

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTIMACIÓN DE CAUDALES A NIVEL DIARIO EN CUENCAS PLUVIALES DE LAS
REGIONES DEL MAULE Y BIOBÍO UTILIZANDO EL MODELO QMD
MODIFICADO**

YEREL MORALES P.¹
LUDWIG STÖWHAS B.²

RESUMEN

La modelación hidrológica es una herramienta ampliamente utilizada para diversos fines tales como investigación, pronósticos para diferentes áreas productivas, entre otros; su uso y los resultados están directamente relacionados con la calidad de la información disponible en la zona de estudio.

En la actualidad existen variadas alternativas para realizar modelación de caudales en cauces superficiales, y su puesta en marcha depende del nivel de detalle de la conceptualización de la zona de estudio y del procesamiento previo de la información de entrada que requiera la alternativa escogida, lo cual tiene directa relación con los tiempos que se tengan disponibles para obtener resultados satisfactorios.

En este artículo se presenta el modelo QMD Modificado, un modelo precipitación escurrentía a escala diaria, de tipo agregado, que considera dentro de su conceptualización procesos relevantes como infiltración, evaporación, flujo subsuperficial y subterráneo, desarrollado para uso en cuencas pluviales. El proceso que se presenta corresponde a una validación de largo plazo (series de tiempo mayores a 10 años) que abarca hasta el año 2014, con valores de parámetros óptimos obtenidos con información de las décadas 80 y 90. Los resultados muestran un NS que va desde 0.68 a 0.71 en cuencas con diferentes características geomorfológicas.

¹Profesor Auxiliar, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso – yerel.morales@uv.cl

²Profesor Titular, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – ludwig.stowhas@usm.cl

1 INTRODUCCIÓN

La modelación hidrológica es una herramienta que ha cobrado importancia, en los últimos años, a raíz de los cambios que se han registrado a nivel global a través de diferentes investigaciones (Garreaud et al., 2017; Rojas 2012), indicando que las forzantes climáticas tienen variaciones que repercuten en el desarrollo del ciclo hidrológico, en conjunto con el uso del recurso hídrico. En este contexto, una información relevante es poder estimar cuál es la cantidad de agua disponible en las diferentes fuentes donde es posible encontrar este recurso, es decir, lagos, ríos, acuíferos, entre otros.

Una de las fuentes de más fácil explotación corresponde a las aguas superficiales presentes en los ríos, pero en este caso se presenta también el inconveniente de la incertidumbre respecto a su disponibilidad. Es aquí donde se unen ambos conceptos, ya que a través de la modelación hidrológica es posible estimar cuál sería la disponibilidad de este recurso frente a diferentes escenarios climáticos presentes en la zona de estudio (Salgado, 2011; Morales, 2012; Duque, 2013), pero a la vez surge la interrogante sobre qué modelo utilizar, cuál es la herramienta adecuada considerando la información disponible, la calidad de la misma (ERIDANUS, 2016) y un factor no menos importante, cuánto tiempo se dispone para tener la estimación del recurso disponible. Otro factor importante de destacar es que la información meteorológica y fluviométrica disponible en el país, que proviene principalmente de la Dirección General de Aguas (DGA), no cuenta con una amplia cobertura (Morales, 2014), lo cual también puede ser una limitación al momento de escoger un modelo.

En la actualidad existe una serie de alternativas para la modelación hidrológica, que han sido ampliamente probadas en el país, como lo son SIMED (Isensee, 2003), HEC-HMS (USACE, 2000) y WEAP (SEI, 1988), los cuales requieren tanto información meteorológica, como también características geomorfológicas de la cuenca para su funcionamiento.

En este artículo se presenta un modelo precipitación escorrentía, de tipo agregado, que considera dentro de su conceptualización procesos relevantes como infiltración, evaporación, flujo subsuperficial y subterráneo, desarrollado para uso en cuencas pluviales. El objetivo es presentar los resultados de un modelo agregado en el que solo se requiere como información de entrada precipitación, evaporación y área de la cuenca, el cual fue calibrado el año 2009 en las cuencas Estero Upeo en Upeo y Río Lirquén en cerro El Padre, con información de las décadas 80 y 90 respectivamente y verificar su comportamiento con información actualizada.

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo QMD, desarrollado por Kuhlmann y Stöwhas el año 1995, es un modelo a escala diaria de tipo conceptual, consta de 11 parámetros ajustables y 2 variables de inicialización. Los procesos hidrológicos se abordan de manera agregada, por lo tanto son evaluados por unidad de área, entregando resultados globales únicamente al final del proceso, al momento de presentar los caudales finales estimados.

Considera que la escorrentía total está compuesta por flujo superficial, subsuperficial y subterráneo, contemplando además procesos de evapotranspiración, infiltración y percolación profunda.

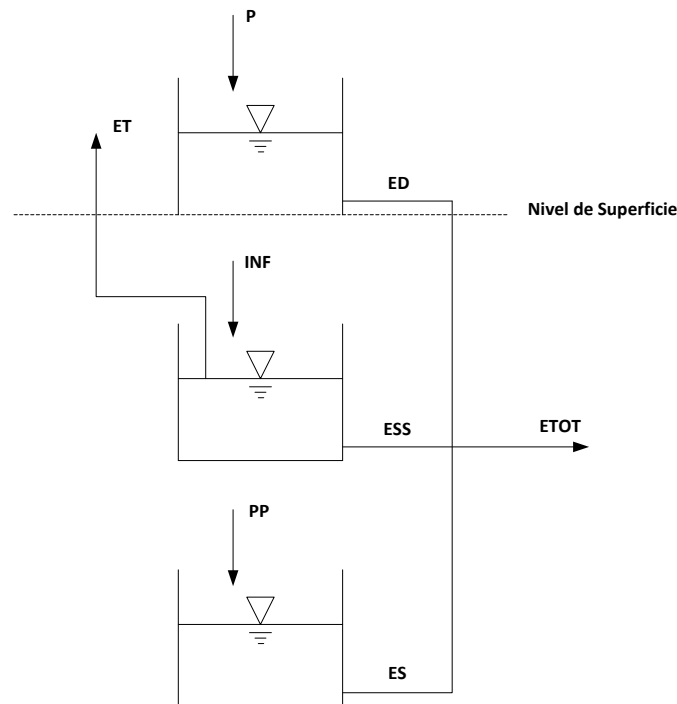


Figura 1: Esquema de representación modelo QMD.

