

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE BULLILEO
DURANTE LAS CRECIDAS INVERNALES DE JUNIO Y AGOSTO DE 2023

GONZALO ANDRÉS ESPÍNDOLA ELGUETA

HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

CHILLÁN-CHILE

2023

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE BULLILEO
DURANTE LAS CRECIDAS INVERNALES DE JUNIO Y AGOSTO DE 2023**

Aprobado por

José Luis Arumí Ribera
Ingeniero Civil, Ph. D.
Profesor Asistente

Profesor Guía

Lisandro Farías Osses
Ingeniero Civil Agrícola
Evaluador Externo

Profesor Co-Guía

Nicole Uslar Valle
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Asistente

Profesor Asesor

José Luis Arumí Ribera
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Asistente

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Asociado

Decana

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	6
2.1. Objetivo general.....	6
2.2. Objetivos específicos.....	6
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	7
3.1. Descripción del invierno de 2023.....	7
3.2. Experiencias recientes: Presa Abu Mansour.....	9
3.3. Gestión y descripción del Embalse Bullileo.....	10
3.4. Área de estudio.....	11
4. METODOLOGÍA.....	13
4.1. Recopilación de información.....	13
4.2. Balance de masas.....	14
4.3. Principio de similitud hidrológica (P.S.H.).....	16
4.4. Proceso de modelación.....	17
4.5. Descripción empírica de la gestión.....	18
4.6. Definición de siglas y conceptos.....	19
5. RESULTADOS.....	21
5.1. Caracterización de los eventos climáticos.....	21
5.2. Periodo de crecidas de junio.....	22
5.3. Periodo de crecidas de agosto.....	26
5.4. Información adicional.....	30
5.4.1. Estatutos de la Junta de Vigilancia.....	31
5.4.2. Funciones del administrador delegado.....	32
5.4.3. Año hidrológico normal.....	32
5.4.4. Limitaciones de operación.....	32
5.4.5. Detalles de la gestión durante los eventos.....	33
6. DISCUSIÓN.....	34

6.1. Discontinuidad de los datos.....	34
6.2. Amortiguación del caudal máximo de entrada.....	35
6.3. Pronóstico del clima en junio.....	35
6.4. Periodos de retorno de las precipitaciones.....	36
6.5. Simulaciones.....	37
6.5.1. Escenarios de manejo durante el evento de junio.....	38
6.5.1.1. Factibilidad de la simulación S5.....	38
6.5.2. Escenarios de manejo durante el evento de agosto.....	39
6.5.2.1. Factibilidad de las simulaciones S4 y S5.....	39
6.6. Análisis de la gestión.....	40
7. CONCLUSIONES.....	42
8. LITERATURA CITADA.....	44
9. ANEXOS.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

En el texto	Página
Tabla 1. Descripción técnica del Embalse Bullileo.....	10
Tabla 2. Descripción de las variables climatológicas que influyeron en la magnitud de los eventos climáticos de junio y agosto en la zona de Chile Central (33-38°S).....	21
Tabla 3. Volúmenes calculados correspondientes a las variables de entrada y salida para el Embalse Bullileo en el periodo de estudio de junio.....	25
Tabla 4. Volúmenes calculados correspondientes a las variables de entrada y salida para el Embalse Bullileo en el periodo de estudio de agosto.....	29
Tabla 5. Comparación de los periodos de retorno (T) estimados para las precipitaciones acumuladas diarias máximas invernales con el registro de las precipitaciones acumuladas diarias máximas de los eventos climáticos.....	36
En el Anexo	Página
Tabla A1. Detalle numérico de los escenarios simulados dentro del periodo de estudio de junio.....	48
Tabla A2. Detalle numérico de los escenarios simulados dentro del periodo de estudio de agosto.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

En el texto	Página
Figura 1.	Mapas del transporte integrado de vapor de agua (magnitud en Kg/m/s) en instantes seleccionados durante la tormenta del 21 al 25 de junio..... 8
Figura 2.	Mapas de (a) precipitación acumulada entre el 21 y 25 de junio de 2023, (b) máxima precipitación en 24 horas continuas durante ese periodo, (c) máxima precipitación horaria en ese periodo y (d) síntesis de daños..... 8
Figura 3.	Mapa de la sub-subcuenca del Río Longaví En La Quiriquina (en rojo las estaciones fluviométricas; en amarillo las estaciones meteorológicas)..... 11
Figura 4.	Cuenca afluente del Embalse Bullileo..... 12
Figura 5.	Diagrama de flujo del proceso de modelado que permite simular diferentes condiciones de manejo de caudales en el Embalse Bullileo 20
Figura 6.	Valores instantáneos de caudales (Q) registrados en las estaciones fluviométricas de los ríos Bullileo y Longaví en junio..... 22
Figura 7.	Volumen del embalse y volumen de agua entrante al embalse (V) durante el evento de junio indicando el instante de máximo caudal de entrada..... 23
Figura 8.	Balance de caudales (Q) manejados en el embalse y su relación con la intensidad de las precipitaciones (dPp/dt) indicando el valor de máximo caudal de entrada en junio..... 23
Figura 9.	Comparación entre el caudal de la cuenca afluente del Embalse Bullileo estimado mediante P.S.H. y el caudal de entrada al embalse (Q) estimado mediante B.M. para junio.... 24
Figura 10.	Curvas de la suma de los caudales de salida (Q) en diferentes escenarios de manejo simulados en el Embalse Bullileo (Sn) durante el evento de junio..... 25
Figura 11.	Valores instantáneos de caudales (Q) registrados en las estaciones fluviométricas de los ríos Bullileo y Longaví en agosto..... 26
Figura 12.	Volumen del embalse y volumen de agua entrante al embalse (V) durante el evento de agosto indicando el instante de máximo caudal de entrada..... 27

Figura 13.	Balance de caudales (Q) manejados en el embalse y su relación con la intensidad de las precipitaciones (dPp/dt) indicando el valor de máximo caudal de entrada en agosto....	28
Figura 14.	Comparación entre el caudal de la cuenca afluyente del Embalse Bullileo estimado mediante P.S.H. y el caudal de entrada al embalse (Q) estimado mediante B.M. para agosto...	28
Figura 15.	Curvas de la suma de los caudales de salida (Q) en diferentes escenarios de manejo simulados en el Embalse Bullileo (S_n) durante el evento de agosto.....	29
Figura 16.	Diagrama resumen de las atribuciones y deberes de la Junta de Vigilancia del Río Longaví.....	31

En el Anexo		Página
Figura A1.	Volumen del embalse y caudales de salida de las simulaciones 1, 2, 3 y 4 para el evento de junio.....	50
Figura A2.	Volumen del embalse y caudales de salida de las simulaciones 5, 6 y 7 para el evento de junio.....	51
Figura A3.	Volumen de embalse y caudales de salida de las simulaciones 1, 2, 3 y 4 para el evento de agosto.....	52
Figura A4.	Volumen de embalse y caudales de salida de las simulaciones 5, 6 y 7 para el evento de agosto.....	53
Figura A5.	Pauta conversacional y observaciones de la reunión.....	54

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Expresión del balance de masa.....	14
Ecuación 2. Ecuación del principio de similitud hidrológica.....	16

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE BULLILEO
DURANTE LAS CRECIDAS INVERNALES DE JUNIO Y AGOSTO DE 2023**

ANALYSIS OF THE BULLILEO RESERVOIR'S BEHAVIOR DURING
WINTER FLOODS IN JUNE AND AUGUST 2023

Palabras claves: Ríos atmosféricos, fenómeno climático, modelo de simulación, manejo de embalses.

RESUMEN

Durante el invierno de 2023, la zona de Chile Central se vió afectada por la llegada de dos ríos atmosféricos. La combinación inusual de las variables climatológicas que influyeron en la intensidad de este fenómeno ocasionó inundaciones en las regiones del Maule, Ñuble y Biobío. Los eventos de junio y agosto provocaron que la gran mayoría de los embalses se vieran afectados, dentro de los cuales el Embalse Bullileo fue el único en superar su capacidad máxima en ambos eventos. Por esta razón, se implementó un modelo de simulación con el objetivo de analizar diferentes escenarios de manejo de los caudales de salida del embalse para la regulación de las crecidas. En junio, las simulaciones indicaron que el embalse habría superado su capacidad máxima hasta en el escenario más favorable, poniendo de manifiesto la excepcionalidad del evento. En agosto, el embalse aún se mantenía por sobre el margen de seguridad, por lo que se decidió accionar las válvulas con el propósito de alcanzar dicho margen a fines de septiembre. Las simulaciones determinaron que esta gestión contribuyó accidentalmente a reducir las crecidas de agosto durante un tiempo considerable. En general, los resultados

de las simulaciones se contrastaron con la verdadera capacidad operativa de las válvulas, descartando aquellas que proponían una apertura mayor a la realmente posible. El análisis concluyó que la gestión llevada a cabo en el Embalse Bullileo se adaptó adecuadamente a las circunstancias, lo que permitió completar la fase de llenado y priorizar la seguridad del embalse.

ANALYSIS OF THE BULLILEO RESERVOIR'S BEHAVIOR DURING WINTER FLOODS IN JUNE AND AUGUST 2023

Keywords: Atmospheric rivers, climatic phenomenon, simulation model, reservoir management.

SUMMARY

During the winter of 2023, the Central Chile region was affected by the arrival of two atmospheric rivers. The unusual combination of climatological variables influencing the intensity of this phenomenon caused flooding in the Maule, Ñuble, and Biobío regions. The events in June and August led to the majority of reservoirs being impacted, with the Bullileo Reservoir being the only one to exceed its maximum capacity in both occurrences. Consequently, a simulation model was implemented with the aim of analyzing different scenarios for managing the reservoir's outflow to regulate flood control. In June, simulations indicated that the reservoir would have exceeded its maximum capacity even in the most favorable scenario, highlighting the exceptional nature of the event. In August, the reservoir still remained above the safety margin, prompting the decision to activate the valves with the purpose of reaching the margin by the end of September. Simulations determined that this management inadvertently contributed to reducing the August floods for a considerable period. Overall, simulation results were compared with the actual operational capacity of the valves, discarding those suggesting an opening greater than what was realistically possible. The analysis concluded that the management carried out

at the Bullileo Reservoir adapted appropriately to the circumstances, allowing for the completion of the filling phase and prioritizing reservoir safety.

1. INTRODUCCIÓN

En el invierno de 2023, la zona de Chile Central se vió afectada por la llegada de dos ríos atmosféricos. En algunas áreas se registraron fuertes precipitaciones en un corto período de tiempo, lo que provocó inundaciones y deslizamientos de tierra (Voiland, 2023). Las regiones que se vieron más afectadas fueron Maule, Ñuble y Biobío, donde el SENAPRED decretó situaciones de alerta roja debido al aumento del nivel de los ríos.

Estos eventos hicieron que varios embalses se vieran afectados, sobre todo aquellos que se encuentran en la región del Maule. En particular, el Embalse Bullileo fue el único embalse a nivel nacional que sobrepasó su capacidad máxima en ambos eventos climáticos (DGA, 2023a; DGA, 2023b).

Ahora bien, de acuerdo con Arumí et al. (2020), dentro de las diferentes funciones que desempeñan los embalses, estos también tienen la capacidad de actuar como sistemas de amortiguación frente a inundaciones. Esto se debe a su capacidad de almacenar el agua de la cuenca y regular el caudal de salida del cauce principal (Votruba & Broža, 1989).

En el contexto chileno, la Ley de Embalses 20.304 del año 2008 norma la operación de los embalses de control frente a crecidas. De acuerdo al catálogo documental de la DGA, solo los embalses Colbún y Ralco se encuentran clasificados en esta categoría.

Bajo este aspecto, es fundamental que las infraestructuras hidráulicas del país se adapten a las nuevas condiciones hidrológicas para mitigar desastres asociados a eventos climáticos extremos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento del Embalse Bullileo ubicado en la sub-subcuenca del Río Longaví durante las crecidas invernales de junio y agosto de 2023.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los eventos climáticos de junio y agosto de 2023.
- Generar un modelo de simulación para el manejo de caudales en el Embalse Bullileo.
- Evaluar la gestión operativa realizada en el Embalse Bullileo durante los eventos climáticos.

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1. Descripción del invierno de 2023

Como se mencionó anteriormente, durante el invierno de este año, Chile Central se vio afectado por la llegada de dos ríos atmosféricos, donde el SENAPRED decretó alerta roja en ambos eventos. En base a los datos del VisMet (2023), el primer evento tuvo lugar entre el 21 al 25 de junio, mientras que el segundo se desarrolló principalmente entre el 19 y el 22 de agosto.

En términos meteorológicos, según Newell et al. (1992), los ríos atmosféricos son corredores estrechos de alta humedad que transportan vapor de agua precipitable desde los trópicos hacia los polos, los cuales se forman por la interacción entre el aire frío y el aire cálido sobre el océano.

En el caso de junio, este flujo se desplazó siguiendo una latitud constante, lo que se conoce como río atmosférico zonal (Garreaud, 2023a). En la Figura 1 se observa el avance de este flujo de alta humedad durante el periodo del 21 al 25 de junio. Asimismo, en la Figura 2 se observa que las lluvias tuvieron un mayor impacto en los sectores de la precordillera y la cordillera de la zona central (33-38°S), donde la Región del Maule fue la región que mantuvo las mayores acumulaciones registradas. En ese sentido, según datos del VisMet (2023), los valores máximos de precipitación acumulada en 48 horas se registraron entre el 23 y 24 de junio, alcanzando 677,4 mm en la estación Embalse Bullileo.

