

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XIX CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

PREDICCIÓN DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN CUENCAS PLUVIALES SIN CONTROL FLUVIOMÉTRICO. USO DEL MODELO GR4J

CÉSAR SALVATIERRA S.¹
XIMENA VARGAS M.²

RESUMEN

Se presenta el modelo conceptual de 4 parámetros denominado GR4J, el que ha sido calibrado para 8 cuencas pluviales de la zona Centro-Sur de Chile utilizando como funciones objetivo el criterio de Nash-Sutcliffe y la función módulo. Los parámetros obtenidos se relacionaron con índices geomorfológicos lo que permitió definir los parámetros del modelo en cuencas sin control fluviométrico. Se validó el procedimiento aplicándolo a 2 cuencas, Cauquenes en el Arrayán y Lebu en Las Corrientes, y comparando los resultados obtenidos con los observados en éstas. Las series de caudales medios diarios simulados con los parámetros obtenidos con la función objetivo Nash-Sutcliffe presentan una incertidumbre menor que en el caso de la función Módulo, resultando siempre más cercanos a los valores observados. No obstante lo anterior, en ambos casos el caudal medio diario en el período de simulación no difiere del observado en más del 10%, resultando una mejor representatividad de los caudales medios por parte de la generación realizada a partir de la función objetivo Nash Sutcliffe, mientras que la mejor representatividad de los caudales menores en los períodos analizados, se obtiene utilizando la función Módulo.

¹ Ingeniero Civil, Universidad de Chile, mail: csalvati@ing.uchile.cl

² Ingeniero Civil, Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, mail: xvargas@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

La predicción de caudales en cuencas no controladas es un tema recurrente en los estudios hidrológicos. La tendencia actual enfocada a mejorar tanto la precisión de estas estimaciones como el conocimiento acerca de los procesos hidrológicos, se orienta principalmente a usar sofisticadas técnicas para representar la variabilidad espacial de los parámetros geomorfológicos y a la utilización de complejos modelos distribuidos para simular los procesos del ciclo hidrológico. Sin embargo, tanto los modelos simples como los más complejos presentan limitaciones al ser usados en cuencas sin control, principalmente por las incertidumbres asociadas a la transferencia de sus parámetros y por la gran heterogeneidad espacial y temporal de las variables meteorológicas y geomorfológicas.

Por otra parte, para estudios preliminares que deben efectuarse en períodos limitados de tiempo, la formulación de un modelo complejo puede conllevar numerosas dificultades ya que debe ser abordada por especialistas que conozcan a cabalidad dichos modelos y, en ocasiones, requiere contar con un grupo de trabajo multidisciplinario que pueda recopilar y analizar una cantidad de información considerable en períodos cortos de tiempo. Por ello, se considera que modelos conceptuales simples pueden ser usados para dichos fines.

De los modelos que se usan en Chile en cuencas pluviales para la determinación de caudales medios diarios, puede citarse el SIMED (Isensee, 2003) donde internamente se simulan los procesos a nivel horario. El modelo considera el método de Green Ampt para representar el proceso de infiltración y se utilizan distribuciones típicas de la precipitación diaria y evaporación mensual para determinar el valor de estos datos de entrada a nivel horario. Dicho modelo requiere conocer los valores de 10 parámetros para realizar la estimación de los caudales medios diarios en las cuencas de interés. Esos parámetros se obtienen a base de la calibración del modelo usando datos observados de las variables de entrada ya mencionadas y de los caudales medios diarios. Aunque la mayoría de los parámetros tienen una interpretación física no se han propuesto mecanismos explícitos de estimación para aplicar el modelo en cuencas sin control fluviométrico, requiriendo establecer la calibración en una cuenca hidrológicamente similar para luego transferir los valores a la cuenca en estudio.

El modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalière) desarrollado por Edijatno et al (1999) y mejorado por Perrin et al (2003) es un modelo parsimonioso que, con sólo 4 parámetros, intenta reproducir los caudales medios diarios en una cuenca de régimen pluvial basándose en una representación simple del sistema, que conceptualiza sólo los principales procesos de ciclo de escorrentía: infiltración, evaporación y flujo subterráneo y superficial. Los análisis de su aplicación en cuencas en Colombia (Carvajal y Roldán, 2007) y Marruecos (Simonneaux et al, 2006) destacan que su simplicidad no impide el correcto ajuste a los valores observados. López (2007) muestra que este modelo permite representar los caudales medios diarios de cuencas chilenas de manera equivalente a modelos más complejos, lo que motivó su calibración en 8 cuencas pluviales del centro sur de Chile y su validación en otras 2 cuencas usando los parámetros obtenidos a base de índices geomorfológicos (Salvatierra, 2008).

2. EL MODELO GR4J

Tal como se muestra en la Figura 2.1, el modelo GR4J es un modelo lluvia-escorrentía agregado, de 4 parámetros y resolución diaria (Perrin et al, 2003). En el modelo, la precipitación, P , y la evapotranspiración potencial, E , deben ser valores representativos de la cuenca aportante por lo que se calculan a base de los datos observados en estaciones cercanas, empleando algún método de interpolación espacial. Los parámetros del modelo se señalan en la Tabla 2.1.

