



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS OPERACIONAL DEL USO DE AGUA PARA  
GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SRDJAN IAN KALDI FELDMAN

PROFESOR GUÍA:

MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

PILAR BARRÍA SANDOVAL

MARIA JULIA WIENER

SANTIAGO DE CHILE

2021

## CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS OPERACIONAL DEL USO DE AGUA PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO.

Todo sistema eléctrico sujeto a demandas variables de potencia eléctrica requiere contar con centrales de generación capaces de responder rápidamente a las fluctuaciones, en momentos de mayor consumo (horas “punta”). Las Centrales Hidroeléctricas (CHs) son una alternativa práctica y económica, contando con equipos generadores que presentan tasas de aumento de generación de cientos de MW por minuto, por lo que responden rápida y eficazmente a las solicitudes. Las CHs, a partir de esta condición, tienen el potencial de inducir en los cauces naturales intervenidos, alteraciones con respecto a su régimen natural a través de fluctuaciones fuertes de caudal, conocidas como *hydropeaking*. En la primera sección del Río Maipo se ubican actualmente 5 CHs de pasada. El Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) no otorga directrices para estimar o registrar el fenómeno de *hydropeaking*.

Se proponen inspecciones y análisis estadísticos a las series históricas de potencia generada por las CHs. Se han identificado patrones de *hydropeaking* como lo son horarios preferenciales de generación durante el día y tasas fuertes de variación de potencias generada. El *hydropeaking* se encuentra vinculado con la estacionalidad, condicionado por los grandes caudales de verano.

La alteración hidrológica intradiaria es evaluada a través de tres indicadores aplicados a las series instantáneas de caudal registrados en estaciones fluviométricas comprometidas por las CHs Alfalfal y Guayacán. Se compara el periodo previo y posterior a la puesta en marcha de las CHs con el fin de identificar el rol de las operaciones de la CH en las variaciones de los indicadores. Se detecta a través del alza de los 3 indicadores, que los cauces son sensibles a las operaciones de las CHs.

El Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM) implementará próximamente 2 CHs de gran potencia en la zona de estudio. Las CHs se encontrarán en serie hidráulica, generando una alteración en múltiples subcuencas locales, considerando longitudes de conducción a través de túneles de decenas de kilómetros entre los puntos de captación y restitución. Se realiza un esquema topológico de la condición posterior a la puesta en marcha del PHAM, ocasionando una disminución sustancial del caudal en los sectores afectados.

## AGRADECIMIENTOS

*Two roads diverged in a yellow wood,  
And sorry I could not travel both  
And be one traveler, long I stood  
And looked down one as far as I could  
To where it bent in the undergrowth;*

*Then took the other, as just as fair,  
And having perhaps the better claim,  
Because it was grassy and wanted wear;  
Though as for that the passing there  
Had worn them really about the same,*

*And both that morning equally lay  
In leaves no step had trodden black.  
Oh, I kept the first for another day!  
Yet knowing how way leads on to way,  
I doubted if I should ever come back.*

*I shall be telling this with a sigh  
Somewhere ages and ages hence:  
Two roads diverged in a wood, and I—  
I took the one less traveled by,  
And that has made all the difference.*

R.F.

# TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	II
TABLA DE CONTENIDO.....	III
ÍNDICE DE TABLAS .....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
2 ANTECEDENTES .....	4
2.1 ZONA DE ESTUDIO: PRIMERA SECCIÓN DEL RÍO MAIPO.....	4
2.2 ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INTRADIARIA POR CHS.....	6
2.3 INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INTRADIARIA .....	8
2.4 PROYECTO HIDROELÉCTRICO ALTO MAIPO (PHAM) .....	10
3 OPERACION DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS .....	14
4 ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INTRADIARIA.....	22
4.1 ANÁLISIS DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA ASOCIADA A LAS CENTRALES ALFALFAL Y MAITENES .....	22
4.2 ANÁLISIS DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA ASOCIADA A LA CH GUAYACÁN	31
5 TOPOLOGÍA DEL SISTEMA .....	39
6 CONCLUSIONES.....	- 44 -
BIBLIOGRAFÍA .....	- 46 -

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1-1: CHs de pasada existentes en la cuenca del río Maipo .....	5
Tabla 2.4-1: Caudales de diseño ( $Q_d$ ) y caudales ecológicos ( $Q_e$ ) de bocatomas del PHAM. ....	13
Tabla 2.4-2: Caudales máximos y mínimos para tramos de conducción del PHAM .....	13
Tabla 2.4-3: Caudales ecológicos de cauces intervenidos por PHAM .....	13

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1-1: Evolución temporal del volumen en el embalse La Paloma, nivel freático en el pozo de observación Alfalfares, altura de la línea de nieve de enero en la cordillera de Santiago y caudal en la estación Río Maipo en el Manzano ((CR)2, 2015). .....	2
Figura 2.1-1: Mapa de zona de estudio. ....	5
Figura 2.1-2: Ubicación de CHs contempladas en el estudio. ....	6
Figura 2.2-1: Esquema central hidroeléctrica de pasada. ....	7
Figura 2.2-2: Esquema de operación tipo hydropeaking. ....	8
Figura 2.4-1: Ubicación de obras principales en PHAM (AES GENER, 2008) .....	12
Figura 2.4-2: Serie temporal de potencia generada por CHs. ....	14
Figura 2.4-3: Boxplot de potencias generadas por CHs separados por temporada. ....	14
Figura 2.4-4: Boxplot de potencia generada por CHs por año de operación. ....	15
Figura 2.4-5: Serie temporal de potencia generada para las CHs. a) CH Alfalfal, b) CH Guayacán, c) Maitenes, d) CH Queltehues, e) CH Volcán. ....	16
Figura 2.4-6: Ejemplos de <i>hydropeaking</i> en series temporales a) CH Alfalfal 23-02-2015 a 27-02-2015, b) CH Guayacán 06-03-2020 a 10-03-2020, c) CH Maitenes 20-12-2015 a 24-12-2015, d) CH Queltehues 13-11-2016 a 17-11-2016, e) CH Volcán 10-03-2020 a 14-03-2020. ....	17
Figura 2.4-7: Estadísticos horarios de operación a) CH Alfalfal, b) CH Guayacán, c) CH Maitenes, d) CH Queltehues, e) CH Volcán .....	19
Figura 2.4-8: Frecuencia acumulada de potencia generada a) CH Alfalfal, b) CH Guayacán, c) CH Maitenes, d) CH Queltehues, e) CH Volcán. ....	21
Figura 4.1-1: Ubicación de estación fluviométrica "Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo". ....	23
Figura 4.1-2: Serie de caudales horarios en estación fluviométrica "Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo" .....	23
Figura 4.1-3: Boxplot de caudales registrados según año y temporada en "Río Colorado Antes de Junta Con Río Maipo" .....	24
Figura 4.1-4: Boxplot de cantidad de registros diarios de caudal en estación fluviométrica "Río Colorado Antes de Junta Con Río Maipo". ....	25
Figura 4.1-5: Boxplot de indicador Richard-Baker en "Río Colorado Antes de Junta Con Río Maipo". ....	26
Figura 4.1-6: Curvas de duración de indicador Richard-Baker en "Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo". (A) periodo de registro 1980-2020; (B) periodo de registro 1980-2003. ....	27
Figura 4.1-7: Boxplot de indicador PTF en "Río Colorado Antes de Junta Con Río Maipo" .....	28
Figura 4.1-8: Curvas de duración de indicador PTF en "Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo". (A) periodo de registro 1980-2020; (B) periodo de registro 1980-2003. ....	29
Figura 4.1-9: Boxplot de indicador CDV en "Río Colorado Antes de Junta Con Río Maipo" ....	30
Figura 4.1-10: Curvas de duración de indicador CDV en "Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo". (A) periodo de registro 1980-2020; (B) periodo de registro 1980-2003. ....	31
Figura 4.2-1: Ubicación de estación fluviométrica "Río Maipo en El Manzano". ....	32
Figura 4.2-2: Serie de caudales en estación fluviométrica "Río Maipo en El Manzano" .....	33
Figura 4.2-3: Boxplot de caudales registrados según año y temporada en "Río Maipo en El Manzano". ....	33

Figura 4.2-4: Boxplot de cantidad de registros diarios de caudal en estación fluviométrica “Río Maipo en El Manzano”.	33
Figura 4.2-5: Boxplot de indicador Richard-Baker en "Río Maipo en El Manzano".	34
Figura 4.2-6: Curvas de duración de indicador Richard-Baker en “Río Maipo en El Manzano”. (A) periodo de registro 1980-2020; (B) periodo de registro 2008-2013.	35
Figura 4.2-7: Boxplot de indicador PTF en "Río Maipo en El Manzano”.	36
Figura 4.2-8: Curvas de duración de indicador PTF en “Río Maipo en El Manzano”. (A) periodo de registro 1980-2020; (B) Periodo de Registro 2008-2013.	37
Figura 4.2-9: Boxplot de indicador CDV en “Río Maipo en El Manzano”.	37
Figura 4.2-10: Curvas de duración de indicador CDV en “Río Maipo en El Manzano”. (A) periodo de registro 1980-2020; (B) periodo de registro 2008-2013.	38
Figura 4.2-11: Ubicación de principales instalaciones con PHAM.	40
Figura 4.2-12: Topología de la zona de estudio sin PHAM.	41
Figura 4.2-13: Topología de la zona de estudio con PHAM	42

# 1 INTRODUCCIÓN

Las centrales hidroeléctricas (CHs) han suplido un 45,8% de la energía del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), en el período 2011-2021 (Coordinador eléctrico nacional, 2021). Las CHs son elementos que flexibilizan el SEN pues poseen una alta capacidad de respuesta ante oscilaciones en la demanda energética. Esta capacidad da origen a un régimen de operación variable que conlleva fluctuaciones importantes en los caudales turbinados a escala horaria. La restitución de los caudales turbinados es capaz de ocasionar efectos severos en los ecosistemas dependientes del cauce (Richter et al., 1997) así como sobre otros usos dispuestos aguas abajo (Genova, 2016; González, 2017). La naturaleza de los impactos de la hidroelectricidad depende del tipo de CH, distancia entre puntos de captación y restitución, esquema de operación, capacidad de almacenamiento, entre otros factores.

La cuenca del río Maipo en su primera sección es sustento de múltiples usos de agua. Los derechos de agua concedidos indican explícitamente los siguientes tipos de usos (DGA, 2021):

- Bebida, uso doméstico y saneamiento
- Energía hidroeléctrica
- Riego
- Uso industrial
- Uso medicinal
- Otros usos.

Los usuarios del agua presentan distintos regímenes de manejo y beneficios. La naturaleza y alcance de las interferencias ocasionadas entre usuarios depende de los esquemas de operación y la topología del sistema. En la cuenca del río Maipo, dichas interferencias no se encuentran precisadas con exactitud.

Es importante notar que la superposición de distintos usos se encuentra enmarcada además en un contexto de cambio climático, en el cual la sequía es un fenómeno cada vez más recurrente. En este sentido, las zonas norte y centro del país están actualmente siendo afectadas por una mega sequía, con un déficit de precipitaciones promedio de entre 20 a 40% de agua caída anual respecto del registro histórico (CEP, 2021). A su vez, este déficit de precipitaciones ha tenido impactos en la disponibilidad de los recursos hídricos ((CR)2, 2015). En la Figura 1.1-1 es posible evidenciar la tendencia a la baja del recurso hídrico en la Región Metropolitana.

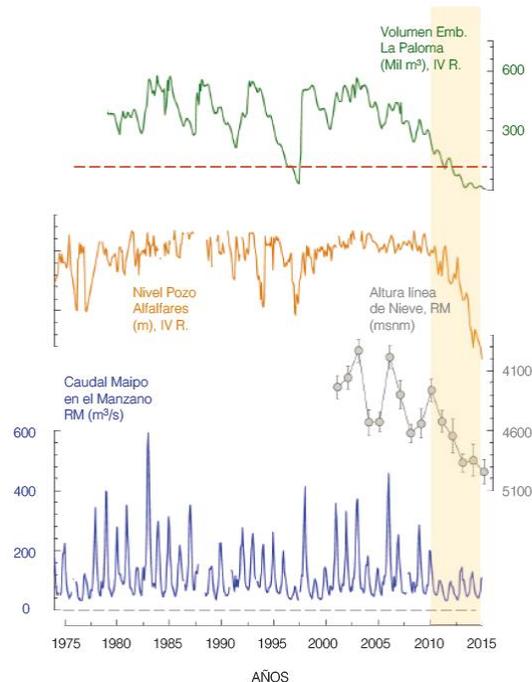


Figura 1.1-1: Evolución temporal del volumen en el embalse La Paloma, nivel freático en el pozo de observación Alfalfares, altura de la línea de nieve de enero en la cordillera de Santiago y caudal en la estación Río Maipo en el Manzano ((CR)2, 2015).

Existe una disminución en la disponibilidad del recurso hídrico, de acuerdo a lo propuesto por la Dirección General de Aguas desde el 10 de septiembre de 2019, donde se ha decretado la primera sección del río Maipo como zona de escasez hídrica (DGA, 2021).

Actualmente la cuenca del río Maipo en el sector cordillerano, contiene 5 centrales hidroeléctricas (CH) de pasada: Alfalfal, Maitenes, Volcán y Queltehues, operados por la empresa AES Gener y la central Guayacán, operada por Energía Coyoanco. AES Gener se encuentra avanzando en el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), el cual añade 2 centrales hidroeléctricas al sistema, triplicando la potencia instalada y adicionando 74,6 kilómetros de túneles (AES GENER, 2008). La literatura internacional permite sustentar preocupaciones sobre el nivel de afectación vinculada a la puesta en marcha del PHAM, considerando la capacidad de almacenamiento, potencia instalada y distancia entra captaciones y restituciones, los cuales son aspectos determinantes en el grado de irrupción (Kuriqi et al., 2021).

La ley N° 20.417 promulgada el 12 de enero de 2010 establece que proyectos o actividades determinados, deben de realizar de un estudio de impacto ambiental (EIA) con el fin de identificar, evaluar y describir el impacto que vinculado a la construcción y operación de dicho proyecto o actividad. Dentro de la categoría indicada se encuentran las centrales hidroeléctricas con capacidad de generación de energía superior a los 3 MW. Debido a que las CH existentes, exceptuando la CH Guayacán, fueron construidas antes de la promulgación de dicha ley, no existen EIA asociados.

Dentro de la pauta detallada para la realización de un EIA no se encuentra explicitado el análisis de la interrupción intradiaria ocasionada por la central hidroeléctrica de pasada. El fenómeno de *hydropeaking* corresponde a las fluctuaciones intradiarias de caudal ocasionadas a la operación de una central hidroeléctrica (SEIA, 2021). El *hydropeaking* se ve acentuado en la medida que energías de naturaleza fluctuante se incorporan a el sistema eléctrico coordinado (Hans et al., 2015; Kern et al., 2014)

En un sistema dónde las CHs no se encuentran correctamente documentadas a través de un EIA, agobiado por la escasez hídrica y múltiples usuarios del recurso, resulta imperante la realización de un diagnostico al escenario actual, así como una aproximación a las incidencias que pueden ser ocasionadas por la inminente entrada en operación de un proyecto hidroeléctrico que busca aumentar sustancialmente la capacidad de generación hidroeléctrica de la cuenca.

## **1.1 OBJETIVOS.**

### **General**

Contribuir al análisis de la interferencia operacional entre centrales hidroeléctricas, existentes y proyectadas, y otros usos del agua en la primera sección río Maipo.

### **Específicos**

El trabajo de título contempla los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar los esquemas de la operación histórica de las centrales hidroeléctricas existentes a través de los registros disponibles de potencia generada.
2. Diagnosticar el grado y naturaleza de alteración hidrológica intradiaria en los cauces naturales y vincularla a la operación de las centrales hidroeléctricas.
3. Desarrollar un modelo conceptual expresado en un diagrama topológico del sistema incorporando el futuro Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo.

## **2 ANTECEDENTES**

En el presente capítulo se resume la revisión de antecedentes que permiten establecer un marco de análisis para el caso de estudio. La revisión se encuentra estructurada a través de temas, resumiendo los principales aspectos utilizados para la evaluación del caso de estudio del trabajo.

### **2.1 ZONA DE ESTUDIO: PRIMERA SECCIÓN DEL RÍO MAIPO**

La cuenca del río Maipo se encuentra situada en la zona central de Chile, siendo prácticamente coincidente en sus límites con la región Metropolitana de Santiago. La cuenca se origina en la cordillera de los Andes, desarrollándose hasta desembocar en el Océano Pacífico. La cuenca presenta un clima templado de tipo mediterráneo (DGA, 2004).

La cuenca se divide en 3 secciones legales (DGA, 2015). La zona de estudio corresponde a la primera sección de la cuenca del río Maipo, presentada en la Figura 2.1-1. La primera sección abarca desde el nacimiento del río Maipo en la cordillera de los Andes hasta el puente del ferrocarril Paine-Talagante (501 m.s.n.m.). El caudal hasta este punto considera los siguientes afluentes principales: los ríos Maipo, Yeso, Volcán, Colorado y Olivares, así como los esteros, Clarillo, Manzano, El Canelo, San José y Coyanco.

El artículo 6° del Código de Aguas define el derecho de aprovechamiento de aguas como “un derecho real que recae sobre las aguas y consiste en el uso y goce de ellas, con los requisitos y en conformidad a las reglas que prescribe este Código”. La Dirección General de Aguas, a través de los decretos N°105 del 10 de septiembre de 2019, N° 34 del 11 de marzo de 2020, N° 102 del 14 de septiembre de 2020 y N° 48 del 8 de marzo de 2021, ha establecido escasez hídrica para la primera sección del río Maipo, a través de un análisis de las series de precipitación y caudal superficial.

La Junta de Vigilancia de la Primera Sección del Río Maipo corresponde a una organización legal, privada, sin fines de lucro, que bajo las facultades que le otorga el Código de Aguas, administra y distribuye las aguas sobre las cuales tiene derechos (DGA; 2015). Además, explota las obras de aprovechamiento común, construyendo nuevas o mejorando las existentes en caso de ser necesario. Así, esta entidad vela por una adecuada convivencia entre sus asociados titulares, que tienen como rubros, entre otros, agricultura, generación hidroeléctrica, turismo, uso industrial, agroindustrial y habitacional, con el objeto de que los derechos de agua puedan ser ejercidos en su plenitud.

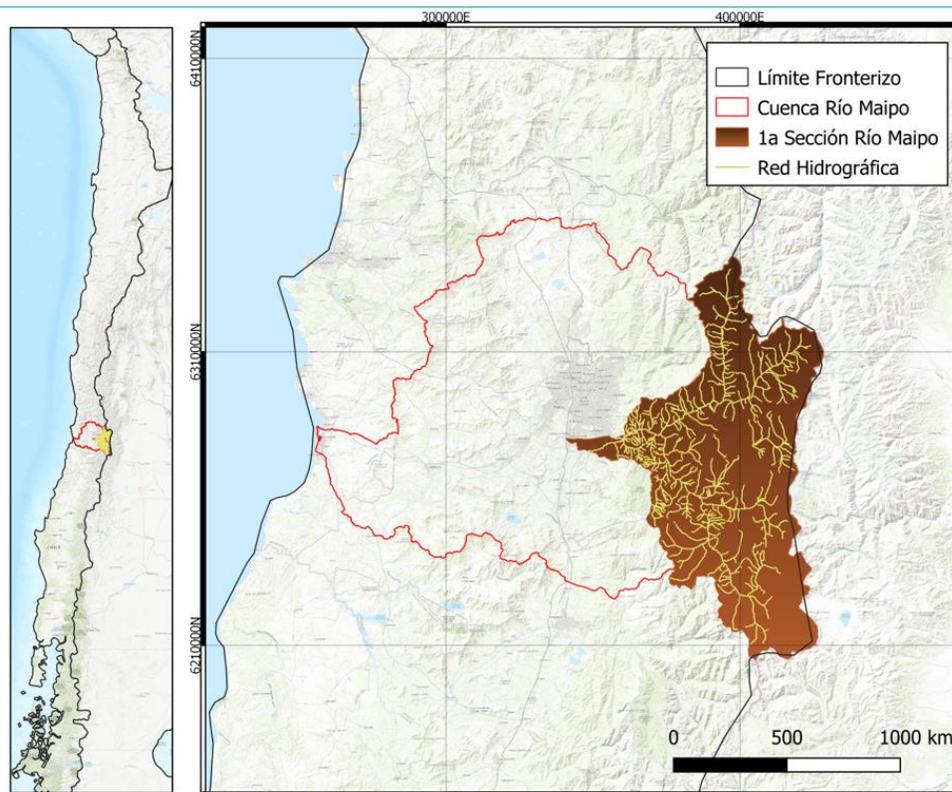


Figura 2.1-1: Mapa de zona de estudio.

En la primera sección del río Maipo se registran precipitaciones concentradas en los meses de invierno, y caudales máximos en época estival (DGA, 2015), ambos presentándose a la baja a causa de las sequías cada vez más recurrentes, como se presentó en la Figura 1.1 (CEPAL, 2012; (CR)2, 2015).

Por otra parte, las CHs con potencias instaladas sobre 3 MW, emplazadas en cauces naturales en la zona de estudio, se listan en la Tabla 2.1-1.

