



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA PARA  
PROPUESTA DE MEJORAS EN LA PROGRAMACIÓN A LARGO PLAZO DE  
CENTRALES HIDROELECTRICAS EN CHILE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO

**YEREL ALEJANDRA MORALES PINO**

PROFESOR GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA

PROFESOR CO-GUÍA:  
MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SEBASTIÁN VICUÑA DÍAZ

SANTIAGO DE CHILE  
2016

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL  
GRADO DE: Mag. Cs. Ing., Menc. Recursos y  
Medio Ambiente Hídricos.  
POR: Yerel Morales Pino  
PROF. GUÍA: Ximena Vargas Mesa.**

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA PARA  
PROPUESTA DE MEJORAS EN LA PROGRAMACIÓN A LARGO PLAZO DE  
CENTRALES HIDROELECTRICAS EN CHILE**

En el marco de la planificación de operación de un sistema eléctrico con participación significativa de hidroelectricidad, existen varias variables que le dan al sistema un carácter estocástico, incluyendo las demandas, el precio de los combustibles y la incertidumbre hidrológica. En el sistema de programación a largo plazo (PLP) utilizado en Chile para la planificación de operación, sólo se aborda la incertidumbre hidrológica. En la actualidad la información hidrológica utilizada como entrada para PLP del sistema hidroeléctrico es de carácter histórico, utilizando según el horizonte de programación, años consecutivos, suponiendo que bajo esta premisa se incorporan intrínsecamente las correlaciones espaciales y temporales asociadas a los flujos. Asimismo, al momento de generar el árbol de escenarios hidrológicos, en cada intervalo dentro del horizonte de tiempo, no se considera la dependencia entre años hidrológicos y entre los meses de invierno - verano, es decir, no se indaga más a fondo en la autocorrelación de las series de tiempo hidrológicas.

El presente trabajo propone generar escenarios de caudales, para cada uno de los puntos de interés del Sistema Interconectado Central (SIC), como información de entrada a la PLP del sistema hidroeléctrico, con una manera distinta de abordar la incertidumbre hidrológica, incorporando las correlaciones espaciales y temporales y forzantes propias de la hidrología. El primer paso consiste en la estimación de caudales en cuencas representativas del sistema que abarquen régimen pluvial y nivopluvial, escogiendo para este caso la cuenca del río Maule en Armerillo; luego bajo el concepto de zona homogénea realizar transposición de caudales a cuencas que abastecen el SIC. Finalmente los escenarios de hidrología futura se obtienen a través de una metodología que incorpora las características del periodo hidrológico.

Por una parte se generaron series sintéticas de precipitación y temperatura a escala diaria, usando un algoritmo estocástico que considera el comportamiento del clima en una ventana de 30 años, separando la información en años normales, secos o húmedos; desde la perspectiva estadística, las series obtenidas pertenecen al mismo universo y representan el comportamiento de las forzantes climáticas en la zona analizada. Paralelo a ello, se calibró un modelo hidrológico en WEAP de la cuenca del Río Maule en Armerillo, donde los resultados obtenidos se consideran buenos, con valores de Nash-Sutcliffe entre 0,7 y 0,82 para cuencas en régimen natural, y valores superiores a 0,4 en cuencas utilizadas con fines agrícolas e hidroeléctricos. En la generación de series sintéticas de caudales semanales, se logra establecer bandas de incertidumbre por tipo de año (seco, normal o húmedo) para un horizonte de tiempo de 2 años con las diferentes combinaciones posibles, incorporando la dependencia que existe entre años consecutivos. Se considera que las bandas de incertidumbre generadas para cada escenario reflejan las tendencias de los caudales en cada punto analizado. Finalmente, para la evaluación de la transposición de caudales en la zona homogénea se seleccionó la cuenca del Estero Las Garzas para la modelación de la cuenca Río Achibueno en la Recova, fuera del área modelada. Los resultados de la transposición muestran una correlación de 0,8, considerado muy adecuado para estos fines.

**A mí amado hijo Héctor,**

*“Inundaste de luz mi vida con sólo mirarme a los ojos, minutos después de nacer.*

*Llenaste mi casa con tu risa de niño.*

*Alegras mi crepúsculo con una simple llamada.*

*Gracias por compartir conmigo tu mundo.”*

*(Carola Gowland)*

## **Agradecimientos**

En primer lugar a mi familia. Gracias a mi hijo Héctor, por darme la fuerza para seguir creciendo e intentar ser mejor cada día. A mi “mami”, por ser una madre 100% presente y estar en todas conmigo. A mi padre por apoyarme siempre en silencio. A mi hermano, por estar siempre dispuesto a colaborar. Sin duda Dios ha bendecido mi vida con una hermosa familia...los amo muchísimo.

A mis amigos, que en el paso por este magister se han multiplicado. A todos los del tercer piso...son tantos!!! De cada uno de ellos rescato su disposición a ayudar siempre, con la mejor voluntad y buena onda. A Yuri, porque su apoyo fue fundamental al inicio de este camino, definitivamente gracias por los consejos y por compartir tus experiencias de vida conmigo. A Lady y Xavier, por tantas risas, llantos y karaokes compartidos, a pesar de la distancia están siempre en mi corazón. A José Miguel por darle el toque de bullying a esta experiencia.

A mis amigos de la U. de Valparaíso. A Wendy por “impulsarme” a tomar este desafío. A Alejandro, por su apoyo, su sentido del humor y por esta gran amistad. A Cecilia, por sus consejos. Y a todos los que han estado conmigo...Cony, Tarek, Sergio y Rodrigo.

A esa persona que llegó a mi vida y puso sus coordenadas de referencia justo en mi corazón, gracias por ponerle gotitas de amor a mis días.

A Ximena Vargas y Marcelo Olivares, por su labor como profesores guía de este trabajo, por la oportunidad que me brindaron, por su paciencia y preocupación más allá de la labor docente. Gracias profesora Ximena por todos los consejos y apoyo en momentos difíciles...los tendré siempre presente.

A Jacqui, por su preocupación constante y sus palabras de apoyo cada vez que tenía un día difícil.

A los profesores de la División de Recursos y Medio Ambiente Hídrico del Departamento de Ingeniería Civil y a los profesores de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, ha sido una gran experiencia el paso por sus aulas.

Al Centro de Cambio Global UC, específicamente a Sebastián Vicuña, por facilitar la conceptualización de la cuenca Maule en Armerillo en el programa WEAP y en especial a David Poblete, por su apoyo en la calibración del modelo, su conocimiento fue de gran ayuda.

# Tabla de Contenidos

<b>CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1    MOTIVACIÓN .....	1
1.2    OBJETIVOS .....	2
1.3    ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO .....	3
<b>CAPÍTULO 2 : REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1    GENERACIÓN SERIES SINTÉTICAS FORZANTES METEOROLÓGICAS.....	4
2.1.1    Generadores climáticos .....	4
2.1.2    Método estocástico de precipitación diaria.....	4
2.1.3    Método estocástico de temperaturas extremas diarias.....	5
2.1.4    Construcción de series sintéticas.....	5
2.1.4.1    Precipitaciones .....	5
2.1.4.2    Temperatura .....	7
2.2    MODELACIÓN HIDROLÓGICA .....	9
2.2.1    Índices de ajuste de la modelación hidrológica .....	10
2.2.1.1    Coeficiente de Nash-Sutcliffe.....	10
2.2.1.2    Coeficiente de Nash Sutcliffe logarítmico.....	11
2.2.1.3    Coeficiente PBIAS .....	11
2.2.1.4    Coeficiente R <sup>2</sup> .....	11
2.2.2    Modelo WEAP .....	12
2.2.3    Variables involucradas.....	12
2.2.4    Transposición de caudales .....	14
<b>CAPÍTULO 3 : METODOLOGÍA .....</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO 4 : ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>18</b>
4.1    CUENCA DEL RÍO MAULE .....	18
4.2    INFORMACIÓN DISPONIBLE .....	20
4.2.1    Información meteorológica .....	21
4.2.3    Información fluviométrica .....	22
4.2.4    Preprocesamiento de la información.....	23
4.2.4.1    Precipitaciones .....	23
4.2.4.2    Temperaturas.....	24
<b>CAPÍTULO 5 : MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....</b>	<b>26</b>
5.1    CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	26
5.2    RESULTADOS CALIBRACIÓN.....	29
5.3    RESULTADOS VALIDACIÓN .....	38
5.4    ELECCIÓN CUENCA PARA TRANSPOSICIÓN DE CAUDALES .....	45
5.5    IDENTIFICACIÓN CORRELACIONES CON SUBCUENCAS MODELADAS .....	46
5.6    RESULTADOS TRANSPOSICIÓN DE CAUDALES.....	48
5.7    GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS DE CAUDALES .....	49
5.7.1    Generación series sintéticas de precipitación y temperatura .....	49
5.7.2    Generación series sintéticas de caudales .....	54
<b>CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
<b>CAPÍTULO 7 : CONCLUSIONES Y COMENTARIOS .....</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO 1: VARIACIÓN BANDA INCERTIDUMBRE SEGÚN AÑO DE INICIO.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO 2: ESTADÍSTICA DE LAS SERIES SIMULADAS Y OBSERVADAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA.....</b>	<b>87</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Elementos hidrológicos modelados en WEAP (Centro de Cambio Global, 2009) .....	13
Figura 3-1: Metodología para la generación de series sintéticas de caudales para el Sistema Eléctrico .....	16
Figura 4-1: Sistema Maule Alto - ubicación estaciones meteorológicas y fluviométricas. ....	19
Figura 4-2: Precipitaciones medias mensuales registradas en estación Armerillo. Período1984-2013 .....	19
Figura 4-3: Curva de variación estacional Río Maule en Armerillo. Período1984-2013.....	20
Figura 4-4: Distribución estaciones fluviométricas en área de estudio según información de Tabla 4-3. ....	23
Figura 4-5: Análisis de frecuencia – Distribución Pearson - precipitaciones duración 1día - julio .....	24
Figura 4-6: Análisis de frecuencia – Distribución Pearson – temperaturas máximas diarias julio .....	25
Figura 5-1: Conceptualización cuencas Estero Las Garzas y Claro en San Carlos en WEAP.....	26
Figura 5-2: Conceptualización de la cuenca en el modelo WEAP.....	28
Figura 5-3: Resultados proceso de calibración en la cuenca Estero Las Garzas.....	30
Figura 5-4: Resultados proceso de calibración en la cuenca Río Claro en San Carlos .....	31
Figura 5-5: Resultados proceso de calibración en la cuenca Río Melado en La Lancha .....	32
Figura 5-6: Resultados proceso de calibración en la cuenca Río Maule en los Baños.....	33
Figura 5-7: Resultados proceso de calibración en la cuenca Afluente a Laguna Invernada. ....	34
Figura 5-8: Resultados proceso de calibración en Canal Bocatoma Central Pehuenche .....	35
Figura 5-9: Resultados proceso de calibración en la cuenca Río Maule en Armerillo .....	36
Figura 5-10: Resultados proceso de validación en la cuenca Estero Las Garzas.....	38
Figura 5-11: Resultados proceso de validación en la cuenca Río Claro en San Carlos. ....	39
Figura 5-12: Resultados proceso de validación en la cuenca Río Melado en la Lancha.....	40
Figura 5-13: Resultados proceso de validación en la cuenca Río Maule en Los Baños. ....	41
Figura 5-14: Resultados proceso de validación en la cuenca Afluentes Laguna Invernada.....	42
Figura 5-15: Resultados proceso de validación en la cuenca Canal Bocatoma Central Pehuenche.....	43
Figura 5-16: Resultados proceso de validación en la cuenca Río Maule en Armerillo.....	44
Figura 5-17: Plano acceso proyecto hidroeléctrico Achibueno.....	46
Figura 5-18: Correlación Ln_Q Río Claro en San Carlos y Río Achibueno en La Recova .....	47
Figura 5-19: Correlación Ln_Q Río Melado en la Lancha y Río Achibueno en La Recova .....	47
Figura 5-20: Correlación Ln_Q Estero Las Garzas y Río Achibueno en La Recova.....	48
Figura 5-21: Serie de tiempo caudales modelados y observados estación Río Achibueno en La Recova...	49
Figura 5-22: Distribución de las precipitaciones medias diarias observadas (_O) y simuladas (_S).....	50
Figura 5-23: Distribución de las precipitaciones medias diarias observadas (_O) y simuladas (_S).....	51
Figura 5-24: Distribución de las temperaturas medias diarias observadas (_O) y simuladas (_S) .....	52
Figura 5-25: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Melado en La Lancha (Año 1 – Seco) .....	55
Figura 5-26: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Canal Bocatoma Central Pehuenche (Año 1 – Seco) .....	56
Figura 5-27: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Maule en Armerillo ....	57
Figura 5-28: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Melado en La Lancha (Año 1 – Normal) .....	58
Figura 5-29: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Canal Bocatoma Central Pehuenche (Año 1 – Normal).....	59
Figura 5-30: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Maule en Armerillo (Año 1 – Normal) .....	60
Figura 5-31: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Melado en La Lancha (Año 1 – Húmedo) .....	61
Figura 5-32: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Canal Bocatoma Central Pehuenche (Año 1 – Húmedo) .....	62

Figura 5-33: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Maule en Armerillo (Año 1 – Húmedo) .....	63
Figura 6-1: Generación hidroeléctrica diaria Central Pehuenche.....	66
Figura 6-2: Generación hidroeléctrica diaria Central Isla .....	66
Figura 6-3: Generación hidroeléctrica diaria Central Colbún .....	67

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1: Parámetros para generación de precipitación estación Armerillo.....	6
Tabla 4-1: Estaciones de precipitaciones en el Sistema Maule Alto.....	21
Tabla 4-2: Estaciones de temperaturas extremas en el Sistema Maule Alto.....	21
Tabla 4-3: Estaciones fluviométricas para Sistemas Maule Alto.....	22
Tabla 5-1: Información bandas de elevación en cuencas seleccionadas.....	27
Tabla 5-2: Calidad dela información estaciones fluviométricas .....	29
Tabla 5-3: Resumen de los indicadores de eficiencia para todas las cuencas calibradas.....	37
Tabla 5-4: Resumen de los indicadores de eficiencia para todas las cuencas validadas.....	45
Tabla 5-5: Clasificación de tipo de año según precipitación anual periodo 1983-2015.....	53
Tabla 5-6: Secuencias de tipo de año para la generación de series sintéticas de caudales.....	54

# **Capítulo 1: Introducción**

## **1.1 Motivación**

En la actualidad la energía eléctrica es tema de preocupación nacional, enmarcado principalmente en el contexto de un fuerte crecimiento de demanda energética, incrementos en costos de combustibles y avances en energías renovables – limpias, pero fluctuantes. Los sistemas eléctricos se enfrentan a nuevos retos económicos, ambientales y de seguridad de suministro. La matriz energética del país está compuesta principalmente por energía térmica e hidroeléctrica. En el caso particular de la energía hidroeléctrica, esta representa 42% de la matriz energética (CDEC-SIC) y su representatividad sigue siendo significativa dentro del Sistema Interconectado Central (SIC) donde, en promedio, considerando el periodo 2013-2014, constituye un 41.6% del total de energía generada.<sup>1</sup>

Hoy en día, la programación de producción energética para un sistema hidrotérmico (conformado principalmente por centrales hidroeléctricas y térmicas) como el SIC consiste en definir el nivel de generación para cada una de las centrales que componen el sistema, buscando minimizar el costo global actualizado de operación y racionamiento, cubriendo la demanda de energía con un determinado nivel de seguridad; todo esto para un horizonte de tiempo que depende del tipo de programación (corto o largo plazo) donde, además, producto de la existencia de un embalse con una capacidad de regulación interanual (Lago Laja), se considera como mínimo un horizonte de tiempo de análisis de al menos 2 años de operación futura<sup>2</sup>.

La potencia hidroeléctrica instalada dentro del SIC está asociada tanto a centrales de pasada como a embalses con un 17,39% y 24,57% de participación, respectivamente<sup>1</sup>. En el caso de los embalses, el despacho queda directamente relacionado con el tiempo y las decisiones que se tomen en el presente influyen necesariamente en las condiciones futuras (Palacios, 2004). A esto se suma que uno de los principales problemas de la generación a través de esta fuente radica en la disponibilidad del recurso y a su vez, la seguridad asociada a dicho caudal. A pesar de que en la actualidad se dispone de una gama de herramientas que permiten el pronóstico de caudales, aún no existe un mecanismo que permita predecir con certeza los caudales en un año cualquiera. Lo antes mencionado conduce a que la operación del sistema eléctrico le asigne una alta consideración al valor que puede tener el agua bajo distintos escenarios futuros.

Actualmente, la coordinación hidrotérmica en el SIC, se realiza a través de dos modelos de programación, uno a corto plazo (PCP) donde el horizonte temporal es de carácter semanal y otro de largo plazo (PLP) donde el horizonte temporal involucra 10 años de simulación. Cabe destacar que el modelo multinodal-multiembalse de operación de sistemas hidrotérmicos PLP, utiliza el método de optimización - simulación conocido como programación dinámica dual estocástica (Pereira & Pinto, 1989), que considera simultáneamente las restricciones de transmisión y de balance hídrico, generando una función que permite minimizar el costo esperado de operación y falla del sistema. Por otra parte, el modelo de corto plazo es de carácter determinístico y se realiza en la primera etapa del horizonte semanalmente (4 semanas), con una verificación del llenado de

---

<sup>1</sup> Reporte Anual 2014 CDEC-SIC.

<http://www.cdecsic.cl/wp-content/uploads/2015/07/reporte-anual-CDECSIC-correcciones.pdf?f8b8ed>

<sup>2</sup> Anuario CDEC-SIC, Estadísticas de Operación CDEC-SIC 2013.

<http://www.cdec-sic.cl/wp-content/uploads/2014/07/Anuario2014.pdf>

la curva de carga a nivel horario, permitiendo este procedimiento realizar una programación diaria y un despacho de carga instantáneo sobre la base del costo de producción de cada una de las unidades generadoras del sistema, ya sea ésta una central térmica o una hidráulica<sup>2</sup>.

En los modelos utilizados para la programación tanto a corto como a largo plazo, el problema de la aleatoriedad hidrológica no ha sido tratado con rigurosidad, ya que la hidrología se sustenta en algunas hipótesis básicas, como son la independencia estadística de los caudales entre años hidrológicos y entre estaciones, sin indagar más a fondo en las propiedades estadísticas de las series de tiempo hidrológicas. En este estudio, el enfoque está centrado en la programación a largo plazo, ya que la programación de corto plazo es de carácter determinístico y utiliza una única serie de caudales afluentes al punto de interés (Avilés, 2011).

En el presente trabajo se realiza un análisis exhaustivo de las variables y fenómenos hidrológicos que influyen en el comportamiento de las series de caudales, con el fin de generar series sintéticas que mantengan la relación espacial y temporal que tiene esta variable, buscando incorporar de manera implícita los impactos que generan fenómenos climáticos como ENSO y la oscilación decadal del Pacífico (Faber, 2001), de manera tal de entregar información de entrada de mayor confiabilidad a la programación de largo plazo del sistema eléctrico (Faber, 2001, Alemany et al<sup>3</sup>) y así abordar la incertidumbre asociada a la disponibilidad del recurso ante los diferentes escenarios (húmedo, normal o seco) que se puedan producir. La generación de caudales se realiza a través del modelo WEAP, para una cuenca (pluvial y nivopluvial) que abastece el SIC, para posteriormente mediante el concepto de homogeneidad (Rubio, 2010) realizar la transposición de estas series a las otras cuencas pertenecientes al sistema (André, 2009). Al incorporar los fenómenos climáticos mediante un método probabilístico (Faber, 2001) se logra obtener los diferentes escenarios que componen la información de entrada para la programación a largo plazo de la generación hidroeléctrica.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es mejorar la representación de la incertidumbre hidrológica en el modelo de programación de largo plazo del SIC, mediante la determinación de variables hidrológicas preponderantes dentro de un modelo de generación de caudales.

Los objetivos específicos se mencionan a continuación:

- Generar series de caudales en cuencas de distinto régimen mediante la aplicación de un modelo hidrológico, las que serán utilizadas como base para obtener los escenarios de entrada en la programación de largo plazo de las centrales hidroeléctricas.
- Elaborar una metodología que permita determinar los escenarios de caudales que serán utilizados como entrada para la programación a largo plazo.
- Proponer una metodología que permita realizar el traspaso de información fluviométrica de las cuencas modeladas hidrológicamente a cuencas que se encuentren dentro de una zona homogénea.

---

<sup>3</sup> <http://www.argencon.org.ar/sites/default/files/069.pdf>

### **1.3 Organización del documento**

A continuación se describen brevemente los capítulos que forman parte de este informe.

En el capítulo 2, se presenta una revisión bibliográfica, donde se muestra el proceso y las expresiones utilizadas para la generación de series sintéticas de precipitación y temperatura. Junto con lo anterior se entrega un resumen sobre las tendencias en el ámbito de la modelación hidrológica y de la transposición de caudales en cuencas no controladas. Se entrega además una descripción del modelo hidrológico WEAP seleccionado para este estudio.

En el capítulo 3, se presenta la metodología, donde se realiza una breve descripción de los procesos involucrados para llevar a cabo este trabajo, y como se conectan entre sí para cumplir con los objetivos planteados.

En el capítulo 4, asociado a la zona de estudio, se muestran las principales características del área analizada, como detalles físicos de la cuenca y su clima. Además, se indican las estaciones meteorológicas y fluviométricas con sus respectivos años de vigencia y registros disponibles para esta investigación.

En el capítulo 5, referente a la modelación hidrológica, se muestran los resultados obtenidos al calibrar las diferentes subcuenca que componen el área de estudio y su respectiva validación. También se incluye la elección del punto de interés para transposición de caudales y los resultados obtenidos en este proceso, para finalmente entregar los resultados de series sintéticas de caudales en los diferentes puntos de interés del SIC.

En el capítulo 6, asociado al análisis de resultados, se lleva a cabo una descripción crítica sobre los resultados obtenidos en términos de generación de series sintéticas de caudales, y cuál es su real utilidad en el Sistema Eléctrico a nivel país.

En el capítulo 7, referente a las conclusiones y recomendaciones, se realiza una síntesis en función del análisis de resultados indicando las ventajas y desventajas cuantitativas de aplicar esta metodología y como se espera que podría impactar en el funcionamiento del Sistema Hidroeléctrico en el país.

## **Capítulo 2: Revisión Bibliográfica**

### **2.1 Generación series sintéticas forzantes meteorológicas**

La generación de series sintéticas es una alternativa ampliamente utilizada cuando los registros históricos son escasos o cuando se requiere información futura, sin ser considerada pronóstico. Una de las herramientas disponible para lo antes mencionado son los generadores climáticos, los cuales permiten obtener series de tiempo asociadas a variables climáticas para diferentes escalas de tiempo, según el programa utilizado y el método para la obtención de parámetros necesarios (Soltani, 2003).

A continuación se presentan las diferentes alternativas de generadores climáticos que existen en la actualidad y se analiza la metodología que utilizan para el cálculo de las variables de interés, es decir, precipitación y temperatura.

#### **2.1.1 Generadores climáticos**

Este tipo de modelos data de años atrás, considerando en un comienzo problemas simples como la ocurrencia de un día húmedo o seco (Williams, 1952; Gabriel et al, 1962). Posteriormente entre los años 1980 y 1990 comenzaron a tomar relevancia, generándose modelos no solo capaces de definir la ocurrencia de la precipitación, sino determinando a su vez intensidades de precipitación, temperaturas extremas y radiación (Gen, 1986; Richardson et al., 1984), con mirar a ser utilizados tanto en hidrología, como en agricultura o para completar información estadística utilizada para diferentes fines. Desde los años 90 en adelante se ha incorporado en los generadores climáticos (GC) la generación de otras variables relevantes a nivel meteorológico, como lo son humedad relativa o velocidad del viento, entre otros (Pickering et al., 1994; Hutchinson, 1995) como también la posibilidad de utilizar información satelital de las diferentes variables antes mencionadas, lo que se transforma en una ventaja principalmente en zonas con baja cobertura de estaciones meteorológicas (Schuol et al., 2007; Harris et al., 2013).

Las diversas alternativas de GC permiten, dentro de sus múltiples usos, la generación de series sintéticas de longitud indefinida para las diferentes variables meteorológicas, proponiendo diferentes métodos para su estimación, los cuales serán utilizados y ajustados en el presente trabajo para definir una alternativa de GC que se ajuste a las condiciones meteorológicas de la zona analizada.

#### **2.1.2 Método estocástico de precipitación diaria**

La precipitación es un proceso definido por 2 variables, la ocurrencia y la intensidad del evento de lluvia. Lo primero que se debe definir es la ocurrencia, es decir, si el día simulado está asociado a un día húmedo o seco, y con dicha información ya es posible abordar la segunda variable relacionada con la cantidad de lluvia que se produjo durante el evento.

Para ambas variables la literatura presenta alternativas que han sido evaluadas en diferentes zonas y condiciones, entregando resultados favorables. Si se trata de la ocurrencia, uno de los métodos ampliamente utilizados corresponde a cadena de Markov de primer orden (Gabriel et al., 1962; Gen, 1986), determinando la condición de lluvia o no lluvia; una vez determinado esto es necesario simular la intensidad del evento, donde una de las distribuciones probabilísticas más utilizadas es

la distribución Gamma de dos parámetros (Wilks, 1999), ya que posee mayor flexibilidad para ajustarse a las características meteorológicas de diversos lugares.

### 2.1.3 Método estocástico de temperaturas extremas diarias

La temperatura es una forzante en la que existen condiciones extremas que se encuentran relacionadas con otros procesos hidrológicos, como las precipitaciones o derretimiento de nieve en el caso de cuencas nivales o mixtas.

El análisis estadístico de esta variable hace distinciones principalmente en sus valores máximos, los cuales varían para los días húmedos o secos. La literatura presenta alternativas que permiten calcular los estadígrafos de cada uno de los grupos de esta variable, las que han sido utilizadas en diversos generadores climáticos (Richardson et al., 1984; Pickering et al., 1994). Los valores calculados permiten determinar los parámetros necesarios para la distribución probabilística que represente de mejor manera el comportamiento de esta forzante meteorológica en la zona de estudio.

### 2.1.4 Construcción de series sintéticas

#### 2.1.4.1 Precipitaciones

Como se mencionó en el punto 2.1.2, la generación sintética de estas series pasa por dos etapas, la ocurrencia de precipitación y la intensidad del evento. Para determinar la ocurrencia de la lluvia se utiliza una cadena de Markov de primer orden, proceso aplicado en diferentes generadores climáticos (Gen, 1986; Pickering et al., 1994; Schuol et al., 2007).

Considerando que  $X_0, X_1, X_2, \dots, X_n$  son variables aleatorias distribuidas de manera uniforme que solo pueden tomar valores 0 y 1 con probabilidad uno, donde:

$$X_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n - \text{ésimo día es seco} \\ 1 & \text{si } n - \text{ésimo día es húmedo} \end{cases} \quad (2.1)$$

Por lo tanto la probabilidad del estado futuro queda definida como:

$$\begin{aligned} P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_0 = x_0) \\ = P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Lo anterior indica que la probabilidad de que un día sea húmedo o seco depende solo de las condiciones del día anterior (húmedo o seco). Por lo tanto el proceso estocástico asociado a  $\{X_n\}$ ,  $n=1,2,\dots$ , es una cadena de Markov.

Dado que en este caso el problema presenta 2 estados, húmedo o seco, es posible considerar la siguiente matriz de transición:

$$\begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix} \quad \text{Donde } P_{ji} = P(X_{1=j} | X_{0=i}), \text{ con } i, j=0, 1 \text{ respectivamente.}$$

Por lo tanto  $P_{11}$  corresponde a la probabilidad de transición de día húmedo a día húmedo, mientras que  $P_{01}$  indica la probabilidad de día seco a día húmedo. Estas probabilidades se calculan a nivel

mensual en cada estación meteorológica mediante los registros históricos. Las probabilidades complementarias asociadas a la ocurrencia de un día seco se determinan por  $P_{00} = 1 - P_{01}$  y  $P_{10} = 1 - P_{11}$ .

En este caso la notación utilizada corresponde a la expresada en Olave (2014) donde día húmedo es H y día seco es S, por lo tanto las probabilidades de transición quedan expresadas como:

- $P(HH)$ : Probabilidad de día húmedo dado que el día anterior fue húmedo.
- $P(HS)$ : Probabilidad de día húmedo dado que el día anterior fue seco.

Como se mencionó anteriormente las probabilidades de transición se determinan mensualmente, entonces para generar las series de precipitación se requieren 24 parámetros para producir el evento de lluvia, 12 valores de  $P(HH)$  y 12 valores de  $P(HS)$ . Las probabilidades se determinan en base a los registros históricos como:  $P(HS) = N_{HS}/N_S$  y  $P(HH) = N_{HH}/N_H$ , donde,  $N_{HS}$  es el número de días húmedos después de un día seco en el mes;  $N_S$  es el número total de días secos en el mes;  $N_{HH}$  es el número de días húmedos después de un día húmedo en el mes;  $N_H$  es el número total de días húmedos en el mes.

Una vez definida la ocurrencia del evento, se debe determinar la intensidad del mismo, lo cual se realiza a través de la distribución Gamma, considerando los parámetros de forma ( $\alpha$ ) y de escala ( $\beta$ ). La función de densidad de probabilidad Gamma es:

$$f(x) = \frac{(x/\beta)^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\beta \Gamma(\alpha)} \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (2.3)$$

Cabe destacar que  $\alpha$  y  $\beta$  son específicos de cada mes. El número total de parámetros requerido para describir la magnitud de lluvia es 24 (12 valores de  $\alpha$  y 12 valores de  $\beta$ ). Estos parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  son estimados mensualmente por el método de los momentos, es decir,  $\alpha = \mu^2/\sigma^2$  y  $\beta = \sigma^2/\mu$ , Wilks (1999), donde  $\mu$  es la media y  $\sigma^2$  es la varianza de los montos de precipitación diaria de los días húmedos. Valores de los parámetros para Chile han sido establecidos por Olave (2014), considerando series estacionarias en el periodo 1979 - 2010, por lo que se recomienda realizar esta verificación para su uso. A modo de ejemplo se muestran para la estación Armerillo en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Parámetros para generación de precipitación estación Armerillo.

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>P(HS)</b>	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1
<b>P(HH)</b>	0,2	0,1	0,2	0,4	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,3	0,2	0,2	0,4
<b>alfa</b>	0,4	0,5	0,3	0,5	0,7	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6	0,2	0,7	0,6
<b>beta</b>	24,6	30,7	73,7	59,1	53,9	46,8	49,0	41,6	39,2	32,5	67,9	27,6	45,6

Definidos los parámetros es posible determinar la magnitud de la precipitación utilizando las herramientas de programación disponibles que incluyen la generación de números aleatorios provenientes de una distribución Gamma. El software Matlab™ genera estas variables aleatorias mediante la función:

$$x = \text{gaminv}(P, A, B) \quad (2.4)$$

Donde:

P = Probabilidad

A = Parámetro de forma

B = Parámetro de escala.

Por lo tanto, los pasos que permiten conformar la serie sintética de precipitación consisten en:

1. Generar un número aleatorio entre 0 y 1.
2. Considerando que el primer día de la serie es seco, se compara el número aleatorio con P(HS), si es mayor, se considera día seco, si es menor se considera día húmedo.
3. Dado día húmedo se determina magnitud de precipitación a través de distribución gamma inversa según los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la estación correspondiente.
4. Se vuelve al punto 1 pero se compara con P(HH) o P(HS) según corresponda.

#### 2.1.4.2 Temperatura

En el caso de las temperaturas, la literatura presenta una metodología aplicada en diversos generadores climáticos como dGen (Schuol et al., 2007), WeatherMan (Pickering et al., 1994) y SIMMETEO (Geng, 1986) entre otros, donde los estadígrafos se obtienen de los registros históricos y la dependencia estacional se agrega a través de armónicos de Fourier, obteniendo las siguientes expresiones que varían para cada mes. Solo las temperaturas máximas son divididas en dos grupos, dependiendo si el día analizado hubo o no precipitación (húmedo o seco):

$$\Delta T = \bar{T}_{max,m} - \bar{T}_{min,m} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{T_{min}} = \max[0,5; (5,2 - 0,13 \cdot \bar{T}_{min,m})] \quad (2.6)$$

$$\bar{T}_{max,seco} = \bar{T}_{max,m} + 0,25 \cdot P_{(w)} \cdot \Delta T \quad (2.7)$$

$$\bar{T}_{max,húmedo} = \bar{T}_{max,seco} - 0,25 \cdot \Delta T \quad (2.8)$$

$$\sigma_{T_{max,seco}} = \max[0,5; (5,8 - 0,09 \cdot \bar{T}_{max,seco})] \quad (2.9)$$

$$\sigma_{T_{max,húmedo}} = \max[0,5; (5,8 - 0,09 \cdot \bar{T}_{max,húmedo})] \quad (2.10)$$

Donde:

$\sigma$  = Desviación estándar.

$P_{(w)}$  = Probabilidad de día húmedo.

$\bar{T}_{max,m}$  = Promedio temperaturas máximas del mes m, con m=1.....12.

$\bar{T}_{min,m}$  = Promedio temperaturas mínimas del mes m, con m=1.....12.

$\bar{T}_{max,seco}$  = Promedio de temperaturas máximas en los días secos del mes.

$\bar{T}_{max,húmedo}$  = Promedio de temperaturas máximas en los días húmedos del mes.

Mediante estos valores es posible determinar los parámetros asociados a la distribución que representa a cada grupo. Para la distribución Gamma los parámetros quedan definidos como:

$$\alpha_{Tmin} = \bar{T}_{min,m}^2 / \sigma_{Tmin}^2 \quad (2.11)$$

$$\beta_{Tmin} = \sigma_{Tmin}^2 / \bar{T}_{min,m} \quad (2.12)$$

$$\alpha_{Tmax,seco} = \bar{T}_{max,seco}^2 / \sigma_{Tmax,seco}^2 \quad (2.13)$$

$$\beta_{Tmax,seco} = \sigma_{Tmax,seco}^2 / \bar{T}_{max,seco} \quad (2.14)$$

$$\alpha_{Tmax,húmedo} = \bar{T}_{max,húmedo}^2 / \sigma_{Tmax,húmedo}^2 \quad (2.15)$$

$$\beta_{Tmax,húmedo} = \sigma_{Tmax,húmedo}^2 / \bar{T}_{max,húmedo} \quad (2.16)$$

Donde:

$\alpha$  = Parámetro de forma para la distribución Gamma.

$\beta$  = Parámetro de escala para la distribución Gamma.

Definidos los parámetros es posible determinar la temperatura para cada grupo, según corresponda, utilizando las herramientas de programación disponibles que incluyen la generación de números aleatorios provenientes de una distribución Gamma. Matlab genera estas variables aleatorias mediante la función descrita en la ecuación 2.4, donde  $x$  es la variable aleatoria de la serie sintética a generar, en este caso temperaturas.

Por lo tanto, los pasos que permiten conformar las series sintéticas de temperaturas extremas consisten en:

1. Generar un número aleatorio entre 0 y 1.
2. Aplicar la distribución gamma inversa con los parámetros de temperatura mínima para generar esta variable.
3. Verificar si el día en curso es húmedo o seco.
4. Generar un número aleatorio entre 0 y 1.
5. Dependiendo de la condición asociada en el punto 3, se determina la temperatura máxima a través de distribución gamma inversa según los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  que correspondan.
6. Se vuelve al punto 1 para continuar con el siguiente día.

Cabe destacar que para cada año se verifica que los estadísticos históricos de precipitación y temperatura se mantienen. Para ello se realiza test de diferencias de media y varianza, lo que permite descartar las series que no cumplen con los requisitos establecidos.

## 2.2 Modelación hidrológica

Las series de tiempo hidrológicas pueden estar asociadas a diferentes variables tales como temperatura, precipitación, caudales, entre otros. Estas series presentan comportamientos que deben ser considerados al momento de realizar la modelación de dichas variables, como tendencia, estacionalidad y periodicidad. Estos fenómenos determinan el comportamiento estacionario de una serie, el que se considera requisito principal para poder analizarlas como un proceso estocástico. En el caso particular de los caudales se agrega la existencia de una fuerte correlación entre períodos sucesivos.

En la actualidad existe una serie de modelos disponibles para realizar simulaciones de series de tiempo hidrológicas, los cuales se clasifican en dos tipos, considerando la clase de modelación que realizan, los modelos estadísticos y los modelos en base a procesos físicos.

Los modelos estadísticos se caracterizan por realizar una modelación de la variable en función del comportamiento histórico de la misma, en algunos casos es solo función de la misma variable y en otros se incorpora más variables que estén directamente relacionadas con el proceso, donde el caso más recurrente en hidrología es la modelación del proceso precipitación-escorrentía. El resultado de este tipo de simulaciones, que buscan un modelo parsimonioso que entregue una solución matemáticamente elegante ante una entrada compleja (Jakeman y Hornberger 1993), incluye procesos de calibración y validación, para finalmente llegar a una expresión asociada a factores numéricos, que generalmente no tienen significado físico, que buscan ajustar la respuesta del sistema a datos de salida conocidos frente a datos de entrada también conocidos, de manera de analizar la validez de los valores obtenidos. En este tipo de modelos, cuando las variables a considerar son hidrológicas, se hace necesario realizar un análisis de estacionariedad, modificando las series de manera tal que se elimine las posibles tendencias, periodicidades y estacionalidad, para así asociarlas a un proceso estocástico. En la actualidad, los modelos más utilizados para generar series de tiempo hidrológicas son redes neuronales, funciones de transferencia y modelos ARIMA. En cuanto a este último, su aplicación en la zona sur del país, Laja y Maule, no arrojó buenos resultados (Palacios, 2009), lo cual se asocia a problemas con la disponibilidad y confiabilidad de los registros de caudales existentes.

Los modelos basados en procesos físicos, tal como su nombre lo dice, incorporan los procesos hidrológicos de manera más explícita (Abbott et al. 1986), caracterizando la zona de estudio en términos geomorfológicos y procesos que se dan en toda su extensión. Los procesos incorporados y por ende la cantidad de variables involucradas dependen directamente del uso que se dará a la respuesta obtenida y a la información disponible en la zona, aunque se debe tener en cuenta la dificultad de representar los procesos a través de expresiones analíticas, lo que incorpora cierto nivel de incertidumbre en los resultados (Beven, 1989), además de la que se encuentra implícita en los datos utilizados (Butts et al., 2004). Generalmente los procesos incluidos en la modelación tienen asociados parámetros a través de los cuales se realiza el proceso de calibración, de manera tal que la modelación realizada con los diversos datos de entrada se ajuste a la respuesta de la cuenca que se registró para ese intervalo de tiempo. En este caso los parámetros que intervienen en la modelación tienen, usualmente, significado físico, lo cual permite discriminar si los valores obtenidos se encuentran dentro de un rango aceptable según las características de la zona.

En el último tiempo ha surgido la idea de utilizar de manera conjunta modelos estadísticos y basados en procesos, de manera tal que trabajen en forma complementaria (Gupta et al., 2008)

generando resultados más robustos, principalmente en cuencas sin registros de información, teniendo en cuenta el “sello” regional de las respuestas hidrológicas y su respectiva incertidumbre (Yadav et al. 2007).

Finalmente, la respuesta obtenida, independiente del tipo de modelos, generalmente se somete a un análisis que indica la eficiencia con la que estos se desempeñan, aportando información para realizar el ajuste durante el proceso de calibración y evaluando su comportamiento en las fases de validación (Krause et al., 2005)

Por otra parte al realizar una modelación hidrológica es necesario tener en cuenta ciertas consideraciones. En primer lugar la base conceptual del modelo debe contar con los principales procesos hidrológicos que participan en la cuenca, teniendo en cuenta el nivel de detalle deseado y la información disponible. En segundo lugar se debe verificar que el paso de tiempo empleado en la modelación logra representar las tasas de variación de los procesos. En tercer lugar está la calibración, que puede ser manual o automática. En este último caso, la calibración dependerá del algoritmo de optimización, la función objetivo, datos de calibración y estructura del modelo (Gan et al. 1997).

