Anexo Hito: Extensión y modificación de la metodología a cuencas piloto.

1. **Objetivo del hito**

Extensión y modificación de la metodología a cuencas piloto.

La metodología corresponde a encontrar la mejor combinatoria del tipo de regresión de modelo estadístico (lineal múltiple, polinomios locales, logarítmico) y los predictores (meteorológicos, variables del modelo hidrológico como almacenamientos internos de la cuenca, variables climáticas de gran escala) tal que se minimicen los errores estadísticos respecto al caudal pronosticado en las cuencas piloto.

Dada la extensión del dominio de estudio, este alberga distintas condiciones hidro climáticas (ej. aridez, estacionalidad de la precipitación, eficiencia del caudal o índice de evaporación), por lo que la modelación hidrológica podría beneficiarse de esquemas diferenciados de calibración y/o variables de entrada. Los pronósticos de temporada de deshielo se desagregan por mes, y se actualizan mensualmente.

1. **Variables críticas estudiadas y rangos alcanzados**

Considerando como referencias las cuencas del Maule (Ríos Achibueno, Maule, Colorado, Palos, Longaví).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Métrica | Valores o rangos esperados | Valores obtenidos (min-mediana-max) |
| R2 | 0.5 - 0.79 | 0.38- 0.72- 0.74 |
| MAE | 140-240 mm/temporada | 120-147-209 |
| pBIAS | 0.8 a 5.7 | 1.7- 3.0 - 7.3 |

1. **Breve descripción de los experimentos, tratamientos y/o pruebas realizadas (en concordancia con la metodología del proyecto).**

La metodología de pronósticos de referencia se basa en la utilización de la condición hidrológica inicial (STORAGE) como único predictor en una regresión lineal simple con el volumen acumulado de septiembre a marzo. La condición inicial corresponde a la suma de todos los almacenamientos hídricos de las cuencas para un momento dado. Los almacenamientos considerados incluyen el Equivalente en agua de nieves, almacenamientos subterráneos superior e inferior y humedad del suelo, y que se generan a partir de la modelación hidrológica de la cuenca, en este caso usando TUW (modificación de HBV para R, Parajka et al., 2007) con forzantes derivadas de ERA5 (Hershbach et al., 2020).

Se agrega una comparación preliminar de la selección de la mejor combinación de predictores agregando índices climáticos de gran escala SOI, ONI, NIÑO1.2, PDO (ver tabla 1). Los índices climáticos aportan capacidad predictiva principalmente en los meses previos al invierno, donde la escasa disponibilidad de datos hidro-climáticos (precipitación, temperatura, caudales, almacenamientos), en este sentido los índices climáticos de gran escala aportan con un proxy de las condiciones atmosféricas y de la superficie del Océano Pacífico y, por lo tanto, ayudan al pronóstico de los siguientes meses en Chile.

Tabla 1. Predictores climáticos e hidrológicos utilizados para el pronóstico de caudales.

|  |  |
| --- | --- |
| Predictor | Significado |
| SOI | Southern Oscillation Index |
| PDO | The Pacific Decadal Oscillation |
| ONI | Oceanic Niño Index. Zona Niño 3.4. |
| NINO1.2 | Niño 1+2 (0-10S, 90W-80W) |
| STORAGE | Suma de almacenamientos en la cuenca |

Para efectos de las evaluaciones realizadas se ocupa la metodología de validación cruzada Leave one out (dejar un valor fuera) con lo que se simula una situación seudo-real para cada año del registro. Para el cálculo del volumen de una particular se dejan fuera los datos de los predictores y el predictando (volumen), se generan las regresiones lineales múltiples con los datos de los años restantes y se pronostica ocupando los predictores de ese año, luego esa predicción se puede contrastar con el volumen real medido de la estación fluviométrica. Esta metodología se repite para todos los años de la serie consiguiendo una serie de todos los años en validación cruzada. Para aplicar este método se debe tener independencia entre los distintos años hidrológicos para cada cuenca.

