GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

Estimación de Caudales
Cuenca río Cisnes

REALIZADO POR:
DEP-DGA

S.D.T. 389

Santiago, Diciembre 2016

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 2
2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO 3
   2.1 OBJETIVO GENERAL 3
   2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3
3. METODOLOGÍA 3
4. ANTECEDENTES 4
   4.1 ANTECEDENTES RECOPILADOS 4
   4.2 LÍMITE DE CUENCA Y SUBCUENCAS DE INTERÉS 4
   4.3 FLUVIOMETRÍA 7
   4.4 PLUVIOMETRÍA 8
   4.5 USOS DE SUELO Y EDAFOLOGÍA 9
5. MODELACIÓN HIDROLÓGICA 10
   5.1 MODELACIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES 10
   5.1.1 CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN SUBCUENCAS DE INTERÉS 11
   5.2 MODELACIÓN CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS 15
   5.2.1 SUBCUENCA RÍO GRANDE 16
   5.2.2 SUBCUENCA RÍO CÁCERES 19
   5.2.3 SUBCUENCA EN DESAGÜE DE LAGUNA ESCONDIDA 21
   5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS 22
6. CONCLUSIONES 23
7. RECOMENDACIONES 24

1. INTRODUCCIÓN

Como parte de la Iniciativa de Inversión "ANÁLISIS Y MODELACIÓN HIDROLÓGICA CUENCA DEL RíO CISNES" código BIP N° N°30291328-0, desarrollado por CFC Ingeniería Limitada para la DGA Regional de Aysén y siendo, la División de Estudios y Planificación de la DGA, contraparte técnica del Estudio del mismo nombre, es que, a través de este Informe Técnico se pretende sintetizar lo realizado y presentar los resultados y conclusiones.

La cuenca del río Cisnes, ubicada en la Provincia de Aysén, en la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, se encuentra sometida a gran presión en el uso del recurso hídrico en actividades productivas. A su vez, el río y sus lagos forman un destino turístico importante debido a su naturaleza prístina, y a la pesca de salmónidos.

Al momento de establecer un uso específico para los recursos hídricos dentro de un sector geográfico se requiere conocer la oferta hídrica del mismo. Generalmente, esto se obtiene de la estadística de caudales disponible en la red hídrica. Sin embargo, no en todos los cauces se tienen estaciones fluviométricas que proporcionen información, por lo que se hace necesario estimarlos a través de modelos que relacionan funcional y numéricamente las distintas fases del agua y las características del entorno geográfico. Si bien existen modelos precipitación-escorrentía que permiten estimar caudales, estos han sido generados para sectores geográficos distintos a los que se presentan en este Estudio.

La situación antes descrita es común para gran parte del territorio nacional, donde hay información, pero ella no es suficiente considerando la extensión territorial que abarca y que incluyen los efectos combinados de distintos regímenes hidrológicos. Otro elemento importante es la existencia de cuencas menores en las cuales es posible indicar regímenes asociados a cuerpos de agua, como lagos, lagunas y zonas de mallines, que generan fenómenos de regulación que afectan directamente cualquier estimación de caudales.

De acuerdo a esto, a partir de la información disponible para el río Cisnes en su cauce principal se hace necesario disponer de métodos que permitan generar información adecuada que refleje la interacción de los diferentes elementos que condicionan los regímenes de caudales que existen en los distintos sectores de la cuenca.

A continuación, se presentan los resultados de la recopilación, revisión, síntesis y análisis de antecedentes meteorológicos, hidrológicos, geomorfológicos y edafológicos en la cuenca del río Cisnes del estudio desarrollado por CFC Ingeniería Limitada para la DGA Regional. Además, se caracteriza la cuenca, y las subcuencas de interés asociadas a los **ríos Cáceres, Grande y Sin Nombre en desagüe de Laguna Escondida**.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo del estudio fue determinar un método de estimación de caudales medios mensuales y máximos instantáneos adecuado para la cuenca del río Cisnes y tributarios sin información fluviométrica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sintetizar antecedentes meteorológicos, hidrológicos, geomorfológicos y edafológicos en la cuenca del río Cisnes.
- Definir los principales factores que condicionan los caudales en las cuencas de los ríos Cáceres, Grande y Sin Nombre desagüe Laguna Escondida.
- Definir métodos hidrológicos para estimación de caudales medios mensuales y diarios en las cuencas de los ríos Cáceres, Grande y Sin Nombre desagüe Laguna Escondida.

3. METODOLOGÍA

La caracterización hidrológica del río Cisnes en los distintos puntos de control se realizó en base a registros históricos, a escala mensual y diaria. Se caracterizaron las precipitaciones, temperaturas extremas, evapotranspiración potencial y caudales. Esta información se obtuvo de los registros oficiales existentes para la zona. Además, se analizaron los factores que podrían determinar la hidrología en cada una de las subcuencas de estudio.

Teniendo como antecedente la disponibilidad y calidad de la información en el área de estudio, fue definido el modelo conceptual que caracteriza la hidrología de la zona, y los modelos cuantitativos asociados, que permiten estimar los caudales a escala mensual y diaria.

Se expone, como resultado de la modelación hidrológica a escala mensual y diaria, la ecuación gobernante de la producción de escorrentía en la cuenca. Por último, se estimaron los caudales medios mensuales para las cuencas de los ríos Cáceres, Grande y Sin Nombre en desagüe de la Laguna Escondida; y se definieron las mejores relaciones de precipitación con caudal máximo a escala diaria.

4. ANTECEDENTES

4.1 ANTECEDENTES RECOPILADOS

Para la elaboración del estudio se consultaron los siguientes antecedentes:

Ref. 1 Balance Hídrico de Chile, Dirección General de Aguas, 1987.

Ref. 2 La economía del cambio climático en Chile, CEPAL, Gobierno de Chile, 2012.

Ref. 3 Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario y de los recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático, CONAMA, MINAGRI-AGRIMED, 2008.

Ref. 4 Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos, DARH.DGA, 2008.

Ref. 5 Análisis de los Efectos de los Cambios Climáticos Globales sobre los regímenes de caudales en las cuencas Andinas de Chile Central, tesis de título ingeniero civil U. de Chile Sebastián Molina Flores, 2007.

Ref. 6 Balance hídrico nacional. XI región, por REG Ricardo Edwards G. Ingenieros Consultores para el Departamento de Hidrología, DGA 1984.

Ref. 7 Informe Técnico N°7, caudales de reserva cuenca del río Palena, División de Estudios y Planificación, DGA 2009.

Ref. 8 Análisis de metodología y determinación de caudales de reserva turísticos por Aquaterra Ingenieros para la División de Estudios y Planificación, DGA 2010.

Ref. 9 Línea base hidrológica presentada por el proyecto hidroeléctrico Aysén, en su estudio de impacto ambiental.

Ref. 10 Informe Preliminar Determinación del Potencial Hidroeléctrico XI Región y Provincia de Palena X Región, Dirección General de Aguas, 2007.

Ref. 11 Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad Cuenca del Río Aysén, Cade-Idepe – DGA, 2004.

Ref. 12 Cartografía Digital DGA.

Ref. 13 Cartografía Digital Software Google Earth.

Ref. 14 Manual de Carreteras. Volumen 2 y 3. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas, 2014.

4.2 LÍMITE DE CUENCA Y SUBCUENCAS DE INTERÉS

La delimitación de la cuenca y las subcuencas de interés, asociadas a los ríos Grande, Cáceres y Sin Nombre en desagüe de Laguna Escondida, y la obtención de sus respectivos parámetros geomorfométricos, fue realizada a partir del modelo de elevación (DEM) ASTER GDEM World Elevation Data (1.5 *arc-second Resolution*) de 32 metros de resolución espacial, utilizando ArcGIS 10.1.