Cabe destacar que conforme avanza el desarrollo de modelos hidrológicos se evidencia que los resultados de la modelación dependen en mayor medida de su estructura, función objetivo y calidad de la información, que de la complejidad del modelo y de la longitud de los datos (Gan et al. 1996). A su vez, dada la gran cantidad de modelos desarrollados para representar, ya sea el comportamiento de una cuenca a través de procesos o en particular la relación precipitación-escorrentía, se ha realizado distintas evaluaciones de su comportamiento (Klemes, 1986; Beven 2006), abordando las diferentes fuentes de incertidumbre y temas como la equifinalidad entre otros, donde la conclusión más relevante quizás, radica en que los criterios de evaluación dependen directamente del uso que se le dé a los resultados de la modelación.

## 2.2.1 Índices de ajuste de la modelación hidrológica

Los resultados de la modelación de caudales se comparan con los caudales observados y se evalúan a través de los siguientes coeficientes estadísticos:

### 2.2.1.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Este indicador propuesto por Nash y Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970) mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación, estableciendo la eficiencia del modelo para predecir los caudales en comparación con la utilización de la media como predictor de la variable. Varía entre  $-\infty$  y 1, donde la simulación es perfecta si el valor del indicador es 1, un valor negativo indica que la media es un mejor predictor y un valor mayor a 0 implica que el modelo es mejor predictor que la media. Usualmente, un valor de 0,7 o más corresponde a una modelación adecuada (Moriasi et al., 2007). El coeficiente se calcula según la ecuación 2.17:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\_i} - Q_{sim\_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\_i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2.17)$$

En donde  $Q_{obs\_i}$  y  $Q_{sim\_i}$  corresponden al caudal medio observado y simulado, respectivamente, en el intervalo temporal de simulación  $i$  (día, semana, mes o año) mientras  $\bar{Q}_{obs}$  es el promedio de los datos observados.

#### 2.2.1.2 Coeficiente de Nash Sutcliffe logarítmico

El coeficiente de Nash-Sutcliffe, ver fórmula 2.17, presenta como inconveniente que al ser cuadrático tiende a sobrevalorar las deficiencias o aciertos del modelo para caudales altos y subvalorar las eficiencias y deficiencias del modelo para caudales bajos. Una forma de contrarrestar este problema es aplicar una transformación logarítmica tanto a los valores observados como simulados. Este coeficiente se calcula según la ecuación 2.18 y se utiliza para evaluar el modelo de manera complementaria.

$$NSlog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{obs_i}) - \log(Q_{sim_i}))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{obs_i}) - \log(\bar{Q}_{obs}))^2} \quad (2.18)$$

#### 2.2.1.3 Coeficiente PBIAS

El coeficiente PBIAS o porcentaje de sesgo, mide a tendencia de que el promedio de los valores simulados sea mayor o menor que los valores observados. El valor óptimo de sesgo es cero, o valores pequeños que indican que el modelo es preciso. Valores positivos indican una subestimación por parte del modelo, mientras que valores negativos indican una sobreestimación. Este coeficiente se calcula según la ec. 2.19.

$$Pbias = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\_i} - Q_{sim\_i}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obs\_i}} \quad (2.19)$$

#### 2.2.1.4 Coeficiente $R^2$

El coeficiente de determinación corresponde a una medida estadística que indica la bondad del ajuste o fiabilidad del modelo a los datos observados, indicando cuál es la proporción de la variación total en la variable dependiente, que es explicada por el modelo de regresión estimado, es decir, mide la capacidad explicativa del modelo aplicado. El coeficiente se estima a través de la ec. 2.20.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\_i} - \bar{Q}_{obs}) \cdot (Q_{sim\_i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\_i} - \bar{Q}_{obs})^2 \cdot (Q_{sim\_i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \quad (2.20)$$

## 2.2.2 Modelo WEAP

El modelo seleccionado para este trabajo corresponde al denominado WEAP (“Water Evaluation And Planning” system), el cual ha sido utilizado en varios estudios de impacto y planificación en recursos hídricos (Purkey 2008, Ingol-Blanco 2009). Este modelo es una herramienta computacional enfocada a la planificación y distribución de aguas, el cual está basado en un modelo hidrológico que funciona en base a un balance de oferta y demanda hídrica. Una de sus principales ventajas, dentro de los modelos de planificación, es que es un modelo forzado por variables climáticas, lo que favorece el análisis planteado en el presente trabajo utilizando forzantes sintéticas de precipitación y temperatura.

Por otra parte, este modelo posee herramientas que permiten distribuir los recursos hídricos entre diferentes tipos de usuarios (agricultura, hidroelectricidad, ecosistema, etc.), lo que hace que sea ideal para el análisis de cuencas multipropósito.

Para el caso analizado se adoptó un modelo donde la cuenca principal es dividida en subcuencas, las que a su vez se encuentran divididas en bandas de elevación. Cada banda de elevación tiene características propias de suelo y datos climáticos que permiten representar de mejor manera la variabilidad de cada una de las subcuencas. El modelo básicamente considera dos estanques en los que se realiza el balance hídrico para cada uso de suelo, en los cuales se considera escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación (Centro de Cambio Global, 2009).

## 2.2.3 Variables involucradas

La conceptualización utilizada para este trabajo fue facilitada por el Centro de Cambio Global de la Universidad Católica de Chile, sobre la cual no se realizaron cambios aparte de la escala temporal (mensual a semanal).

Para la modelación se requiere datos climáticos como precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, temperaturas de derretimiento y congelamiento y latitud, dentro de los cuales solo se calibran las temperaturas de congelamiento y derretimiento. A su vez, se requiere información fluviométrica para la comparación y evaluación del modelo.

La representación gráfica de la base conceptual del modelo se observa en la Figura 2-1, donde el balance se realiza entre los estanques que representan la zona de raíces y zona profunda. Las ecuaciones de balance de masa para cada estanque se presentan en las ecuaciones 2.21 y 2.22

*Estanque superior:*

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left( \frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{\frac{RRF_j}{2}} - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_s z_{1,j}^2 \quad (2.21)$$

*Estanque inferior*

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_j) k_s z_{2,j}^2 \quad (2.22)$$

En el estanque superior, los términos de izquierda a derecha, representan: cambio en la humedad del suelo, precipitación efectiva, evapotranspiración, escorrentía superficial, flujo intermedio y percolación. Los términos de la ecuación de balance representan:

$Sw_j$  = Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces.

$z_{1,j}$  = Nivel de humedad en la zona de raíces.

$P_e$  = Precipitación efectiva, incluye derretimiento de nieve y riego.

$PET$  = Evaporación potencial cultivo referencia, aproximación de Penman-Montieth.

$k_{c,j}$  = Coeficiente de cultivo para las diferentes porciones de cobertura de suelo.

$RRF_j$  = Índice de resistencia a la escorrentía para cada cobertura de suelo.

$k_s$  = Conductividad de zona de raíces.

$f_j$  = Dirección preferencial de flujo.

$Dw_j$  = Capacidad de almacenamiento en la zona profunda.

$z_{2,j}$  = Nivel de humedad en la zona profunda.

$k_d$  = Conductividad de zona profunda.

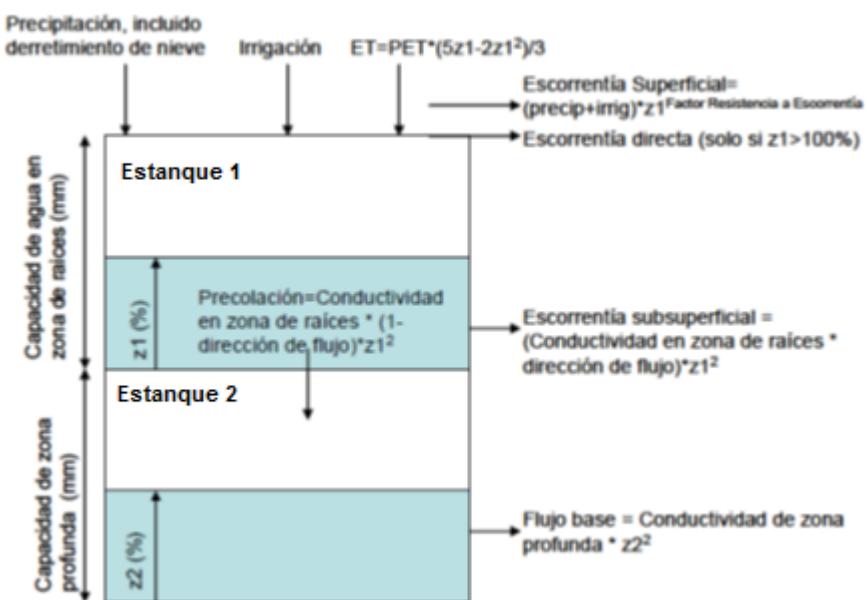


Figura 2-1: Elementos hidrológicos modelados en WEAP (Centro de Cambio Global, 2009)

En caso de trabajar con cuencas altas es importante considerar la acumulación de nieve. WEAP posee una metodología definida para el análisis en la acumulación de nieve, la cual utiliza dos parámetros de calibración, la temperatura de congelamiento y temperatura de derretimiento.

$$P_e(t) = (A_c(t) + Pp(t)m_c) \quad (2.23)$$

$$m_c = \begin{cases} 0 & T_i < T_c \\ 1 & T_i > T_c \\ \frac{T_i - T_c}{T_d - T_c} & T_c < T_i < T_d \end{cases} \quad (2.24)$$

Donde:

$P_e$  = Aportes de precipitación líquida y derretimiento de nieve a la escorrentía.

$A_c$  = Área de cobertura nival.

$Pp$  = Precipitación total.

$m_c$  = Coeficiente de acumulación de nieves.

$T_i$  = Temperatura media semanal.

$T_c$  = Temperatura de congelamiento.

$T_d$  = Temperatura de derretimiento.

Generalmente se busca en la calibración ajustar los caudales peak y los caudales base, teniendo en cuenta que entre los parámetros de calibración hay relaciones no lineales, y por tanto, la alteración de uno puede influir indirectamente en los otros parámetros.

#### 2.2.4 Transposición de caudales

Dentro del análisis de disponibilidad de recursos hídricos para diversos fines la información más relevante está asociada con los caudales que pasan a través de los diferentes puntos de interés, pero a su vez esto se convierte en muchas ocasiones en el mayor de los problemas, ya que la densidad espacial de estaciones fluviométricas no cubre la totalidad de los cauces o existen vacíos en los registros históricos, temas que si bien han mejorado a lo largo de los años, aún hay trabajo por hacer. A raíz de lo antes mencionado, se ha buscado una manera de suplir esta carencia de información siendo uno de los métodos utilizados la transposición de caudales, donde el objetivo principal radica en traspasar información desde cuencas monitoreadas a cuencas no monitoreadas y las técnicas para llevar a cabo esta tarea han variado a lo largo del tiempo.

Dentro de las técnicas que se han utilizado para realizar este proceso se ha evidenciado que la metodología es bastante sensible a las variables de predicción involucradas (Nathan, 1990), así como también se ha observado que las cuencas aunque estén en zonas similares, tienen diferente comportamiento y es necesario identificar los factores que controlan dicha variabilidad, ya sea características de la respuesta dinámica o descriptores físicos de la cuenca, pues eso mejora considerablemente los resultados (Kokkonen et all., 2003). Las tendencias actuales apuntan hacia una regionalización que indique comportamientos similares de las cuencas y que esta se puede realizar a través de regresiones, proximidad espacial y similitud física, donde en algunos casos se tiene que la proximidad espacial entrega mejores resultados (Oudin, 2008), pero aun así, se llega a la conclusión de que dichos resultados no son comparables a un proceso de calibración (Merz, 2004; McIntyre, 2005; Young, 2006).

Por otra parte, existen autores que indican que el desafío está en escoger la cuenca o estación de referencia, donde los resultados no siempre arrojan que la de mayor proximidad no siempre es la más adecuada, sino la de correlación más fuerte y por ello han incorporado métodos geoestadísticos para su elección (Archfield, 2010).

En los últimos años se ha llegado a la conclusión de que no existe un enfoque universal y que muchas veces los resultados dependen de un análisis localizado, tanto de la información disponible, de las propiedades físicas de la zona, como también del tipo de modelo utilizado para llevar a cabo el proceso, es decir modelo dependiente o independiente (Razavi, 2013). Así, en función de lo antes mencionado, llegar al mejor resultado para la generación de series de tiempo de caudales en puntos de interés no controlados.

## Capítulo 3: Metodología

En la Figura 3-1 se expone la estructura general de la metodología a utilizar en el presente trabajo.

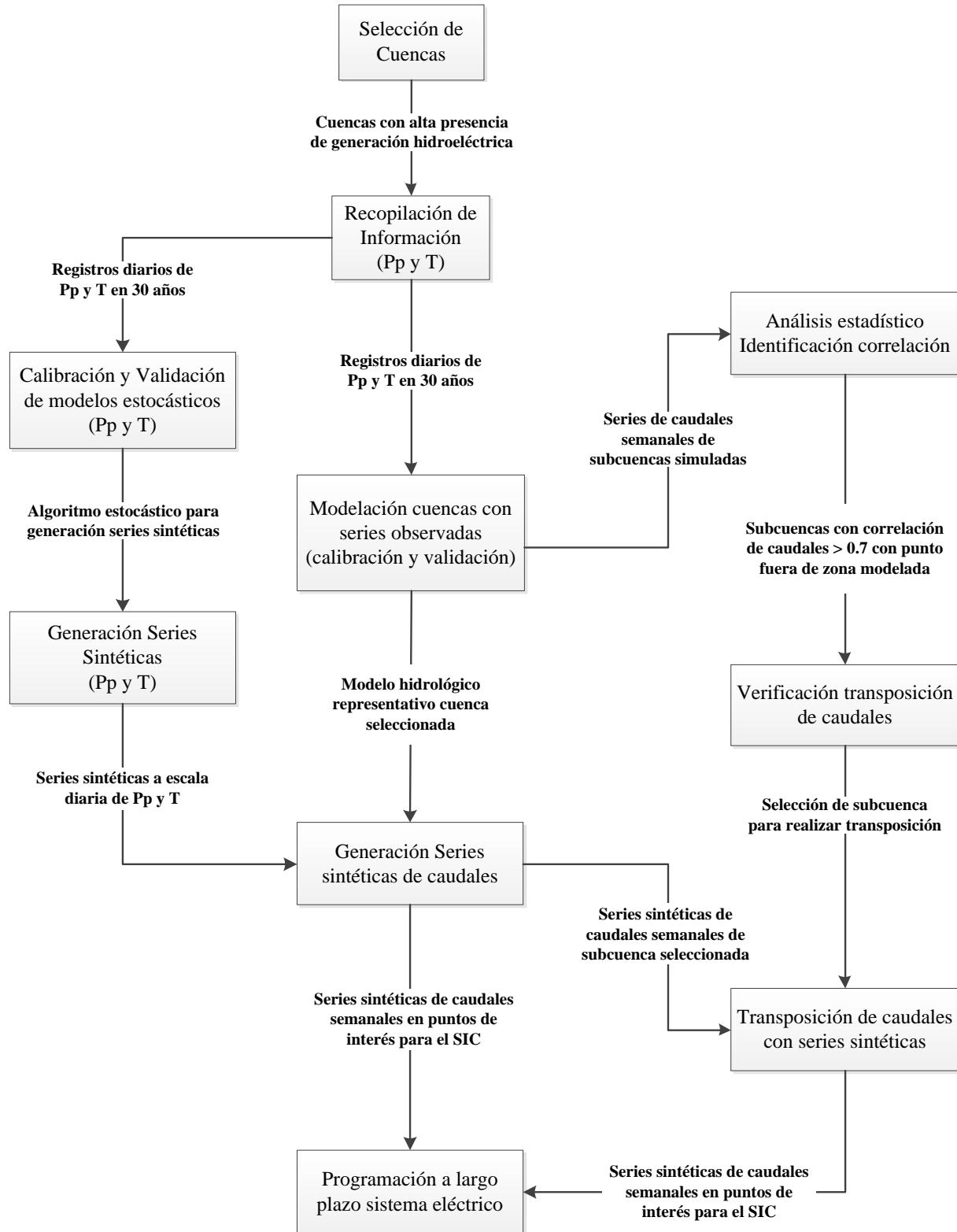


Figura 3-1: Metodología para la generación de series sintéticas de caudales para el Sistema Eléctrico

Como se ha mencionado anteriormente, la operación de los embalses para la producción de energía hidroeléctrica es un problema estocástico, que se caracteriza por la incertidumbre en hidrología, la demanda de energía y los precios del combustible. Actualmente, la programación a largo plazo de los grandes sistemas de energía en Chile sólo tiene en cuenta la incertidumbre hidrológica, utilizando la programación dinámica dual estocástica (SDDP) con los posibles escenarios de flujo de entrada definidos a partir de registros históricos. Cada año de registro se trata como una muestra de las entradas semanales a las plantas de energía, suponiendo que, de esta manera, se incorporan intrínsecamente correlaciones espaciales y temporales, sin ningún análisis de autocorrelación adicional de las series hidrológicas. Sin embargo, la buena práctica estándar sugiere el uso de flujos sintéticos en lugar de los registros históricos.

El enfoque propuesto reconoce que la incertidumbre hidrológica proviene principalmente de las condiciones climáticas y busca abordar esta perspectiva para la generación de series sintéticas de caudales a través de modelación hidrológica y transposición de caudales.

En primera instancia se escoge una cuenca representativa del sistema hidroeléctrico y dado que en este caso las forzantes consideradas son la precipitación y la temperatura, se recopila información histórica de estas variables, se realiza su respectivo análisis estadístico para estimar los parámetros descritos en la sección 2.1.4 y generar las series sintéticas de precipitación y temperatura. Posteriormente se lleva a cabo un proceso de calibración y validación del modelo estadístico, para finalmente generar series sintéticas que pueden estar asociadas a diferentes escenarios hidrológicos (seco, normal o húmedo).

Por otra parte, una vez escogida la cuenca de interés, se realiza una modelación hidrológica, llevando a cabo un proceso de calibración y validación con datos históricos, considerando para ambos procesos los indicadores de bondad de ajuste especificados en la sección 2.2.4. Una vez finalizado los procesos de calibración y validación, es posible utilizar las series sintéticas de precipitación y temperatura como entrada del modelo de simulación hidrológica para generar series sintéticas de caudales considerando los mismos escenarios hidrológicos, es decir, seco, normal o húmedo. Este enfoque permite capturar de forma explícita los efectos asociados a las características geomorfológicas actuales de la cuenca (por ejemplo, cambios de uso de la suelo) y así obtener información de caudales en todos los puntos de interés. Junto con lo antes mencionado, se identifica puntos de interés en los que se requiera información de caudales por parte del sistema eléctrico y que no se encuentren incluídos en la modelación. En este caso se escoge un punto específico, al cual se le realiza un análisis estadístico en conjunto con las series simuladas con el modelo hidrológico calibrado utilizando correlaciones e inspección visual. A partir de esto, se identifican fuertes correlaciones que se utilizan para generar series de flujo sintético en puntos fuera del dominio del modelo. Cabe destacar que para la selección de los puntos se considera el concepto de zona homogénea evaluado por Rubio (2010), además la consideración de zonas homogéneas implica una disminución en el esfuerzo necesario para la generación de información en comparación con la modelación hidrológica de cada punto de interés.

## **Capítulo 4: Zona de Estudio**

El estudio se enfoca en una cuenca de cabecera dentro del Sistema Interconectado Central (SIC) del país, específicamente al Sistema Maule Alto donde la cuenca queda definida por la estación fluviométrica Maule en Armerillo que se ubica en el río Maule, aproximadamente 60 km. al sureste de la ciudad de Talca, en la Región del Maule. La razón principal de la elección de esta cuenca de cabecera radica en que, el potencial eléctrico instalado en la región es de 1718.3 [MW] y las centrales hidroeléctricas asociadas a Sistema Maule Alto representan un 88.31% de este potencial y un 23,83% de la capacidad hidroeléctrica instalada en el SIC.

Además de lo anterior, posee demandas de agua de origen agrícola, lo que la clasifica como cuenca multipropósito, donde los convenios de riego presentes se traducen en una mayor cantidad de variables a analizar cuando se habla de la disponibilidad del recurso hídrico. Esto se incorpora a través de extracciones de agua de la Laguna Maule según convenios de riego y aguas abajo a través de derechos (acciones) que se agrupan en los diferentes canales asociados al Río Maule, información que maneja a Junta de Vigilancia del mismo.

Es necesario tener en cuenta que el Sistema Maule Alto se encuentra al interior de una de las zonas homogéneas definidas por Rubio (2010), la cual representa solo una parte del SIC.

### **4.1 Cuenca del Río Maule**

La cuenca del Sistema Maule Alto corresponde al área aportante al río Maule aguas abajo de la Laguna El Maule, perteneciente a la séptima región del Maule. Cuenta con un área aportante de 5471,22 Km<sup>2</sup>, altura mínima de 465 msnm y altura máxima de 3952 msnm. Se encuentra controlada fluviométricamente por la estación Río Maule en Armerillo, vigente desde el año 1947. La estación se ubica a 35°42'22" latitud Sur y 71°06'50" de longitud (Ver Figura 4-1).

La zona se caracteriza por tener dos tipos bioclimáticos dadas las condiciones geomorfológicas de la zona (CADE-IDEPE, 2004), estos son:

- Mediterráneo pluvial oceánico: influyendo los sectores costeros, la Cordillera de la Costa, el Valle Central y los pisos inferiores de la Cordillera de los Andes, bajo los 2000 msnm.
- Mediterráneo pluvial continental: se encuentra en las zonas andinas altas por sobre los 2000 msnm, cuyo régimen ombrotérmico está dado por el efecto que ejerce la altitud sobre la continentalidad.

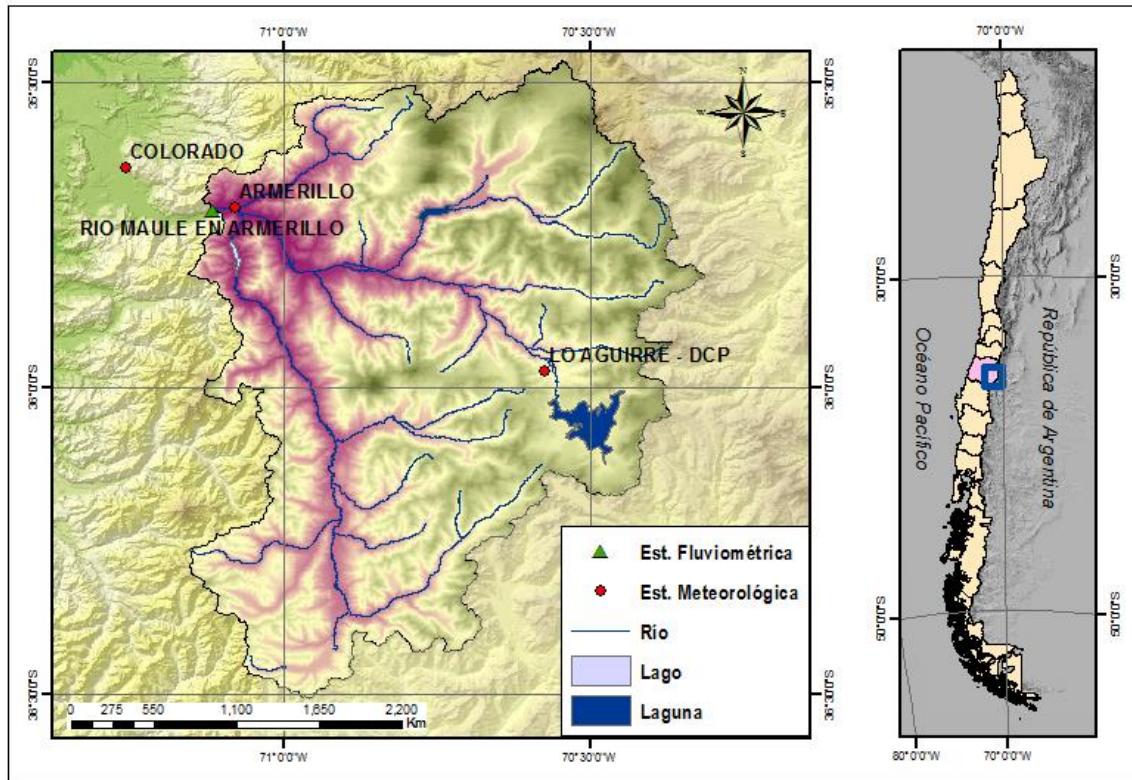


Figura 4-1: Sistema Maule Alto - ubicación estaciones meteorológicas y fluviométricas.

La temperatura media anual es de 13,5 °C, con una máxima de 19,6 °C y una mínima de 7,4 °C en la parte baja de la cuenca, mientras que en la zona alta la temperatura media anual es de 7,8 °C, con una máxima de 3,2 °C y una mínima de 12,3 °C (datos estimados según información de la DGA, periodo 1984-2013). Como es posible observar en la Figura 4-2 (estación Armerillo, periodo 1984-2013), las precipitaciones en la zona son mayores en la temporada de invierno, predominantemente en los meses de mayo, junio, julio y agosto.

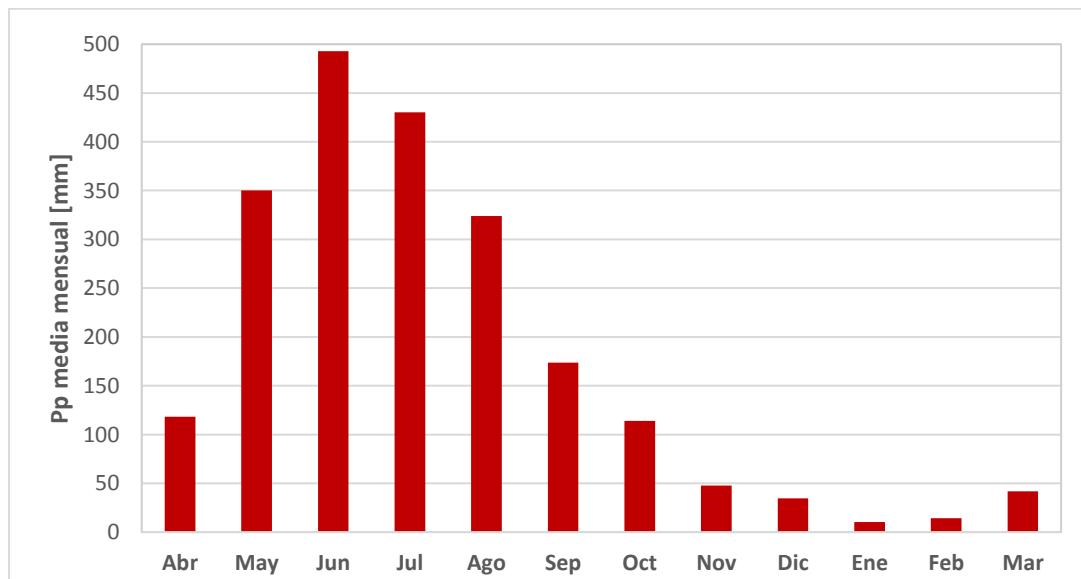


Figura 4-2: Precipitaciones medias mensuales registradas en estación Armerillo. Período 1984-2013

Maule en Armerillo es una cuenca nivopluvial, con aumentos de caudales tanto en invierno como en verano, aunque los caudales más elevados corresponden a la temporada estival, tal como se puede observar en la Figura 4-3.

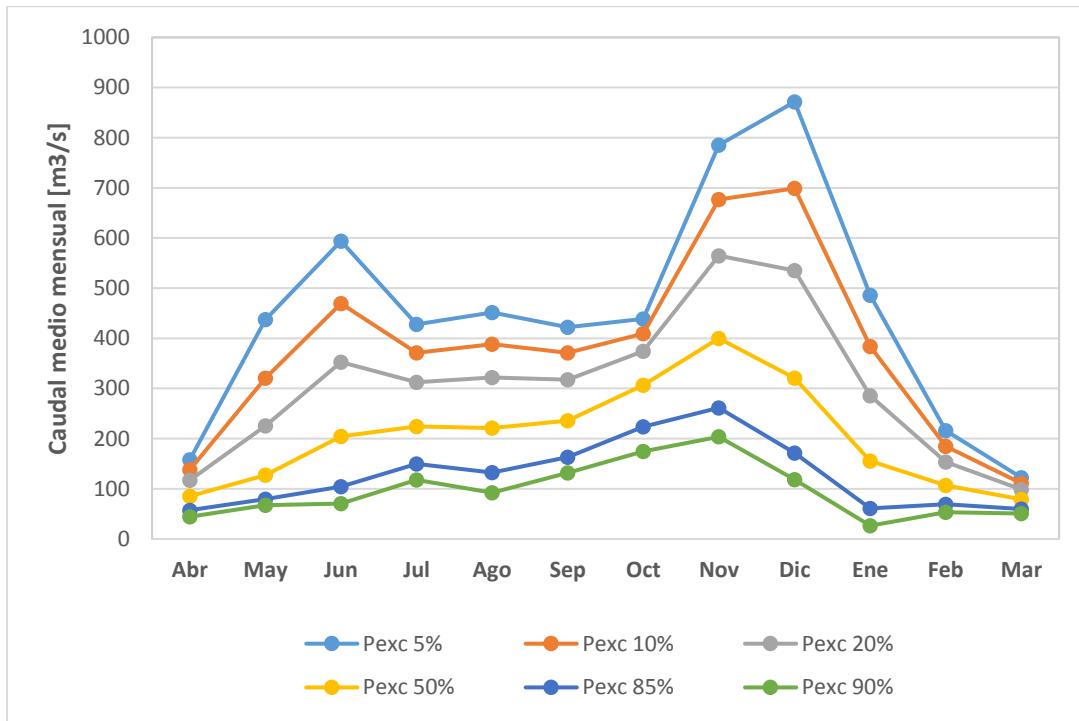


Figura 4-3: Curva de variación estacional Río Maule en Armerillo. Período 1984-2013

Una de las características relevantes de esta cuenca corresponde a su gran actividad agropecuaria, siendo la actividad económica más importante, la cual tiene directa relación con la generación hidroeléctrica, ya que ambas extraen recursos de la Laguna El Maule regidos por acuerdos de extracción. Posee una agricultura típica de clima templado caracterizado por veranos cálidos e inviernos secos, fríos y húmedos. Esta situación hace que los cultivos deban desarrollarse bajo condiciones de regadío. Los cultivos que ocupan mayor superficie en la cuenca corresponden a los cultivos anuales, permanentes y praderas artificiales, de los cuales la mayoría se desarrolla en condiciones de riego y una mínima parte en secano. Lo antes mencionado indica que las demandas de riego son una variable relevante en la disponibilidad del recurso hídrico en la zona (CADE-IDEPE, 2004).

## 4.2 Información disponible

La información meteorológica de carácter histórico es uno de los principales requisitos para llevar a cabo el análisis estadístico de las forzantes meteorológicas que se generarán sintéticamente, tal como se plantea en los objetivos del presente trabajo.

Uno de los principales inconvenientes que se genera en cuencas ubicadas en las zonas montañosas es la escasa o nula existencia de estaciones meteorológicas y fluviométricas, lo cual dificulta el análisis estadístico, haciendo en algunas ocasiones que sea menos representativo.

A continuación se presenta la información disponible en la zona de estudio, sus fuentes y caracterización espacial y las formas en las que ha sido procesada de manera tal de obtener la información requerida para generar posteriormente las series sintéticas de precipitación y temperatura.

#### 4.2.1 Información meteorológica

En el sistema Maule Alto las estaciones que registran precipitación se encuentran presentes en la parte baja de la cuenca. En la Tabla 4-1 se indica las características generales de las estaciones de precipitación consideradas en este estudio, cuya ubicación se mostró en la Figura 4-1. Cabe destacar que en esta cuenca se toma como base la información de la estación Armerillo.

*Tabla 4-1: Estaciones de precipitaciones en el Sistema Maule Alto.*

Código	Nombre	Periodo de Registro		Altura [msnm]	Coordenadas	
		Instal.	Suspen.		Lat. S	Lon. W
07320050-4	Armerillo	01/1950	/	470	35° 42'	71° 04'
07317001-K	Melado en la Lancha	11/1965	03/2003	650	35° 51'	71° 04'

En el caso de las estaciones de temperatura, es necesario que registren temperaturas extremas, es decir temperaturas mínimas y máximas, encontrando dos con estas características en la zona, las cuales se detallan en la Tabla 4-2 y cuya ubicación se destaca en la Figura 4-1.

*Tabla 4-2: Estaciones de temperaturas extremas en el Sistema Maule Alto.*

Código	Nombre	Periodo de Registro		Altura [msnm]	Coordenadas	
		Instal.	Suspen.		Lat. S	Lon. W
07378003-9	Colorado	01/1969	/	420	35° 38'	71° 15'
07301000-4	Lo Aguirre	01/2000	/	2000	35° 58'	70° 34'

#### 4.2.3 Información fluviométrica

Las estaciones de control fluviométrico utilizadas para monitorear las cuencas seleccionadas se detallan en la Tabla 4-3 y su distribución se puede observar en la Figura 4-4.

*Tabla 4-3: Estaciones fluviométricas para Sistemas Maule Alto.*

ID	Código	Nombre	Periodo de Registro		Altura [msnm]	Coordenadas	
			Instal.	Suspen.		Lat. S	Lon. W
0	07300001-7	Río Maule en desagüe Laguna del Maule	2002	/	---	36° 00'	70° 33'
1	07303000-5	Río Maule en Los Baños	2002	/	980	35° 49'	70° 45'
2	07308000-2	Canal Ad. Maule C. Pehuenche	2002	/	690	35° 47'	70° 59'
3	07308001-0	Estero Las Garzas	2002	/	600	35° 45'	71° 00'
4	07308002-9	Río Maule bajo bocatoma Central Pehuenche	2002	/	---	35° 46'	71° 00'
5	07317005-2	Río Melado en El Salto	2003	/	730	35° 53'	71° 01'
6	07320003-2	Río Claro en San Carlos	2002	/	550	35° 41'	71° 04'
7	07321002-K	Río Maule en Armerillo	1968	/	470	35° 42'	71° 06'

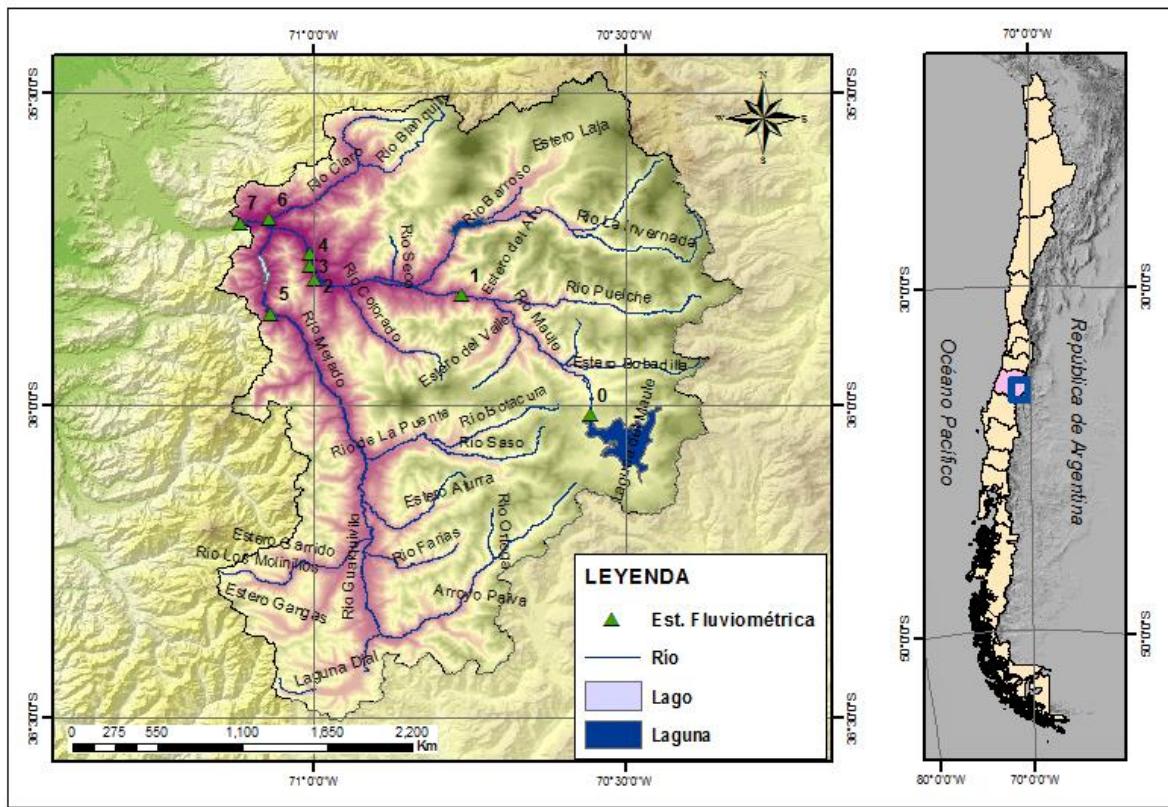


Figura 4-4: Distribución estaciones fluviométricas en área de estudio según información de Tabla 4-3.

#### 4.2.4 Preprocesamiento de la información

##### 4.2.4.1 Precipitaciones

Para realizar el análisis estadístico de las precipitaciones se utilizó registros históricos diarios considerando como periodo de análisis los años 1983 a 2013 inclusive. Una vez recopilada la información de las estaciones meteorológicas mencionadas en la Tabla 4-1, se realizó una agrupación basada en dos características, días de duración del evento y periodo de invierno o verano.

Realizada esta agrupación se llevó a cabo un análisis de frecuencia a cada uno de los grupos, es decir, para las diferentes duraciones de eventos ya sea en invierno o verano, con el objetivo de identificar cuál es la distribución probabilística que mejor representa el comportamiento de la precipitación en cada una de las estaciones escogidas para la cuenca en estudio. Como resultado de este análisis se obtuvo que la distribución que se ajusta en ambas estaciones, Armerillo y Melado en la Lancha, corresponde a una Distribución Pearson; a modo de ejemplo se muestra en la Figura 4-5 el ajuste para los eventos de duración 1 día durante el mes de julio en la estación Armerillo.

SERIE DE PRECIPITACIONES DIARIAS - ESTACIÓN ARMERILLO PERÍODO 1983-2013

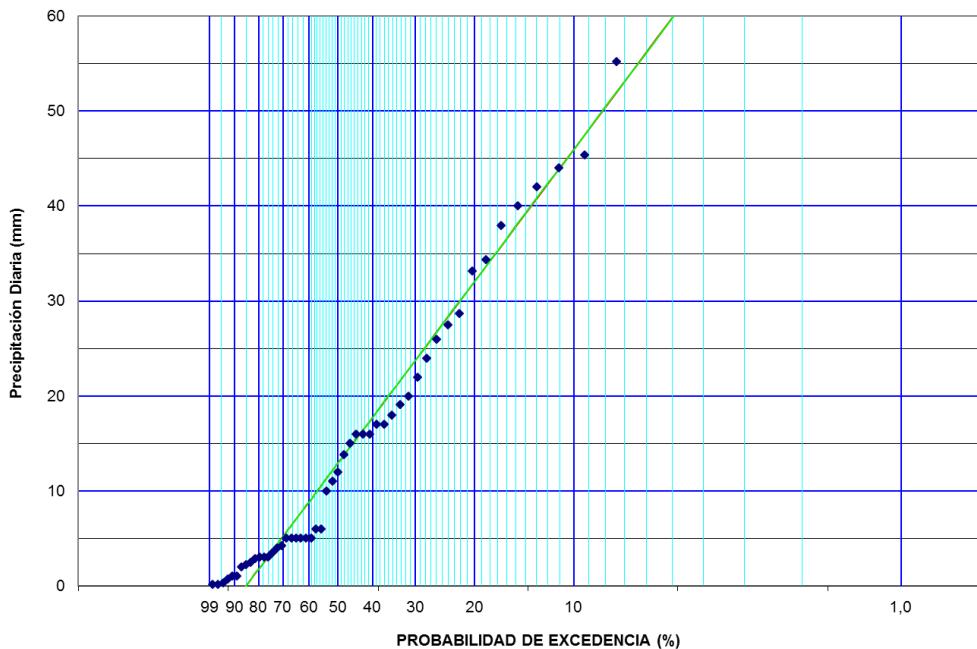


Figura 4-5: Análisis de frecuencia – Distribución Pearson - precipitaciones duración 1día - julio  
Estación Armerillo

#### 4.2.4.2 Temperaturas

Los registros históricos utilizados para el análisis de las temperaturas consideran valores extremos, es decir, información de temperaturas máximas y mínimas de las estaciones mencionadas en la Tabla 4-2. Cabe destacar que en el caso de las temperaturas máximas se realizó una división asociada a los eventos de precipitación, considerando temperaturas máximas asociadas a días secos y a días húmedos. El período histórico utilizado para el análisis comprende los años entre 1983 y 2013 inclusive.