Tal como se presenta en la Figura 1, el modelo representa el proceso de precipitación-escorrentía a través de 2 estanques consecutivos que se encuentran bajo la superficie terrestre, en donde producto de la infiltración, evapotranspiración y dependiendo de la humedad del suelo, se genera la escorrentía subsuperficial y la percolación profunda que alimenta el segundo estanque. En este último se genera la escorrentía subterránea, la cual está sujeta a la capacidad que tenga la napa subterránea que fluctúa producto de la misma escorrentía subterránea y de la percolación profunda.

La información de entrada para su funcionamiento corresponde a: evaporación y precipitación diaria, además de las variables de inicialización que corresponden a la humedad del suelo y la escorrentía subterránea. La simulación comienza ajustando los valores de precipitación y evaporación a través de los parámetros A y B, respectivamente, los cuales tienen como objetivo alterar la información de entrada de manera tal que ésta se ajuste a las condiciones medias de la cuenca.

Los procesos hídricos del modelo son: escorrentía directa, escorrentía subsuperficial y percolación profunda, escorrentía subterránea, evapotranspiración de la cuenca, estimación de la infiltración y escorrentía total, los cuales se evalúan a través de las ecuaciones que se presentan a continuación:

Escorrentía Directa

La escorrentía directa (ED) puede provenir de dos fuentes: la precipitación que cae directamente sobre la red de drenaje de la cuenca (ED1) o parte de la precipitación que cae en zonas no saturadas, pero con una capacidad de infiltración menor a la intensidad de lluvia (ED2), lo cual se representa a través del parámetro PED, que considera la cantidad de precipitación que cae sobre la red de drenaje como una proporción de la precipitación total, tal como se observa en la ecuación (1)

$$ED1 = PED \cdot P \quad (1)$$

En caso de que la intensidad de precipitación exceda la capacidad de infiltración del suelo se genera el segundo caso a través del cual se suma un nuevo aporte a la escorrentía directa que queda definido por la siguiente expresión:

$$ED2 = (1 - PED) \cdot P - f \cdot 24 \quad \text{Si } (1 - PED) \cdot P > 24 \cdot f \quad (2)$$

$$ED2 = 0 \quad \text{Si } (1 - PED) \cdot P \leq 24 \cdot f \quad (3)$$

Donde:

f: Capacidad de infiltración promedio diaria [mm/hr].

Por lo tanto la escorrentía directa total queda representada por:

$$ED = ED1 + ED2 \quad (4)$$

El retardo que puede tener el agua caída en la cuenca al abandonar la misma, se incorpora de la siguiente manera:

$$ED'_i = \alpha \cdot ED \quad (5)$$

$$ED'_{i+1} = (1 - \alpha) \cdot ED \quad (6)$$

Donde:

i: Día en que ocurre la precipitación

α : Parámetro ajustable. $0 < \alpha < 1$

ED_i: Volumen de escorrentía directa que abandona la cuenca el día i.

Escorrentía Subsuperficial y Percolación Profunda

La escorrentía subsuperficial (ESS) se estima a través de lo propuesto por Jamieson y Amerman (1969), considerando que ésta comienza a generarse a partir de un cierto valor umbral de humedad del suelo que corresponde a la capacidad de campo (H₀), sobre este valor depende linealmente de su humedad, hasta llegar a un valor límite de cuando el suelo alcanza su máximo nivel de humedad (H_{MX}).

La percolación profunda (PP), comienza una vez que se ha superado la capacidad de campo, tal como lo indican Huggins y Monke (1966). Tal como en el caso anterior, superado este valor se considera linealmente dependiente de la humedad del suelo, por lo que podría decirse que es proporcional a ESS.

El modelo considera un método alternativo, estimando el caudal total por unidad de área que abandona la cuenca por concepto de ESS y que pasa a la napa subterránea como PP, el cual se define como INTER y se representa a través de las siguientes expresiones:

$$INTER = 0 \quad \text{Si } H \leq H_0 \quad (7)$$

$$INTER = \gamma \cdot \frac{(H - H_0)}{(H_{MX} - H_0)} \quad \text{Si } H_0 < H < H_{MX} \quad (8)$$

$$INTER = \gamma \quad \text{Si } H \geq H_{MX} \quad (9)$$

Donde H corresponde al nivel de humedad en el primer estanque. El volumen escurrido por unidad de área al término de un día cualquiera producto del caudal INTER estará dado por:

$$VINT = \int_0^{24} INTER \cdot dt \quad (10)$$

Finalmente los volúmenes por unidad de área que escurren diariamente por concepto de ESS y PP quedan definidos de la siguiente manera:

$$ESS = \delta \cdot VINT \quad (11)$$

$$PP = (1 - \delta) \cdot VINT \quad (12)$$

Donde:

δ : Parámetro ajustable cuyo valor depende de las características de la cuenca $0 \leq \delta \leq 1$

γ : Parámetro ajustable que permite regular el flujo que genera el volumen VINT.

Escorrentía Subterránea

Depende principalmente de las características físicas de la cuenca y del volumen de agua por unidad de área que se encuentre acumulado en la napa subterránea; Este último puede variar por diversos motivos, Considerando en el presente modelo sólo los efectos de escorrentía subterránea (ES) y percolación profunda (PP), lo cual permite ES mediante la ecuación utilizada en el modelo de Brown, Ferrer y Ayala (1973).

$$ES = \frac{1}{(0.5 + 1/CK)} \cdot \left[ES_1 \cdot \left(\frac{1}{CK} - 0.5 \right) + PP \right] \quad (13)$$

Donde:

- ES: Volumen por unidad de área que escurre en un día por efecto de la escorrentía subterránea [mm].
- ES₁: Volumen por unidad de área que escurre el día anterior [mm].
- PP: Percolación profunda del día en cuestión.
- CK: Parámetro ajustable que permite que esta ecuación sea utilizada en diversas cuencas.

Evapotranspiración de la cuenca

Se considera que el agua asociada a este proceso sólo proviene de zona húmeda del suelo, es decir, el primer estanque. Esto implica que dicha zona estará sometida a una demanda igual a la evapotranspiración potencial, ETP, por lo cual aportará una cantidad igual a la evapotranspiración real. La evapotranspiración en el modelo se calcula a través de la siguiente expresión:

$$ETP = B \cdot EM \quad (14)$$

Donde:

- EM: Evaporación en superficie de agua libre medida o estimada, o evapotranspiración potencial diaria medida o estimada.
- B: Parámetro ajustable cuya finalidad es ajustar EM a la evapotranspiración potencial media diaria de la cuenca ETP.