Las subcuencas delimitadas constituyen la base para la modelación hidrológica y su punto de cierre se indica en la Tabla 1. La Figura 1 muestra la ubicación de los puntos de cierre.

Tabla 1. Ubicación punto de cierre cuencas de interés.

Nombre	Este (m)	Norte (m)
Río Caceres	765.083	5.053.964
Río Grande	715.680	5.053.143
Río Sin Nombre en el desague de Laguna Escondida	683.800	5.037.891

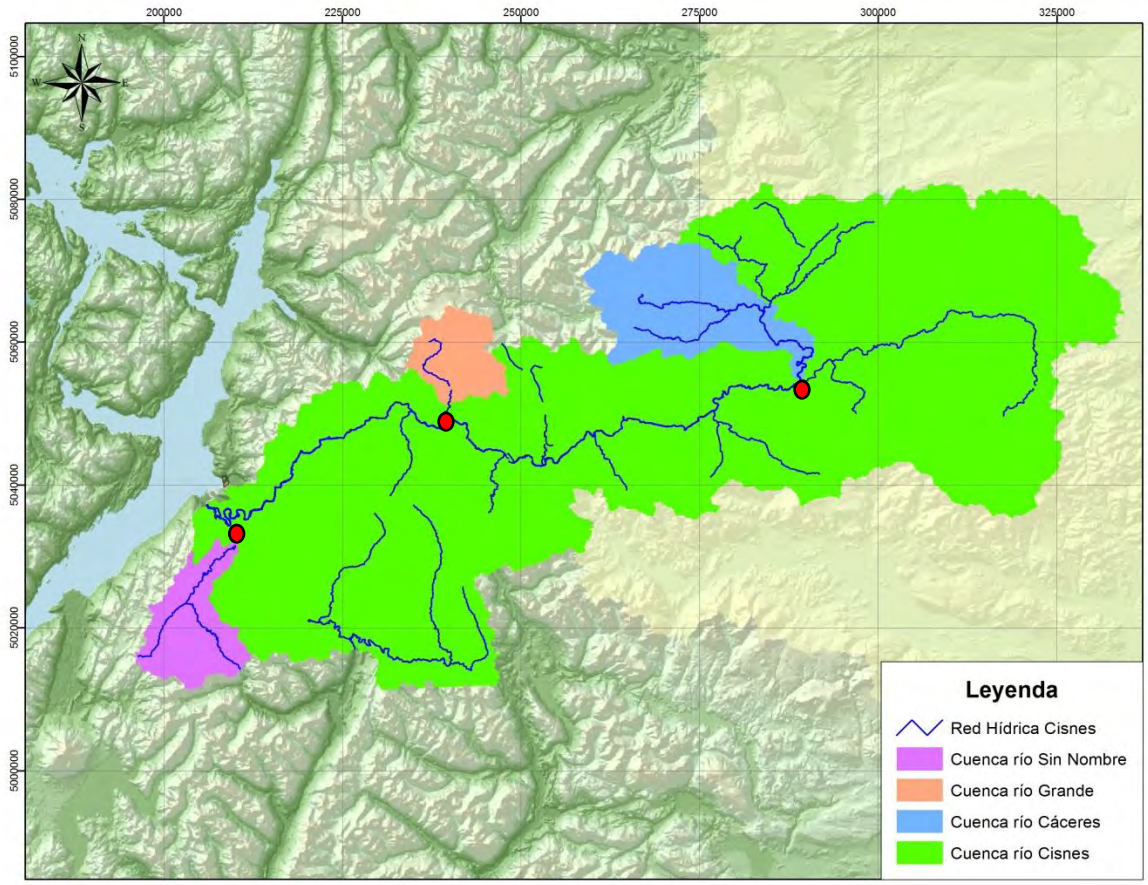

Figura 1. Cuenca Río Cisnes y subcuencas de interés.

Los parámetros morfométricos estimados para la cuenca fueron: área, pendiente media, elevación media, mínima y máxima; y para los cauces: longitud total y pendiente media se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros morfométricos subcuencas de interés.

Cuencas de interés	Área (km2)	Pendiente media de la cuenca	Elevación (m)	Elevación mínima (m)	Elevación máxima (m)
Río Cáceres	347,82	15,61	1091,00	510	1.987
Río Grande	128,07	20,80	1010,83	203	1.920
Río Sin Nombre en desagüe de Laguna Escondida	181,38	19,79	809,48	4	1.756

Cuenca del río Cáceres

Dentro de los factores que se espera que condicionen la hidrología de la cuenca del río Cáceres están: la orografía, debido a la presencia de valles confinados en la parte noreste de la cuenca; y subsecuentemente a la pendiente media de la cuenca. La ausencia de almacenamientos y, la relación entre el área y la escasa red drenaje, hace esperar respuestas levemente desplazadas a los eventos de lluvia y con peaks distribuidos.

Cuenca del río Grande

Dentro de los factores que se espera que condicionen la hidrología de la cuenca del río Grande está la orografía, debido a los valles confinados por los que fluye el río, primero unos 5 km en dirección noroeste, luego gira casi en 90 grados, para seguir una trayectoria sur este por 5 km más, hasta finalmente tomar rumbo al sur donde desemboca en el río Cisnes. La presencia de glaciares en la parte alta de la cuenca, también son un factor de influencia; situación que se evidencia en las curvas de variación estacional en la estación fluviométrica con el mismo nombre.

Debido a la presencia de superficies glaciares, y la escasa red de drenaje, se espera que la respuesta de la cuenca a eventos de lluvia tenga peaks desplazados al evento, y distribuidos en el tiempo. El régimen hidrológico asociado a la cuenca del río grande es nivo pluvial.

Cuenca del río Sin Nombre en desagüe Laguna Escondida

El factor que condiciona la hidrología de la cuenca asociada al desagüe de la Laguna Escondida es la presencia de la laguna. En efecto, los cuerpos lénticos, como lagos y lagunas, tienen un efecto regulador de las crecidas, condicionando la hidrología aguas abajo.

Debido a que la laguna es principalmente alimentada por las precipitaciones, con escasos afluentes (ninguno de importancia), y aunque presenta una morfología relativamente alargada (aproximadamente 6 km de largo versus 1.5 km de ancho), se espera que la hidrología de la cuenca sea regulada.

4.3 FLUVIOMETRÍA

En base a la información de la red hidrométrica de la Dirección General de Aguas (DGA) se identificaron las estaciones fluviométricas ubicadas en la cuenca de estudio.
En la Tabla 3 se indican las características de cada estación y en la Figura 2 se muestra la ubicación en la cuenca de cada una de ellas.

Tabla 3. Ubicación de las estaciones fluviométricas en la cuenca del Río Cisnes.