Una vez realizada esta agrupación se realizó un análisis de frecuencia a cada uno de los grupos, con el objetivo de identificar cuál es la distribución probabilística que mejor representa el comportamiento de las temperaturas extremas de la estación escogida, Colorado. Como resultado de este análisis se obtuvo que la distribución que se ajusta a esta estación corresponde a una Distribución Pearson, tal como se muestra en la Figura 4-6 para el mes de julio.

SERIE DE TEMPERATURAS MÁXIMAS DIARIAS - ESTACIÓN COLORADO PERÍODO 1983-2013

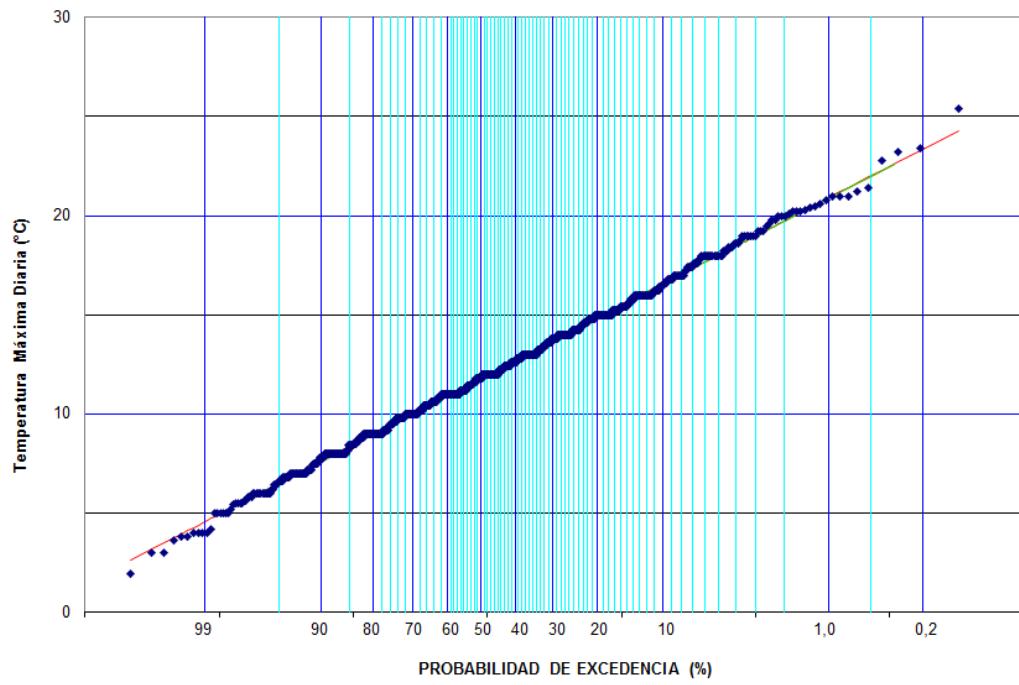


Figura 4-6: Análisis de frecuencia – Distribución Pearson – temperaturas máximas diarias julio  
Estación Colorado

# Capítulo 5: Modelación hidrológica

## 5.1 Construcción del modelo

Para la modelación de la cuenca en estudio se utilizó el programa WEAP en su versión 3.496 y una conceptualización a escala mensual facilitada por el Centro de Cambio Global de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

El modelo considera una subdivisión de la cuenca del río Maule en Armerillo, dividida en 7 subcuencas y 5 cuencas intermedias, como se muestra en la Figura 5-1, donde se plantea un esquema semidistribuido, con entradas de variables meteorológicas registradas en estaciones de la DGA.

Según estudios realizados anteriormente en la zona, los datos de precipitación y temperatura indican que este tipo de variables presentan una marcada relación con la altitud asociada a su distribución espacial (Vargas 2009; Vicuña 2010). Por lo antes mencionado, cada subcuenca se discretiza en bandas de elevación, considerando que la cota media de cada banda corresponde a la altitud de su centro de gravedad (ver Tabla 5-1), además de una subdivisión por banda que considera la presencia de diferentes tipos de suelo tales como: áreas desprovistas de vegetación, bosques, cuerpos de agua, plantaciones forestales, praderas y matorrales, terrenos agrícolas y áreas urbanas. A modo de ejemplo en la Figura 5-1 se esquematizan los modelos de las subcuencas de Claro en San Carlos y Estero Las Garzas. En la Figura 5-2 se presenta un mapa con la conceptualización de la cuenca completa.

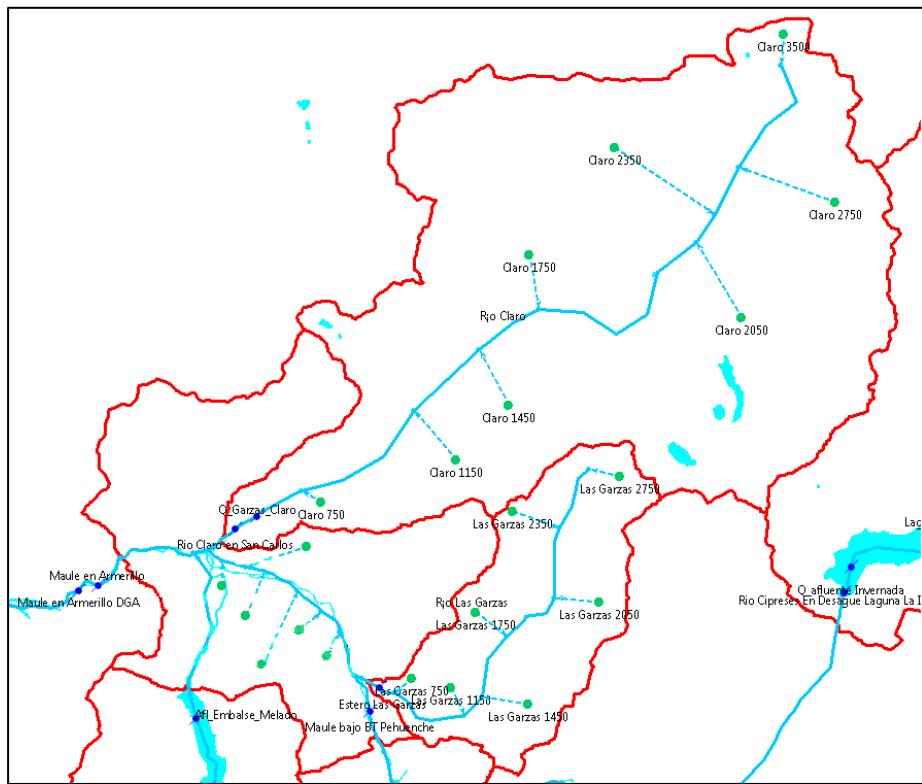
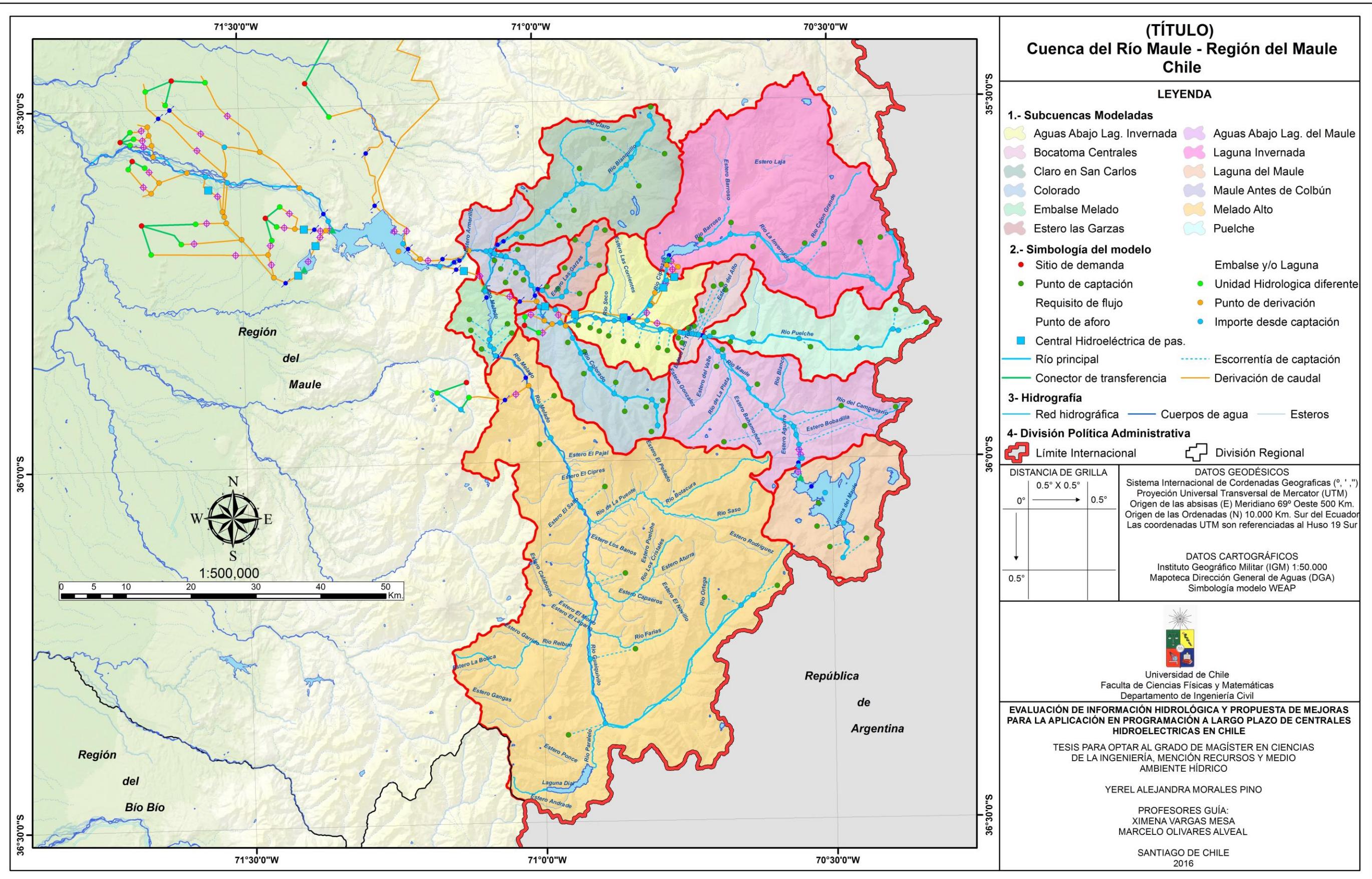


Figura 5-1: Conceptualización cuencas Estero Las Garzas y Claro en San Carlos en WEAP.

Tabla 5-1: Información bandas de elevación en cuencas seleccionadas.

Cuenca	Elevación media bandas (m.s.n.m.)	Área bandas (km <sup>2</sup> )
Laguna Maule	(3500; 2750; 2350; 2050)	(4,19;111,37;120,81;71,57)
Aguas abajo Laguna Maule	(3500; 2750; 2350; 2050;1750;1450;1150)	(5,83; 103,40; 157,20; 106,04; 62,38; 31,88; 8,49)
Puelche	(3500; 2750; 2350; 2050;1750;1450;1150)	(11,61; 132,25; 82,73; 40,09; 19,76; 10,36; 3,48)
Bocatoma Centrales	(3500; 2750; 2350; 2050;1750;1450;1150; 750)	(0,63; 32,56; 21,31; 11,93; 7,73; 6,60; 6,07; 0,53)
Laguna Invernada	(3500; 2750; 2350; 2050;1750;1450;1150)	(60,36; 414,59; 184,13; 100,38; 59,21; 44,91; 8,11)
Estero Las Garzas	(2750; 2350; 2050;1750;1450;1150; 750)	(0,97; 5,96; 12,65; 13,77; 16,95; 21,66; 12,29)
Claro en San Carlos	(3500; 2750; 2350; 2050;1750;1450;1150; 750)	(13,03; 49,05; 69,72; 83,94; 61,55; 51,33; 49,13; 22,33)
Melado Alto	(3500; 2750; 2350; 2050;1750;1450;1150; 750)	(4,92; 225,10; 447,15; 568,92; 443,49; 283,72; 163,22; 45,42)
Colorado	(3500; 2750; 2350; 2050;1750;1450;1150; 750)	(3,02; 20,02; 36,72; 51,01; 38,91; 38,54; 29,28; 30,67)
Embalse Melado	(2050;1750;1450;1150; 750)	(3,28; 13,36; 20,66; 23,44; 26,45)
Aguas abajo Laguna Invernada	(3500; 2750; 2350; 2050;1750;1450;1150; 750)	(0,17; 17,68; 39,58; 46,35; 41,19; 40,86; 49,61; 35,12)
Maule antes de Colbún	(2350; 2050; 1750; 1450; 1150; 750)	(0,36; 4,49; 17,65; 30,41; 37,27; 66,70)



## 5.2 Resultados calibración

El proceso de calibración tiene como objetivo encontrar el conjunto de parámetros que logra el mejor ajuste entre la información registrada de caudales en la estación fluviométrica respectiva y la respuesta del modelo utilizado. Este proceso se llevó a cabo manualmente, mediante el concepto de prueba y error, basando la elección en un criterio de bondad de ajuste e inspección visual.

Para la calibración se utilizó generalmente períodos de 3 años, dado que las estaciones fluviométricas que se encuentran en la cuenca presentan información discontinua, con importantes vacíos a lo largo de sus registros, tal como se muestra en la Tabla 5-2.

*Tabla 5-2: Calidad de la información estaciones fluviométricas*

Estación	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Río Maule en Armerillo	7	c	c	c	6	c
Canal Ad. Maule C. Pehuenche	2	c	c	c	8	b
Estero Las Garzas	3	c	c	c	6	c
Río Claro en San Carlos	2	c	c	c	7	c
Río Maule en Los Baños	2	9	c	c	7	b
Río Melado en El Salto	***	7	c	c	c	c
Afluentes Lag. Invernada	c	c	c	c	c	c
Estación	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Río Maule en Armerillo	c	c	c	6	2	c
Canal Ad. Maule C. Pehuenche	b	c	c	c	a	a
Estero Las Garzas	a	b	c	b	b	8
Río Claro en San Carlos	4	4	c	c	c	c
Río Maule en Los Baños	8	7	0	1	b	9
Río Melado en El Salto	c	c	b	c	b	a
Afluentes Lag. Invernada	c	c	c	c	c	c

**Nota:** "a" corresponde a 10 meses con información completa, "b" a 11 meses con información completa, "c" a 12 meses con información completa y "\*\*\*\*" año sin información.

A continuación, en las Figuras 5-3 a 5-9 se presentan los resultados del proceso de calibración asociado a las estaciones fluviométricas presentes en la zona de estudio. Para cada una de ellas se presenta una primera figura con la serie de tiempo que incluye caudales simulados y observados, luego una figura donde se observa la variación promedio durante el año, luego la curva de duración de caudales a nivel semanal y finalmente correlación entre los valores ya mencionados a nivel mensual. Los gráficos descritos permiten corroborar el desempeño del modelo y si este es capaz de representar la estacionalidad de los caudales y cuál es el nivel de dispersión que existe entre los valores modelados y observados. Los resultados de los indicadores de eficiencia se presentan en la Tabla 5-2.

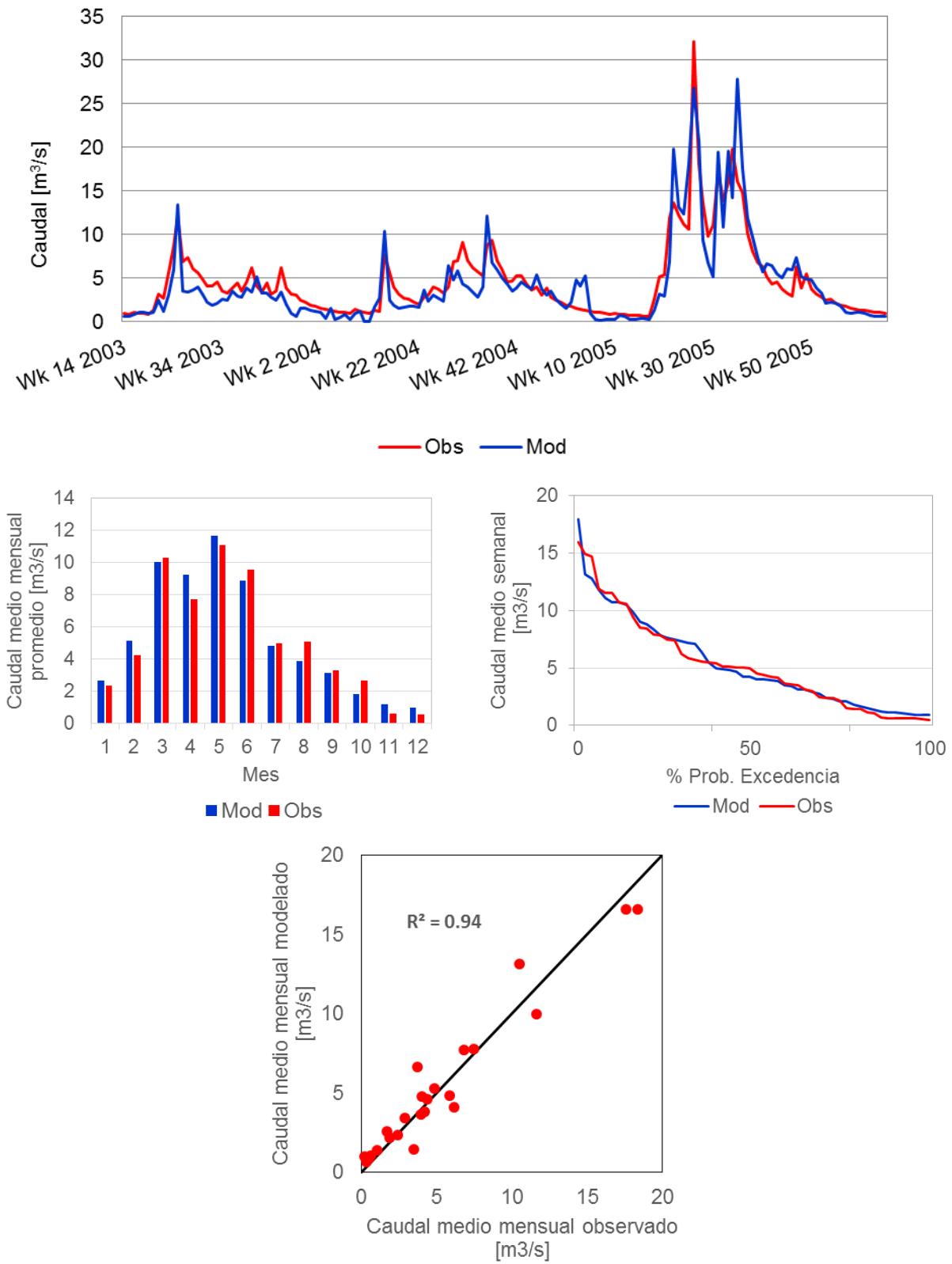


Figura 5-3: Resultados proceso de calibración en la cuenca Estero Las Garzas.

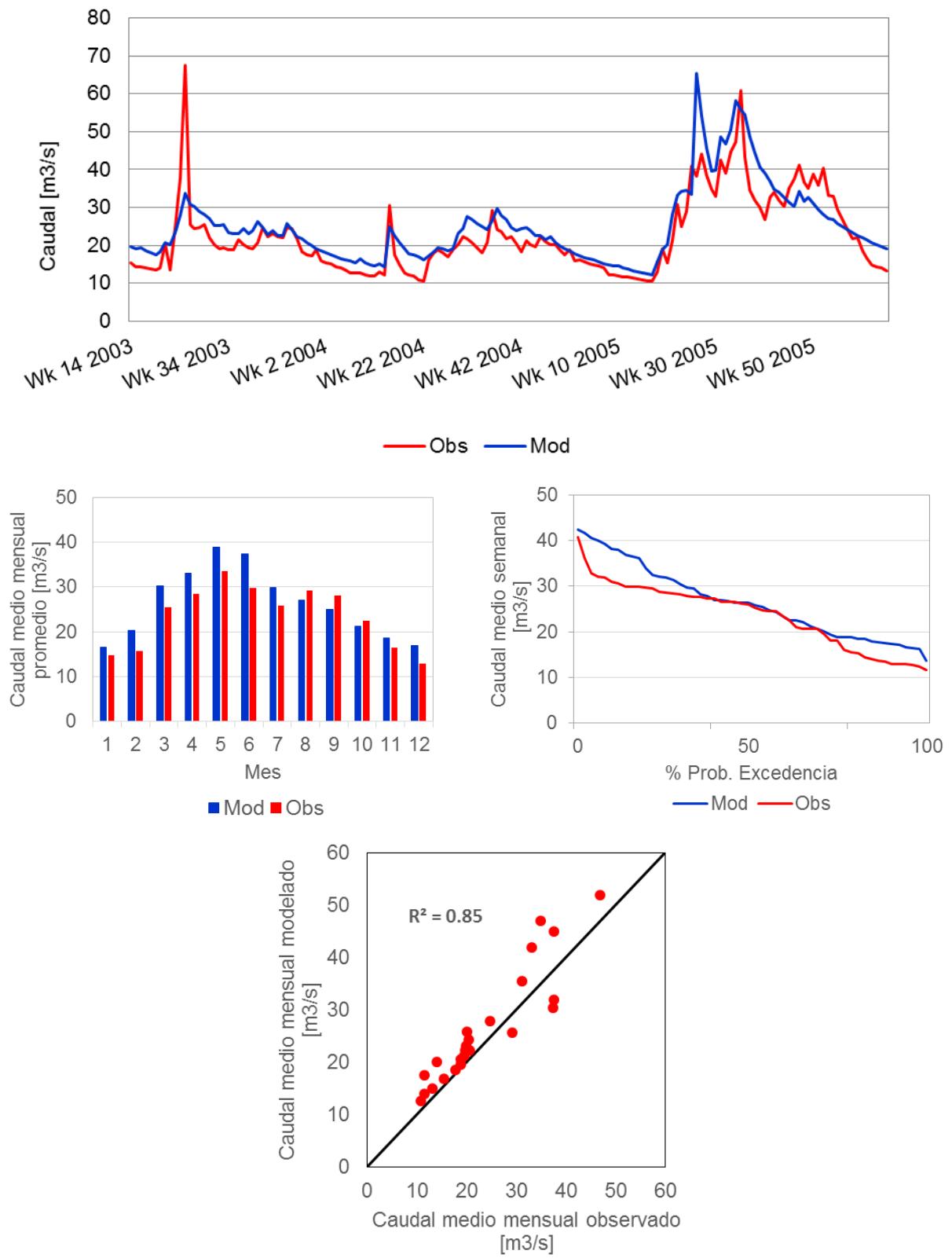
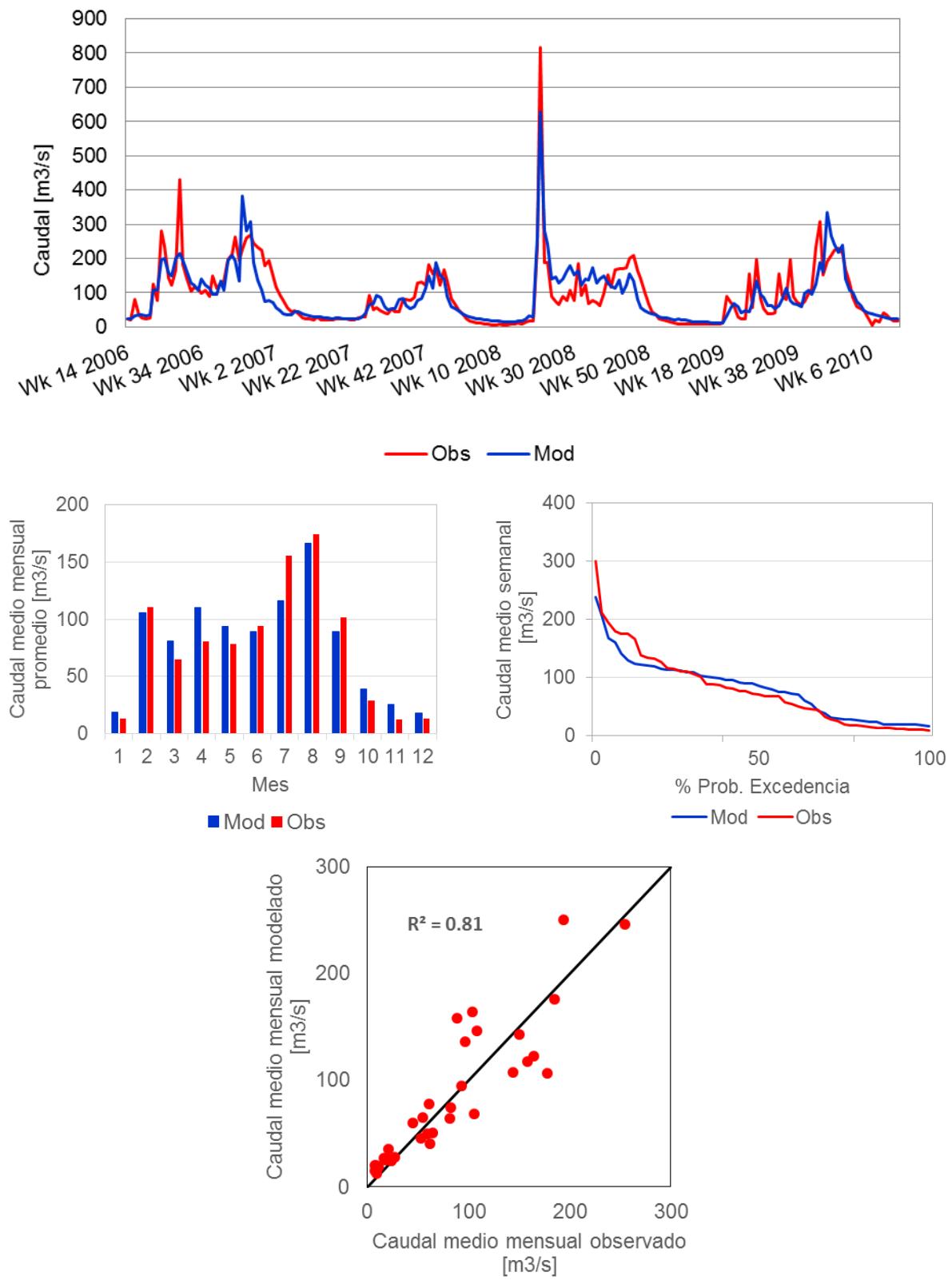


Figura 5-4: Resultados proceso de calibración en la cuenca Río Claro en San Carlos



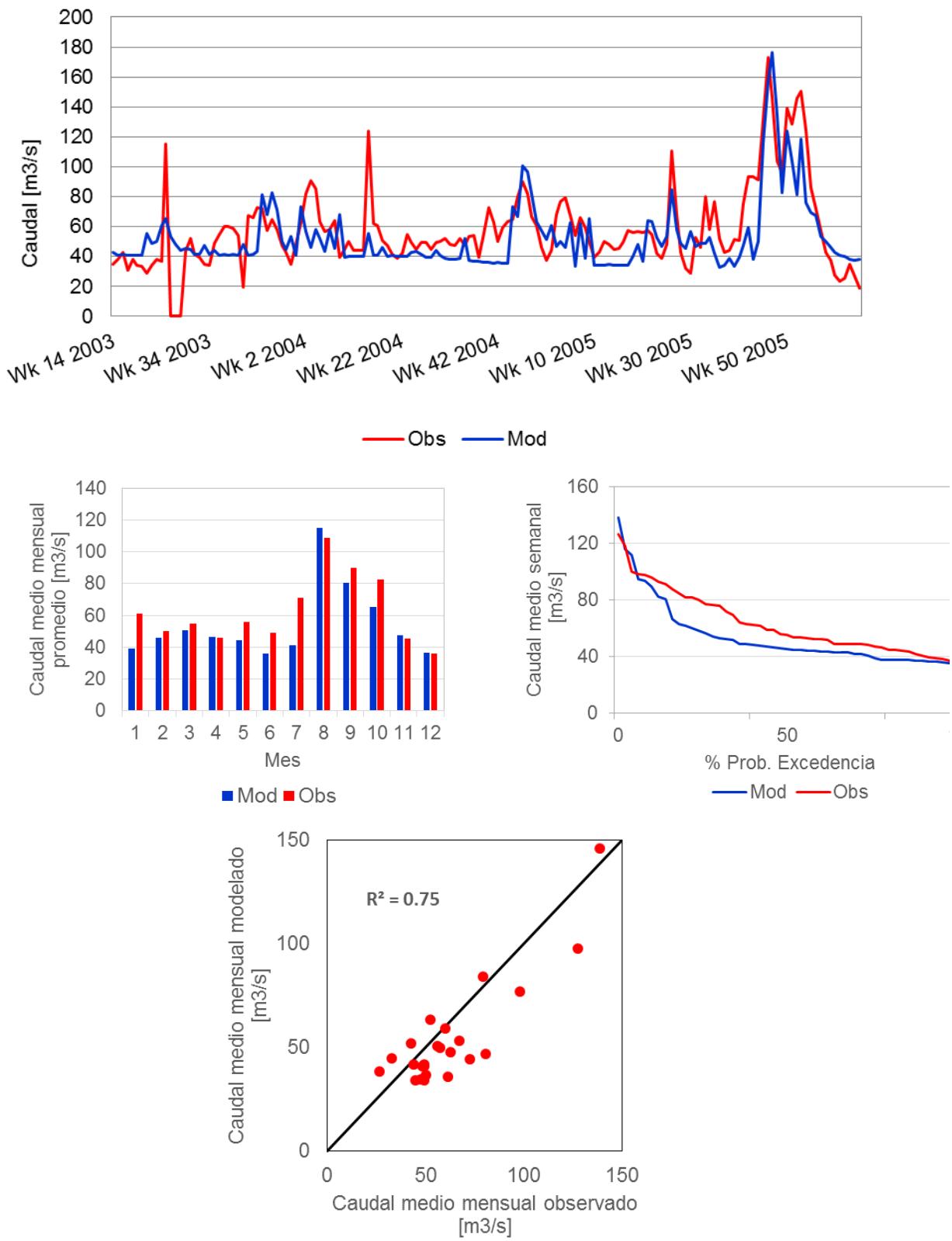


Figura 5-6: Resultados proceso de calibración en la cuenca Río Maule en los Baños

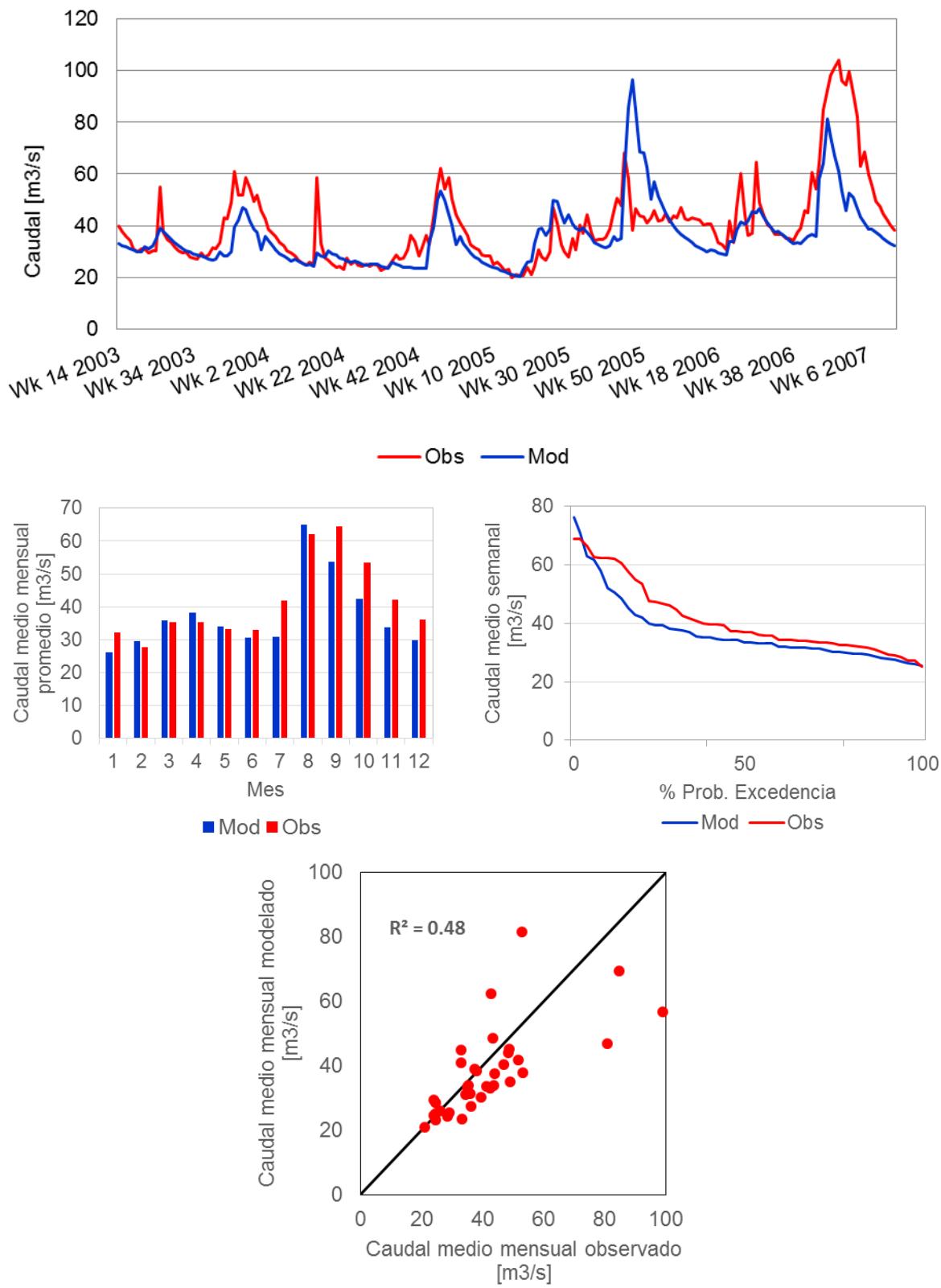


Figura 5-7: Resultados proceso de calibración en la cuenca Afluentes a Laguna Invernada.

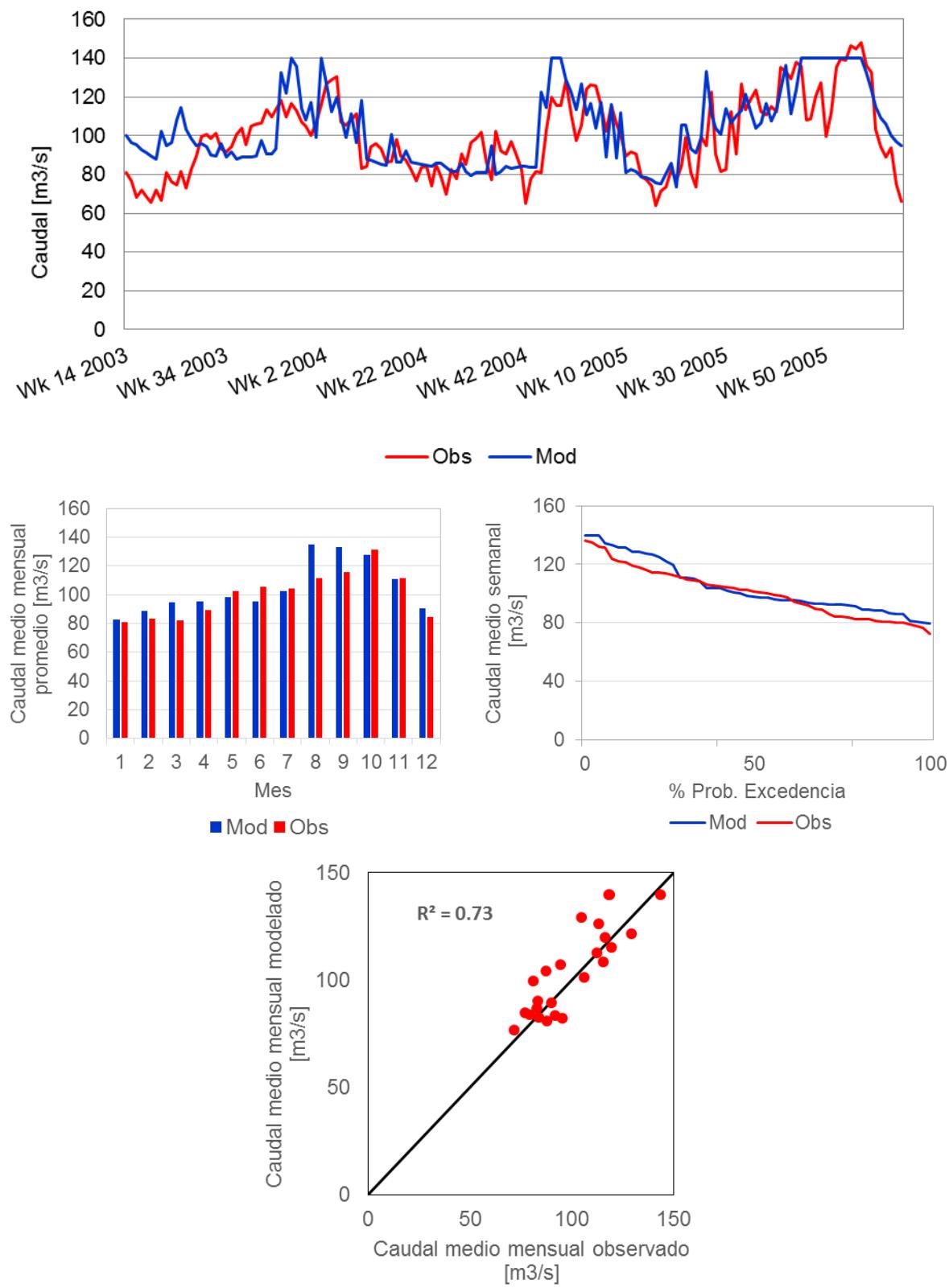


Figura 5-8: Resultados proceso de calibración en Canal Bocatoma Central Pehuenche

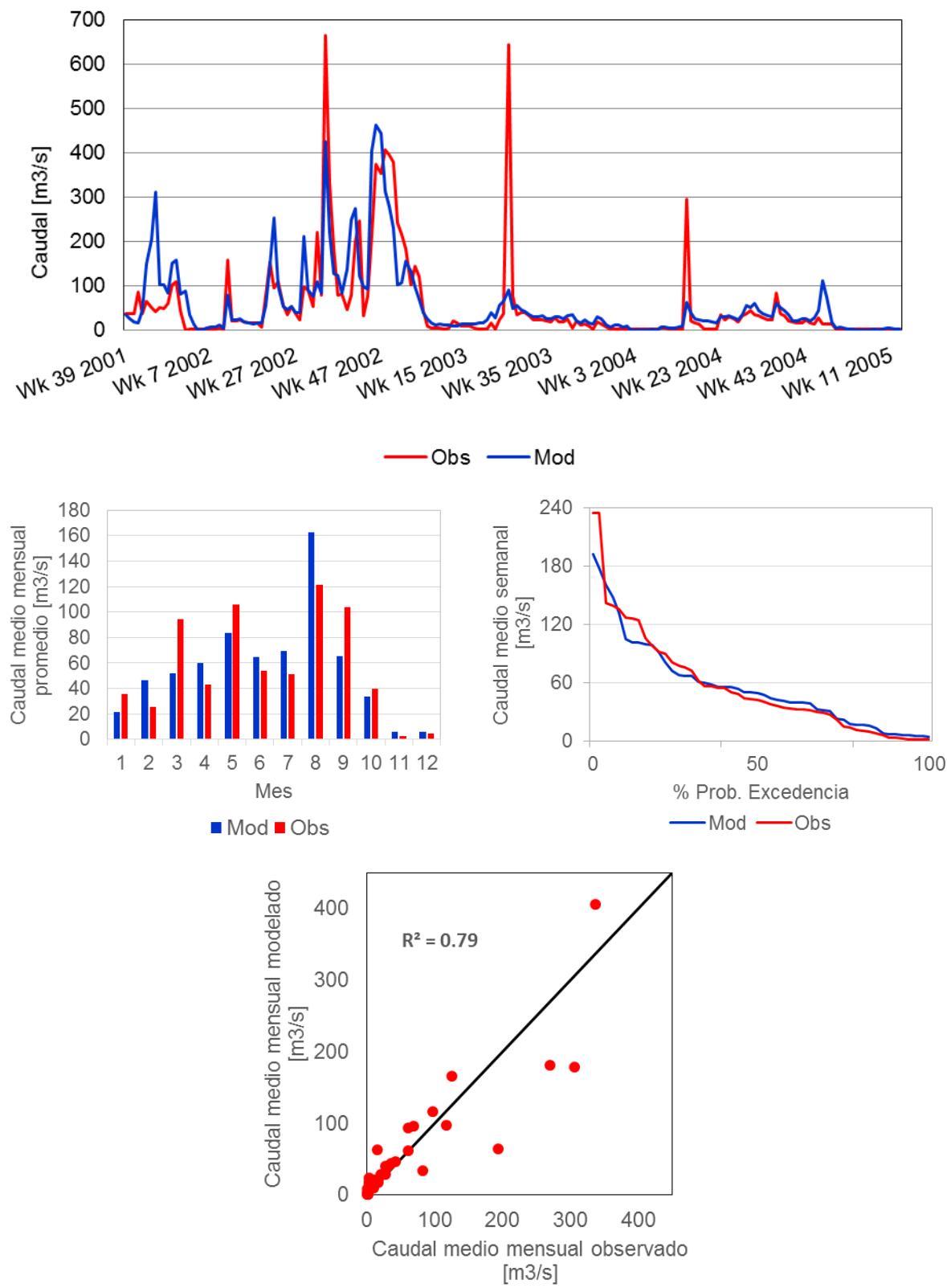


Figura 5-9: Resultados proceso de calibración en la cuenca Río Maule en Armerillo

Tabla 5-3: Resumen de los indicadores de eficiencia para todas las cuencas calibradas.