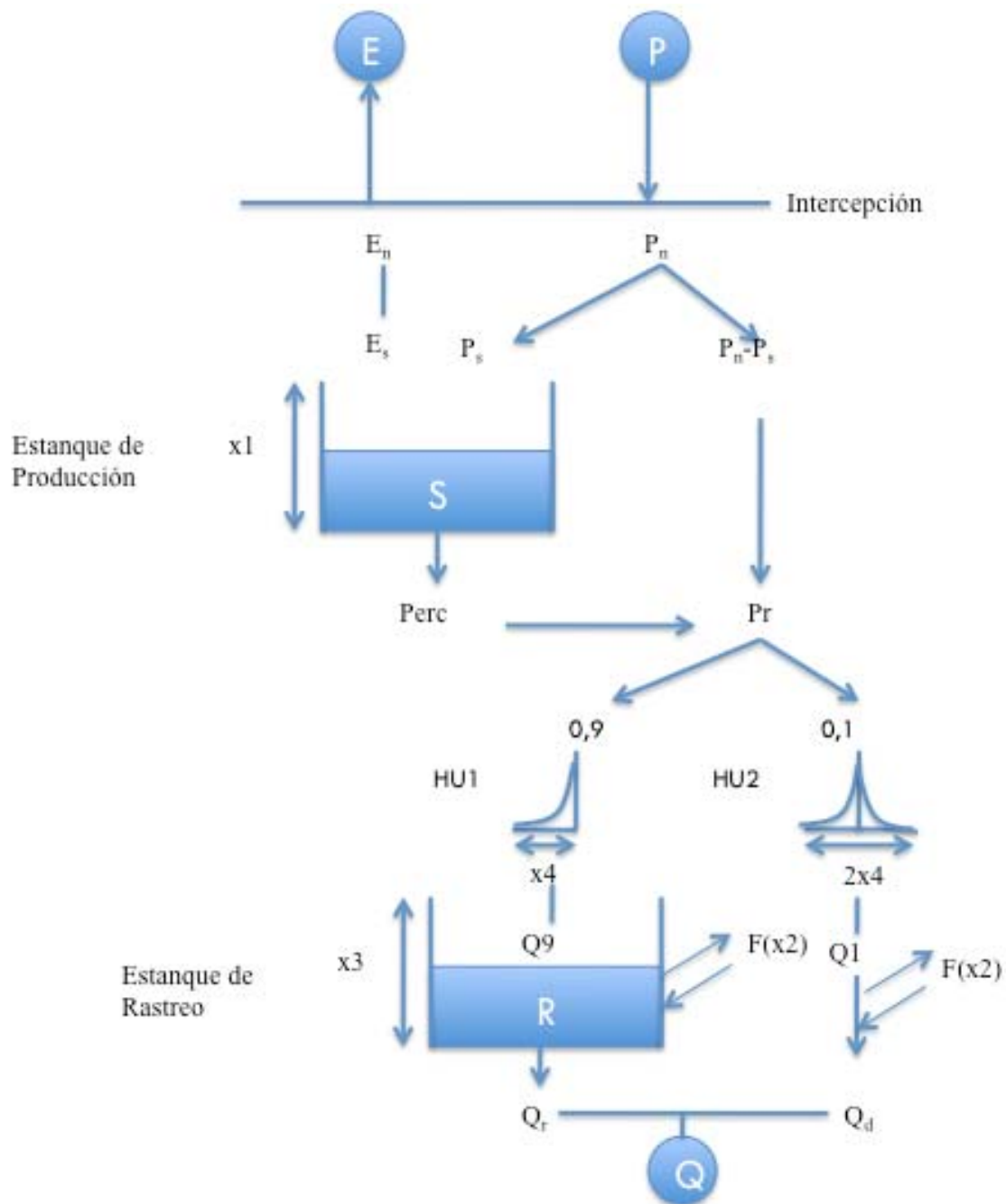


Figura 2.1: Esquema del Modelo GR4J

Tabla 2.1. Parámetros del modelo GR4J

Parámetro	Unidad	Significado
x1	(mm)	Capacidad máxima del embalse de producción
x2	(mm)	Coefficiente de intercambio de aguas subterráneas
x3	(mm)	Capacidad diaria del embalse de tránsito en canales
x4	(días)	Tiempo base del hidrograma unitario HU1

Para determinar la precipitación neta P_n o una capacidad de evapotranspiración E_n , tal como se aprecia en la Figura 2.1, en el modelo GR4J se plantea que la capacidad de intercepción es nula, de manera que:

$$\text{Si } P \geq E \rightarrow P_n = P - E \text{ y } E_n = 0 \quad (1)$$

$$\text{Si } P < E \rightarrow E_n = E - P \text{ y } P_n = 0 \quad (2)$$

Al primer estanque, de capacidad $X1$, denominado de producción, ingresa una parte P_s de la precipitación neta P_n , que modifica el nivel inicial S en el estanque. La cantidad de agua que entra se supone que es función de dicho nivel S y de la capacidad del estanque:

$$P_s = \frac{x1[1 - (\frac{S}{x1})^2] \tanh(\frac{P_n}{x1})}{1 + \frac{S}{x1} \tanh(\frac{P_n}{x1})} \quad (3)$$

Si P_n es nula entonces es posible estimar una tasa diaria de evaporación desde el estanque de producción:

$$E_s = \frac{S(2 - \frac{S}{x1}) \tanh(\frac{E_n}{x1})}{1 + [1 - \frac{S}{x1}] \tanh(\frac{E_n}{x1})} \quad (4)$$

El balance en este primer estanque señala que:

$$S = S - E_s + P_s \quad (5)$$

Luego, se considera que parte del agua contenida en este estanque puede percolar hacia los estratos más profundos. La fracción que percola, $Perc$, se calcula como:

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9x1} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\} \quad (6)$$

Una vez que esta fracción es calculada, se actualiza el nivel de agua en el estanque de producción:

$$S = S - Perc \quad (7)$$

La cantidad de agua P_r que llega al estanque de rastro es:

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) \quad (8)$$

Esta cantidad se divide en dos componentes de escorrentía, el 90% es transitado por un hidrograma unitario HU1 y por un embalse mientras el 10% restante es afectado sólo por un hidrograma unitario HU2. Ambos hidrogramas unitarios dependen del mismo parámetro x_4 , siendo éste el tiempo base en días de HU1. Las ordenadas de los hidrogramas se calculan a partir de curvas en S, HS1 y HS2.