Tabla 2.1-1: CHs de pasada existentes en la cuenca del río Maipo

Nombre	Compañía	Inicio Operación	Capacidad (MW)
Alfalfal	AES Gener	1991	178
Guayacán	Energía Coyanco	2011	12
Maitenes	AES Gener	1923	31
Queltehues	AES Gener	1928	49
Volcán	AES Gener	1944	13

La Figura 2.1-2 presenta la ubicación de las CHs de la Tabla 2.1-1. Todas las CHs contempladas corresponden a centrales de pasada, con alguna capacidad de almacenamiento a escala intradiaria, esto es, que puede regular caudales en períodos inferiores a un día.

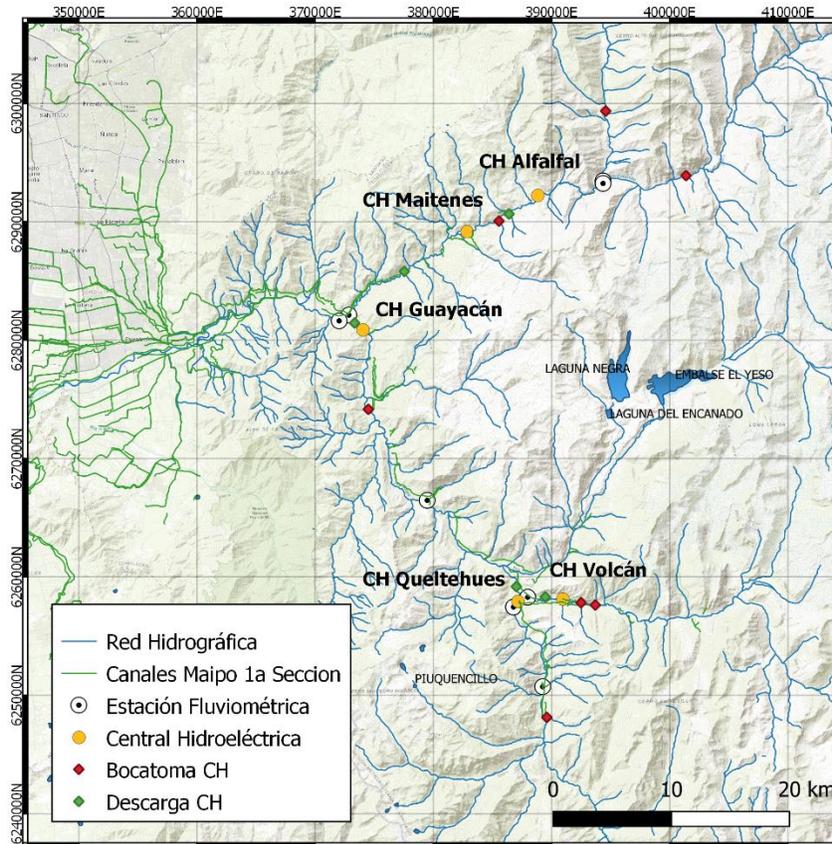


Figura 2.1-2: Ubicación de CHs contempladas en el estudio.

## 2.2 ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INTRADIARIA POR CHS

El régimen natural de los cuerpos de agua se encuentra caracterizado por patrones que incluyen los parámetros de caudal, temporalidad, duración, frecuencia y tasa de variación. Disrupciones en los parámetros anteriormente enunciados tienen un rol determinante en la integridad química, física y biológica, lo que significa una alteración hidrológica del cuerpo de agua (EPA, 2018).

La estructura y persistencia de los ecosistemas acuáticos se encuentran fuertemente vinculados a la variación tanto temporal como espacial de las condiciones ambientales (Poff and Ward, 1989; Stanford et al., 1996). Las variaciones de las condiciones ambientales se encuentran sujetas, dentro de diversos factores, a las intervenciones antropogénicas que alteran el régimen hidrológico.

Para cuantificar el grado de alteración de una acción antropogénica deben definirse parámetros representativos del estado de un aspecto a estudiar. Cuando hablamos de un cuerpo de agua superficial aparecen principalmente 2 familias de parámetros a estudiar: cantidad y calidad. Es a partir de la información disponible de mediciones de los parámetros anteriormente mencionados que se construyen metodologías capaces de identificar y graduar la alteración hidrológica.

La variabilidad en la operación de centrales hidroeléctricas se explica porque la electricidad, a diferencia de otras fuentes de energía, no puede ser almacenada al nivel de ser capaz de sustentar la demanda eléctrica, sino que esta debe ser igualada por la generación en cada momento. Dentro de la generación eléctrica, las CHs tienen la ventaja de ser flexibles, es decir, capaces de variar su generación eléctrica rápidamente, compensando los requerimientos de potencia eléctrica (Carvalho et al., 2011). Esta fuerte fluctuación en los caudales turbinados por la CH, llamada *hydropeaking*, conlleva alta variabilidad en los caudales restituidos al cauce de no contar con medidas apropiadas de mitigación.

Las CHs pueden ser clasificadas de diversas formas (SEIA, 2021), las cuales no son mutuamente excluyentes, a partir de parámetros característicos, entre ellos:

- Tamaño.
- Altura de caída, definiendo el tipo de turbina utilizada.
- Capacidad de almacenamiento (central de embalse o de pasada).
- Propósito (único o multipropósito).

Las CHs de pasada realizan extracciones de caudal en los puntos de captación y retornan el volumen total en el o los puntos de restitución definidos. Los caudales turbinados son conducidos y restituidos aguas abajo de los puntos de extracción a través de cauces artificiales en desmedro del cauce natural, ocasionando la disminución del caudal en el rango de afectación delimitado por los puntos de extracción y restitución, además de fluctuaciones en el punto de restitución y aguas abajo del mismo. La Figura 2.2-1 presenta un esquema general de una central hidroeléctrica de pasada.

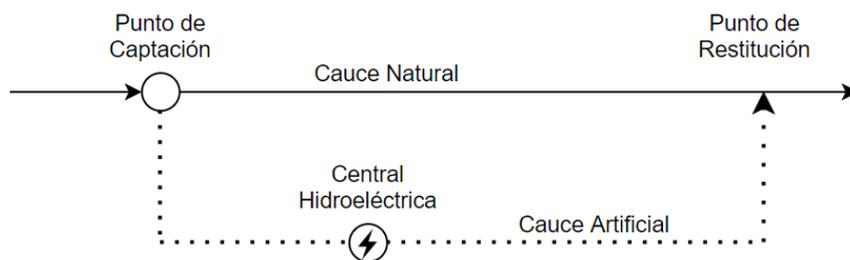


Figura 2.2-1: Esquema central hidroeléctrica de pasada.

El auge de las fuentes de energía renovables como las plantas eólicas y fotovoltaicas, condicionan aún más la operación de las centrales hidroeléctricas, debido a su naturaleza oscilante, requiriendo elementos que otorguen flexibilidad al sistema, con capacidad de respuesta rápida a la demanda eléctrica, así acrecentando la operación tipo *hydropeaking* (Olivares et al., 2015; Haas et al., 2015).

La Figura 2.2-2 presenta un esquema de operación tipo *hydropeaking* en bloques dentro de un día, típico de algunas CHs de pasada. El esquema se encuentra compuesto por períodos de operación en valle (bajos caudales turbinados y potencia eléctrica generada) seguidos súbitamente por una rampa de subida de potencia. La CH luego opera en punta (altos caudales turbinados y potencia eléctrica generada). La operación en punta se ve finalizada por una súbita rampa de bajada de potencia eléctrica generada.

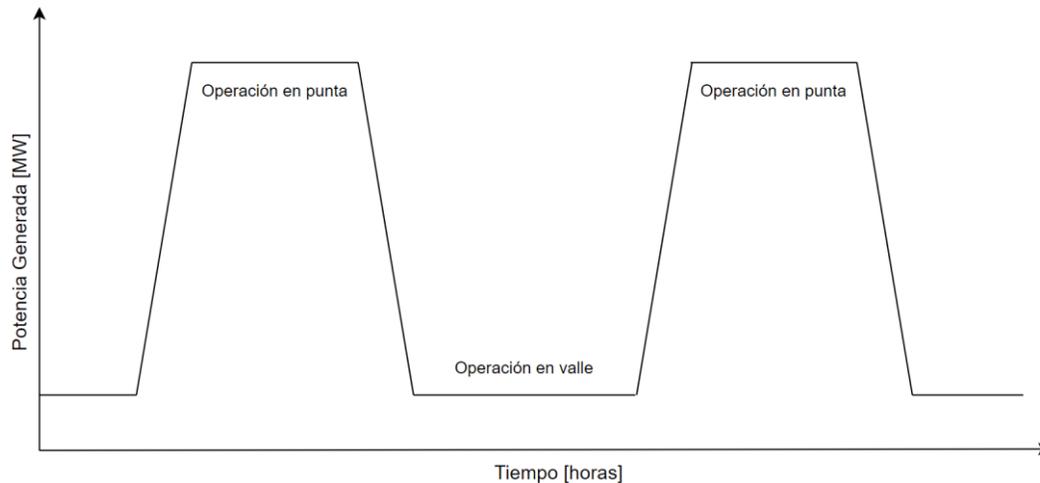


Figura 2.2-2: Esquema de operación tipo hydropeaking.

### 2.3 INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INTRADIARIA

La literatura ha propuesto indicadores que permiten cuantificar el grado de alteración hidrológica vinculado a la operación de una CH a partir del análisis estadístico de la serie de caudales horarios registrados. Se establece que el módulo de este tipo de indicadores se encuentra ligado proporcionalmente al grado de alteración hidrológica. A continuación se presentan los indicadores a utilizar en el diagnóstico de la alteración hidrológica intradiaria de la zona de estudio.

#### **Coefficiente de Variación (CDV):**

El indicador da cuenta de la fluctuación del caudal registrado, siendo comparable entre distintos sistemas debido a que es un valor adimensional. Se calcula como la desviación estándar de la serie de caudales en 24 horas, normalizando de acuerdo a la media. El CDV entrega una noción de la desviación de los caudales registrados en un día respecto a la media de dicho día.

$$CDV = \frac{\sigma_x}{|\bar{x}|} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_x$ : desviación estándar

$|\bar{x}|$ : módulo de la media

**Porcentaje Total de Flujo (PTF):**

Este indicador fue propuesto por Lundquist and Cayan (2002), y se determina de acuerdo a la ecuación 3. El PTF da cuenta, a través de un valor adimensional, del rango de caudales registrados en un día, normalizados por la magnitud de los caudales registrados. La hipótesis tras su uso responde a la sospecha de valores extremos de caudales registrados a causa de la operación de la CH.

$$PTF = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{\sum_{i=0}^{24} Q_i} \quad (2)$$

Donde:

$Q_{max}$ : caudal máximo registrado en un día

$Q_{min}$ : caudal mínimo registrado en un día

$|\bar{x}|$ : módulo de la media

$Q_i$ : caudal i-ésimo registrado en un día

**Índice de Richards y Baker (Richard-Baker Flashiness Index):**

Propuesto por Baker et al., (2004), este indicador da cuenta de la variación hora a hora del caudal registrado, analizando directamente las irrupciones intradiarias ocasionadas por la operación de una CH. Se calcula como la semisuma del módulo de las diferencias de un registro horario respecto a su registro precedente y subsecuente, para un período de 24 horas, normalizado por el promedio del registro.

$$RBF = \frac{\sum_{i=0}^{24} 0,5 * (|Q_i - Q_{i-1}| + |Q_i - Q_{i+1}|)}{\sum_{i=0}^{24} Q_i} \quad (3)$$

Donde:

$Q_i$ : caudal i-ésimo registrado en un día

## **2.4 PROYECTO HIDROELÉCTRICO ALTO MAIPO (PHAM)**

La presente sección se encuentra basada en la información disponible del proyecto en el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), correspondiente a la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (AES Gener, 2008).

El proyecto, impulsado por AES Gener, está ubicado en la comuna de San José de Maipo, Provincia de Cordillera, Región Metropolitana, en la zona de estudio del presente trabajo. Su objetivo es la generación de energía eléctrica mediante la construcción y operación de dos centrales de pasada en serie hidráulica, las que en conjunto generarán una potencia máxima de 531 MW para entregarla al sistema interconectado central (SIC), aumentando sustancialmente la potencia de generación hidroeléctrica instalada en la zona.

El Proyecto comprende la construcción de las CH Alfalfal II y Las Lajas, dispuestas en serie en el sector alto del Río Maipo. Considera el aprovechamiento de las aguas provenientes de la zona alta del Río Volcán, Río Yeso, de las aguas turbinas por la central Alfalfal y de la cuenca intermedia del Río Colorado.

La nueva central Alfalfal II se localizará en la subcuenca del río Colorado, aguas abajo de la actual Central Hidroeléctrica Alfalfal I, de propiedad de AES Gener, mientras que la segunda central Las Lajas se ubicará en la ribera sur del río Colorado, sector El Sauce. La central Alfalfal II aprovechará las aguas provenientes de la zona alta del río Volcán y del río Yeso, 700 m aguas abajo de la descarga del embalse, mientras que la Central Las Lajas aprovechará las aguas provenientes de las descargas de las centrales Alfalfal I y II, además de los aportes de la hoya intermedia del río Colorado y subcuenca del estero Aucayes. La Figura 2.4-1 corresponde a un mapa en planta donde se presenta la ubicación de las obras más importantes del PHAM.

La CH Alfalfal II tendrá un caudal de diseño de  $27 \text{ m}^3/\text{s}$ , recibiendo aguas captadas desde esteros ubicados en la parte alta del río Volcán y del río Yeso. Para la captación de las aguas en el sector alto del río Volcán, se contemplan 4 bocatomas las cuales interceptan los esteros la Engorda, Colina, Las Placas y El Morado, con lo cual se captará un caudal máximo de  $12,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este caudal será conducido hasta el túnel El Volcán mediante un ducto enterrado, el cual derivará las aguas hasta el valle del río Yeso, donde además se recibirá el aporte de la descarga del embalse a través de un ducto enterrado y un pozo de toma. Seguido de dicho pozo de toma el flujo será conducido a través de un ducto en presión, hasta el túnel de aducción de la central Alfalfal II.

La casa de máquinas de la CH Alfalfal II se instalará en una caverna excavada en el macizo rocoso. El equipamiento de generación considera dos turbinas Pelton de 136 MW de potencia nominal cada una. La descarga de la central se realizará mediante el túnel de aducción de la Central Las Lajas. El caudal generado por la central Alfalfal II puede direccionarse hacia la casa de máquinas de la Central Las Lajas, o bien, hacia la cámara de carga de esta última.

La CH Las Lajas, por otro lado, diseñada para un caudal de  $65 \text{ m}^3/\text{s}$ , recibirá las aguas generadas de las centrales Alfalfal y Alfalfal II, además de los aportes de la cuenca intermedia del río Colorado ubicada entre las bocatomas de la central Alfalfal (Colorado y Olivares) y la actual bocatoma de la central Maitenes y aportes de la quebrada Aucayes.

La central Las Lajas considera una cámara de carga, ubicada en la ribera derecha del río Colorado. Las aguas captadas en la bocatoma Maitenes serán conducidas por un canal ubicado en la ribera izquierda del río Colorado (ya existentes). El cruce desde esta bocatoma hacia la cámara de carga se realizará mediante un sifón bajo el río Colorado. Este sifón enlazará con el túnel Las Lajas.

El túnel Las Lajas recibirá el aporte proveniente del túnel de descarga de la central Alfalfal II; además, recibirá en su recorrido el aporte del estero Aucayes y terminará en un pique de presión que alimentará las turbinas. La altura bruta de caída será de 485 m.

La casa de máquinas estará ubicada en una caverna excavada en el macizo rocoso en la ribera izquierda del río Colorado. El equipamiento de generación contará con dos turbinas Pelton de 135 MW de potencia nominal cada una. El túnel de descarga de la Central Las Lajas descargará sus aguas directamente en el río Maipo, en el sector de Las Lajas.

El proyecto considera dos fases: fase de construcción y fase de operación. La fase de abandono no es contemplada en el desarrollo del proyecto. La etapa de construcción contempla la construcción de obras superficiales (incluyendo obras de captación, cámaras de carga, subestaciones eléctricas, conducciones y sifones) y la construcción de obras subterráneas, correspondiente a los túneles, piques, chimeneas de equilibrio y cavernas. Además, la etapa de construcción contempla el mejoramiento de caminos, y la habilitación de 5 campamentos y 7 instalaciones de faenas.

La operación de las centrales hidroeléctricas Alfalfal II y Las Lajas se inicia en las bocatomas donde se capta el agua que será conducida hasta la caverna de máquinas para la generación de energía eléctrica. Los caudales máximos utilizados por las centrales corresponden a los caudales de diseño, de  $27 \text{ m}^3/\text{s}$  en el caso del Alfalfal II y de  $65 \text{ m}^3/\text{s}$  en el caso de Las Lajas.

En la Tabla 2.4-1, Tabla 2.4-2 y Tabla 2.4-3 se presentan los caudales de diseño de las bocatomas, y los caudales máximos, medios y mínimos para las distintas obras de captación y conducción contempladas por el PHAM. Estos valores corresponden a restricciones sobre la operación del proyecto.

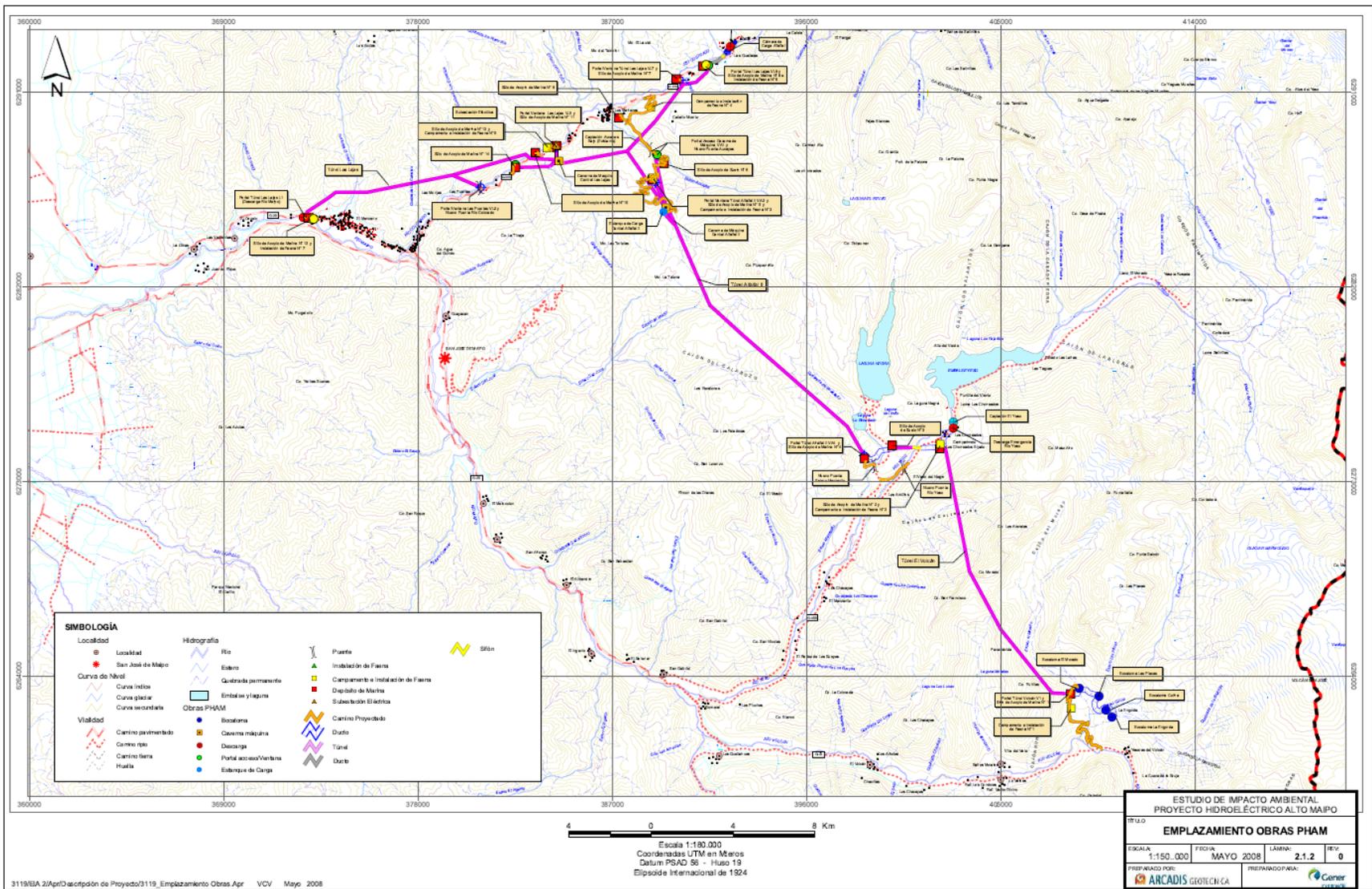


Figura 2.4-1: Ubicación de obras principales en PHAM (AES GENER, 2008)

Tabla 2.4-1: Caudales de diseño (Qd) y caudales ecológicos (Qe) de bocatomas del PHAM.