<b>Indicador Cuenca</b>	<b>NS</b>	<b>Log NS</b>	<b>PBias</b>	<b>R<sup>2</sup> Mensual</b>	<b>R<sup>2</sup> Anual</b>
Estero Las Garzas	0,81	0,82	-1,43	0,94	0,99
Claro en San Carlos	0,68	0,77	-11,65	0,85	0,99
Melado en la Lancha	0,78	0,83	-1,93	0,81	0,91
Maule en Los Baños	0,51	0,35	14,46	0,75	0,73
Afluentes Laguna Invernada	0,37	0,52	9,71	0,48	0,73
Canal Bocatoma Central Pehuenche	0,51	0,52	-3,84	0,73	0,97
Maule en Armerillo	0,62	0,59	1,20	0,79	0,97

Es posible observar en la Tabla 5-3 que los indicadores obtenidos en el proceso de calibración presentan valores que en algunos casos son deficientes, como por ejemplo, los valores de NS para las cuencas de Maule en Los Baños, Canal Bocatoma Central Pehuenche y Afluentes a Laguna Invernada. En el caso de las dos primeras, son estaciones que se encuentran fuertemente influenciadas por la generación hidroeléctrica, lo cual hace complejo el proceso de calibración. Lo antes mencionado es producto de que cada una de las centrales hidroeléctricas presenta un comportamiento que podría definirse como aleatorio, sin seguir un patrón en el tiempo, ya que cada año la generación de energía es diferente para cada una de ellas.

La inexistencia de un patrón de generación energética afecta principalmente a la estación de Maule en los Baños, ya que la operación de la Laguna El Maule se modela con dos reglas de operación, una para agricultura y la otra para hidroelectricidad, donde ambas varían a nivel semanal a lo largo de un año, el cual se repite posteriormente para todo el horizonte de modelación. Por lo tanto en estos casos se busca seguir principalmente el patrón de la serie de tiempo, más que un buen valor del coeficiente NS, el que se considera aceptable en estos casos.

En cuanto a los afluentes de Laguna Invernada, se considera que las deficiencias en el índice NS son puntuales y se producen en dos períodos estivales, donde los caudales en un caso son sobreestimados y en el siguiente subestimados, afectando considerablemente el valor del indicador, pero en el resto del período analizado, los valores simulados se ajustan de manera aceptable a los valores observados.

En términos generales se considera que los resultados obtenidos en el proceso de calibración son adecuados para una modelación en régimen intervenido, logrando respetar los patrones de las series de tiempo tanto de los caudales como de la generación de las centrales hidroeléctricas y los volúmenes de los embalses.

### 5.3 Resultados validación

En las Figuras 5-10 a 5-16 se presentan los resultados del proceso de validación.

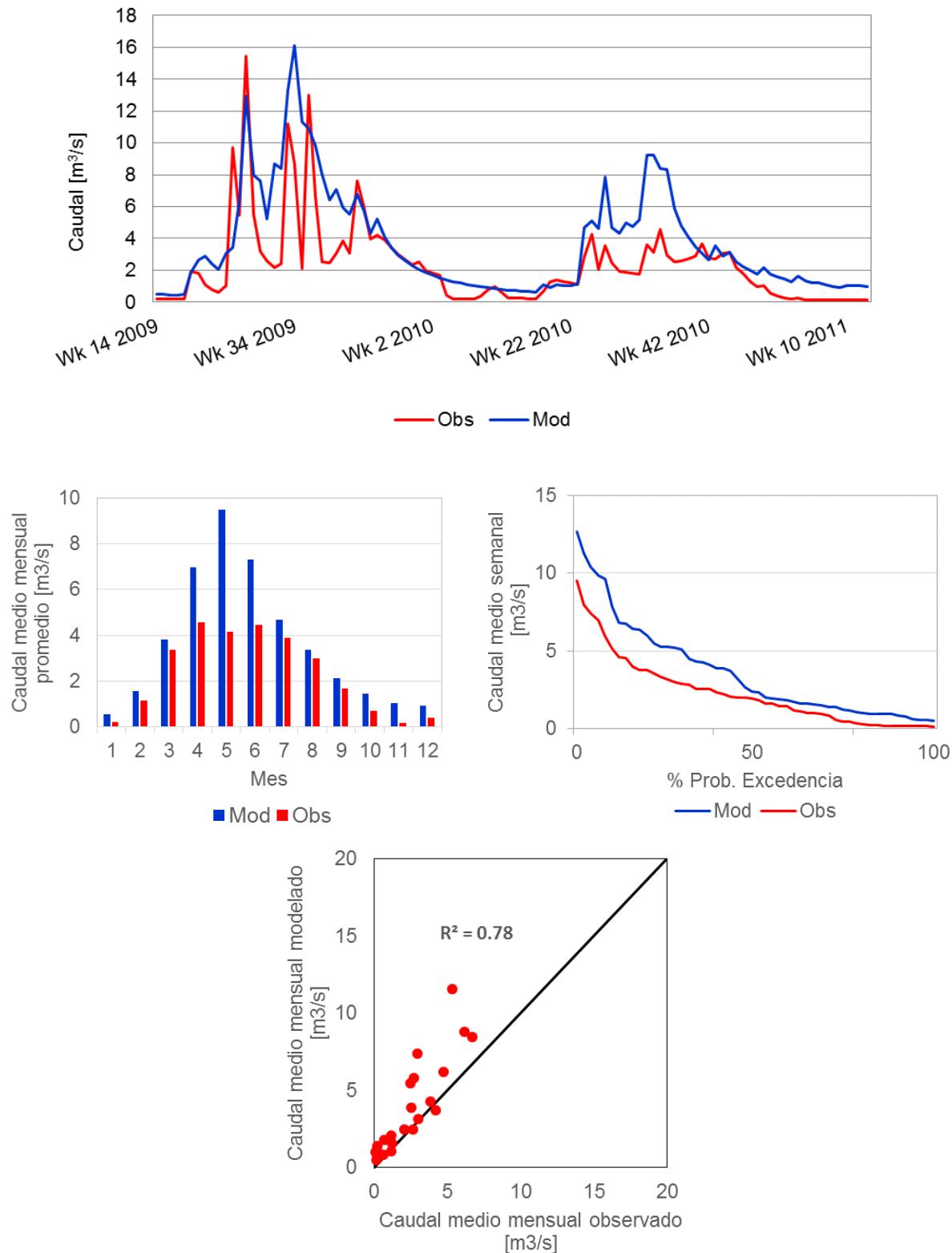


Figura 5-10: Resultados proceso de validación en la cuenca Estero Las Garzas.

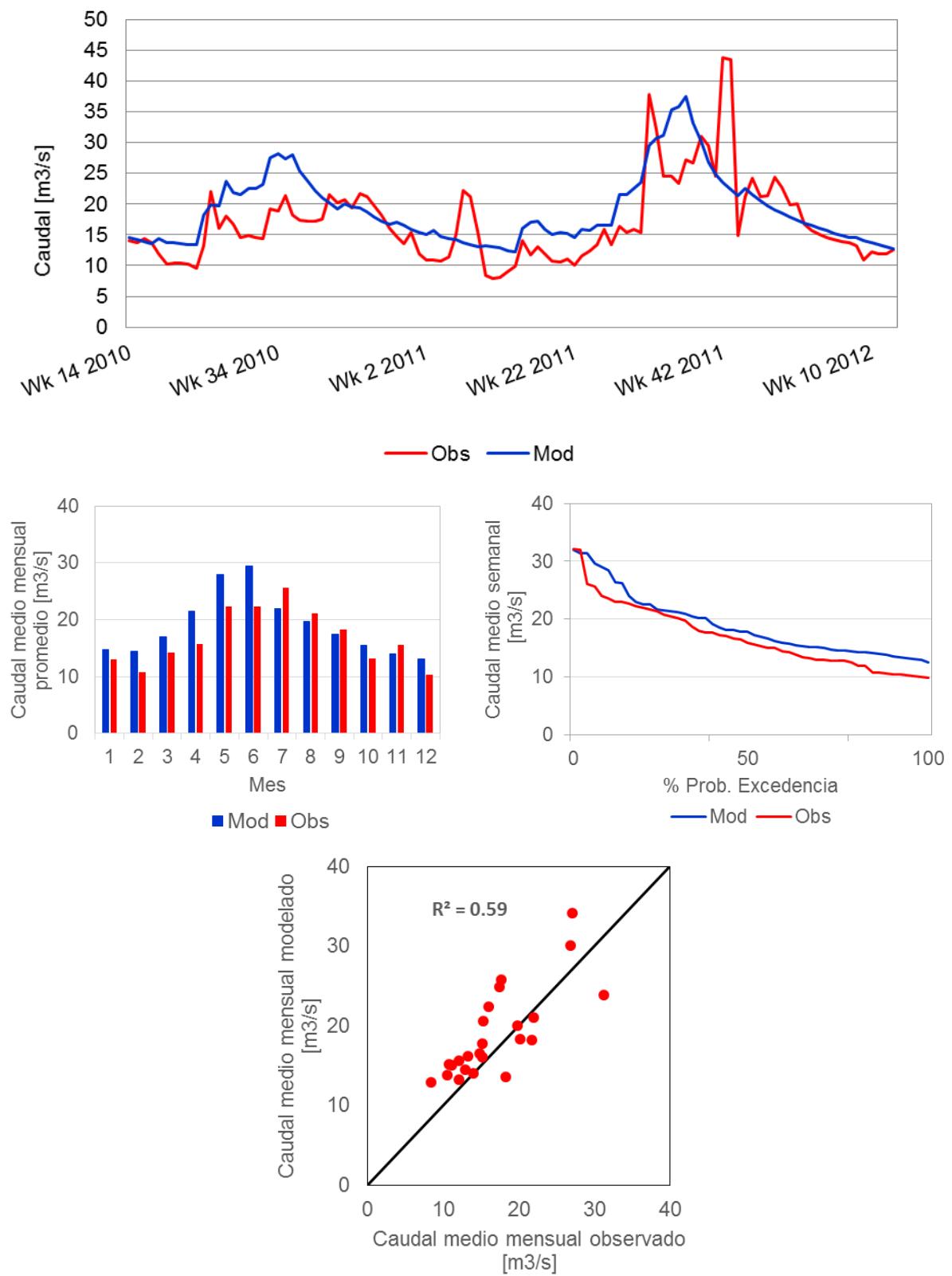


Figura 5-11: Resultados proceso de validación en la cuenca Río Claro en San Carlos.

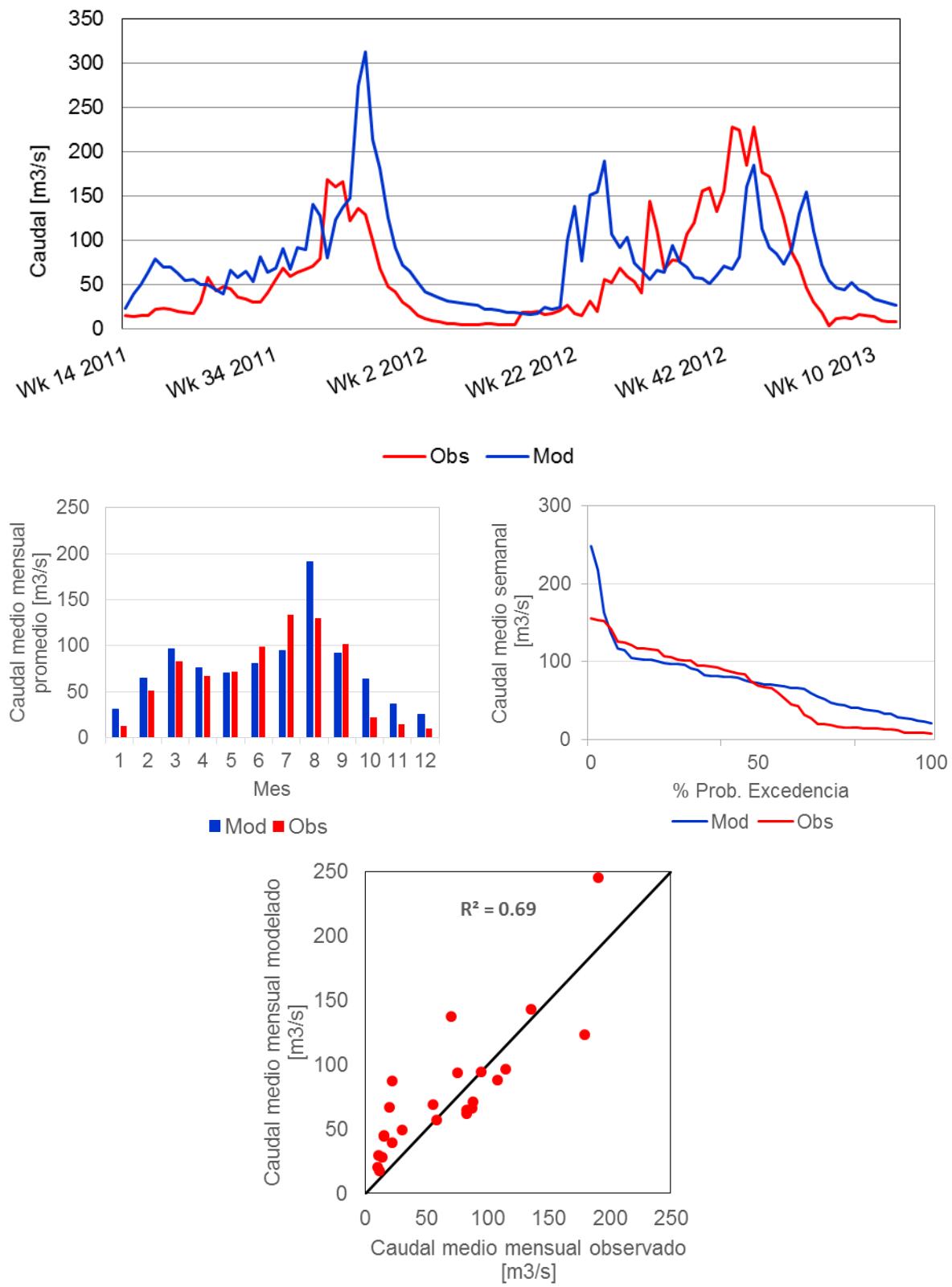


Figura 5-12: Resultados proceso de validación en la cuenca Río Melado en la Lancha.

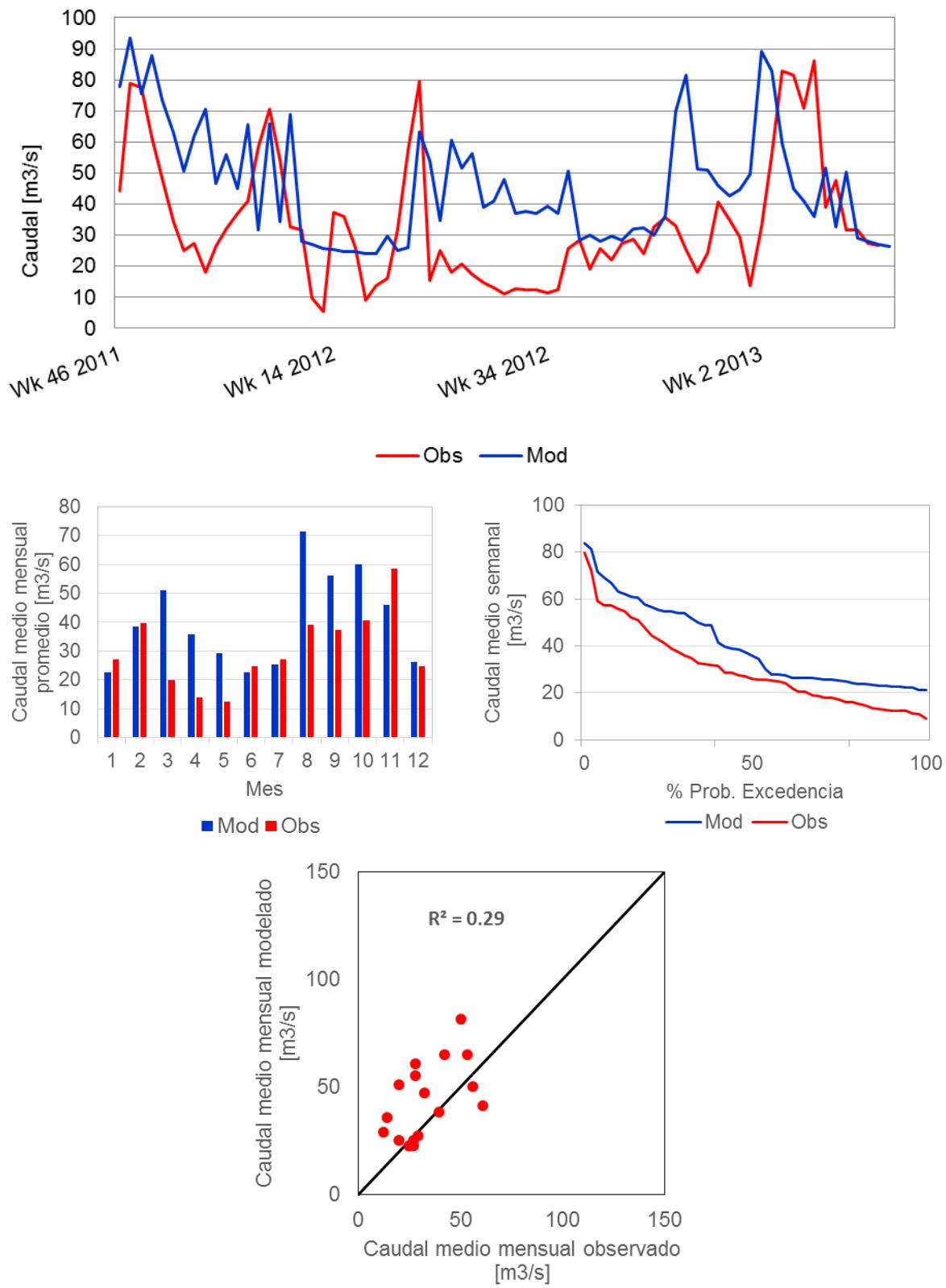


Figura 5-13: Resultados proceso de validación en la cuenca Río Maule en Los Baños.

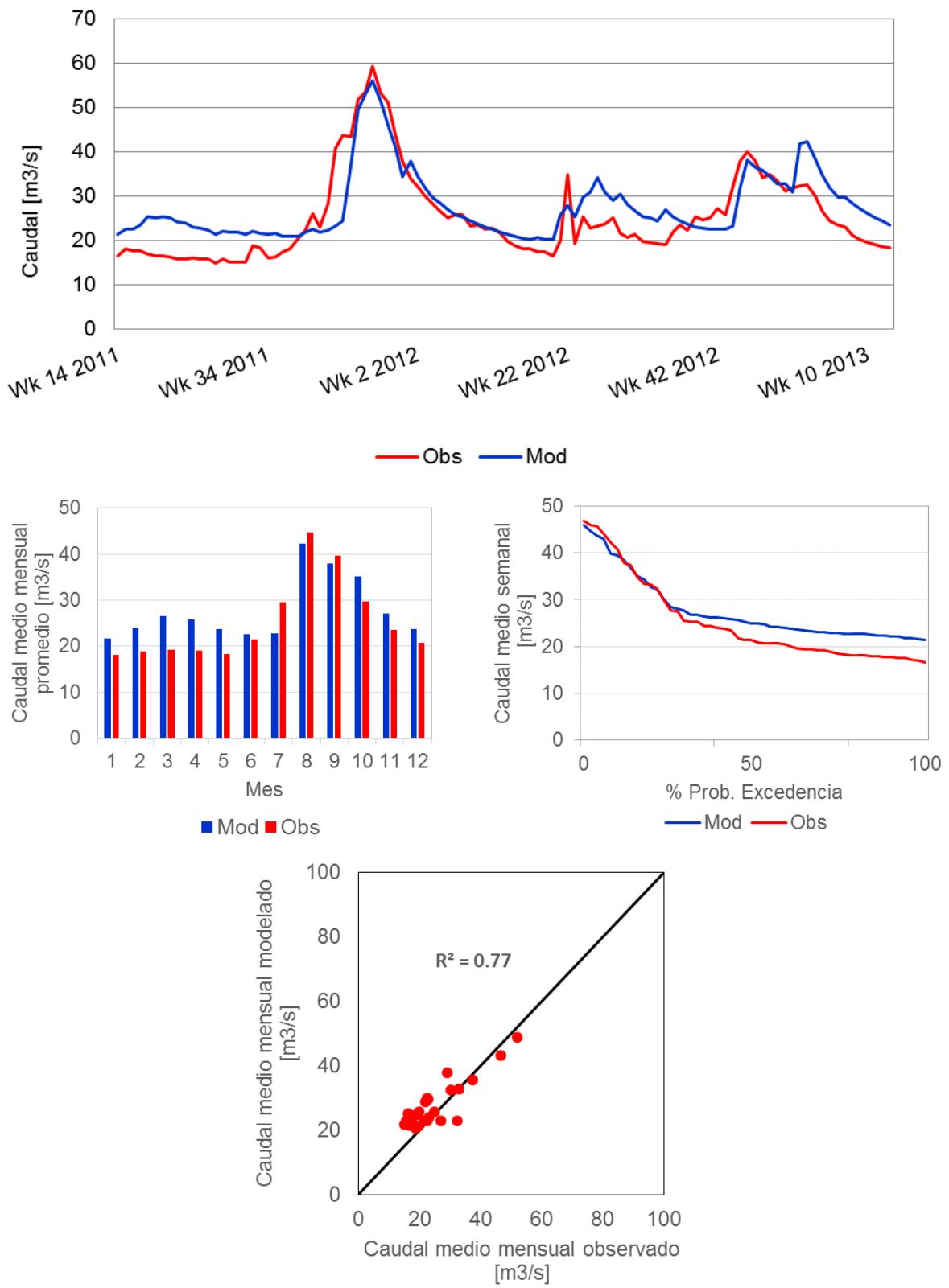


Figura 5-14: Resultados proceso de validación en la cuenca Afluentes Laguna Invernada.

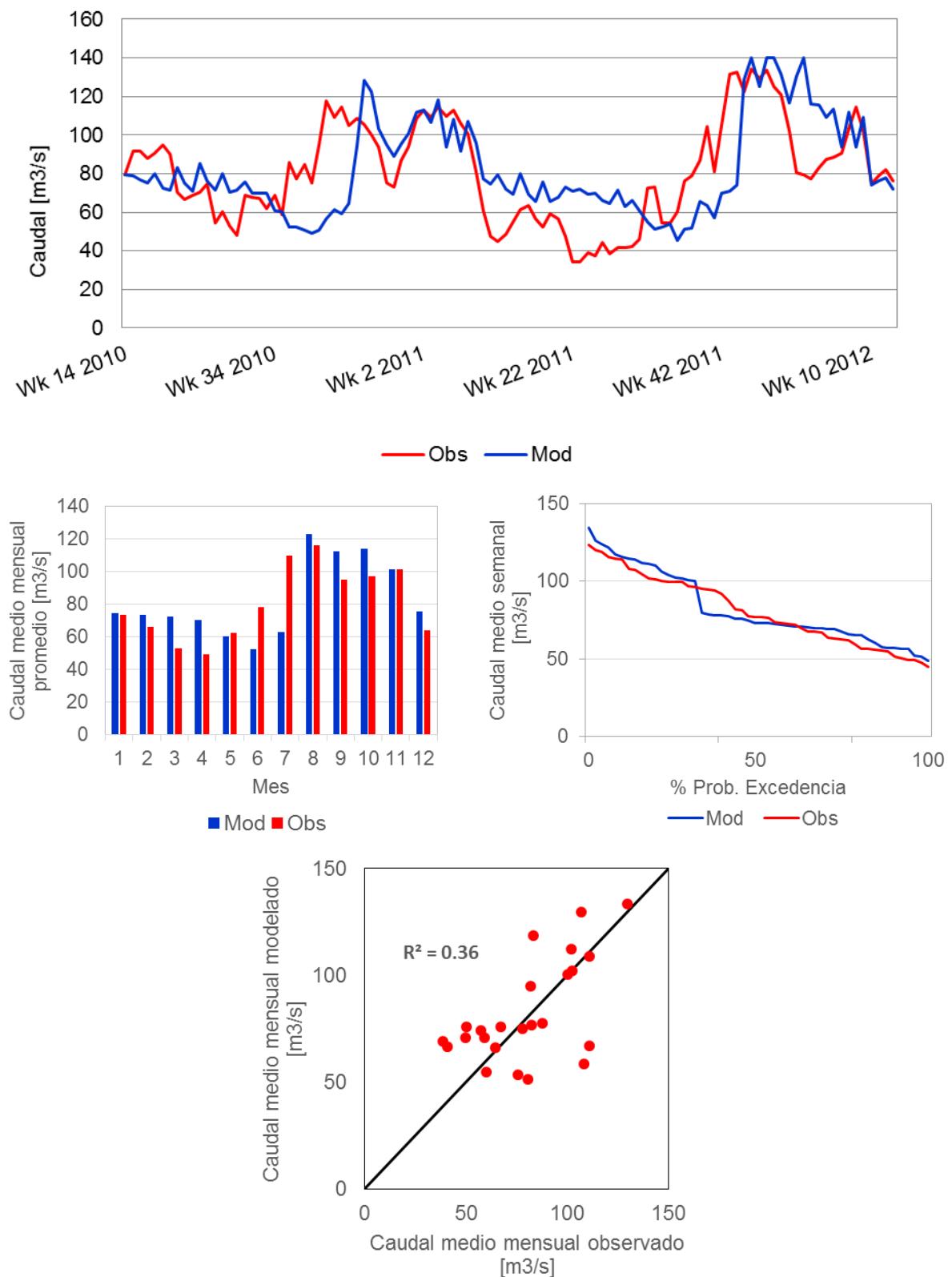


Figura 5-15: Resultados proceso de validación en la cuenca Canal Bocatoma Central Pehuenche.

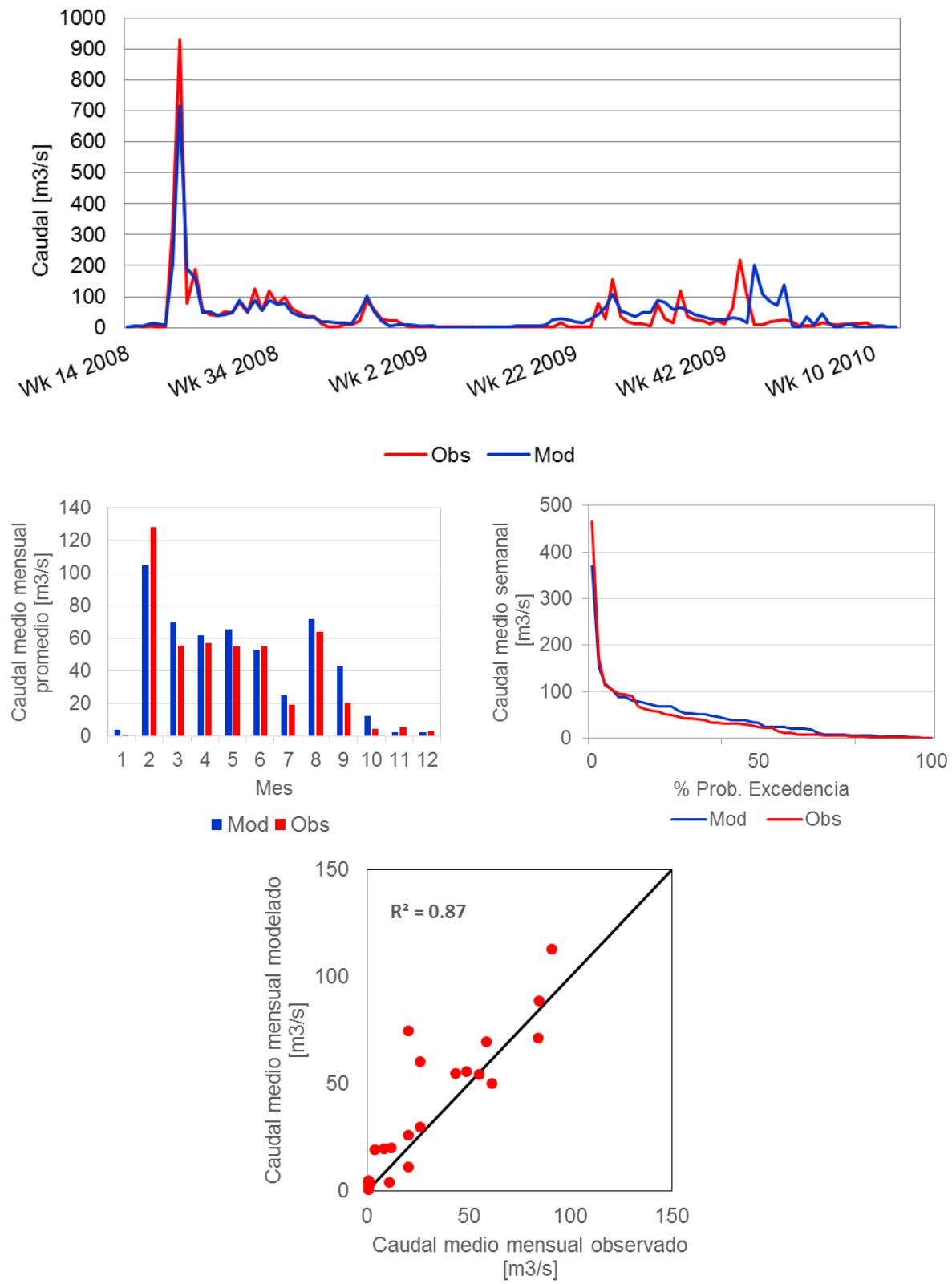


Figura 5-16: Resultados proceso de validación en la cuenca Río Maule en Armerillo.

Tabla 5-4: Resumen de los indicadores de eficiencia para todas las cuencas validadas.

<b>Indicador Cuenca</b>	<b>NS</b>	<b>Log NS</b>	<b>PBias</b>	<b>R<sup>2</sup> Mensual</b>
Estero Las Garzas	0,16	0,51	-57,25	0,78
Claro en San Carlos	0,34	0,42	-12,04	0,59
Melado en la Lancha	0,60	0,58	-14,98	0,69
Maule en Los Baños	-0,36	-0,08	-28,74	0,29
Afluentes Laguna Invernada	0,64	0,51	-9,98	0,77
Canal Bocatoma Central Pehuenche	0,14	0,12	-1,93	0,36
Maule en Armerillo	0,79	0,40	-9,14	0,87

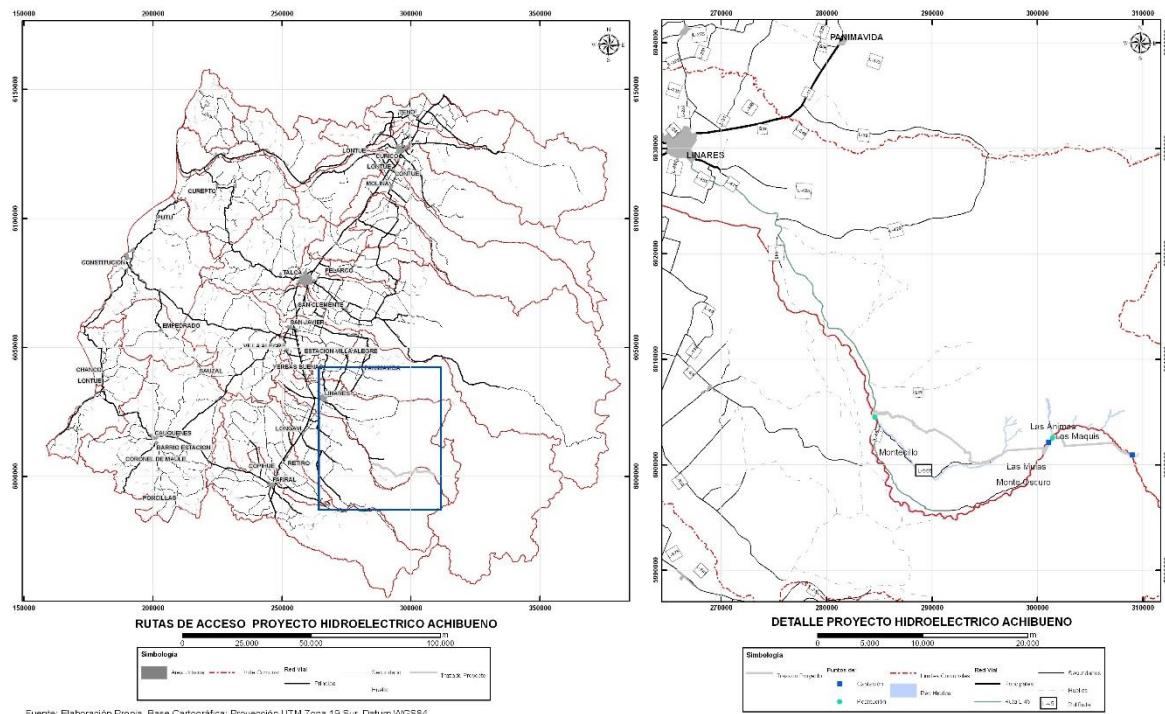
El proceso de validación muestra algunas deficiencias en cuencas que durante la calibración arrojaron buenos resultados. Esto se observa en Estero Las Garzas y Claro en San Carlos, donde en los últimos años se observa una sobreestimación importante de los caudales por parte del modelo, lo cual se repite en el resto de las estaciones de manera más suave. Esto puede indicar que el modelo no tiene suficiente información para replicar periodos de sequía prolongada, por lo que se recomienda a futuro y en función de la disponibilidad de información de las estaciones fluviométricas, realizar la calibración con series observadas de mayor extensión, donde sea posible abarcar los diferentes fenómenos que se han presentado en la cuenca a lo largo del tiempo

Aun así, el modelo logra replicar de manera aceptable los patrones de comportamiento de las series de tiempo en la mayoría de las estaciones y los valores de flujo anual, lo que se observa a través de las correlaciones mensuales y el PBIAS.

#### 5.4 Elección cuenca para transposición de caudales

Dentro de la zona homogénea analizada por Rubio (2010) se identificó cual podría ser un punto de interés para el SIC. Bajo esa premisa se hizo una revisión de la zona donde se encontró que en el año 2009 se proyectó una central hidroeléctrica de pasada denominado “Proyecto hidroeléctrico Achibueno” desarrollado por Hidroeléctrica Centinela Limitada (ver Figura 5-17).

Se ubica específicamente en la cuenca del río Achibueno, la que desde su origen (en laguna del mismo nombre) hasta la estación de fluviométrica río Achibueno en La Recova, abarca una superficie aproximada de 943 Km<sup>2</sup> entre Linares y Longaví. Las cotas van desde los 590 hasta los 2600 m s. n. m. La orientación del cauce principal va de Oriente a Nor-poniente, con una longitud aproximada de 78 km.



Fuente: Elaboración Propia. Base Cartográfica: Proyección UTM Zona 19 Sur, Datum WGS84.

Figura 5-17: Plano acceso proyecto hidroeléctrico Achibueno

## 5.5 Identificación correlaciones con subcuencas modeladas

Dado que los mejores resultados en el proceso de calibración se tienen en cuencas que presentan un régimen natural, se consideró adecuado analizar la posibilidad de transposición entre ellas y la estación Río Achibueno en la Recova. Cabe destacar que las cuencas simuladas cumplen con la condición de proximidad espacial y además están dentro de una zona homogénea. Las cuencas analizadas son:

- Río Claro en San Carlos
- Melado en la Lancha
- Estero Las Garzas

Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 5-18 a 5-20, donde se muestra la correlación entre los logaritmos de los caudales simulados en las cuencas ya mencionadas y los caudales registrados en la estación Río Achibueno en la Recova, ambos a escala semanal para el periodo 2003-2009.