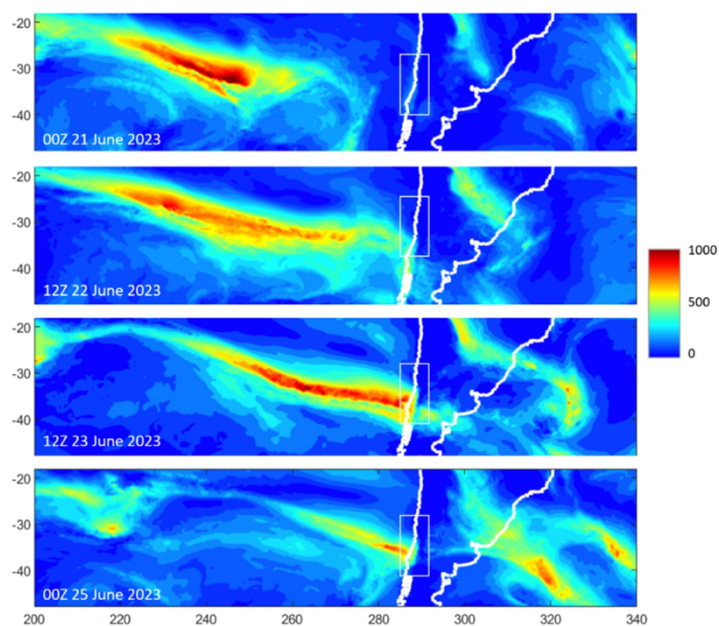


Figura 1. Mapas del transporte integrado de vapor de agua (magnitud en Kg/m/s) en instantes seleccionados durante la tormenta del 21 al 25 de junio.

Fuente: Adaptado de Garreaud (2023a).

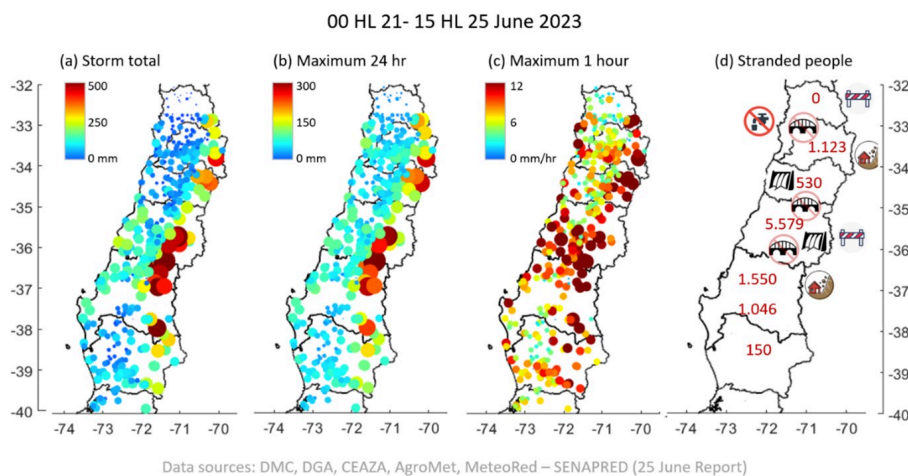


Figura 2. Mapas de (a) precipitación acumulada entre el 21 y 25 de junio de 2023, (b) máxima precipitación en 24 horas continuas durante ese periodo, (c) máxima precipitación horaria en ese periodo y (d) síntesis de daños.

Fuente: Adaptado de Garreaud (2023a).

En cuanto al evento de agosto, nuevamente la Región del Maule registró las mayores acumulaciones de precipitación en la precordillera. Entre los días 20 y 21 se registraron las máximas acumulaciones en el sector de Río Claro y Embalse Bullileo, acumulando un total de 547,1 mm y 436,3 mm en 48 horas, respectivamente.

3.2. Experiencias recientes: Presa Abu Mansour

Un ejemplo representativo de eventos similares tuvo lugar este año entre el 10 y el 13 de septiembre en la ciudad de Derna, Libia. Durante este período, la tormenta Daniel provocó el llenado de la presas Al-Bilad, y Abu Mansour. Ahora bien, a diferencia del Embalse Bullileo, la presa Abu Mansour colapsó, liberando aproximadamente 30 hm³ de agua en la ciudad (ACAPS, 2023). Según Al-Ansari (2023), el colapso de la presa se debió principalmente a una gestión deficiente. Este menciona que si se hubieran abierto las compuertas para mantener el agua dentro de la capacidad de carga y se hubiera mantenido una comunicación constante con los meteorólogos, se podría haber evitado el desastre. Esto resalta la importancia de una gestión efectiva y una coordinación estrecha entre quienes están a cargo para prevenir desastres de este tipo.

3.3. Gestión y descripción del Embalse Bullileo

La organización encargada de administrar, explotar y conservar el Embalse Bullileo y sus obras anexas es la Junta de Vigilancia del Río Longaví y sus Afluentes, en adelante indistintamente “la Junta”. Según señalan sus estatutos, la Junta tiene por objeto administrar y distribuir las aguas a que tienen derecho sus miembros, explotar y conservar las obras de aprovechamiento común y realizar los demás fines que le encomienda la ley. Actualmente operan a través de 20 bocatomas y proporcionan servicio a 32 comunidades de agua.

Por su parte, el Embalse Bullileo se encuentra 10 km aguas arriba de la confluencia entre los ríos Bullileo y Longaví. Cuenta con 250 ha que inundan las áreas de Valle Hermoso, Lara y Amargo. Su función es regular el caudal del Río Longaví para apoyar las necesidades de riego de 25.000 ha en verano. Cabe destacar que esta información y los estatutos fueron proporcionados mediante el contacto directo con la Junta de Vigilancia.

La descripción técnica del embalse se encuentra resumida en la tabla 1.

Tabla 1. Descripción técnica del Embalse Bullileo.

Característica	Descripción
Altura de columna de agua	60 m
Capacidad máxima de llenado	60.000.000 m ³
Principales fuentes de salida	Filtraciones, válvulas, vertedero
Cantidad de válvulas de regulación	5
Potencial máximo de acción de válvulas	9 m ³ /s
Capacidad de evacuación del vertedero	Hasta 1000 m ³ /s
Cota máxima para la evacuación	50,08 mca

3.4. Área de estudio

El Embalse Bullileo vierte sus aguas hacia el cauce del Río Bullileo. Posteriormente, este se junta con el Río Longaví por su ribera sur para formar los ríos Perquilauquén y Loncomilla. El Río Bullileo forma parte de la sub-subcuenca del Río Longaví y, por consecuencia, de la cuenca del Río Maule.

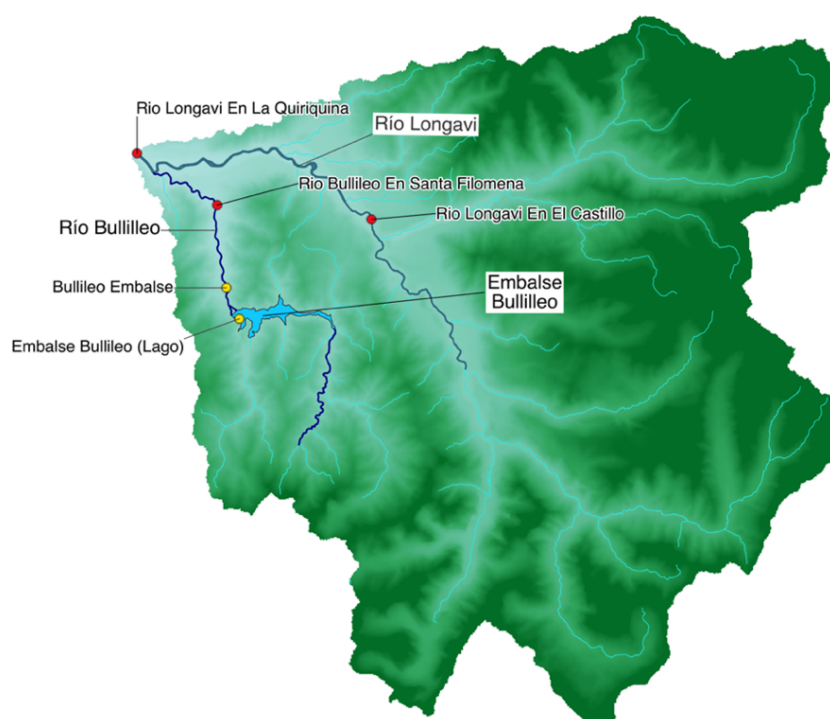


Figura 3. Mapa de la sub-subcuenca del Río Longaví En La Quiriquina (en rojo las estaciones fluviométricas; en amarillo las estaciones meteorológicas).

El mapa de la Figura 3 se hizo en base a los datos del explorador de cuencas del (CR)2, de la mapoteca de la BCN y del IDE. En esta se observan las estaciones fluviométricas y meteorológicas del sector, así como la confluencia entre el Río Bullileo y el Río Longaví.

Actualmente, la Dirección General de Agua (DGA) monitorea el Río Bullileo en las estaciones fluviométricas y meteorológicas de Santa Filomena y Bullileo Embalse, respectivamente.

La cuenca aportante del Embalse Bullileo se puede observar en la Figura 4. Esta imagen fue extraída del capítulo 2 de la ficha del proyecto “Central Hidroeléctrica Embalse Bullileo”, el cual fue presentado al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental en el año 2012. En dicho documento se estima que el área de la cuenca aportante es de 100 km² aproximadamente. La referencia respectiva se encuentra en el penúltimo apartado de esta tesis.

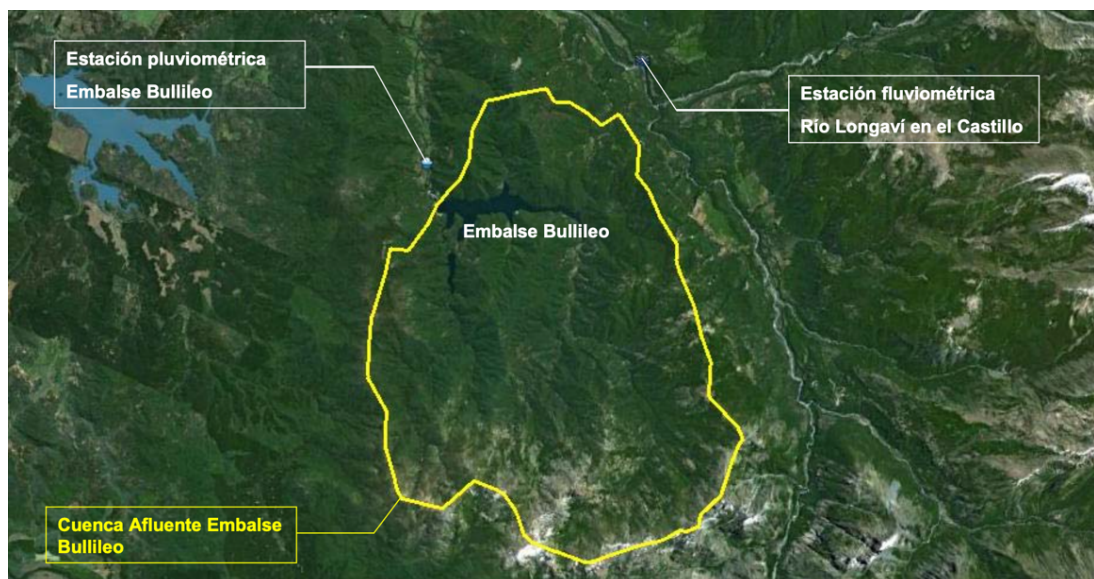


Figura 4. Cuenca afluyente del Embalse Bullileo.

4. METODOLOGÍA

4.1. Recopilación de información

Para describir el fenómeno climático, se recopiló información descrita por expertos en el área a través de páginas web, cuyas referencias se encuentran en el apartado de literatura citada. También se elaboraron dos gráficos que describen el caudal de los ríos Bullileo y Longaví para los periodos de crecidas con tal de evidenciar la magnitud de los eventos. Los datos fueron descargados de las estaciones fluviométricas correspondientes, cuyos resultados se pueden observar en las figuras 6 y 11.

A su vez, este proyecto de título se desarrolló en colaboración con la Junta de Vigilancia del Río Longaví. Esto permitió conocer, además de los detalles técnicos descritos en la tabla 1, la curva de gasto del vertedero y el caudal manejado a través de las válvulas durante los eventos. Por su parte, las precipitaciones acumuladas, el volumen del embalse y la cota del embalse fueron descargadas de la estación Embalse Bullileo (Lago) de la DGA.

Cabe destacar que esta estación no mantuvo un registro completo del periodo de crecidas de junio. Específicamente, comenzó a registrar datos a partir del 22 de junio a las 17:59 h. Por tanto, para efectos de este estudio, las precipitaciones de junio tuvieron una duración de 78 horas aproximadamente. Es necesario mencionar que el periodo de estudio considerado para junio es entre el 22/06 17:59 h – 25/06 23:59 h, mientras que para agosto es entre el 19/08 07:59 h – 22/08 23:59 h.

4.2. Balance de masas

Para poder generar el modelo de simulación, primero fue necesario calcular el caudal de entrada al embalse. Para esto se hizo un balance de masas (B.M.), el cual, se pudo llevar a cabo dado que se conocían de antemano los registros de volumen, cota y caudal de las válvulas del embalse.