<b>Obra de Captación</b>	<b>Qd (m3/s)</b>	<b>Qe (m3/s)</b>
Bocatoma La Engorda	2,1	0,15
Bocatoma Colina	6	0,37
Bocatoma Las Placas	1	0,1
Bocatoma El Morado	3,7	0,44

Tabla 2.4-2: Caudales máximos y mínimos para tramos de conducción del PHAM

<b>Tramo</b>	<b>Caudal [m<sup>3</sup>/s]</b>		
	<b>Máximo</b>	<b>Medio</b>	<b>Mínimo</b>
Acueducto conexión Engorda - Colina	2,10	0,72	0,00
Acueducto Colina - Las Placas	8,10	3,01	0,31
Acueducto Las Placas - Morado	9,10	3,32	0,31
Acueducto Morado - Túnel Volcán	12,80	4,65	0,43
Túnel Volcán	12,80	4,65	0,43
Acueducto El Yeso - Pozo de toma	15,00	7,52	0,00
Tubería Pozo de toma - Túnel Alfalfal II	27,00	12,50	4,80
Túnel Alfalfal II	27,00	12,50	4,80
Ducto en presión Cámara de carga LL – Túnel Las Lajas	39,88	21,90	6,40
Canal Aucayes – Túnel Las Lajas	2,00	0,67	0,06
Túnel Las Lajas	65,00	35,17	10,51

Los caudales ecológicos, constantes durante todo el año, determinados para cada uno de los cauces, aguas abajo del punto de captación, se presentan en la Tabla 2.4-3. En el caso de que el seguimiento de las variables ambientales determine que el caudal ecológico no es capaz de satisfacer el real requerimiento del sistema acuático, entonces se activarán las medidas de mitigación, reparación y/o compensación. Si este plan de manejo no cumple con el objetivo de evitar una pérdida en la biodiversidad, el caudal ecológico deberá ser analizado para adoptar nuevas medidas.

Tabla 2.4-3: Caudales ecológicos de cauces intervenidos por PHAM

<b>Cauce</b>	<b>Qe [m3/s]</b>
Yeso	0,46
Colorado	0,66
Colina	0,37
Morado	0,17
Placas	0,10
Engorda	0,15
Central El Volcán	0,30

### 3 OPERACION DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Los datos de potencia generada por parte de las hidroeléctricas de pasada ubicadas en la parte alta de la cuenca del Río Maipo han sido extraídos del sitio web del Coordinador del Sistema Interconectado Central (SIC). Los datos son registrados de forma horaria y corresponden a la potencia real generada por la unidad generadora y transferida al SIC. Se han descargado datos de la operación de las 5 hidroeléctricas de pasada consideradas para el estudio (SIC, 2021).

La Figura 2.4-2 presenta la serie temporal de potencias generadas por cada una de las centrales contempladas en el presente estudio. El periodo de registro disponible comienza en enero de 1999. La Figura 2.4-3 presenta un boxplot diferenciando la serie temporal de potencias en la temporada estival o riego (octubre-marzo) e invernal o no riego (abril-septiembre).

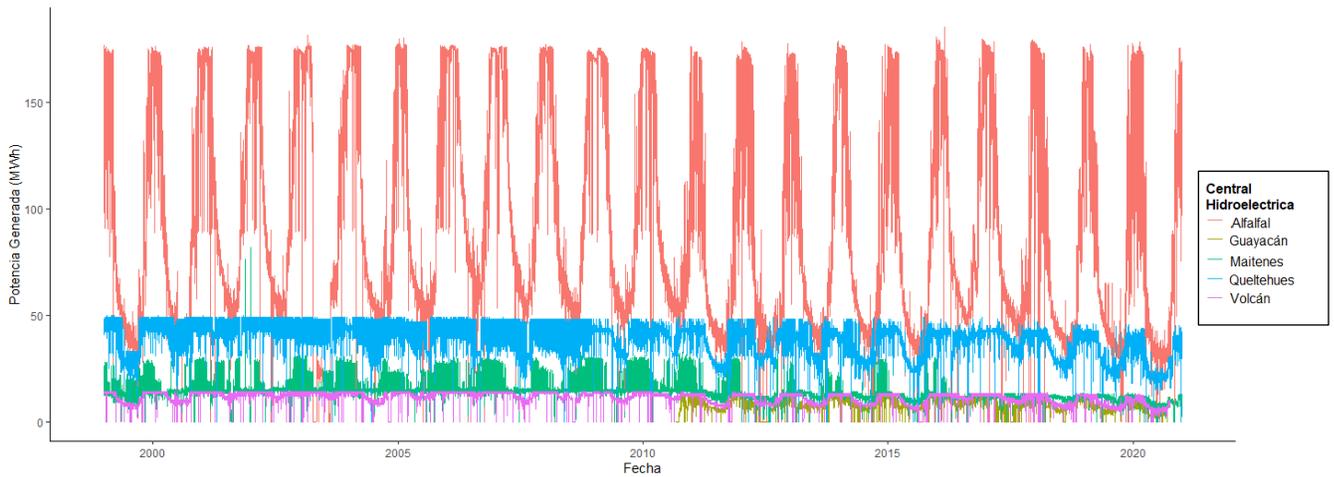


Figura 2.4-2: Serie temporal de potencia generada por CHs.

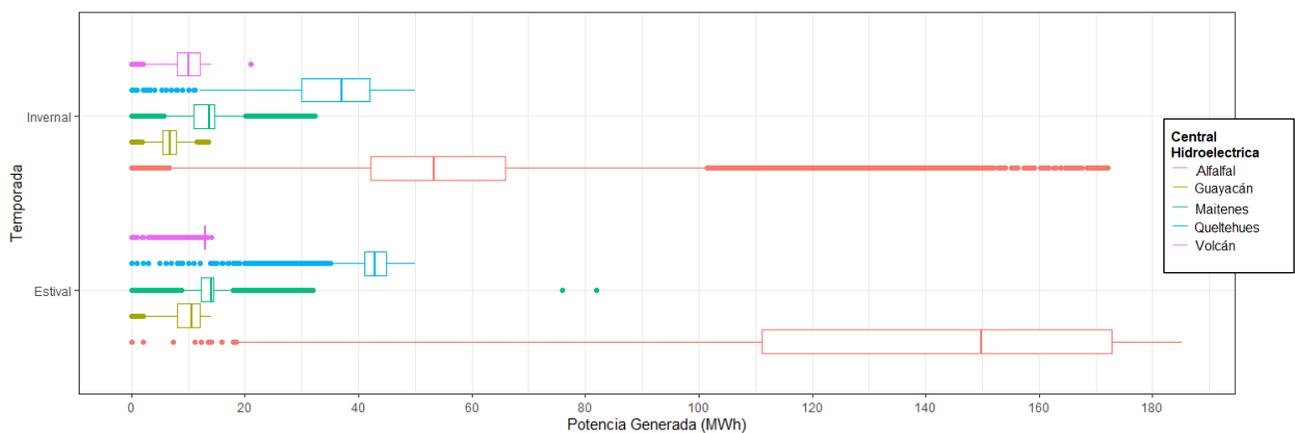


Figura 2.4-3: Boxplot de potencias generadas por CHs separados por temporada.

La potencia generada varía entre la temporada estival e invernal para las CHs estudiadas. La estacionalidad de la operación es entonces dependiente de la disponibilidad de caudal en los cauces intervenidos.

La central Alfalfal posee una potencia instalada mucho mayor que las centrales restantes. Esta capacidad solo se ve utilizada a cabalidad en los períodos estivales, lo que permite concluir que, en invierno, los caudales registrados en las bocatomas de dicha central son significativamente menores, forzando operaciones de menor magnitud.

Es posible apreciar en la Figura 2.4-4, que la magnitud de las potencias generadas se encuentra a la baja en los últimos años, consecuentemente con la disminución en los caudales registrados en la cuenca del río Maipo, de acuerdo a lo presentado en la Sección 2.1.

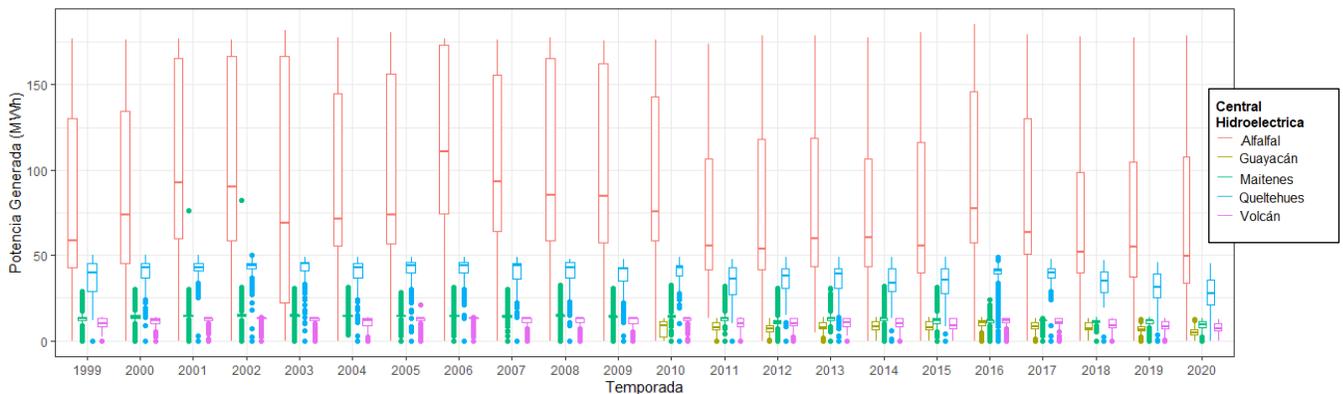


Figura 2.4-4: Boxplot de potencia generada por CHs por año de operación.

La Figura 2.4-5 muestra las potencias generadas por cada CH en su propia escala. Se aprecia que la CH Alfalfal triplica su potencia generada en el período estival con respecto a la potencia generada en el período invernal. Además, se logra apreciar que es esta CH la que tiene menores tiempos de inactividad. La CH Guayacán tiende igualmente a operar de forma estacional, presentando, sin embargo, anomalías operacionales en los años 2016 y 2017. La CH Maitenes presenta *peaks* de operación distintos al resto de las centrales, los cuales no son sostenidos en el tiempo. Esta CH tiende a operar de forma constante. Desde mediados de 2016 esta CH ha operado sin alcanzar el máximo de potencia instalada. La CH Queltehues opera mayormente con potencias generadas comparables a la potencia instalada. La CH Volcán tiende a alcanzar regularmente y por períodos extensos su capacidad máxima de generación, lo que apunta a que el potencial hidroeléctrico en la zona es superior al que se aprovecha actualmente.

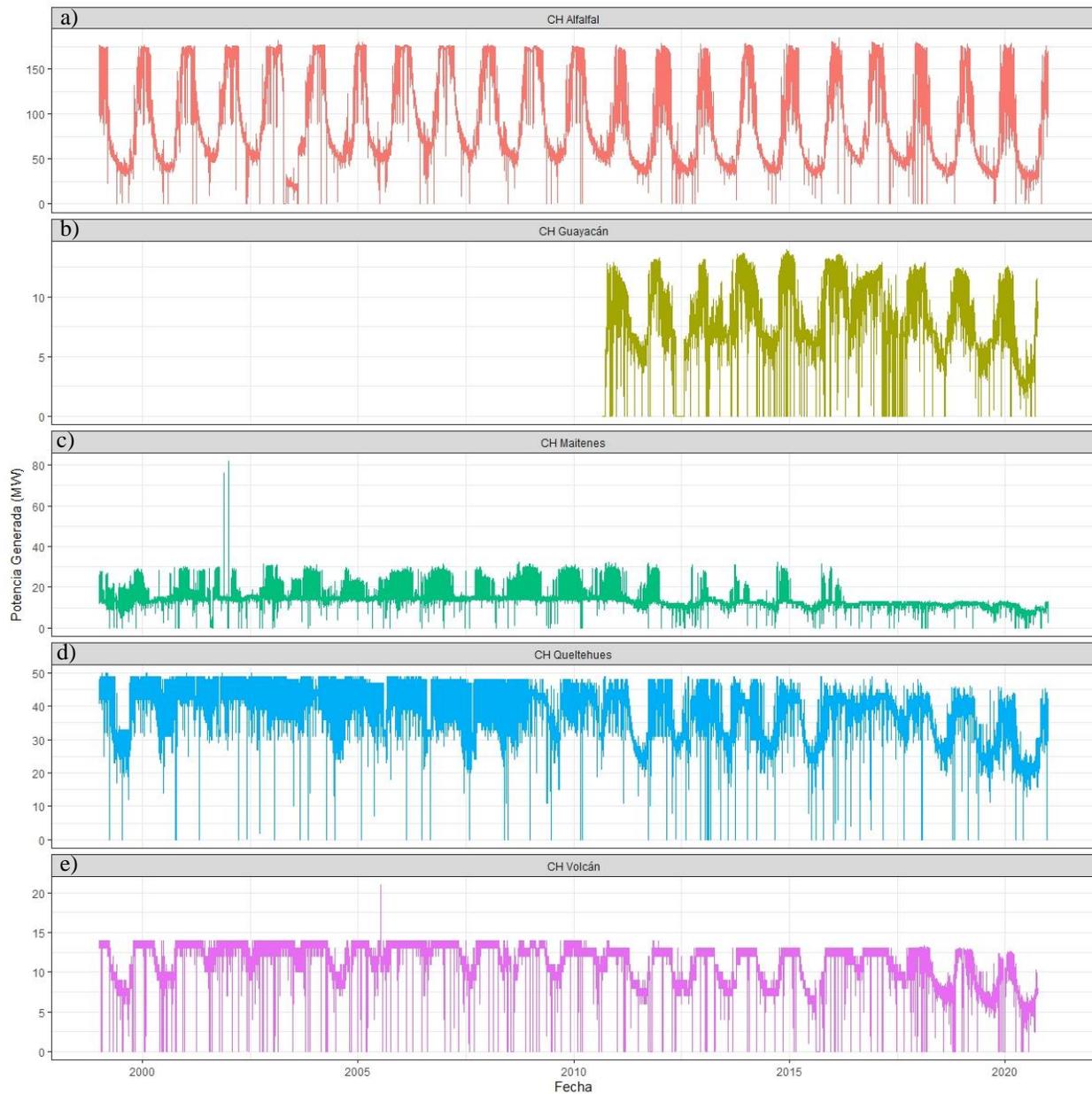


Figura 2.4-5: Serie temporal de potencia generada para las CHs. a) CH Alfalfal, b) CH Guayacán, c) Maitenes, d) CH Queltehues, e) CH Volcán.

Las series anteriores no permiten apreciar la operación tipo *hydropeaking*, que sólo puede ser identificada a una escala intradiaria, con fluctuaciones importantes y súbitas, asociadas a rampas de subida y bajada en potencias generadas y caudales turbinados. Un ejemplo de lo anterior se presenta en la Figura 2.2-2, que incluye series de potencia generada durante cuatro días consecutivos.

La Figura 2.4-6 corresponde a períodos donde se puede apreciar una operación tipo *hydropeaking*. Estos períodos de operación se encuentran vinculados por fluctuaciones abruptas entre una potencia generada media o baja y una potencia generada alta.

Se puede apreciar que las 5 CHs estudiadas han operado de acuerdo a dicho esquema definido como *hydropeaking* en bloques, durante el período de estudio. Este análisis no es representativo de un comportamiento reiterativo, sin embargo, establece que este esquema de operación es factible y ocurre, manteniéndose, en los ejemplos presentados, por períodos de 4 días.

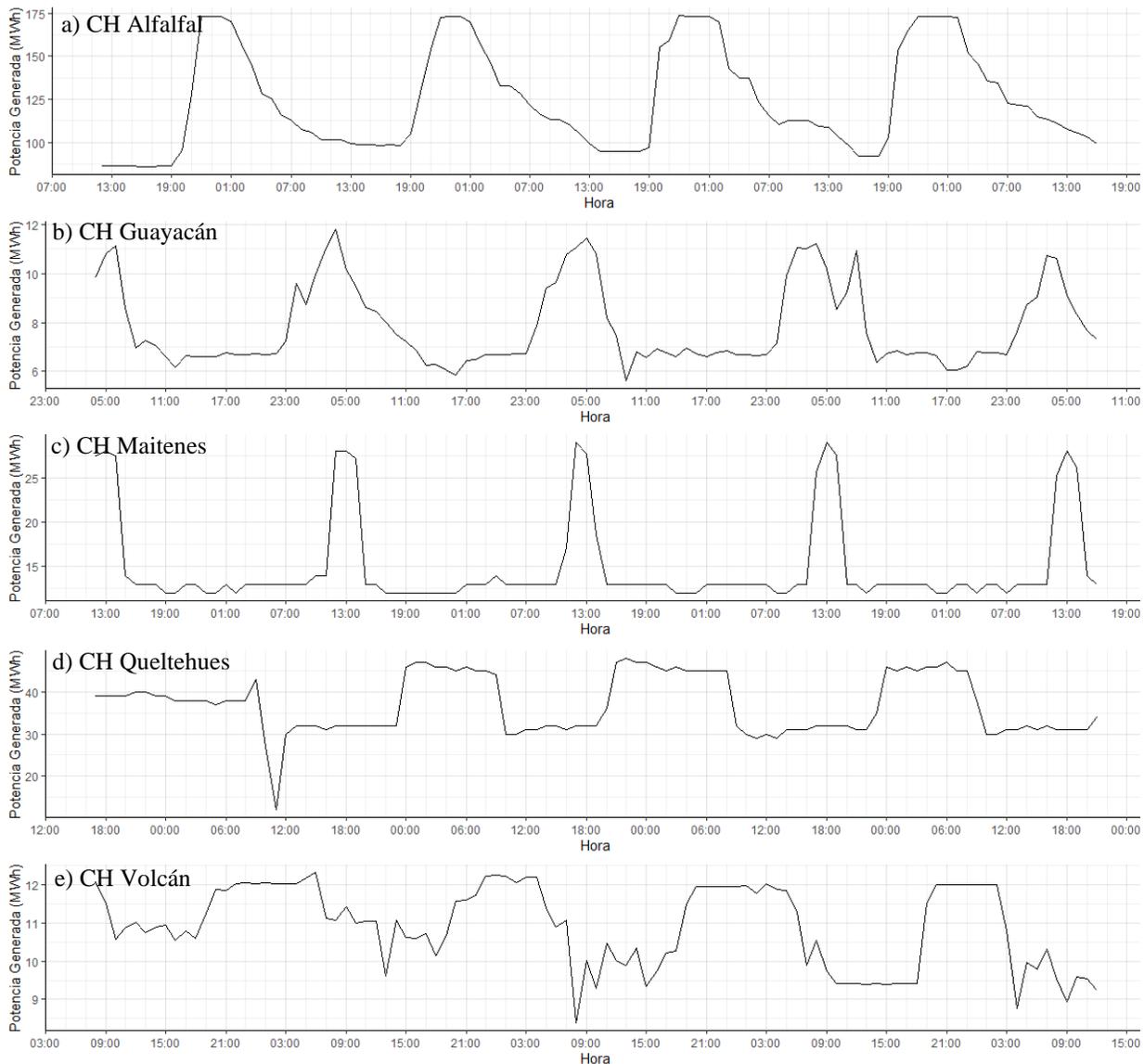
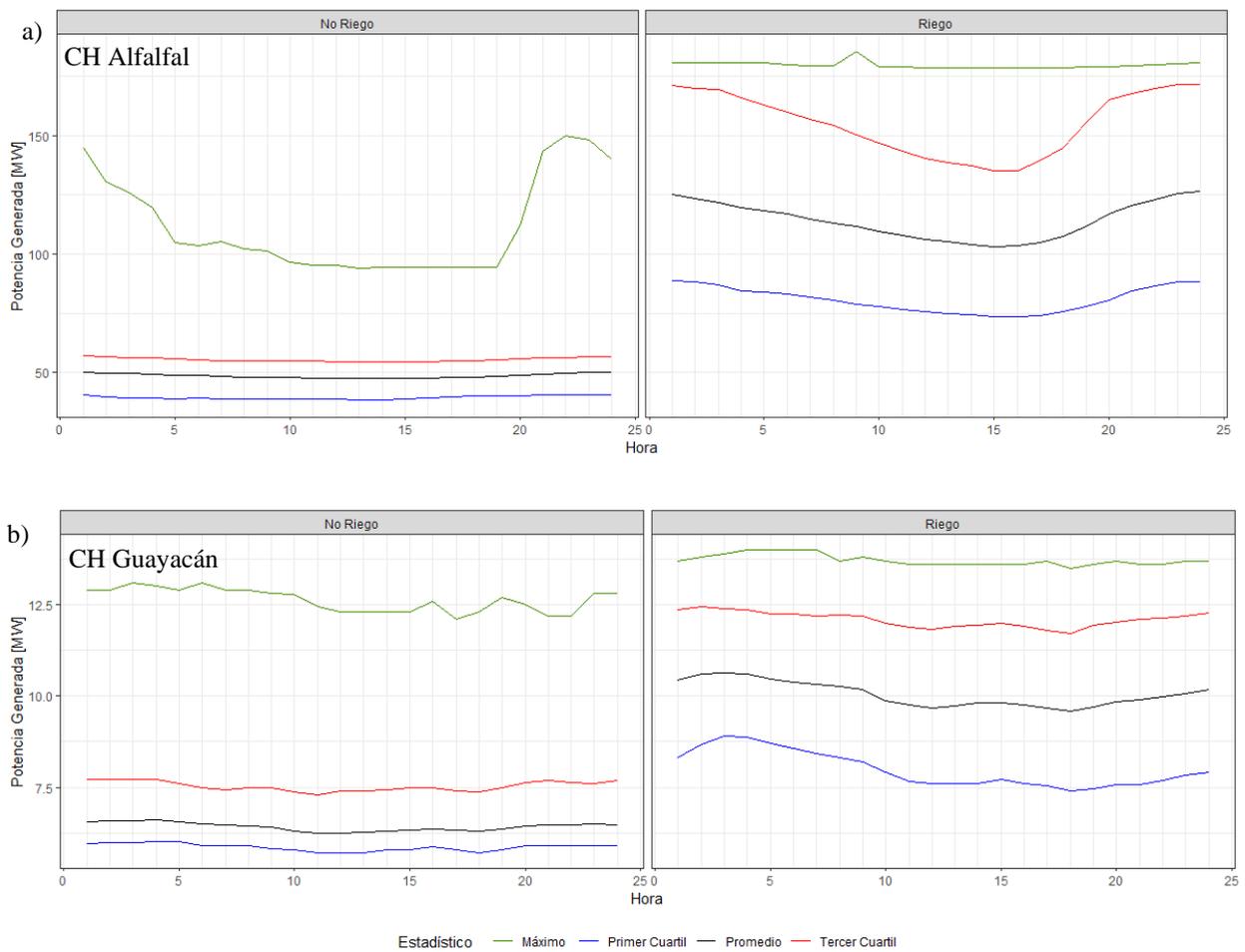


Figura 2.4-6: Ejemplos de *hydropeaking* en series temporales a) CH Alfalfal 23-02-2015 a 27-02-2015, b) CH Guayacán 06-03-2020 a 10-03-2020, c) CH Maitenes 20-12-2015 a 24-12-2015, d) CH Queltehues 13-11-2016 a 17-11-2016, e) CH Volcán 10-03-2020 a 14-03-2020.