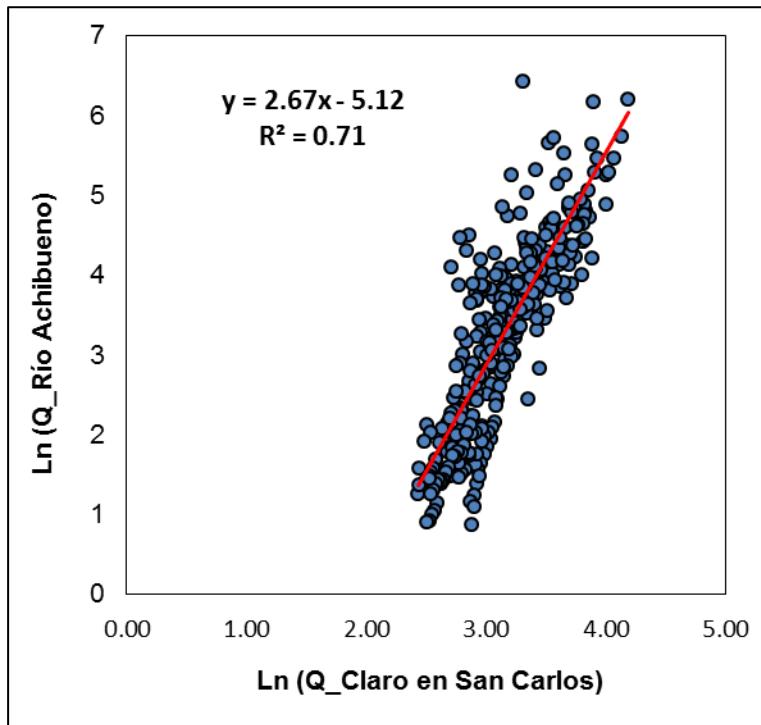


Figura 5-18: Correlación  $\ln Q$  Río Claro en San Carlos y Río Achibueno en La Recova

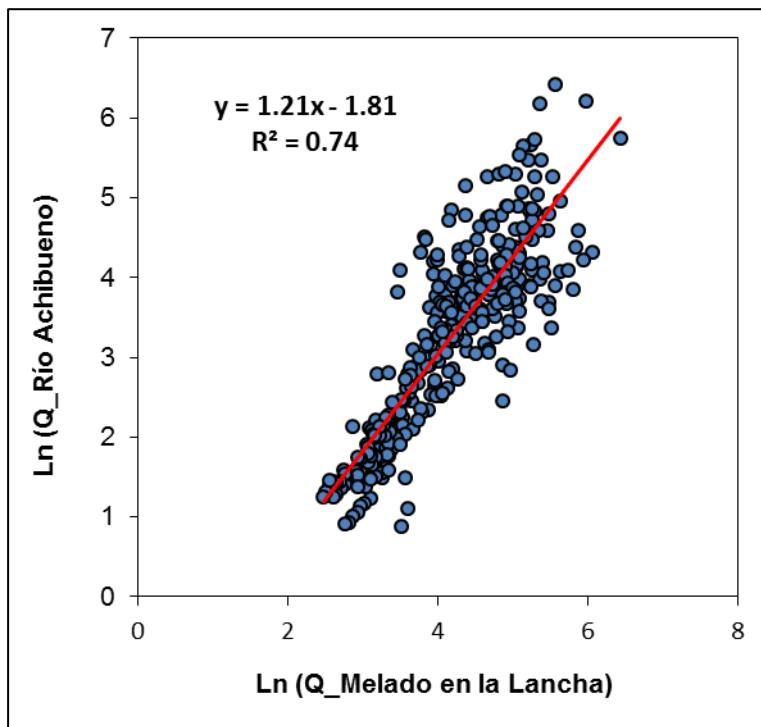


Figura 5-19: Correlación  $\ln Q$  Río Melado en la Lancha y Río Achibueno en La Recova

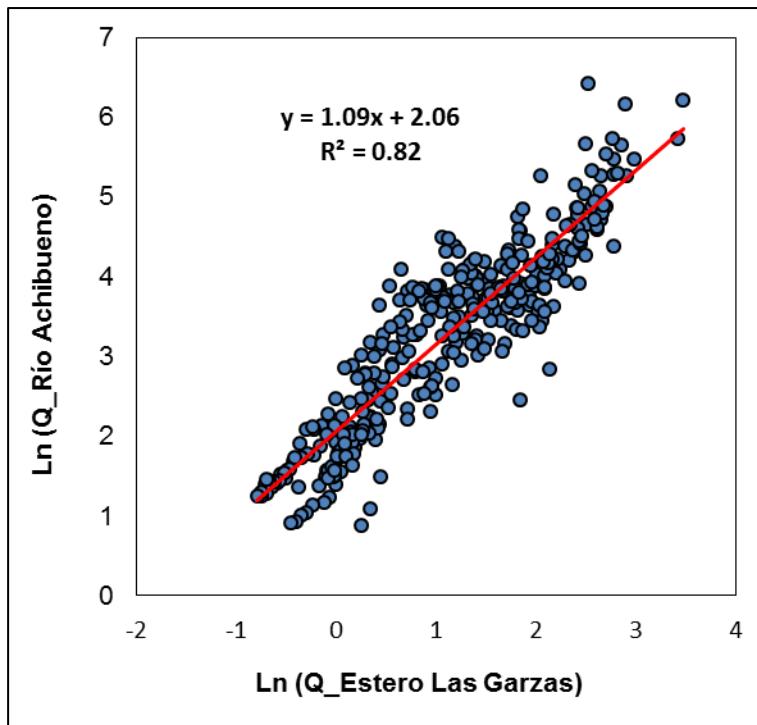


Figura 5-20: Correlación  $\ln Q$  Estero Las Garzas y Río Achibueno en La Recova

Como es posible apreciar en los gráficos anteriores, la mayor correlación se da con la estación de Estero Las Garzas, que si bien no es la estación más próxima, se encuentran a una distancia aceptable y ambas se encuentran en la zona homogénea. Se observa además que la pendiente de la recta ajustada a los datos es cercana a 1.

## 5.6 Resultados transposición de caudales

La correlación obtenida en el punto anterior es buena, pero como ya se ha mencionado anteriormente, eso no es suficiente y es necesario verificar que la relación represente de manera adecuada la estacionalidad y magnitud de los caudales de la cuenca. En la Figura 5-21 se presenta los caudales simulados y observados para la estación Río Achibueno en la Recova.

Cabe destacar que este es el procedimiento a realizar para generar series de caudales en puntos de interés para el SIC, que estén al interior de la zona homogénea a la que pertenece la cuenca modelada.

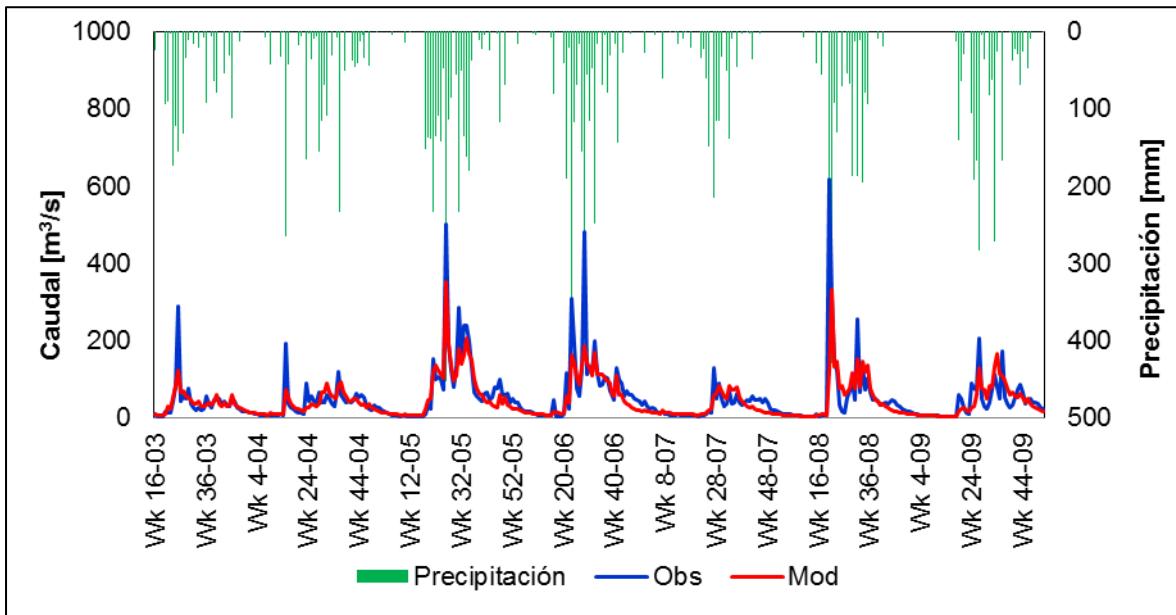


Figura 5-21: Serie de tiempo caudales modelados y observados estación Río Achibueno en La Recova.

Se puede observar que la relación ajustada logra reproducir la estacionalidad de los caudales para todo el periodo analizado de manera adecuada, donde las principales falencias se presentan en los caudales elevados, no logrando representar los “peaks” registrados por la estación fluviométrica en los meses de invierno.

## 5.7 Generación de series sintéticas de caudales

La generación de series sintéticas de caudales se lleva a cabo en dos etapas, en una primera instancia se realiza la generación de series sintéticas de precipitación y temperatura, para posteriormente ingresarlas como datos de entrada en el modelo de simulación hidrológica, el cual arroja como resultado las series sintéticas de caudales.

### 5.7.1 Generación series sintéticas de precipitación y temperatura

Tal como se explica en la sección 2.4.1, las series de temperatura dependen de la serie de precipitación, dado que la temperatura máxima del día está relacionada con la existencia de precipitación (húmedo o seco) y además la selección del escenario hidrológico está en función de los milímetros de agua caída durante el año.

En primera instancia se genera un conjunto de 100 años de datos por escenario hidrológico, tanto para precipitación como para temperatura a escala diaria, en donde se realizan pruebas no paramétricas a nivel mensual a las series de precipitación y temperatura, de manera de determinar que todas pertenecen al mismo universo. Las Figuras 5-22 a 5-24 muestran los promedios mensuales observados y simulados de las variables y estaciones utilizadas para años secos; los promedios mensuales observados y simulados para años normales y húmedos se encuentran en el Anexo 2.

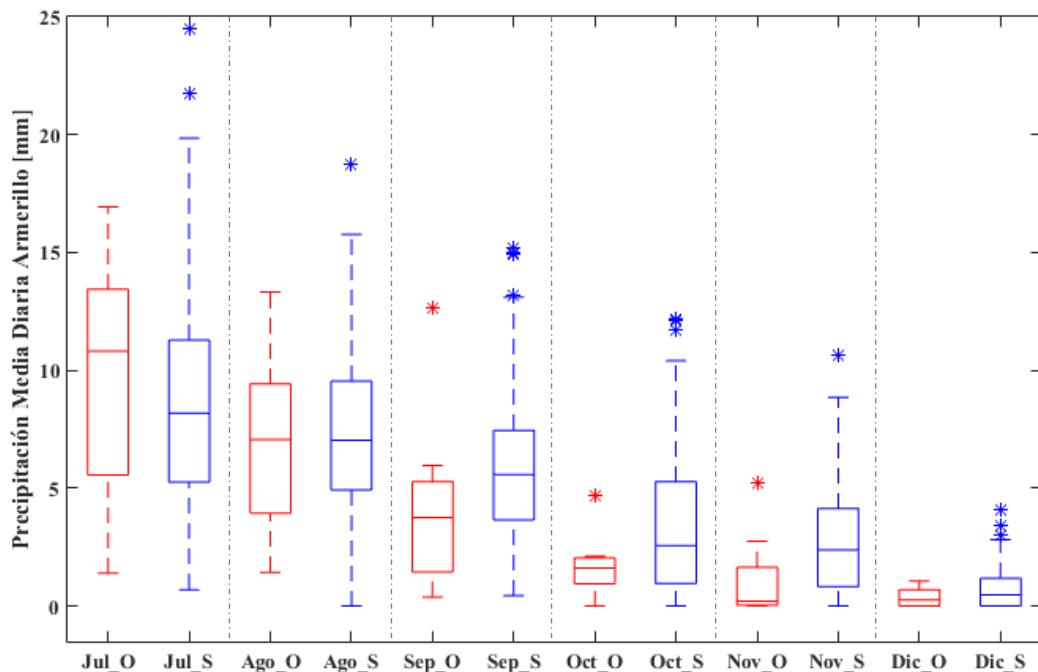
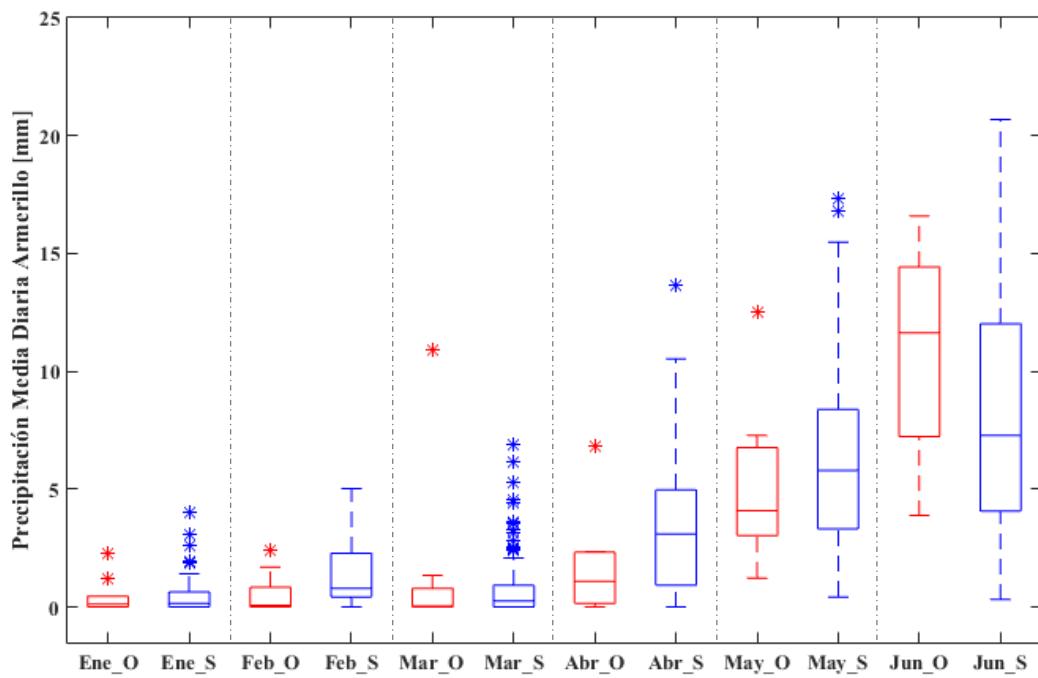


Figura 5-22: Distribución de las precipitaciones medias diarias observadas (<sub>O</sub>) y simuladas (<sub>S</sub>) en la estación Armerillo en años secos

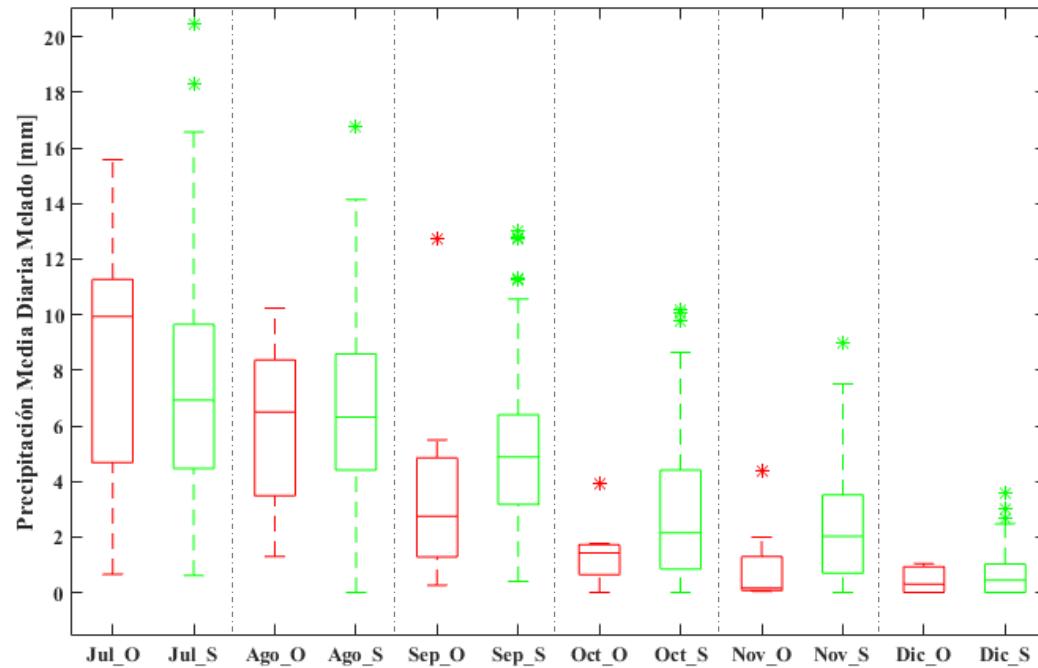
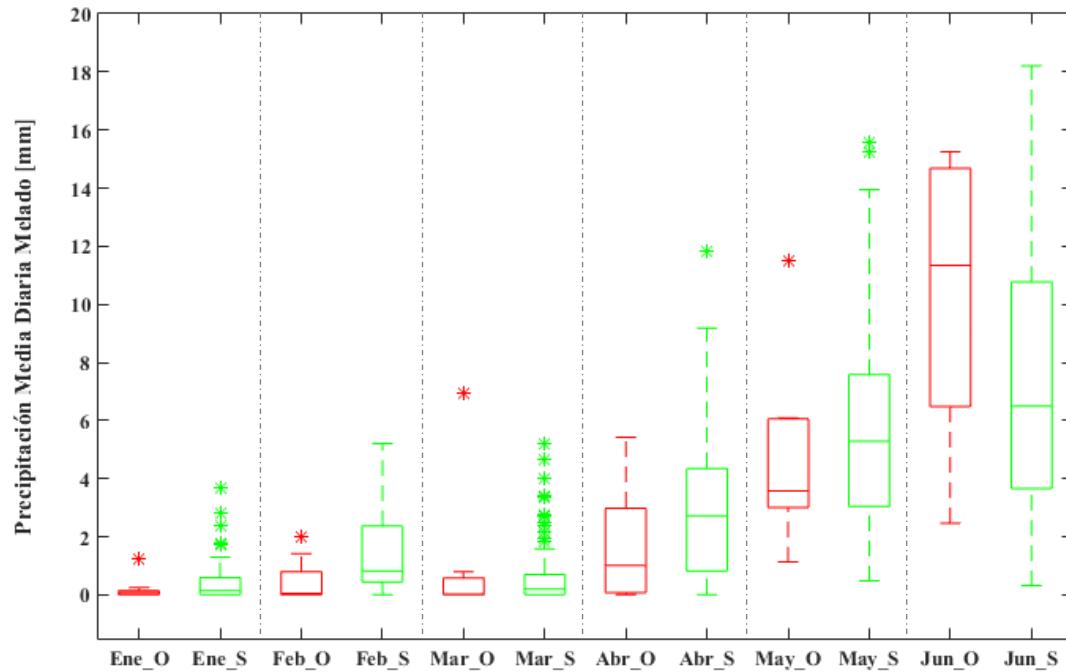


Figura 5-23: Distribución de las precipitaciones medias diarias observadas (*\_O*) y simuladas (*\_S*) en la estación Melado en años secos

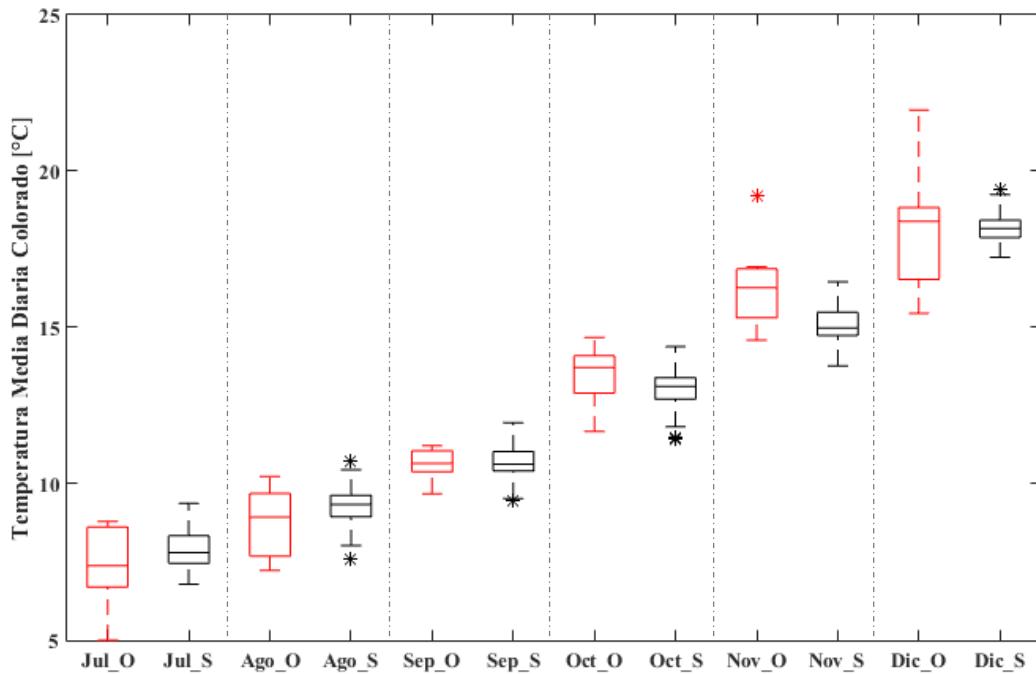
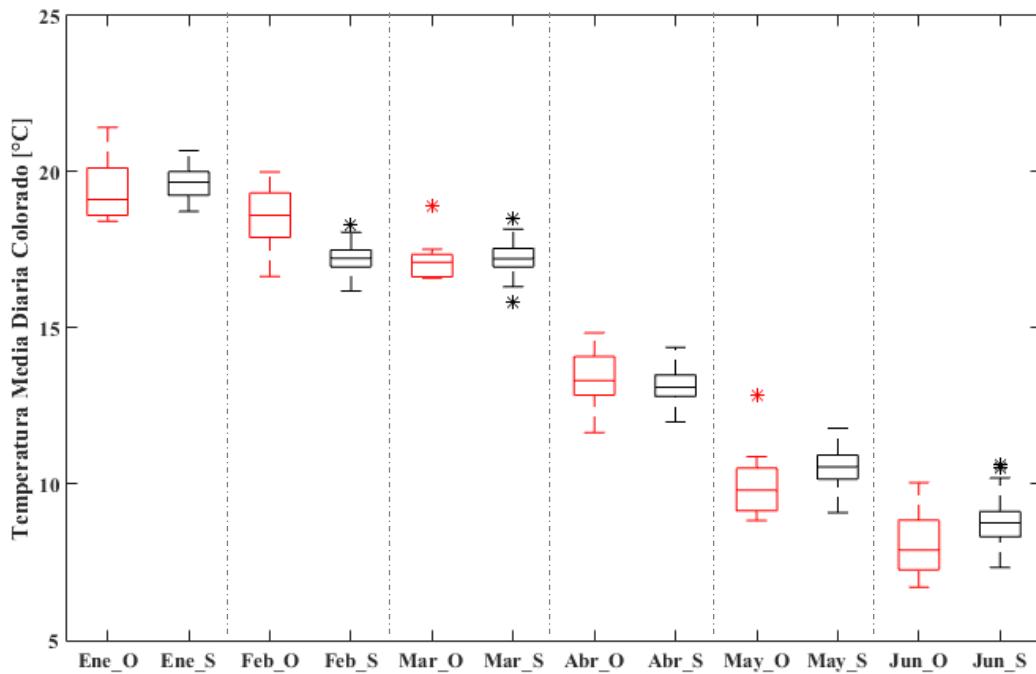


Figura 5-24: Distribución de las temperaturas medias diarias observadas (\_O) y simuladas (\_S) en la estación Colorado en años secos

Una vez generado el conjunto de datos y teniendo en cuenta que el horizonte de planificación del SIC es de 2 años, se considera este intervalo de tiempo para la generación de series sintéticas. La elección del escenario hidrológico se hace para el primer año en forma aleatoria, estimando la probabilidad de tipo de año (seco, normal o húmedo) asociada a una ventana clima comprendida entre los años 1983-2013. Posteriormente, para el escenario hidrológico del año siguiente, se realiza un análisis en el mismo periodo de años, donde se estiman las probabilidades de las distintas combinaciones, tanto para año seco, normal o húmedo, considerando las posibilidades:

- $P_{SS}$ , probabilidad de año seco dado año seco
- $P_{SN}$ , probabilidad de año normal dado año seco
- $P_{SH}$ , probabilidad de año húmedo dado año seco
- $P_{NS}$ , probabilidad de año seco dado año normal
- $P_{NN}$ , probabilidad de año normal dado año normal
- $P_{NH}$ , probabilidad de año húmedo dado año normal
- $P_{HS}$ , probabilidad de año seco dado año húmedo
- $P_{HN}$ , probabilidad de año normal dado año húmedo
- $P_{HH}$ , probabilidad de año húmedo dado año húmedo

*Tabla 5-5: Clasificación de tipo de año según precipitación anual periodo 1983-2015*

Año	Tipo	Año	Tipo	Año	Tipo
1983	Seco	1994	Normal	2005	Húmedo
1984	Húmedo	1995	Normal	2006	Normal
1985	Normal	1996	Seco	2007	Seco
1986	Húmedo	1997	Húmedo	2008	Normal
1987	Húmedo	1998	Seco	2009	Normal
1988	Normal	1999	Normal	2010	Seco
1989	Seco	2000	Normal	2011	Normal
1990	Seco	2001	Normal	2012	Normal
1991	Húmedo	2002	Húmedo	2013	Seco
1992	Húmedo	2003	Seco	2014	Seco
1993	Normal	2004	Normal	2015	***

En función de las probabilidades antes mencionadas se escoge en forma aleatoria el escenario para el segundo año de la serie sintética. Se genera un conjunto de 100 series en los que se encuentran presentes las diferentes combinaciones antes mencionadas.

Posteriormente, se escoge en forma aleatoria desde los conjuntos de 100 años, los valores de precipitación ( $P_p$ ) y temperatura ( $T$ ) que componen las series sintéticas. Con esto se tiene definidos los datos de entrada para generar las series sintéticas de caudales.

### 5.7.2 Generación series sintéticas de caudales

Cada par de series sintéticas (Pp y T) se ingresa como dato al modelo hidrológico calibrado, obteniendo los valores de series sintéticas de caudales para cada una de las estaciones analizadas en el punto 5.2. Este proceso se realiza para 3 escenarios diferentes, los que consideran la evaluación de las series sintéticas después de un año seco, normal o húmedo.

En las Figuras 5-25 a 5-33 se muestra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para las estaciones Río Melado en La Lancha, Canal Bocatoma Central Pehuenche y Río Maule en Armerillo. Para cada una de ellas se presenta una primera figura con la serie de tiempo que incluye caudales simulados según la Tabla 5-6 y la serie de tiempo simulada con precipitaciones y temperaturas observadas (Sim) para el mismo periodo; el resto de las estaciones se muestran en el Anexo 1.

*Tabla 5-6: Secuencias de tipo de año para la generación de series sintéticas de caudales*

Año Inicio	Año 1	Año 2
Seco (2013)	Seco	Seco
		Normal
		Húmedo
	Normal	Seco
		Normal
		Húmedo
	Húmedo	Seco
		Normal
		Húmedo
Normal (2008)	Seco	Seco
		Normal
		Húmedo
	Normal	Seco
		Normal
		Húmedo
	Húmedo	Seco
		Normal
		Húmedo
Húmedo (2005)	Seco	Seco
		Normal
		Húmedo
	Normal	Seco
		Normal
		Húmedo
	Húmedo	Seco
		Normal
		Húmedo

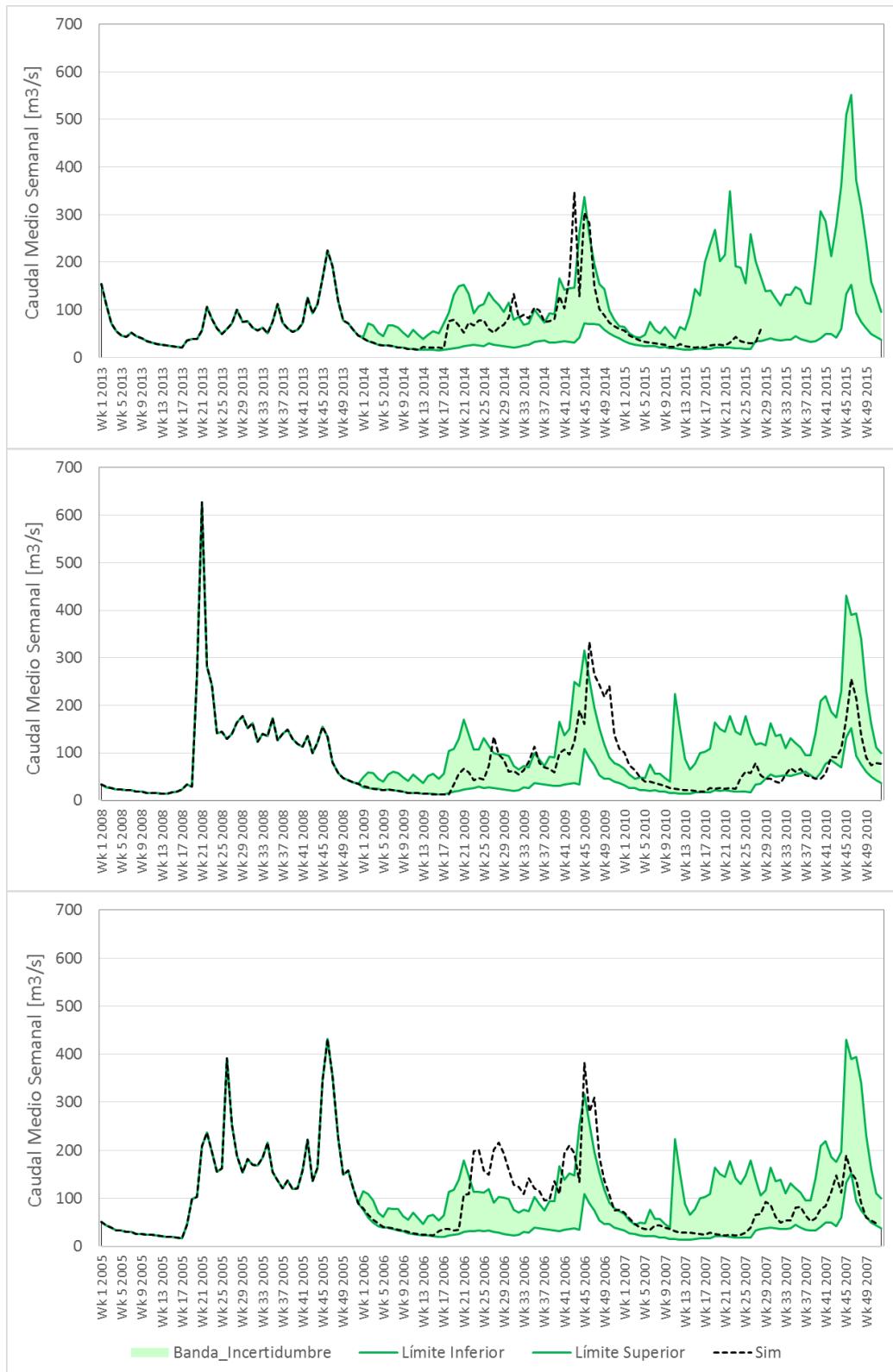


Figura 5-25: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Melado en La Lancha  
(Año 1 – Seco)

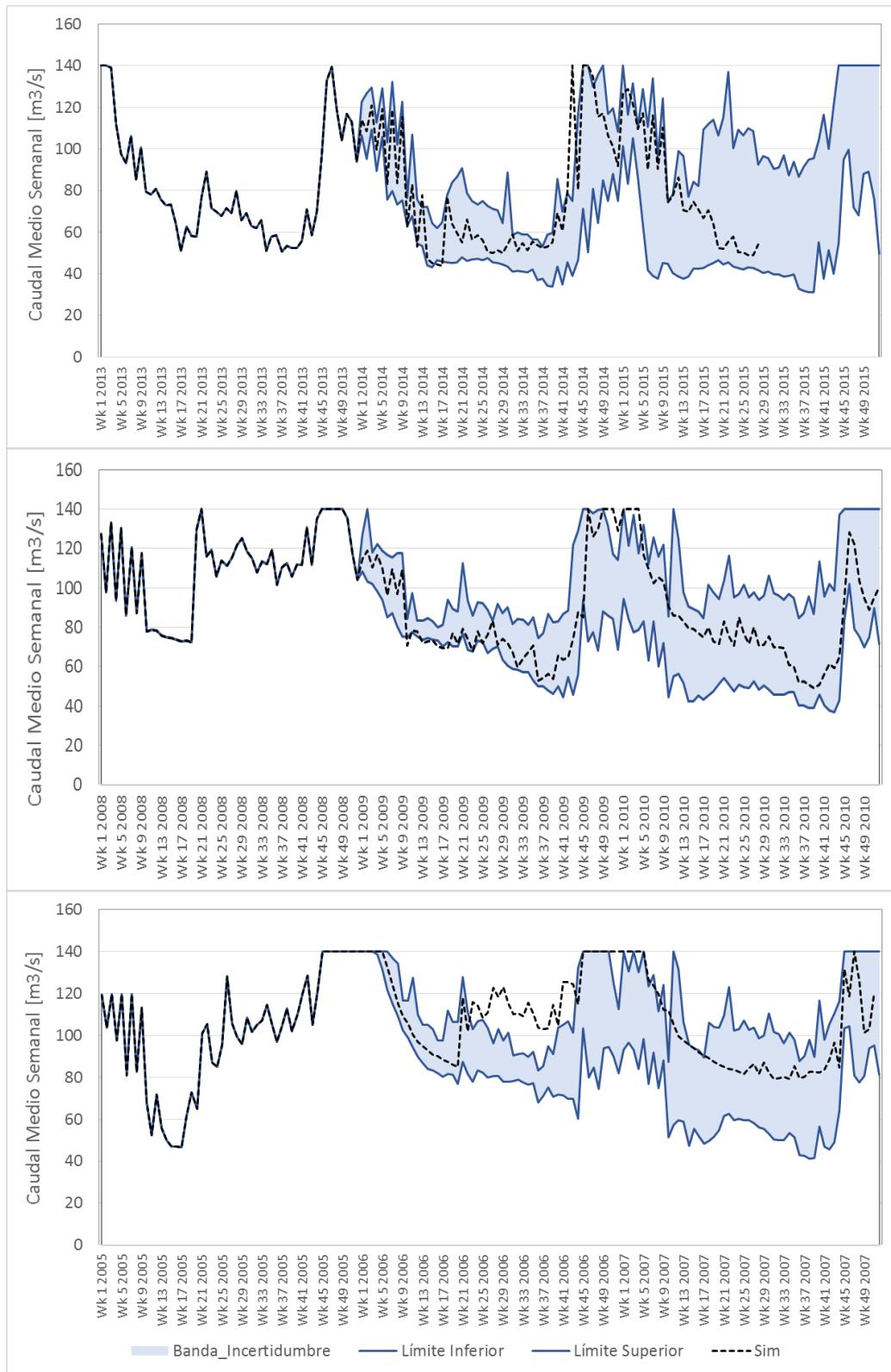


Figura 5-26: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Canal Bocatoma Central Pehuenche (Año 1 – Seco)

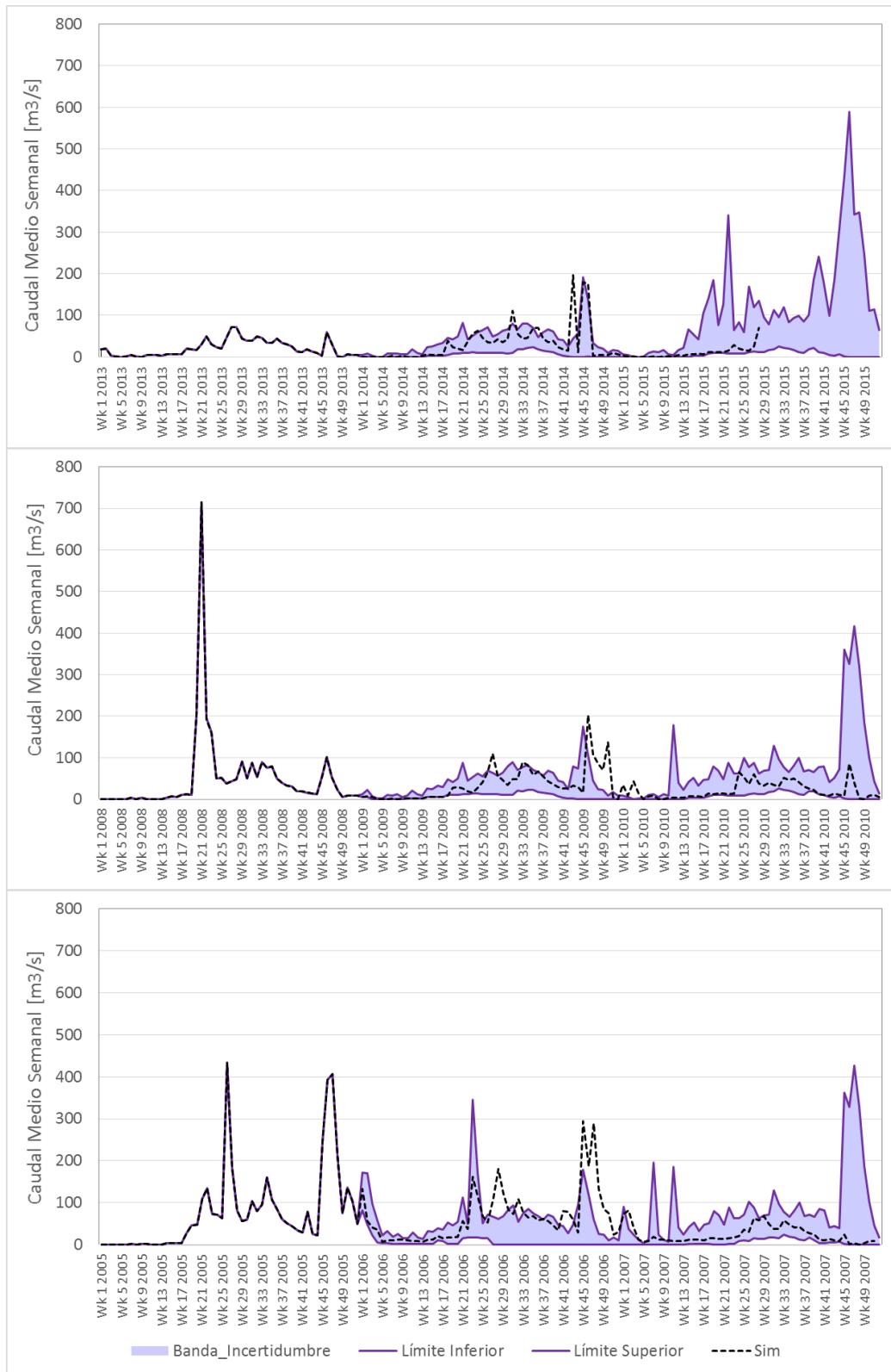


Figura 5-27: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Maule en Armerillo  
(Año 1 – Seco)

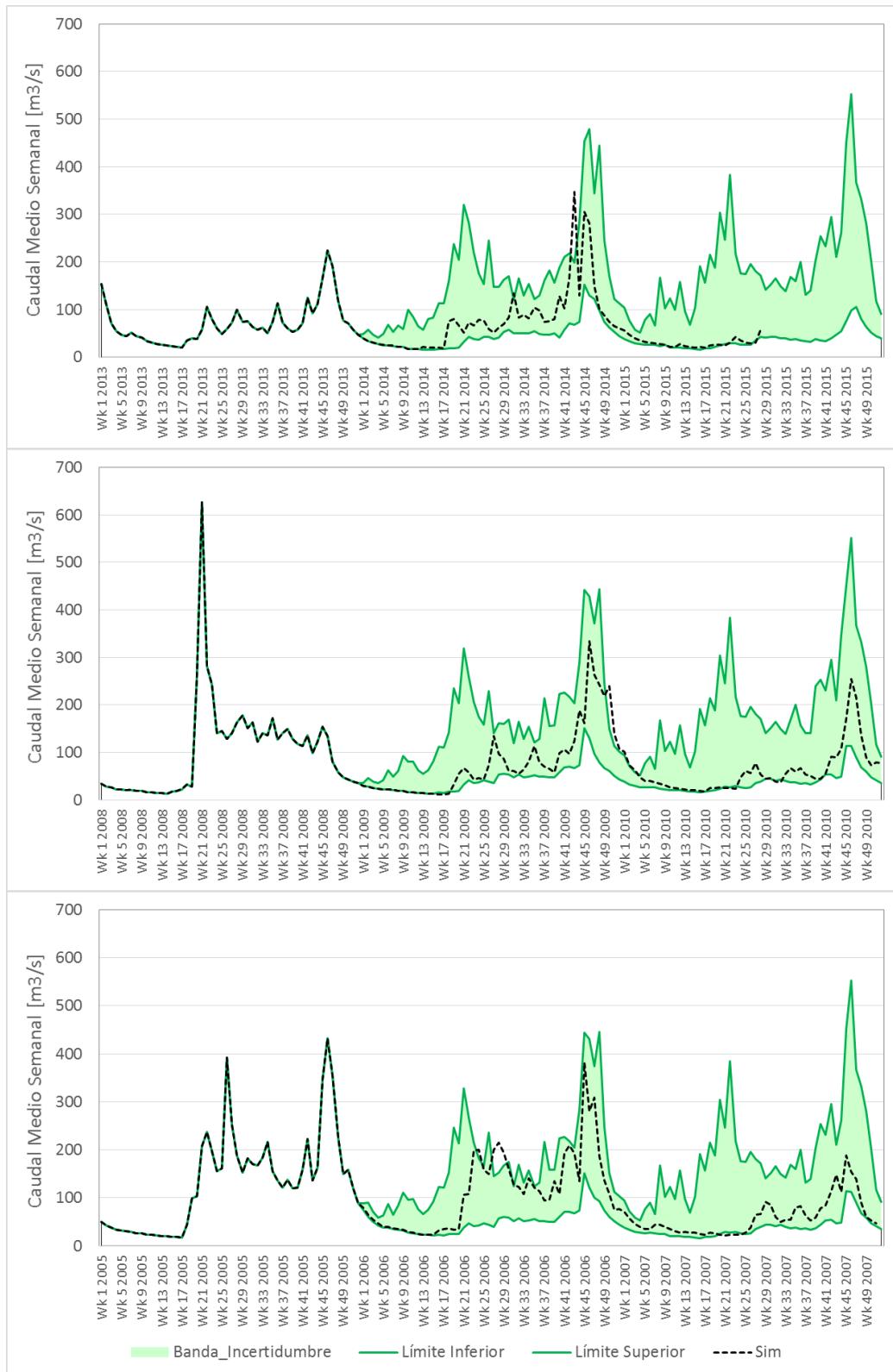


Figura 5-28: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Melado en La Lancha  
(Año 1 – Normal)

