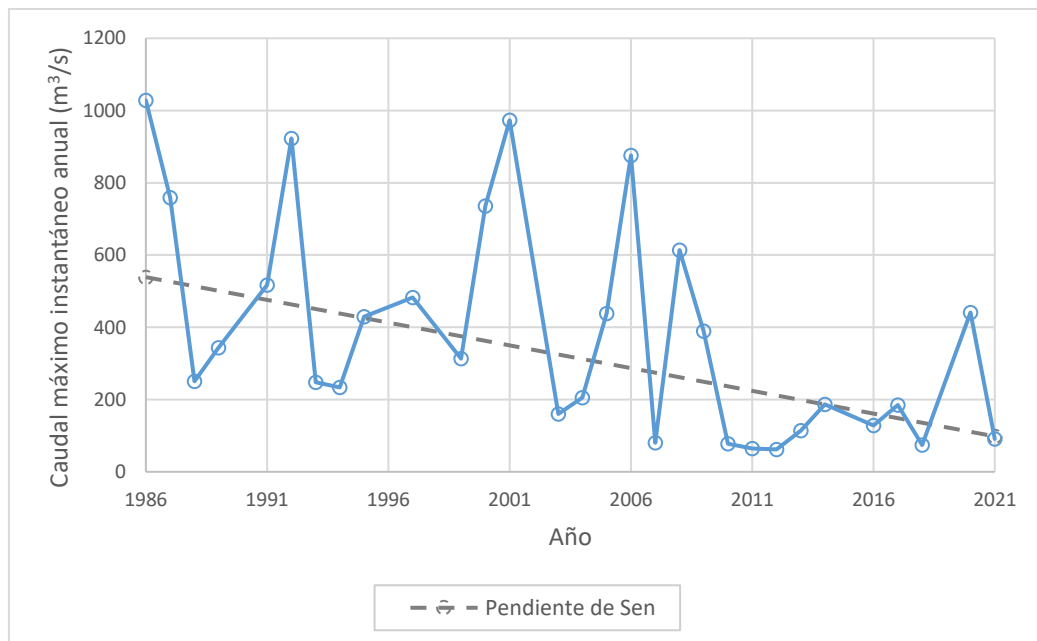
**Anexo 5-9.** Tendencia significativamente decreciente, estación Río Andalién camino a Penco.



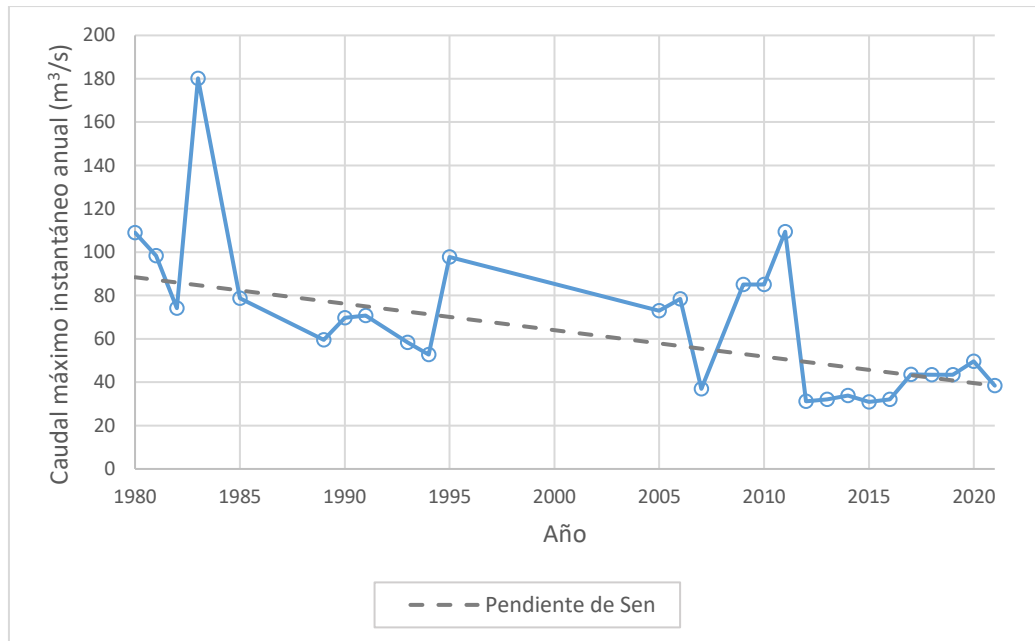
**Anexo 5-10.** Tendencia significativamente decreciente en caudal máximo instantáneo anual, estación Río Andalién camino a Penco.



**Anexo 5-11.** *Tendencia significativamente decreciente, estación Río Lleu-Lleu en desague Lago Lleu-Lleu.*

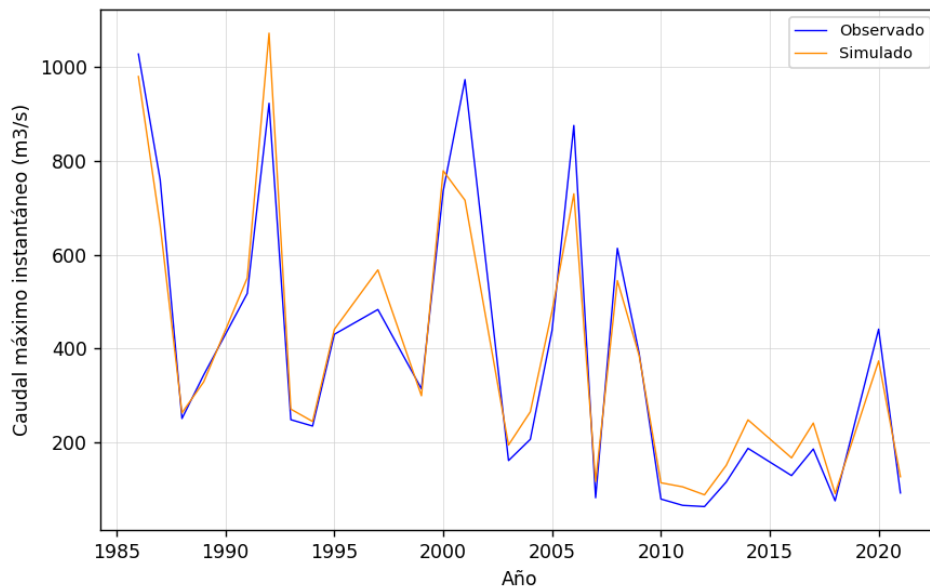


**Anexo 5-12.** *Tendencia significativamente decreciente en caudal máximo instantáneo anual, estación Estero Nilahue en Santa Teresa.*

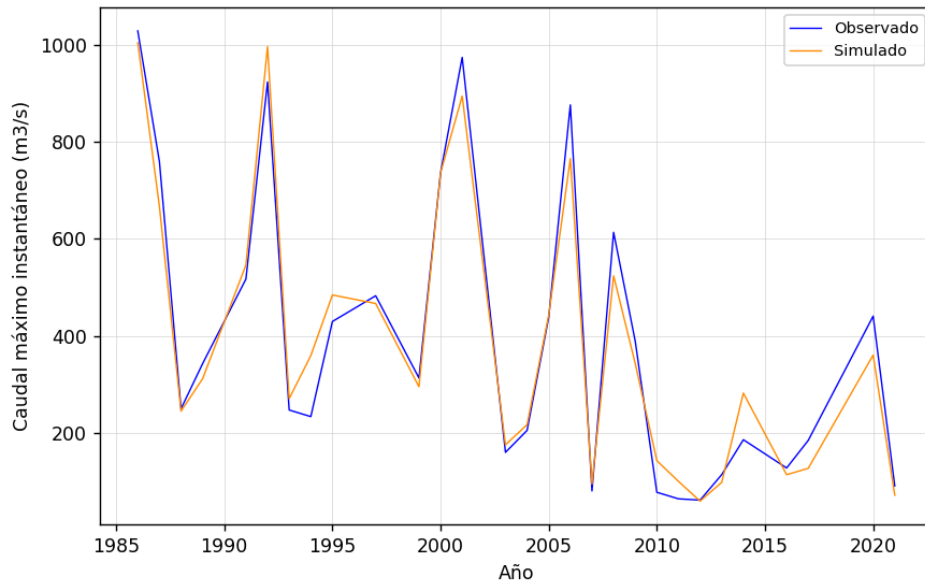


*Anexo 5-13. Tendencia significativamente decreciente en caudal máximo instantáneo anual, estación Río Butamalal en Butamalal.*