De acuerdo a lo expuesto por Olivares (2015) y Haas (2014), la incorporación de energías renovables tiende a incrementar las fluctuaciones intradiarias correspondientes a la operación de centrales hidroeléctricas, ya que estas tienden a responder a las demandas inmediatas del SIC debido a su gran velocidad de respuesta. Las series de potencia generada expuestas anteriormente consideran un bloque punta en la operación de las centrales. Los bloques punta expuestos anteriormente para las centrales Alfalfal, Queltehues, Volcán y Guayacán comienzan una vez ha acabado el bloque solar, lo que corresponde directamente a las conclusiones establecidas por Haas (2014). De forma alternativa, la CH Maitenes presenta *peaks* en el horario 11:00-15:00.

Una primera aproximación a los patrones de operación intradiaria de las centrales hidroeléctricas de Maipo se presenta en la Figura 2.4-7, que muestra los estadísticos horarios de la potencia generada por las centrales, obtenidos a partir de un análisis de frecuencia de potencias horarias para el período estudiado. Se muestra el valor máximo (línea verde), promedio (línea negra), primer cuartil (línea azul) y tercer cuartil (línea roja) de la serie de potencias estudiada, para cada hora del día. Se diferencia entre temporadas de riego o verano (octubre-marzo) y temporadas de no riego o invierno (abril-septiembre).



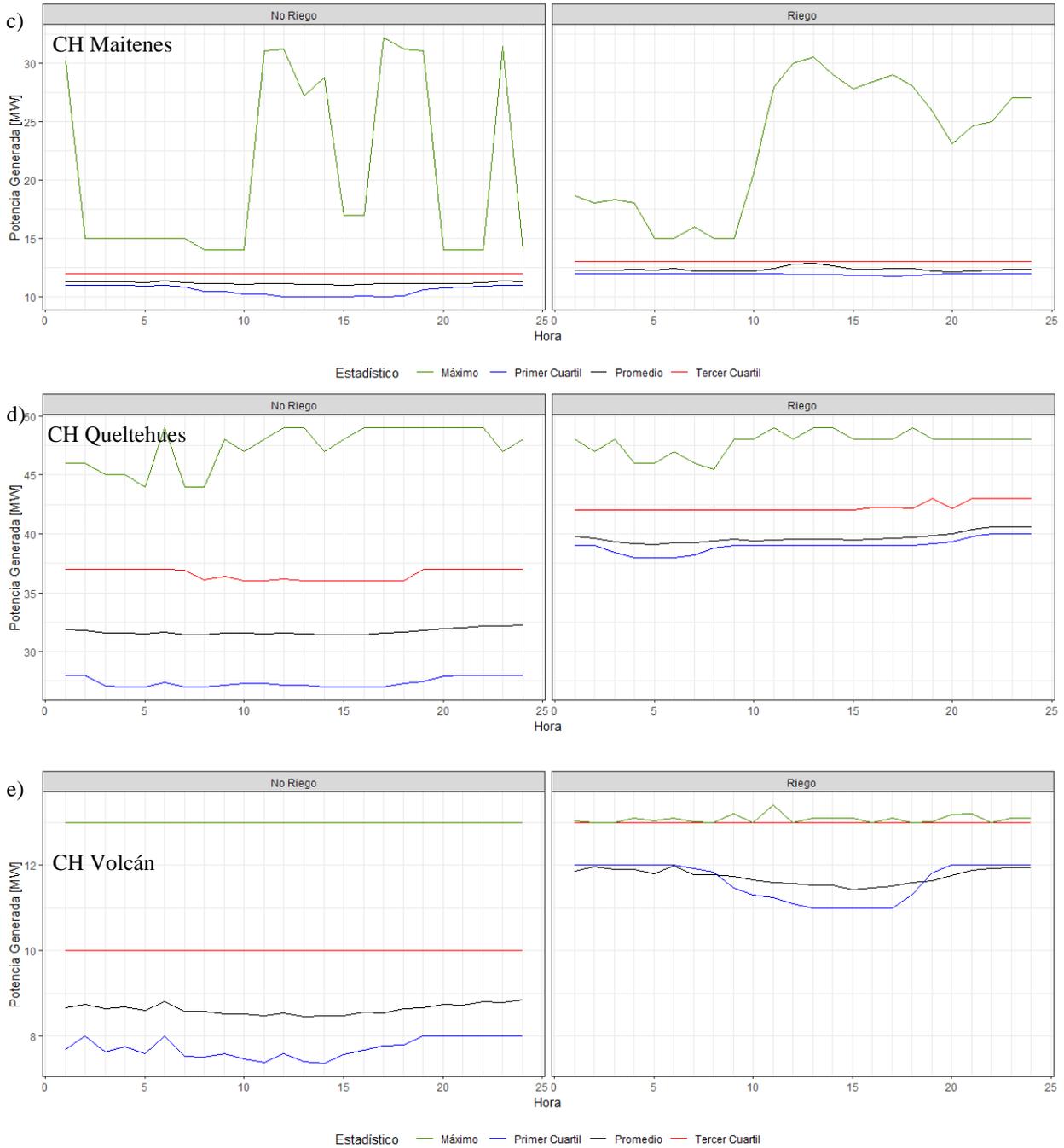


Figura 2.4-7: Estadísticos horarios de operación a) CH Alfalfal, b) CH Guayacán, c) CH Maitenes, d) CH Queltehues, e) CH Volcán

Los patrones observados para la central Alfalfal muestran una clara tendencia a operar en forma de bloques punta y valle en el período estival o de riego. Durante la temporada de no riego, la tendencia es a operar en forma de base, sin grandes fluctuaciones de caudales turbinados, reforzando la idea de estacionalidad de operación, enlazada al régimen nival de la cuenca. El valor máximo registrado en el periodo de no riego muestra que los escenarios de alta operación se

encuentran vinculados con el bloque definido previamente como punta para Alfalfal, probablemente correlativos a escenarios de altos e inusuales caudales de invierno.

Respecto a los estadísticos determinados de forma horaria para las centrales restantes, se puede apreciar horarios preferenciales para la generación eléctrica, vinculándolas al fenómeno de operación tipo *hydropeaking*.

La Figura 2.4-8 presenta las curvas de duración de potencia generada por cada central hidroeléctrica estudiada. Las curvas de duración de la potencia generada permiten discriminar sobre los porcentajes de excedencia de distintas potencias generadas por las centrales. Se realizan distinciones sobre los períodos de riego y no riego (verano e invierno), además de los bloques punta y valle.

Se puede apreciar para todas las centrales que los horarios punta se encuentran vinculados a mayores caudales turbinados, lo que se acrecienta de forma importante en los períodos de mayor disponibilidad de caudal (período estival o de riego). Por otra parte, las curvas de horarios punta y valle tienden a estar muy cerca para el período de no riego para todas las centrales. Sin embargo, durante la temporada de riego las curvas están más separadas, especialmente para las centrales Alfalfal y Guayacán, consistente con una operación en bloques. Por ejemplo, se puede evidenciar que para la CH Alfalfal en la temporada de riego, el horario definido como punta supone una mayor potencia generada, lo que sugiere que existen horarios preferenciales para generar mayor potencia eléctrica. En efecto, las curvas de duración muestran que la central Alfalfal es la que tiende a tener un esquema de operación orientado hacia el aprovechamiento total de la capacidad instalada durante algunas horas en período de riego (estival). Por otra parte, la central Maitenes tiende a operar de forma constante durante el año, así como en promedio, no aumentar significativamente los caudales turbinados en los bloques punta.

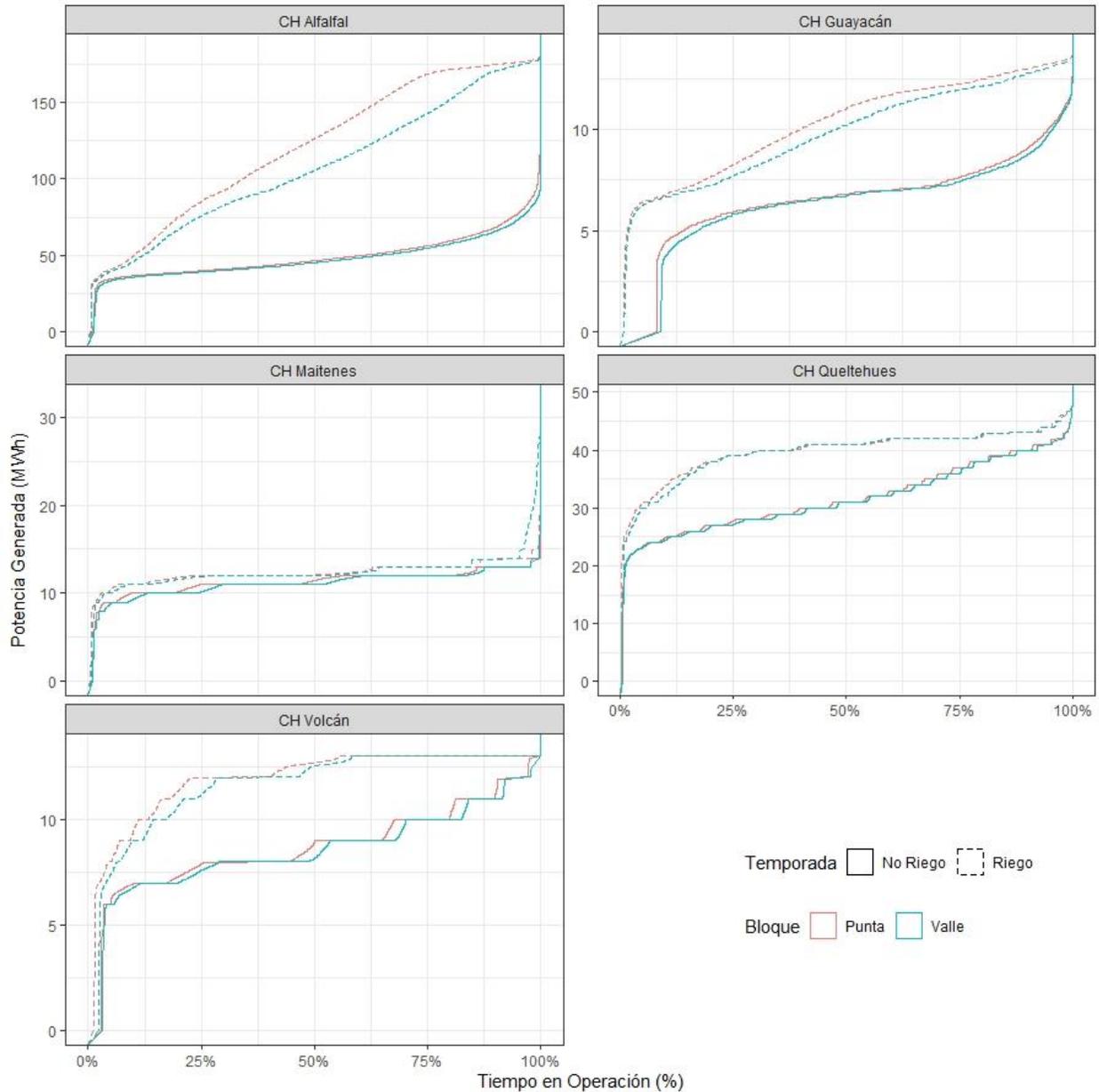


Figura 2.4-8: Frecuencia acumulada de potencia generada a) CH Alfalfal, b) CH Guayacán, c) CH Maitenes, d) CH Quelitehues, e) CH Volcán

Tal como se había apreciado anteriormente, exceptuando la CH Maitenes, las CHs tienden a diferir significativamente en sus operaciones considerando las temporadas de riego (estival) y no riego (invierno). Se puede evidenciar además que para la CH Alfalfal en la temporada de riego, el horario definido como punta supone una mayor potencia generada, lo que sugiere que existen horarios preferenciales para generar mayor potencia eléctrica, esto no se mantiene en la temporada de no riego. Las CHs Alfalfal, Guayacán y Volcán presentan diferencias importantes entre los bloques definidos, por lo que, si bien existe preferencia, esta no tiende a ser persistente en el período de registro analizado.

## **4 ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INTRADIARIA**

La alteración hidrológica será evaluada a través de indicadores seleccionados aplicados a la serie de caudales horarios registrados en las estaciones fluviométricas consideradas en el presente estudio. El análisis busca determinar el grado de impacto sobre los caudales en diversos cursos de agua, vinculado a las operaciones de las centrales hidroeléctricas.

Debido a la longevidad de las centrales hidroeléctricas emplazadas en el río Maipo, se ha realizado el análisis teniendo como objetivo la determinación de la alteración hidrológica intradiaria debido a la operación de las CHs instaladas más recientemente, Guayacán, puesta en operación en 2011, y Alfalfal, puesta en operación en 1991.

Se utilizarán los indicadores presentados en la sección 2.2. La magnitud del indicador se encuentra vinculado al grado de alteración hidrológica estimado, encontrándose correlacionados positivamente.

Los registros fluviométricos disponibles en la zona de estudio han sido extraídos desde la red hidrométrica de la dirección general de aguas, a través de su portal web. Debido a la naturaleza de la alteración hidrológica vinculada a las centrales hidroeléctricas, se han utilizado registros de caudal instantáneo, medidos en el cauce.

Se realizará un análisis estadístico sobre las series de caudales e indicadores de alteración intradiaria en estaciones fluviométricas presuntamente comprometidas por la operación de CHs.

### **4.1 ANÁLISIS DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA ASOCIADA A LAS CENTRALES ALFALFAL Y MAITENES**

Se ha seleccionado la estación fluviométrica “Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo” para el análisis de la alteración hidrológica inducida por la operación de la CH Alfalfal, al ser esta la primera estación aguas abajo del punto de restitución. La Figura 4.1-1 presenta la ubicación de las instalaciones de interés para el análisis. Es importante establecer que no se dispone de una estación ubicada entre la restitución de CH Alfalfal y la CH Maitenes, por lo que el presente análisis dará cuenta del impacto conjunto de ambas CHs.

LA CH Alfalfal posee una potencia instalada de 178 MW. La CH Alfalfal se encuentra emplazada aguas arriba de la CH Maitenes, descargando los caudales turbinados aguas arriba de la bocatoma de la última. La estación fluviométrica registra la alteración hidrológica inducida por ambas CHs. Existen tributarios hacia el río Colorado que enmascaran la alteración hidrológica registrada en la estación fluviométrica, entre ellos los esteros Aucayes, Los Toyos y Sauce.

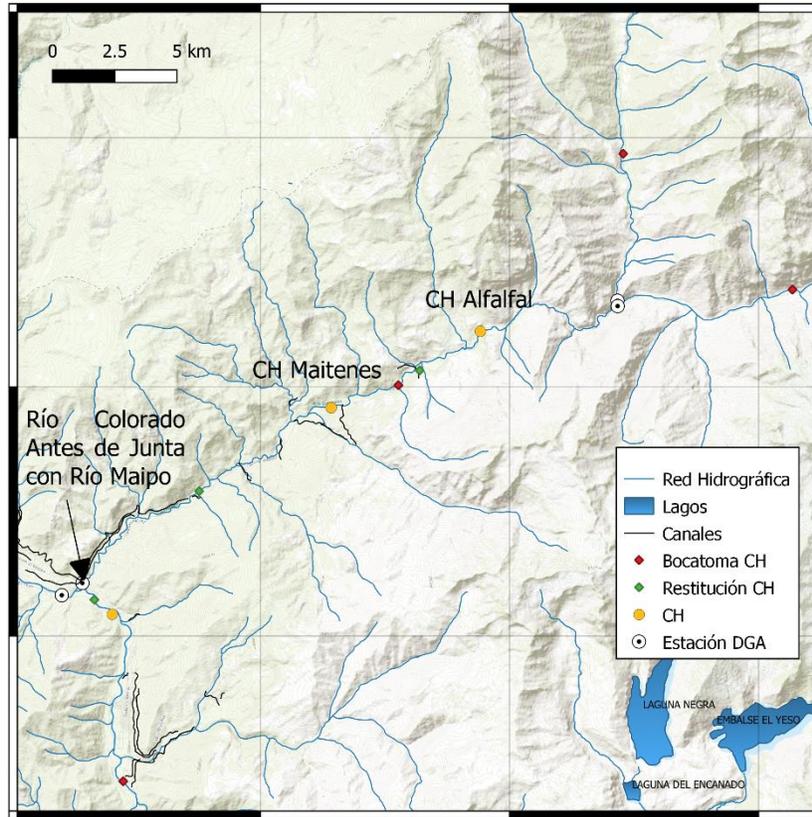


Figura 4.1-1: Ubicación de estación fluviométrica "Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo".

En la Figura 4.1-2 se presenta la serie de caudales registrados en la estación fluviométrica "Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo" en el período de estudio 1980-2020. La figura presenta además el comienzo de la operación de la CH Alfalfal el año 1991 con una línea punteada de color rojo.

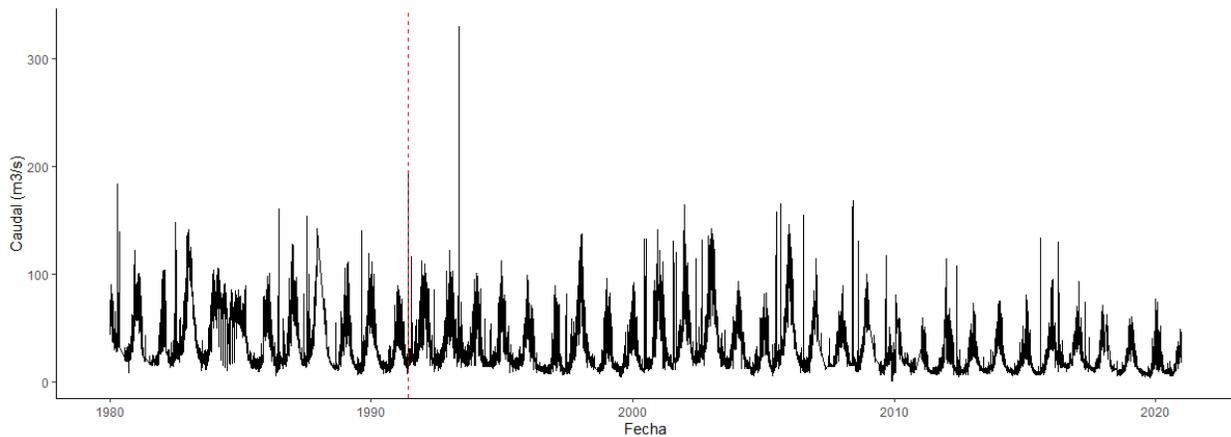


Figura 4.1-2: Serie de caudales horarios en estación fluviométrica "Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo".

La Figura 4.1-3 presente un *boxplot* de los caudales registrados en el cauce, según año y temporada (invierno o verano). Se puede apreciar un decrecimiento en la disponibilidad de caudales de forma sostenida en los últimos 15 años.