$$HS1(t) = \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \quad \text{para } 0 \leq t \leq x_4 \quad (9)$$

$$HS1(t) = 1 \quad \text{para } t > x_4 \quad (10)$$

$$HS2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \quad \text{para } 0 \leq t \leq x_4 \quad (11)$$

$$HS2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \quad \text{para } x_4 < t \leq 2x_4 \quad (12)$$

$$HS2(t) = 1 \quad \text{para } t > 2x_4 \quad (13)$$

Los hidrogramas HU1 y HU2 se obtienen como la diferencia de los hidrogramas en S usando un paso de tiempo diario. Los caudales Q_9 y Q_1 (ver Figura 2.1) se obtienen usando los hidrogramas unitarios HU1 y HU2, respectivamente. Se considera finalmente, una función de intercambio (pérdida o incorporación) subterráneo, que se expresa en función del nivel del estanque de rastro y de los parámetros x_2 y x_3 , según la siguiente expresión:

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3}\right)^{7/2} \quad (14)$$

El nivel en el estanque de rastro se actualiza como:

$$R = \max(0; R + Q_9 + F) \quad (15)$$

de manera que la salida del estanque de rastro es:

$$Q_r = R \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3}\right)^4 \right]^{-1/4} \right\} \quad (16)$$

valor que es descontado al nivel en el estanque.

La salida Q1 es también afectada por la función de intercambio subterráneo, con lo cual se define el caudal Q_d como:

$$Q_d = \text{máx}(0; Q1 + F) \quad (17)$$

y el caudal total es la suma de Q_r y Q_d .

3. ZONA DE APLICACIÓN Y CUENCAS DE CALIBRACIÓN

Con el fin de lograr obtener las variaciones que experimentan los parámetros x_1 , x_2 , x_3 y x_4 según la geomorfología del sector, para calibrar el modelo de simulación hidrológica se consideran las 8 cuencas pluviales comprendidas entre las Regiones Séptima a la Novena, que se indican en la Tabla 3.1 y que se muestran en las Figuras 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1: Cuencas de Calibración

CÓDIGO BNA	CUENCA	CÓDIGO CUENCA	PERÍODO CALIBRACIÓN	PERÍODO VALIDACIÓN	AREA Km ²
07381001-9	LOS PUERCOS EN PUENTE LOS PUERCOS	LPP	1992-1999	1999-2002	555.2
07341001-0	PURAPEL EN NIRIVILO	PEN	1977-1983	1984-1986	274.4
07330001-0	PERQUILAUQUÉN EN SAN MANUEL	PES	1980-1987	1988-1990	502.7
08117004-5	CHILLÁN EN ESPERANZA	CEE	1980-1987	1988-1990	203.7
08820001-2	CARAMÁVIDA EN CARAMÁVIDA	CEC	1975-1980	1980-1982	93.7
08358001-1	RÍO VERGARA EN TIJERAL	VET	1988-1995	1995-1998	2253
09101001-1	PURÉN EN TRANAMÁN	PET	1988-1998	1998-2001	347.9
09107001-4	CHUFQUÉN EN CHUFQUÉN	CHU	1996-2003	2003-2006	818.9

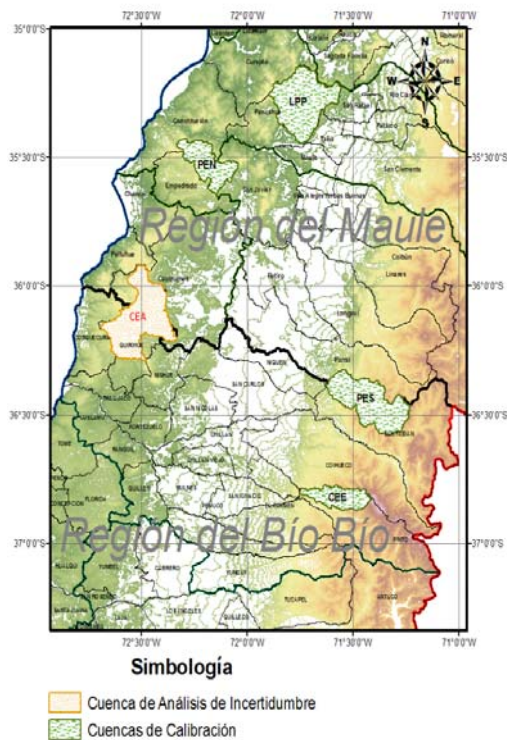


Figura 3.1: Cuencas Calibración Región VII y VIII

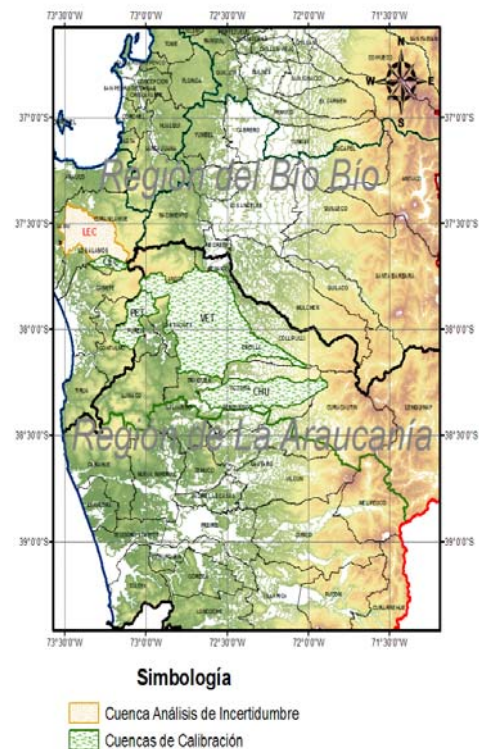


Figura 3.2: Cuencas de Calibración Región VIII y IX

Para la generación de una base de datos de entrada que almacene las magnitudes de los parámetros de operación calibrados del modelo GR4J, se calibra el modelo utilizando como método de optimización una rutina de Algoritmos Genéticos (Salvatierra, 2008). Se seleccionan como funciones objetivos las funciones Nash Sutcliffe, f_1 , y Módulo, f_2 . En adición a la obtención de los parámetros operacionales del modelo con la metodología de algoritmos utilizada, las funciones f_1 y f_2 entregan calibrados los niveles iniciales de los estanques (S, R).

$$f_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=N} [Q(sim)_i - Q(obs)_i]^2}{\sum_{i=1}^{i=N} [Q(obs)_i - \bar{Q}(obs)]^2} \quad (14)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^{i=N} |Q(sim)_i - Q(obs)_i| \quad (15)$$

Como resultado del proceso de calibración y validación, en los períodos previamente presentados en la Tabla 3.1, se presentan las Figuras 3.3 y 3.4 con los resultados de las variaciones de los coeficientes de la Función Nash Sutcliffe a lo largo del espacio geográfico analizado.