Finalmente la evapotranspiración real de la cuenca en el modelo se rige a través de las siguientes expresiones:

$$ETR = ETP \quad Si \ H > 0 \quad (15)$$

$$ETR = 0 \quad Si \ H = 0 \quad (16)$$

Cabe destacar que en caso que H sea menor que ETP, este último se corrige internamente en el modelo.

Estimación de la Infiltración

En este modelo la estimación de la infiltración queda definida por lo siguiente:

$$f = i' \quad Si \ i' < f_0 \quad (17)$$

$$f = f_0 \quad Si \ i' \geq f_0 \quad (18)$$

Donde:

- f: Infiltración promedio diaria [mm/hr]
 i': Intensidad de precipitación promedio diaria corregida [mm/hr].
 fo: Capacidad de infiltración del suelo de la cuenca [mm/hr].

La corrección de la intensidad de precipitación se realiza producto del agua que cae directamente a la red de drenaje y queda definida de la siguiente manera:

$$i' = \frac{P'}{24} = \frac{(1 - PED) \cdot P}{24} \quad (19)$$

La capacidad de infiltración, que es una condición propia de la cuenca, se estima a través de las siguientes ecuaciones:

$$fo = FMX \quad Si H \leq H0 \quad (20)$$

$$fo = FMX + (FMN - FMX) \cdot \frac{(H - H0)}{(HMX - H0)} \quad Si H0 < H < HMX \quad (21)$$

$$fo = INTER = \gamma \quad Si H = HMX \quad (22)$$

Cabe destacar que idealmente la capacidad de infiltración del suelo, cuando la humedad se encuentra entre H0 y HMX debiera tomar el mismo valor que el parámetro γ (gama) cuando H=HMX, sin embargo esto no ocurre en la realidad y normalmente γ resulta ser menor.

La diferencia que se produce se asocia a suelos compuestos por diferentes estratos, donde las capacidades de infiltración de los estratos superiores son mucho mayores que las de los suelos inferiores. Siendo esta la estructura de los suelos, es lógico pensar que, mientras el suelo no haya alcanzado un nivel de humedad de saturación (HMX), la capacidad de infiltración estará gobernada por los estratos superiores, y una vez que haya alcanzado la saturación, la capacidad de infiltración dependerá de los estratos inferiores.

Esta metodología para determinar la infiltración fue modificada tal como plantea Morales (2009), resultando el modelo QMD Modificado, el cual adopta el método de Green Ampt, similar a lo propuesto por Isense (1991), incorporando como variables del modelo la conductividad hidráulica del suelo (Khid), altura de ascensión capilar (Hcap) y la porosidad efectiva (PorEf).

Escorrentía Total

La escorrentía total diaria en la cuenca corresponde a la suma de la escorrentía directa, la escorrentía subsuperficial y la escorrentía subterránea:

$$ETOT_{(i,j)} = ED_{(i)} + ESS_{(i)} + ES_{(i)} \quad (23)$$

Donde:

ETOT_(i,j): Escorrentía total para el día i , del mes j.

ED_(i): Escorrentía directa del día i.

ESS_(i): Escorrentía subsuperficial del día i.

ES_(i): Escorrentía subterránea del día i.

Parámetros y variables de inicialización

A continuación se presenta un resumen general de todos los parámetros (Tabla 1) y las variables de inicialización (Tabla 2) que usa este modelo, donde los tres últimos parámetros de la Tabla 1 están asociados al cambio de método de estimación de la infiltración.

Tabla 1: Parámetros modelo QMD Modificado

A	Factor que corrige la precipitación de entrada del modelo. (A>0)
α	Permite que el valor que escurrirá en forma de escorrentía directa y que se generó el día i, se distribuya entre el día i e i+1. ($0 \leq \alpha \leq 1$)
B	Factor que corrige la información de evaporación que se ingresa al modelo. (B>0)
CK	Constante de tiempo del embalse subterráneo. (CK>0)
δ	Distribuye el volumen que infiltra en el suelo en escorrentía subsuperficial y percolación profunda. ($0 \leq \delta \leq 1$)
FMN	Capacidad mínima de infiltración promedio diaria del suelo. Esto se observa cuando el suelo se encuentra saturado (H=HMX).
FMX	Capacidad máxima de infiltración promedio diaria del suelo. Esta se observa cuando la humedad del suelo es inferior a H0.
γ	Regula el flujo que genera el volumen que infiltra en el suelo. ($\gamma > 0$)
H0	Representa la humedad del suelo a partir de la cual comienza a generarse la percolación profunda y escorrentía subsuperficial.
HMX	Humedad máxima que es capaz de alcanzar el suelo.
PED	Proporción de la precipitación que no infiltra por caer en zonas impermeables o saturadas. (PED \geq 0)
Khid	Conductividad hidráulica.
Hcap	Altura de ascensión capilar.
PorEf	Porosidad del suelo.

Tabla 2: Variables de inicialización modelo QMD Modificado

ESIN	Volumen por unidad de área de la cuenca que escurre el primer del período de análisis por efecto de la escorrentía subterránea.
------	---

HIN	Humedad inicial del suelo para el período bajo análisis.
-----	--

Programa Computacional

La programación computacional del modelo incluye un conjunto de procesos que se requieren para poder reproducir el comportamiento de la cuenca, estos son calibración de parámetros, verificación y generación. Todo esto se lleva a cabo a través de una rutina principal denominada QMD y 2 subrutinas BUSCA y SIMUL, que funcionan de la siguiente manera:

Tabla 3: Descripción rutinas que componen modelo QMD y QMD Modificado

QMD	Corresponde a la rutina principal del modelo en la que dependiendo de los procesos que se desea realizar deriva a las subrutinas indicadas. En ella además se modifican los caudales medios diarios obtenidos durante la simulación para poder representarlos en forma gráfica.
BUSCA	En esta se realiza el proceso de búsqueda de los parámetros óptimos, lo cual se lleva a cabo a través de una búsqueda univariada. En esta subrutina se incluyen 3 criterios de ajuste o función objetivo (FOB), los que pueden ser usados indistintamente según lo requiera el usuario (Morales, 2009).
SIMUL	Aquí se realiza el proceso de estimación de los caudales medios diarios. Se calculan además, al ejecutar los procesos de calibración y verificación, el grado de ajuste FOB y el coeficiente de correlación entre los datos medidos y estimados.

3 Zona de estudio

Las cuencas en estudio corresponden a Estero Upeo en Upeo y Río Lirquén en cerro El Padre. La cuenca del Estero Upeo pertenece a la Región del Maule, Chile, cuenta con un área aportante de 204,63 Km², altura mínima de 441 msnm y altura máxima de 2891 msnm. Se encuentra controlada fluviométricamente por la estación Estero Upeo en Upeo, vigente desde el año 1963. La estación se ubica a 35°10'23" latitud Sur y 71°05'28" de longitud Sur (ver Figura 2).