Este método se encuentra descrito por la siguiente expresión:

$$\frac{dV}{dt} = Q_e - (Q_{ver} + Q_{val}) \quad [1]$$

Dónde:

V = Volumen embalse

Q_e = Caudal entrada

Q_{ver} = Caudal vertedero

Q_{val} = Caudal válvulas

En donde se despreciaron las filtraciones como variables de salida.

Para determinar la función dV/dt , la cual describe la variación del volumen del embalse en función del tiempo, se derivó la curva de volumen del embalse. Esto implicó calcular la diferencia entre volúmenes consecutivos y dividirla por el intervalo de tiempo correspondiente.

De acuerdo con la Junta, la cota máxima del embalse a la cual comienza a operar el vertedero es de 50,08 mca. En base a esta información, y utilizando los registros horarios de la DGA, se pudo calcular la carga del vertedero cuando el nivel del embalse superaba esta cota mediante la resta de ambos valores. Esta carga se relacionó con la curva de gasto, permitiendo obtener el caudal del vertedero cada hora.

Por su parte, la planilla con el registro del caudal de válvulas fue proporcionada por la Junta. En junio, las válvulas se abrieron el día 24 con un caudal constante de 15,6 m³/s. Estas se mantuvieron abiertas por los próximos meses, registrando un caudal de 16 m³/s el 1 de agosto. Después disminuyeron a 7,5 m³/s entre los días 2 y 4 de agosto, y a 6 m³/s desde el día 5 hasta cerrarlas el día 7. El 16 de agosto se restablecieron a 7,5 m³/s, y luego del día 19 se mantuvieron a 15 m³/s.

Estos datos permitieron calcular el caudal de entrada al embalse para después generar el modelo. También permitieron cuantificar la cantidad de agua que entró al embalse en los periodos de tiempo de las crecidas en los cuales se mantuvo registro. Los resultados se observan en las figuras 7, 8, 12 y 13, y en las tablas 3 y 4.

4.3. Principio de similitud hidrológica (P.S.H)

Este método fue utilizado para asegurar la validez de la estimación del caudal de entrada al embalse mediante B.M. Al no contar con datos concretos para la cuenca aportante del Embalse Bullileo, se utilizaron datos de la cuenca del Río Longaví En El Castillo.

Para poder hacer esto, se deben cumplir los siguientes criterios:

- I. Que ambas cuencas tengan un clima similar (evapotranspiración y precipitación).
- II. Que ambas cuencas tengan un uso de suelo similar.
- III. Que ambas cuencas tengan una geomorfología y geología similar.

Este principio se encuentra descrito por la siguiente expresión:

$$Q_1/Q_2 = A_1/A_2 \quad [2]$$

Dónde:

Q_1 = Caudal cuenca aportante Embalse Bullileo

Q_2 = Caudal cuenca estación Longaví En El Castillo

A_1 = Área cuenca aportante Embalse Bullileo

A_2 = Área cuenca estación Longaví En El Castillo

Según la plataforma CAMELS, la cuenca de la estación Longaví En El Castillo tiene un área de 466,9 km², mientras que la cuenca afluyente del Embalse Bullileo cuenta con una superficie aproximada de 100 km².

De este modo, el método B.M. genera un caudal en la entrada del embalse, mientras que P.S.H. lo genera para la cuenca aportante al embalse. Dado que este sector se mantuvo bajo el mismo régimen de precipitaciones, es correcto esperar que las curvas describan un comportamiento similar. El periodo considerado para esta validación se hizo a partir del 22 de junio a las 18:59 h debido a la falta de datos anteriores. Los resultados se encuentran en las figuras 9 y 14.

4.4. Proceso de modelación

Para llevar a cabo las simulaciones, se implementó una condición de borde en el proceso de modelación. En este caso, se asumió un aumento sostenido del volumen y cota del embalse obviando la liberación del agua a través de las válvulas y el vertedero. De este modo, y conociendo previamente el caudal de entrada, se lograron simular diferentes escenarios desde el interior del dominio hacia sus límites, manejando las variables de salida según lo deseado.

Para determinar el valor de la cota correspondiente a la variación de volumen, se aplicó una interpolación lineal entre los pares de coordenadas adyacentes al valor deseado con los valores respectivos en condiciones de borde. Esto permitió calcular la carga del vertedero y, posteriormente, conocer el caudal del vertedero al relacionarla con la curva de gasto.

Luego, a medida que se iba incorporando el caudal del vertedero en la ecuación de balance, la variación del volumen se iba actualizando en cada instante de tiempo, lo que permitía obtener un nuevo volumen de embalse en tiempo real, el cual, era considerado en el siguiente cálculo. Este modelo se resume algebraicamente en el diagrama de flujo de la Figura 5.

4.5. Descripción empírica de la gestión

En el contexto de colaboración con la Junta, se sostuvo una reunión con el administrador delegado del embalse el día 21 de diciembre en las oficinas de la organización, ubicada en calle dieciocho 580, Parral. Se utilizó una pauta semiestructurada conforme al libro "Metodología de la Investigación", citado en el penúltimo apartado de esta tesis. Por tanto, se abordaron temáticas predeterminadas que a su vez permitieron adaptarse a la dinámica de la conversación, buscando obtener perspectivas técnicas, experiencias y opiniones adicionales.

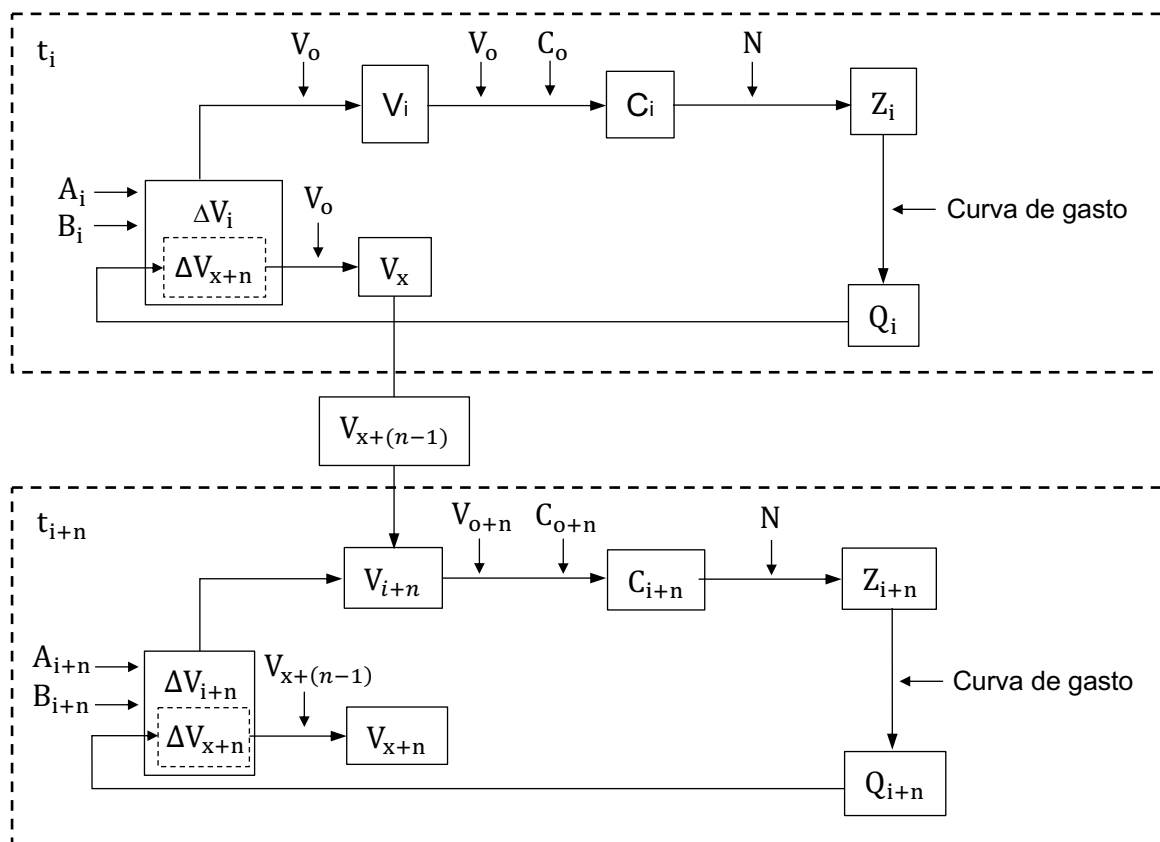
El propósito de esta reunión fue conocer información sobre la gestión llevada a cabo durante los eventos, así como las limitaciones de operación y de infraestructura. Esto permitió eventualmente evaluar la factibilidad de los escenarios simulados mediante el modelo, cumpliendo así con el tercer objetivo específico de esta tesis. La pauta conversacional, junto con las observaciones respectivas, se encuentran adjuntas en el apartado de anexos.

4.6. Definición de siglas y conceptos

Es necesario esclarecer que para cada evento se hicieron un total de 7 simulaciones, en donde la numeración de las simulaciones hechas para el evento de junio es independiente de la numeración para el evento de agosto. Por su parte, para conocer el detalle de cada simulación, se pueden consultar las tablas A1 y A2 del apartado de anexos.

Por otro lado, para un mejor entendimiento de los resultados de esta tesis, a continuación se detallan las siglas empleadas para cada escenario simulado. Asimismo, se explica la semántica de algunas palabras utilizadas en el texto. Cabe destacar que la leyenda de los gráficos no permite utilizar subíndices, por lo que siguen el formato básico de texto en línea.

- E_J: Escenario sin la presencia del embalse en el evento de junio.
- E_A: Escenario sin la presencia del embalse en el evento de agosto.
- R_J: Escenario que representa la gestión real en el evento de junio.
- R_A: Escenario que representa la gestión real en el evento de agosto.
- S_n: Escenarios simulados cualesquiera, siendo n distinto de cero.
- Regular: Término que hace referencia al control del caudal del Río Bullileo mediante la intervención del embalse.
- Contener: Término que indica la capacidad del embalse para retener el agua de entrada sin necesidad de liberarla.
- Amortiguar: Término empleado para señalar la capacidad del embalse de atenuar la intensidad del caudal de entrada.



Dónde:

t	= Tiempo	N	= Cota de desbordamiento
V	= Volumen	Q	= Caudal de vertedero
ΔV	= Variación volumen / tiempo	V_o	= Volumen en condiciones de borde
A	= Caudal de entrada	C_o	= Cota en condiciones de borde
B	= Caudal de válvulas	Z	= Carga del vertedero

Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de modelado que permite simular diferentes condiciones de manejo de caudales en el Embalse Bullileo.

5. RESULTADOS

5.1. Caracterización de los eventos climáticos

Según menciona Voiland (2023), el río atmosférico de agosto se comportó de manera similar al evento de junio. Tomando en consideración este punto, la tabla 2 resume los factores que influyeron en la magnitud de ambos eventos climáticos.

Tabla 2. Descripción de las variables climatológicas que influyeron en la magnitud de los eventos climáticos de junio y agosto en la zona de Chile Central (33-38°S).

Variable	Descripción
Transporte Integrado de Vapor (IVT)	La fuerza de los ríos atmosféricos, medido en IVT, fueron clasificados como evento de categoría 4. La columna de vapor de agua tuvo valores atípicos, por sobre 30 mm.
Dirección de los vientos del oeste	El ángulo de 90° con el que los vientos del oeste chocaron con la cordillera generó tormentas de larga duración.
Efecto orográfico	La cordillera forzó la ascensión de los ríos atmosféricos, resultando en una mayor condensación del vapor de agua y mayores precipitaciones en el lado barlovento de las montañas.
Altitud de la isoterma 0°C	En promedio, la isoterma 0°C se mantuvo cerca de los 3300 msnm, aumentando así el área donde cae precipitación líquida.
Distribución horaria	En junio, las precipitaciones perduraron 100 horas continuas luego de la llegada de los ríos atmosféricos.

Basado en la información de: Voiland (2023), Garreaud (2023a), Garreaud (2023b) & Vicencio (2021).

5.2. Periodo de crecidas de junio

A continuación, se presentan los caudales registrados por las estaciones de la DGA en el Río Longaví durante el evento climático de junio.

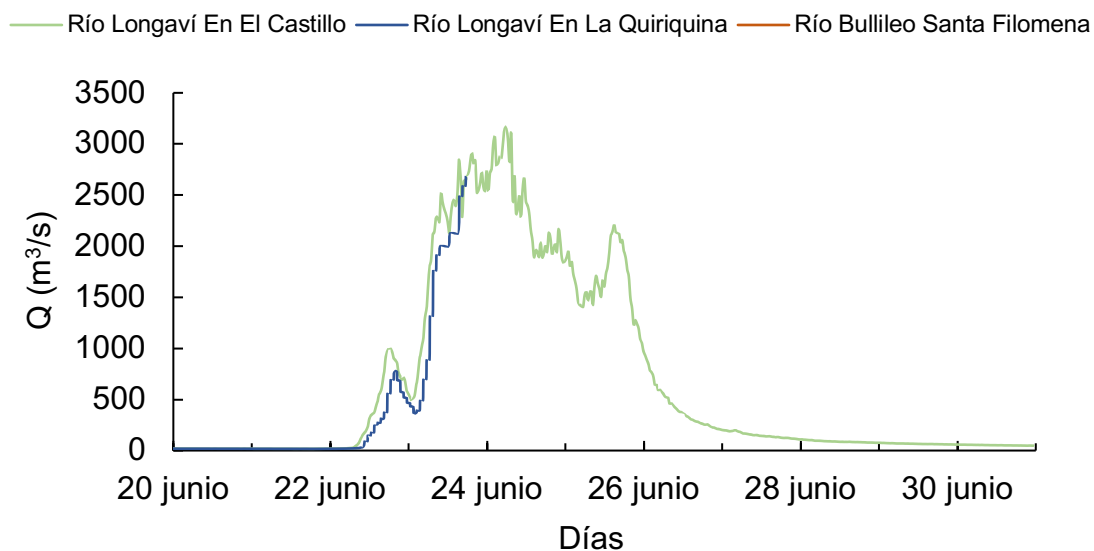


Figura 6. Valores instantáneos de caudales (Q) registrados en las estaciones fluviométricas de los ríos Bullileo y Longaví en junio.