CODBNA	ID	Nombre	Este (m)	Norte (m)	Vigencia	Periodo
11141001-1	E1	Río Cisnes en Estancia Los Cisnes	774.526	5.058.672	Vigente	1984-2015
11143001-2	E2	Río Cisnes antes junta Río Moro	752.187	5.050.711	Vigente	1988-2015
11143002-0	E3	Río Moro antes junta Río Cisnes	752.214	5.049.858	Vigente	1988-2015
11147002-2	E4	Río Grande en carretera austral	717.132	5.051.552	Vigente	1991-2015
11147001-4	E5	Río Cisnes en Puerto Cisnes	681.184	5.037.736	Vigente	2001-2015

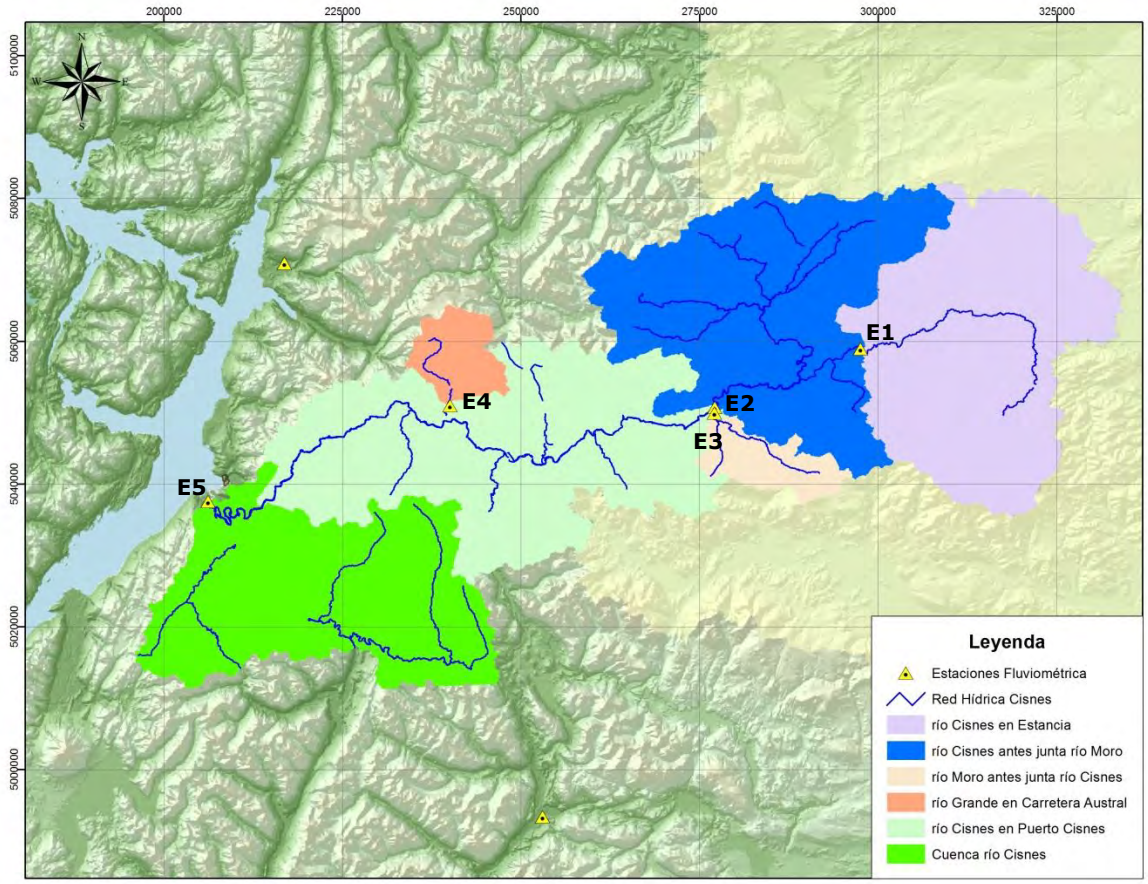

Figura 2. Ubicación estaciones fluviométricas.
(Coordenadas UTM según Datum WGS84. Huso 18)

Para cada una de las estaciones se definió su cuenca aportante y se estimaron los parámetros morfológicos que las caracterizan, utilizando herramientas del tipo ArcSWAT 10.1 (*Soil and water assessment tool*), extensión de ArcGIS 10.1. Los parámetros morfométricos estimados para la cuenca fueron: área, pendiente media, elevación media, mínima y máxima.

Tabla 4. Parámetros morfométricos de cuencas aportantes a estaciones fluviométricas.

Estaciones fluviométricas	Área (km2)	Pendiente media de la cuenca	Elevación (m)	Elevación mínima (m)	Elevación máxima (m)
Río Cisnes en Estacia	1122,79	15,61	1064,33	560	2.008
Río Cisnes antes de Moro	2260,10	20,80	1048,15	461	2.086
Río Moro antes de Cisnes	136,68	19,79	1190,82	505	1.885
Río Grande en Carretera Austral	129,15	63,19	1004,96	188	1.920
Río Cisnes en Puerto Cisnes	3810,82	32,24	989,15	3	2.121

4.4 PLUVIOMETRÍA

En base a la información de la red hidrométrica de la Dirección General de Aguas (DGA) se identificaron las estaciones meteorológicas asociadas a la zona de estudio, como se muestran en la Tabla 5 y Figura 3. Para ellas se recopilaron antecedentes de precipitación, correspondientes a los registros históricos de precipitaciones medias mensuales y diarias de las estaciones.

Tabla 5. Ubicación de las estaciones pluviométricas en la zona de estudio.

CODBNA	ID	Nombre	Este (m)	Norte (m)	Altitud	Vigencia	Periodo
11140001-6	E1	Río Cisnes	793.581	5.069.917	740	Vigente	1981-2013
11143003-9	E2	La Tapera	763.684	5.048.678	550	Suspendida	1991-2000
11144002-6	E3	Cisnes Medio	717.925	5.052.396	180	Vigente	1981-2015
11147003-0	E4	Puerto Cisnes	683.518	5.040.330	10	Vigente	1956-2015

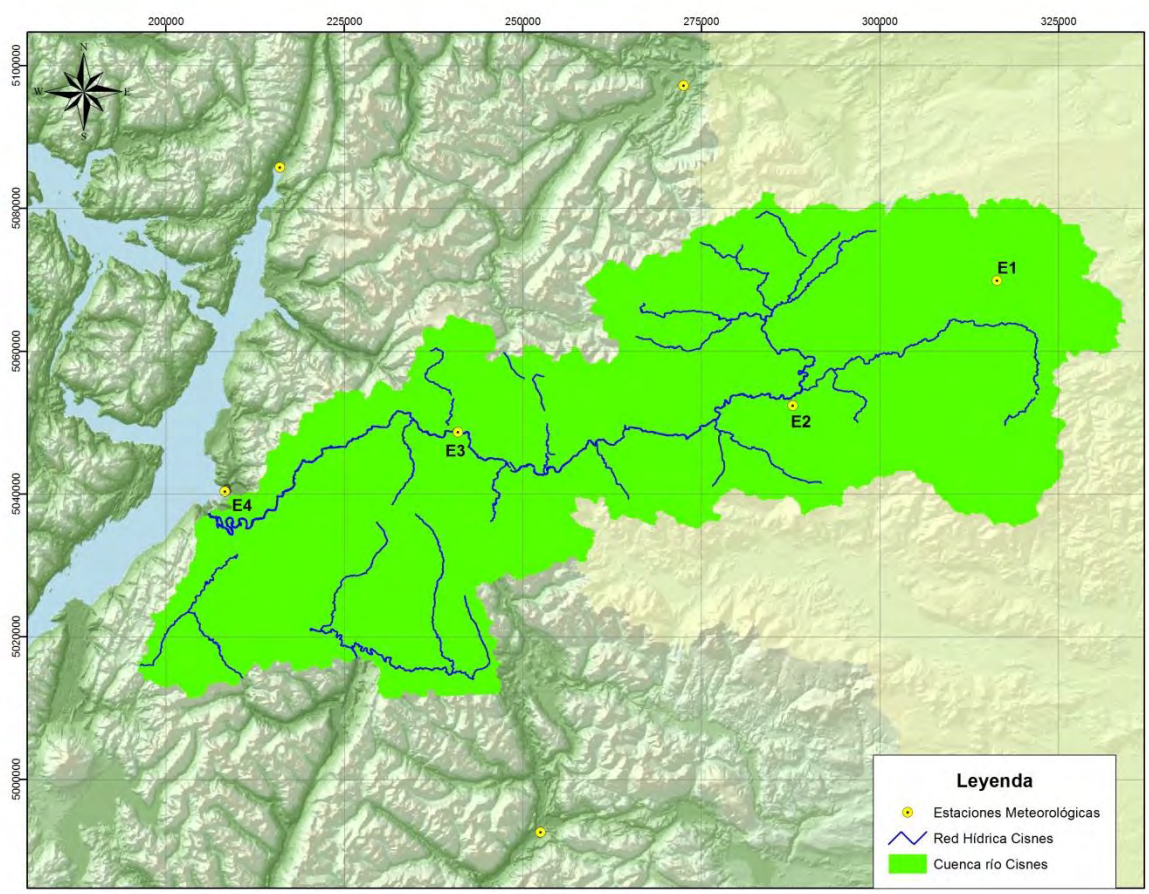

Figura 3. Estaciones meteorológicas en la cuenca del río Cisnes.
(Coordenadas UTM según Datum WGS84. Huso 18)