La cuenca del Río Lirquén en cerro El Padre pertenece a la Región del Biobío, Chile, cuenta con un área aportante de 104,07 Km², altura mínima de 319 msnm y altura máxima de 1426 msnm. Se encuentra controlada fluviométricamente por la estación del mismo nombre, vigente desde el año 1942. La estación se ubica a 37°46'32" latitud Sur y 71°51'46" de longitud Sur (ver Figura 2).

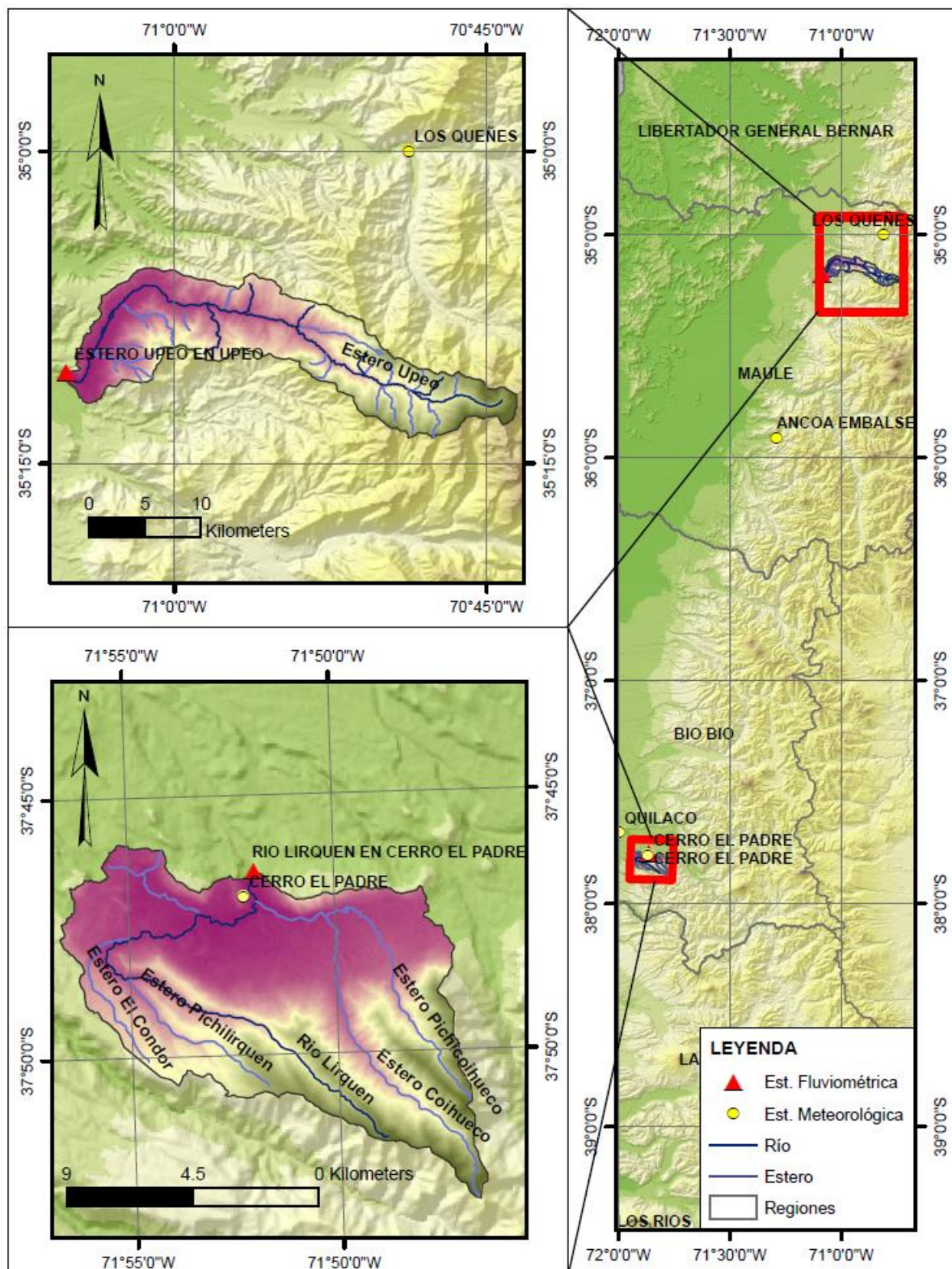


Figura 2: Mapa zona de estudio.

4 Materiales y métodos

Se utiliza la información meteorológica de precipitación (Pp) y Evaporación (E) de las estaciones de la DGA, las cuales se presentan en la Tabla 4. Cabe destacar que se utiliza las mismas estaciones que en el estudio realizado por Morales (2009).

Tabla 4: Estaciones meteorológicas y fluviométricas utilizadas para modelación.

Código	Nombre	Variable Interés	Cuenca	Periodo de Registro		Altura [msnm]	Coordenadas	
				Instal.	Suspen.		Lat. S	Lon. W
07103003-2	Los Queñes	Pp	Estero Upeo en Upeo	1918	/	663	35°00'03"	70°48'43"
07355007-6	Ancoa Embalse	E	Estero Upeo en Upeo	1957	/	421	35°54'38"	71°17'45"
07116001-7	Estero Upeo en Upeo	Q	Estero Upeo en Upeo	1963	/	450	35°10'23"	71°05'28"
08317003-4	Cerro El Padre	Pp	Río Lirquén en cerro El Padre	1943	/	346	37°46'47"	71°51'59"
08318002-1	Quilaco	E	Río Lirquén en cerro El Padre	1948	/	231	37°41'06"	72°00'21"
08317002-6	Río Lirquén en cerro El Padre	Q	Río Lirquén en cerro El Padre	1942	/	340	37°46'32"	71°51'46"

Se evaluará los resultados a través del criterio de ajuste 2 de la subrutina BUSCA del modelo QMD Modificado (ver ecuación 24), error cuadrático medio (RMS) y error cuadrático medio normalizado. Además se incorporará los criterios de bondad de ajuste utilizados en la actualidad, es decir, coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), Nash-Sutcliffe logarítmico (NS-Log), Porcentaje BIAS (PBIAS) y el coeficiente R^2 .

$$FOB = \frac{\sum \frac{|ETOT_{(i,j)} - QDIA_{(i,j)}|}{QDIA_{(i,j)}}}{DIAQ} \quad (24)$$

Donde $DIAQ$ corresponde a la cantidad de días del periodo simulado.