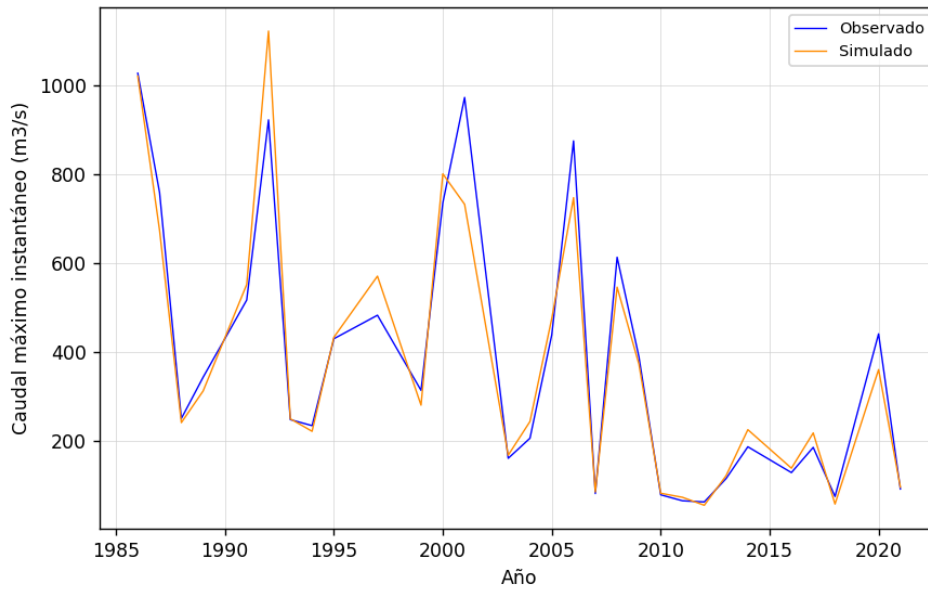
**6. ANEXO6: Datos de caudales máximos instantáneos anuales observados vs simulados con los diferentes modelos de regresión.**



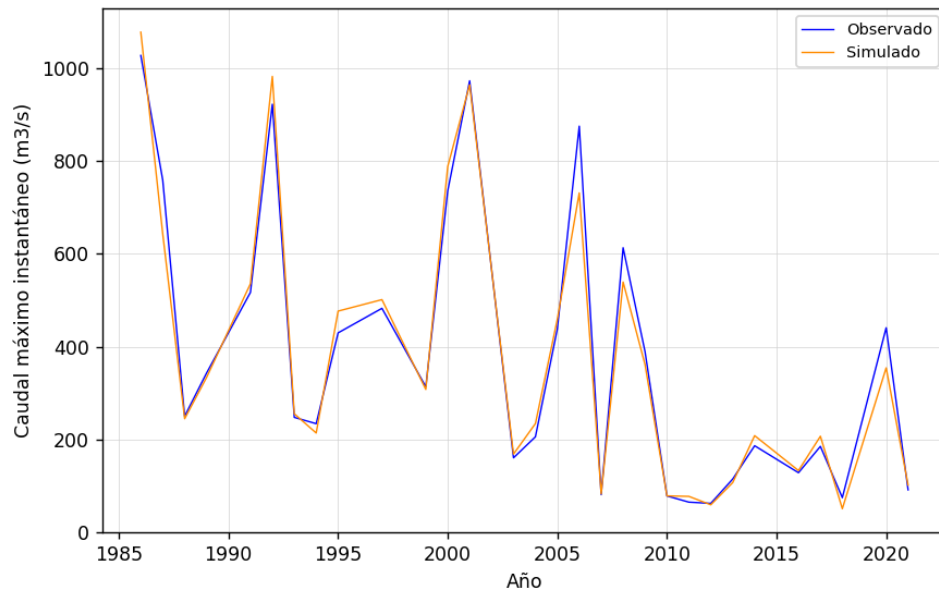
*Anexo 6-1. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal, cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa.*



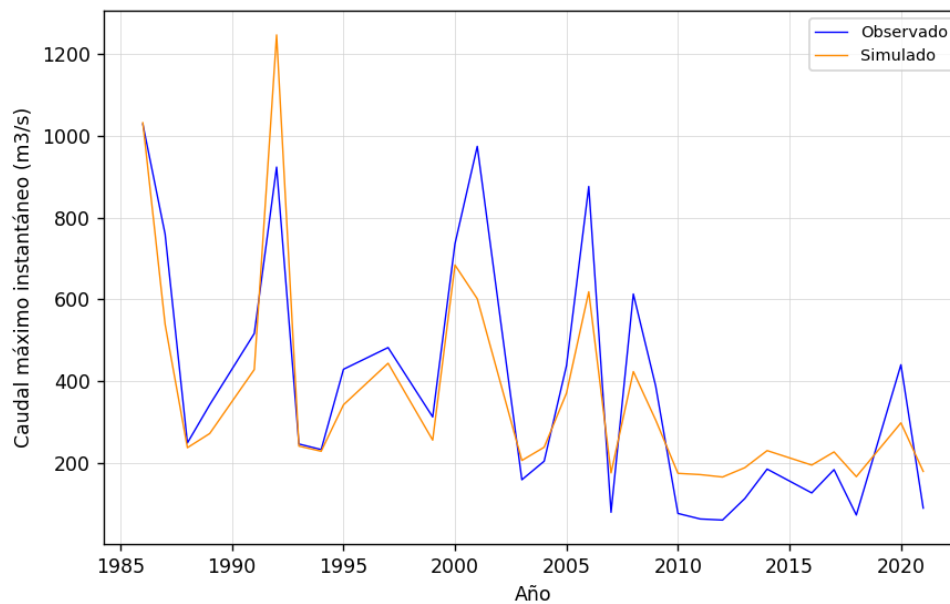
*Anexo 6-2. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal múltiple, cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa.*



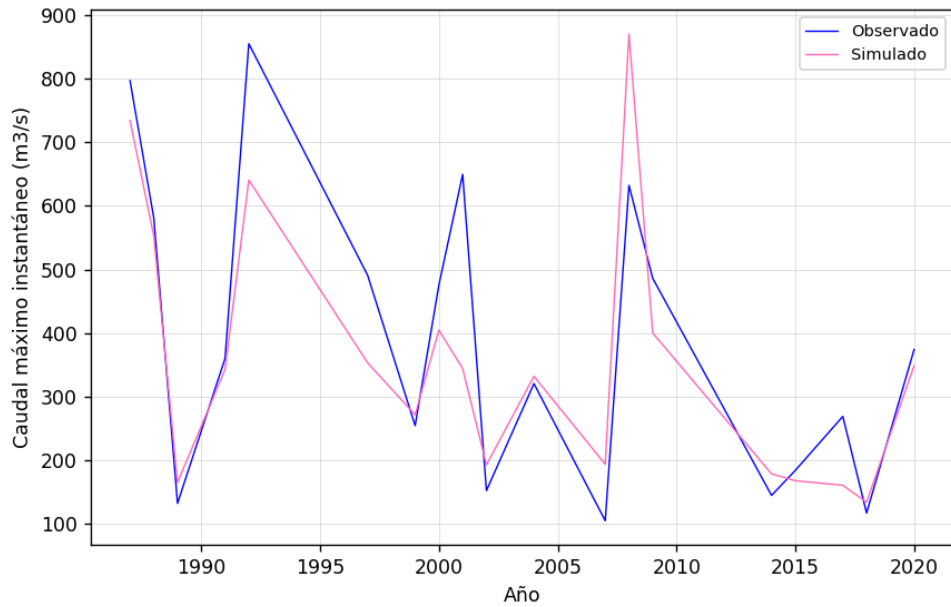
*Anexo 6-3. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal logarítmica, cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa.*



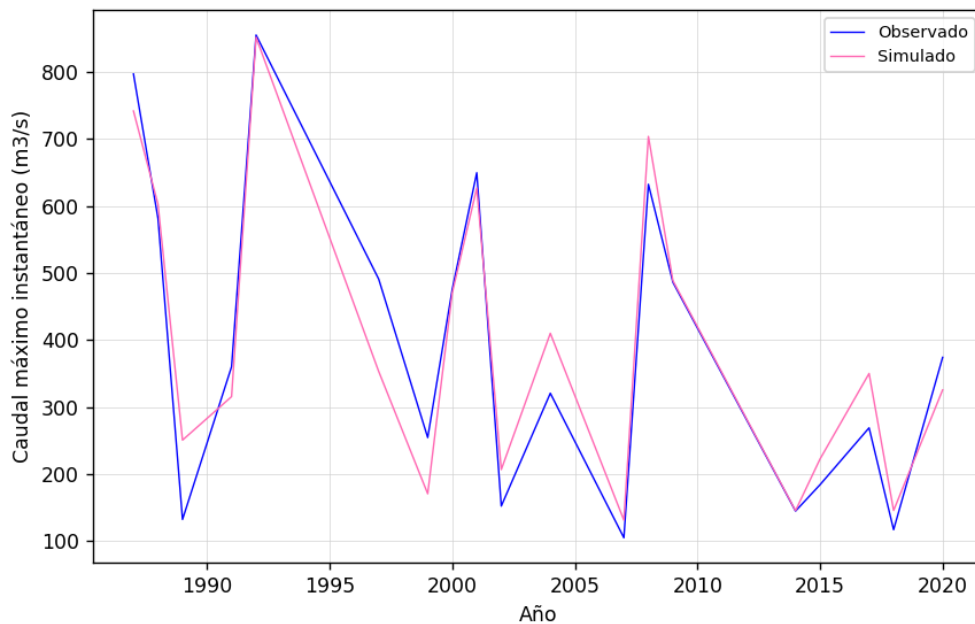
**Anexo 6-4.** Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal logarítmica múltiple, cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa.