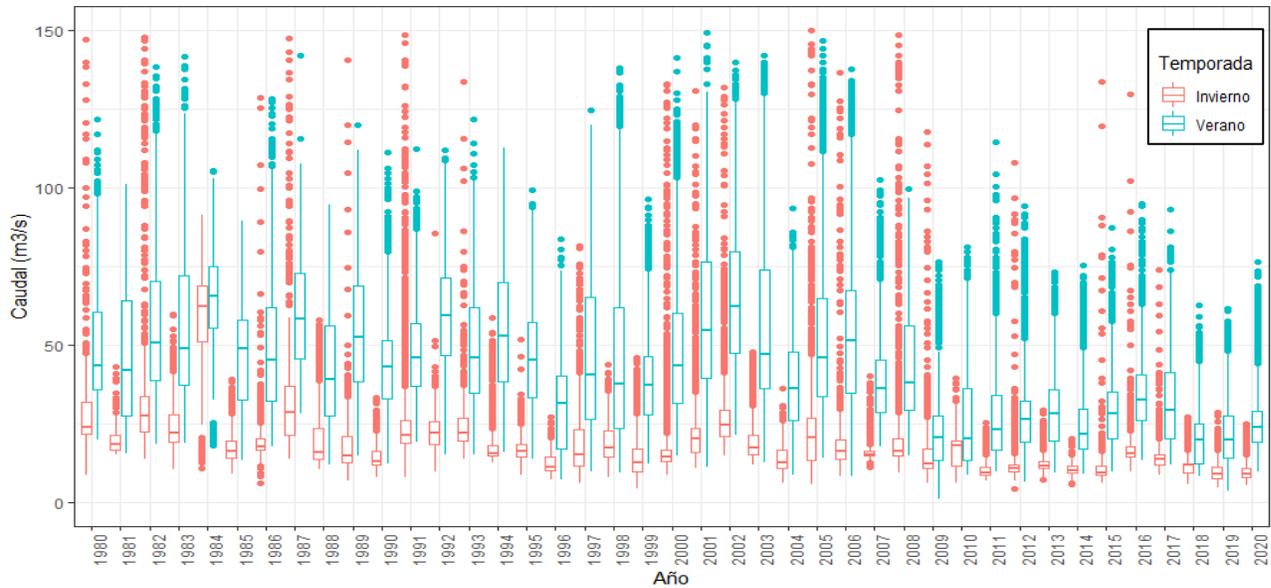


Figura 4.1-3: Boxplot de caudales registrados según año y temporada en "Río Colorado Antes de Junta Con Río Maipo".

En la Figura 4.1-2 y Figura 4.1-3, se puede apreciar el régimen nival del cauce en cuestión, con valores altos de caudal en la época estival, presentando algunas puntas en invierno, probablemente vinculadas a escenarios de altas precipitaciones. Visualizando la serie no se puede concluir sobre la alteración hidrológica vinculada a la puesta en marcha de la CH Alfalfal.

Para realizar el cálculo de los indicadores de alteración hidrológica, es necesario, en principio, contar con registros horarios completos (Baker, 2004). Los indicadores han sido construidos bajo la premisa de suficiencia de información y no se dispone de una discusión acabada a la fecha de la implicancia de registros incompletos en los indicadores utilizados en el presente trabajo. Se ha tomado la decisión de no realizar una interpolación de los valores para obtener un registro completo y equidistante en el tiempo, ya que se desconoce el grado de incertidumbre que este proceso incorpora al análisis. El tipo de interpolación debe ser correctamente seleccionado para ajustarse correctamente a la serie en estudio y debe determinarse a partir de la distribución de datos (Tao 2009), lo que a su vez condiciona una serie particular interpolada a partir del comportamiento general de los datos.

La Figura 4.1-4 presenta una contabilización de la cantidad de mediciones de caudal disponibles, a través de un análisis de los registros diarios disponibles. Es importante hacer notar que los registros se han vuelto cada vez más consistentes y exhaustivos, presentando vacíos importantes y menor frecuencia en el período anterior a la puesta en marcha de la CH Alfalfal.

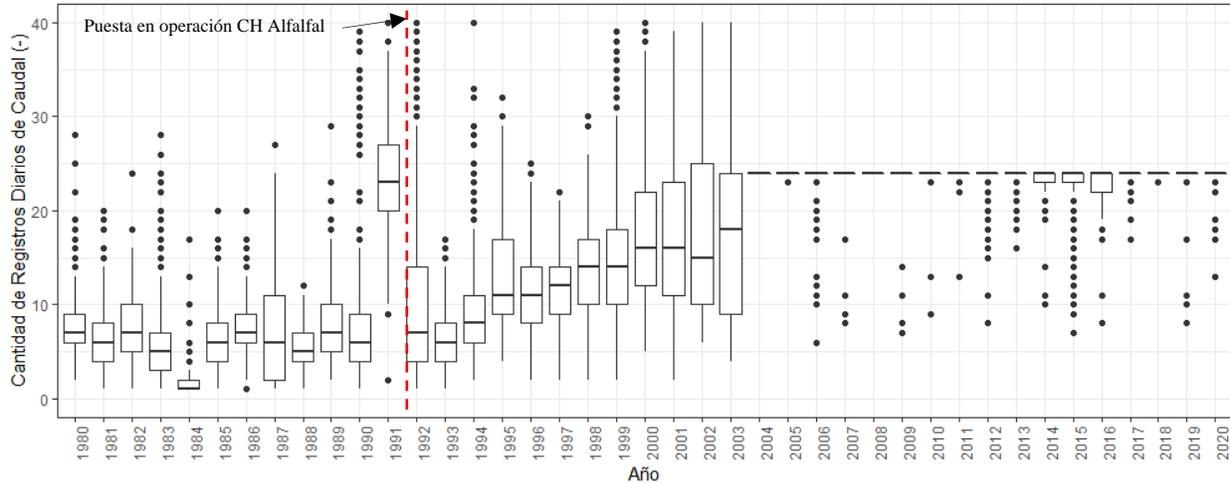


Figura 4.1-4: Boxplot de cantidad de registros diarios de caudal en estación fluviométrica “Río Colorado Antes de Junta Con Río Maipo”.

Para evaluar de forma consistente el impacto es necesario disponer de un registro de caudales estable y frecuente. Los indicadores de alteración hidrológica propuestos para la evaluación de impacto de la operación de las centrales son susceptibles a la frecuencia y calidad del registro utilizado. Se puede anticipar que los análisis a realizar para la presente estación fluviométrica se encontrarán sesgados por esta falencia.

Se aprecia una regularización en la frecuencia de medición de datos desde el año 2004, encontrándose 24 registros diarios de forma consistente, fenómeno escaso si visualizamos la serie en el periodo 1980-2003. La regularización de los datos puede encontrarse vinculada a la implementación de nueva instrumentación para la medición de caudal en el cauce. Al comparar periodos que suponen otro método o instrumento de registro, se está sujeto a la diferenciación en el error instrumental de la medición.

Se realizará un análisis diferenciado, considerando 2 subgrupos. El primer subgrupo contempla el registro completo de datos desde 1980 a 2020, mientras que el segundo subgrupo contempla el registro desde 1980 a 2003, buscando aislar del error instrumental diferenciado el análisis de indicadores de alteración intradiarios.

Se realiza una evaluación de los índices de alteración hidrológica expuestos en la Sección 2.2 del presente documento. Los índices fueron calculados de forma diaria en el período de estudio de acuerdo con las ecuaciones 1, 2 y 3, con la información disponible.

El indicador Richard-Baker se presenta en la Figura 4.1-5. Se han considerado las temporadas de invierno o no riego (abril-septiembre) y la temporada de verano o riego (octubre-marzo). Se ha generado una línea roja punteada que denota la puesta en marcha de la CH Alfalfal. En el cálculo del indicador Richard-Baker se ha considerado los registros consecutivos, independiente de la variación temporal existente.

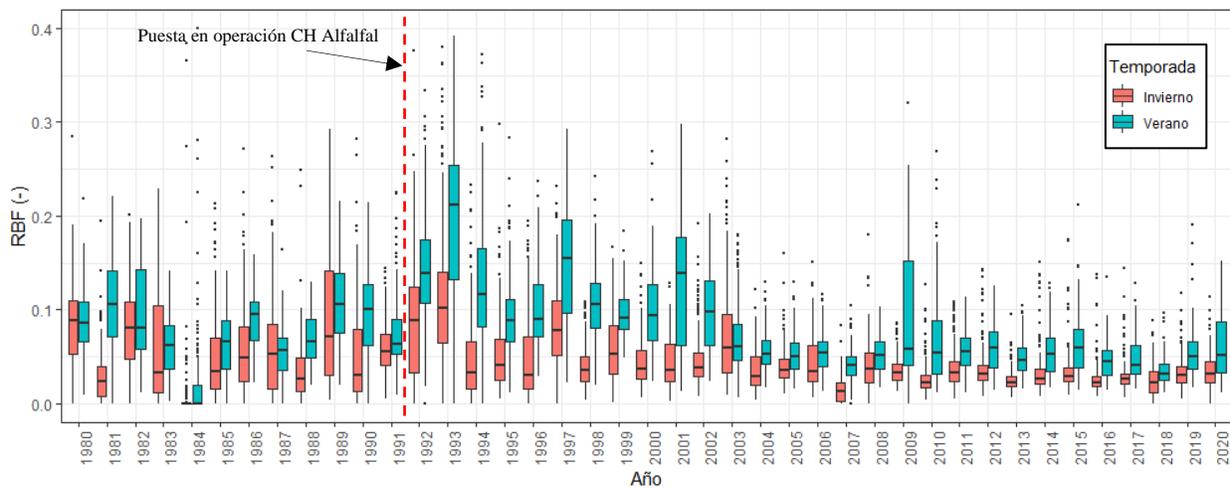


Figura 4.1-5: Boxplot de indicador Richard-Baker en “Río Colorado Antes de Junta Con Río Maipo”.

El gráfico permite vislumbrar la correlación entre el valor del indicador y el régimen nival del cauce. Valores mayores del indicador se asocian a mayores caudales registrados. Se puede apreciar un aumento significativo en el valor del indicador en los dos primeros años, en la temporada de verano, tras la puesta en marcha de la CH Alfalfal. Este aumento es sostenido hasta el año 2004.

La disponibilidad y frecuencia de los registros, con mayor constancia desde el año 2004, se encuentran vinculados con una diferencia notable en los valores del indicador. El indicador, al ser calculado a partir de un registro completo de datos, tiende a entregar magnitudes menores. Además, el año con una menor frecuencia de registro 1984, entrega además la mayor dispersión en indicador. Esto reafirma la noción de la fuerte dependencia del indicador Richard-Baker en la frecuencia de registro de datos de caudal.

El valor del indicador disminuye después de la puesta en marcha de la CH, en la temporada de invierno. Se puede establecer entonces, que la operación de la CH apacigua las fluctuaciones entre horas en el cauce en la temporada de invierno, donde se encuentra una menor disponibilidad de caudal.

La Figura 4.1-6 presenta las curvas de duración del indicador Richard-Baker, diferenciado por temporada (invierno o verano) y periodo, previo o posterior a la puesta en marcha de la CH Alfalfal.

Se han realizado las figuras considerando 2 grupos de control. El primer grupo de control considera el registro total disponible, es decir 1980-2020. El segundo grupo de control excluye el periodo 2004-2020, debido a la diferencia observada en la Figura 4.1-4, donde se aprecia un quiebre en la frecuencia de registro, por lo que el segundo grupo de control considera el periodo 1980-2003. La diferencia entre los dos grupos de control radica en la curva de duración en el periodo posterior a la puesta en marcha de la CH Alfalfal.

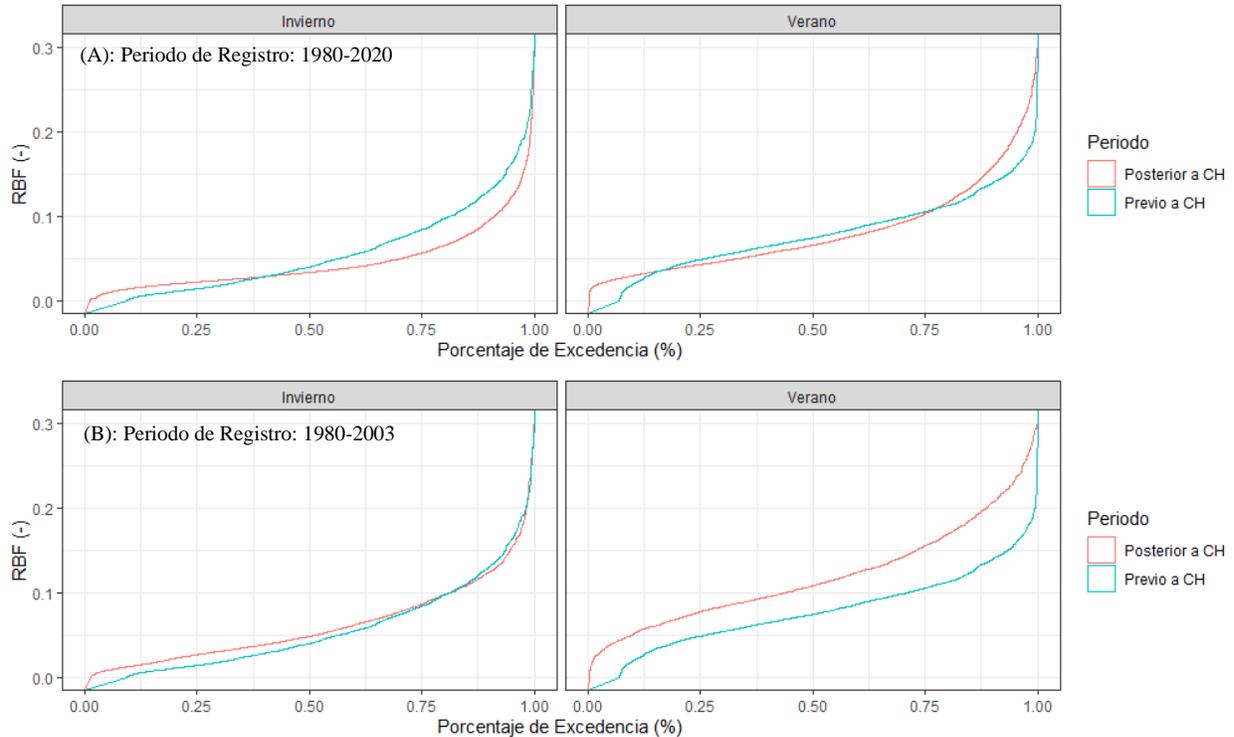


Figura 4.1-6: Curvas de duración de indicador Richard-Baker en “Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo”. (A) periodo de registro 1980-2020; (B) periodo de registro 1980-2003.

La Figura 4.1-6 reafirma el vínculo entre la magnitud del indicador y el régimen nival de la cuenca, presentando valores mayores durante la temporada de verano.

Al considerar el registro completo en la Figura 4.1-6 (A), se observa que tras el comienzo de operaciones de la CH Alfalfal, el percentil 12,5 ha aumentado en la temporada de invierno o verano. En la temporada de invierno, posterior a la CH Alfalfal se aprecia una disminución en la ocurrencia de días con magnitud de RBF superior a 0,1. De forma opuesta, en la temporada de verano, se aprecia un aumento en la ocurrencia de eventos con valores de RBF altos.

Al considerar el registro parcial, correspondiente al periodo 1980-2003 en la Figura 4.1-6 (B), las curvas de duración del periodo posterior al comienzo de operaciones de la CH Alfalfal son comparables en la temporada de invierno. Durante la temporada de verano se puede apreciar un aumento consistente en todos los percentiles del valor del indicador, especialmente en los valores altos del indicador, estableciendo que las temporadas de verano de 1992-2003 (posterior a CH Alfalfal) presentan magnitudes de RBF sustancialmente superiores a las que presentan las temporadas de verano de 1980-1990 (previo a CH Alfalfal).

El indicador refleja las fluctuaciones entre un dato de caudal y el siguiente, por lo que un aumento en su magnitud refleja un aumento en el grado de fluctuaciones entre registros de caudal consecutivos, que pueden ser explicadas por rampas de subida y bajada en la CH, asociadas con el *hydropeaking*.

El indicador PTF se presenta en la Figura 4.1-7. Se han considerado las temporadas de invierno o no riego (abril-septiembre) y la temporada de verano o riego (octubre-marzo). Se ha generado una línea roja punteada que denota la puesta en marcha de la CH Alfalfal.

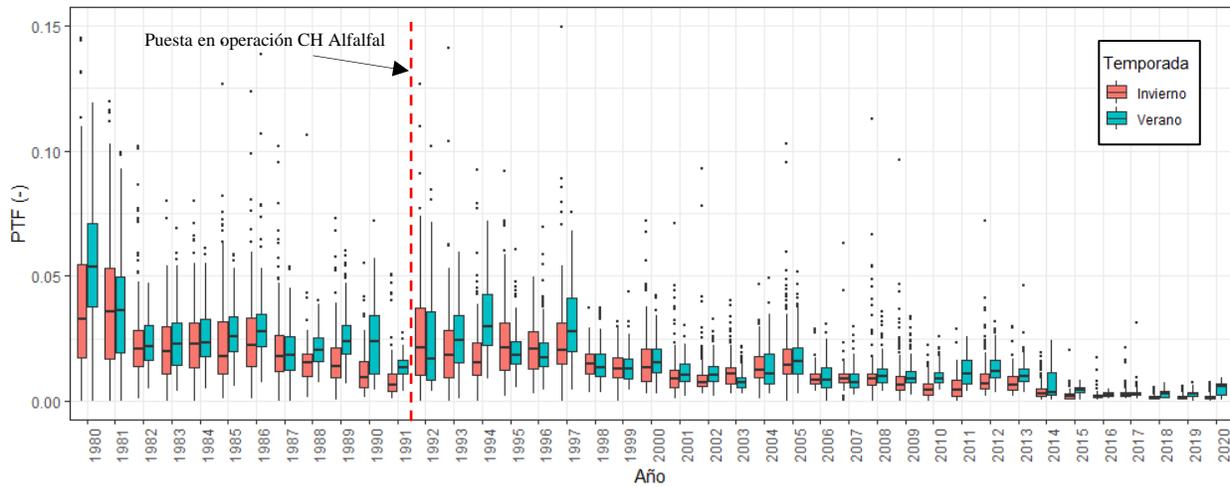


Figura 4.1-7: Boxplot de indicador PTF en “Río Colorado Antes de Junta Con Río Maipo”.

El indicador da cuenta de la diferencia entre el registro de caudal máximo y mínimo dentro de un día, normalizado por la suma total de caudal.

Se puede apreciar un aumento significativo en el valor del indicador PTF en los dos primeros años, principalmente en la temporada de invierno, tras la puesta en marcha de la CH Alfalfal. Posterior a ello existe un declive general del indicador.

La disponibilidad y frecuencia de los registros, con mayor constancia desde el año 2004, no suponen un impacto general en la magnitud del indicador. Al ser calculado a partir de la diferencia de valores extremos, depende del registro de estos y no directamente de la frecuencia de los datos.

La Figura 4.1-6 presenta las curvas de duración del indicador PTF, diferenciado por temporada (invierno o verano) y periodo, previo o posterior a la puesta en marcha de la CH Alfalfal. Se han realizado las figuras considerando 2 grupos de control tal como se realizó previamente. El primer grupo de control considera el periodo 1980-2020. El segundo grupo de control considera los años 2004-2020. La diferencia entre los dos grupos de control radica en la curva de duración en el periodo posterior a la puesta en marcha de la CH Alfalfal.

Se puede apreciar que el indicador PTF no se encuentra influenciado por la estacionalidad de la cuenca, como ocurre con el RBF. De igual forma, el indicador tampoco se encuentra condicionado por la diferencia en la frecuencia de registro.

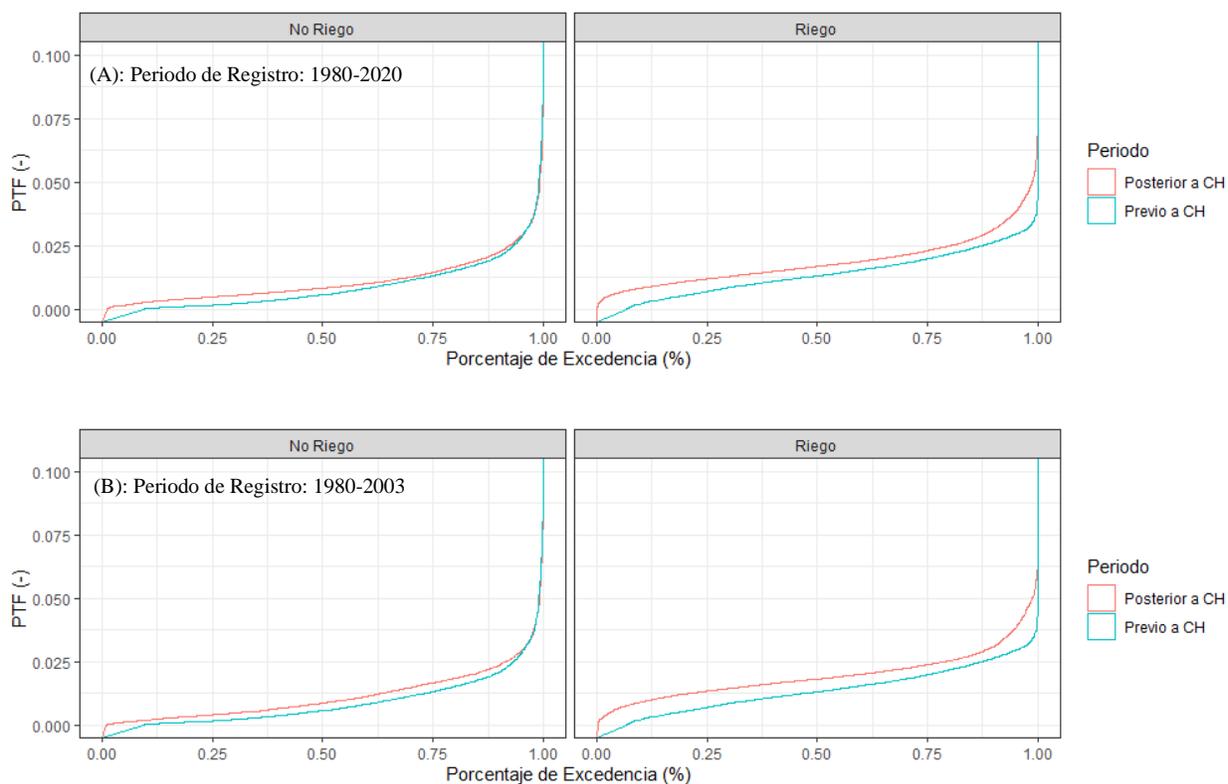


Figura 4.1-8: Curvas de duración de indicador PTF en “Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo”. (A) periodo de registro 1980-2020; (B) periodo de registro 1980-2003.