5 Resultados

El proceso de calibración realizado en el año 2009 para las cuencas de Estero Upeo en Upeo (1977-1978) y Río Lirquén en cerro El Padre (1992-1993) entregaron como resultado los valores de indicadores presentados en la Tabla 5 y las series de tiempo presentadas en las Figuras 3a y 3b. Los parámetros óptimos asociados a este proceso de calibración se encuentran detallados en la Tabla 6.

Tabla 5: Indicadores obtenidos en el proceso de calibración

Cuenca	FOB	RMS	RMS Normalizado	NS	NS-Log	PBIAS	R ²
Estero Upeo en Upeo	0.39	10.51	0.06	0.72	0.57	18.65	0.75
Río Lirquén en cerro El Padre	0.21	5.85	0.06	0.76	0.91	20.21	0.81

Es posible observar que los valores de indicadores de bondad de ajuste para ambas cuencas se consideran adecuados según los límites que se establecen en la literatura para modelación hidrológica (Moriassi, 2007; Molnar, 2011). En el caso de la representación gráfica de los resultados, es posible ver que las series modeladas logran mantener el comportamiento histórico de la serie de tiempo. En términos generales se observa que el modelo tiende a subestimar los caudales teniendo en ambos casos un PBIAS mayor que cero, presentando además ciertas deficiencias para lograr replicar los caudales máximos que se presentan en las diferentes cuencas modeladas y también ciertas deficiencias en la representación de los caudales base, principalmente en el caso de la cuenca Estero Upeo en Upeo.

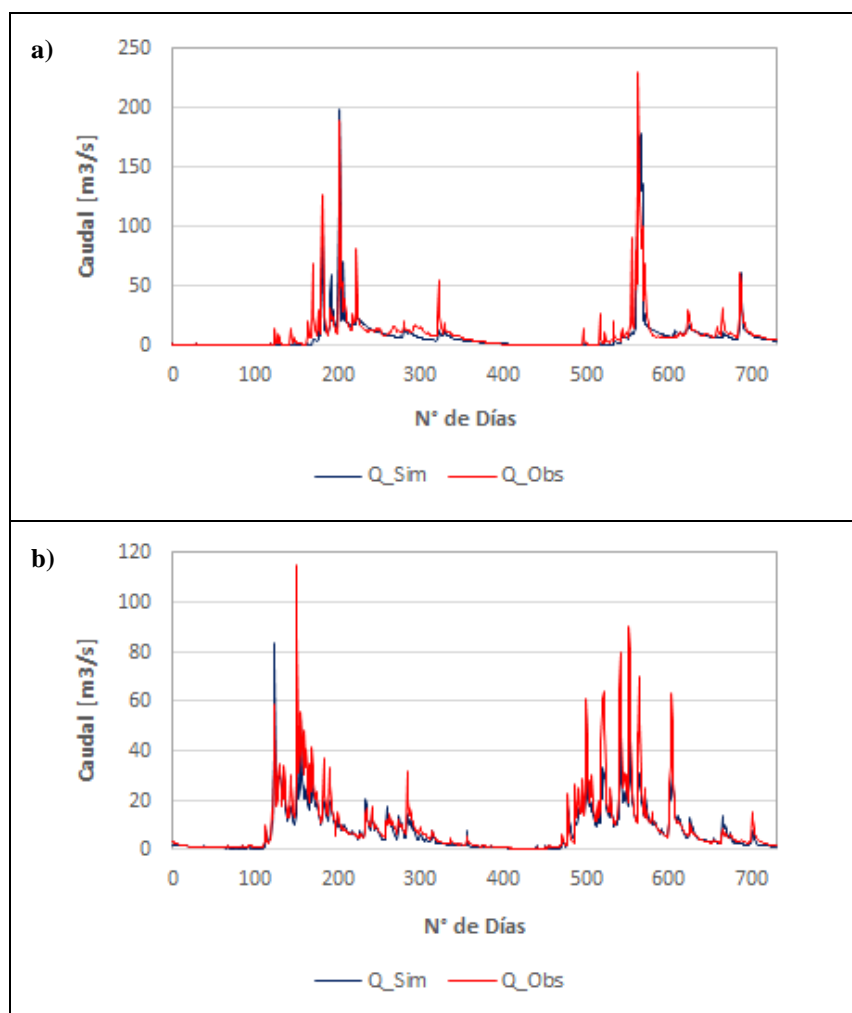


Figura 3: Caudales observados y simulados – proceso calibración: a) Estero Upeo en Upeo. b) Río Lirquén en cerro El Padre.

Tabla 6: Parámetros calibrados modelo QMD Modificado (Morales, 2009)

Parámetros	Unidades	Cuenca Estero Upeo	Cuenca Río Lirquén
A	---	0.9753	1.0523
B	---	0.3097	0.7462
H0	[mm]	368.1818	147.8205
FMX	[mm/hr]	5.8606	3.7579
FMN	[mm/hr]	4.0909	3.0062
PED	---	0.019	0.0352
α	---	0.2236	0.2005
γ	---	0.6691	2.2467
δ	---	0.257	0.5897
CK	---	0.0215	0.0169
HMX	[mm]	500.303	432.8205
Khid	[mm/hr]	7.3818	3.3846
PorEf	---	0.2	0.2114
Hcap	[mm]	75.8788	50.7692

El proceso de evaluación del modelo con información actual se lleva a cabo con información de las mismas estaciones fluviométricas y meteorológicas presentadas en la Tabla 4. El periodo utilizado para la modelación en ambas cuencas es el que se detalla en la Tabla 7. Cabe destacar que se utilizó años con información completa de precipitación, para no incorporar incertidumbre producto del relleno de estadística.

Tabla 7: Detalle periodo de tiempo utilizado para validación modelo QMD Modificado.