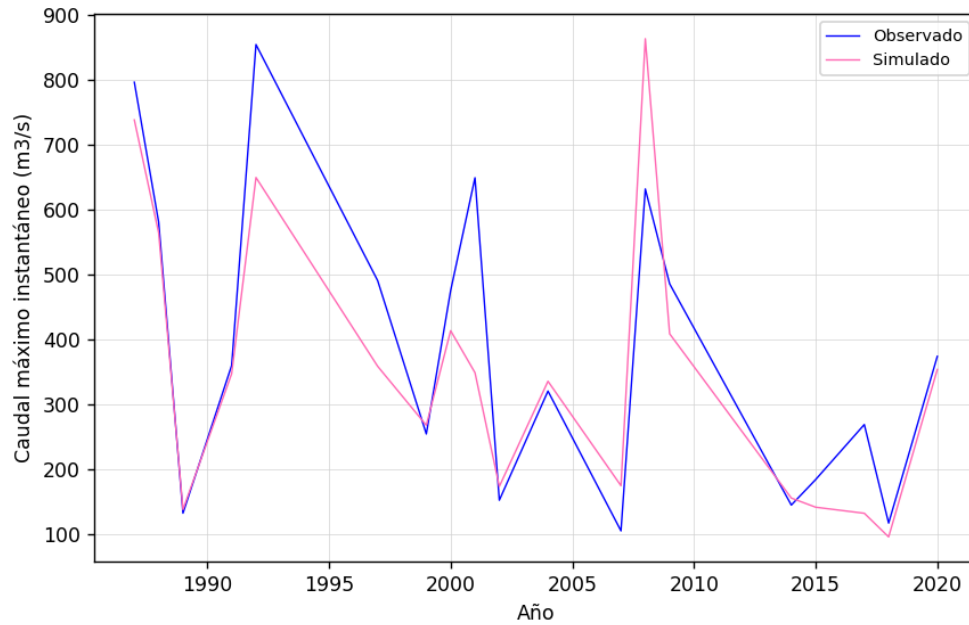
**Anexo 6-5.** Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal exponencial, cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa.



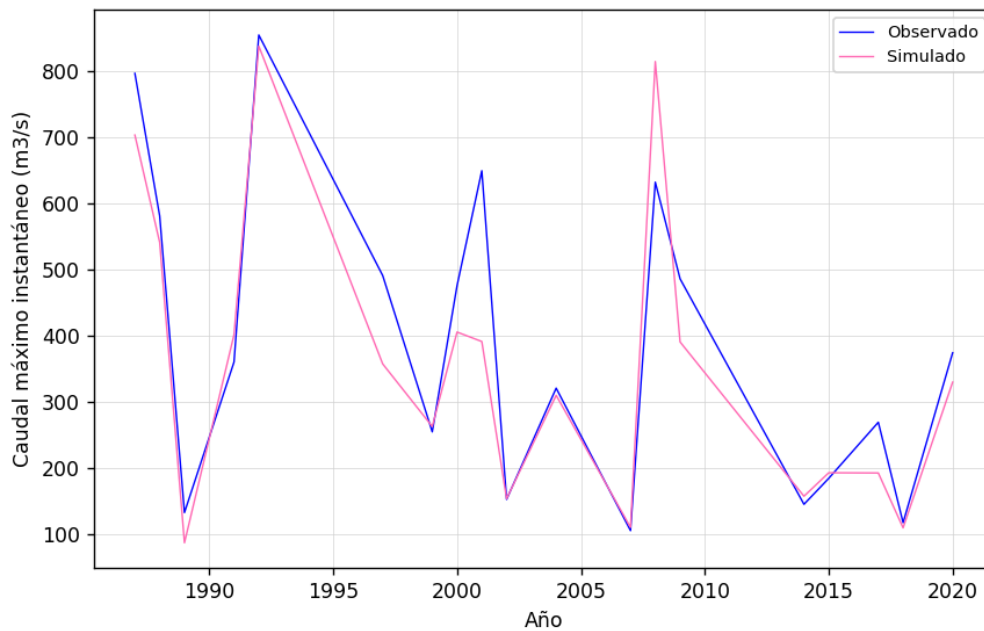
**Anexo 6-6.** Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal, cuenca Río Loanco en desembocadura.



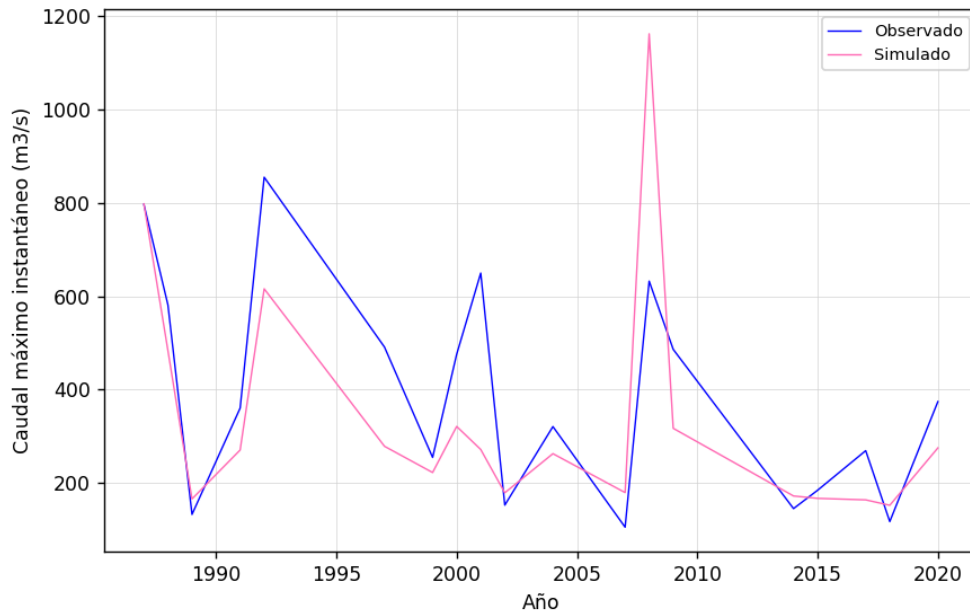
**Anexo 6-7.** Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal múltiple, cuenca Río Loanco en desembocadura.



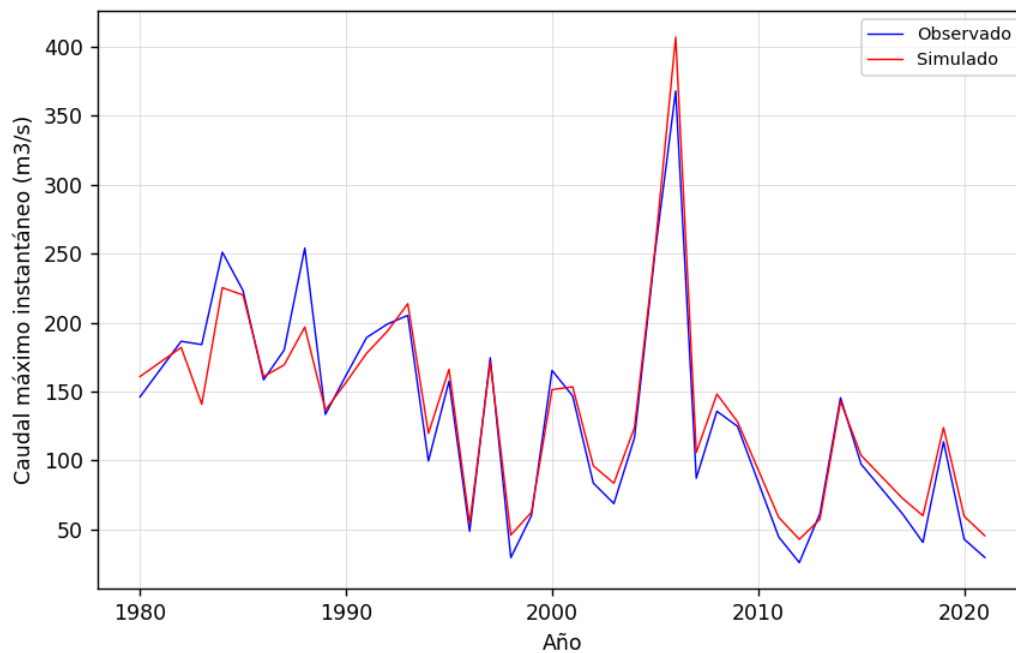
**Anexo 6-8.** Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal logarítmica, cuenca Río Loanco en desembocadura.