4.5 USOS DE SUELO Y EDAFOLOGÍA

Cerca del 60% del uso de suelo de la cuenca del Cisnes son fundamentalmente de bosque nativo con Los principales tipos forestales son Lenga, Siempreverde, Coigüe de Magallanes y Ciprés de las Guaitecas.

- Lenga, con especies de dominantes de Lenga (*Nothofagus pumilio*), Ñirre (*Nothofagus antartica*), Coigüe de Magallanes (*Nothofagus betuloides*), y Coigüe de Chiloé (*Nothofagus nitida*).
- Siempreverde, con dominancia de Coigüe de Magallanes, Coigüe (*Nothofagus dombeyi*), Tepa (*Laureliopsis philippiana*), Canelo (*Drymis winteri*), Notro (*Embothrium coccineum*), Tepú (*Tepualia stipularis*) y Luma (*Amomyrtus luma*).
- Coigüe de Magallanes, compuesto principalmente por Coigüe de Magallanes y Coigüe. Ciprés de las Guaitecas (*Pilgerodendro nuviferum*) con especies dominantes de Tepú y Coigüe de Magallanes.

5. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

En general, el escurrimiento de una cuenca es el resultado de dos grupos de factores: aquellos que dependen del clima y aquellos que representan la geomorfología de la cuenca.

Los factores climatológicos incluyen los efectos de la lluvia, nieve y evapotranspiración, y generalmente exhiben un comportamiento estacional. Entre los factores morfológicos de la cuenca se distinguen aquellos que son característicos de la cuenca y los que representan el sistema hidrográfico. La cuenca afecta el origen y comportamiento de los escurrimientos generados en ella, a través de la geometría (tamaño, forma, pendiente, densidad de drenaje, distribución de alturas) y a través de la distribución espacial de factores físicos, tales como los usos de suelo, condiciones de infiltración, tipos de suelo, características geológicas, etc. Estos elementos tienen variaciones tanto en el espacio como en el tiempo y, por consiguiente, no es trivial la definición de relaciones simples que permitan estimar el escurrimiento con precisión, si sólo se consideran algunos de los factores relevantes.

Todos los estudios que fueron revisados, utilizan métodos para estimación de caudales con base en la fórmula racional, en función del área y precipitación principalmente. Debido a esto se evaluó la correlación de caudales con precipitación, resultando ser poco representativa para la cuenca. Este resultado era esperable debido a la complejidad del sistema evaluado, gran tamaño de la cuenca, diferencia en los regímenes de caudales de las subcuencas, presencia de almacenamientos, entre otros.

5.1 MODELACIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES

Se buscó una única relación que caracterice el comportamiento hidrológico en la cuenca del río Cisnes. Para ello, se ajustó una relación a partir de los parámetros morfométricos: área (km^2), pendiente media y elevación media (m) de la cuenca, y datos de precipitación mensual y caudal medio mensual para todas las cuencas asociadas a estaciones fluviométricas. También se consideró un coeficiente independiente que busca incorporar el aporte nival y otros fenómenos que no son descritos por las variables conocidas en la cuenca de estudio. Se utilizó la siguiente estadística de caudales disponible:

- Cuenca Cisnes en Estancia con los datos de precipitación de la estación río Cisnes;
- Cuenca del río Moro y río Cisnes antes de junta con río Moro con los datos de precipitación de la estación La Tapera;
- Río Grande en Carretera Austral con datos de precipitación Cisnes Medio;
- Río Cisnes en Puerto Cisnes con precipitación en la estación Puerto Cisnes.

Las estaciones pluviométricas asociadas se definieron de acuerdo a la proximidad con la cuenca caracterizada.

La relación propuesta está definida por:

$$Q_{men} = a * A^b * P_{men}^c * S^d * H^e + f$$

Donde:

Q_{men}: Caudal medio mensual (m^3/s)

A: Superficie de la cuenca (km^2).

P_{men}: Precipitación mensual (mm).

S: Pendiente media de la cuenca (%).

H: Elevación media de la cuenca.

a, b, c, d, e, f: coeficientes.

Debido a que la jerarquía de los fenómenos que controlan la generación de escorrentía varía mes a mes, los coeficientes se calibraron con igual frecuencia. Estos coeficientes se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 6. Valores de los coeficientes de las ecuaciones mensuales que modelan el comportamiento de caudales en la cuenca del río Cisnes.

	Párametro del modelo						
Mes	a	b	c	d	e	f	R2
Enero	1.8922*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.89
Febrero	1.3667*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.91
Marzo	1.3667*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.86
Abril	1.3667*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.91
Mayo	1.3667*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.88
Junio	1.3667*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.84
Julio	1.3667*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.9
Agosto	1.1905*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.83
Septiembre	1.7464*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.88
Octubre	1.7464*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.68
Noviembre	2.318*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.93
Diciembre	2.2237*10(-6)	1.0997	39.5721*10(-2)	2.1038	19.3019*10(-3)	2.6763	0.96

5.1.1 CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN SUBCUENCAS DE INTERÉS

Se estimaron los caudales medios mensuales en cada una de las subcuencas de interés a partir de la ecuación gobernante de la producción de caudales en la cuenca del Cisnes, con periodo mensual. La estadística utilizada es la siguiente:

Para la subcuenca asociada al río Cáceres se utilizó la estadística de precipitación mensual disponible en la estación La Tapera.

Para la subcuenca del río Grande se utilizó la estación Cisnes Medio.

Para la subcuenca del río Sin Nombre, la estación Puerto Cisnes (ver Tabla 5 y Figura 3).

Todas ellas escogidas de acuerdo a su proximidad con la cuenca de interés. Ver Tabla 7.

Tabla 7. Caudales medios mensuales y su varianza en subcuencas de interés

	Cáceres			Grande			Sin Nombre		
Mes	N° Datos	Promedio	Varianza	N° Datos	Promedio	Varianza	N° Datos	Promedio	Varianza
Enero	6	4,8	0,312	29	22,18	22,66	29	5,3	0,273
Febrero	6	3,72	0,128	26	15,2	8,8	14	4,33	0,228
Marzo	8	4,12	0,106	28	17,39	10,03	15	4,63	0,183
Abril	7	4,27	0,21	27	19,08	12,89	17	4,81	0,114
Mayo	8	4,59	0,294	26	20	18,51	15	5,04	0,383
Junio	8	4,49	0,213	30	21,14	9,75	16	5,22	0,529
Julio	9	4,38	0,343	30	20,02	11,31	14	5,12	0,239
Agosto	7	4,41	0,194	29	17,89	5,87	15	4,92	0,267
Septiembre	9	4,42	0,543	28	21,43	18,67	16	5,38	0,223
Octubre	8	4,59	0,578	29	21,62	20,02	13	5,58	0,167
Noviembre	8	5,05	0,273	29	26,87	26,99	14	6,1	0,493
Diciembre	8	5	0,754	28	25,34	44,2	14	5,67	0,542

Es importante señalar que al realizar un análisis estadístico, uno de los parámetros más utilizados y analizados es el ANOVA.