En la Figura 6 se observa una discontinuidad en los datos para la estación Río Longaví En La Quiriquina, así como la inexistencia de los mismos para la estación Río Bullileo Santa Filomena. Sin embargo, aún es posible observar la relación existente entre la magnitud de las precipitaciones del 21 al 25 de junio y el aumento del caudal del Río Longaví durante ese periodo.

En la Figura 7 se observa el impacto que tuvieron las precipitaciones en el volumen del embalse durante el evento de junio, el cual, alcanzó un máximo de $64,8 \text{ hm}^3$. También se muestra la cantidad de agua que entró al embalse y la capacidad que tenía en el instante de máximo caudal de entrada.

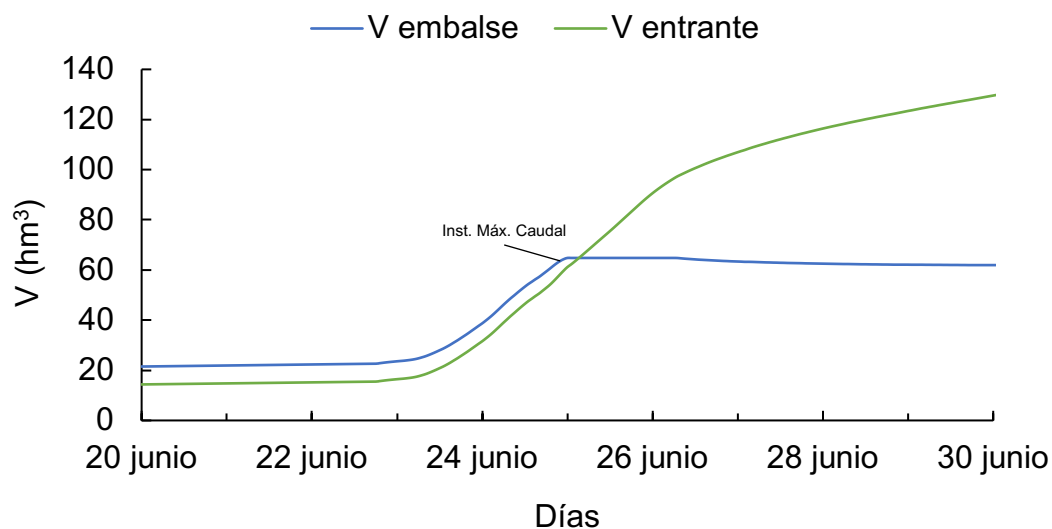


Figura 7. Volumen del embalse y volumen de agua entrante al embalse (V) durante el evento de junio indicando el instante de máximo caudal de entrada.

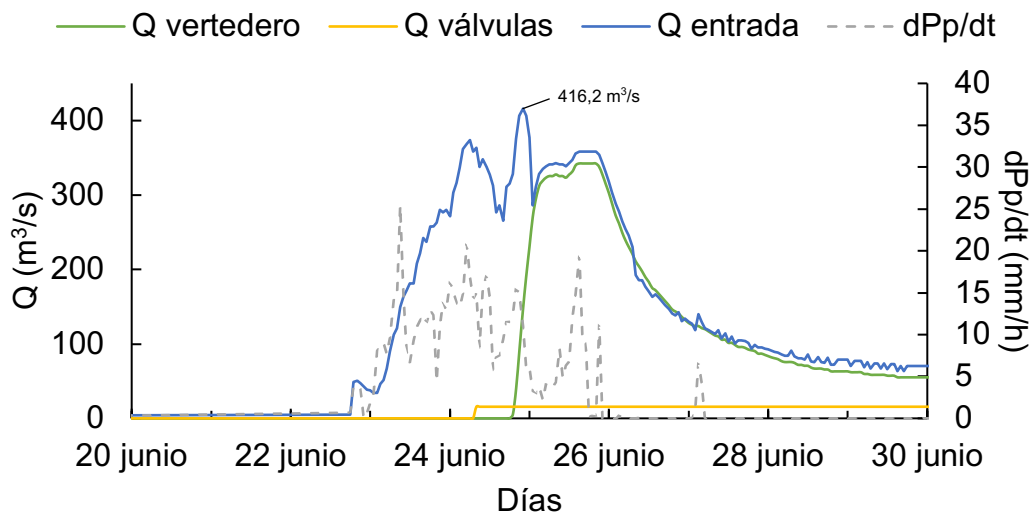


Figura 8. Balance de caudales (Q) manejados en el embalse y su relación con la intensidad de las precipitaciones (dPp/dt) indicando el valor de máximo caudal de entrada en junio.

La Figura 8 muestra el caudal de entrada y el manejo de los caudales de salida durante el evento de junio, separando la liberación de agua a través de las

válvulas y el vertedero. Se observa que cuando las precipitaciones se intensificaban, el caudal de entrada aumentaba.

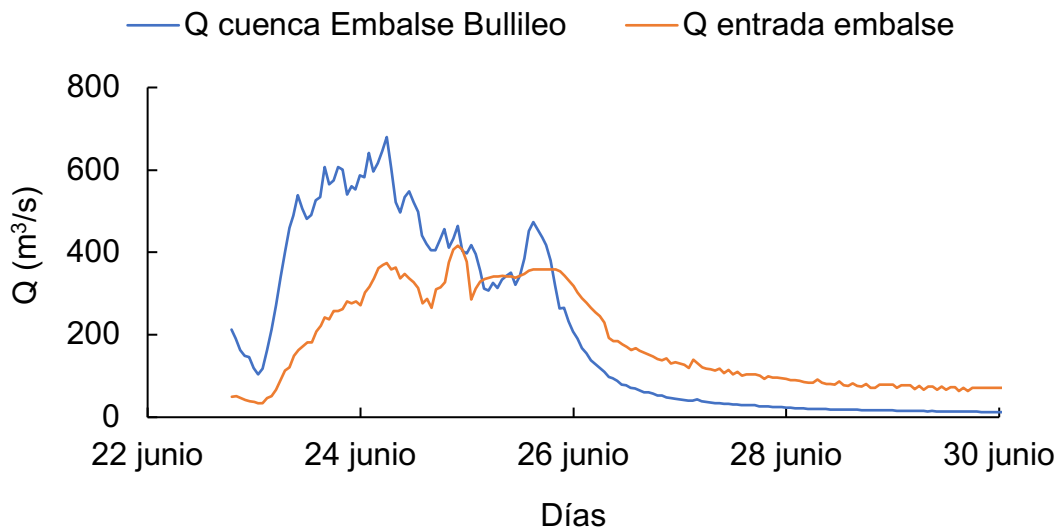


Figura 9. Comparación entre el caudal de la cuenca afluyente del Embalse Bullileo estimado mediante P.S.H. y el caudal de entrada al embalse (Q) estimado mediante B.M. para junio.

En la Figura 9 se observa un comportamiento similar entre las curvas P.S.H. y B.M., lo que sugiere que el caudal de entrada estimado para el embalse sigue el mismo régimen hidrológico de la cuenca aportante, asegurando la validez de la estimación.

Por otro lado, se cuantificó la cantidad de agua que entró y salió del embalse para las crecidas de junio únicamente con los registros disponibles. Los cálculos se realizaron integrando las curvas de caudales de la Figura 8 mediante el método del trapecio, los cuales se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Volúmenes calculados correspondientes a las variables de entrada y salida para el Embalse Bullileo en el periodo de estudio de junio.

Descripción de volumen		Cantidad (m ³)
Entrada		74.569.693
Liberado	Vertedero	30.104.244
	Válvulas	2.302.560
Antes de las crecidas		22.632.000
Final registrado		64.794.889

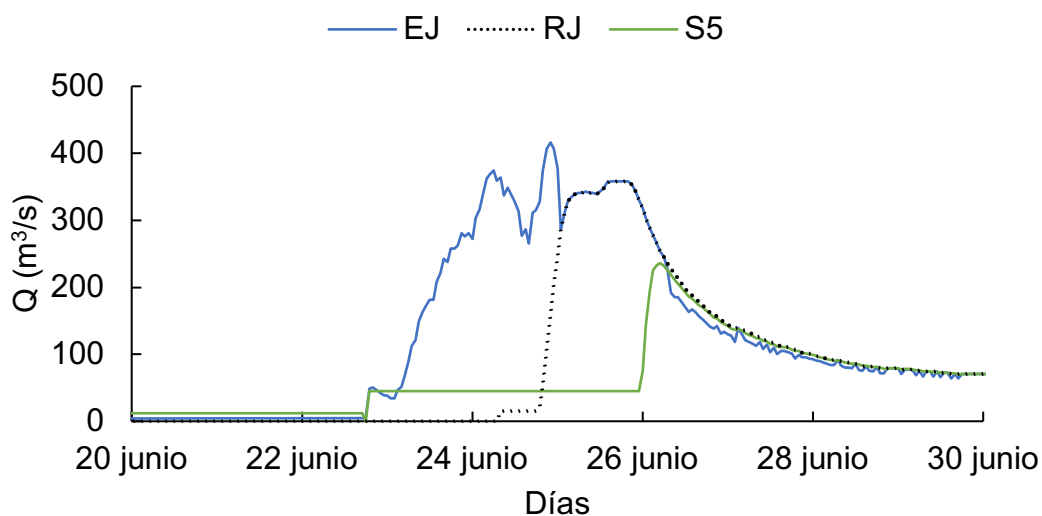


Figura 10. Curvas de la suma de los caudales de salida (Q) en diferentes escenarios de manejo simulados en el Embalse Bullileo (Sn) durante el evento de junio.

La Figura 10 muestra tres curvas significativas para el evento de junio, donde las siglas de la leyenda se explican en el apartado 4.6 de esta tesis. Cabe destacar que la curva E_J hace referencia a un caudal de salida equivalente al caudal de entrada en ese mes.

Comparando la curva E_J con la curva R_J, se observa que el embalse logró contener la crecida alrededor de 38 horas antes de abrir las válvulas el 24 de

junio. Luego, logró regular el caudal de salida por otras 11 horas más hasta que comenzó a operar el vertedero.

Por su parte, S5 sugiere haber mantenido una liberación constante de agua a través de las válvulas desde el 1 de junio. Esto quiere decir que, en lugar de contener el agua de entrada, esta estrategia habría permitido regular la crecida el mayor tiempo posible hasta que comenzara a operar el vertedero.

5.3. Periodo de crecidas de agosto

A continuación, se presentan las curvas de caudales para los ríos Bullileo y Longaví en el mes de agosto registrados por la DGA.

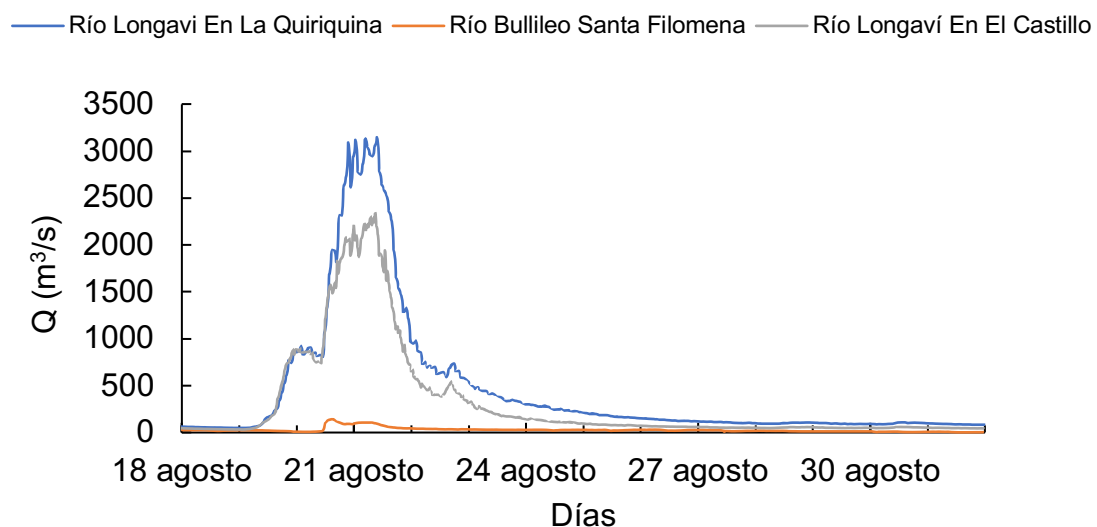


Figura 11. Valores instantáneos de caudales (Q) registrados en las estaciones fluviométricas de los ríos Bullileo y Longaví en agosto.