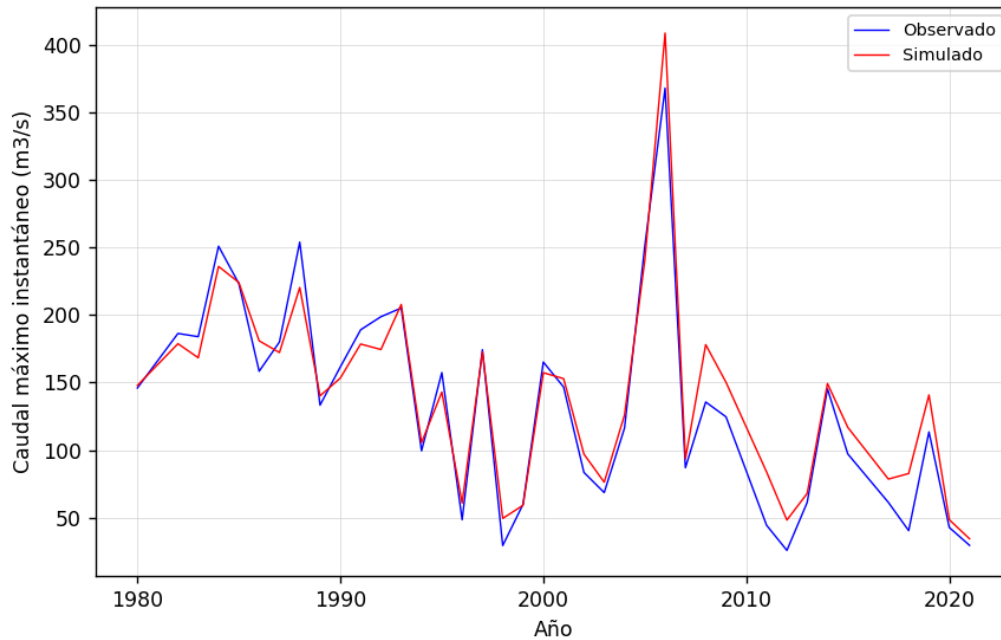
**Anexo 6-9.** Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal logarítmica múltiple, cuenca Río Loanco en desembocadura.



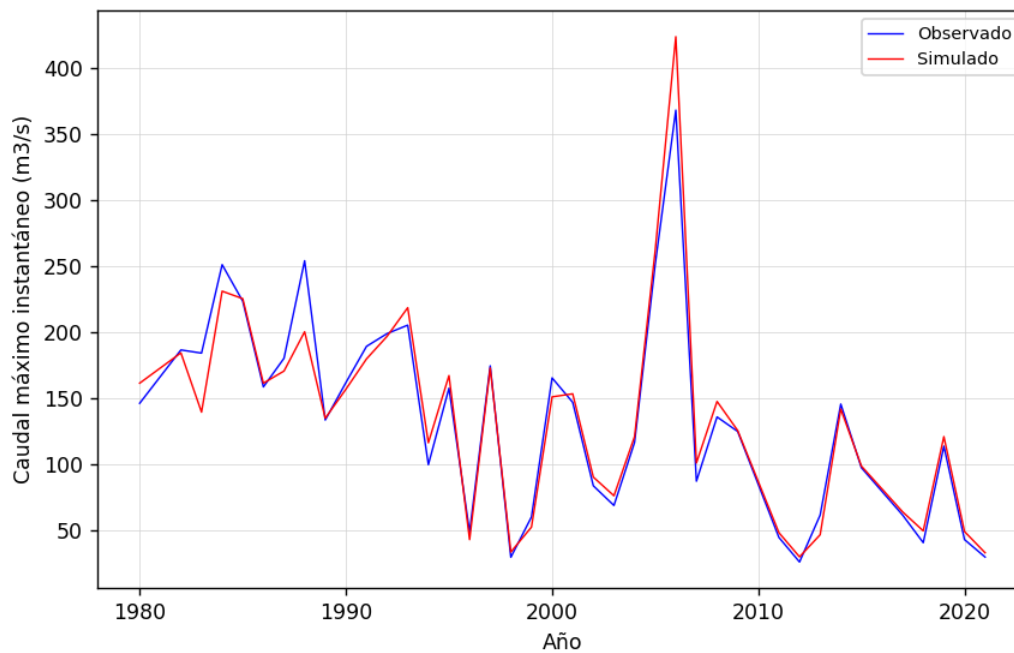
*Anexo 6-10. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal exponencial, cuenca Río Loanco en desembocadura.*



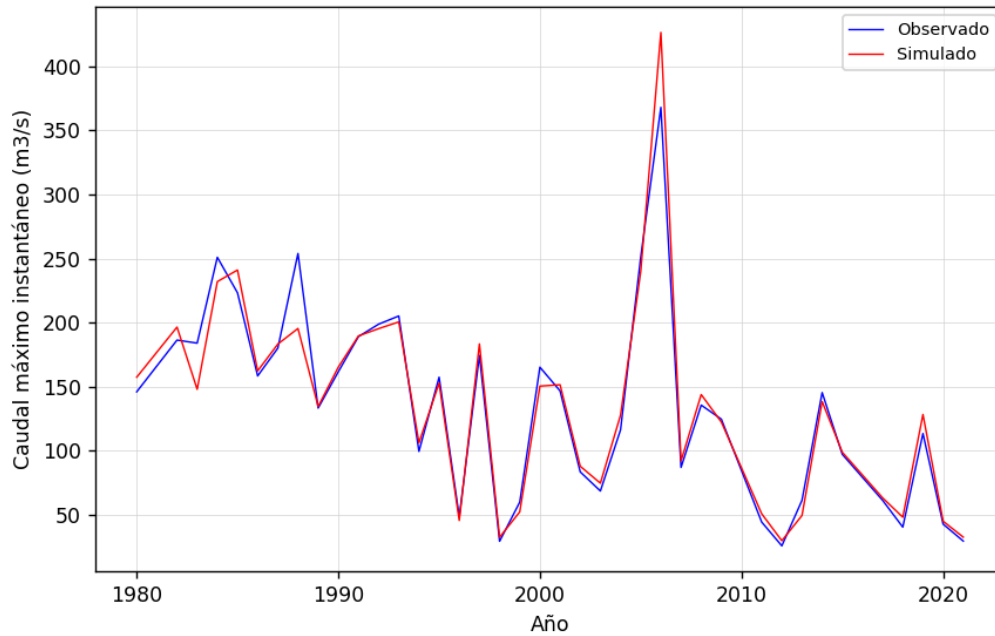
*Anexo 6-11. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal, cuenca Río Andalién camino a Penco.*



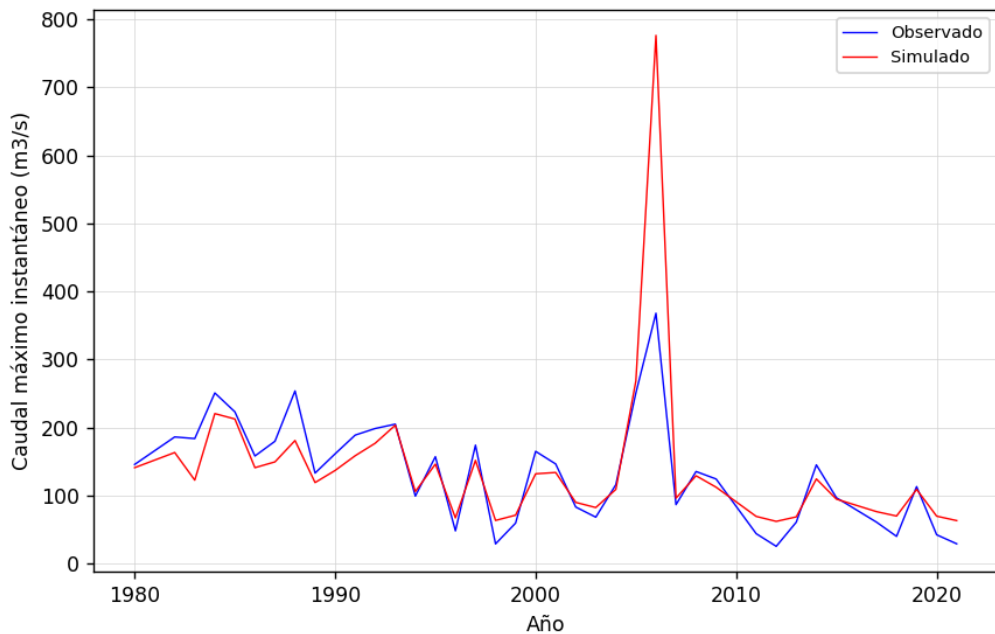
*Anexo 6-12. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal múltiple, cuenca Río Andalién camino a Penco.*