El ANOVA de un factor es una técnica estadística que señala si dos variables (una independiente y otra dependiente) están relacionadas en base a si las medias de la variable dependiente son diferentes en las categorías o grupos de la variable independiente. Es decir, señala si las medias entre dos o más grupos son similares o diferentes.

Al aplicar ANOVA de un factor se calcula un estadístico o test denominado F y su significación. El cálculo del estadístico F es algo complejo de entender, pero lo que hace es dividir la variación entre los grupos por la variación dentro de los grupos. Si las medias entre los grupos varían mucho y la media dentro de un grupo varía poco, es decir, los grupos son heterogéneos entre ellos y similares internamente, el valor de F será más alto, y por tanto, las variables estarán relacionadas.

A continuación se presentan los gráficos y tablas con el ANOVA para cada subcuenca analizada, cabe recordar que se analizan 3 subcuencas de ríos que son tributarios al río Cisnes (ver Figura 1), estas son:

- río Cáceres
- río Grande
- río Sin Nombre en desagüe de Laguna Escondida

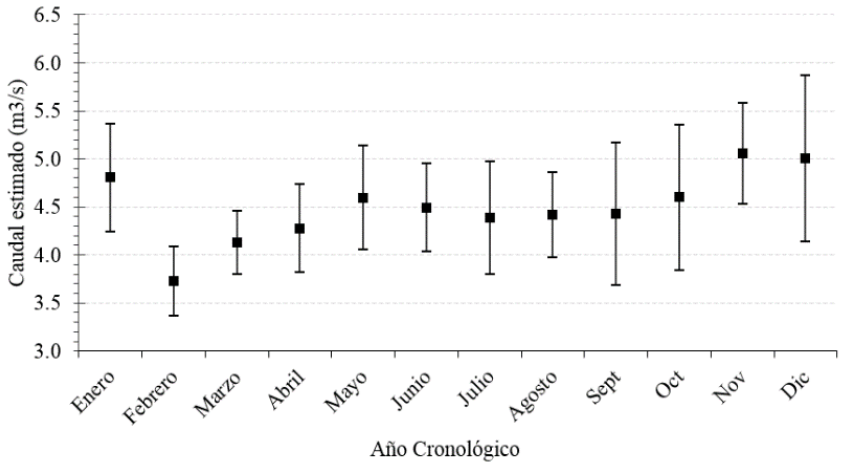

Figura 4. Caudales medios mensuales estimados para la cuenca del río Cáceres.

Tabla 8. ANOVA caudales medios mensuales en la subcuenca del río Cáceres.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor P	Valor crítico para F
Entre grupos	10,47	11	0,951	2,791	0,004	1,910
Dentro de los grupos	27,27	80	0,340			
Total	37,75	91				

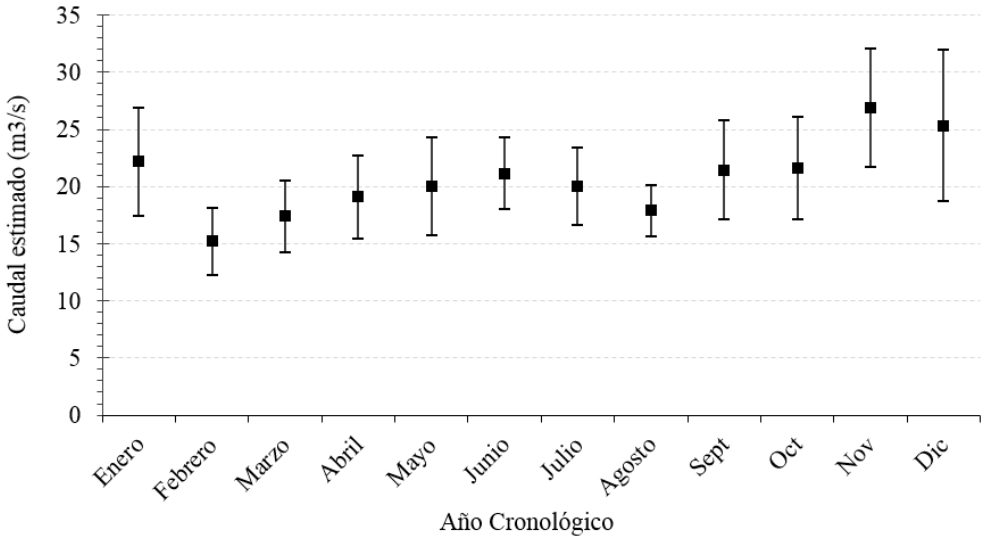

Figura 5. Caudales medios mensuales estimados para la cuenca del río Grande.

Tabla 9. ANOVA caudales medios mensuales en la subcuenca del río Grande.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor P	Valor crítico para F
Entre grupos	3238,23	11	294,38	16,84	2,66*10(-26)	1,81
Dentro de los grupos	5713,52	327	17,47			
Total	8951,75	338				

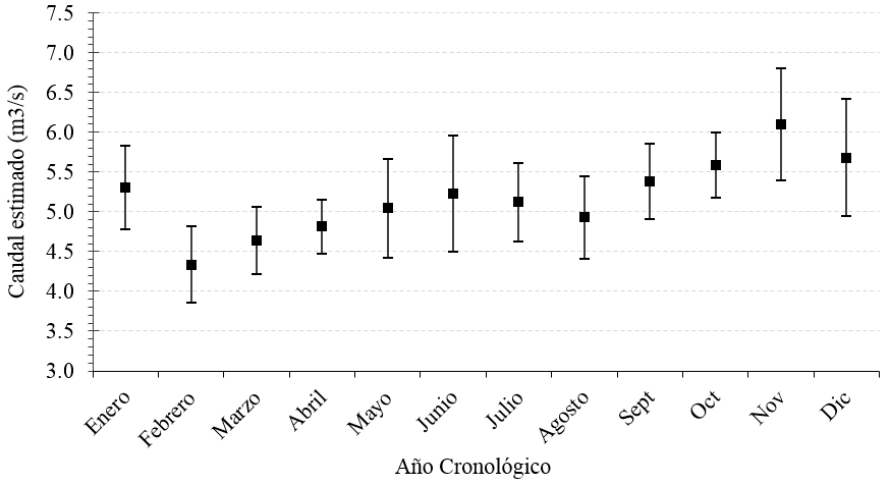

Figura 6. Caudales medios mensuales estimados para la cuenca del río Sin Nombre.

Tabla 10. ANOVA caudales medios mensuales en la subcuenca del río Sin Nombre

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor P	Valor crítico para F
Entre grupos	36,50	11	3,31	11,05	1,65*10(-15)	1,84
Dentro de los grupos	54,03	180	0,30			
Total	90,54	191				

5.2 MODELACIÓN CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS

Se evaluaron tres métodos de ajuste entre precipitación y escorrentía para las cuencas de interés:

1. El primero considera el caudal diario (observado) y la precipitación total diaria de todos los días de registro.

2. El segundo considera sólo los días con eventos de precipitación. Se evaluó por un lado la precipitación y el caudal de los días en que ocurrieron eventos de precipitación (relación Pd-Qd); y por otro lado se evaluaron los caudales efectivos asociados a los eventos de precipitación (relación Pd-Qe). Se definió como caudal efectivo al caudal observado menos el caudal del día anterior al inicio del evento de tormenta. En ambos casos se seleccionaron eventos de a lo menos tres días, con el objetivo de correlacionar correctamente la influencia de la precipitación en el régimen de caudales y garantizar la predominancia de las precipitaciones como factor explicativo. Del análisis se tiene que eventos de precipitación de un día, menores a 3,5 mm no tienen incidencia en el caudal medio diario.