En la Figura 11 se observa la relación que hay entre las lluvias del 19 al 22 de agosto y el aumento de caudales de los ríos en la zona, evidenciando la magnitud del evento. Además, a diferencia de junio, agosto cuenta con datos continuos, permitiendo generar curvas de caudales más afines con la realidad.

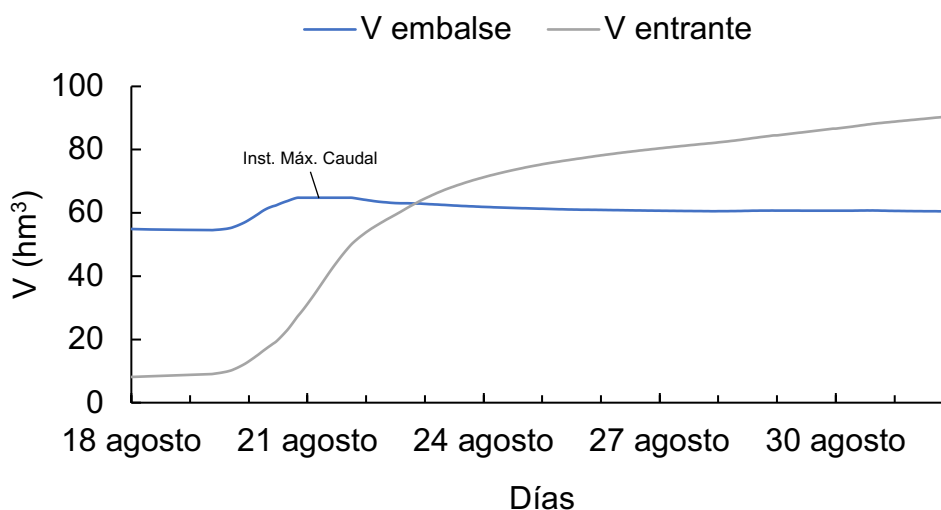


Figura 12. Volumen del embalse y volumen de agua entrante al embalse (V) durante el evento de agosto indicando el instante de máximo caudal de entrada.

En la Figura 12 se observa el impacto que tuvieron las precipitaciones de agosto en el volumen del embalse, el cual también alcanzó un volumen 64,8 hm^3 . También se observa la cantidad de agua que entró al embalse y la capacidad del embalse de amortiguar la crecida durante el instante de máximo caudal de entrada.

La Figura 13 muestra cómo se manejaron los caudales de salida y cómo influyeron las precipitaciones en la magnitud del caudal de entrada al embalse en agosto. Además, se indica el valor de máximo caudal en la entrada.

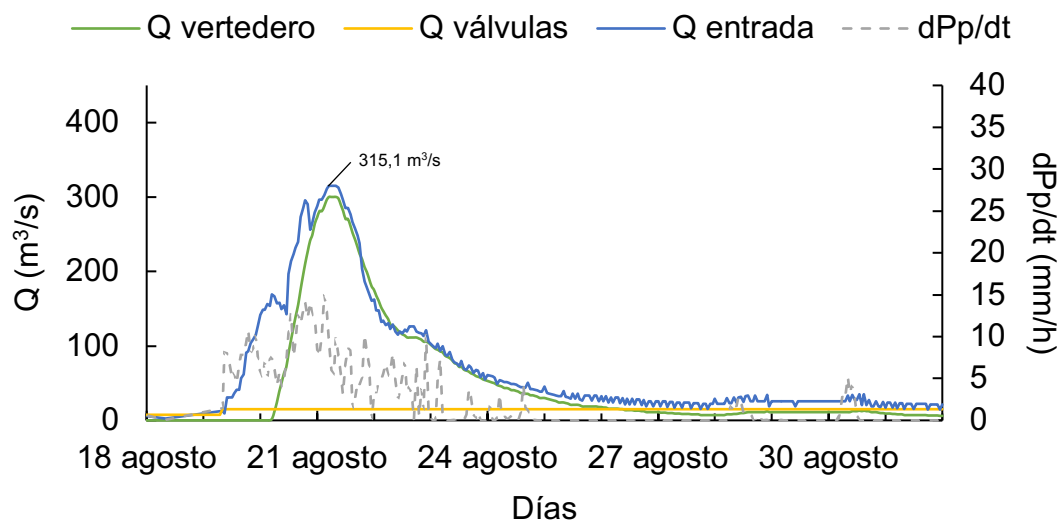


Figura 13. Balance de caudales (Q) manejados en el embalse y su relación con la intensidad de las precipitaciones (dPp/dt) indicando el valor de máximo caudal de entrada en agosto.

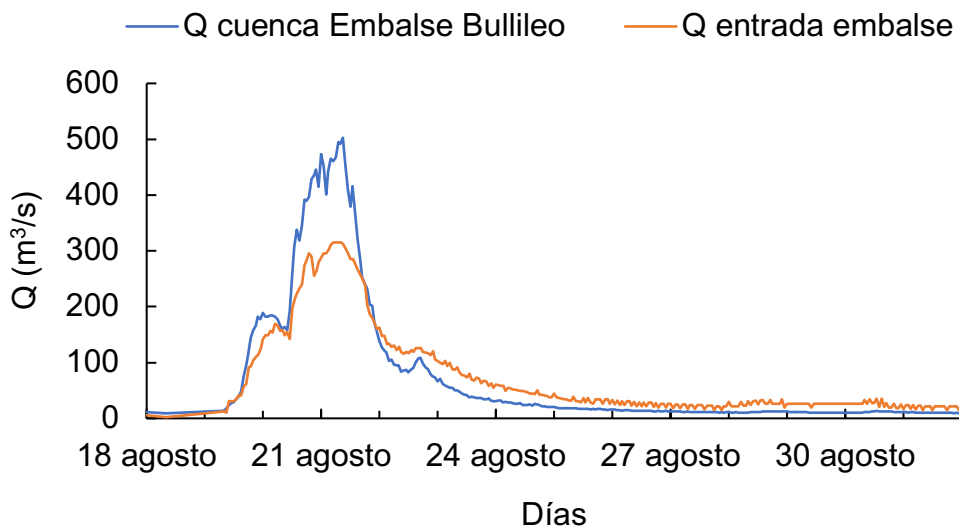


Figura 14. Comparación entre el caudal de la cuenca afluente del Embalse Bullileo estimado mediante P.S.H. y el caudal de entrada al embalse (Q) estimado mediante B.M. para agosto.

La Figura 14 permite asegurar la validez del método B.M. empleado para estimar el caudal de entrada al embalse en agosto ya que sigue el mismo régimen hidrológico que la cuenca aportante.

La tabla 4 muestra la cantidad de agua que entró al embalse calculado únicamente en el periodo de estudio. También se muestra la cantidad de agua que liberaron las válvulas y el vertedero.

Tabla 4. Volúmenes calculados correspondientes a las variables de entrada y salida para el Embalse Bullileo en el periodo de estudio de agosto.

Descripción de volumen		Cantidad (m ³)
Entrada		56.011.932
Liberado	Vertedero	42.296.328
	Válvulas	5.724.000
Antes de las crecidas		54.573.000
Final registrado		62.564.604

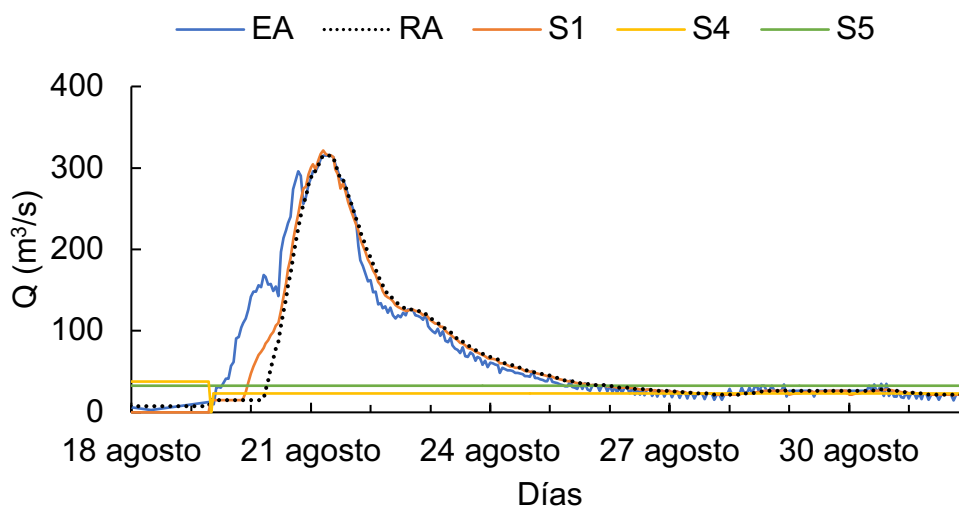


Figura 15. Curvas de la suma de los caudales de salida (Q) en diferentes escenarios de manejo simulados en el Embalse Bullileo (S_n) durante el evento de agosto.

La Figura 15 muestra 5 curvas significativas para el evento de agosto, donde las siglas de la leyenda se explican en el apartado 4.6 de esta tesis. Cabe destacar que la curva E_J refleja un caudal de salida equivalente al caudal de entrada durante el evento de agosto. Asimismo, la curva S1 simula la abertura de válvulas al inicio de la crecida, mientras que S4 y S5 representan escenarios simulados con las mínimas condiciones necesarias para una regulación completa de la crecida.

Al comparar las curvas R_A y S1 se observa que haber mantenido las válvulas abiertas luego del evento de junio permitió regular la crecida alrededor de 8 horas más en comparación con haberlas cerrado a principio de mes y luego abrirlas al inicio del evento.

En general, S4 y S5 proponen una apertura de válvulas mayor que en la realidad, lo que habría regulado la crecida. Sin embargo, hay que evaluar la factibilidad de estas simulaciones dadas las limitaciones reales de operación.

5.4. Información adicional

Durante la reunión con el administrador delegado del embalse se recopiló información con respecto a los estatutos de la Junta y sus años de experiencia en esta labor, así como de las limitaciones de operación y de los detalles de la gestión realizada durante los eventos. El administrador delegado explicó que el llenado y manejo de válvulas dependen en gran medida del pronóstico del clima y de la demanda de riego para el verano, la cual, se define en el programa de distribución de aguas establecido mediante decisión colegiada.

5.4.1. Estatutos de la Junta de Vigilancia

La estructura y funcionamiento de la Junta se rige por las disposiciones halladas en los estatutos de la misma. Estos definen que la Junta debe ser administrada por una directorio de 7 miembros, quienes son nombrados cada dos años por la asamblea general. En su artículo trigésimo primero se detallan los deberes y atribuciones de este directorio. A su vez, el artículo quincuagésimo indica que la designación tanto de los repartidores como de los trabajadores debe ser mediante unanimidad.

La figura 16 presenta un diagrama que resume algunas de estas atribuciones seleccionadas según las preferencias de esta tesis.

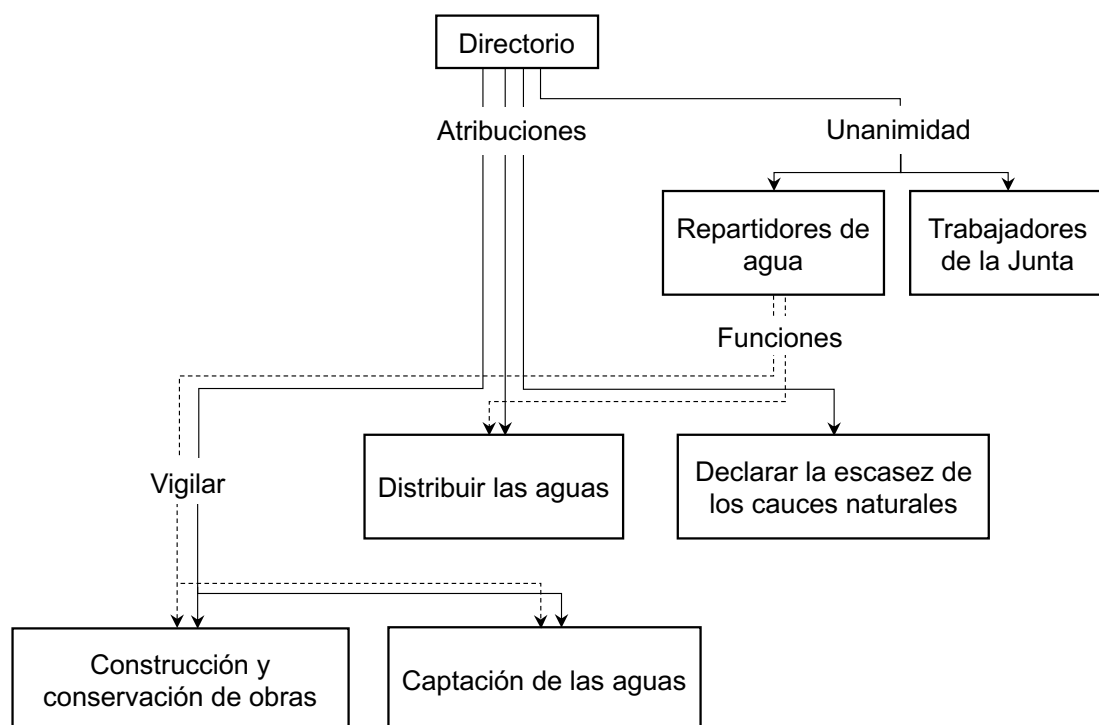


Figura 16. Diagrama resumen de las atribuciones y deberes de la Junta de Vigilancia del Río Longaví.