Al considerar el registro completo en la Figura 4.1-8Figura 4.1-6 (A) y el registro parcial en la Figura 4.1-8 (B), se observa que tras el comienzo de operaciones de la CH Alfalfal, el indicador indica una mayor diferencia de valores extremos de caudal de forma diaria.

El indicador CDV se presenta en la Figura 4.1-9. Se han considerado las temporadas de invierno o no riego (abril-septiembre) y la temporada de verano o riego (octubre-marzo). Se ha generado una línea roja punteada que denota la puesta en marcha de la CH Alfalfal.

El indicador CDV da cuenta de la dispersión de los datos de caudal normalizado con respecto al valor promedio de los datos, en un día de registro. La disponibilidad y frecuencia de los registros, con mayor constancia desde el año 2004, no suponen un impacto general en la magnitud del indicador de acuerdo con la Figura 4.1-9. De igual forma, el año 1984, que presenta una menor frecuencia de registro de acuerdo con la Figura 4.1-4, no se distingue fuertemente en la variabilidad anual del indicador CDV.

El indicador se encuentra vinculado a la estacionalidad de la cuenca estudiada, considerando valores mayores en las temporadas de verano, que conllevan un mayor caudal.

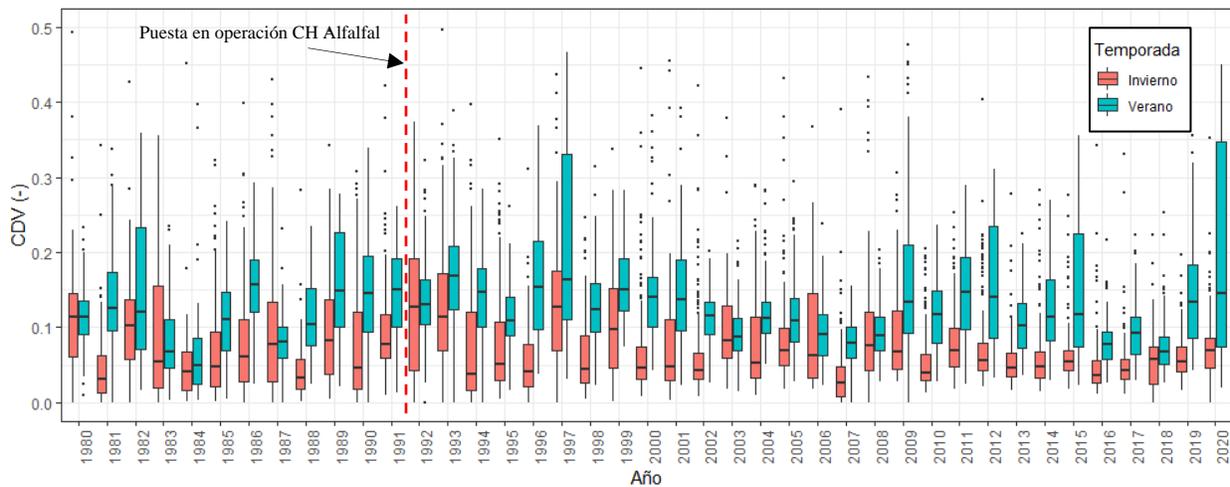


Figura 4.1-9: Boxplot de indicador CDV en “Río Colorado Antes de Junta Con Río Maipo”.

La Figura 4.1-10 presenta las curvas de duracion del indicador CDV, diferenciado por temporada (invierno o verano) y periodo, previo o posterior a la puesta en marcha de la CH Alfalfal. Se han realizado las figuras considerando 2 grupos de control tal como se realizó previamente. El primer grupo de control considera el periodo 1980-2020. El segundo grupo de control considera los años 2004-2020. La diferencia entre los dos grupos de control radica en la curva de duración en el periodo posterior a la puesta en marcha de la CH Alfalfal.

La Figura 4.1-10 reafirma el vinculo entre la magnitud del indicador y el regimen nival de la cuenca, presentando valores mayores durante la temporada de verano.

Al considerar el registro completo en la Figura 4.1-10 (A), se observa no existe una diferencia considerable tras la puesta en marcha de la CH Alfalfal. Al considerar el registro parcial, correspondiente al periodo 1980-2003 en la Figura 4.1-10Figura 4.1-6 (B), las curvas de duracion del periodo posterior al comienzo de operaciones de la CH Alfalfal son comparables en la temporada de invierno, con una mayor cantidad de valores altos posterior a la CH. Durante la temporada de verano se puede apreciar un aumento consistente en todos lo percentiles del valor del indicador, especialmente en los valores altos del indicador, estbleciendo que las temporadas de verano de 1992-2003 (posterior a CH Alfalfal) presentan magnitudes de CDV sustancialmente superiores a las que presentan las temporadas de verano de 1980-1990 (previo a CH Alfalfal).

Se puede vincular con significancia estadística la operación de la CH Alfalfal con la alteración hidrológica intradiaria registrada en la estación fluviométrica “Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo”.

A partir del indicador Richard-Baker, se ha detectado un aumento significativo de las fluctuaciones entre registros consecutivos. Un aumento en las fluctuaciones puede encontrarse asociado a rampas de operación como las presentadas en la Figura 2.4-6 (Ministerio de Energía, 2015).

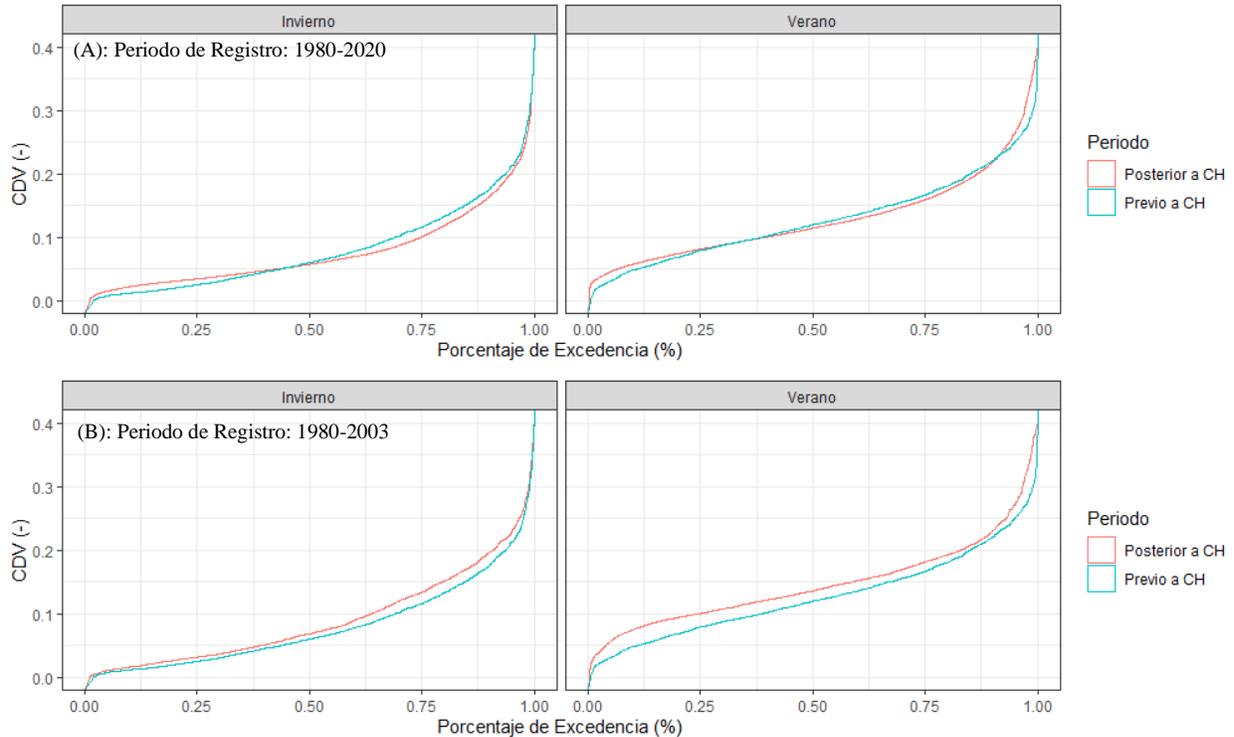


Figura 4.1-10: Curvas de duración de indicador CDV en “Río Colorado Antes de Junta con Río Maipo”. (A) periodo de registro 1980-2020; (B) periodo de registro 1980-2003.

EL indicador PTF muestra que las diferencias de los caudales extremos tras la puesta en marcha de la CH Alfalfal han aumentado, especialmente en la temporada de verano, donde existen mayores caudales en el cauce y mayores caudales turbinados por la CH Alfalfal según la Figura 2.4-5. El indicador CDV a su vez, respalda un aumento en la dispersión en los registros de caudal intradiarios.

## 4.2 ANÁLISIS DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA ASOCIADA A LA CH GUAYACÁN

En octubre de 2010 comienza la operación de la CH Guayacán. Se ha seleccionado la estación fluviométrica “Río Maipo en El Manzano” para el análisis de la alteración hidrológica inducida por la operación de esta central. Es importante notar la influencia de las CHs Alfalfal y Maitenes en los registros de la estación. En la Figura 4.2-1, se presenta la ubicación de las instalaciones anteriormente mencionadas:

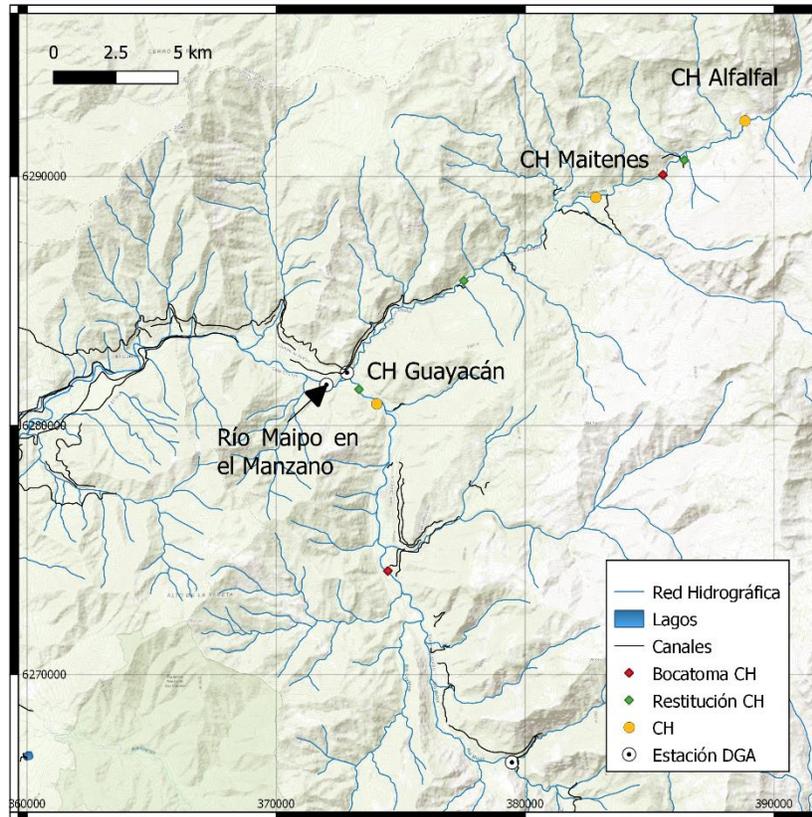


Figura 4.2-1: Ubicación de estación fluviométrica "Río Maipo en El Manzano".

La CH Guayacán corresponde a una instalación de baja potencia (12 MW) y caudal de diseño de 42 m<sup>3</sup>/s, emplazada en el río Maipo, aguas arriba de la confluencia de este con el río Colorado. El análisis de los indicadores propuestos en la estación "Río Maipo en El Manzano" se encuentra influenciado por el aporte del río Colorado, el cual se encuentra intervenido por la operación de las 2 CHs emplazadas en él, CH Maitenes y CH Alfalfal, de mayor potencia instalada.

La Figura 4.2-2 presenta la serie de caudales registrados en la estación fluviométrica "Río Maipo en El Manzano" en el período de estudio 1980-2020. Se puede apreciar el régimen nival del cauce en cuestión. Los valores de caudales presentan disminuciones considerables, con caudales extremos significativamente menores en el período 2010-2020.

La Figura 4.2-3 presenta un *boxplot* de los caudales registrados en el cauce, según año y temporada (invierno o verano). Se puede apreciar un decrecimiento en los valores extremos de caudal de forma sostenida en los últimos 15 años. Además, existe una disminución general de la disponibilidad de caudales desde el año 2007.

La Figura 4.2-4 presenta una contabilización de la cantidad de mediciones de caudal disponibles en la estación "Río Maipo en El Manzano", a través de un análisis de los registros diarios disponibles. Es importante notar que los registros se han vuelto cada vez más consistentes y exhaustivos.

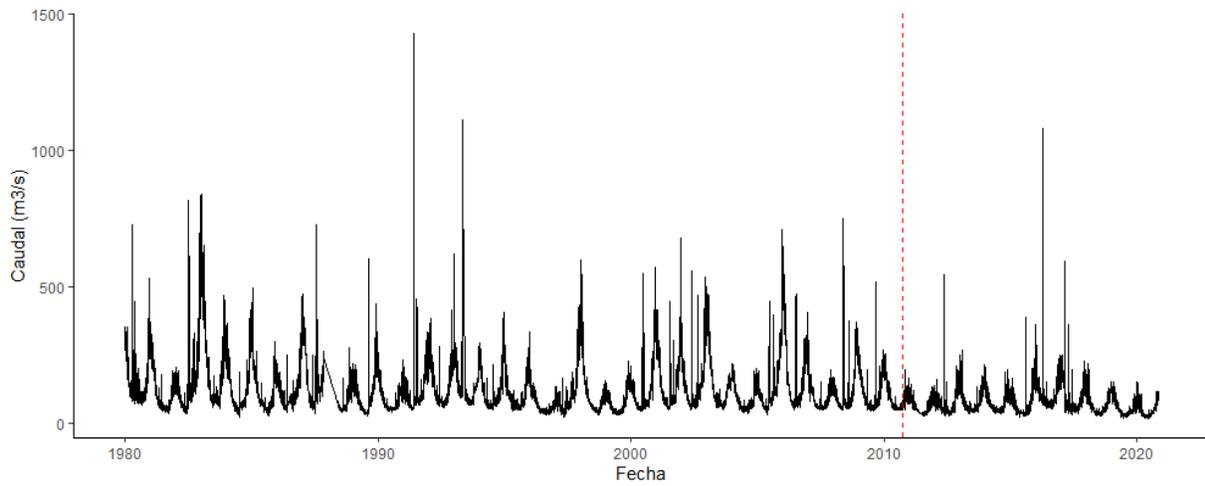


Figura 4.2-2: Serie de caudales en estación fluviométrica “Río Maipo en El Manzano”

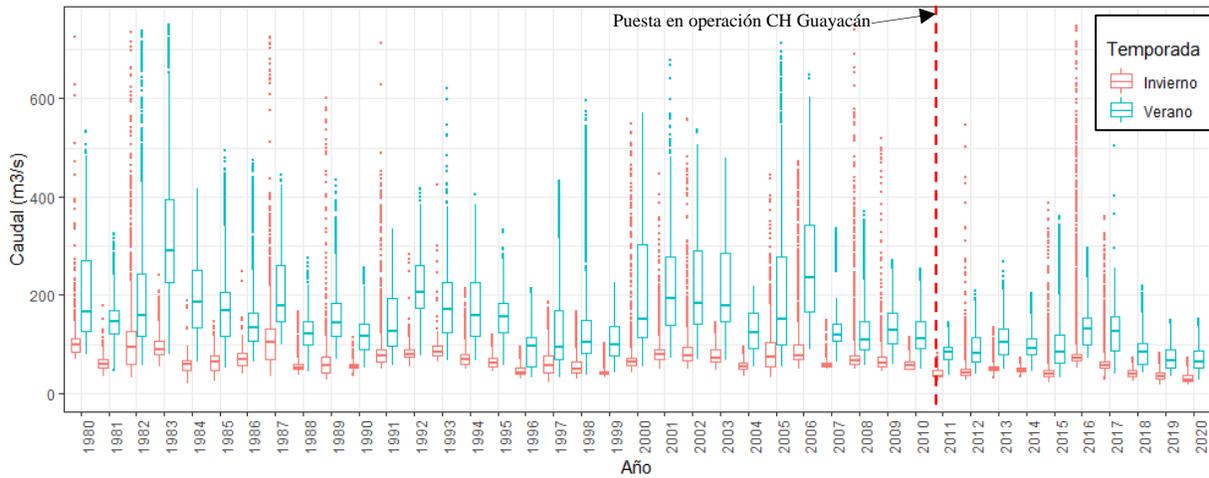


Figura 4.2-3: Boxplot de caudales registrados según año y temporada en "Río Maipo en El Manzano".

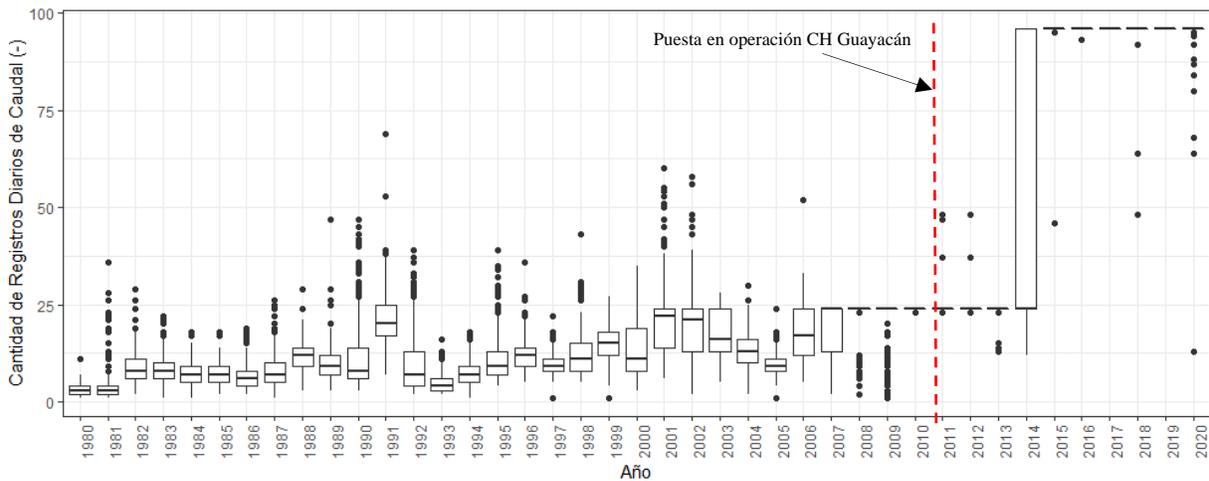


Figura 4.2-4: Boxplot de cantidad de registros diarios de caudal en estación fluviométrica “Río Maipo en El Manzano”.

La Figura 4.2-4 permite concluir que existen 3 subgrupos de frecuencia de registro de datos en el cauce. El primer subgrupo corresponde al periodo 1980-2007, donde existe alta variabilidad en la frecuencia de registro, con valores promedio inferiores a 24 registros diarios de caudal instantáneo. El segundo subgrupo corresponde al periodo 2008-2013, donde la frecuencia de registro se regulariza, consiguiendo 24 registros diarios de forma consistente. El tercer subgrupo corresponde al periodo 2015-2020, donde la cantidad de registros diarios aumenta a 96 registros diarios, es decir 1 registro cada 15 minutos.

A partir de los caudales horarios, se calcularon los índices de alteración hidrológica expuestos en las secciones 2 y 3 del presente documento, específicamente usando las ecuaciones 1, 2 y 3 planteadas en la Sección 2.2.

El indicador Richard-Baker se presenta en la. Se han considerado las temporadas de invierno o no riego (abril-septiembre) y la temporada de verano o riego (octubre-marzo). Se ha generado una línea roja punteada que denota la puesta en marcha de la CH Guayacán.