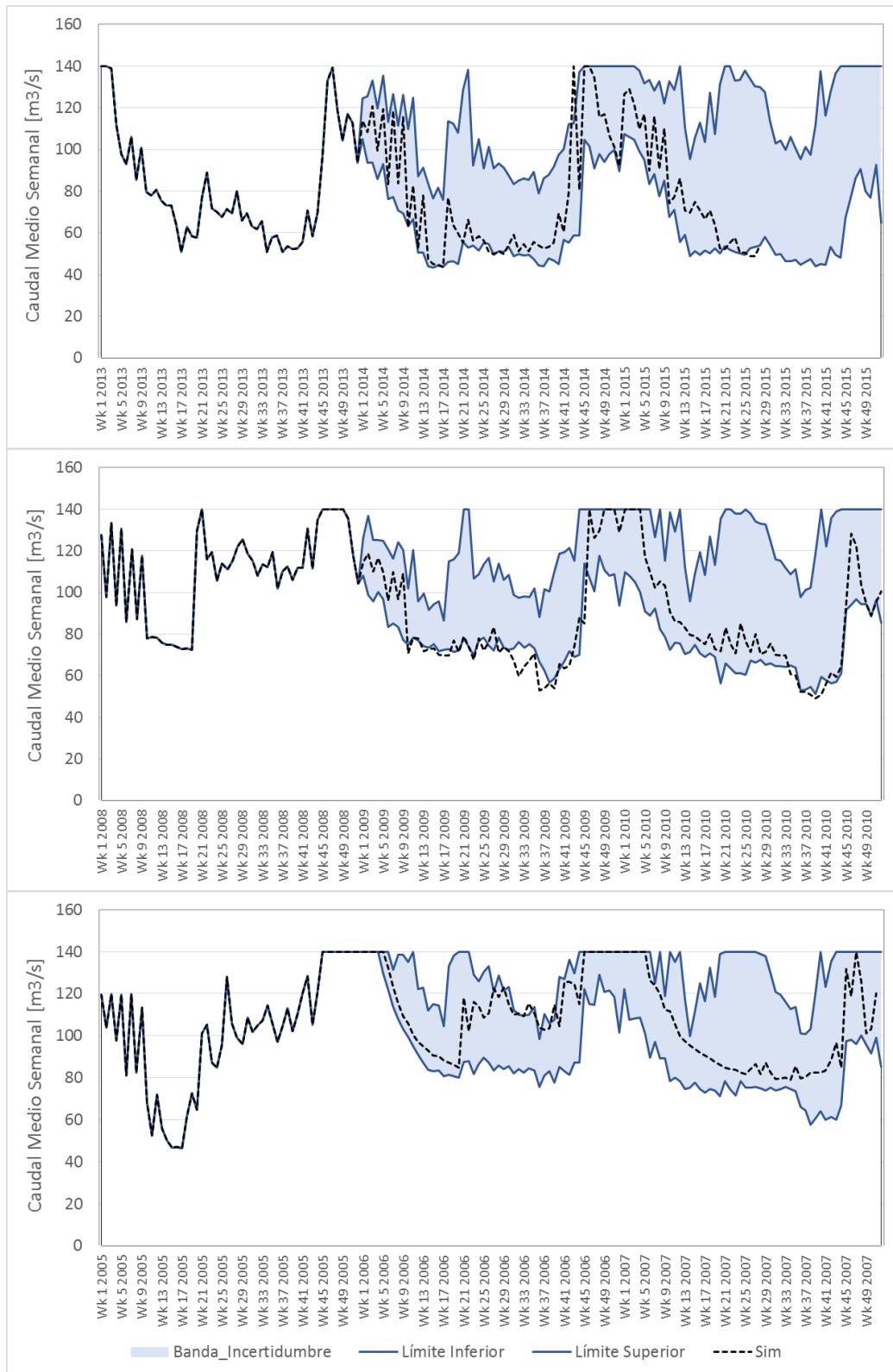


Figura 5-29: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Canal Bocatoma Central Pehuenche (Año 1 – Normal)

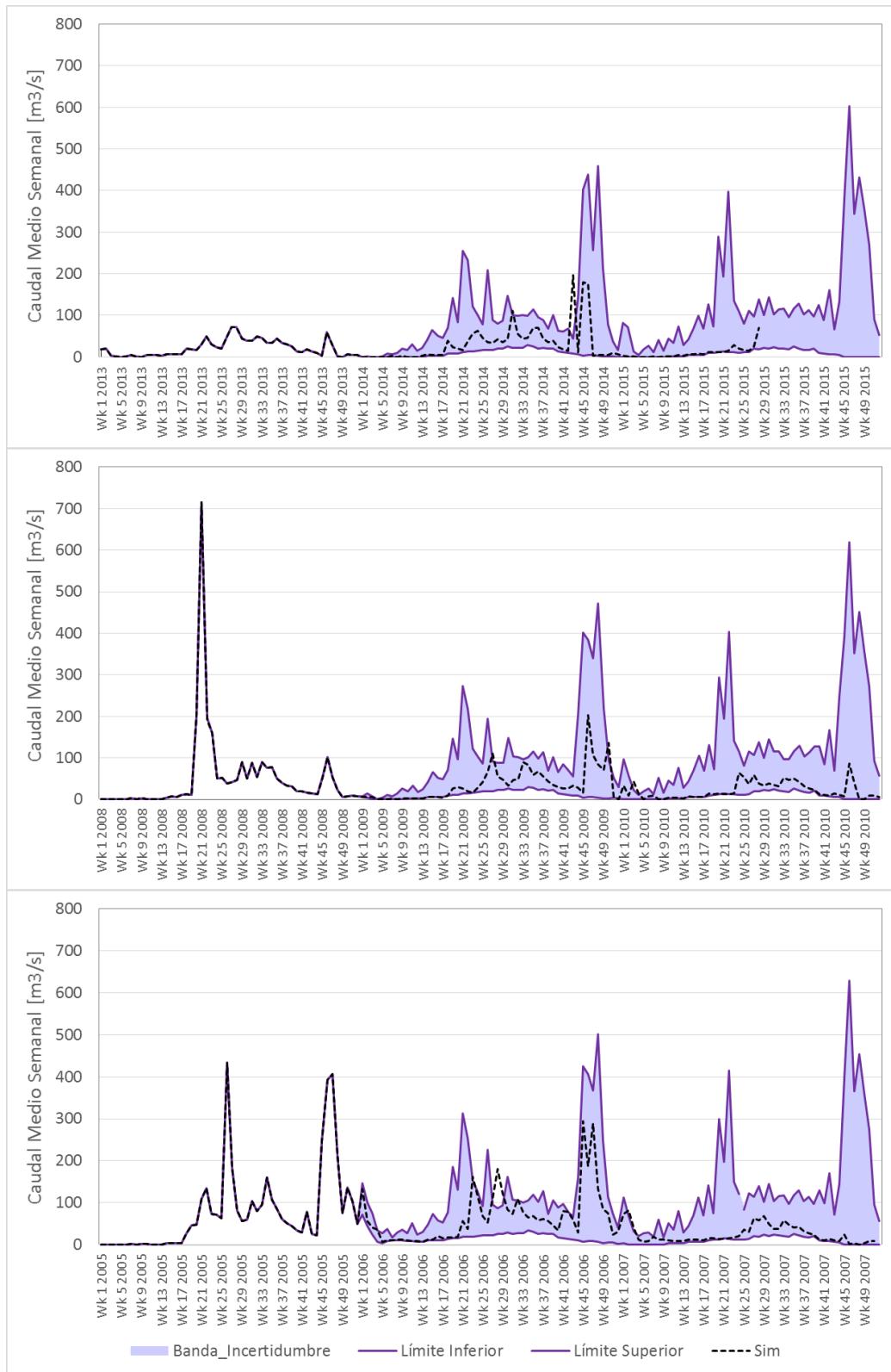


Figura 5-30: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Maule en Armerillo  
(Año 1 – Normal)

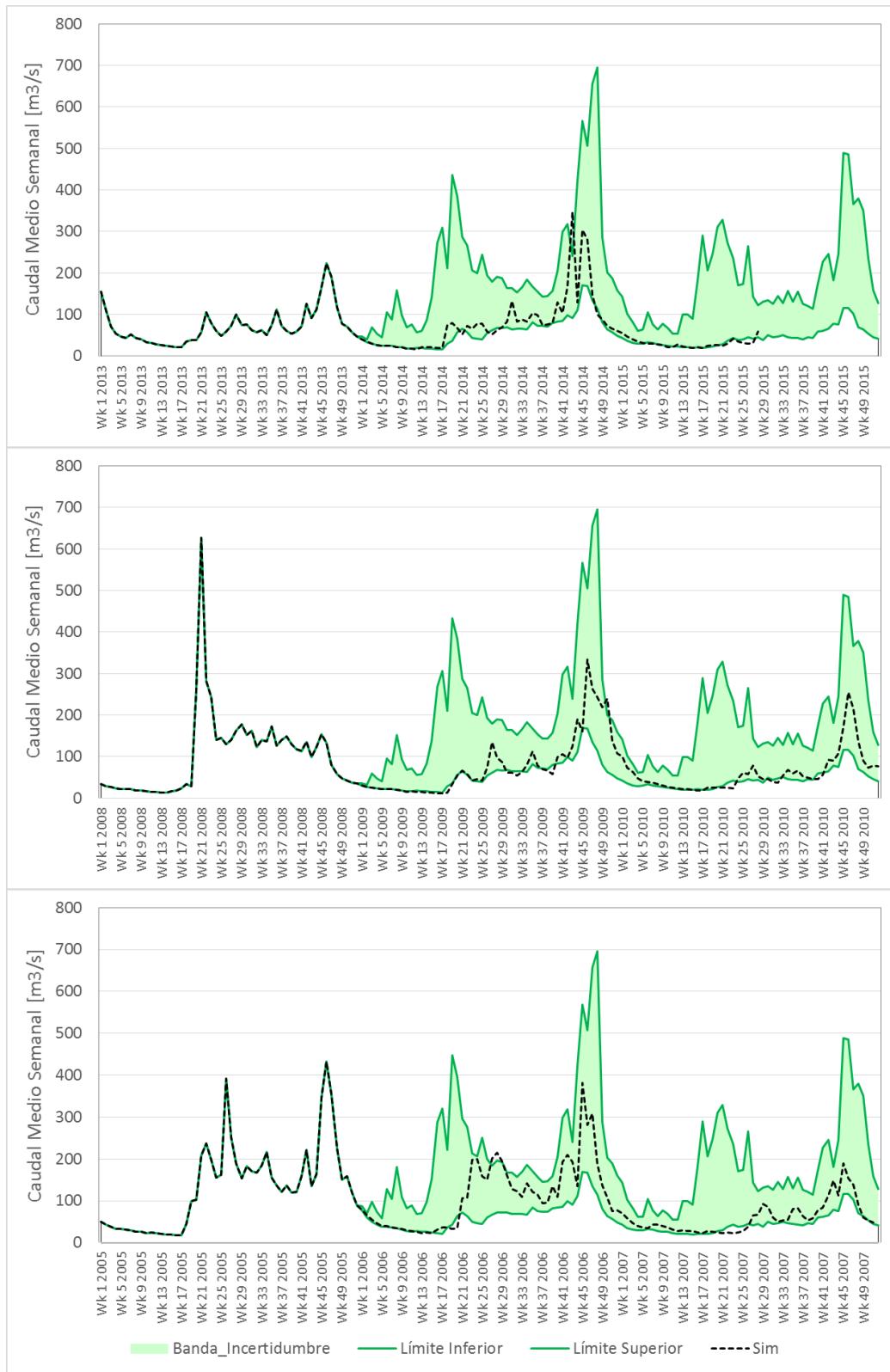


Figura 5-31: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Melado en La Lancha  
(Año 1 – Húmedo)

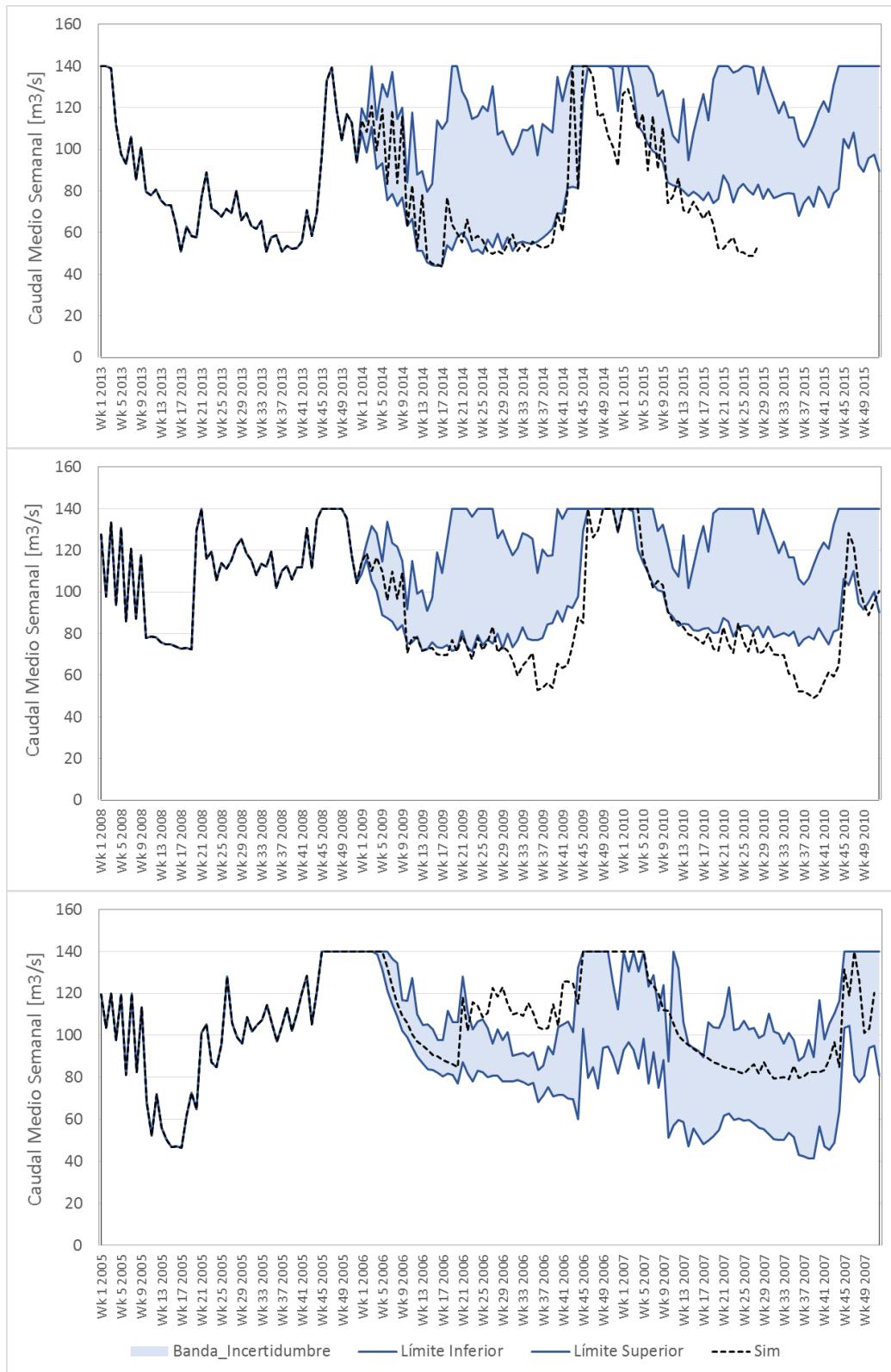


Figura 5-32: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Canal Bocatoma Central Pehuenche (Año 1 – Húmedo)

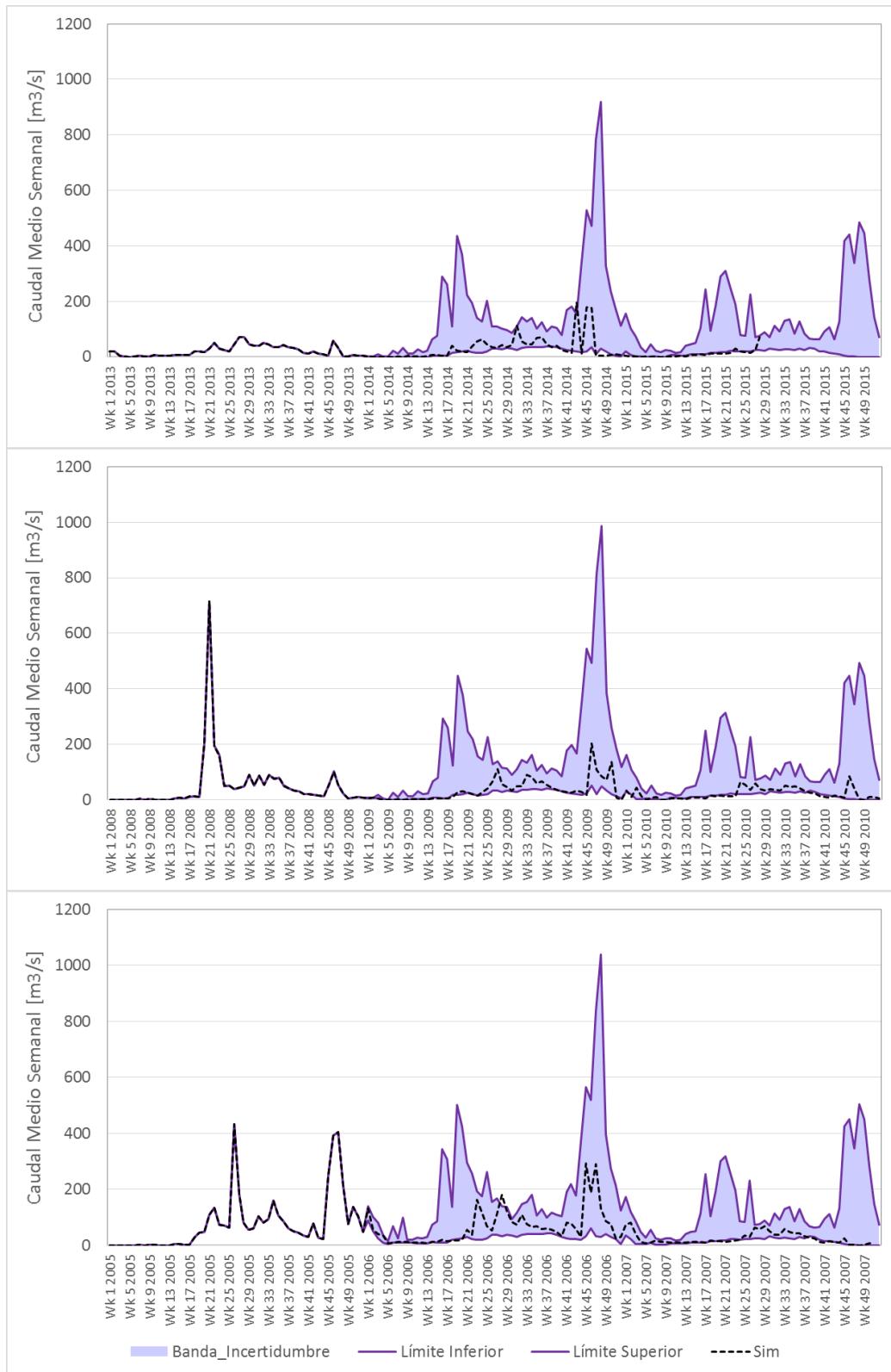


Figura 5-33: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Maule en Armerillo  
(Año 1 – Húmedo)

Según las secuencias descritas en la Tabla 5-6, es posible observar que para las series sintéticas de caudales con año 1 normal (imagen central en Figuras 5-25 a 5-33) o húmedo (imagen inferior en Figuras 5-25 a 5-33), la dependencia del año de inicio es más evidente en el año 1, alterando la banda de incertidumbre, mientras que en el año 2 las bandas de incertidumbre tienden a ser similares independiente del año de inicio.

En el caso de las series sintéticas con año 1 seco (imagen superior en Figuras 5-25 a 5-33), es posible observar una mayor variabilidad en las bandas para ambos años, como también una influencia más marcada del año de inicio en comparación al resto de los casos.

Cuando el año de inicio es húmedo (imagen inferior en Figuras 5-25 a 5-33), es posible observar que los peaks de caudales presentes en las bandas tienden a ser más elevados, aunque las variaciones son pequeñas.

En relación la estación Canal Bocatoma Central Pehuenche, se observa que para años húmedos existe una menor cantidad de agua que pasa por el canal, lo que puede estar ligado a que en el río Maule existe una mayor cantidad de agua, tal como lo muestra el comportamiento de la estación Río Maule en los Baños. Al existir un mayor flujo en el cauce producto de un año con mayores precipitaciones, se requiere una menor demanda desde el Embalse Melado hacia la Central Pehuenche (central hidroeléctrica de pasada).

Finalmente, al observar las simulaciones con datos reales de Pp y T para los períodos analizados, es decir, año inicio seco 2013-2015, año de inicio normal 2008-2010 y año de inicio húmedo 2005-2007, es posible ver que los valores en la mayoría de las estaciones se encuentran dentro de la banda que corresponde a su comportamiento según el tipo de año descrito en la Tabla 5-5.

## Capítulo 6: Análisis de resultados

Según se describe en el capítulo 3, el presente informe cuenta con tres procesos principales para llevar a cabo la generación de series sintéticas de caudales. En primer lugar es necesario generar las series sintéticas de precipitación y temperatura que representarán los diferentes escenarios meteorológicos de interés (seco, normal o húmedo). Por otra parte se encuentra la calibración y validación del modelo hidrológico que representará la zona de estudio. Finalmente ingresando las series sintéticas de precipitación y temperatura al modelo hidrológico antes mencionado, se obtiene como resultado las series sintéticas de caudales dentro de la zona analizada, los que pueden ser utilizados posteriormente para realizar la transposición de caudales hacia zonas no modeladas.

El proceso de generación de series sintéticas de precipitación y temperatura considera los estadísticos históricos mensuales de cada variable y además pruebas no paramétricas de media y desviación estándar, mediante las cuales se acepta o rechaza la información generada, asegurando de esta manera que cada año pertenece a un mismo universo. Según los resultados presentados en la sección 5.7.1, se observa en términos generales que los máximos de precipitación en los meses de mayo, junio y julio son subestimados, mientras que los valores de precipitación en los meses estivales tienden a sobreestimarse. Las series sintéticas de precipitación presentan un comportamiento similar con un máximo central de carácter moderado en el mes de junio o julio. En cuanto a las temperaturas, para los tres escenarios se tiene que las series representan con gran exactitud los valores medios históricos de la estación escogida para el análisis. Lo antes mencionado se observa de manera gráfica en la sección 5.7.1, donde es posible ver que las series simuladas en cada mes presentan un cruce con las series observadas, indicando que existe un intervalo común, con sus respectivos *outliers*, presentes tanto en los datos observados como simulados. Cabe destacar en este caso que los datos observados para los tres escenarios se encuentran dentro de la ventana climática de 30 años, mientras que los simulados corresponden a 100 series para cada escenario. Conforme a los resultados obtenidos en esta etapa, se considera que las series cumplen con los requisitos establecidos, siendo representativas de la zona en estudio.

En el proceso de calibración del modelo hidrológico se observa que las principales dificultades están asociadas a la caracterización de las demandas de los embalses presentes en la cuenca, tanto para centrales hidroeléctricas como riego. Particularmente complejo es el caso de la Laguna El Maule. La modelación considera, según la normativa que rige la operación de la laguna, un volumen asociado a la generación hidroeléctrica y agricultura, los cuales se distribuyen según la escala temporal de modelación a lo largo de un año, esta distribución es fija para todo el horizonte de modelación. En el caso de la agricultura, si bien no se tiene una demanda fija todos los años, se sabe que su demanda se concentra en los meses estivales y que esta depende del área asociada a los cultivos y de los coeficientes de cultivo que se estime para ella. En el caso de las demandas hidroeléctricas, la distribución del volumen es más compleja, principalmente porque no existe una tendencia establecida en la producción de energía por parte de las distintas centrales, lo cual hace más complejo el proceso de calibración. A modo de ejemplo se presenta en las Figuras 6-1 a 6-3 la generación hidroeléctrica de las centrales Pehuenche, Isla y Colbún, para los períodos simulados. En ellos es posible observar que la generación es bastante aleatoria, sin contar con un patrón anual definido, y que sólo algunos casos, como por ejemplo la Central Pehuenche, tienen una tendencia más marcada dentro de los diferentes períodos analizados.

Lo antes mencionado hace que el desagüe desde la Laguna El Maule no logre una calibración adecuada y por ende las estaciones que se encuentran aguas abajo, como Río Maule en Los Baños también presente un resultado deficiente en calibración que se acentúa aún más en el proceso de validación.

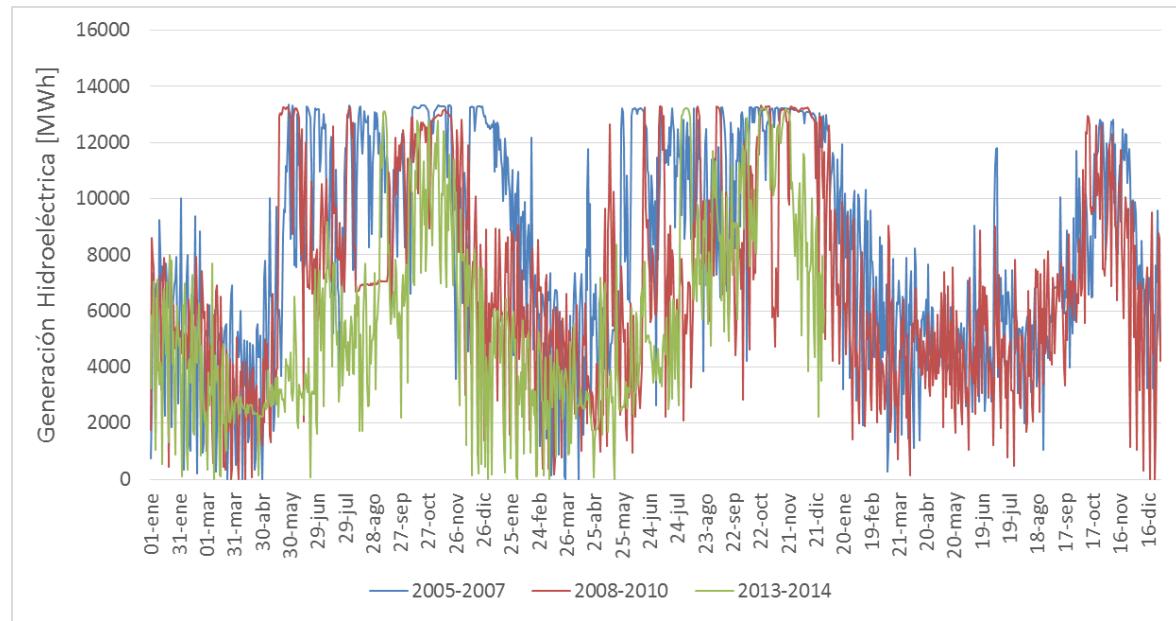


Figura 6-1: Generación hidroeléctrica diaria Central Pehuenche

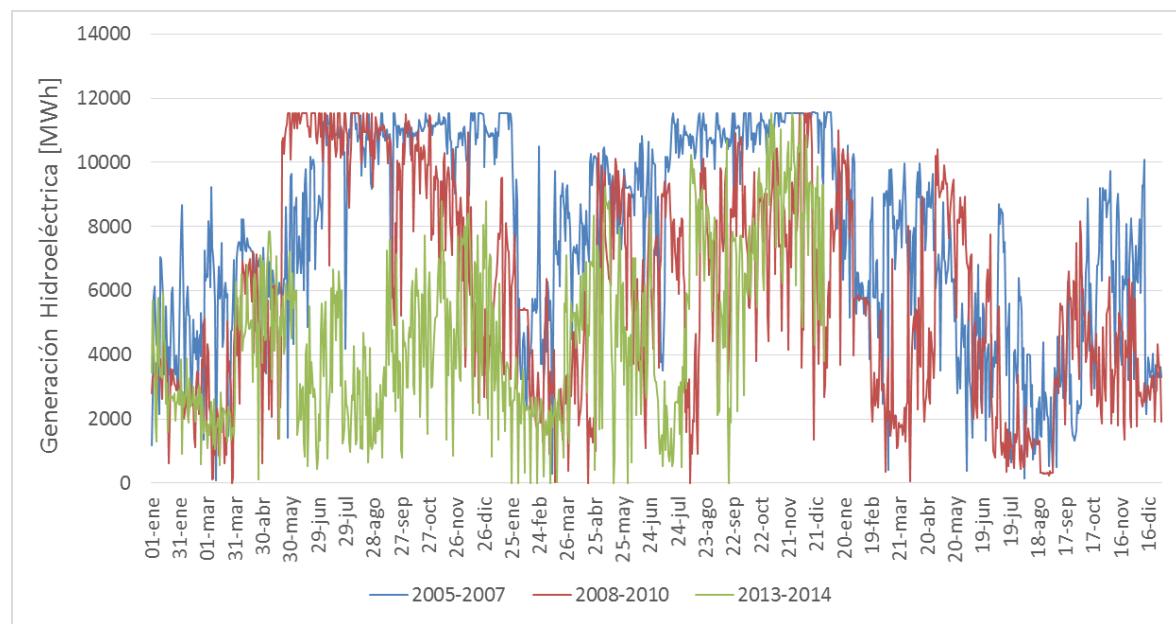


Figura 6-2: Generación hidroeléctrica diaria Central Isla

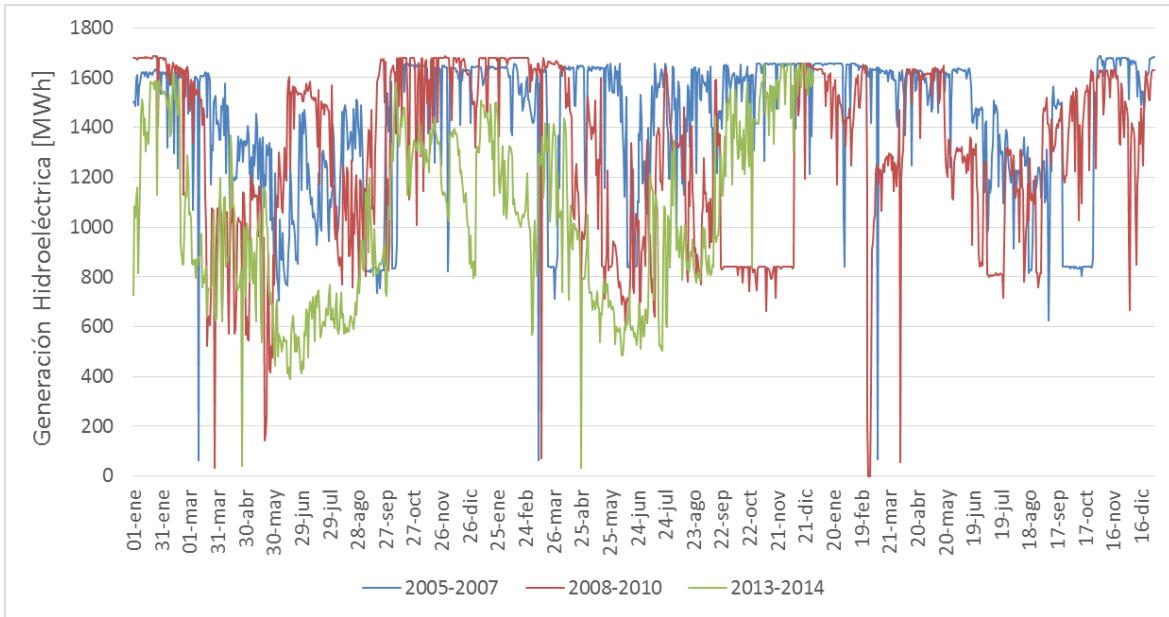


Figura 6-3: Generación hidroeléctrica diaria Central Colbún

En el caso de la generación de series sintéticas de caudales, se observa que las series que presentan una mayor dispersión son cuando el año 1 corresponde a un año seco, mientras que en el resto de los casos las dispersiones son acotadas, aun cuando los gráficos incluyen en el año 2 todas las posibles combinaciones, es decir, seco normal o húmedo. Junto con lo antes mencionado, se verifica que las series simuladas con datos de precipitación y temperatura observados se encuentran en la mayoría de los casos dentro de la banda de incertidumbre que corresponde a la tendencia según la clasificación de tipo de año en base a la precipitación. En términos generales es posible observar que para cada una de las estaciones analizadas, la banda de incertidumbre logra seguir la tendencia de los caudales a lo largo de las series de tiempo.

En relación a lo anterior, al incorporar las probabilidades de carácter histórico del tipo de año a lo largo del horizonte de modelación de la programación a largo plazo (2 años) tal como se explica en la sección 5.7.1, se logra uno de los propósitos del presente trabajo, que se refiere a abordar la incertidumbre hidrológica en la planificación del sistema eléctrico de la zona central. En esta metodología los años de registros de caudales históricos ya no consideran una distribución uniforme, sino que se analizan las probabilidades de tipo de año y sus posibles combinaciones dentro de una ventana de clima (30 años). El resultado final corresponde a una serie de tiempo de caudales de 2 años a escala semanal, con una banda de incertidumbre acotada según el tipo de año de inicio.

Cabe destacar que el uso de un modelo hidrológico entrega la posibilidad de capturar diferentes cambios en el sistema, tales como:

- Cambios físicos dentro de la cuenca, es decir variaciones en el uso de suelo.
- Cambios de carácter técnico dentro de las mismas centrales (número de turbinas, eficiencia de los equipos).
- Efectos climáticos en precipitación y temperatura, los que se traducen en cambios en los caudales.

Se debe tener en consideración que los dos primeros casos planteados requieren de un ajuste del modelo y si es necesario, un nuevo proceso de calibración.

En base a lo antes mencionado, es posible afirmar que la modelación realizada permite generar los caudales afluentes para los diferentes escenarios analizados a escala semanal, en diversos puntos de interés para el Sistema Interconectado Central, como por ejemplo, caudales afluentes a las centrales hidroeléctricas dentro del Sistema Maule Alto perteneciente al SIC. Sin embargo, es necesario tener en consideración que esta es una metodología alternativa a la que actualmente usa el CDEC-SIC para generar las series de caudales afluentes a la programación a largo plazo. En términos comparativos, ambos métodos al tratar de abordar el concepto de incertidumbre hidrológica, también incorporan incertidumbre al sistema a través de las siguientes fuentes:

- Metodología Actual CDEC-SIC: Como ya se ha mencionado, en este caso se genera para los meses de invierno un árbol en donde se asume por una parte, la independencia de los caudales a nivel mensual y por otra, que los valores mensuales asociados a cada serie construida son equiprobables, lo cual pierde validez a través del análisis por escenario realizado en el presente trabajo y otros asociados a la generación hidrotérmica (Morice, 2009, Palacios 2004).

En cuanto a la información utilizada para la construcción de series, esta corresponde a información histórica y en caso de estar incompleta se hace un relleno en función de información de generación energética. Esto en términos de incertidumbre se traduce en que la probabilidad de que un caudal se repita exactamente igual en el tiempo es muy baja y en el caso del relleno utilizando información de generación, esto se traduce en una saturación de los caudales cuando la central ha generado a su máxima capacidad, sin representar la estadística real (Palacios, 2004).

- Metodología propuesta: En este caso es posible identificar tres fuentes de incertidumbre, una apunta a la modelación hidrológica, la cual está asociada a la manera simplificada de representar el sistema. Junto con lo anterior está la calibración, proceso que depende de la disponibilidad de información histórica que permita ajustar los parámetros del modelo para representar el comportamiento de la zona analizada. La tercera fuente se relaciona con el uso de series sintéticas de las forzantes meteorológicas, pues si bien en la generación se realizan pruebas que verifiquen que pertenecen al mismo universo de datos históricos, esto se encuentra asociado a un intervalo de confianza que implícitamente tiene un grado de incertidumbre.

En la metodología propuesta se considera que para la generación del árbol de escenarios, las series sintéticas de caudales deben tener la misma secuencia de tipo de año. De esta forma la equiprobabilidad considerada en las aperturas no sería una fuente adicional de incertidumbre en el sistema.

Finalmente, en cuanto a la transposición de caudales dentro de la zona homogénea definida en función del comportamiento registrado por estaciones fluviométricas (Rubio, 2010), se observa una clara posibilidad de reducir esfuerzos en la generación de series sintéticas de caudales mediante la transposición desde series simuladas a puntos fuera de la zona modelada, tal como se observa para

la cuenca del Río Achibueno en la Recova, teniendo resultados de correlación que bordean el 0,8 y con series de tiempo que mantienen de manera adecuada la tendencia y magnitud de los caudales.

## **Capítulo 7: Conclusiones y comentarios**

Expuestos los resultados del trabajo de tesis es posible concluir lo siguiente:

A través de un análisis del estado del arte en términos de generadores climáticos, se logra establecer una metodología adecuada para la generación de series sintéticas de precipitación y temperatura a escala diaria, considerando factores importantes como la relación que existe entre las temperaturas máximas y los días con precipitación, análisis de frecuencia para determinar el mejor ajuste de las variables a una función de densidad de probabilidades y correlaciones entre estaciones de precipitación y parámetros característicos en función de tipo de año (seco, normal o húmedo). Considerando todo lo antes mencionado se logra la generación de series sintéticas de precipitación y temperatura que desde la perspectiva estadística, cumpliendo con los requisitos de pertenecer al mismo universo y representar el comportamiento de estas forzantes climáticas en la zona analizada.

En necesario tener en cuenta que para representar los diferentes fenómenos que se generan en términos de caudales, lo más adecuado es tomar un periodo de tiempo no menor a una ventana climática, que corresponde a un intervalo de 30 años, donde se asegura que estén presentes fenómenos como ENSO y variaciones de carácter decadal como lo es la Oscilación Decadal del Pacífico, los cuales estarían involucrados de manera implícita en la generación de forzantes meteorológicas a través de los parámetros estadísticos de las series históricas. Las consideraciones mencionadas están presentes en este trabajo.

Por otro lado, la modelación hidrológica realizada tiene dos aristas, una con subcuencas en régimen natural y otra con subcuencas en régimen intervenido. En el caso de la calibración en subcuencas que presentan un régimen natural, los resultados de la modelación son buenos, presentando valores de NS entre 0,68 a 0,81 y para el caso de subcuencas intervenidas los valores de NS están por sobre 0,4 en la mayoría de los casos. Durante la validación existen estaciones donde los indicadores empeoran para ambos tipos de cuencas, pero aun así mantienen la tendencia de las series históricas.

En función de los resultados de la calibración y validación, se consideran relevantes las recomendaciones de modelación hidrológica que tienen relación al intervalo de tiempo utilizado para la calibración, el cual debe ser lo suficientemente extenso para captar las variaciones que existen en la zona modelada. Lo antes mencionado se relaciona con las cuencas en régimen natural producto que las disminuciones de los caudales en los últimos años del periodo no logran ser representadas según el periodo utilizado para la calibración, esto principalmente por la calidad de los registros de las estaciones fluviométricas, mientras que en el caso de las cuencas intervenidas, la gran variabilidad en el tiempo, asociada principalmente a la generación hidroeléctrica, requiere de periodos más extensos de calibración para lograr mejores ajustes.

En cuanto a las series sintéticas de caudales, se considera que el incorporar las probabilidades del tipo de año en dos niveles, donde el año 2 depende de las condiciones del año anterior, es un avance importante respecto de la forma actual en la que el SIC maneja la información de registros fluviométricos, considerando el tipo de año de manera equiprobable. Esto se refleja en la caracterización del periodo analizado 1983-2013, donde se observa que no existe la misma cantidad de años secos, normales o húmedos, por lo tanto el incorporar esta diferenciación hace que el

proceso represente de manera más adecuada la realidad del comportamiento de los flujos en la zona analizada, lo cual se puede extrapolar a otras zonas del SIC.