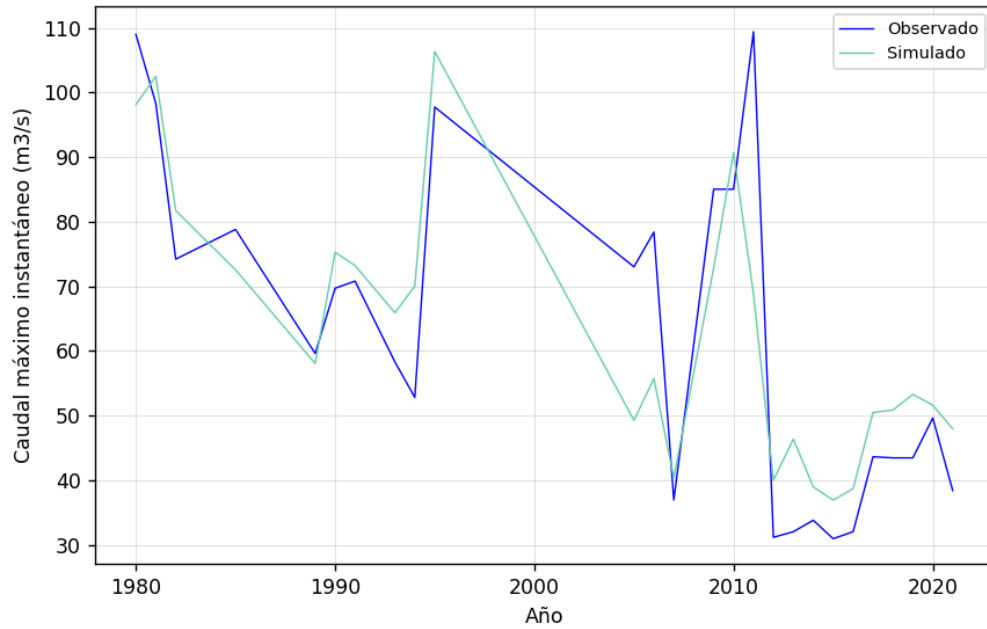
*Anexo 6-13. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal logarítmica, cuenca Río Andalién camino a Penco.*



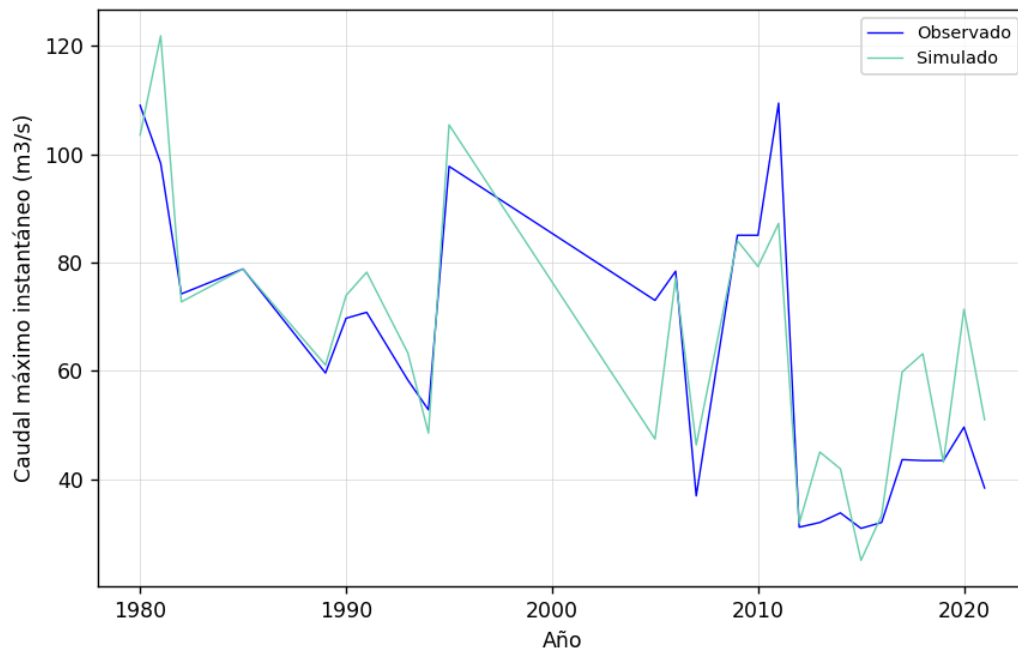
*Anexo 6-14. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal logarítmica múltiple, cuenca Río Andalién camino a Penco.*



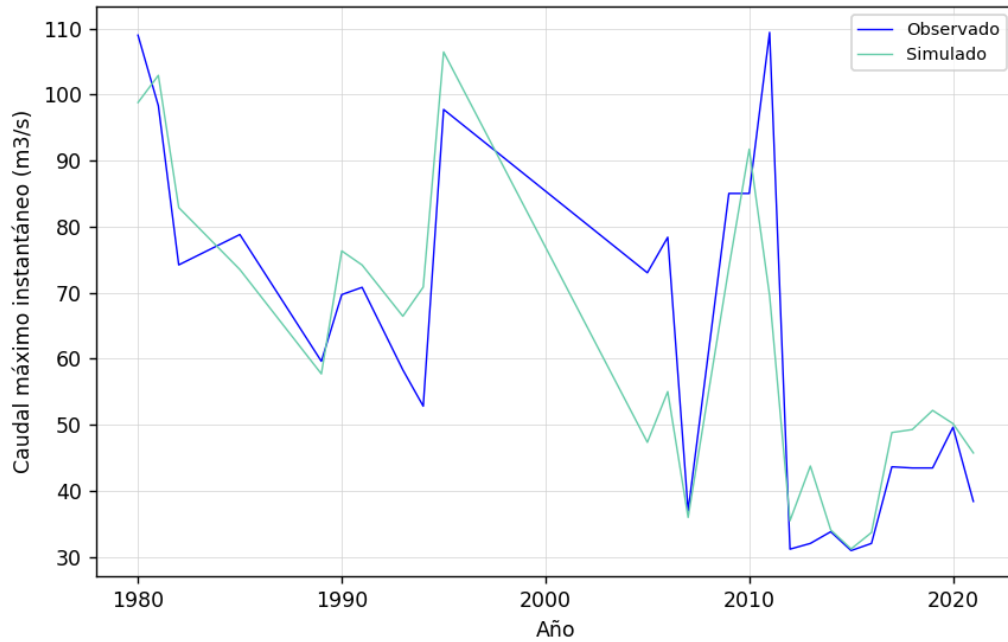
*Anexo 6-15. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal exponencial, cuenca Río Andalién camino a Penco.*



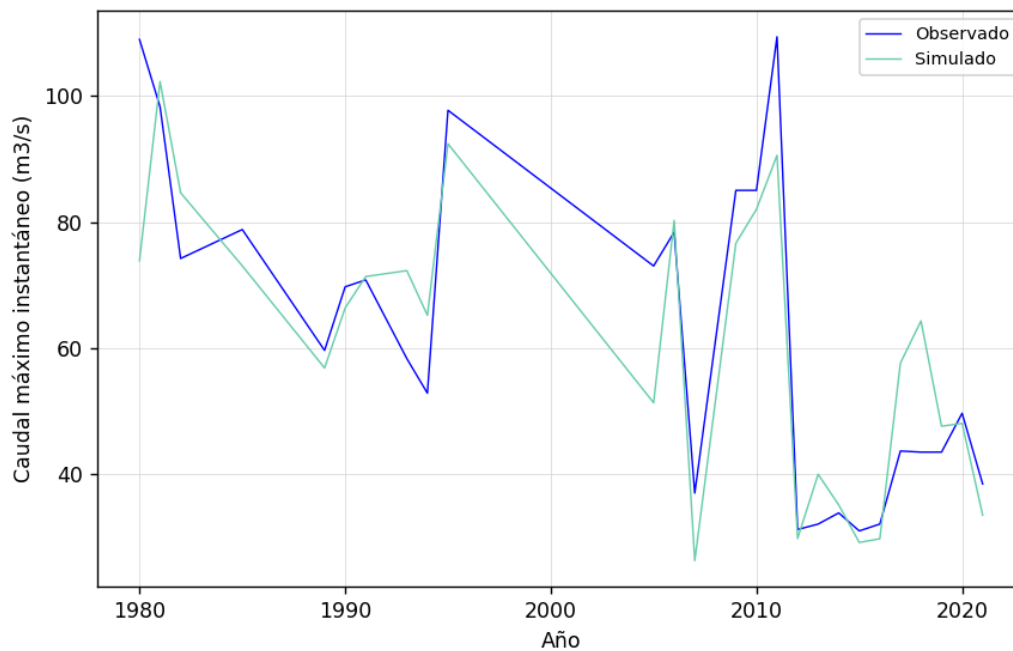
**Anexo 6-16.** Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal, cuenca Río Butamalal en Butamalal.