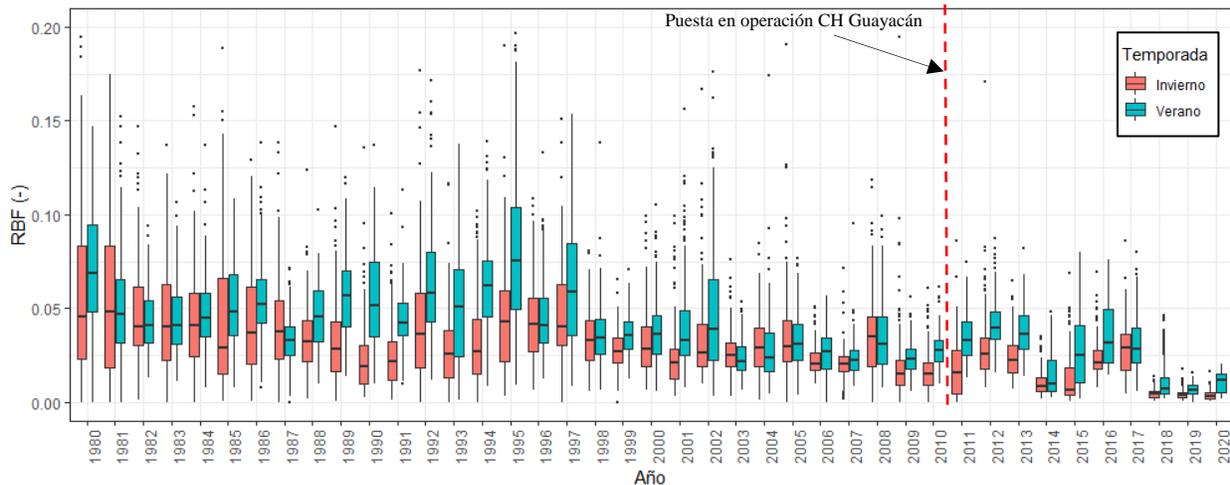


Figura 4.2-5: Boxplot de indicador Richard-Baker en "Río Maipo en El Manzano".

El grafico permite vislumbrar la correlación entre el valor del indicador y el régimen nival del cauce, con valores mayores del indicador en la temporada de verano.

El grafico no permite desarrollar a priori un argumento sobre la incidencia de la CH Guayacán en las fluctuaciones entre registros, fenómeno que debe captar el indicador RBF. Se puede apreciar que el valor y la dispersión del indicador se encuentran a la baja, con valores sumamente bajos en los últimos años.

La Figura 4.2-6 presenta las curvas de duracion del indicador Richard-Baker, diferenciado por temporada (invierno o verano) y periodo, previo o posterior a la puesta en marcha de la CH Alfalfal. Se han determinado las curvas considerando los subgrupos de frecuencia de registro establecidos anteriormente.

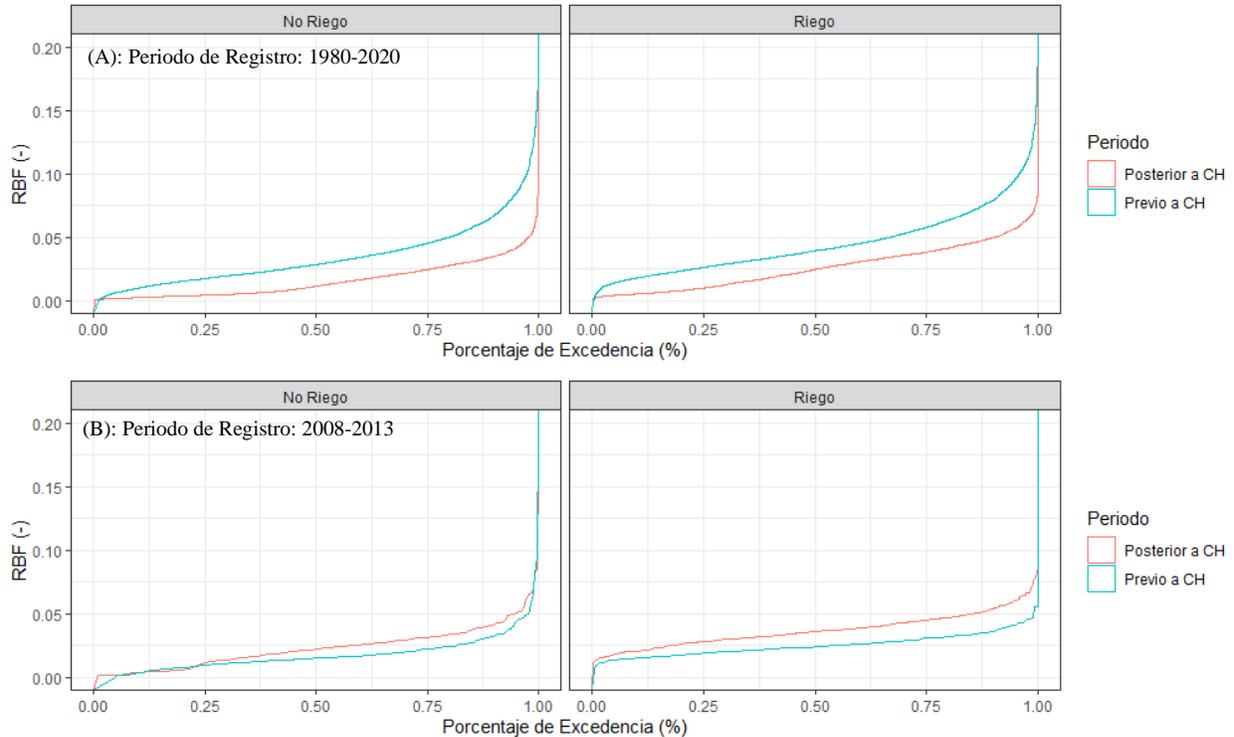


Figura 4.2-6: Curvas de duración de indicador Richard-Baker en "Río Maipo en El Manzano". (A) periodo de registro 1980-2020; (B) periodo de registro 2008-2013.

Al considerar el registro completo en la Figura 4.2-6 (A), se observa que tras el comienzo de operaciones de la CH Alfalfal, las fluctuaciones de caudal han disminuido de forma importante, tanto en la temporada de invierno como verano.

Al considerar el registro parcial, correspondiente al periodo 2004-2013 en la Figura 4.2-6 (B), podemos evidenciar que la CH Guayacán induce mayores fluctuaciones de caudal en ambas temporadas. La alteración se manifiesta más fuertemente en la temporada de verano. Este periodo es consecuente en su frecuencia de registro. El aumento en el indicador RBF permite vincular la puesta en marcha de la CH con un cambio importante en las fluctuaciones intradiarias de caudal, que pueden ser explicadas por rampas de subida y bajada en la CH, asociadas con el *hydropeaking*.

La variación significativa de los resultados a partir del periodo de estudio permite reforzar la noción de dependencia del indicador en la calidad y frecuencia de registro de los datos de caudal. A la fecha no se han encontrado estudio que permitan afirmar el grado de incertidumbre dentro del cálculo del indicador RBF a causa de registros incompletos de caudal, sin embargo resultaría provechoso con el fin de determinar la precisión del indicador y requerimientos básicos para su aplicación.

El indicador PTF se presenta en la Figura 4.1-7. Se han considerado las temporadas de invierno o no riego (abril-septiembre) y la temporada de verano o riego (octubre-marzo). Se ha generado una línea roja punteada que denota la puesta en marcha de la CH Guayacán.

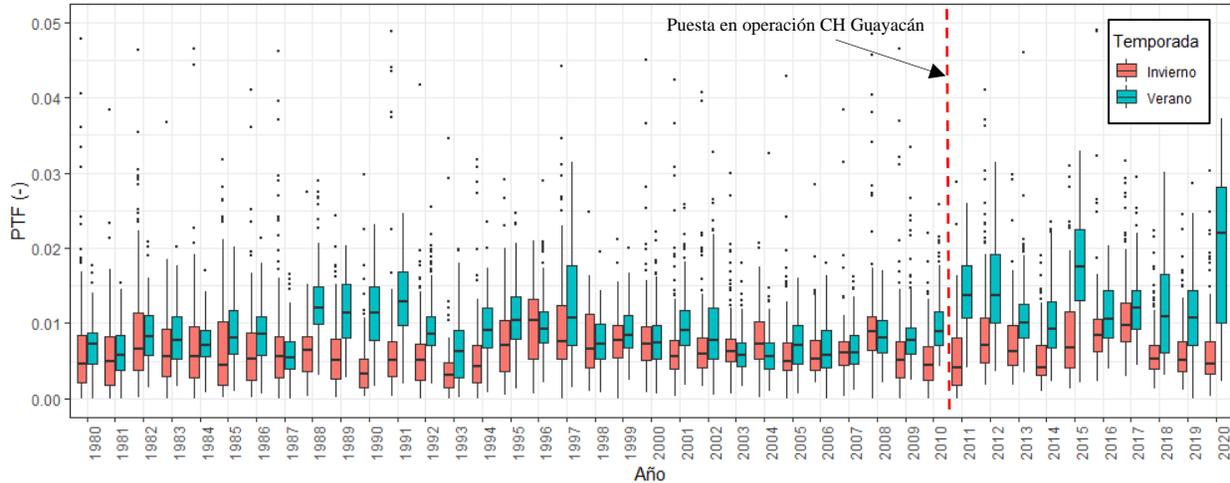


Figura 4.2-7: Boxplot de indicador PTF en "Río Maipo en El Manzano".

Se puede apreciar un aumento significativo en el valor del indicador PTF en los dos primeros años, principalmente en la temporada de verano, tras la puesta en marcha de la CH Alfalfal. Posterior a ello existe un aumento general en la dispersión del indicador, lo que indica que, si bien la mediana no ha sufrido variaciones importantes, existe una mayor cantidad de valores altos en temporada de verano.

La disponibilidad y frecuencia de los registros, considerando los años 2004 y 2014 como aquellos diferenciadores en la frecuencia de registro, no suponen un impacto general en la magnitud del indicador.

La Figura 4.2-8 presenta las curvas de duración del indicador PTF, diferenciado por temporada (invierno o verano) y periodo, previo o posterior a la puesta en marcha de la CH Alfalfal. Se han realizado las figuras considerando 2 grupos de control tal como se realizó previamente.

Se puede apreciar que el indicador PTF no se encuentra vinculado a la estacionalidad de la cuenca, como ocurre con el RBF. Los resultados se ven fuertemente influenciados por el periodo de registro analizado, donde el registro completo, permite concluir que tras la puesta en marcha de la CH Guayacán el indicador ha disminuido, por lo que el rango de caudal diario (diferencia entre caudal máximo y mínimo) ha disminuido. Considerando el registro parcial de datos, se puede evidenciar que la CH Guayacán no ha tenido un impacto en el rango de caudal diario observado en el cauce.

El indicador CDV se presenta en la Figura 4.2-9. Se han considerado las temporadas de invierno o no riego (abril-septiembre) y la temporada de verano o riego (octubre-marzo). Se ha generado una línea roja punteada que denota la puesta en marcha de la CH Guayacán.

La disponibilidad y frecuencia de los registros no suponen un impacto general en la magnitud del indicador. El indicador se encuentra vinculado a la estacionalidad de la cuenca estudiada. LA puesta en marcha de la CH Guayacán ha generado un impacto en la dispersión de los datos, aumentando de esa forma el indicador CDV, especialmente en la temporada de verano.

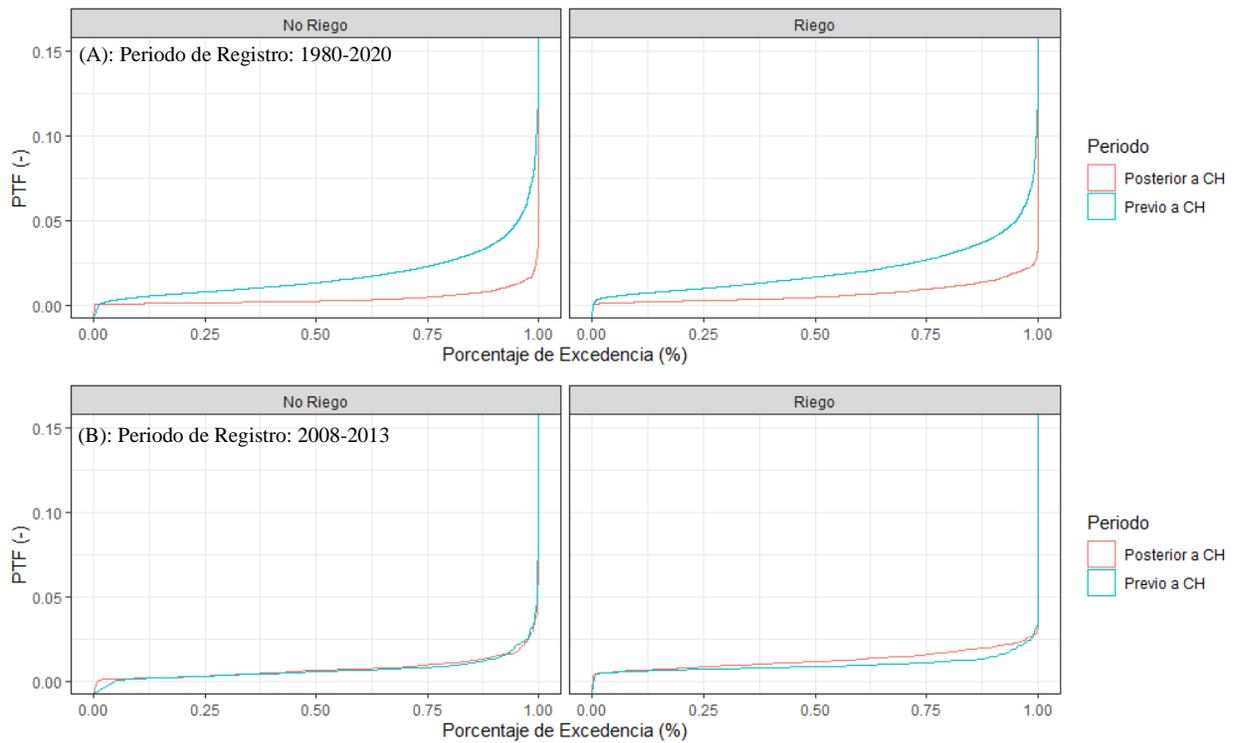


Figura 4.2-8: Curvas de duración de indicador PTF en “Río Maipo en El Manzano”. (A) periodo de registro 1980-2020; (B) Periodo de Registro 2008-2013.

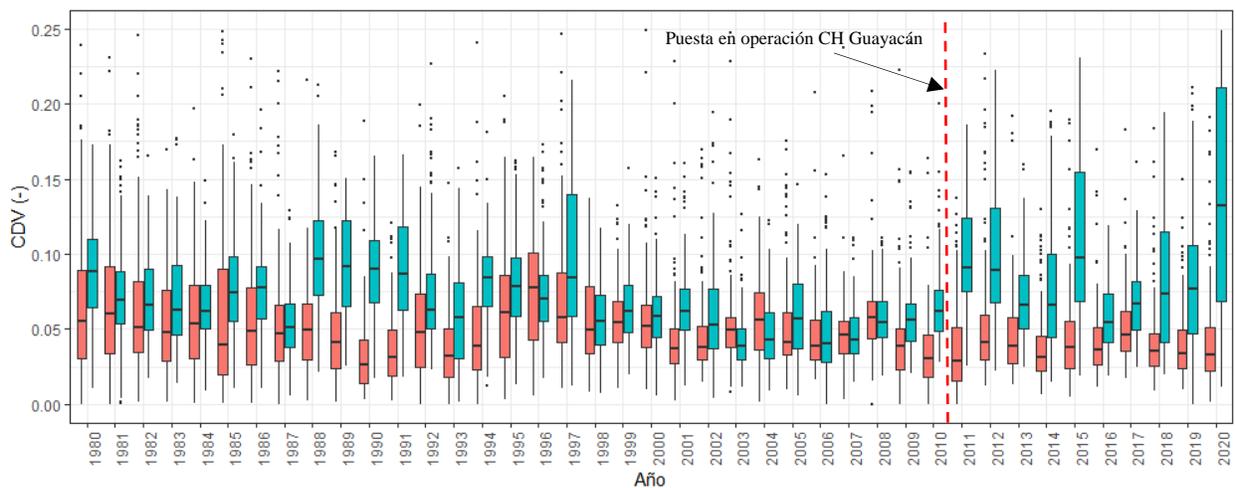


Figura 4.2-9: Boxplot de indicador CDV en “Río Maipo en El Manzano”.

La Figura 4.2-10Figura 4.1-10 presenta las curvas de duracion del indicador CDV, diferenciado por temporada (invierno o verano) y periodo, previo o posterior a la puesta en marcha de la CH Guayacán.

Al considerar tanto el registro completo, como el registro parcial, se observa que la puesta en marcha de la CH Guayacán supone un cambio importante en la dispersion de los registros intradiarios de caudal en la estacion fluviometrica “Río Maipo en El Manzano”. Este cambio se acrecenta fuertemente en la temporada de verano.

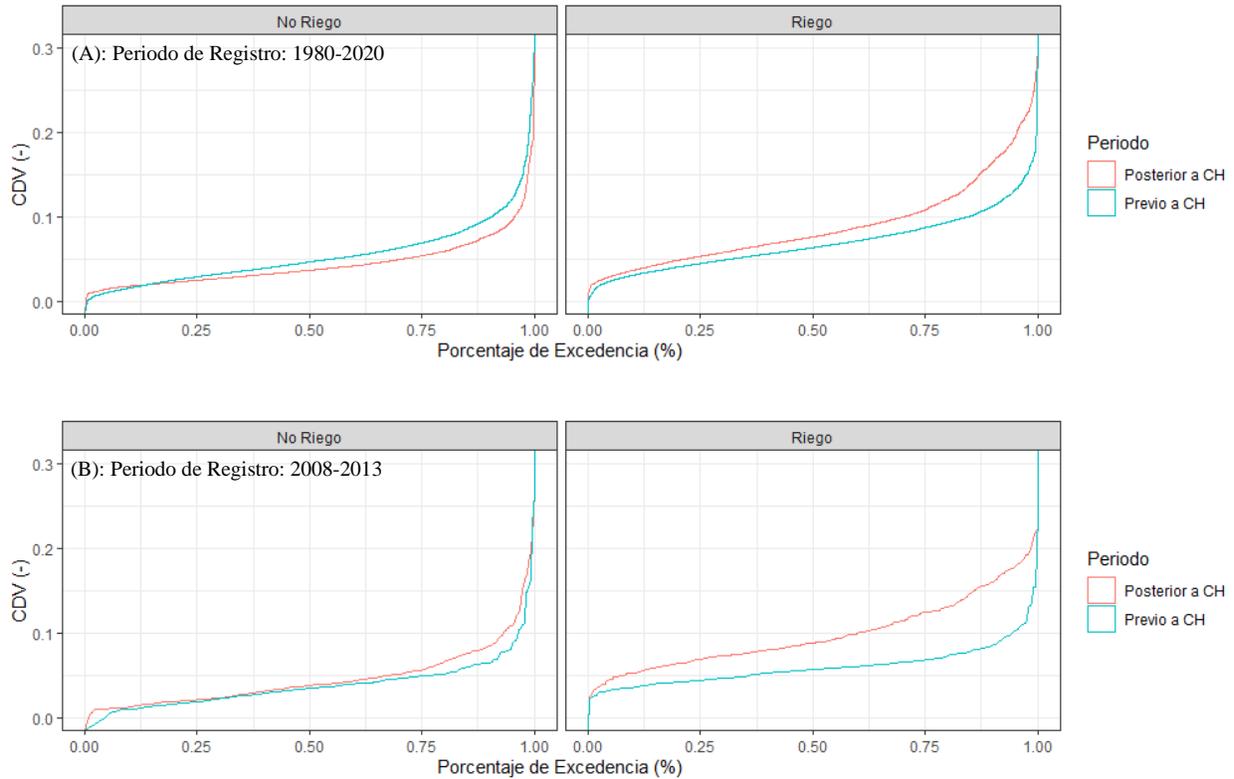


Figura 4.2-10: Curvas de duración de indicador CDV en “Río Maipo en El Manzano”. (A) periodo de registro 1980-2020; (B) periodo de registro 2008-2013.

El análisis ha permitido evidenciar la incidencia de la puesta en marcha de la CH Guayacán en el régimen del cauce. Al considerar el periodo de registro 2008-2013 se obtiene un alza en los tres indicadores considerados. El indicador RBF permite afirmar un aumento en las fluctuaciones de caudal registradas en la estación fluviométrica posterior a la CH Guayacán. El indicador PTF presenta un alza sutil en la temporada de verano únicamente. EL indicador CDV evidencia un aumento significativo en la dispersión del caudal tras la puesta en marcha de la CH, lo que puede encontrarse asociado a operaciones en bloque. Las operaciones en bloque no son correctamente registradas por el indicador RBF.

## 5 TOPOLOGÍA DEL SISTEMA

La construcción del PHAM supone, de acuerdo con lo estipulado en el EIA, grandes cambios en la topología de la línea de aguas de la cuenca del río Maipo. Como un primer paso en la elaboración de un modelo operacional que permita analizar el efecto del PHAM, se ha elaborado un diagrama topológico de la primera sección del río Maipo que incorpora el PHAM. El diagrama incluye nodos de balance en puntos de interés y arcos que conectan los nodos, siendo estos, cauces naturales o artificiales. Se definen además nodos de embalse, que contemplan almacenamiento. Además, se identifica de forma referencial la ubicación de elementos de interés y control, como estaciones y canales de riego.

El PHAM supone unir hidráulicamente el sistema de generación hidroeléctrica, originando un sistema en serie, que afecta múltiples subcuencas. La Figura 4.2-11 presenta la ubicación de las CHs en el sector de estudio considerando la puesta en marcha del PHAM. Se ha dispuesto con una línea punteada los túneles contemplados por el PHAM.

De acuerdo con Kuriqi et al., (2019), a medida que se incrementa la capacidad de almacenamiento y la distancia de restitución de las aguas extraídas, aumenta también el grado de alteración vinculada a la operación de la CH en cuestión. Los 74,6 kilómetros de túneles provocaran el desvío de las aguas de los cauces naturales, entre los que podemos mencionar, río Volcán, río Maipo, río Yeso y río Colorado. El PHAM considera además 2 cámaras de carga de dimensiones relevantes, 45.080 m<sup>3</sup> para la CH Alfalfal II y 300.000 m<sup>3</sup> para la CH Las Lajas. Estas capacidades de almacenamientos corresponden a 0,5 y 1,3 horas de operación a caudal de diseño de las CHs. Para este análisis no se ha tomado en consideración el volumen de los túneles y obras de conducción adicionales.