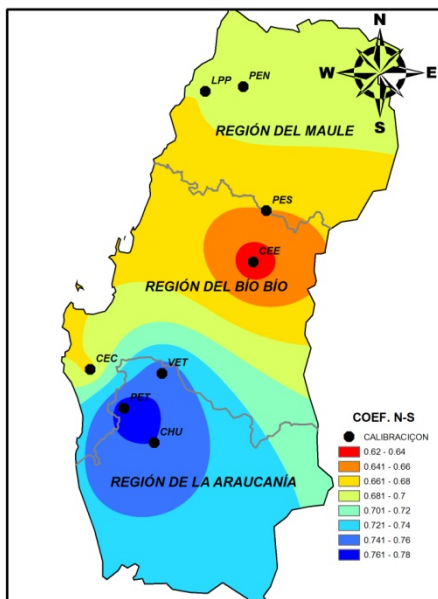


Figura 3.3. Calibración Función N-S

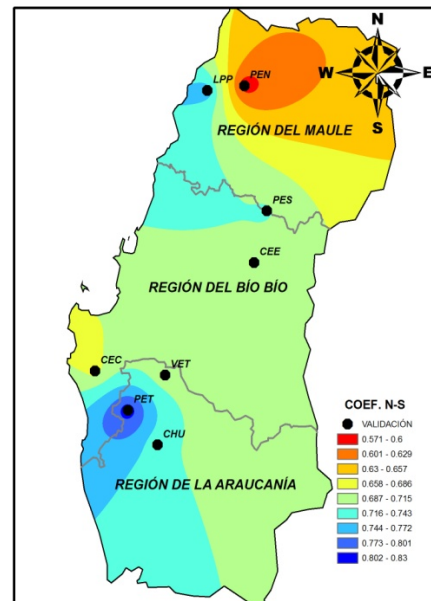


Figura 3.4. Validación Función N-S

Con respecto al proceso de calibración, de la Figura 3.3 se desprende una mejor adaptación de las cuencas localizadas en la Región de La Araucanía, mientras que las cuencas PES y CEE arrojan los valores del coeficiente de f_1 más bajos, producto de la pequeña influencia nival en dichas cuencas.

Para la validación, en la Figura 3.4 se observa una adaptación uniforme, con excepción de la cuenca PEN, donde la función f_1 alcanza un valor cercano a 0.6.

4.- RELACIONES GEOMORFOLÓGICAS

A partir de las características geomorfológicas de las cuencas de calibración anteriormente presentadas, se desarrollaron índices que permiten estimar los parámetros de funcionamiento del modelo GR4J, formados a partir de los parámetros base presentados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros geomorfológicos base

Parámetro	Unidad	Representa
A	[km ²]	Área de la cuenca
E	[m]	Elevación media de la cuenca
i	-	Pendiente media de la cuenca
Per	[m]	Perímetro de la cuenca
Lp	[m]	Largo del cauce principal
Lcg	[m]	Largo del cauce principal hasta el punto más cercano al centro de gravedad de la cuenca
Dcg	[m]	Menor distancia entre el cauce principal y el centro de gravedad de la cuenca
SL	[m]	Suma de los largos de los cauces presentes en la cuenca
AOFD	[m]	Promedio de las distancias de escurrimiento en la superficie de la cuenca, al curso de agua más cercano.
Shape	-	Largo de la cuenca dividido por su ancho
Sin	-	Sinuosidad del cauce principal en la cuenca
Aac	[km ²]	Porción de acuífero en superficie localizado dentro de la cuenca
e_ac	[m]	Espesor del acuífero localizado dentro de la cuenca

Los índices propuestos, corresponden a los obtenidos del proceso de análisis de las posibles combinaciones de parámetros base, utilizando la información extraída del proceso de calibración, en cada una de las cuencas seleccionadas. Lo anterior queda referenciado a la función objetivo que se utilice para el procedimiento de calibración.

La generación de los índices, se realiza a partir de parámetros geomorfológicos linealmente independientes entre sí, que permitan obtener, a partir de la utilización de correlaciones lineales, una tendencia que relacione efectivamente dichos índices con los parámetros calibrados del modelo GR4J.

La forma del índice geomorfológico se encuentra dada por:

$$I(X_z)_j = \prod P_k^i \quad (16)$$

En donde z representa el índice del parámetro del modelo GR4J analizado, j corresponde a la función objetivo utilizada, P_k al parámetro base analizado, e i al exponente de ponderación que se obtiene del proceso de tanteo en la conformación del índice geomorfológico, variable que puede tomar el valor i = 0 en el caso de que el parámetro base no forme parte del índice, y mayor o menor que cero, dependiendo de si el parámetro base disminuye la dispersión asociada a la regresión lineal formada por el índice geomorfológico, amplificando el numerador o el denominador de I(X_z)_j.

Los índices configurados, son considerados como indicadores ponderados de las características geomorfológicas de las cuencas, careciendo de un sentido físico por si solos.

En las Figuras 4.1 y 4.2 se presentan las correlaciones asociadas a cada una de las regresiones obtenidas para las funciones Nash Sutcliffe y Módulo, en conjunto con las bandas de incertidumbre generadas por la estimación de los índices geomorfológicos (bandas rojas).