**Anexo 6-17.** Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal múltiple, cuenca Río Butamalal en Butamalal.



*Anexo 6-18. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal logarítmica, cuenca Río Butamalal en Butamalal.*

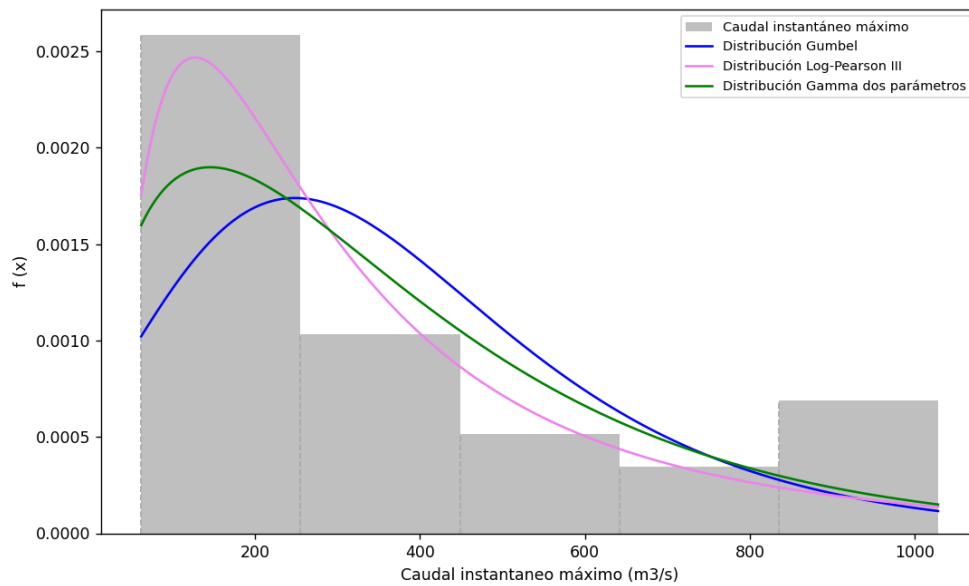


*Anexo 6-19. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión lineal logarítmica múltiple, cuenca Río Butamalal en Butamalal.*

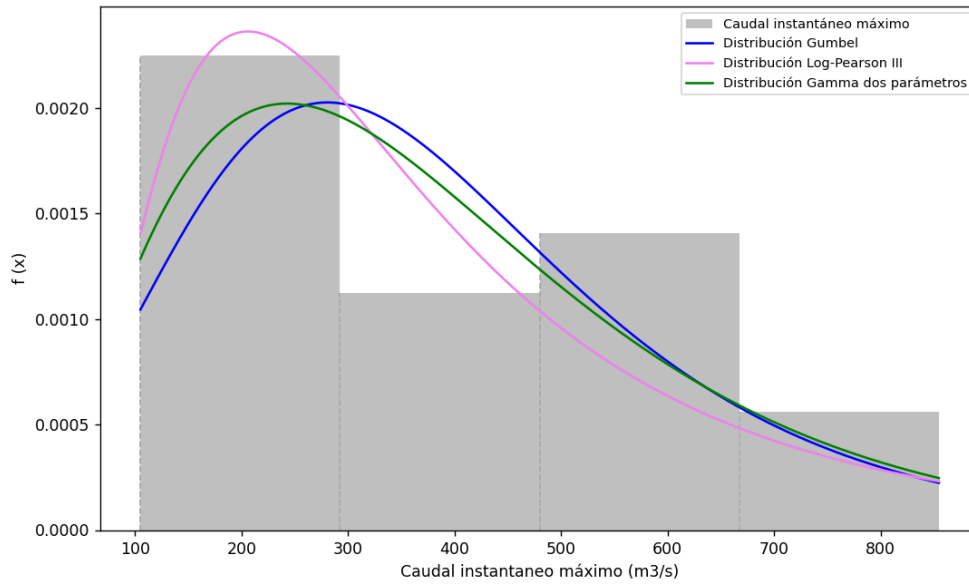


*Anexo 6-20. Caudal máximo instantáneo anual observado vs simulado con el método regresión exponencial, cuenca Río Butamalal en Butamalal.*

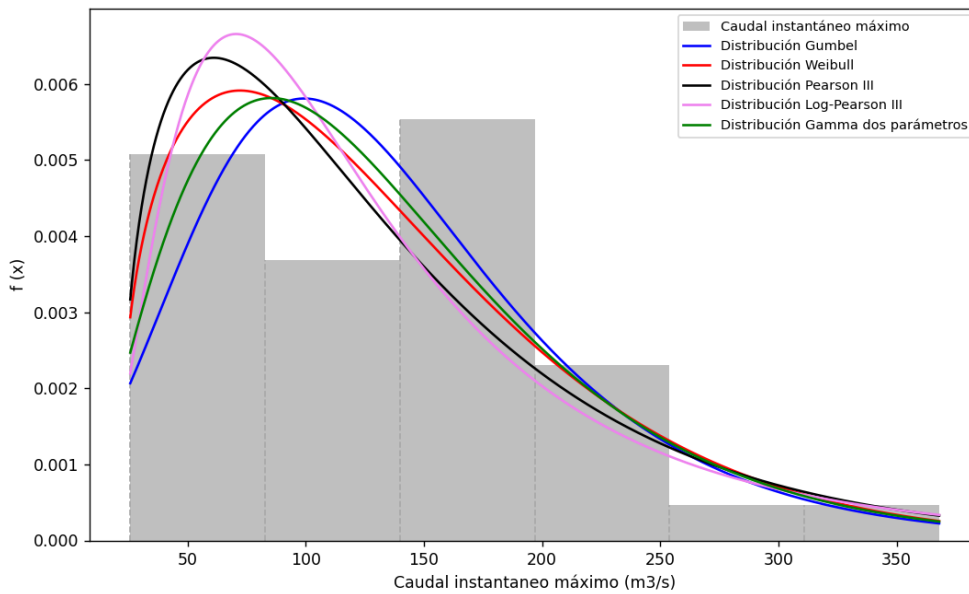
**7. ANEXO7: Histogramas de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en series sin relleno de datos.**



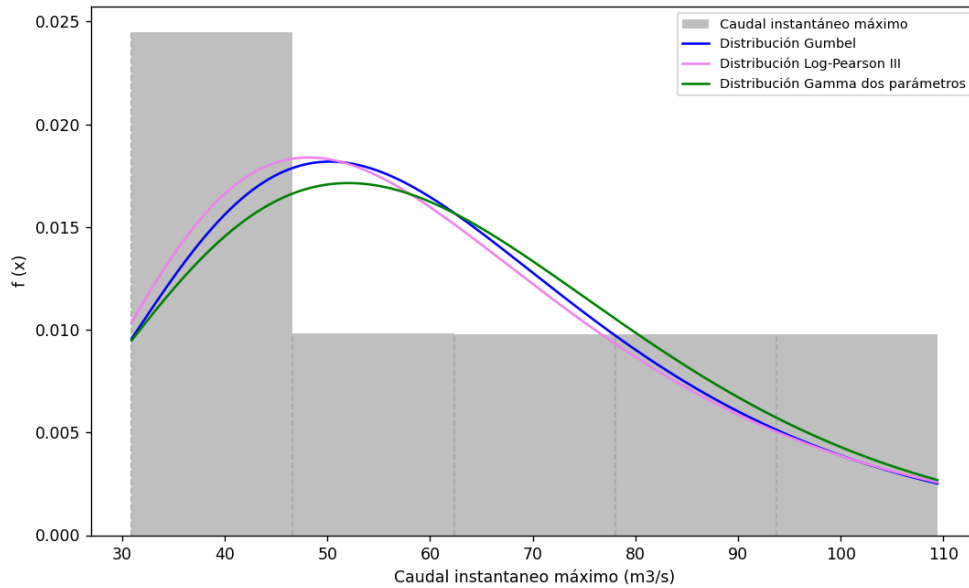
*Anexo 7-1. Histograma de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en la cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa, serie sin relleno de datos.*



**Anexo 7-2.** Histograma de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en la cuenca Río Loanco en desembocadura, serie sin relleno de datos.

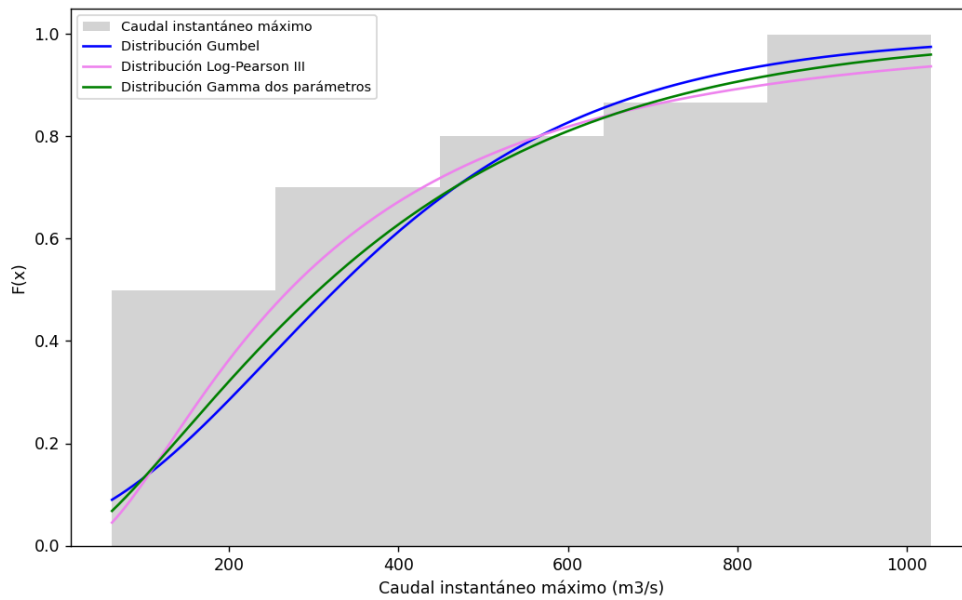


**Anexo 7-3.** Histograma de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en la cuenca Río Andalién camino a Penco, serie sin relleno de datos.