Cuenca	Periodo de validación	
	Inicio	Término
Estero Upeo en Upeo	01-01-1995	31-12-2011
Río Lirquén en cerro El Padre	01-01-1995	31-12-2014

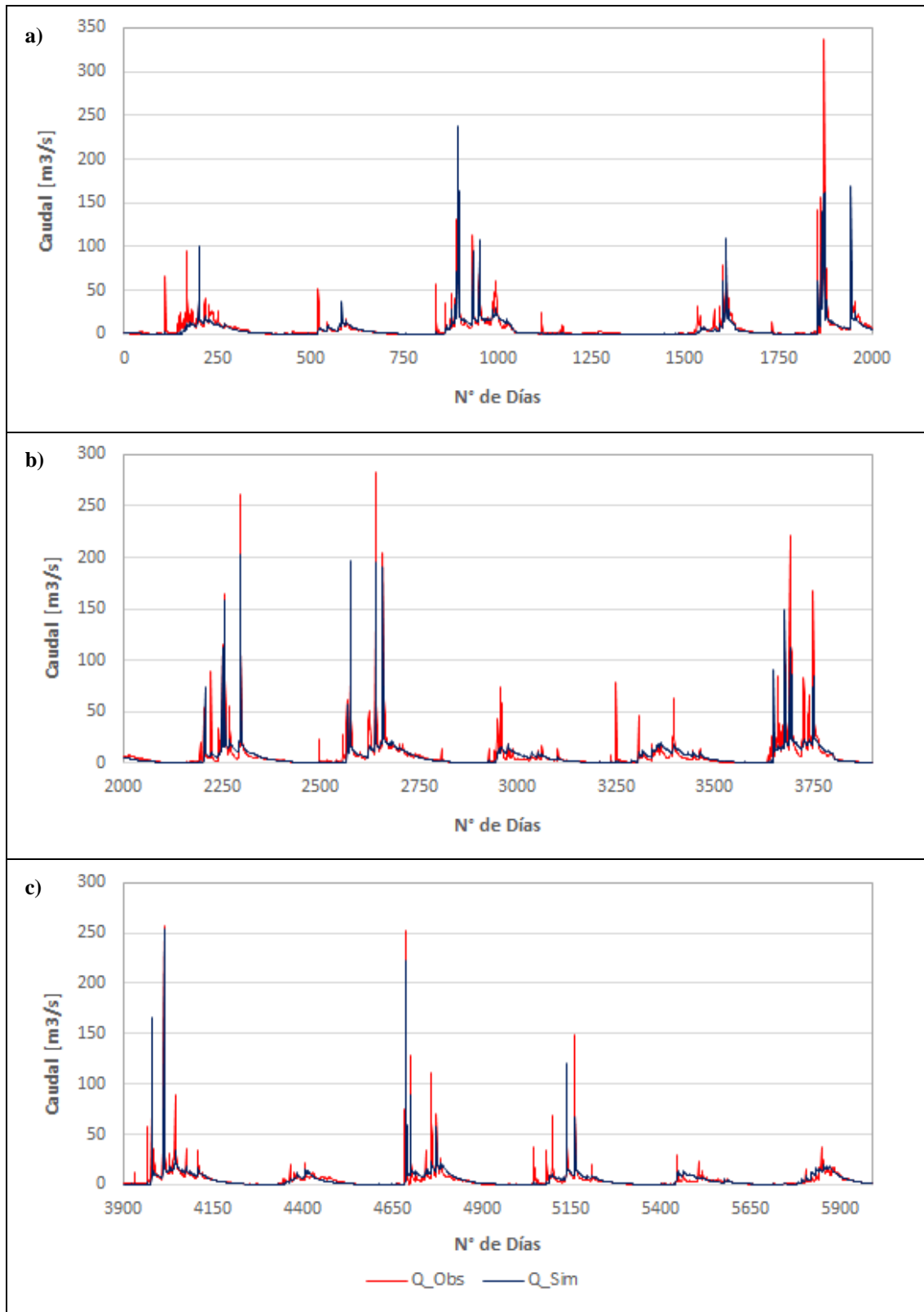


Figura 4: Caudales medios diarios observados y simulados cuenca Estero Upeo en Upeo – periodo de validación.

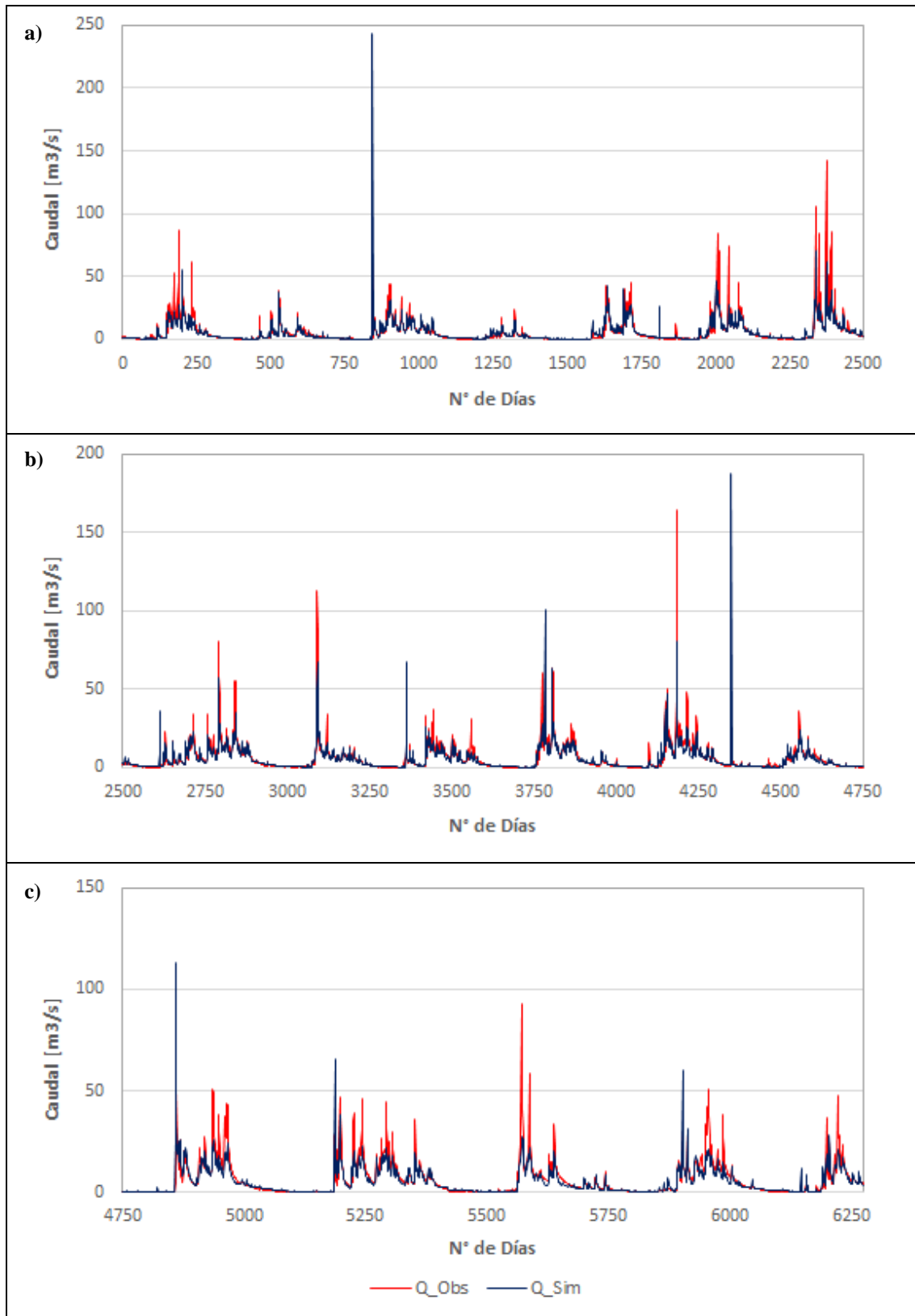


Figura 5: Caudales medios diarios observados y simulados cuenca Río Lirquén en cerro El Padre – periodo de validación.