3. El tercer método considera la máxima precipitación diaria en un evento de tormenta y el caudal máximo asociado a ese evento (Px-Qx). Esta alternativa sólo se presenta referencialmente y no como herramienta de cálculo por la escasa cantidad de datos útiles para realizar análisis

5.2.1 SUBCUENCA RÍO GRANDE

Debido a que la subcuenca del río Grande cuenta con registros hidro-meteorológicos, de la estadística fluviométrica disponible de la estación río Grande en Carretera Austral y del registro pluviométrico y de temperaturas extremas en la estación Cisnes Medio, se modeló el comportamiento de los caudales a partir de los datos de precipitación y temperaturas extremas disponibles. El periodo de modelación fue desde Mayo del 2014 hasta Abril del 2015, que corresponde al periodo más reciente con toda la estadística disponible al momento en que se realizó el estudio, como se muestra en la siguiente figura.

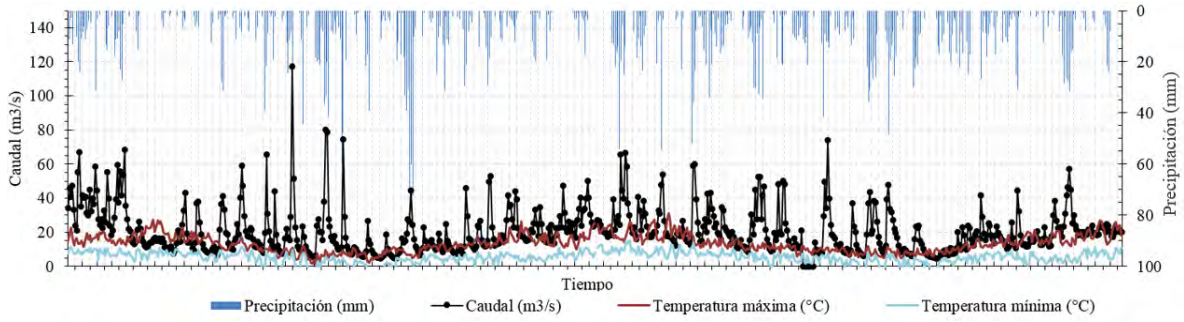

Figura 7. Caudal, precipitación, temperatura mínima y máxima en la cuenca asociada a la estación río Grande en Carretera Austral en el periodo: Mayo, 2014 − Abril, 2015.

La relación entregada por el modelo es:

$$\mathbf{Q = 10{,}49 + 0{,}398*PP - 0{,}179*Tmáx + 1.914*Tmín},$$

Donde PP: precipitación y T: temperatura.

Para evaluar la representación de los caudales que ocurren en la subcuenca se hizo el proceso inverso, esto es, a partir de los datos meteorológicos disponibles (precipitación y temperaturas extremas) se estimaron los caudales. La correlación de los caudales modelados con los caudales medidos en la cuenca es de R^2=0,34, como se muestra en la Figura 8**.**

1) Caudal diario respecto a precipitación diaria.

Se graficó la precipitación media diaria con los caudales medios, como se muestra en la Figura 8.

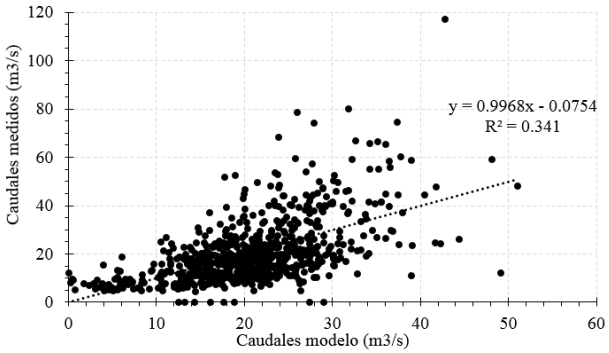

Figura 8. Correlación caudales del modelo versus caudales medidos.

2) Caudal diario de crecida respecto a precipitación diaria.

La siguiente figura muestra los 13 eventos modelados:

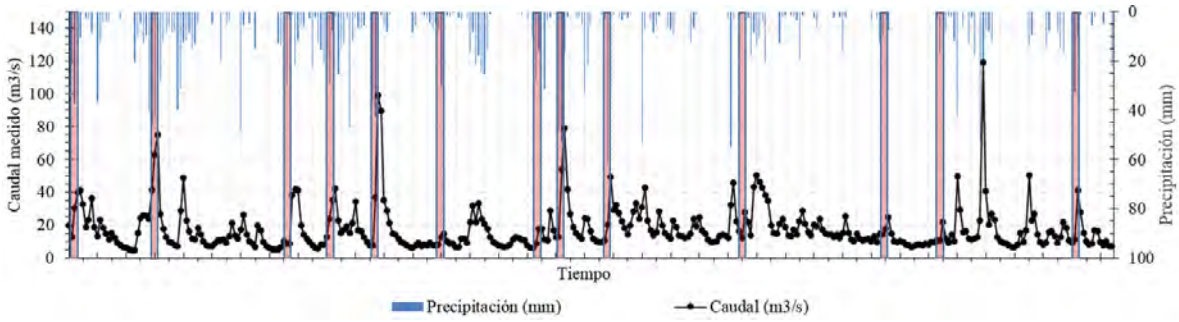

Figura 9. Hidrograma y pluviograma diario en el periodo de estudio, y eventos de lluvia modelados.

La Figura 10.a indica la relación entre precipitación diaria con los caudales diarios por evento, y la Figura 10.b indica la precipitación diaria con los caudales efectivos generados por el evento de lluvia, esto es, restados o descontados con el caudal al inicio de la crecida.

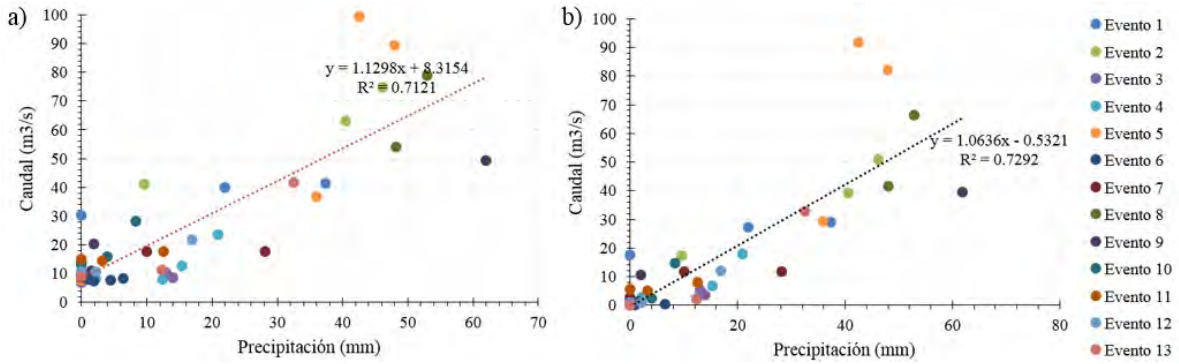

Figura 10. (a) Relación entre la precipitación diaria y caudal diario debido a eventos de precipitación, (b) Relación entre precipitación y caudal efectivo debido a eventos de precipitación, en la cuenca del río Grande en Carretera Austral.