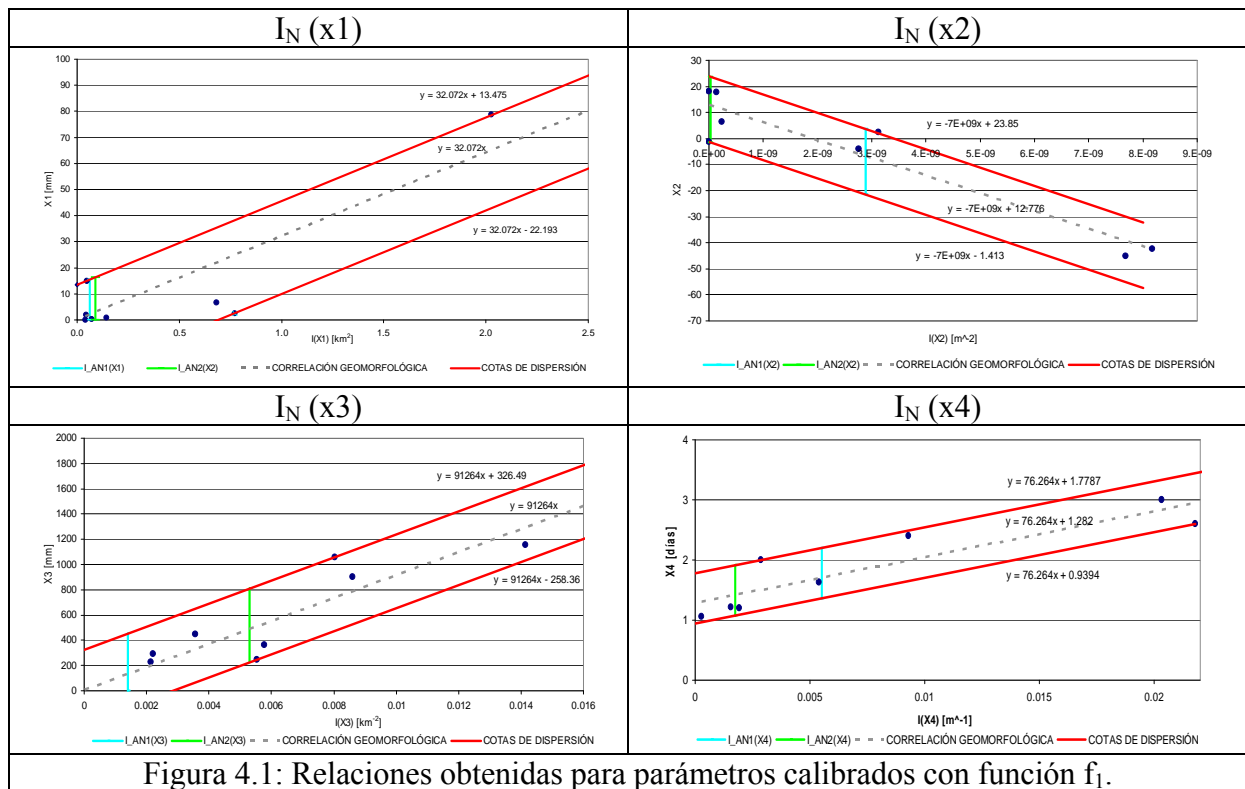


Figura 4.1: Relaciones obtenidas para parámetros calibrados con función f_1 .

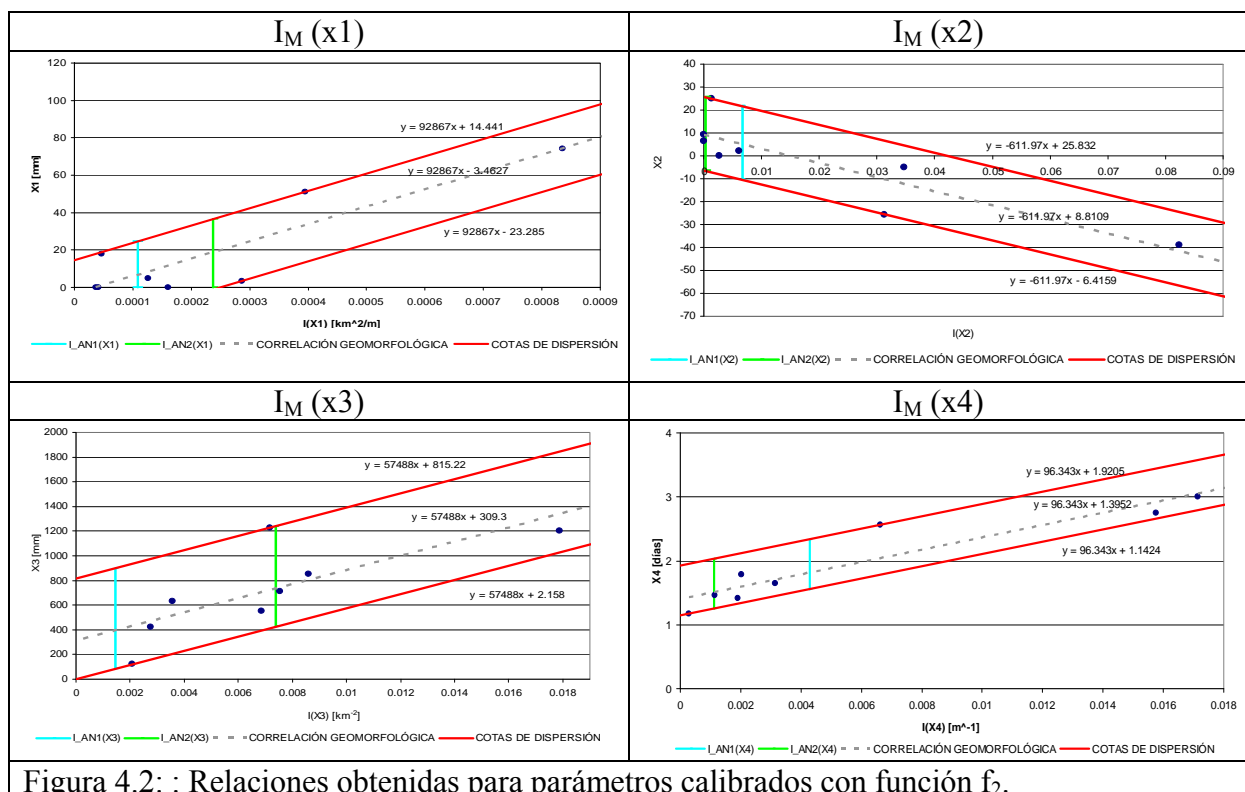


Figura 4.2: : Relaciones obtenidas para parámetros calibrados con función f_2 .