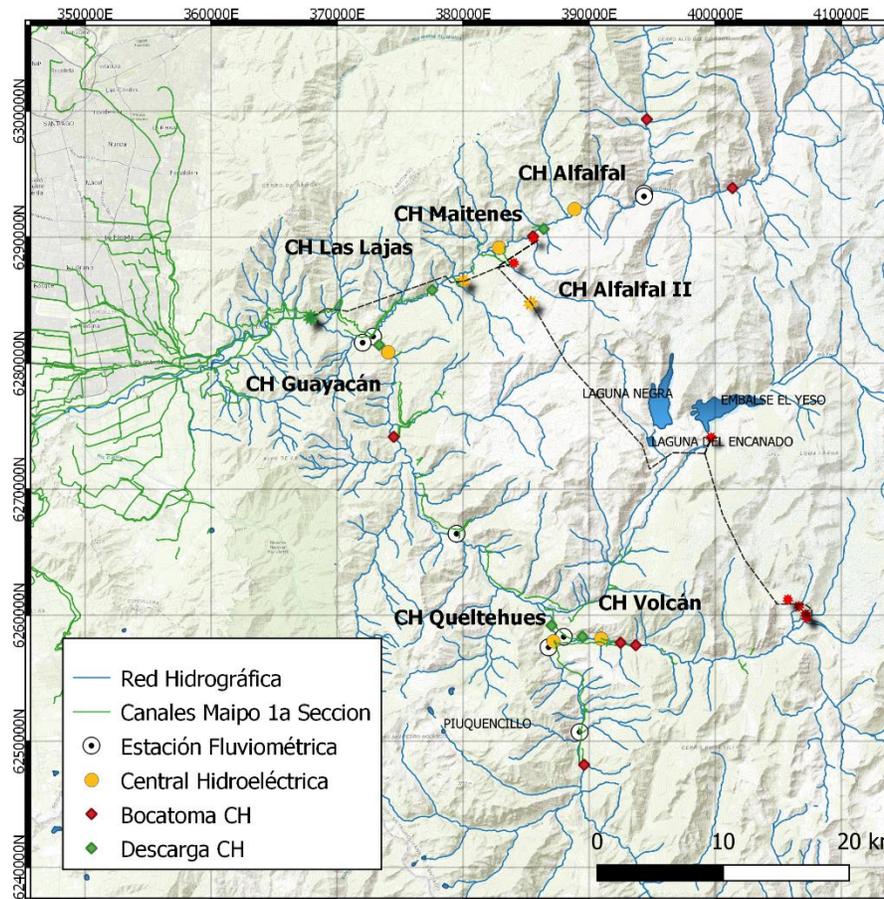


Figura 4.2-11: Ubicación de principales instalaciones con PHAM

A partir de la figura anterior, se presenta el esquema topológico de la línea de aguas del sistema estudiado sin considerar el PHAM en la Figura 4.2-12 y considerando su implementación en la Figura 4.2-13.

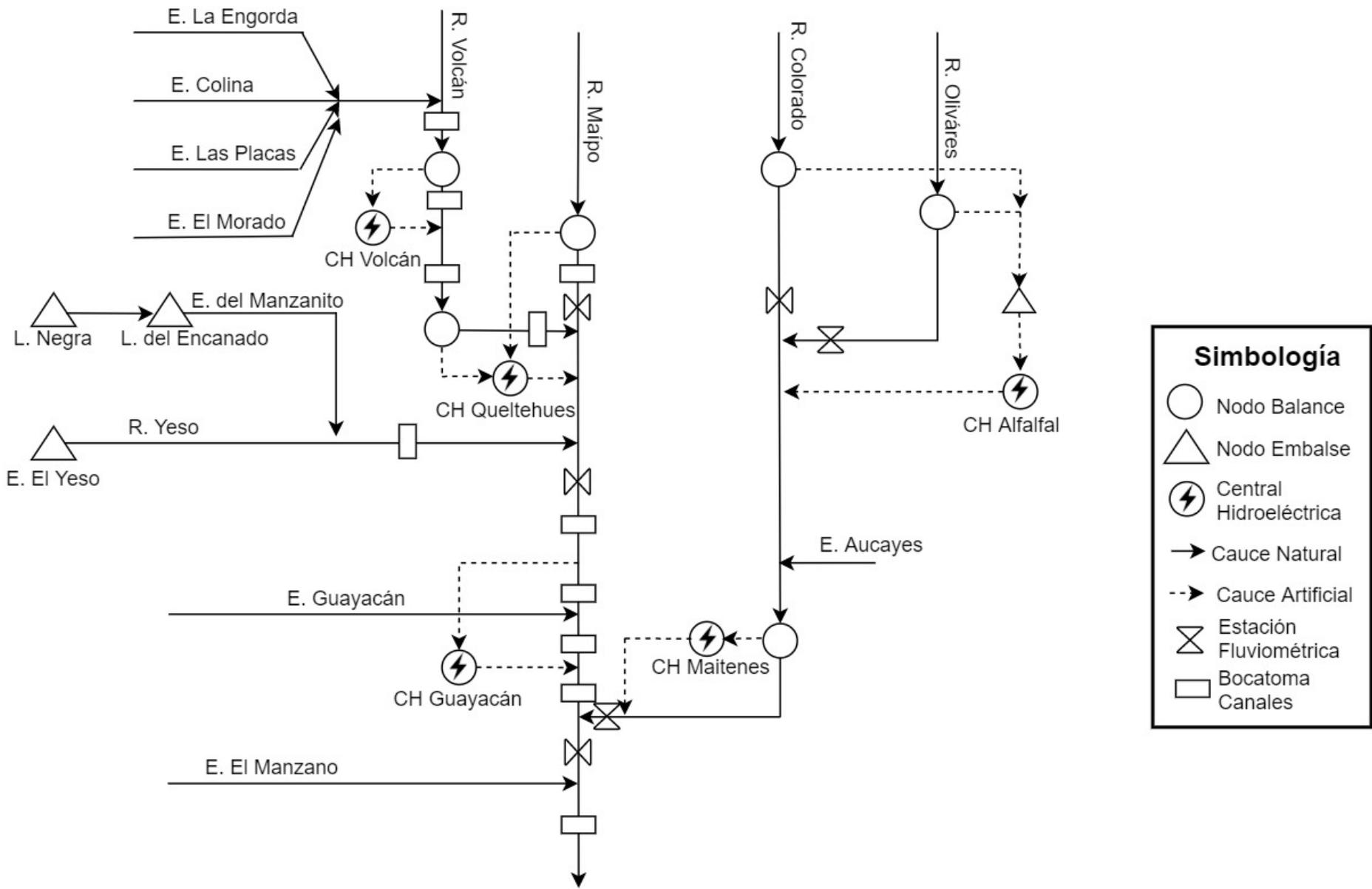


Figura 4.2-12: Topología de la zona de estudio sin PHAM.

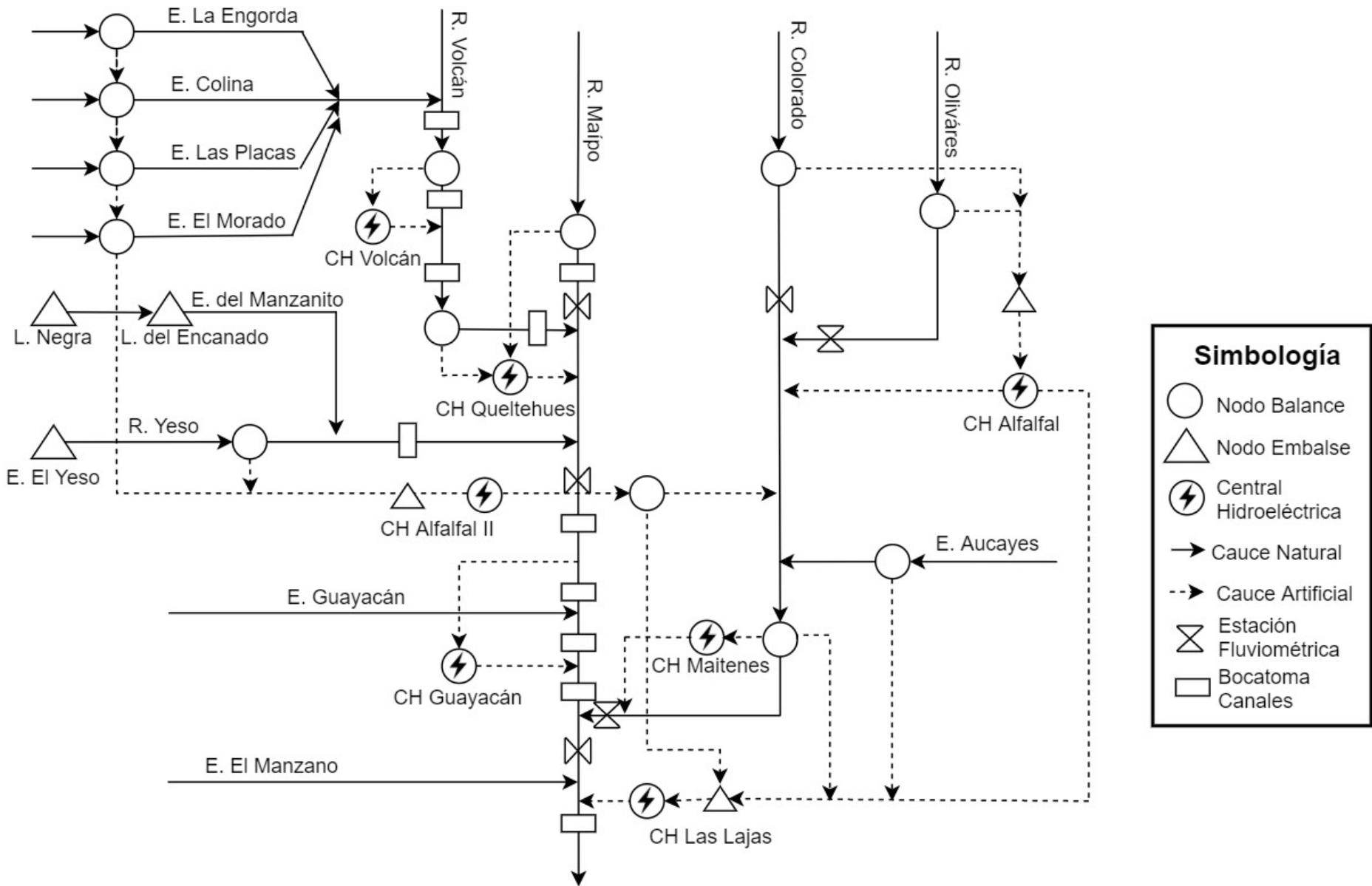


Figura 4.2-13: Topología de la zona de estudio con PHAM

Donde para los nodos se realiza el balance de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\sum \text{Cauces Afluentes}_i - \sum \text{Cauces Efluentes}_i + \Delta \text{Caudal} = 0 \quad (4)$$

La variación de caudal corresponde a la cuantificación de afluentes y efluentes no contemplados en el esquema general. Se compone principalmente de afluentes de cauces naturales intermedios y pérdidas en la conducción. El esquema tiene un objetivo ilustrativo, si se deseara realizar una modelación a partir del mismo la variación de caudal en cada nodo debe ser correctamente evaluada, así como sus supuestos.

Para los nodos de embalse y cámaras de carga, el balance se realiza de forma similar, pero adicionando la posibilidad de almacenamiento dentro del nodo. A continuación, se plantea la ecuación que rige a los nodos de embalse y cámaras de carga:

$$\sum \text{Cauces Afluentes}_i - \sum \text{Cauces Efluentes}_i + \Delta \text{Caudal} = \frac{\Delta \text{Almacenamiento}}{\Delta t} \quad (5)$$

Los nodos de embalse y cámaras de carga además presentan la restricción de almacenamiento máximo, dictado por la capacidad de embalsar de las distintas instalaciones.

Es importante considerar que, debido a la longitud de los tramos involucrados, realizar una modelación del sistema requiere comprender los tiempos de viaje a través arcos de gran longitud, a partir de la estimación de velocidades promedio de flujo y longitudes reales de los arcos en cuestión.

Finalmente, existen nodos que se encuentran sujetos a restricciones de operación definidas por caudales ecológicos y caudales de diseño de cauces artificiales. Dichas restricciones pueden ser visualizadas en la Tabla 2.4-1, Tabla 2.4-2 y Tabla 2.4-3.

El PHAM corresponde a un proyecto que irrumpe topológicamente los cauces de la primera sección del río Maipo en mayor magnitud que las CHs que se encuentran emplazadas actualmente, a causa de las extensas conducciones, visualizadas gráficamente en la Figura 4.2-11.

Los principales cauces afectados, al encontrarse entre los puntos de captación y restitución del PHAM, considerando como único resguardo los caudales ecológicos definidos en el EIA del proyecto son los siguientes: río Maipo, río Volcán, río Yeso y río Colorado (AES Gener, 2008). Así, además de los efectos asociados al hydropeaking aguas debajo de los puntos de restitución, es necesario evaluar las reducciones de caudal en los tramos intermedios.

Es importante además adicionar al análisis las disminuciones de caudal proyectadas a causa del cambio climático, restringiendo la operación del PHAM para cumplir con los caudales ecológicos definidos.

## 6 CONCLUSIONES

El trabajo realizado cumple con contribuir al análisis de la interferencia ocasionada por las CHs existentes y proyectadas, con otros usos del agua, en la primera sección del río Maipo. Los ejemplos encontrados y los análisis estadísticos realizados a las series de potencia generada por las CHs permiten concluir que existen horarios preferenciales para la generación, así como esquemas tipo bloque con rampas de subida y bajada de potencia generada, operación tipo *hydropeaking*. Se ha determinado que los cauces, en su condición actual, son sensibles a las operaciones de las CHs Alfalfal y Guayacán. A partir de los indicadores RBF, PTF, CDB se ha determinado un aumento en la alteración hidrológica del cauce debido a mayores fluctuaciones de caudal intradiario, dispersión de los datos de caudal y aumento del rango de caudales de forma. El PHAM supone irrupciones en grandes extensiones de distintos cauces pertenecientes a múltiples subcuencas, siendo las distancias entre los puntos de captación y restitución del orden de decenas de kilómetros.

Las CHs emplazadas en la zona de estudio tienen operaciones tipo *hydropeaking*, principalmente en períodos de alta disponibilidad de caudales, en verano. Se ha determinado que para la CH Alfalfal, este comportamiento es frecuente, definiéndose períodos de operación en punta en el horario 19:00-07:00. Se puede afirmar a través de las probabilidades de excedencia de las series de potencia que las CHs Alfalfal y Guayacán presentan mayores diferencias de generación entre los horarios punta y valle de forma sostenida en el tiempo. Para las CHs Queltehues, Volcán y Maitenes, la operación tipo *hydropeaking* no ha podido ser registrada como un fenómeno persistente, sino más bien como uno esporádico.

Para realizar una correcta evaluación del impacto de la hidroelectricidad, se propone imponer a través de legislación, instrumentos de control que permitan el registro de los caudales captados en las bocatomas, con el fin de modelar correctamente la operación de las CHs, considerando su capacidad de retención. De esta forma se puede evaluar precisamente la alteración inducida en el cauce a través de la captación y restitución de caudal.

Los análisis de los registros de caudal en los cauces permiten determinar alteración hidrológica intradiaria vinculada a la operación de las CHs Alfalfal y Guayacán, a través del aumento de los indicadores RBF, PTF y CDV considerados en el análisis. El análisis se encuentra condicionado por la información disponible y varía según el periodo de estudio seleccionado como representativo. Se ha establecido que al considerar registros extensos se contabiliza factores no deseados, generando ruido en el análisis.

La inconsistencia de los periodos de registro genera análisis contradictorios, por lo que la selección del periodo de estudio es un factor determinante en los resultados. Indicadores más sofisticados, que consideran umbrales para determinar *hydropeaking* (Barbalić et al, 2015) o análisis más detallados condicionando los resultados de acuerdo a las precipitaciones (Mazor et al, 2017)

permitirían analizar con mayor detalle la alteración hidrológica vinculada a la operación de las CHs.

En la literatura, no existe un análisis respecto a la incertidumbre en los indicadores a causa de los registros incompletos de series de caudal. La realización de este estudio permitiría cuantificar y controlar el error dentro de los resultados y por lo tanto en las conclusiones derivadas de estos. Tampoco existe una discusión acabada respecto a las diferencias resultantes al considerar los caudales instantáneos o los caudales medios horarios.

El PHAM es un proyecto que ocasionará una disminución sustancial del caudal en los sectores afectados de río Volcán, río Yeso, río Maipo y río Colorado. Dentro de las secciones afectadas se verán involucrados los usos de agua de riego y los ecosistemas dependientes de cauce. La esquematización del sistema, junto a la decisión de limitantes del sistema, sienta las bases para establecer en trabajos futuros las fluctuaciones correspondientes a la puesta en marcha del PHAM. Esto requiere la implementación de un modelo de operación en base a la topología definida en la Sección 4.3 del presente documento. Una correcta modelación a partir de dicho esquema permitirá prever las afectaciones reales de los usuarios del sistema en estudio, bajo distintos escenarios de evaluación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Haas, J. (2014), Análisis de interacciones a nivel horario entre centrales hidroeléctricas y eólicas en el Sistema Interconectado Central de Chile, Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- [2] Pérez-Díaz, J., Wilhelmi, J. Assessment of the economic impact of environmental constraints on short-term hydropower plant operation, *Energy Policy* 38 (2010), pp. 7960–7970.
- [3] Olivares, M., Haas, J., Palma-Behnke, R., Benavides, C. A framework to identify Paretoefficient subdaily environmental flow constraints on hydropower reservoirs using a gridwide power dispatch model, *Water Resources Research*, 10.1002/2014WR016215, (2015), pp. 3664-3680.
- [4] Escobar N. (2016), Análisis conceptual del efecto de un contraembalse como medida de mitigación de las fluctuaciones intradiarias de caudal inducidas por la operación de una central hidroeléctrica de embalse, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- [5] Genova P. (2016), Método para asignación optima entre usos in situ recreativos y usos extractivos en río Maipo, Chile, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- [6] Gonzalez J. (2017), Operación d embalses multipropósito: trade-offs entre producción agrícola e hidroelectricidad, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- [7] Baker, D., Richards, R., Loftus, T., Kramer, J. A new flashiness index: characteristics and applications to midwestern rivers and streams. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 40 (2004), pp.503- 522.
- [8] Poff, N.L., Zimmerman, J.K.H., , Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshw. Biol.* 55(2010), pp. 194e205.
- [9] Bruder, A., et al., A conceptual framework for hydropeaking mitigation, *Sci Total Environ* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.032>
- [10] Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central, Chile
- [11] Poff, N.L., Zimmerman, J.K.H., , Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshw. Biol.* 55(2010), pp. 194e205.

- [12] Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., & Garrote, L. (2019). Flow regime aspects in determining environmental flows and maximising energy production at run-of-river hydropower plants. *Applied Energy*, 256, 113980. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113980.
- [13]TAO, T., CHOCAT, B., LIU, S., & XIN, K. (2009). Uncertainty Analysis of Interpolation Methods in Rainfall Spatial Distribution—A Case of Small Catchment in Lyon. *Journal of Water Resource and Protection*, 01(02), 136–144. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2009.12018>
- [14] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Informe a la Nación: La Megasequía 2010-2015: Una Lección para el Futuro, 2015.
- [15] Barbalić, Darko & Kuspilić, Neven. (2015). Indicators of sub-daily hydrological alterations. *Tehnicki Vjesnik*. 22. 1345-1352. 10.17559/TV-20140811003920.
- [16] Sengupta, Ashmita & Adams, Stephen & Bledsoe, Brian & Stein, Eric & McCune, Kenneth & Mazor, Raphael. (2018). Tools for managing hydrologic alteration on a regional scale: Estimating changes in flow characteristics at ungauged sites. *Freshwater Biology*. 63. 10.1111/fwb.13074.
- [17]Dirección General de Aguas, Decretos declaración zona de escasez vigentes, disponible en línea: <https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/decretosZonas Escasez/Paginas/default.aspx>. Visitado el 06/06/2021.
- [18] Servicio de Evaluación Ambiental, Guías para la Evaluación de Impacto Ambiental, disponible en línea: <https://www.sea.gob.cl/documentacion/guias-evaluacion-impacto-ambiental>. Visitado el 02/04/2021.
- [19]CEPAL, La Economía del Cambio Climático en Chile, Gobierno de Chile, mayo 2012.
- [20] Dirección General de Aguas (DGA). Actualización de la Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Maipo, Santiago, Chile, 2015.
- [21] Ministerio de Energía de Chile. Análisis de Medidas de Mitigación para los Efectos de las Variaciones Intradurias de Caudal, Producto de la Generación de Punta, Concepción, Chile, 2015.
- [22] AES Gener S.A., Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, julio 2008.
- [23] Coordinador Eléctrico Nacional, 2021, Operación, <https://www.coordinador.cl/operacion/graficos/operacion-real/generacion-real-del-sistema/>. Visitado el 15/01/2021.