Tabla 8: Indicadores bondad de ajuste validación modelo QMD Modificado con información actual.

Cuenca	Validación						
	FOB	RMS	RMS_Norm	NS	NS-Log	PBIAS	R ²
Estero Upeo en Upeo	0.56	9.20	0.04	0.68	0.02	13.73	0.67
Río Lirquén en cerro El Padre	0.67	2.49	0.01	0.71	0.86	12.23	0.63

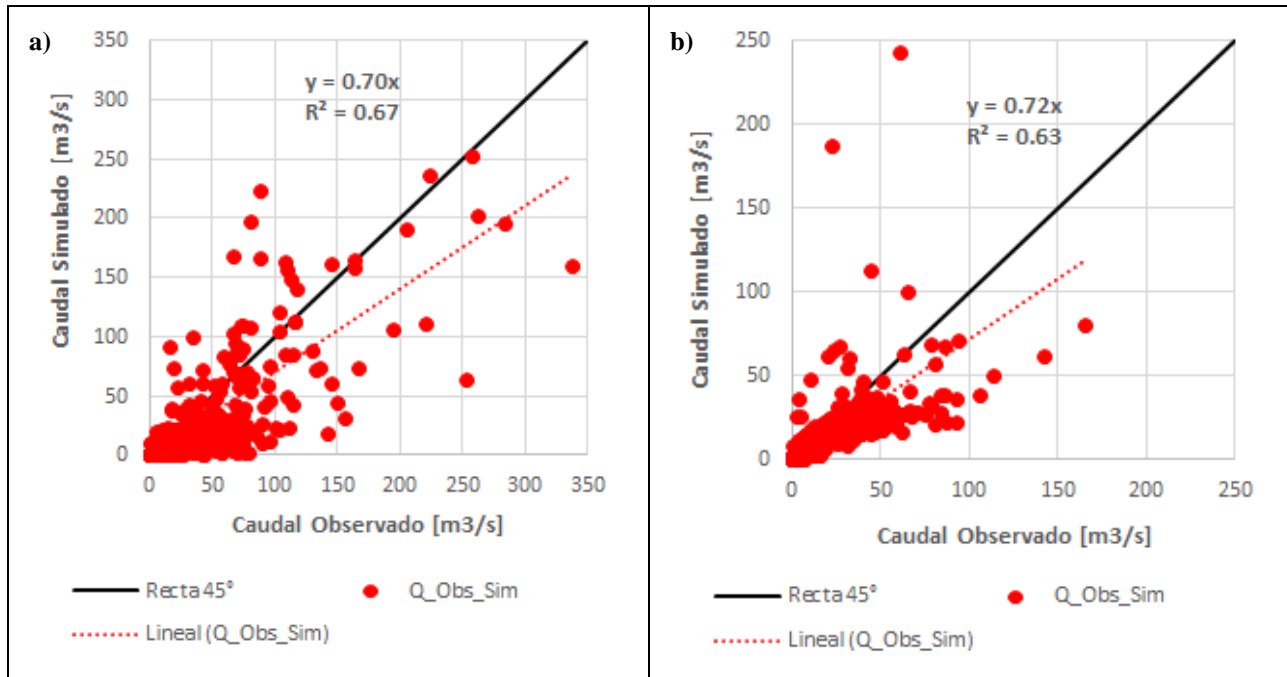


Figura 6: Correlación caudales medios diarios observados y simulados – periodo de validación. a) Estero Upeo en Upeo. b) Río Lirquén en cerro El Padre.

Los resultados obtenidos con información actual (ver Tabla 8) indican que en términos generales el modelo logra representar el comportamiento histórico de las cuencas analizadas, donde la tendencia a la subestimación sigue presente, aunque con una leve disminución en ambos casos. Los principales descensos, en términos de desempeño, se evidencian en el coeficiente de correlación, donde en el caso puntual del Estero Upeo en Upeo, se observa una considerable disminución en la estimación de los caudales bajos.

Teniendo en cuenta la longitud del periodo de simulación, que en ambos casos supera los 10 años de registros, se considera que el PBIAS obtenido indica una muy buena estimación de los volúmenes de escorrentía directa presente en ambas cuencas, así como también los valores de RMS y RMS_Normalizado, que en el caso de este último no superan el 5% en las cuencas analizadas.

En términos de las series de tiempo, en el caso de Estero Upeo en Upeo se observa que los datos simulados presentan deficiencias importantes en los caudales peaks. Es una cuenca con una tendencia de precipitaciones diarias sucesivas, por lo tanto tiene una respuesta rápida ante eventos de alta precipitación, generando los respectivos peaks de escorrentía superficial, pero el modelo no logra replicar todos los peaks que se presentan en un año hidrológico. Por otra parte en el caso de los caudales bajos, también se observa deficiencias en los caudales simulados, ya que estos son bastante menores que los caudales bajos observados en periodos de estiaje, por lo que se considera que el modelo no logra replicar adecuadamente los caudales base de la cuenca. Lo antes mencionado se puede ver al comparar los datos observados y simulados, tal como se muestra en la Figura 6a. Sin prejuicio de lo anterior, a lo largo de la serie de tiempo (ver Figura 4), que el modelo en la mayoría de los casos logra replicar la tendencia histórica de la serie temporal analizada. Las deficiencias que presenta el modelo en este cuenca pueden estar relacionadas con que una modelación agregada en una cuenca con diferencias de altura importantes (2450 metros), y con un cauce principal de considerable longitud (43.25 Kilómetros), puede dificultar el replicar tanto los procesos superficiales como subterráneos, pues los parámetros relacionados con este tipo de escorrentías podrían tener mayor variabilidad al interior de la cuenca.