5.4.2. Funciones del administrador delegado

El administrador delegado del embalse, en adelante indistintamente “repartidor”, cuenta con 17 años de trayectoria, quien ha desarrollado sus conocimientos de manera totalmente práctica. Esto le ha valido la designación por el directorio para actualmente estar a cargo de la repartición de las aguas y la mantención del embalse. Entre sus responsabilidades se incluyen el trabajo de mantención del piso del embalse, la revisión permanente del muro de presa y de la sala de válvulas, y la limpieza del embalse en el periodo seco. Su gestión principal consiste en el manejo de las válvulas para completar la fase de llenado del embalse a fines de septiembre y cumplir con el programa de riego aprobado por el directorio.

5.4.3. Año hidrológico normal

De acuerdo con el repartidor, un régimen hidrológico normal para el embalse se caracteriza por precipitaciones que varían entre 1800 y 2600 mm al año. Esto permite asegurar que el embalse complete su fase de llenado entre abril y septiembre. Durante este periodo, se busca alcanzar un volumen de 45 hm³ con un margen de seguridad de 15 hm³ para prevenir posibles desbordamientos.

5.4.4. Limitaciones de operación

Las limitaciones radican principalmente en la sala de válvulas, la cual está protegida por una cubierta de policarbonato para prevenir la infiltración de

agua y, por ende, la corrosión de las tuberías. Luego de 70 años de operación del embalse, se ha observado que la apertura de 4 válvulas genera vibraciones que pueden afectar la infraestructura de la sala, comprometiendo la integridad de la cubierta. Por lo tanto, con el objetivo de resguardar la sala de válvulas, actualmente se evita abrirlas por completo, optando por abrir entre 3 y media y 4 válvulas simultáneamente con una capacidad máxima de liberación de 7,5 m³/s cada una.

5.4.5. Detalles de la gestión durante los eventos

Según comentó el repartidor, el 20 de junio el embalse tenía un volumen de 21 hm³. Esta situación mantuvo preocupada a la administración ya que en años anteriores habían tenido más agua para esa fecha. Para el 23 de junio, el embalse aumentó su volumen a 40 hm³. Finalmente, el 25 de junio el embalse registró un volumen de 64 hm³. Por esta razón, decidieron mantener las válvulas abiertas por los próximos meses para generar el margen de seguridad de 15 hm³.

A principios de agosto, el embalse tenía un volumen de 51 hm³, y estimaban alcanzar el margen de seguridad a fines de septiembre considerando los pronósticos en ese entonces. Sin embargo, las lluvias de ese mes hicieron que el embalse se volviera a llenar el 21 de agosto. El repartidor señaló que este evento presentó mayores desafíos que el de junio ya que hubo un instante en que el agua que ingresaba al embalse era la misma que la que salía. Esto hace referencia a un embalse completamente lleno en pleno evento de crecidas.

6. DISCUSIÓN

6.1. Discontinuidad de los datos

La estación fluviométrica Río Bullileo Santa Filomena no contaba con datos desde el 4 de junio hasta su reanudación el 14 de julio, por lo que no se pudo representar en la Figura 5. Además, la estación Río Longaví En La Quiriquina dejó de monitorear luego del 23 de junio.

La estación Embalse Bullileo (Lago) no mantuvo registro entre los días 12 al 15 y 18 al 21 de junio. Asimismo, los días 11 y 17 de junio mantuvieron registro hasta las 09:59 h, mientras que el 16 y 22 de junio comenzaron a registrar a partir de las 10:29 h y 17:29 h, respectivamente. Esta discontinuidad en los datos no permitió representar en su totalidad el periodo completo de crecidas del 21 al 25 de junio, y pudo alterar los resultados de la tabla 2. Con respecto a agosto, la estación Embalse Bullileo (Lago) comenzó a registrar datos a partir del 19 de agosto a las 8:29 h.

Por su parte, la Junta de Vigilancia mantuvo un registro de caudal de válvulas medido diariamente a las 07:59 h. Por lo tanto, para que las mediciones de la estación guardaran coherencia con el registro del caudal de válvulas en los periodos de estudio, se asumió que la estación comenzó a registrar datos el 22 de junio a las 17:59 h y el 19 de agosto a las 07:59 h.

6.2. Amortiguación del caudal máximo de entrada

El caudal máximo de entrada corresponde al momento donde se registra la mayor cantidad de agua fluyendo en el sistema, lo que trae complicaciones para proteger el embalse y sus obras anexas. Por lo tanto, es importante considerar esta variable a la hora de analizar la gestión del embalse.

Al inicio del evento de junio, el embalse estaba al 30% de capacidad. Esto le permitió amortiguar el 62% del caudal máximo registrado el 24 de junio (416,2 m³/s). Por otro lado, antes de las crecidas de agosto, el embalse se encontraba al 91% de capacidad, por lo que no pudo amortiguar el caudal máximo de 315,1 m³/s registrado el 21 de agosto.

Esta afirmación se respalda al contrastar los instantes de tiempo de los caudales máximos de las figuras 7 con 8, y 12 con 13. Dichos resultados confirman las dificultades señaladas por el administrador delegado en el apartado 5.4.5, ya que el embalse estaba completamente lleno en el instante de máxima crecida en agosto.

6.3. Pronóstico del clima en junio

Luego de la reunión con el administrador delegado del embalse, se constató que el pronóstico del clima en junio no previó lluvias de tales magnitudes. Específicamente, el pronóstico del clima consultado el 20 de junio indicaba un máximo acumulado aproximado de 530 mm entre el 21 y 25 de junio. Por tanto, las medidas adoptadas se basaron en dicho pronóstico. Sin embargo, el evento completo registró un máximo acumulado aproximado de 800 mm.

6.4. Periodos de retorno de las precipitaciones

En el estudio de prefactibilidad para evaluar la construcción del sistema de riego del Longaví se estimaron los periodos de retorno para las precipitaciones acumuladas diarias utilizando datos de la estación Bullileo Embalse de la DGA. Este documento fue facilitado por el personal de la Junta de Vigilancia, cuyos resultados se muestran en la tabla 5. Además, esta tabla contrasta dichos resultados con las precipitaciones máximas acumuladas diarias registradas en los eventos de este año.

Tabla 5. Comparación de los periodos de retorno (T) estimados para las precipitaciones acumuladas diarias máximas invernales con el registro de las precipitaciones acumuladas diarias máximas de los eventos climáticos.

T (años)	ESTIMACIÓN Pd 24 h MÁX	Pd 24 h MÁX REGISTRADO	
	Invernal (mm)	Mes (mm)	
	PEARSON III	Junio (24/06 11:38 h)	Agosto (21/08 09:38 h)
2	131,1		
5	167,0		
10	188,0		
20	206,4		
50	228,4		
100	243,8		
200	258,4		249,0
500	276,8		
1000	290,2		
5000	319,8	319,1	
10000	332,1		

En la tabla 5 se observa que la probabilidad de que ocurra un evento de precipitaciones similar al de junio es de entre 1000 y 5000 años, mientras que para el evento de agosto es de entre 100 y 200 años. Por lo tanto, anticipar eventos climáticos de esta magnitud, y especialmente prever la ocurrencia de un evento similar dos meses después de otro, implica grandes dificultades para la operación.

6.5. Simulaciones

El propósito de generar estas simulaciones es determinar si el Embalse Bullileo habría tenido oportunidad de regular las crecidas. Cada simulación fue realizada bajo condiciones únicas en términos de capacidad y manejo de caudales en el embalse. Se analizaron escenarios que incluyen un vaciamiento gradual antes de las crecidas, acción simultánea de las válvulas a caudales medios y/o con el máximo potencial de acción de $9 \text{ m}^3/\text{s}$, y distintos momentos de acción de estas, así como combinaciones entre estas variables. El detalle de cada uno de los escenarios se muestra en el apartado de anexos. Es necesario mencionar la premisa utilizada para determinar una evacuación regulada. En este caso, se considera una evacuación regulada cuando la liberación de las aguas sucede solo a través de las válvulas. Si ocurre a través el vertedero, se considera no regulada.

6.5.1. Escenarios de manejo durante el evento de junio

Para el evento de junio se hicieron 7 simulaciones en total, dentro de las cuales solo una destacó como la opción más efectiva para regular la crecida hasta cierto punto. Esta simulación corresponde a S5.

La simulación S5 propone la apertura de válvulas a partir del 1 de junio a un caudal constante de 12 m³/s hasta vaciar el embalse. Luego, sugiere la apertura completa de válvulas el 22 de junio, lo que habría permitido regular la crecida el mayor tiempo posible. Ahora bien, no se habría evitado el funcionamiento del vertedero, el cual habría alcanzado un caudal máximo de evacuación de 191 m³/s el 26 de junio. Por tanto, a pesar de estar bajo las mejores condiciones de operación, no se habría regulado la crecida en su totalidad.

6.5.1.1. Factibilidad de la simulación S5

La decisión de comenzar a vaciar el embalse el 1 de junio (propuesta de S5) carece de fundamento porque para ese entonces no se preveían precipitaciones de tal magnitud. Esta decisión habría contradicho el principal propósito del embalse de almacenar agua para la temporada estival, sobre todo considerando la poca cantidad de agua que tenía el embalse en esa fecha. A su vez, habría tenido un impacto significativo en la temporada de riego y se habría opuesto al programa de distribución de aguas definido por el directorio. Por último, S5 requiere el uso completo de válvulas, lo que queda descartado debido a las limitaciones mencionadas en el apartado 5.4.4.

6.5.2. Escenarios de manejo durante el evento de agosto

Para el evento de agosto se hicieron otras 7 simulaciones, de las cuales se presentan aquellas que consideran el mínimo funcionamiento de válvulas.

S4 propone haber mantenido un caudal constante de $37,8 \text{ m}^3/\text{s}$ a partir del 1 de agosto. Esto habría hecho que el día 19 el embalse alcanzara un volumen de $3,8 \text{ hm}^3$, lo que habría permitido, hipotéticamente, contener toda el agua entrante dentro del periodo de estudio. Luego, sugiere accionar las válvulas con un caudal de $23,2 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta fin de mes, lo que, independiente de lo mencionado anteriormente, también habría permitido regular la crecida.

Por su parte, S5 propone haber mantenido un caudal de $32,7 \text{ m}^3/\text{s}$ durante todo el mes. Esto habría permitido amortiguar el 90% del caudal máximo de entrada, aproximadamente. A su vez, habría permitido regular la crecida en su totalidad.

6.5.2.1. Factibilidad de las simulaciones S4 y S5

Durante el periodo señalado para S4 en el apartado anterior, habría sido necesario como mínimo el funcionamiento de 4 válvulas a $9 \text{ m}^3/\text{s}$. Luego se habría requerido el uso de 2 válvulas y media al máximo potencial de acción, o en su defecto, 3 válvulas a $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ cada una. Para la factibilidad de S5, habría sido necesario el funcionamiento de 3 válvulas y media completas, o en su defecto, haber accionado 4 válvulas a $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y una a $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Considerando las limitaciones operativas mencionadas en el apartado 5.4.4, ninguna de estas alternativas habría sido viable. Además, ambos escenarios

consideran vaciar el embalse presuponiendo la llegada de un segundo evento con la intensidad suficiente para volver a llenarlo, algo que se demostró ser impredecible en el apartado 6.4. Del mismo modo, y así como sucede en S5 para junio, esta acción se habría contrapuesto con el programa de distribución de aguas definido por el directorio

6.6. Análisis de la gestión

Como se observa en la Figura 7, durante el evento de junio el embalse alcanzó su fase de llenado en 1 a 2 días. Al relacionar este suceso con lo mencionado en el apartado 5.4.3, se afirma que este evento tuvo una magnitud tal que equivale a lo esperado en todo un año hidrológico. Ahora bien, debido a la poca cantidad de agua que tenía el embalse antes del inicio del evento de junio, este tuvo la capacidad de contener y amortiguar gran parte de la crecida, lo que se observa en la Figura 10 y se detalla en el apartado 6.2. Asimismo, las simulaciones de la Figura 10 indican que, incluso en el mejor escenario, no se habría regulado la crecida por completo. La magnitud del evento de junio imposibilitó mantener el margen de seguridad de 15 hm^3 . Por esta razón, se decidió vaciar el embalse gradualmente, registrando un volumen de 51 hm^3 a principios de agosto.

Ahora bien, esta decisión permitió regular la crecida en agosto durante 8 horas más en comparación con la alternativa hipotética de mantener las válvulas cerradas a principio de mes y abrirlas al inicio del evento, como se

describe en la Figura 14. Por lo tanto, esta decisión destaca como una gestión efectiva accidental.

Por otro lado, aunque las simulaciones de agosto sugieren dos escenarios en los que podría haberse regulado la crecida por completo, las limitaciones de operación y la posibilidad de comprometer el abastecimiento de agua para la temporada de riego descartan estas opciones.

7. CONCLUSIONES

De la tabla 2 se infiere que las variables climatológicas que influyeron en la intensidad de los ríos atmosféricos se combinaron de manera inusual. Este fenómeno desencadenó dos eventos climáticos atípicos que afectaron en mayor medida a la zona precordillerana de la Región del Maule, ocasionando que el Embalse Bullileo superara su capacidad máxima en ambos eventos. Las figuras 6 y 11 ilustran el caudal de los ríos en ese sector, evidenciado la magnitud de las precipitaciones en esos periodos. Esta información permitió caracterizar los eventos climáticos de este año.