Para la generación de la series de caudales a escala mensual en el Sistema Maule Alto, como consecuencia de los procesos de calibración y validación, se establece que el modelo hidrológico logra representar de manera adecuada el comportamiento de las diferentes subcuencas analizadas, así como también las tendencias de las series de tiempo de caudales de las estaciones fluviométricas. A raíz de ello, se considera que las bandas de incertidumbre generadas para cada escenario reflejan las tendencias de los caudales en cada punto. Por otra parte, es posible observar que estaciones relacionadas presentan comportamientos consistentes, es decir, la presencia de mayores flujos en estaciones ubicadas en los cauces naturales generan menores flujos en estaciones ubicadas en canales de abastecimiento desde embalses para la generación hidroeléctrica (Maule en Los Baños y Canal Aducción Central Pehuenche).

En esta instancia es necesario tener en cuenta que tanto la metodología existente como la alternativa propuesta, en su intención de abordar la incertidumbre hidrológica, incorporan a su vez incertidumbre al sistema a través de diferentes fuentes, las cuales se analizaron en la sección 6. En este caso, se considera que la fuente más importante en la alternativa propuesta corresponde a la disponibilidad de registros históricos extensos que permitan realizar una calibración representativa que abarque todos los fenómenos que se presentan en la zona analizada a lo largo del tiempo.

En relación a la transposición de caudales, se observa que el proceso de selección de la cuenca que cumple con los requisitos para ser utilizada en la transposición consta de dos etapas: en primer lugar establecer si existe una correlación adecuada (valores iguales o superiores a 0,7), entre los caudales observados en el punto de interés o cercano a él y los caudales simulados en las coordenadas establecidas como posible base para la transposición. Junto con lo anterior es necesario verificar el comportamiento de la serie de tiempo de caudales observados en el punto de interés y los valores simulados a través del proceso transposición, de manera que los caudales respeten el comportamiento histórico de la zona. En el caso analizado en el presente trabajo, Río Achibueno en la Recova, existen 3 cuencas modeladas que cumplen con los valores de correlación, pero solo una sigue de manera adecuada la serie de tiempo del punto de interés, la Estación Estero Las Garzas.

Finalmente es posible decir, luego del trabajo realizado, que la modelación hidrológica en cuencas intervenidas presenta diversas complejidades, principalmente la aleatoriedad en la generación hidroeléctrica, pero aun así se pueden lograr resultados adecuados que permiten generar herramientas para abordar la incertidumbre hidrológica asociada a la programación a largo plazo del Sistema Interconectado Central mediante un enfoque con mayor sentido físico de las variables involucradas.

Cabe destacar, que como trabajo futuro se debe considerar para la extensión de esta metodología a todo el SIC es necesario realizar la modelación hidrológica de una cuenca hacia el sur, presente en la otra zona homogénea definida por Rubio (2010) e identificar si hacia el norte del Sistema Maule Alto existe una zona homogénea que permita replicar el proceso realizado en el presente trabajo.

De esta manera se lograría cubrir la totalidad del SIC, con modelación hidrológica para un número acotado de cuencas, que en conjunto con la transposición de caudales, permitiría la generación de series sintéticas de caudales a escala semanal para diferentes escenarios hidrológicos.

## Bibliografía

1. Alemany J., Moitre D. and Magnago F., “Descomposición de Benders aplicada al predespacho con restricciones de red”, <http://www.argencon.org.ar/sites/default/files/069.pdf>
2. Anuario CDEC-SIC, Estadísticas de Operación CDEC-SIC 2004 – 2013. [http://www.cdec-sic.cl/anuarios/anuario2014/cdec\\_sic\\_2013.pdf](http://www.cdec-sic.cl/anuarios/anuario2014/cdec_sic_2013.pdf)
3. Archifield, S.A., Voguel, R. M. (2010). Map correlation method: Selection of a reference streamgage to estimate daily streamflow at ungaged catchments. Water Resources Research, Vol 46, w10513, doi:10.1029/2009WR008481.
4. Avilés, N. (2011). Estudio y mejoramiento de un modelo de predespacho aplicado a la operación de embalses hidroeléctricos del Sistema Interconectado Central. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
5. CADE-IDPE Consultores en Ingeniería (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Maule, Sinia-1292, artículo 31018 .Realizado para DGA, MOP.
6. Camino, V., Miranda, J. Gestión de riesgo en el abastecimiento energético a nivel país. <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno11/gestionriesgo/Web.htm>
7. Centro de Cambio Global – Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.
8. Faber, B. (2001). Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecast. Journal of Hydrology, 249, 113-133.
9. Gabriel R., Neumann J. (1962). A Markov chain model for daily rainfall occurrence in Tel Aviv, Israel. Q. J. R. Met. Soc., 88: 90-95
10. Geng, Sh. (1986). A simple method for generating daily rainfall data. Agricultural and Forest Meteorology, 36, 363-376.
11. Harris, L., Jones, P. D., Osborn, T. J., Lister, D. H. (2013). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. International journal of climatology.
12. Kokkonen T. S., Jakeman, A. J., Young P. C. and Koivusalo H. J. (2003). Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Ceweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. Hydrol. Process. 17, 2219–2238. DOI: 10.1002/hyp.1329.
13. Ministerio de Energía. Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2030. 2012. <http://www.minenergia.cl/estrategia-nacional-de-energia-2012.html>
14. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Biobío.
15. Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner R. L., Harmel R. D., Veith T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol 50, 885-900.
16. Morice, L. (2010). Desarrollo de un modelo de programación dinámica para el diseño y operación del embalse Guaiquivilo. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

17. Nathan R. J., McMahon T. A. (1990). Identification of homogenous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology* 121: 217–238.
18. Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, Ch., Michael, C. and Le Moine, N. (2008). Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resour. Res.*, 44, w03413, DOI:10.1029/2007WR006240.
19. Olave P., y Vargas X. (2014). Generación estocástica de series de precipitaciones diarias en Chile continental incorporando datos de reanálisis. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*. Vol 29, N°1, pág. 9-21, Diciembre 2014.
20. Palacios, E. (2004). Modelo para Manejo de la Incertidumbre Hidrológica en la Planificación de la Operación del SIC. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
21. Pereira, M. (1989). Optimal Stochastic Operations Scheduling of Large Hydroelectrics Systems. *Electrical Power & Energy Systems*, Vol 11, No 3. USA.
22. Pickering, N. B., Hansen, J. W., Jones, J. W., Wells, C. M., Chan, V. K., and Godwin, D. C., 1994. WeatherManA: Utility for Managinga nd Generating Daily Weather Data. *Agronomy Journal*, 85, 332-337.
23. Razavi, T., Coulibaly, P. (2013). Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. *American Society of Civil Engineers*, 18, 958-975. DOI: 10.1061/(ASCE) HE.1943-5584.0000690.
24. Reporte Anual 2014 CDEC-SIC  
<http://www.cdecsic.cl/wp-content/uploads/2015/07/reporto-anual-CDECSIC-correcciones.pdf?f8b8ed>
25. Richardson, C. W., Wright D. A. 1984. WGEN: a model for generating daily weather variables. SDA-ARS, ARS-8.
26. Rubio, E. (2010). Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003. *Water Resources Research*, Vol 46, w05514, DOI:10.1029/2009wr007982.
27. Schuol, J., Abbaspour, K. C. (2007). Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa. *Ecological Modelling*, 201, 301–311.
28. Wilks D. 1999. Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93: 153-169.

## ANEXO 1: Variación Banda Incertidumbre según Año de Inicio

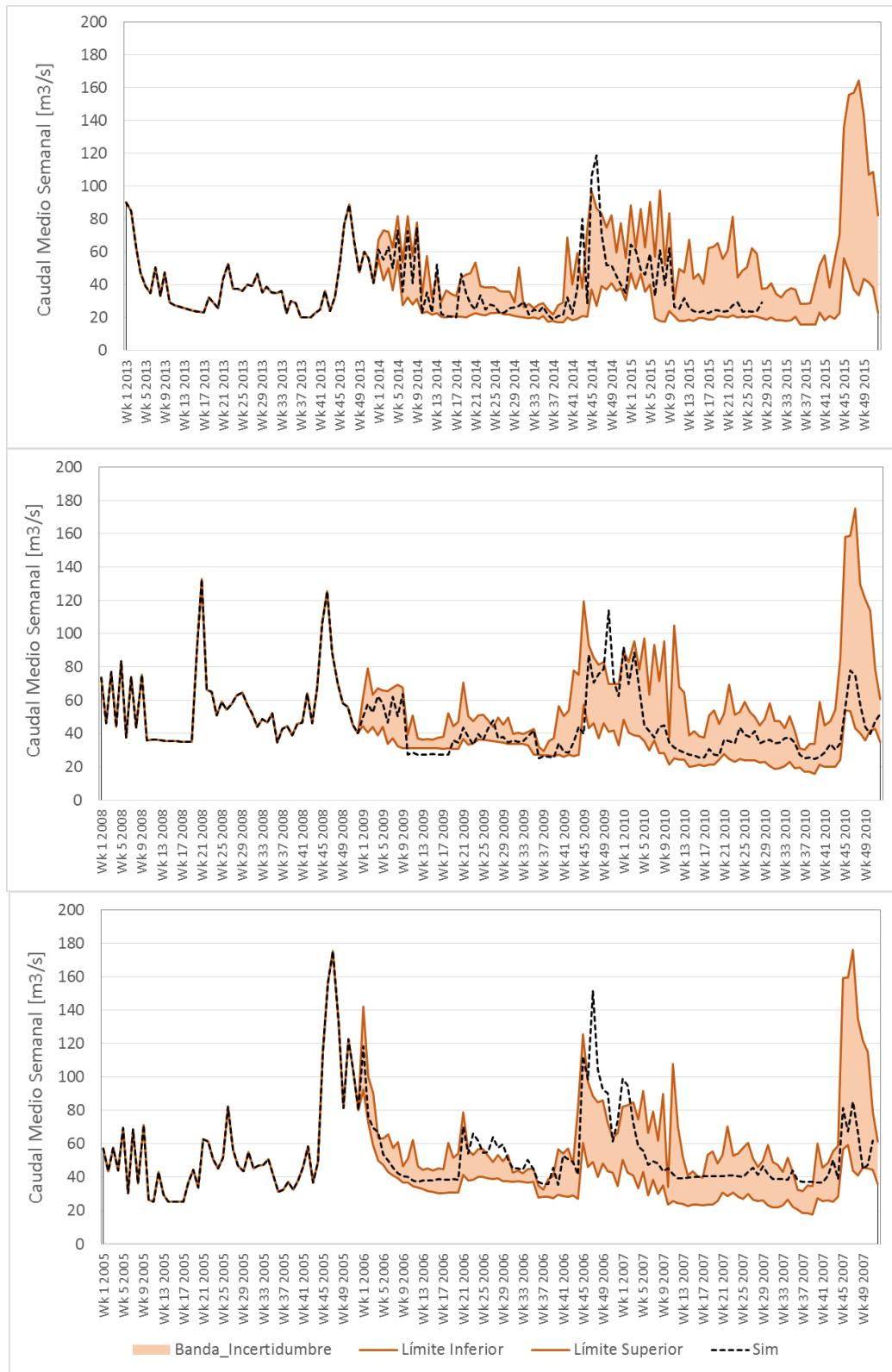


Figura A1- 1: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Maule en Los Baños (Año 1 – Seco)

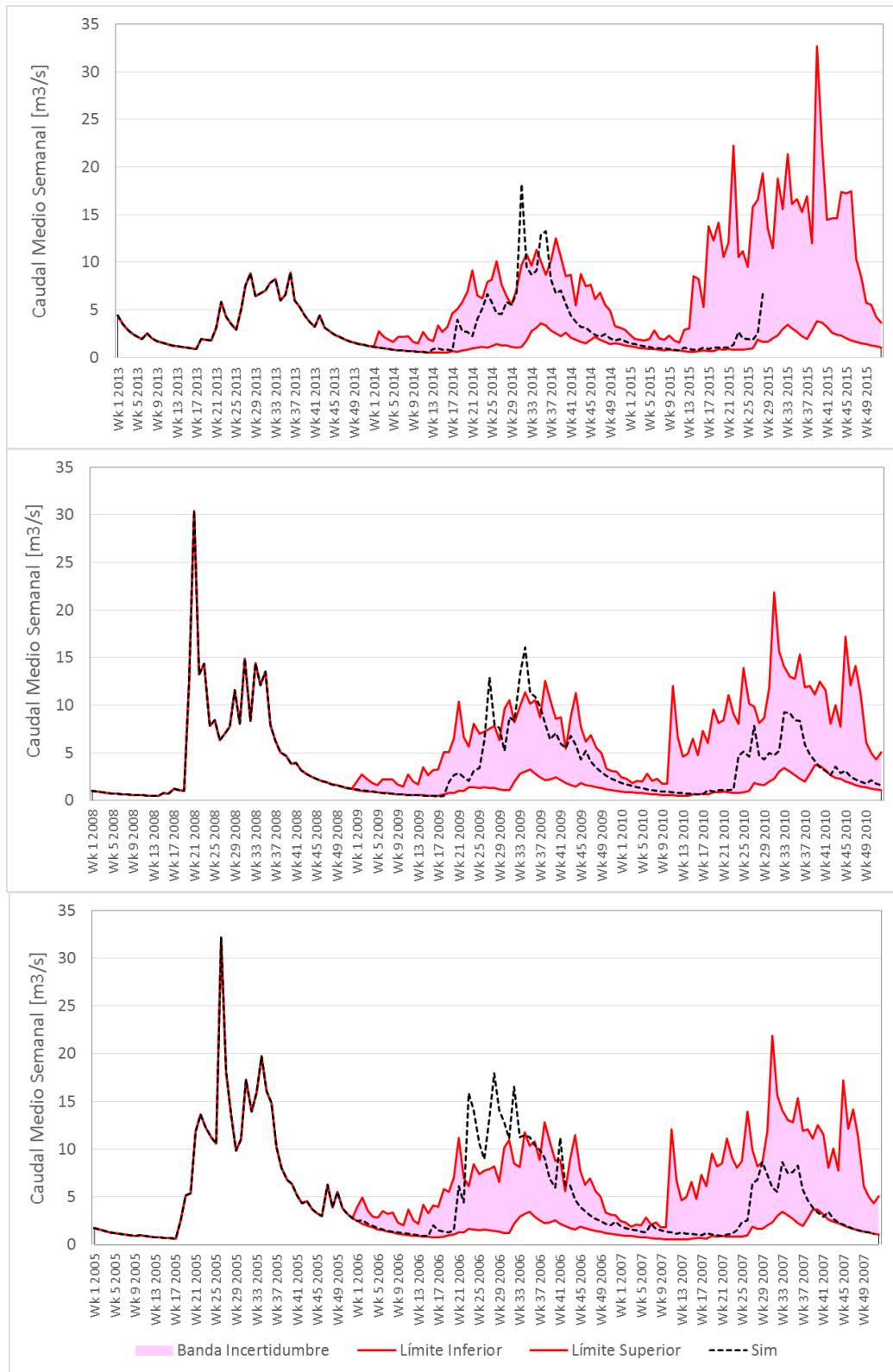


Figura A1- 2: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Estero Las Garzas  
(Año I – Seco)

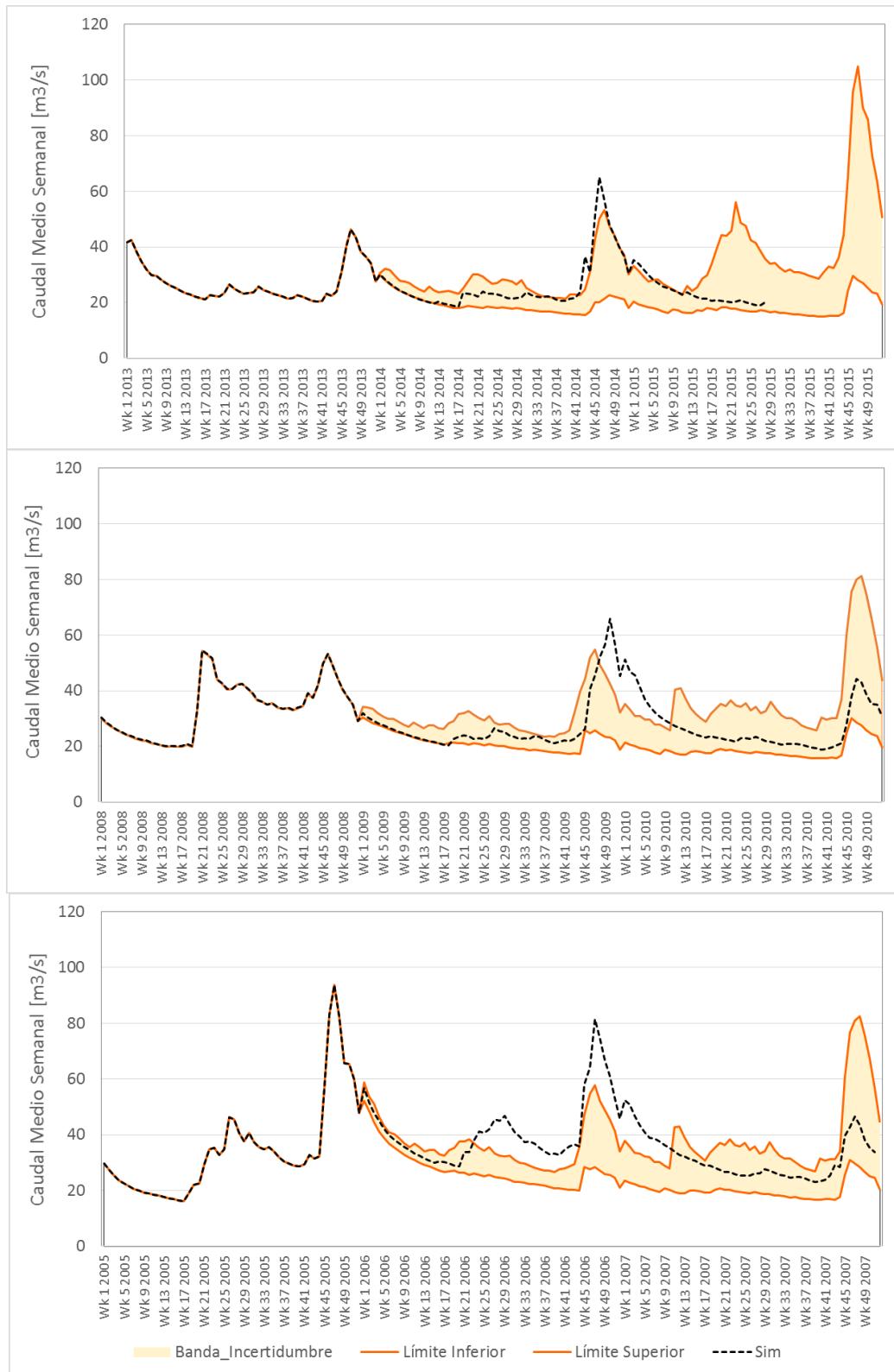


Figura A1- 3: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Afluente Laguna Invernada  
(Año 1 – Seco)

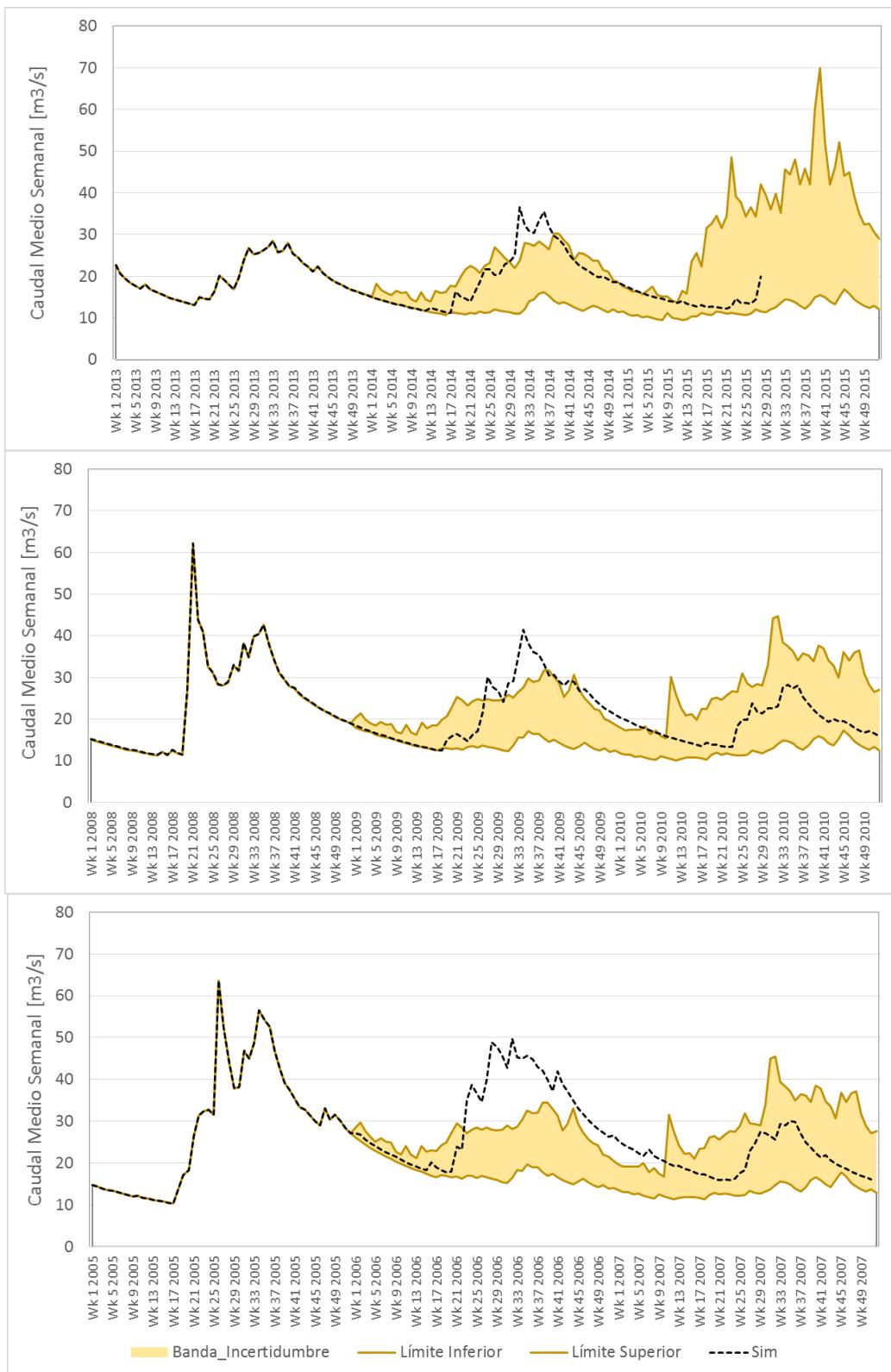


Figura A1- 4: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Claro en San Carlos  
(Año 1 – Seco)

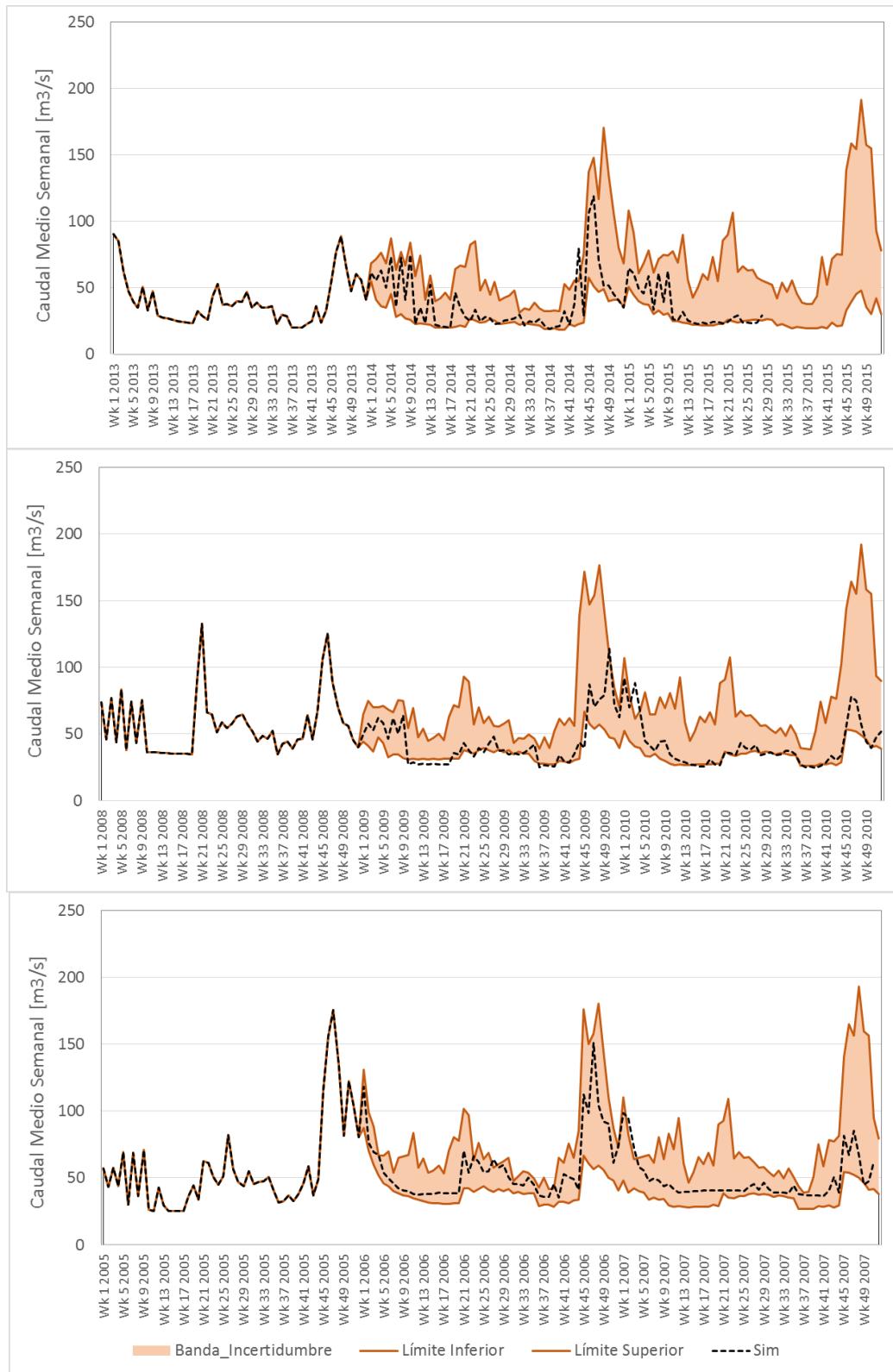


Figura A1- 5: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Maule en Los Baños  
(Año 1 – Normal)

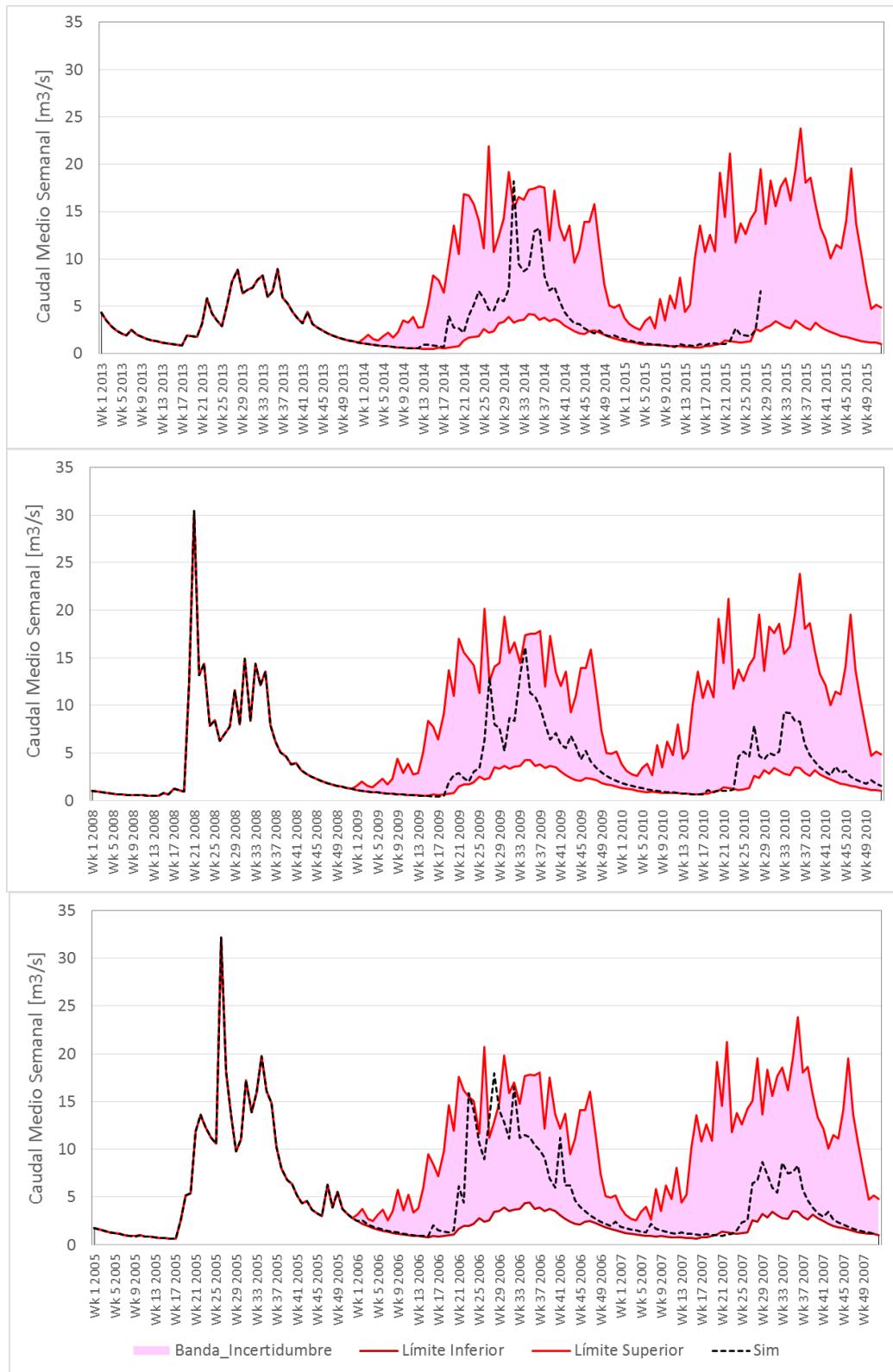


Figura A1- 6: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Estero Las Garzas  
(Año 1 – Normal)

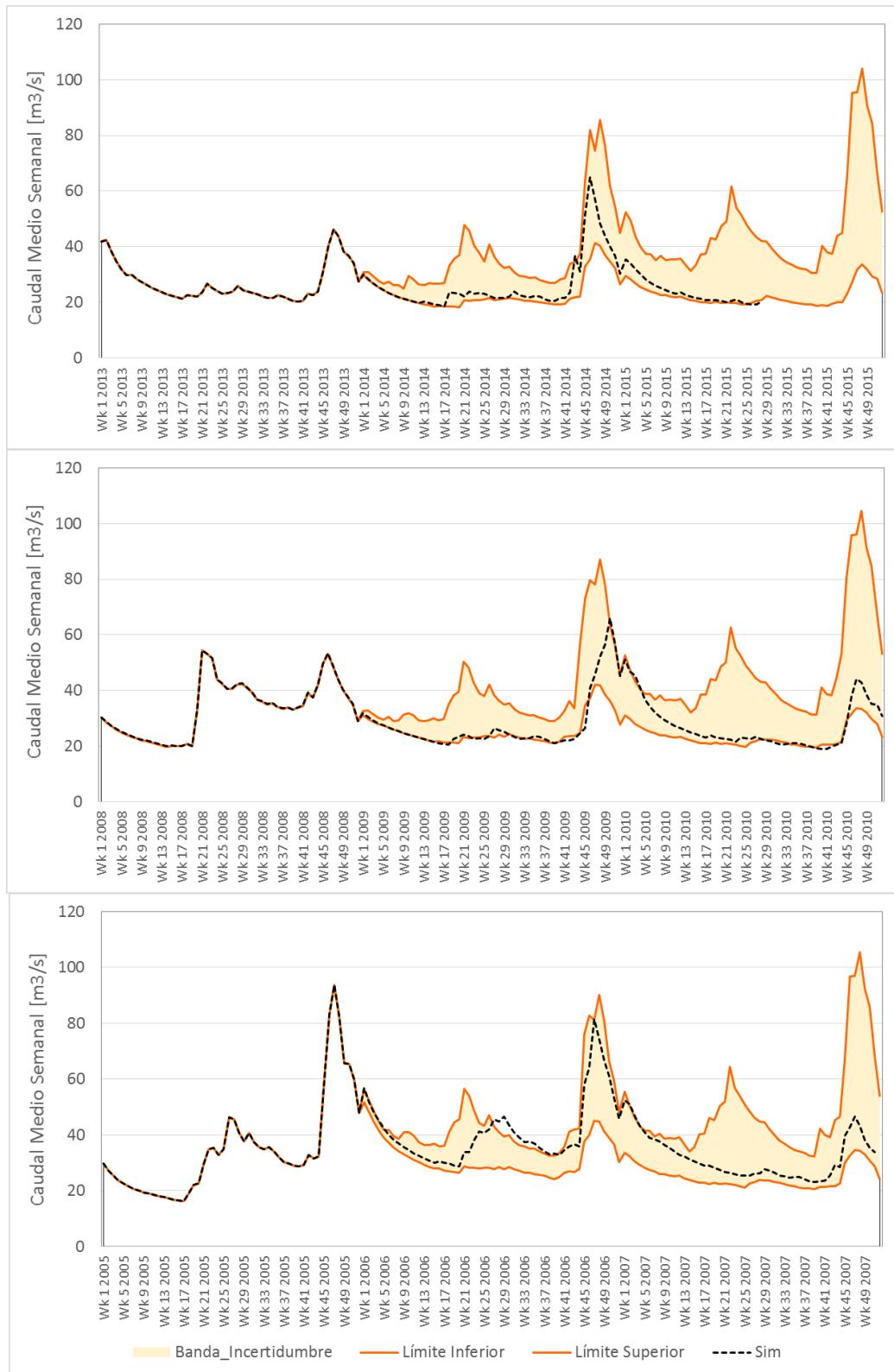


Figura A1- 7: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Afluente Laguna Invernada (Año 1 – Normal)

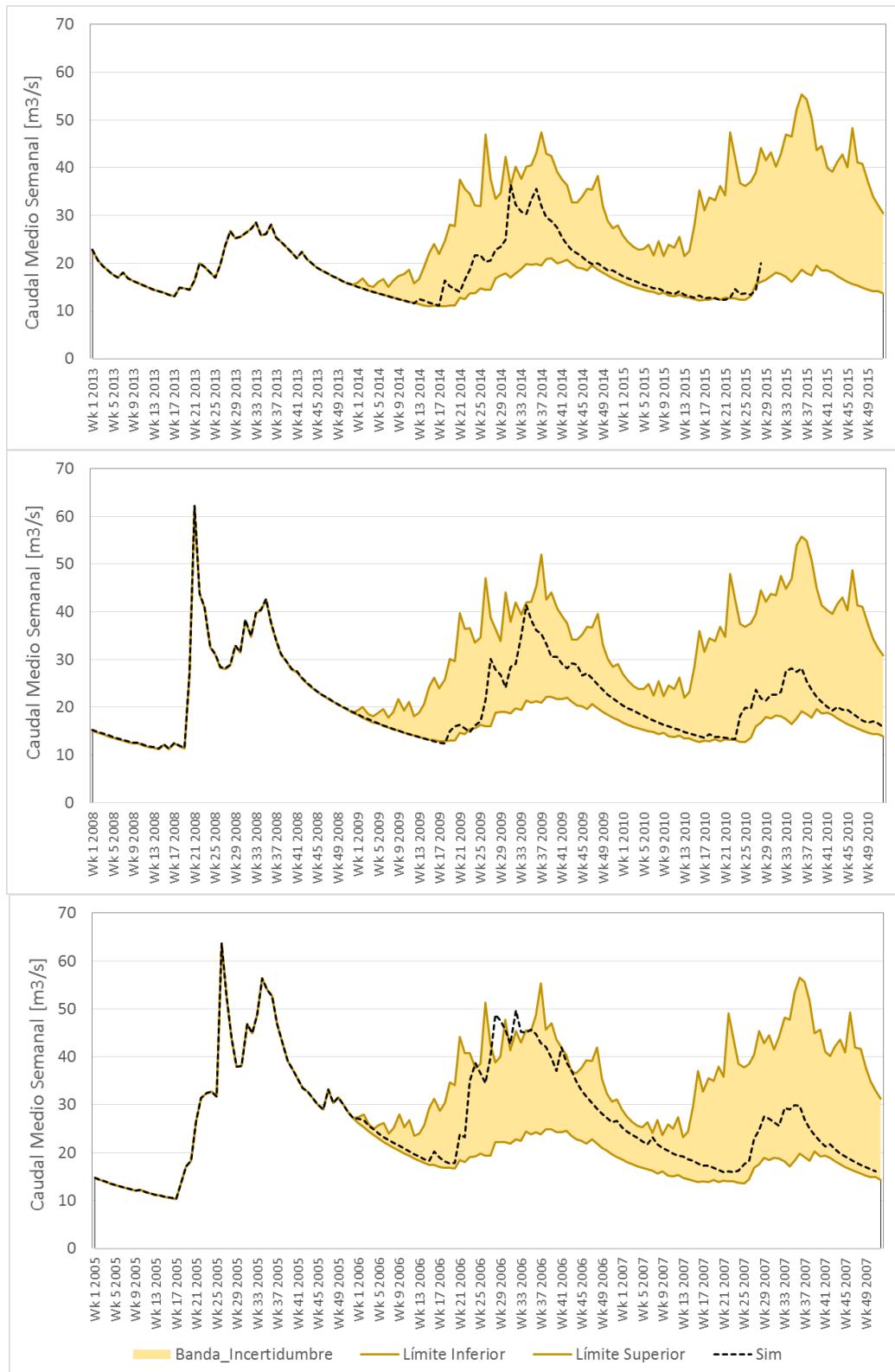


Figura A1- 8: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Claro en San Carlos  
(Año 1 – Normal)