3) Caudal máximo respecto a precipitación máxima diaria registrada durante el evento (de tres días o más).

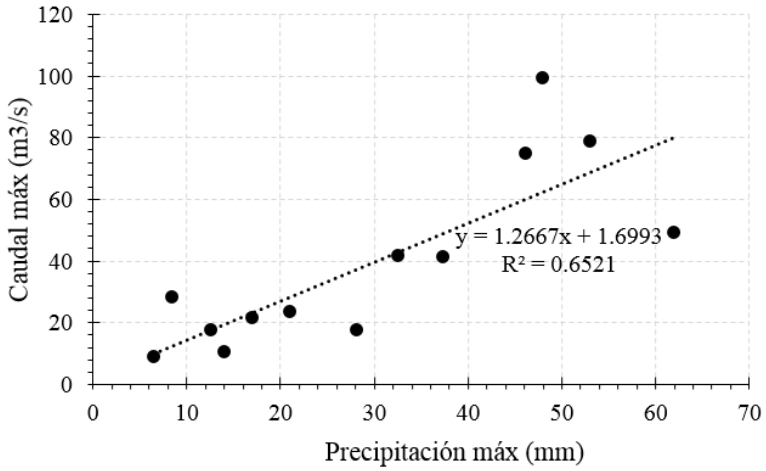

Figura 11. Relación entre precipitación máxima de un evento de lluvia y caudal máximo generado, en cuenca del río Grande en Carretera Austral.

5.2.2 SUBCUENCA RÍO CÁCERES

1) Caudal diario respecto a precipitación diaria.

Se graficó la precipitación media diaria con los caudales medios, como se muestra en la Figura18.

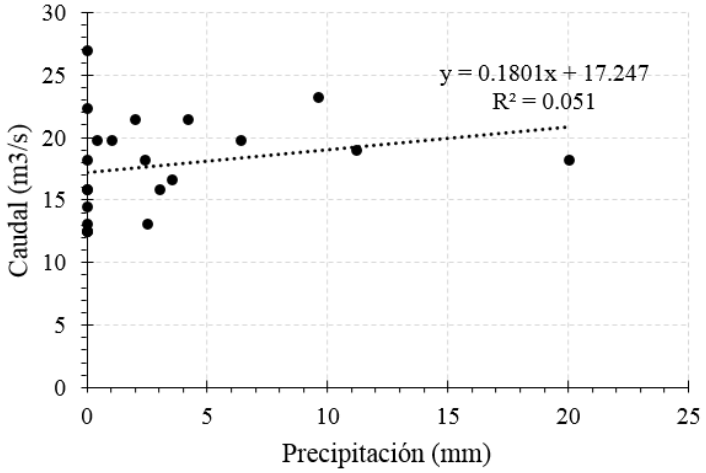

Figura 12. Relación entre caudal diario y precipitación en cuenca del río Cáceres.

2) Caudal diario de crecida respecto a precipitación diaria.

La Figura 19.a indica la relación entre precipitación diaria con los caudales diarios por evento, y la Figura 19.b indica la precipitación diaria con los caudales efectivos generados por el evento de lluvia, esto es, disminuidos con el caudal al inicio de la crecida.

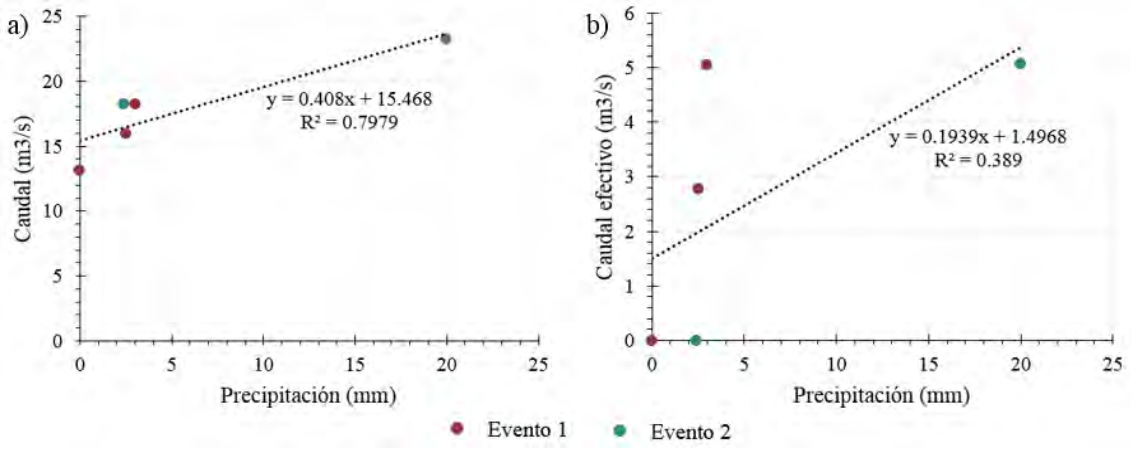

Figura 13. (a) Relación entre la precipitación diaria y caudal diario debido a eventos de precipitación, (b) Relación entre precipitación y caudal efectivo debido a eventos de precipitación, para la cuenca del río Cáceres.

3) Caudal máximo respecto a precipitación máxima diaria registrada durante el evento (de tres días o más).

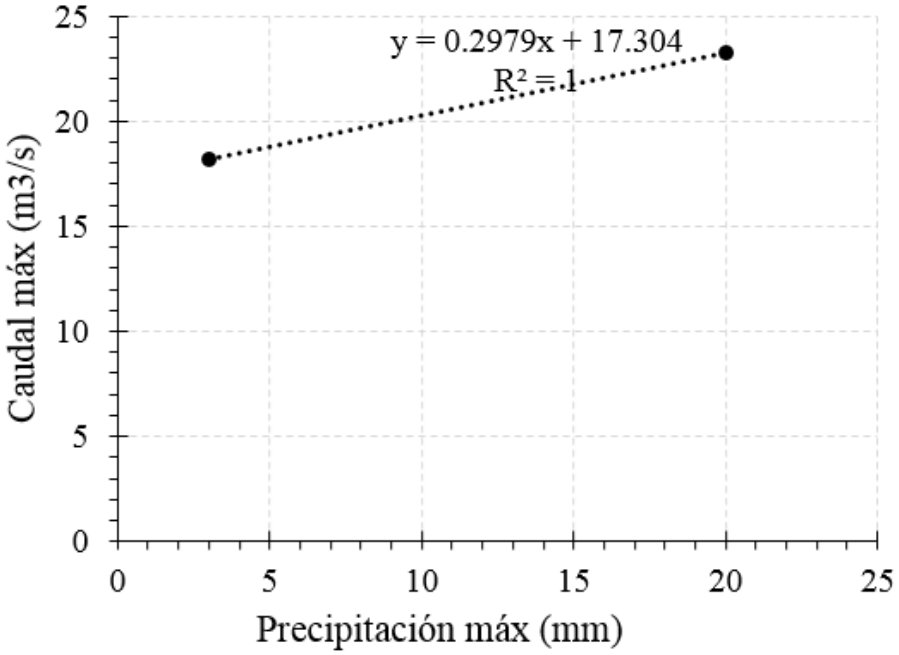

Figura 14. Relación entre precipitación máxima de un evento de lluvia y caudal máximo generado, en cuenca del río Cáceres.

5.2.3 SUBCUENCA EN DESAGÜE DE LAGUNA ESCONDIDA

Dado que el nivel de la laguna presenta oscilaciones diarias de 7 y 12 cm diariamente y que esta oscilación no es a igual cota todos los días (debido a los ciclos de mareas), no fue posible realizar un análisis hidrológico para esta cuenca.