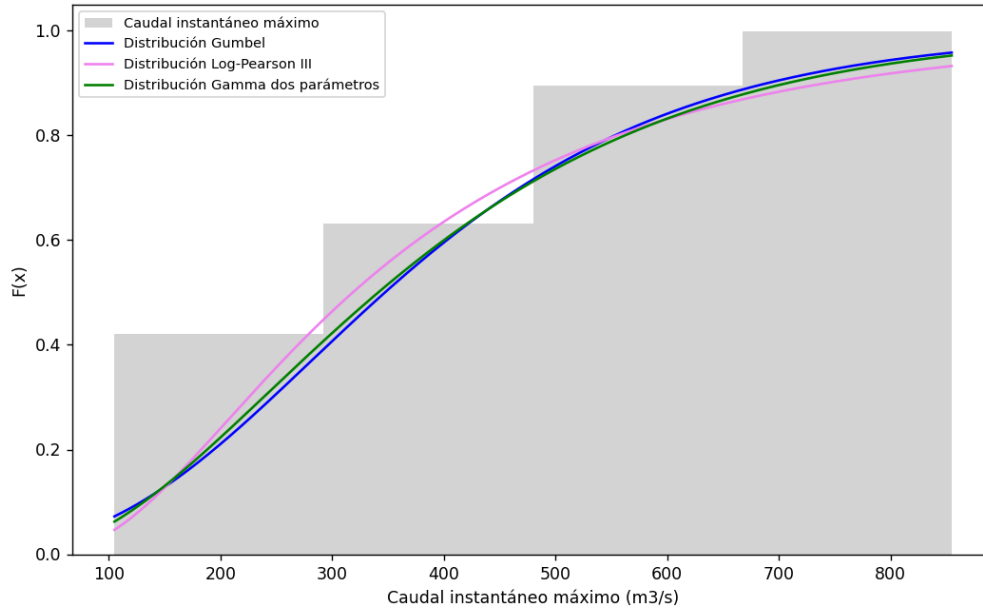


**Anexo 7-4.** *Histograma de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en la cuenca Río Butamalal en Butamalal, serie sin relleno de datos.*

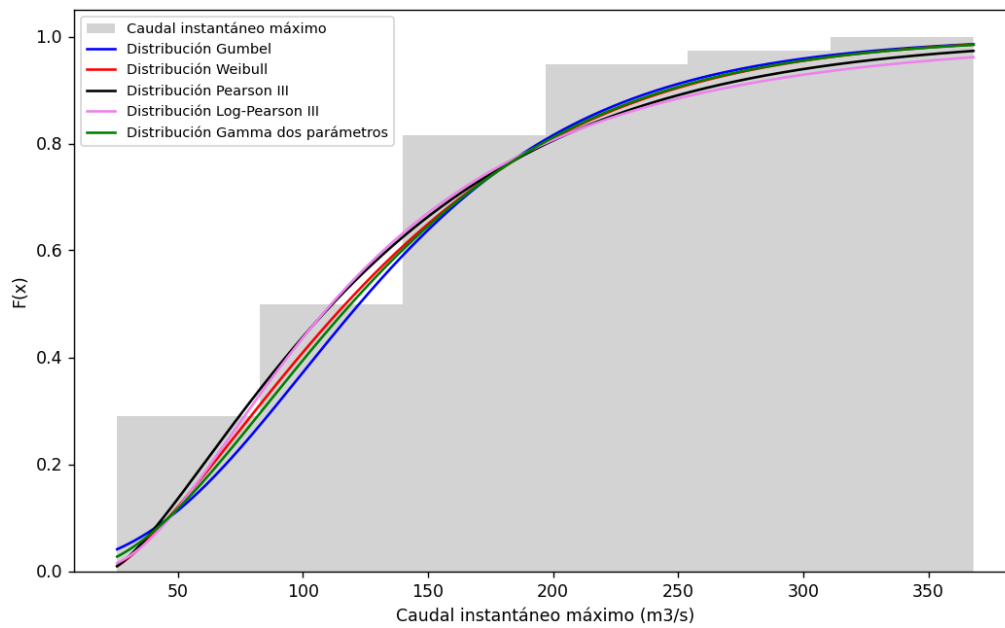
**8. ANEXO8: Funciones de densidad de probabilidad acumulada en series sin relleno de datos.**



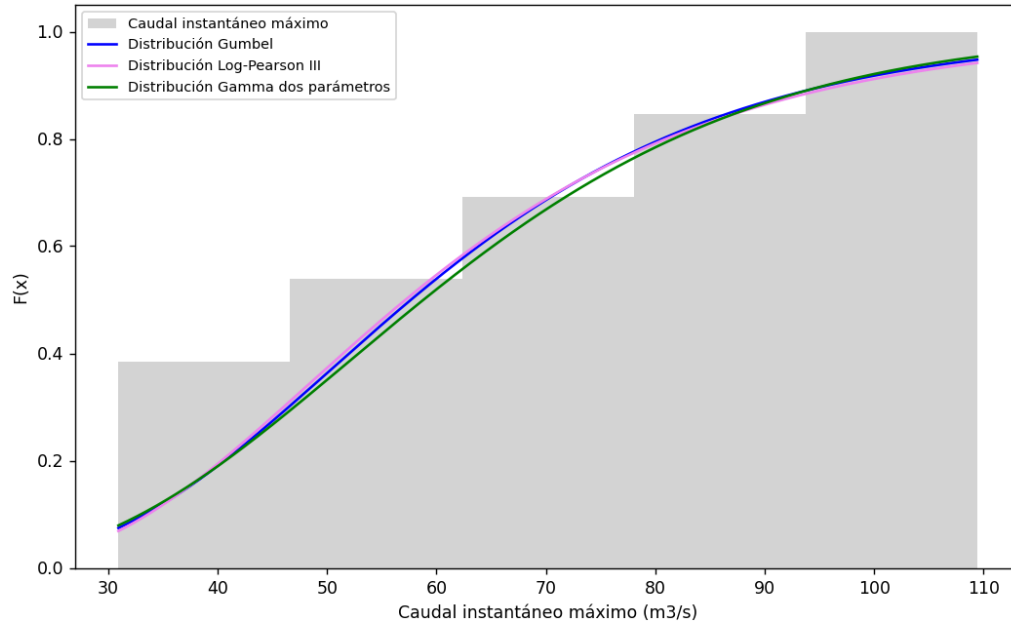
**Anexo 8-1.** *Función de distribución acumulada en la cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa, serie sin relleno de datos.*