El uso de los métodos mencionados en el apartado de metodología permitieron generar y validar un modelo de manejo de caudales en el Embalse Bullileo. Este modelo posibilitó la simulación de diversos escenarios diseñados para evaluar la capacidad del embalse de regular las crecidas. Las figuras 10 y 15 muestran los resultados al respecto, donde se observan los escenarios más eficientes para el control de las crecidas durante los eventos. En los anexos se proporciona el detalle de otros escenarios de manejo analizados.

La reunión con el administrador delegado proporcionó información sobre las limitaciones operativas y la gestión durante los eventos. Al comparar esta información con los resultados obtenidos, se aclaró la verdadera capacidad operativa de las válvulas. Por lo tanto, se descartaron los escenarios simulados más eficientes, ya que consideraban un caudal de válvulas que, en la realidad, no son factibles.

Cabe destacar que esta evaluación se hizo sin considerar la rehabilitación completa de las condiciones operativas de la sala de válvulas en su máxima capacidad de operación con 5 válvulas abiertas.

En conclusión, los eventos de junio y agosto representaron fenómenos climáticos sin precedentes para el embalse. Los resultados indican que, dadas las condiciones limitadas del embalse, la gestión llevada a cabo en la realidad se adaptó a las circunstancias, lo que permitió completar la fase de llenado y priorizar la seguridad del embalse. Aunque el embalse no está diseñado para regular crecidas, la gestión accidental en el evento de agosto mencionado anteriormente logró hacerlo durante un tiempo considerable.

Este trabajo posibilitó hacer un análisis objetivo del comportamiento del Embalse Bullileo durante las crecidas invernales de junio y agosto de 2023, evidenciando una gestión adecuada según el propósito del embalse y sus limitaciones.

8. LITERATURA CITADA

Al-Ansari, N. (2023). Libya dam collapse: engineering expert raises questions about management [en línea]. <<https://theconversation.com/libya-dam-collapse-engineering-expert-raises-questions-about-management-213546>>. [Consulta: 19 de diciembre de 2023].

Antartic Generacion S.A. (2012). *Capítulo N°2 Estudio de Línea Base. Central Hidroeléctrica Embalse Bullileo* [en línea]. Estudio de Impacto Ambiental. Obtenido de <https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=7275105>

Arumí, J. L., Delgado, V., Stehr, A., Sandoval, M. I., & Urrutia, R. (2020). Los embalses y su gestión sustentable bajo el escenario de escasez hídrica [en línea]. Serie Comunicacional N°13. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería. Obtenido de <https://www.crhiam.cl/publicaciones/series-comunicacionales/page/5/>

Assessment Capacities Project (ACAPS, 2023). Update on the impact of Storm Daniel in Derna district. Thematic report [en línea]. <<https://reliefweb.int/report/libya/acaps-thematic-report-libya-update-impact-storm-daniel-derna-district-15-september-2023>>. [Consulta: 19 de diciembre de 2023].

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN, s.f.). Mapas Vectoriales [en línea]. https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales/index_html

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2, 2018). Explorador de Cuencas (Camels-CL) [en línea]. <https://camels.cr2.cl/>

Dirección General de Aguas (DGA, 2023a). Informe Hidrometeorológico Semanal, 27 de junio de 2023 [en línea]. Obtenido de <https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Paginas/default.aspx>

Dirección General de Aguas (DGA, 2023b). Informe Hidrometeorológico Semanal, 21 de agosto de 2023 [en línea]. Obtenido de <https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Paginas/default.aspx>

Dirección General de Aguas (DGA, s.f.). Sistema Hidrométrico en Línea. Datos de Estaciones. <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/hidrolineasatel.aspx>

Garreaud, R. (2023a). Análisis (CR)2 | Vuelven los gigantes: un análisis preliminar de la tormenta ocurrida entre el 21 y 26 de junio de 2023 en Chile Central [en línea]. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-vuelven-los-gigantes-un-analisis-preliminar-de-la-tormenta-ocurrida-entre-el-21-y-26-de-junio-de-2023-en-chile-central/>. [Consulta: 12 de septiembre de 2023].

Garreaud, R. (2023b). *Análisis CR2 | Vuelve Aculeo... ¿se va la Megasequía?* [en línea]. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-vuelve-aculeo-se-va-la-megasequia/>. [Consulta: 27 de septiembre de 2023].

Hernández, M. A., & Naudon, C. (2010a). Ley 20.304 sobre operación de embalses frente a alertas y Emergencias de crecidas y otras medidas que indica: definición de embalse Colbún como Embalse de Control [en línea]. División de Estudios y Planificación. Catálogo Documental DGA. Obtenido de

<https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/5>

Hernández, M. A., & Naudon, C. (2010b). *Ley 20.304 sobre operación de embalses frente a alertas y Emergencias de crecidas y otras medidas que indica: definición de embalse Ralco como Embalse de Control* [en línea]. División de Estudios y Planificación. Catálogo Documental DGA. Obtenido de

<https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/5>

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M (2014). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill. pp. 404-410.

Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE, s.f.). Información Territorial [en línea]. Obtenido de <https://www.ide.cl/index.php/informacion-territorial/descargar-informacion-territorial>

Ley N° 20.304 art. 3, diciembre 13, 2008, Diario Oficial [D.O] (Chile). Obtenido de <http://www.bcn.cl>

Newell, R. E., Newell, N. E., Zhu, Y., & Scott, C. (1992). Tropospheric rivers? – A pilot study. *Geophysical Research Letters*, 19(24), 2401-2404. <https://doi.org/10.1029/92GL02916>

Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED, junio de 2023). *Monitoreo por evento meteorológico entre las regiones de Valparaíso y La Araucanía* [en línea]. <<https://senapred.cl/monitoreo-por-evento-meteorologico-entre-las-regiones-de-valparaiso-y-la-araucaania/>>. [Consulta: 29 de septiembre de 2023].

Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED, agosto de 2023). *Monitoreo por evento meteorológico entre las regiones de Valparaíso y Biobío* [en línea]. <<https://senapred.cl/monitoreo-por-evento-meteorologico-entre-las-regiones-de-valparaiso-y-biobio/>>. [Consulta: 27 de septiembre de 2023].

Vicencio, J. (2023). *Potente río atmosférico desencadena históricas lluvias e inundaciones en Chile Central luego de 12 años de megasequía* [en línea]. <<https://josevicenciov.wordpress.com/>>. [Consulta: 7 de septiembre de 2023].

Visualizador Meteorológico (VisMet, 2023). Datos observados de lluvia del CR2-U de Chile [en línea]. Obtenido de <http://vismet.cr2.cl>

Voiland, A. (2023). *Atmospheric Rivers Swamp Central Chile* [en línea]. NASA Earth Observatory. <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/151783/atmospheric-rivers-swamp-central-chile>>. [Consulta: 26 de septiembre de 2023].

9. ANEXOS

Tabla A1. Detalle numérico de los escenarios simulados dentro del periodo de estudio de junio.

Simulaciones 22/06 17:59 h – 25/06 23:59 h							
Cantidad de agua entrante						74.569.693 m ³	
Caudal máximo entrada (dd/mm hh:mm)						416,2 m ³ /s (24/06 21:59 h)	
	1	2	3	4	5	6	7
Volumen final (m ³)	63.663.175	63.723.745	63.400.825	63.697.051	62.166.367	62.700.919	63.730.250
Caudal válvulas (m ³ /s) (dd/mm hh:mm)	15,6 (22/06 17:59 h)	45 (24/06 07:59 h)	45 (22/06 17:59 h)	12 (01/06 07:59 h)	12 (01/06 07:59 h)	45 (22/06 18:59 h - 20:59 h)	-
				15,6 (22/06 17:59 h)	45 (22/06 18:59 h)	45 (23/06 02:59 h)	
Carga máxima (m) (dd/mm hh:mm)	2,66 (25/06 16:59 h)	2,44 (25/06 14:59 h)	2,44 (25/06 14:59 h)	2,37 (25/06 20:59 h)	1,74 (26/06 04:59 h)	1,78 (26/06 03:59 h)	2,54 (25/06 18:59 h)
Caudal máximo salida (m ³ /s) (dd/mm hh:mm)	386,0 (25/06 16:59 h)	374,7 (25/06 14:59 h)	374,7 (25/06 14:59 h)	330,5 (25/06 20:59 h)	236,0 (26/06 04:59 h)	244,2 (26/06 03:59 h)	345,4 (25/06 18:59 h)

Tabla A2. Detalle numérico de los escenarios simulados dentro del periodo de estudio de agosto.

Simulaciones 19/08 07:59 h – 22/08 23:59 h							
Cantidad de agua entrante				56.011.932 m ³			
Caudal máximo entrada (dd/mm hh:mm)				315,1 m ³ /s (21/08 04:59 h)			
	1	2	3	4	5	6	7
Volumen final (m ³)	62.335.116	63.094.140	62.009.352	52.474.752	55.686.312	56.677.432	51.606.472
Caudal válvulas (m ³ /s) (dd/mm hh:mm)	15,0 (19/08 07:59 h)	16,0 (01/08 07:59 h)	45,0 (19/08 07:59 h)	37,8 (01/08 07:59 h) 23,2 (19/08 08:59 h)	32,7 (01/08 07:59 h)	-	16,0 (19/08 08:59 h)
Carga máxima (m) (dd/mm hh:mm)	2,33 (21/08 04:59 h)	2,15 (21/08 10:59 h)	2,19 (21/08 04:59 h)	-	-	0,84 (24/08 01:59 h)	0,29 (30/08 12:59 h)
Caudal máximo salida (m ³ /s) (dd/mm hh:mm)	321,5 (21/08 04:59 h)	284,4 (21/08 10:59 h)	321,9 (21/08 04:59 h)	23,2 (19/08 08:59 h)	32,7 (01/08 07:59 h)	62,0 (24/08 01:59 h)	27,7 (30/08 12:59 h)

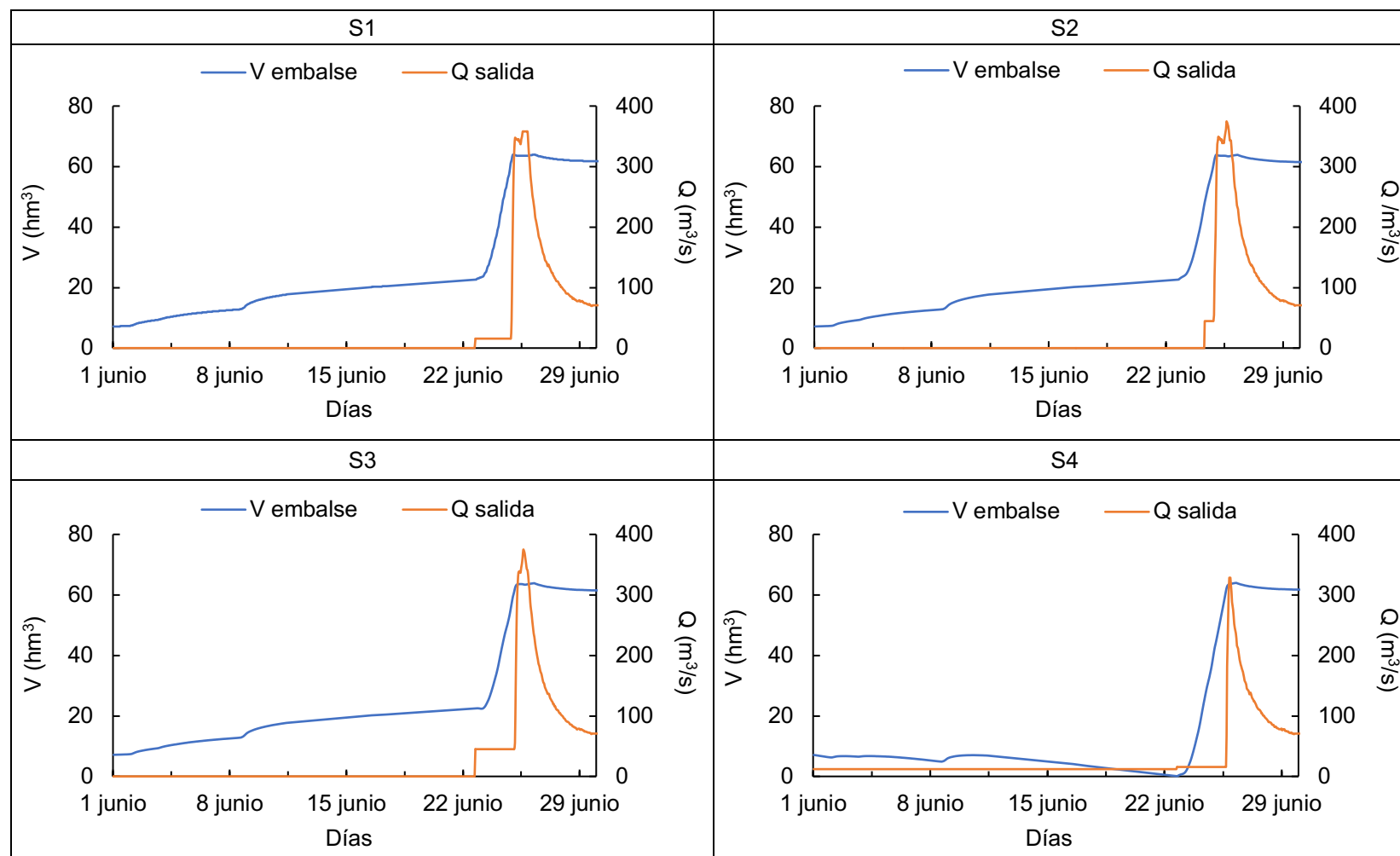


Figura A1. Volumen del embalse y caudales de salida de las simulaciones 1, 2, 3 y 4 para el evento de junio.