Los índices geomorfológicos definidos para obtener las relaciones para los parámetros y las correspondientes expresiones de éstas se detallan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Índices geomorfológicos y relaciones para definir los parámetros

Parámetros calibrados con función f_1	
$(x1)_N = 32,072 \cdot I_N(x1)$ $0,04 \text{ Km}^2 < I_N(x1) < 2,03 \text{ Km}^2$	$I_N(x1) = A \cdot E \cdot i \cdot Lcg \cdot Shape / (SL \cdot Lp \cdot Sin)$
$(x2)_N = -7 \cdot 10^9 \cdot I_N(x2) + 12,776$ $0 < I_N(x2) < 8 \cdot 10^{-9} \text{ (m}^2\text{)}$	$I_N(x2) = \frac{\sum_{j=1}^n \{Aac_j \cdot SL \cdot e_{ac_j} \cdot i \cdot AOFD \cdot Sin \cdot shape\}}{(A \cdot Per \cdot Lp \cdot Dcg \cdot E^2)}$
$(x3)_N = 91.264 \cdot I_N(x3)$ $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ Km}^{-2} < I_N(x3) < 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ Km}^{-2}$	$I_N(x3) = \frac{SL \cdot Sin \cdot E \cdot Lp}{(A \cdot AOFD \cdot Per \cdot Lcg)}$
$(x4)_N = 76,26 \cdot I_N(x4) + 0,939$ $2,89 \cdot 10^{-4} < I_N(x4) < 2,18 \cdot 10^{-2}$	$I_N(x4) = \frac{Lp}{(Lcg \cdot i \cdot Shape \cdot Dcg)}$
Parámetros calibrados con función f_2	
$(x1)_M = 92.867 \cdot I_M(x1) - 3,46$ $3,69 \cdot 10^{-5} \text{ Km}^2 / m < I_M(x1) < 8,36 \cdot 10^{-4} \text{ Km}^2 / m$	$I_M(x1) = \frac{A \cdot Shape \cdot Dcg \cdot Sin}{(SL \cdot Lp)}$
$(x2)_M = -611,97 \cdot I_M(x2) + 8,81$ $0 < I_M(x2) < 8,23 \cdot 10^{-2}$	$I_M(x2) = \sum_{j=1}^n \{Aac_j \cdot e_{ac_j} \cdot Sin / (A \cdot Dcg)\}$
$(x3)_M = 57.488 \cdot I_M(x3) + 309,3$ $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ Km}^{-2} < I_M(x3) < 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ Km}^{-2}$	$I_M(x3) = \frac{SL \cdot Sin \cdot E \cdot Lp}{(A \cdot AOFD \cdot Per \cdot Lcg)}$
$(x4)_M = 96,343 \cdot I_M(x4) + 1,4$ $2,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1} < I_M(x4) < 1,7 \cdot 10^{-2 \text{ m}^{-1}}$	$I_M(x4) = \frac{Lp}{(Lcg \cdot i \cdot Shape \cdot Sin \cdot Dcg)}$

5. USO DE RELACIONES GEOMORFOLÓGICAS

5.1. Río Cauquenes en el Arrayán

La cuenca “Río Cauquenes en el Arrayán”, CEA, pertenece a la cuenca del río Maule, y a la subcuenca del río Perquilauquén Alto. Se ubica entre las coordenadas 35°55’ y 36°17’ de Latitud, 72°41’ y 72°20’ de Longitud. La localización de su punto de salida es aproximadamente a 8 km al Sur Oeste de la ciudad de Cauquenes, VII región del Maule, Chile, con coordenadas UTM 6010971 N, 735824 E H18 (según Datum PSAD56), y comprende un área de drenaje de 619,9 km².

Las características del uso de suelo y red hidrográfica de la cuenca de análisis, son presentadas en las Figuras 5.1 y 5.2.