Dado que uno de los requerimientos para utilizar regresiones lineales (simples o múltiples) es que la distribución del predictando sea Normal, se realiza una prueba de Shapiro-Wilk del volumen que testea la hipótesis nula que una muestra viene de una población normal, se aprueba o rechaza de acuerdo con el umbral del p-value 0,05 (Shapiro & Wilk, 1965). Generalmente una transformación logarítmica hará que una distribución sesgada hacia un lado (izquierda o derecha) se vuelva normal, por lo que se debe realizar otra prueba de Shapiro-Wilk a la transformación para asegurar la normalidad de la variable transformada.

Para seleccionar la mejor combinación de predictores, primero se comprueba que los predictores no estén correlacionados entre sí lo que podría afectar la sobre-ponderación de un predictor, luego se eliminan aquellos predictores con alta correlación y se pronostica utilizando todas las posibles combinaciones de predictores (ocupando 1, 2, 3, 4 o 5 predictores). Para cada cuenca y mes de emisión se elige la mejor combinación ocupando el criterio de Akaike (AIC, Ecuación 1), índice que relaciona la cantidad de predictores (k) y la función de verosimilitud (L). El criterio de elección es minimizar el AIC con objetivo de conseguir el modelo con mejor rendimiento (dado por la función de verosimilitud) pero con el menor número de predictores (k).

Text

Description automatically generated with low confidence (Ecuación 1)

1. **Principales resultados logrados y conclusiones**

Las métricas se calculan comparando el volumen simulado versus el observado (o naturalizado) para las cuencas de la región del Maule como referencia con emisiones desde el 1 de mayo al 1 de marzo. Dado que los volúmenes se calculan como un conjunto de 1000 ensembles, para calcular las métricas determinísticas se utiliza el promedio de esos ensembles. Los errores (MAE, RMSE) fueron normalizados por el volumen promedio de cada cuenca para evitar observar mayores errores en cuencas de mayor caudal. Se destaca el mes de septiembre que corresponde al mes donde típicamente se genera el primer pronostico y donde además se hace la comparación con los métodos anteriores.

Las siguientes tablas son el detalle para cada mes de los pronósticos de la región del Maule.

Tabla 2. Estadísticas del sesgo porcentual para las cuencas de la zona del Maule en la versión de referencia (solo STORAGE) y versión mejor combinación según criterio AIC para distintos tiempos de inicialización (mayo a marzo).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Pbias [%] | Mejor combinación | | | | | Referencia (STORAGE) | | | | |
| Fecha emisión | min | Percentil 25% | Mediana | Percentil 75% | max | min | Percentil 25% | Mediana | Percentil 75% | max |
| 1˚may | 7.8 | 9.6 | 14.7 | 16.6 | 20.5 | 8.2 | 9.9 | 14.7 | 17.6 | 21.2 |
| 1˚jun | 5.0 | 7.0 | 12.8 | 12.8 | 17.6 | 7.2 | 9.2 | 14.2 | 15.4 | 20.2 |
| 1˚jul | 3.5 | 4.8 | 7.7 | 8.4 | 11.7 | 4.5 | 6.0 | 9.7 | 10.0 | 14.7 |
| 1˚ago | 2.4 | 3.3 | 5.5 | 7.6 | 9.0 | 3.3 | 3.9 | 6.4 | 10.0 | 10.2 |
| 1˚sep | 1.7 | 2.2 | 2.8 | 7.1 | 7.4 | 2.3 | 2.7 | 4.5 | 10.6 | 11.0 |
| 1˚oct | 1.6 | 1.8 | 2.0 | 5.7 | 7.5 | 2.0 | 2.0 | 2.8 | 5.9 | 10.2 |
| 1˚nov | 2.5 | 2.8 | 2.9 | 3.9 | 7.1 | 2.4 | 2.9 | 3.2 | 3.8 | 7.5 |
| 1˚dic | 4.6 | 5.7 | 6.3 | 6.6 | 6.7 | 5.7 | 5.7 | 5.8 | 6.1 | 9.4 |
| 1˚ene | 2.8 | 6.4 | 7.3 | 8.8 | 10.4 | 2.7 | 6.9 | 7.1 | 10.2 | 11.7 |
| 1˚feb | 2.1 | 2.6 | 4.1 | 9.4 | 11.2 | 2.0 | 2.6 | 4.3 | 9.3 | 11.4 |
| 1˚mar | 1.6 | 2.3 | 2.5 | 22.5 | 26.3 | 1.7 | 1.8 | 2.8 | 22.4 | 26.2 |