**Anexo 8-2.** Función de distribución acumulada en la cuenca Río Loanco en desembocadura, serie sin relleno de datos.

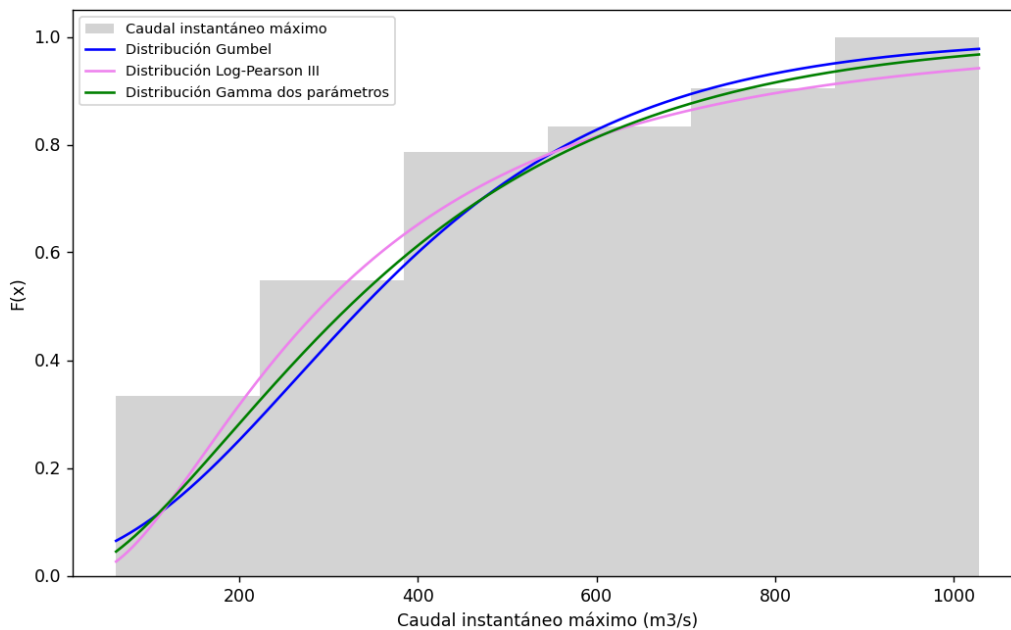


**Anexo 8-3.** Función de distribución acumulada en la cuenca Río Andalién camino a Penco, serie sin relleno de datos.

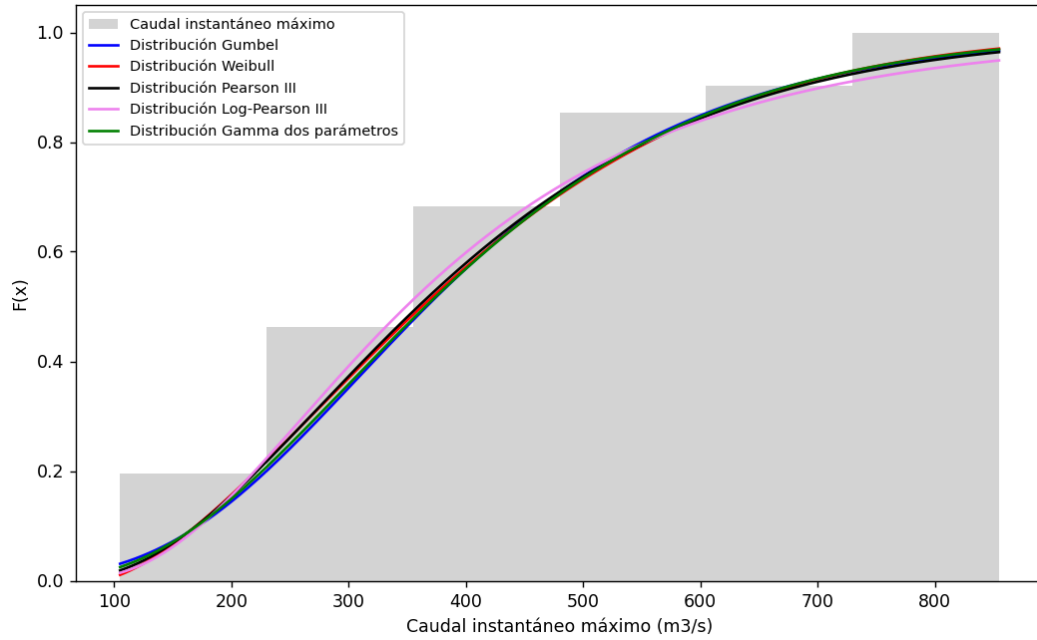


*Anexo 8-4. Función de distribución acumulada en la cuenca Río Butamalal en Butamalal, serie sin relleno de datos.*

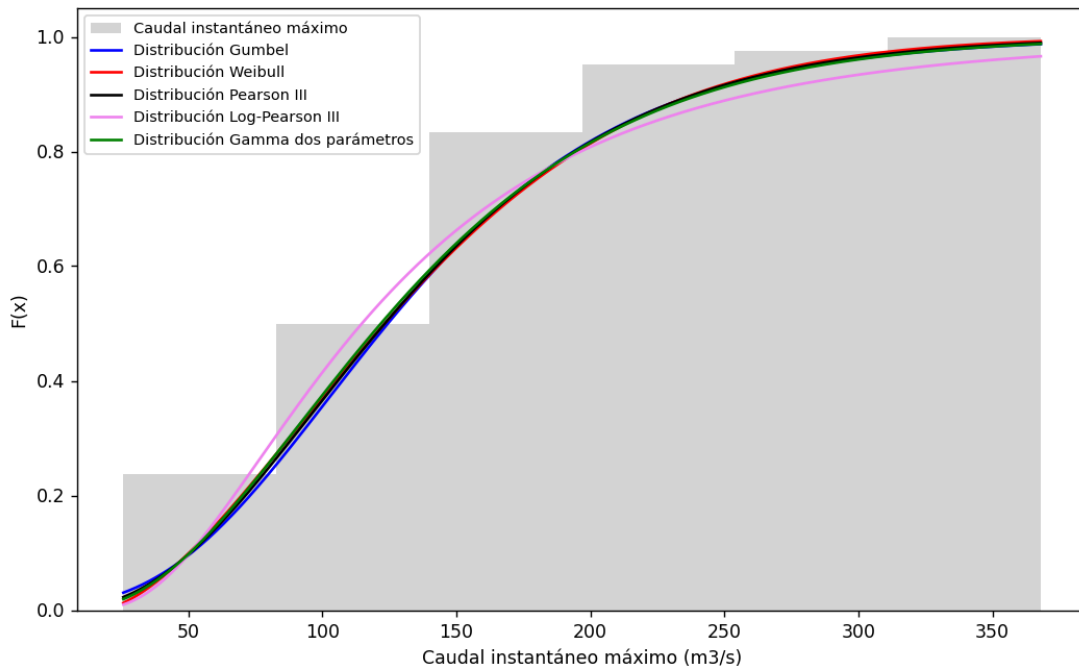
## 9. ANEXO9: Funciones de densidad de probabilidad acumulada en series completas.



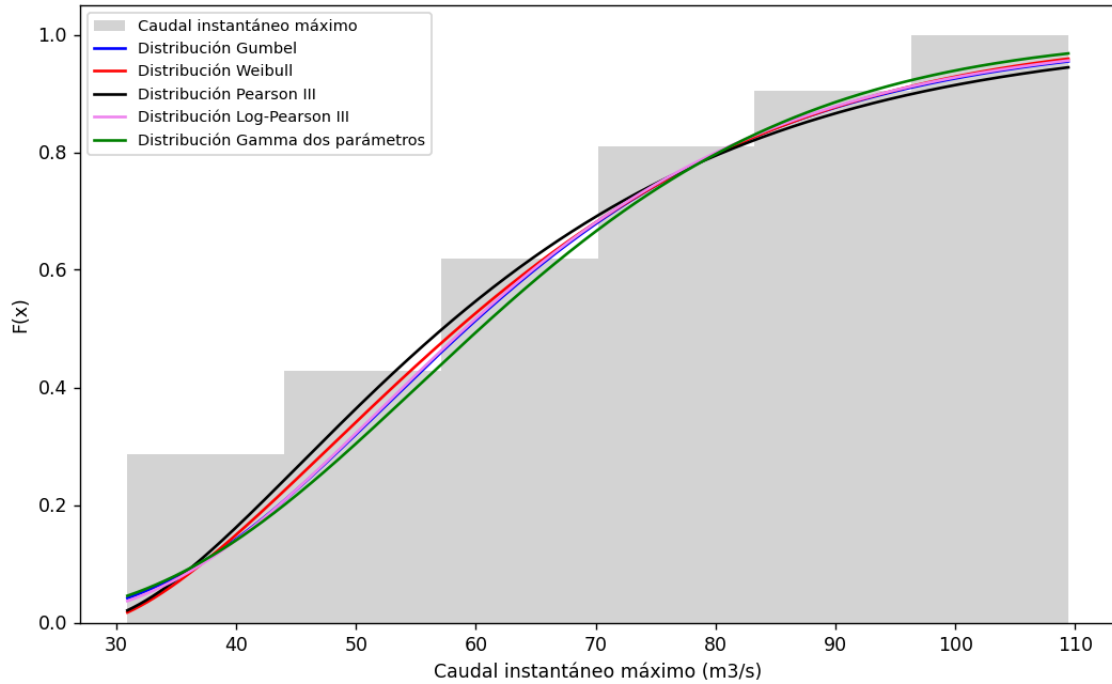
*Anexo 9-1. Función de distribución acumulada en la cuenca Estero Nilahue en Santa Teresa, serie completa.*



*Anexo 9-2. Función de distribución acumulada en la cuenca Río Loanco en desembocadura, serie completa.*



*Anexo 9-3. Función de distribución acumulada en la cuenca Río Andalién camino a penco, serie completa.*



**Anexo 9-4.** Función de distribución acumulada en la cuenca Río Butamalal en Butamalal, serie completa.

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

**Departamento** : Departamento de Ingeniería Civil  
**Carrera** : Ingeniería Civil  
**Nombre del memorista** : Pamela Estefanía Ortega Merino  
**Título de la memoria** : Estimación de caudales máximos instantáneos a partir de caudales medios diarios en cuencas costeras de la zona centro-sur de Chile  
**Fecha de la presentación oral** :  
**Profesor(es) Guía** : Alejandra Stehr Gesche  
**Profesor(es) Revisor(es)** : Maricarmen Guerra Paris  
**Concepto** :  
**Calificación** :

**Resumen**

En hidrología, la estimación de caudales de diseño es esencial para la construcción de infraestructuras hidráulicas que aseguren un adecuado funcionamiento en caso de ocurrir eventos extremos, previniendo el colapso y/o fallas de las obras, con la finalidad de evitar potenciales daños a personas y pérdidas económicas. En Chile, los registros históricos de caudales máximos instantáneos anuales están incompletos o son escasos, lo que dificulta el estudio en diversas áreas del país. Las cuencas costeras ubicadas entre las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y Biobío no están exentas de esta problemática, por lo que se llevó a cabo un estudio para estimar los caudales máximos instantáneos anuales a partir de la información que se encuentra disponible.

En esta investigación, fueron empleados modelos empíricos mediante modelos de regresión para obtener caudales máximos instantáneos anuales y completar las series de registro; los modelos se ajustaron ingresando variables como caudales medios diarios máximos, parámetros morfométricos, precipitaciones medias y usos de suelo de las cuencas. Luego de completar las series de registro de caudales máximos instantáneos anuales en las cuencas costeras durante el periodo de estudio, se aplicó el análisis de frecuencia con diferentes funciones de densidad de probabilidad eligiendo aquellas con mejor rendimiento en las pruebas de bondad de ajuste Chi-cuadrado y Kolmogórov-Smirnov, siendo las distribuciones Gumbel y Gamma de dos parámetros las de mejor ajuste, y con ellas se estimaron los caudales máximos instantáneos asociados a los periodos de retorno entre 2 y 100 años.