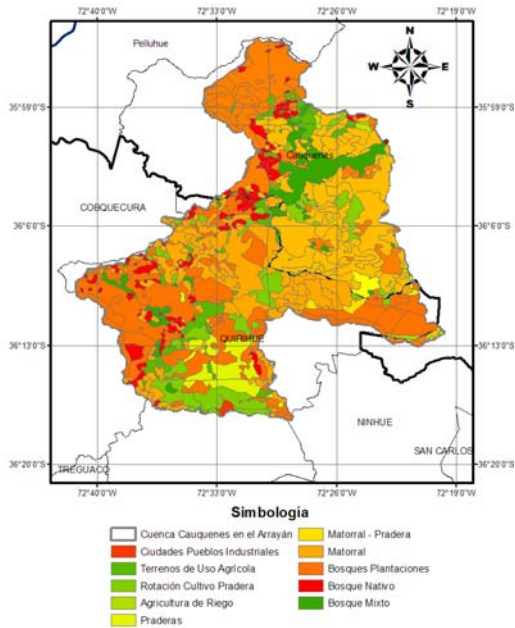


Figura 5.1. Uso de Suelo CEA

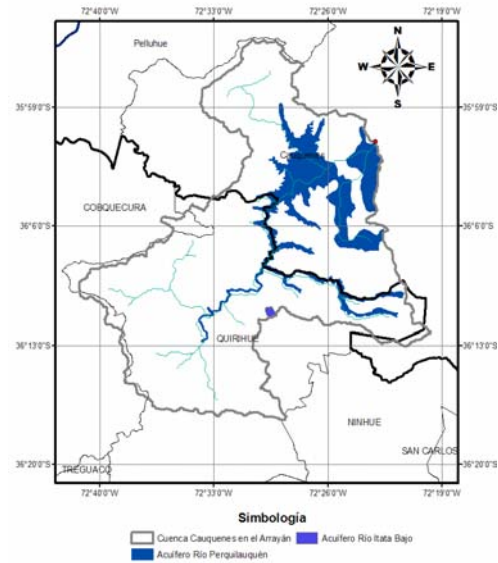


Figura 5.2. Red Hidrográfica CEA

A partir de la utilización de los índices y las correlaciones geomorfológicas, se muestra en las Figuras 5.3 y 5.4 los resultados de la aplicación del modelo GR4J en la cuenca CEA utilizando las estimaciones según $I_{N-S}(X_j)$ e $I_M(X_j)$ que se traduce en las simulaciones de caudales $Q_{geo}(N-S)$ y $Q_{geo}(M)$ respectivamente. Se aprecia un ajuste razonable en ambos casos aunque los valores obtenidos con el ajuste de la función módulo aparentan ser ligeramente mejores.

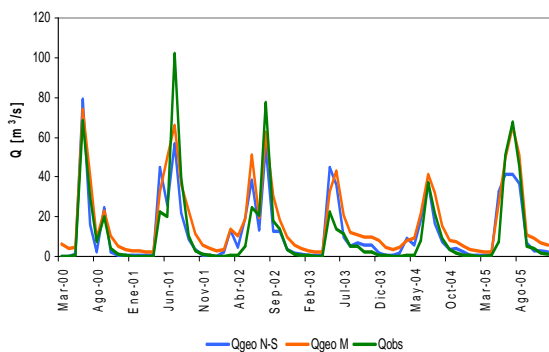


Figura 5.3: Series Caudales Generados y Observados. Cuenca CEA.

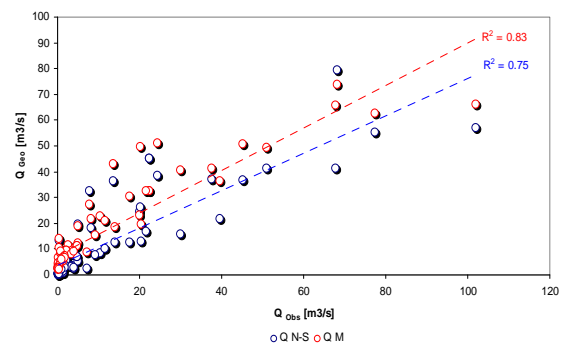


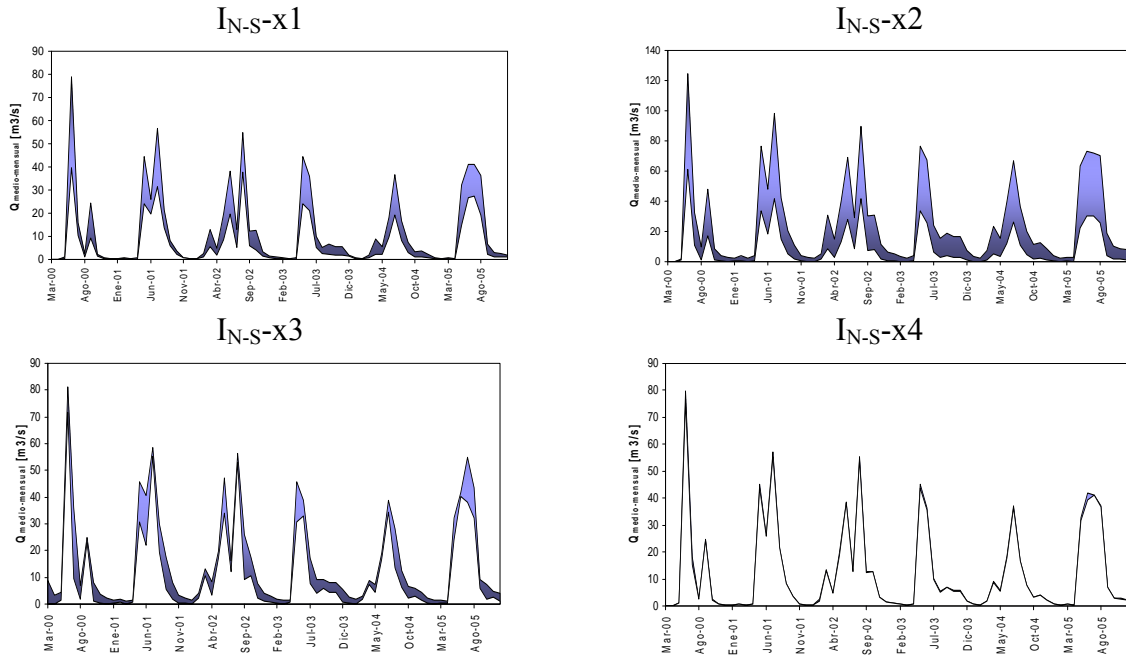
Figura 5.4. Correlaciones entre Caudales Generados y Observados. Cuenca CEA.

Explorando las bandas de incertidumbre a partir de una distribución normal, fijando sus parámetros operacionales μ (media) y σ (desviación estándar) a partir de un 95% de probabilidad de ocurrencia dentro de la banda de incertidumbre de cada uno de los parámetros, se calculan las probabilidades de ocurrencia de 5, 25, 45, 55, 75 y 95% obteniéndose el parámetro X_i de búsqueda según la expresión (17). Fijando el resto de parámetros del modelo se obtienen las bandas de incertidumbres de caudales de cada uno de los parámetros del modelo GR4J, presentados en la Figura 5.5.

$$P(Z_1 < Z < Z^*) = I\% \rightarrow Z^* = \frac{X^* - \mu}{\sigma} \rightarrow X^* \quad (17)$$

Se destaca, en ambos casos la amplitud de la banda de incertidumbre para el parámetro estimado x_2 , relacionado con el intercambio subterráneo de escorrentía, mientras que para el parámetro x_4 la variabilidad presentada en los resultados es despreciable. Resumiendo las bandas de incertidumbres, se presentan las Figuras 5.6 y 5.7 para las simulaciones con los índices I_{N-S} e I_M .