La siguiente Tabla, muestra el resumen de las ecuaciones obtenidas para cada método analizado.

Tabla 11. Resumen de ecuaciones obtenidas para cada subcuenca

Subcuenca	Método		Ecuación	R^2
Río Grande	1	Caudal diario y precipitación total	y = 0,9968x - 0,0754	0,34
	2a	Precipitación y caudal con evento de precipitación	y = 1,1298x + 8,3154	0,712
	2b	Caudal efectivo asociado a evento de precipitación	y = 1,0636x - 0,5321	0,7292
	3	Máx. pp diaria en tormenta y caudal máx asociado a ese evento	y = 1,2667x + 1,6993	0,6521
Río Cáceres	1	Caudal diario y precipitación total	y = 0,1801x + 17,247	0,051
	2a	Precipitación y caudal con evento de precipitación	y = 0,408x + 15,468	0,7979
	2b	Caudal efectivo asociado a evento de precipitación	y = 0,1939x + 1,4968	0,389
	3	Máx. pp diaria en tormenta y caudal máx asociado a ese evento	y = 0,2979x + 17,304	1
Desagüe Laguna Escondida	1	Caudal diario y precipitación total	-	-
	2a	Precipitación y caudal con evento de precipitación	-	-
	2b	Caudal efectivo asociado a evento de precipitación	-	-
	3	Máx. pp diaria en tormenta y caudal máx asociado a ese evento	-	-

5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Respecto a los caudales mensuales, la ecuación que caracteriza la producción de escurrimiento en la cuenca del Cisnes tiene un ajuste regular respecto a los caudales medios mensuales para todos los meses (R^2>0,68, ver Tabla 6), sin embargo, no garantiza una estimación adecuada en las subcuencas de interés.
Este resultado se debe a la variabilidad intrínseca de los caudales generados en cuencas pequeñas, debido a la ausencia de un único factor explicativo del régimen de caudales que ellas presentan y a la escasez de datos para calibrar.

En el estudio se consideró modelar con la información disponible de todas las subcuencas, ya que todas tienen distintos regímenes de caudales y aportan variables relevantes al análisis multivariado; río Cisnes en Estancia y río Moro, nivo-pluvial; río Grande antes de Carretera Austral, pluvio-glacial, y por último, río Cisnes antes de junta con río Moro y río Cisnes en Puerto Cisnes, pluvio-nival. Incorporar las diferentes cuencas garantiza incluir en la modelación los distintos procesos de producción de escorrentía presentes en la cuenca del río Cisnes. Por el contrario, si se hubiese utilizado sólo los datos de algunas subcuencas, probablemente habría predominado la producción nival en la ecuación.

La modelación de caudales diarios en las subcuencas de interés fue bueno para el río Grande, donde el mejor ajuste lo tiene la precipitación diaria con el caudal efectivo (Pd-Qe, método 2b); mientras que para la subcuenca del río Cáceres corresponde a precipitación diaria con caudal diario (Pd-Qd, método 2a) que cuenta con pocos datos de precipitación, debido a la falla del pluviógrafo instalado en Laguna Escondida y la actualización incompleta de datos pluviográficos de la estación Cisnes Medio en el periodo de monitoreo. Respecto a la subcuenca del río Sin Nombre en desagüe de Laguna Escondida, no fue posible modelar la respuesta a eventos de precipitación debido a que los datos presentan efecto de mareas, por lo que la curva de descarga generada no puede ser utilizada como predictora de caudales a partir de registros limnigráficos y sólo se observó un evento de precipitación en la estación pluviométrica de referencia durante las mediciones. El ruido causado por la marea no puede caracterizarse debido a que no se tiene información adecuada de mareas en la zona.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo a la información disponible, se modelaron las cuencas de interés a escala mensual y diaria. Respecto a la modelación mensual, se determinó una ecuación que caracteriza los fenómenos gobernantes de la producción de escorrentía en la cuenca del río Cisnes, con un buen ajuste de R^2 para el promedio de los datos, (R^2>0,68 en todos los meses). Dicha ecuación fue aplicada para cada una de las subcuencas de interés, obteniendo los caudales medios mensuales para ellas. Se observó que no estima de buena manera el fenómeno en cuencas de interés (menores). A pesar de esto, lo más adecuado es modelar con la información disponible de todas las cuencas, ya que todas tienen distintos regímenes de caudales, además, el incorporar las diferentes cuencas, garantiza incluir en la modelación los distintos procesos de producción de escorrentía presentes en la cuenca del Cisnes.

Respecto a la modelación de caudales máximos instantáneos, debido a la alta correlación de los peaks de caudal con los peaks de lluvia, se modeló la respuesta de las subucuencas ante eventos de precipitación, con excepción de la subcuenca asociada al desagüe de Laguna Escondida.

Para río Grande en Carretera Austral, el mejor método arrojó un valor de R^2=0,73 y para río Cáceres el método Pd-Qd, arrojó un R^2=0,79. La tercera alternativa fue descartada por la escasa cantidad de datos útiles para realizar análisis.

Si bien el procedimiento de cálculo arrojó resultados de caudales posibles, los valores estimados no corresponden necesariamente a máximos instantáneos, sino que al valor observado por una persona en un momento particular de cada día de registro.

Se corroboró también la importancia de las estaciones existentes a lo largo del río Cisnes a diferentes alturas. Ello permite conocer el comportamiento del cauce, que sumado, a aforos, permite identificar posibles pérdidas o ganancias del río hacia o desde el acuífero.

Se debe tener consciencia respecto a que los resultados obtenidos son solo una mirada preliminar de lo que puede suceder en las subcuencas de interés y que se debe tener una visión holística al respecto, así como analizar los resultados como una primera aproximación a la realidad.

7. RECOMENDACIONES

Conforme a lo observado en el desarrollo del informe, se identifican recomendaciones prioritarias y secundarias, todas ellas condiciones mínimas para la caracterización de la cuenca del río Cisnes basada en datos reales.

Recomendaciones prioritarias:

- Mantener vigentes las estaciones fluviométricas con mayor información disponible. Principalmente río Cisnes en Estancia, río Cisnes antes de junta con río Moro y río Cisnes en Puerto Cisnes.
- Instalar una estación fluviométrica con medición continua en la desembocadura del río Cisnes. Si bien, existe una estación llamada río Cisnes en Puerto Cisnes, lo cierto es que se ubica en el río Cisnes pero aguas arriba de la unión del tributario río Melimoyu. Tributario, que de acuerdo a las características descritas anteriormente, genera un aporte importante a los caudales disponibles en la cuenca.
- Para tener un modelo predictivo de caudales máximos instantáneos más refinado se recomienda generar registros continuos de caudal y precipitación en las subcuencas aportantes y desarrollar un enfoque similar al presentado en este informe. Esto permitiría estimar con exactitud el tiempo de viaje en la cuenca, y con ello evaluar la respuesta de la cuenca.

Algunas recomendaciones segundarias:

- Instalar una estación en el río Cisnes aguas arriba de la unión del tributario río Grande. Ésta, junto con una estación en la desembocadura del Cisnes, permitirá caracterizar la hidrología de la cuenca en 5 altitudes diferentes, con distintos procesos físicos predominantes en la generación de escurrimiento.
- Instalar una estación Pluviométrica en la parte alta de la cuenca, lejana al cauce principal de manera que permita caracterizar el aporte del manto nivoso.

Por último, si se quiere caracterizar el comportamiento de cuerpos de agua y/o su influencia en el régimen de caudales del río se debería instalar equipos en terreno por al menos 5 años, de manera que permitan validar modelos predictivos