Tabla 3. Estadísticas del coeficiente de determinación R2 para las cuencas de la zona del Maule en la versión de referencia (solo STORAGE) y versión mejor combinación según criterio AIC para distintos tiempos de inicialización (mayo a marzo).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| R2 [-] | Mejor combinación | | | | | | Referencia (STORAGE) | | | | | |
| Fecha emisión | min | Percentil 25% | Mediana | Percentil 75% | max | min | | Percentil 25% | Mediana | Percentil 75% | max |
| 1˚may | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.6 | 0.3 | | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| 1˚jun | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.0 | | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 1˚jul | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.2 | | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.4 |
| 1˚ago | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.2 | | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.6 |
| 1˚sep | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.1 | | 0.3 | 0.6 | 0.7 | 0.7 |
| 1˚oct | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.3 | | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.8 |
| 1˚nov | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.4 | | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.8 |
| 1˚dic | 0.4 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.4 | | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |
| 1˚ene | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.2 | | 0.3 | 0.4 | 0.7 | 0.7 |
| 1˚feb | 0.0 | 0.2 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.0 | | 0.2 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
| 1˚mar | 0.0 | 0.1 | 0.6 | 0.6 | 0.8 | 0.0 | | 0.1 | 0.5 | 0.6 | 0.8 |

Tabla 4. Estadísticas del Error medio absoluto para las cuencas de la zona del Maule en la versión de referencia (solo STORAGE) y versión mejor combinación según criterio AIC para distintos tiempos de inicialización (mayo a marzo).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| MAE [mm/temporada] | Mejor combinación | | | | | Referencia (STORAGE) | | | | |
| Fecha emisión | min | Percentil 25% | Mediana | Percentil 75% | max | min | Percentil 25% | Mediana | Percentil 75% | max |
| 1˚may | 187.5 | 249.2 | 257.5 | 326.5 | 337.9 | 191.5 | 249.2 | 255.1 | 329.4 | 331.6 |
| 1˚jun | 172.4 | 210.3 | 234.2 | 254.0 | 262.5 | 192.1 | 237.1 | 260.2 | 305.2 | 312.5 |
| 1˚jul | 162.0 | 176.8 | 207.4 | 231.0 | 240.1 | 173.9 | 190.0 | 237.7 | 253.8 | 264.0 |
| 1˚ago | 149.7 | 151.0 | 194.0 | 194.3 | 229.3 | 158.4 | 159.6 | 197.1 | 218.9 | 244.0 |
| 1˚sep | 120.8 | 142.2 | 147.5 | 153.0 | 209.2 | 139.6 | 161.6 | 162.3 | 186.8 | 241.6 |
| 1˚oct | 85.5 | 89.4 | 127.1 | 143.0 | 152.0 | 92.7 | 99.0 | 130.1 | 154.9 | 168.6 |
| 1˚nov | 56.9 | 81.6 | 92.2 | 130.2 | 142.8 | 52.9 | 90.8 | 95.4 | 127.5 | 144.0 |
| 1˚dic | 44.7 | 69.3 | 77.5 | 121.8 | 123.9 | 44.9 | 66.9 | 85.8 | 118.6 | 133.1 |
| 1˚ene | 28.7 | 36.4 | 39.0 | 69.4 | 81.8 | 29.1 | 38.0 | 41.5 | 66.4 | 99.7 |
| 1˚feb | 13.0 | 16.4 | 23.3 | 23.8 | 39.5 | 13.0 | 17.5 | 23.2 | 24.0 | 41.8 |
| 1˚mar | 6.7 | 7.1 | 10.1 | 14.8 | 16.0 | 6.7 | 7.4 | 10.1 | 14.7 | 17.7 |