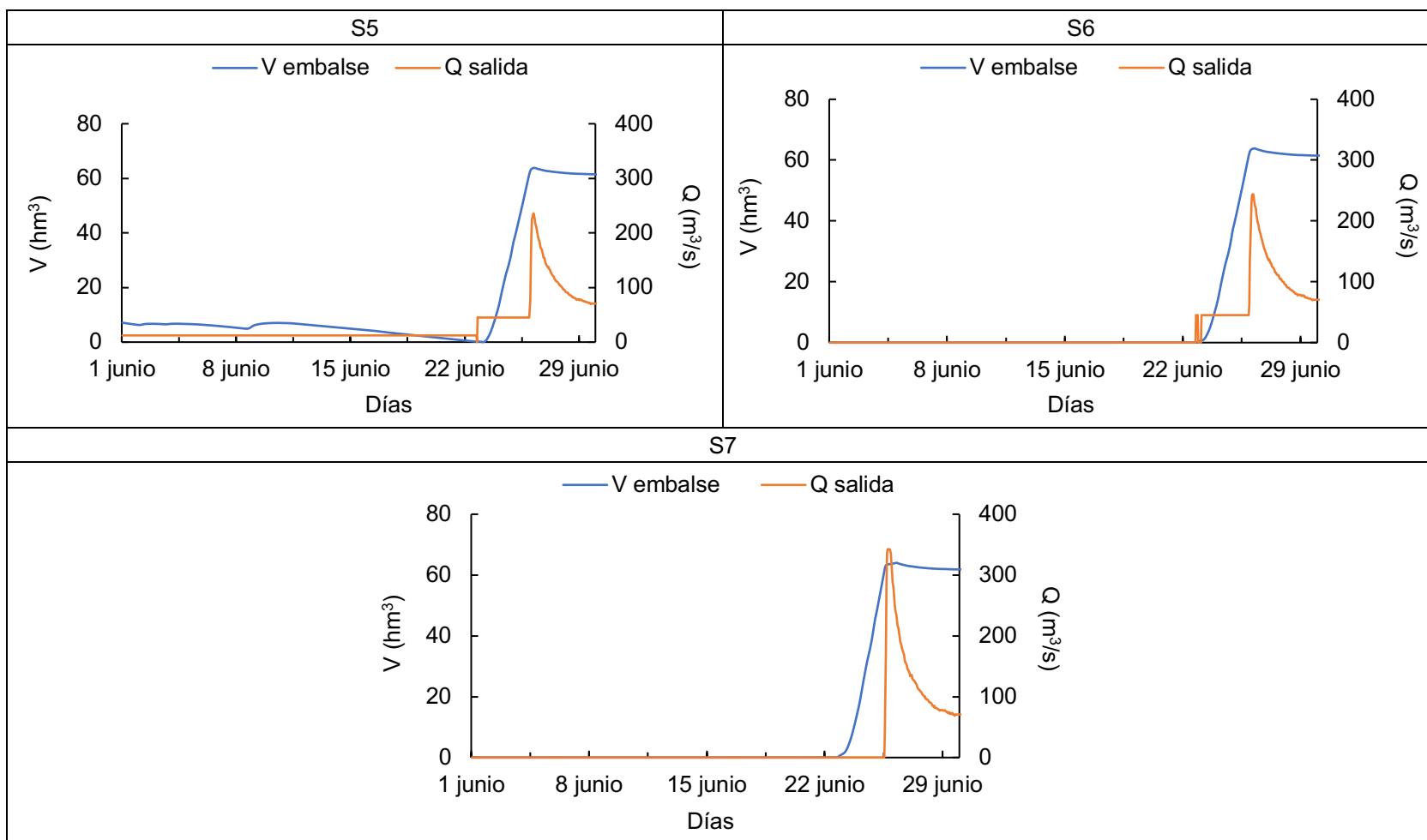


Figura A2. Volumen del embalse y caudales de salida de las simulaciones 5, 6 y 7 para el evento de junio.

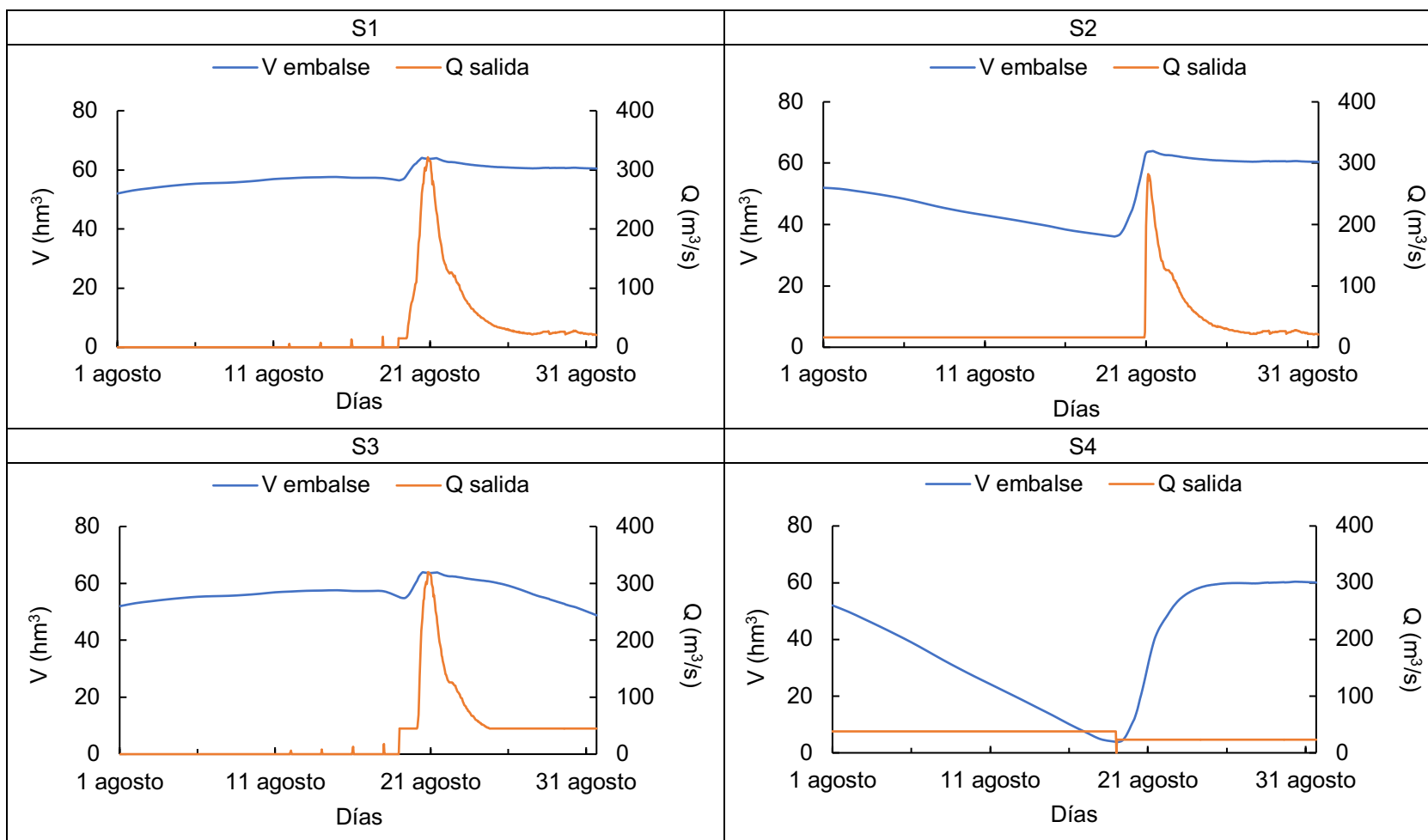


Figura A3. Volumen de embalse y caudales de salida de las simulaciones 1, 2, 3 y 4 para el evento de agosto.

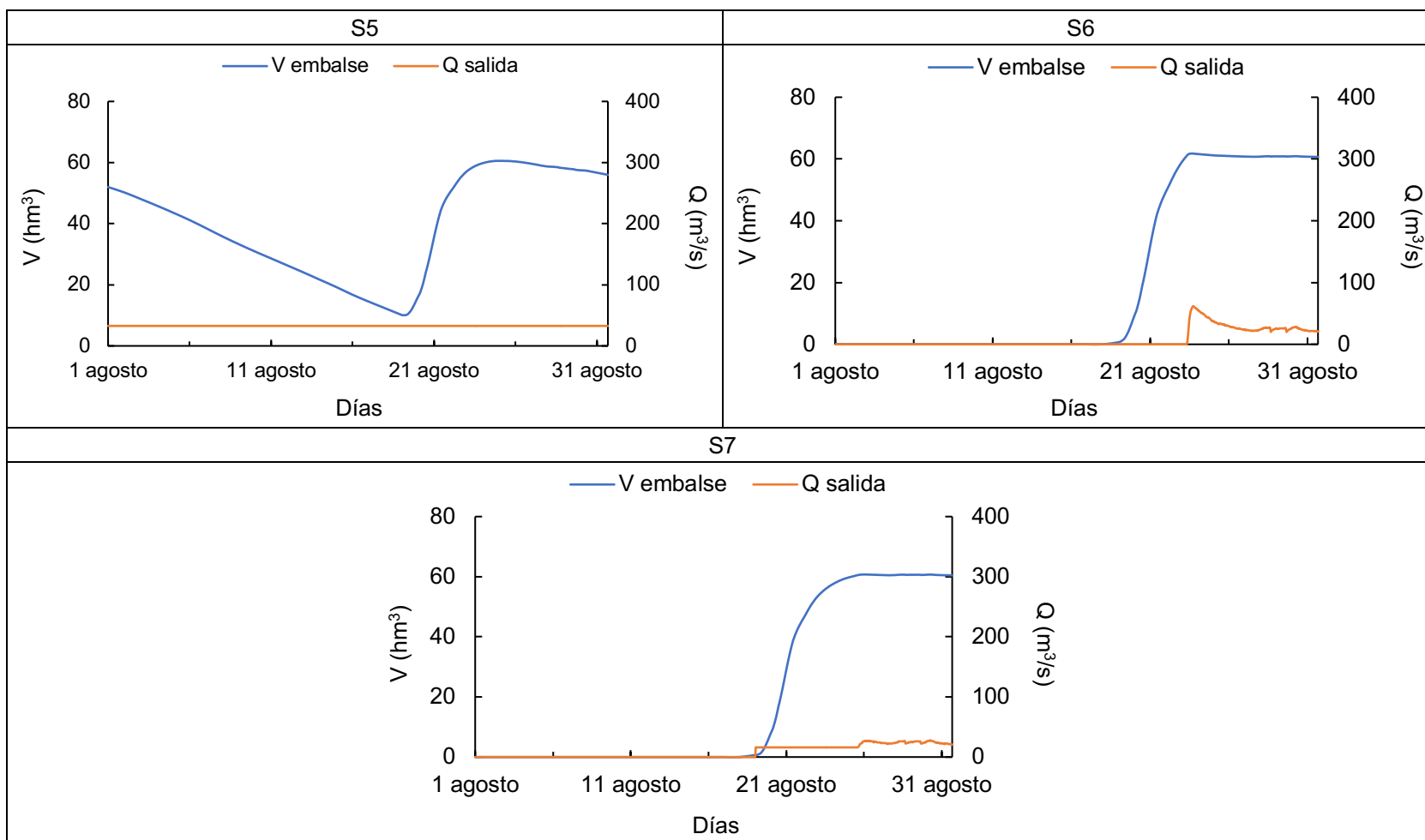


Figura A4. Volumen de embalse y caudales de salida de las simulaciones 5, 6 y 7 para el evento de agosto.

Pauta conversacional para abordar la tesis:

“Análisis de la respuesta del Embalse Bullileo ante las crecidas invernales de junio y agosto de 2023”

Fecha: 21/12

Lugar: Calle dieciocho, 580, Parral

Hora inicio: 9:59 h

Hora término: 10:32 h

Interlocutor 1: Gonzalo Espíndola Elgueta

Interlocutor 2: Juvenal Correa Rubio

Introducción

Se busca obtener perspectivas técnicas, experiencias y opiniones adicionales respecto de la gestión operativa durante los eventos climáticos de junio y agosto de 2023 en el Embalse Bullileo.

Temáticas	
Información introductoria	Nombre, ocupación ✓
Calidad del experto	Tiempo de ocupación, labor específica, equipo de trabajo, aprendizaje ✓
Características del embalse	Funcionalidad, condiciones, factibilidad, limitaciones ✓
Condiciones climáticas	Antecedentes climáticos, pronóstico del clima, influencia del pronóstico ✓
Gestión operacional	Apreciaciones, comunicación interna, dificultades operativas ✓

Observaciones
<p>En año normal, embalse lleno 20/09, ideal Colchón de seguridad 15 km^3 → Equivalen a 200 mm Hay que sellar infiltraciones todos los años Caudal máx. válvulas: 7500 L/s. Máx. 4 porque desmontan tuberías Cuidado de la cubierta En junio se llenó en 1 día y medio Agosto fue más difícil. El agua se entraba esa igual se salía • Se hizo lo que se tuvo al alcance</p>

Figura A5. Pauta conversacional y observaciones de la reunión.