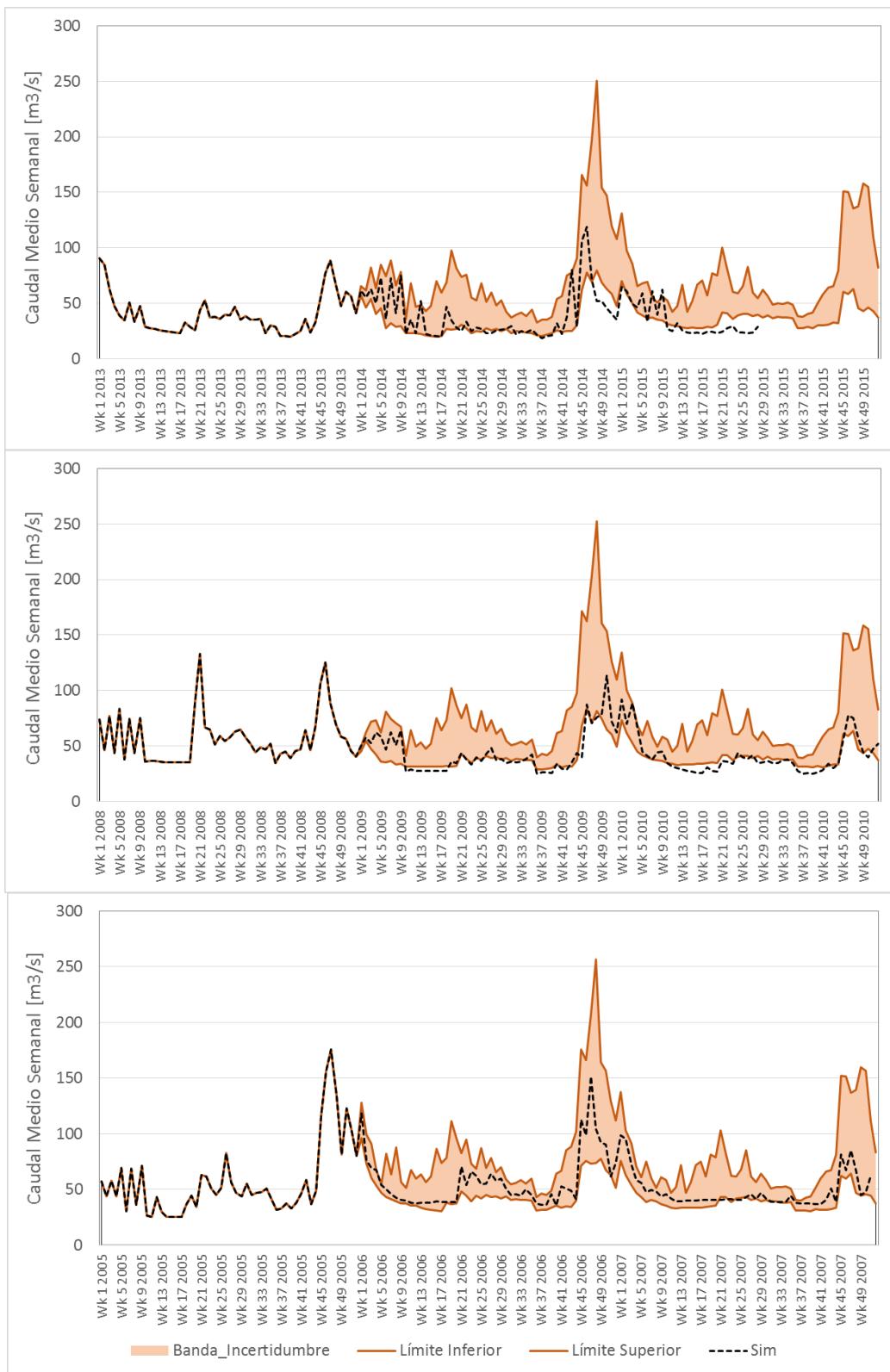


Figura A1- 9: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Maule en Los Baños (Año 1 – Húmedo)

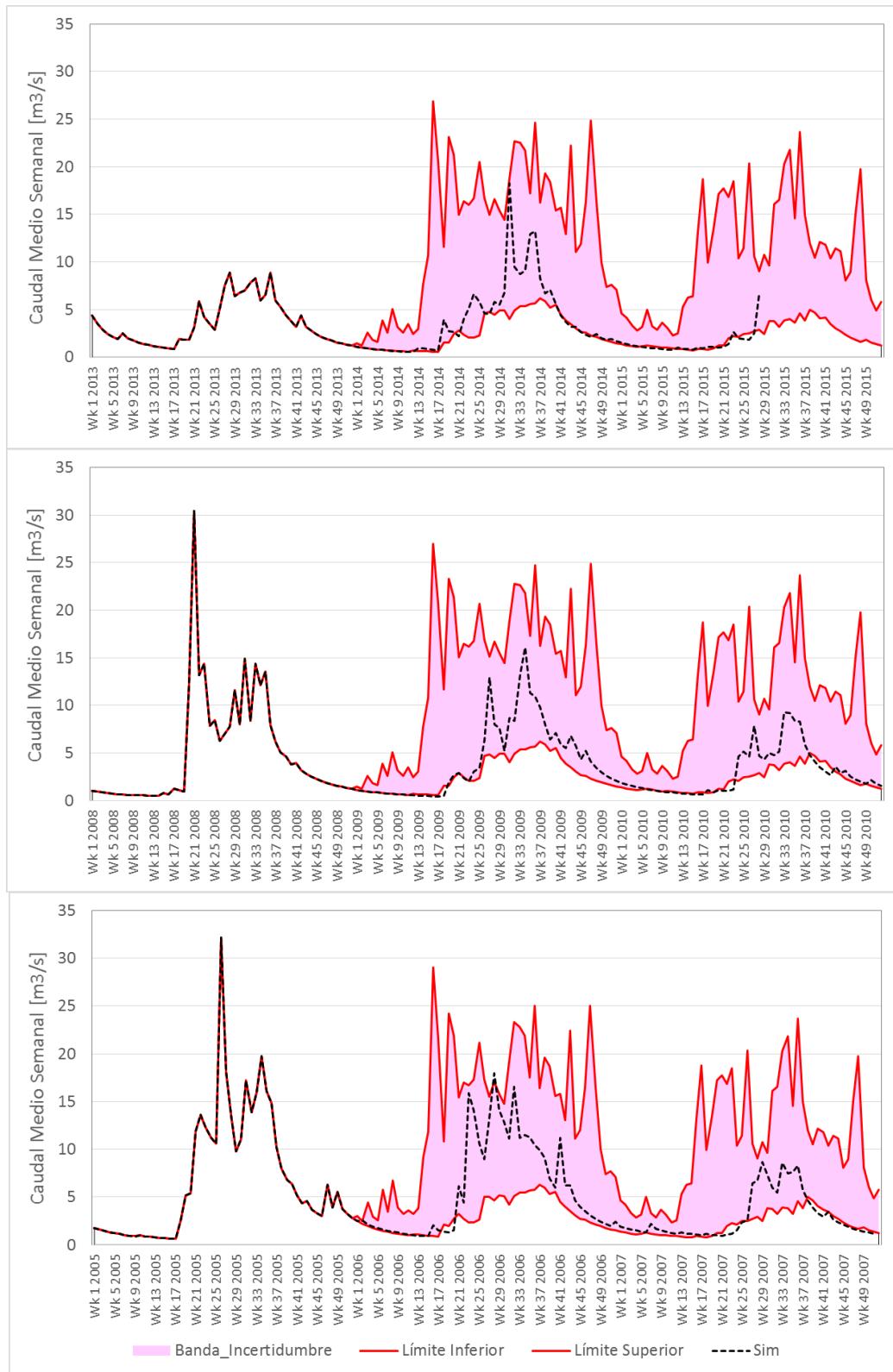


Figura A1- 10: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Estero Las Garzas (Año 1 – Húmedo)

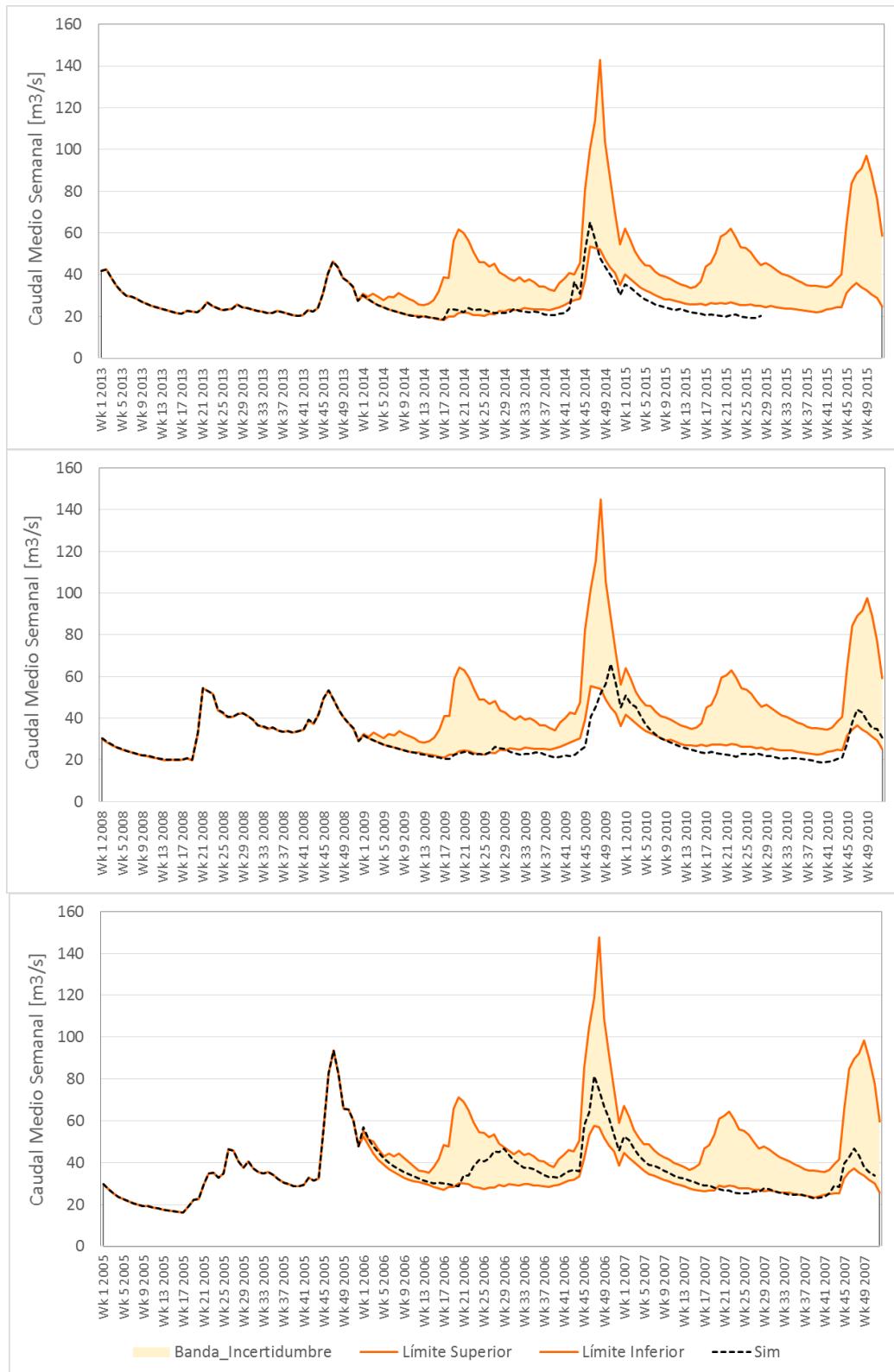


Figura A1- 11: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Afluente Laguna Invernada (Año 1 – Húmedo)

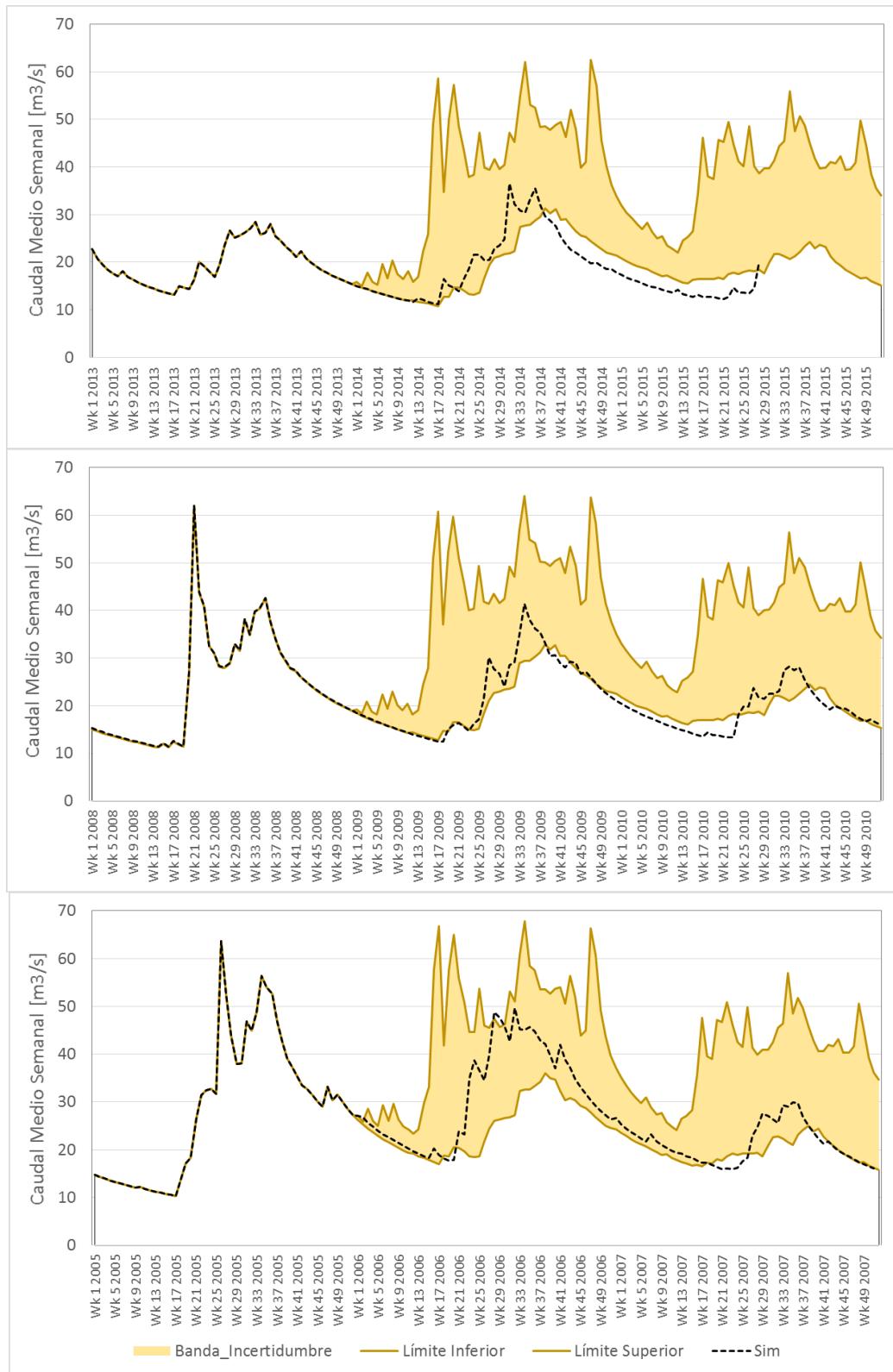


Figura A1- 12: Variación de Banda de Incertidumbre según año inicio estación Río Claro en San Carlos  
(Año 1 – Húmedo)

## ANEXO 2: Estadística de las series simuladas y observadas de precipitación y temperatura

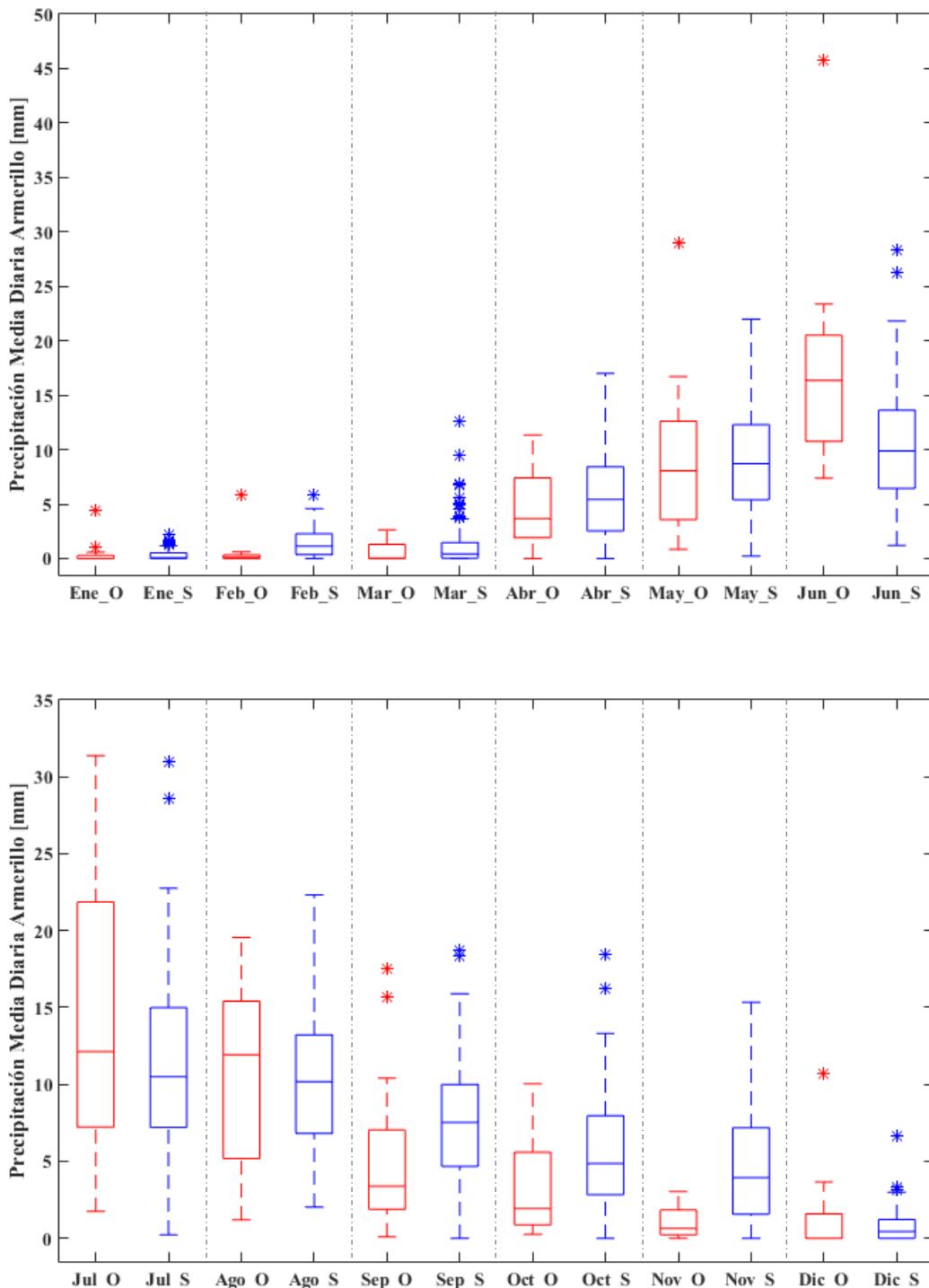


Figura A2- 1: Distribución de las precipitaciones medias diarias observadas (*\_O*) y simuladas (*\_S*) en la estación Armerillo en años normales

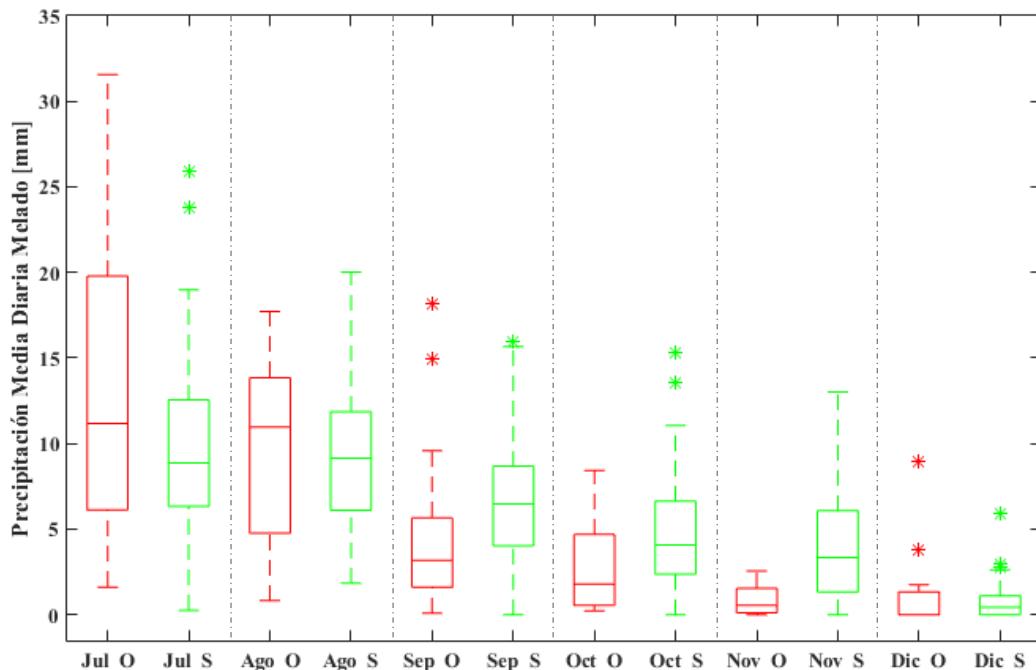
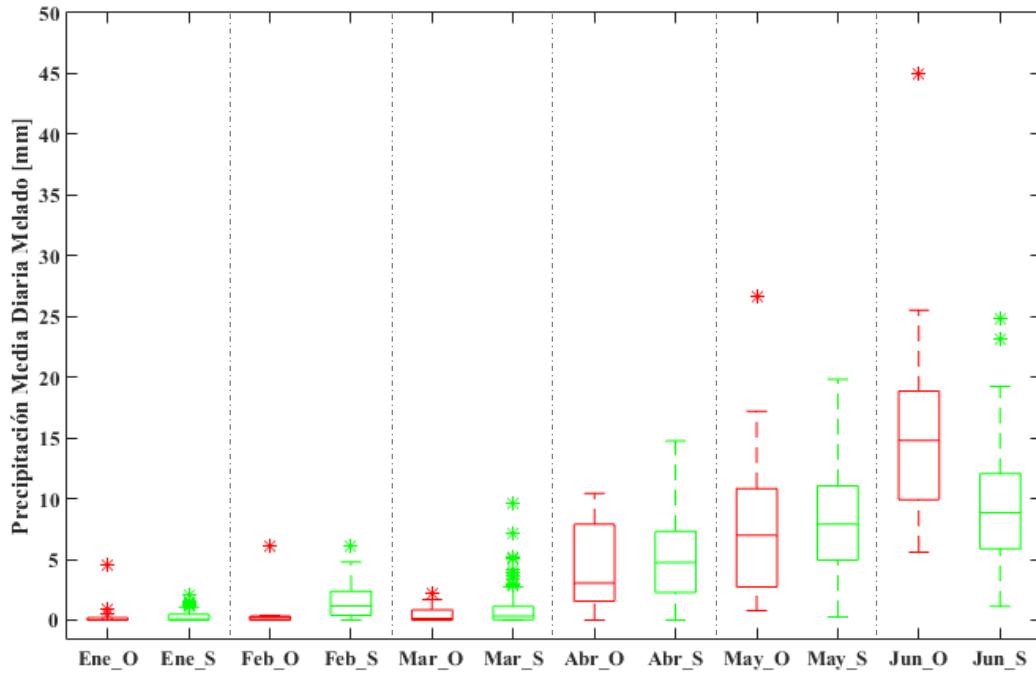


Figura A2- 2: Distribución de las precipitaciones medias diarias observadas (\_O) y simuladas (\_S) en la estación Melado en años normales

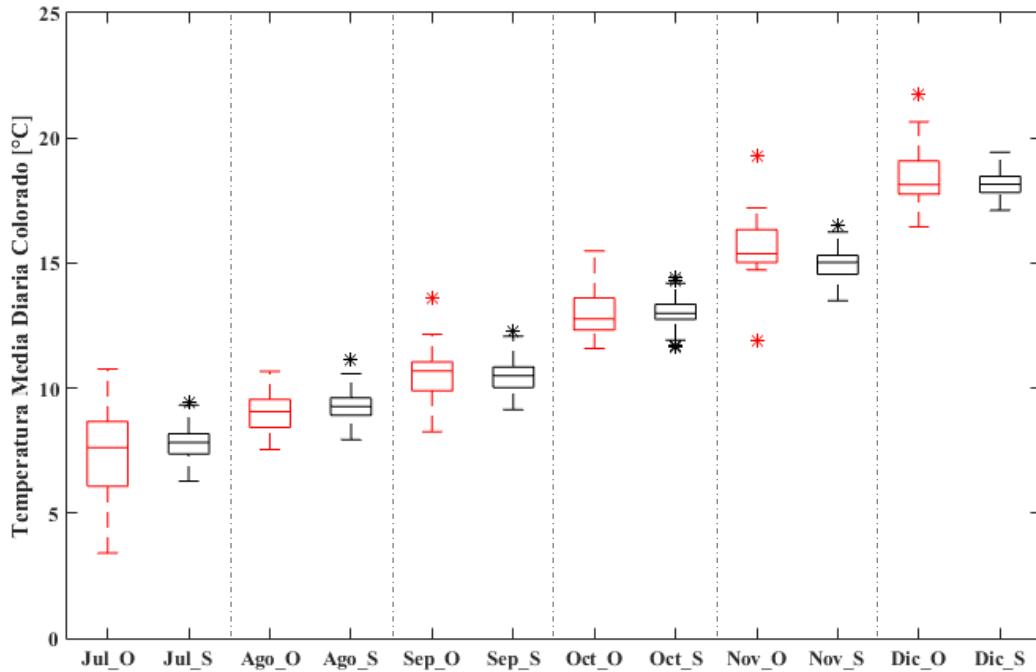
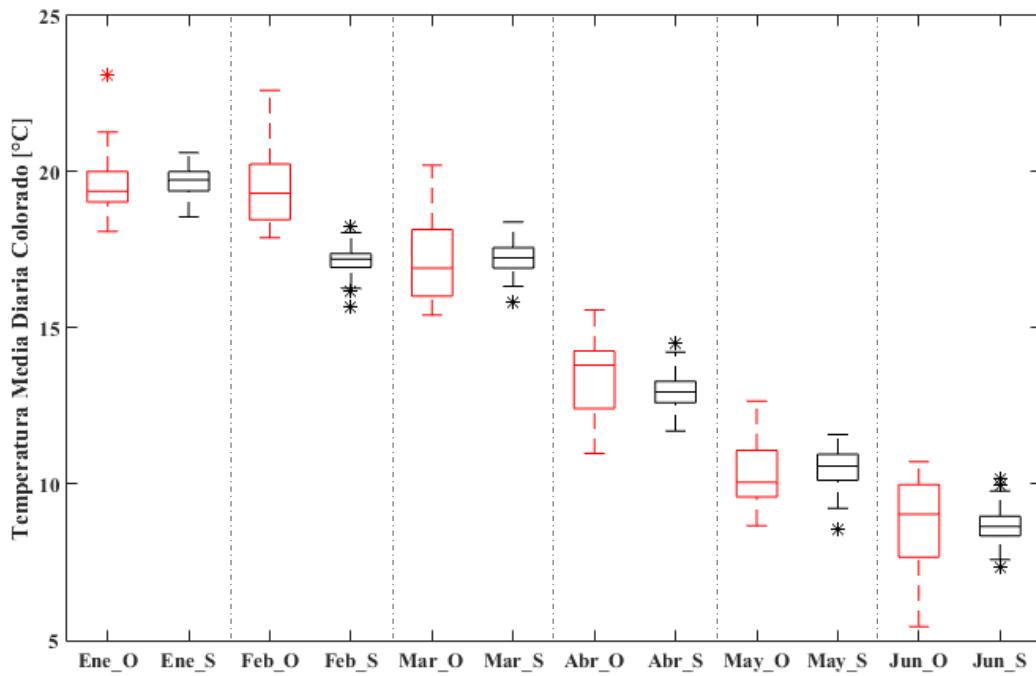


Figura A2- 3: Distribución de las temperaturas medias diarias observadas (<sub>O</sub>) y simuladas (<sub>S</sub>) en la estación Colorado en años normales

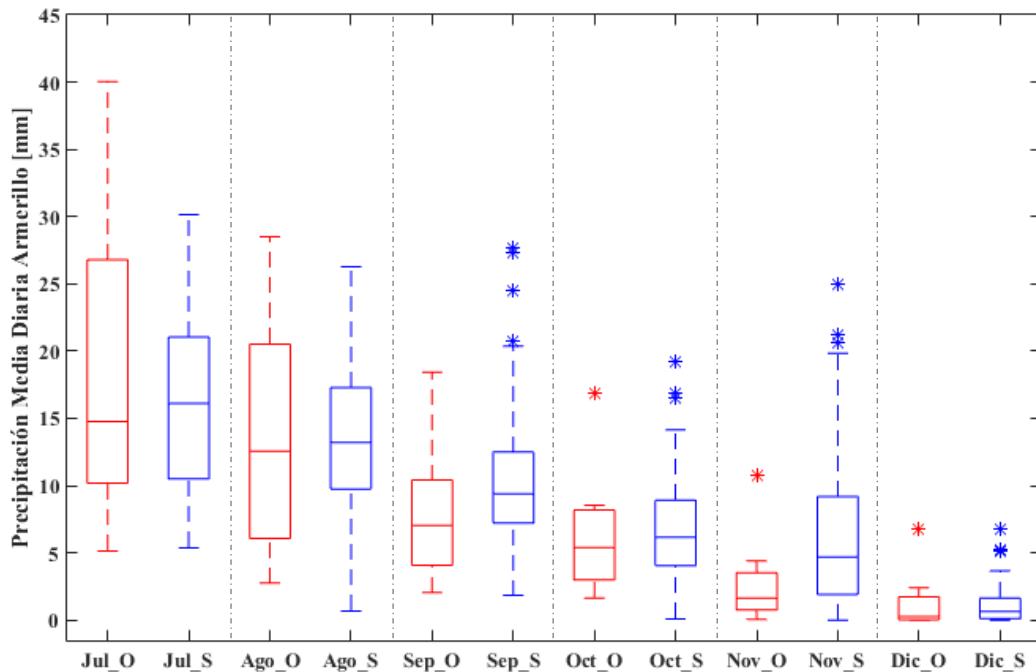
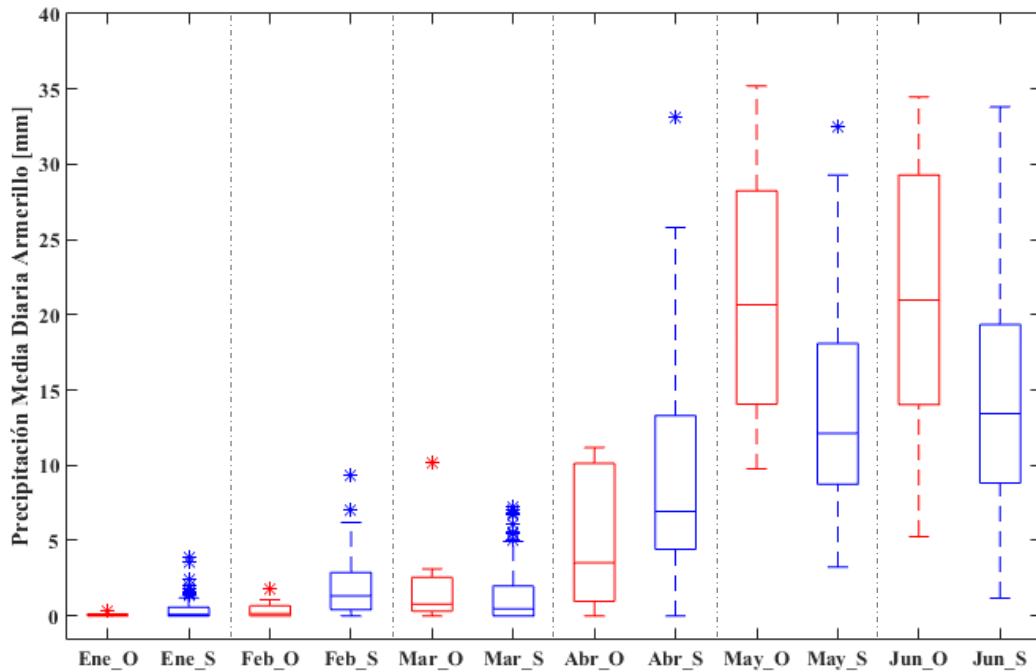


Figura A2- 4: Distribución de las precipitaciones medias diarias observadas (\_O) y simuladas (\_S) en la estación Armerillo en años húmedos

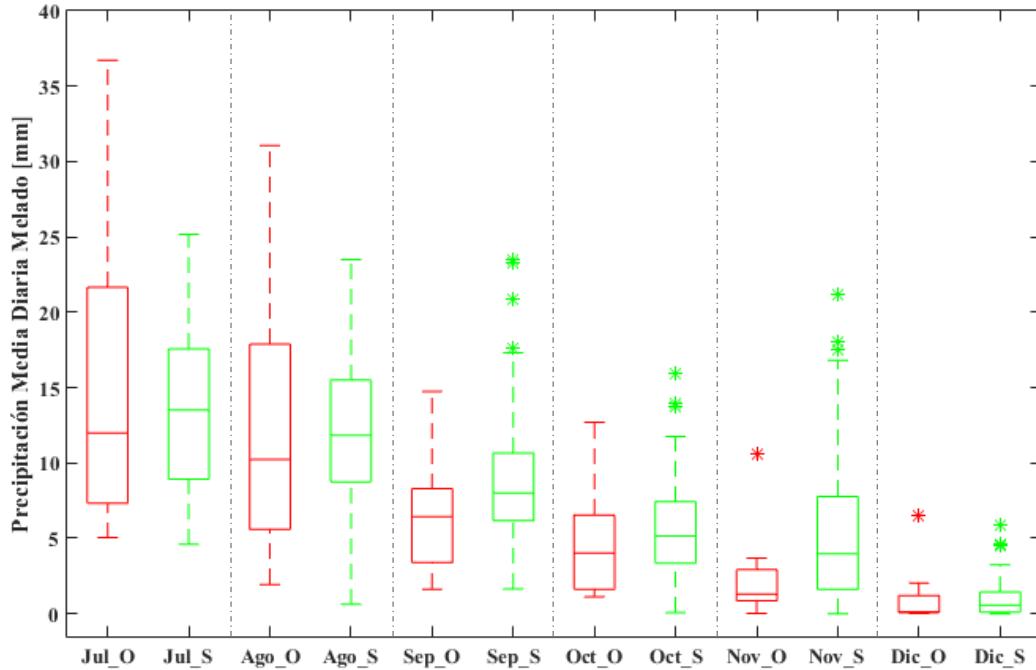
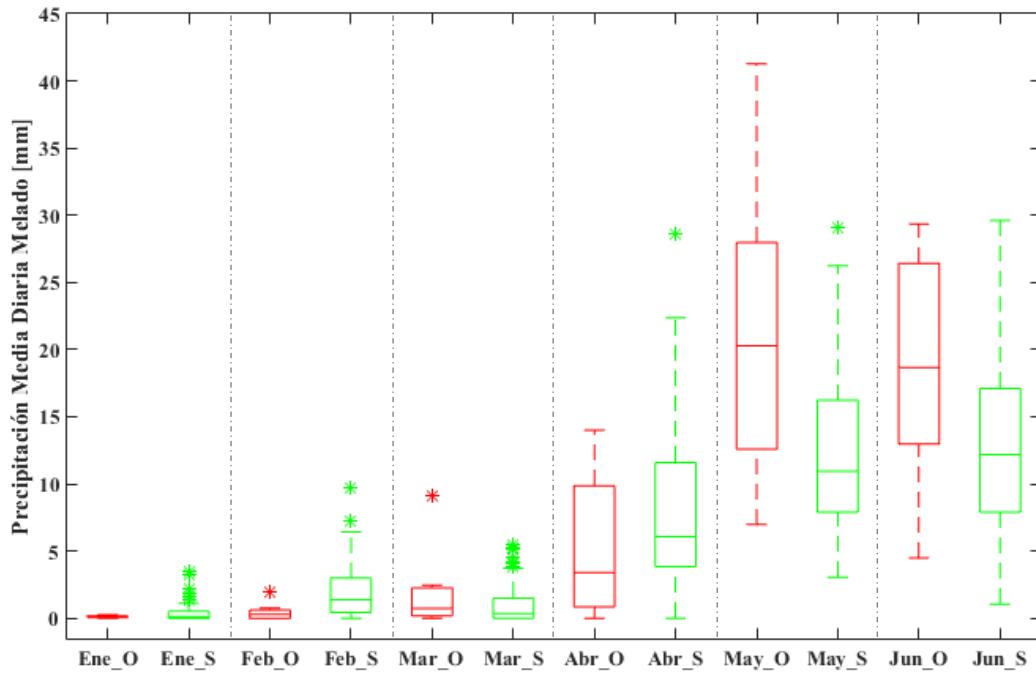


Figura A2-5: Distribución de las precipitaciones medias diarias observadas (\_O) y simuladas (\_S) en la estación Melado en años húmedos

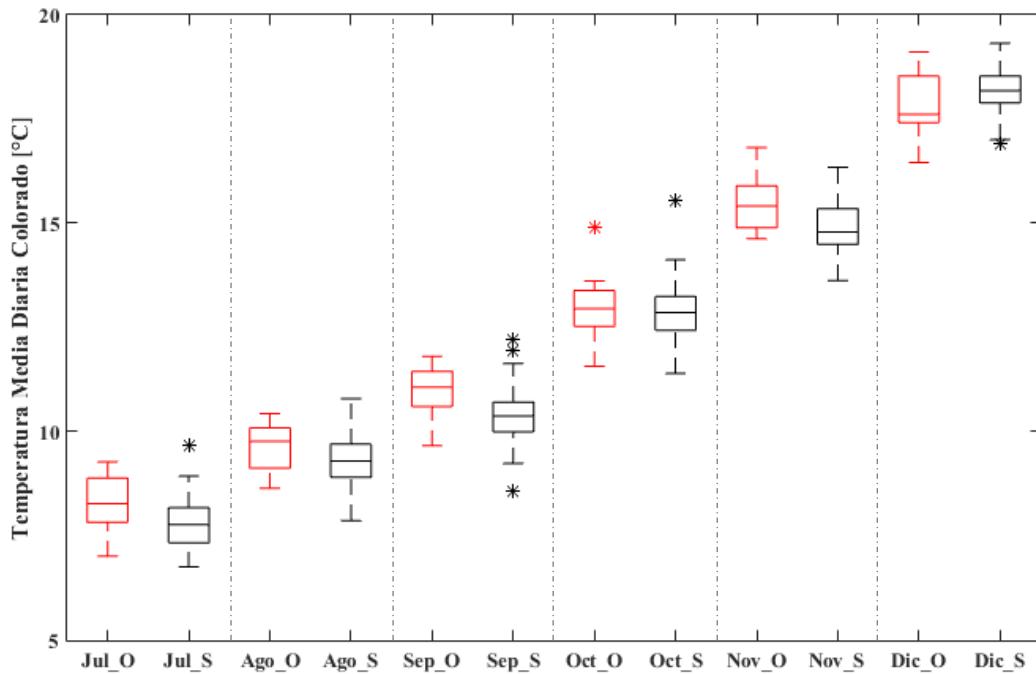
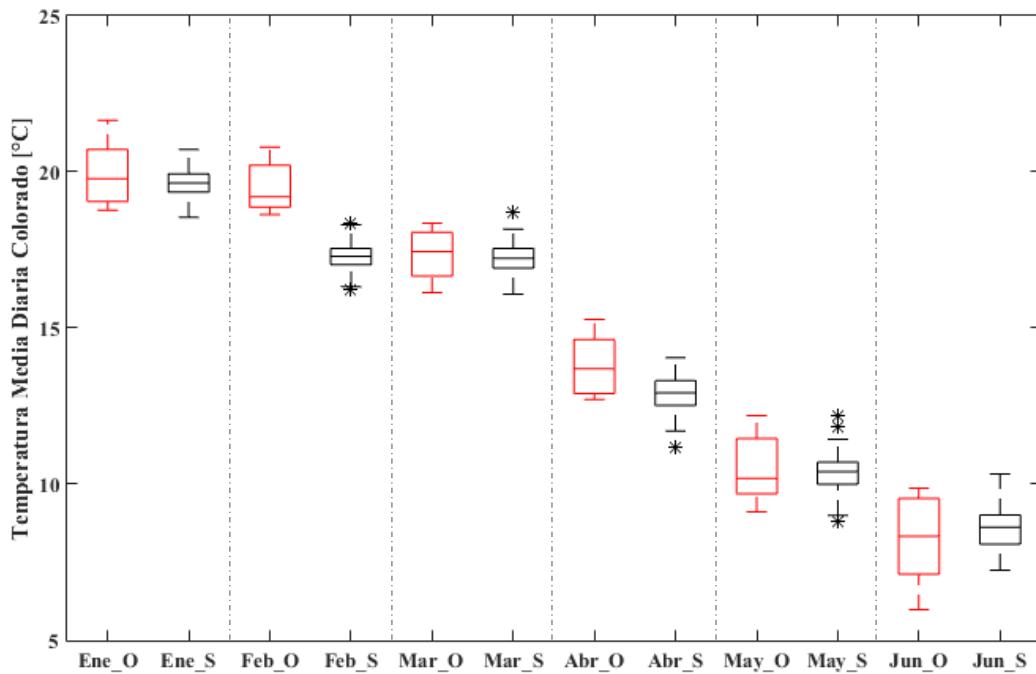


Figura A2- 6: Distribución de las temperaturas medias diarias observadas (*\_O*) y simuladas (*\_S*) en la estación Colorado en años húmedos