Tabla 5. Estadísticas del Error cuadrático medio para las cuencas de la zona del Maule en la versión de referencia (solo STORAGE) y versión mejor combinación según criterio AIC para distintos tiempos de inicialización (mayo a marzo).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| RMSE [mm/temporada] | Mejor combinación | | | | | Referencia (STORAGE) | | | | |
| Fecha emisión | min | Percentil 25% | Mediana | Percentil 75% | max | min | Percentil 25% | Mediana | Percentil 75% | max |
| 1˚may | 247.2 | 309.7 | 339.3 | 409.3 | 419.1 | 253.6 | 312.3 | 342.1 | 406.3 | 415.9 |
| 1˚jun | 221.6 | 260.8 | 316.7 | 325.3 | 343.3 | 243.3 | 295.2 | 337.8 | 387.2 | 399.8 |
| 1˚jul | 198.1 | 221.6 | 264.8 | 295.3 | 297.5 | 212.3 | 235.6 | 287.8 | 310.8 | 326.4 |
| 1˚ago | 190.5 | 190.7 | 249.6 | 257.7 | 271.9 | 195.1 | 196.4 | 272.7 | 281.2 | 289.2 |
| 1˚sep | 153.9 | 175.0 | 203.3 | 210.8 | 267.4 | 172.2 | 196.9 | 222.7 | 239.6 | 305.2 |
| 1˚oct | 114.0 | 118.7 | 166.9 | 185.1 | 199.3 | 119.4 | 124.9 | 169.3 | 209.3 | 209.5 |
| 1˚nov | 75.7 | 99.9 | 118.5 | 171.4 | 196.0 | 74.8 | 109.2 | 119.9 | 165.9 | 198.7 |
| 1˚dic | 57.0 | 84.4 | 127.9 | 168.6 | 175.5 | 56.7 | 83.3 | 150.7 | 160.4 | 200.1 |
| 1˚ene | 40.7 | 48.9 | 55.5 | 106.5 | 137.5 | 41.0 | 51.7 | 56.5 | 95.8 | 173.8 |
| 1˚feb | 20.8 | 22.8 | 31.8 | 42.1 | 55.3 | 20.7 | 23.8 | 31.6 | 42.2 | 60.4 |
| 1˚mar | 10.9 | 12.3 | 13.6 | 21.8 | 27.6 | 11.0 | 12.3 | 13.6 | 24.3 | 27.5 |

Al aplicar la misma metodología a todas las 41 cuencas de estudio se obtiene lo siguiente.

Chart

Description automatically generated

Figura 1. Error cuadrático medio normalizado por el volumen promedio para las versiones de referencia y mejor combinación de predictores según criterio AIC.

Chart

Description automatically generated

Figura 2. Error absoluto medio (MAE) normalizado por el volumen promedio de los volúmenes simulados vs los observados para las versiones de referencia y mejor combinación de predictores según criterio AIC.

Chart, box and whisker chart

Description automatically generated

Figura 3. Coeficiente de determinación R2 de los volúmenes simulados vs los observados para las versiones de referencia y mejor combinación de predictores según criterio AIC.

Chart, scatter chart

Description automatically generated

Figura 4. Sesgo porcentual de los volúmenes simulados vs los observados para las versiones de referencia y mejor combinación de predictores según criterio AIC.

Con esto se puede concluir preliminarmente que los pronósticos logran métricas de evaluación aceptables a partir de la emisión del 1 de agosto. Que los valores se estabilizan para las emisiones entre agosto y diciembre. El agregar los índices climáticos en la versión “hibrida” agrega poder predictivo reduciendo el error y aumenta la correlación con las observaciones. Los índices climáticos son especialmente útiles para los meses previos a agosto donde la relevancia de la condición hidrológica inicial es menor y las condiciones atmosféricas tienen mayor relevancia.