En cuanto a la cuenca del Río Lirquén en cerro El Padre, es posible observar que los datos simulados tienen una mejor relación respecto a la información de caudales observados, donde las principales diferencias se concentran en los caudales peaks, ya que el modelo no logra replicar de manera adecuada estos valores a lo largo del periodo simulado, a diferencia de lo que sucede con los caudales medios y bajos, donde el modelo logra un buen ajuste respecto a la información observada (ver Figura 6). Existen dentro de la modelación dos puntos que tienen una alta diferencia con los valores observados (ver Figura 5a y 5b), los cuales se analizaron de manera puntual en términos de precipitación y escorrentía; el análisis arrojó que los peaks de caudal están asociados a los dos valores más altos de precipitación dentro del periodo analizado, pero en casos de precipitaciones similares (alrededor de un 30% menores), no se registran peaks tan altos de caudal, por lo que estos puntos podrían estar relacionados con errores en los registros de precipitación. Finalmente, al analizar la serie de tiempo en su totalidad, es posible observar que existe una buena relación entre los caudales observados y simulados, logrando replicar adecuadamente la tendencia de los datos históricos, tal como se muestra en la Figura 5 y como lo avalan los indicadores de bondad de ajuste, los que en esta cuenca en particular se encuentran en el rango bueno y muy bueno.

6 Discusión y conclusiones

El modelo QMD modificado (Morales, 2009), se presenta como una alternativa para modelación precipitación-escorrentía a escala diaria, con la ventaja principal de que requiere poca información de entrada (precipitación, evaporación y área de la cuenca). Lo antes mencionado lo hace una alternativa interesante que puede ser puesta en marcha en poco tiempo.

Los resultados obtenidos en el presente artículo reflejan que es un modelo con una muy buena representación de los flujos bajos, en cuencas con una forma regular, aunque tiende a la subestimación de los caudales en términos generales, presentando algunas deficiencias en la

representación de los caudales medios y crecidas extremas. En el caso de cuencas con geomorfología irregular, como es el Caso del Estero Upeo en Upeo, donde existe una mayor diferencia de altura y una forma más alargada, se observa que si bien en términos generales se puede obtener un buen ajuste, hay deficiencias no menores en la representación de los caudales bases y valores extremos. A pesar de lo antes mencionado, es un modelo que logra replicar la tendencia de los caudales a lo largo del ciclo hidrológico de manera adecuada y con diferencias menores en términos de volumen total de escorrentía, las cuales no superan el 15% en el periodo de validación, el que en ambas cuencas es superior a los 10 años. Cabe destacar además, que en el trabajo presentado por Morales (2009), se compara su desempeño con el modelo SIMED (Isensee, 2003), donde QMD Modificado arroja mejores resultados que éste último, logrando una representación más adecuada de las diferentes escorrentías, es decir, superficial, subsuperficial y subterránea, además de una serie de tiempo mucho más representativa del comportamiento histórico de las cuencas analizadas.

De acuerdo a lo antes mencionado, QMD Modificado puede ser considerado como una alternativa adecuada para realizar modelaciones a largo plazo con valores de parámetros óptimos calibrados en períodos cortos de tiempo (2 años), entregando buenos resultados junto con una representación adecuada de cuál sería el comportamiento de la serie de tiempo, principalmente en cuencas con una geomorfología regular, donde puede considerarse una herramienta útil para la estimación de caudales mínimos disponibles. Además, presenta la ventaja de una puesta en marcha en menor tiempo que otros programas utilizados en la actualidad, pero se debe tener en cuenta su tendencia a la subestimación y mayor dispersión en los caudales peaks.

7 Referencia

Dirección General de Aguas. 2010. Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía. Informe Técnico elaborado por el División de Estudios y Planificación. S.D.T. N° 302.

Duque, F. (2013). “Análisis de la vulnerabilidad y medidas de adaptación de un proyecto de regadío frente al cambio climático. Caso proyecto Lonquén”. Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente hídrico. Santiago. Universidad de Chile.

Ferrer, P., Brown, E., Ayala, L. (1973). “Simulación de gastos mensuales en una cuenca pluvial”. II Coloquio Nacional de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago. Agosto. Departamento de Obras Hidráulicas, Universidad Católica de Chile.

Garreaud, R., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M. (2017): “The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation”. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, doi:10.5194/hess-2017-191, 2017

Huggins, L., Monke, E. (1966). “The mathematical simulation of the hydrology of small watersheds”. Technical Report No. 1 P

Isensee, P. (2003). “Modelo de simulación de caudales medios diarios en cuencas pluviales” Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago.

Jamieson, D., Amerman, C. (1969). Quick-Return surface flow. *Journal of Hydrology* 8 (2), pag. 122-136.

Kuhlmann, J. (1995). “Modelo para la estimación de caudales medios diarios en cuencas pluviales”. Memoria para optar a título de Ingeniero Civil. Valparaíso. UTFSM.

Molnar, P. (2011). “Calibration, Watershed Modelling, SS 2011” Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich, Switzerland.

Morales, B. (2012). “Adaptación de sistemas de agua potable rural frente al cambio climático en el valle del río Cogotí”. Memoria para optar a título de Ingeniero Civil. Santiago. Universidad de Chile.

Morales, Y. (2009). “Análisis comparativo de modelos de estimación de caudales medios diarios en cuencas pluviales”. Memoria para optar a título de Ingeniero Civil. Valparaíso. UTFSM.

Morales, Y. y Vargas, X. (2014). “Estimación de la precipitación en una tormenta usando información satelital. Aplicación en la zona central de Chile”, XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile.

Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., Veith, T. (2007). “Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations” American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Rojas, M. 2012. Simulaciones de cambio climático regional para Chile obtenidos por el modelo PRECIS-ECHAM. Proyecto Anillos SOC-28: Impactos Sociales Ambientales del Cambio Climático Global en la Región del Bío-Bío. Disponible en línea: <http://mirasol.dgf.uchile.cl/PRECIS-ECHAM.html>

Salgado, B. (2011). “Disponibilidad y demanda futura del recurso hídrico. Análisis escenario A2 en una cuenca agrícola de la VI Región”. Memoria para optar a título de Ingeniero Civil. Santiago. Universidad de Chile.

Vargas, X., ERIDANUS (2016). “Determinación del Impacto del Cambio Climático en el Potencial Esperado de Generación Hidroeléctrica en la cuenca del río Maule. Anexo 4 – Guía Metodológica”. Preparado para Subsecretaría de Energía.