Parámetros calibrados con función f_1



Parámetros calculados con función f_2

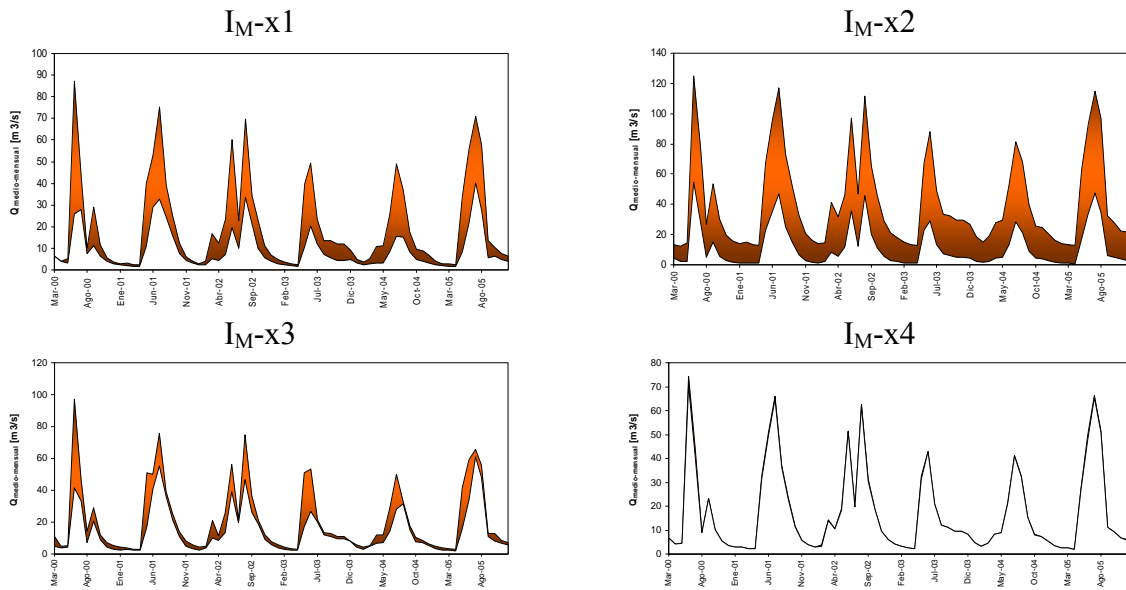


Figura 5.5: Incertidumbre de la estimación en la cuenca Cauquenes en el Arrayán

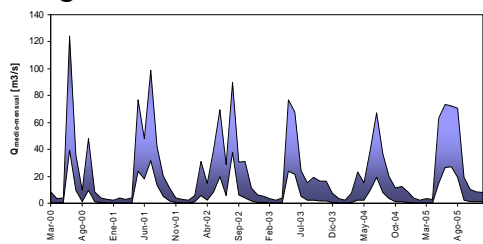


Figura 5.6: Banda de Incertidumbre con índices I_{N-S} Cuenca CEA

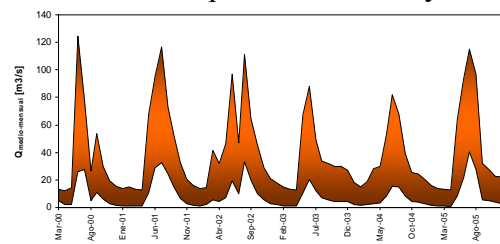


Figura 5.7: Banda de incertidumbre con índices I_M Cuenca CEA

5.2. Río Lebu en Las Corrientes

La cuenca “Río Lebu en Las Corrientes”, LEC pertenece a la cuenca del río Lebu, y a la subcuenca del río Lebu entre junta ríos Curanilahue, Pilpilco y Desembocadura. Se ubica entre las coordenadas 37°24' y 37°41' de Latitud, 73°32' y 73°7' de Longitud. La localización de su punto de salida es aproximadamente a 58 km al Oeste de la ciudad de Angol, VIII región del Bío Bío, Chile, con coordenadas UTM 5827969 N, 645497 E H18 (según Datum PSAD56), y comprende un área de drenaje de 646,8 km².

Las características del uso de suelo y red hidrográfica de la cuenca de análisis, son presentadas en las Figuras 5.8 y 5.9.

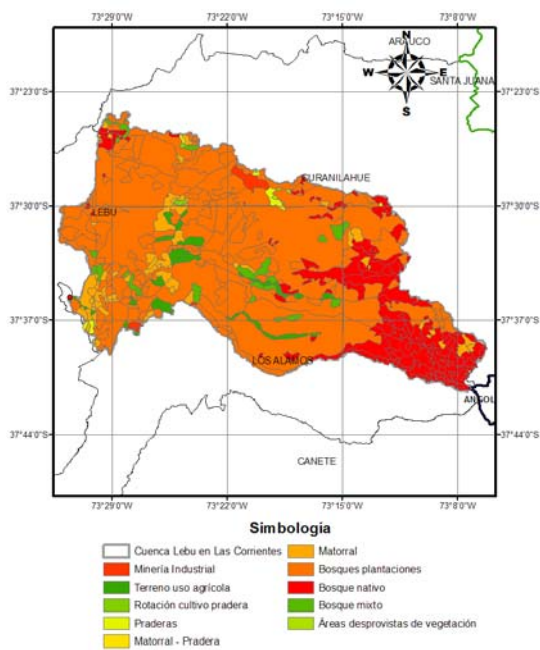


Figura 5.8: Uso de Suelo LEC

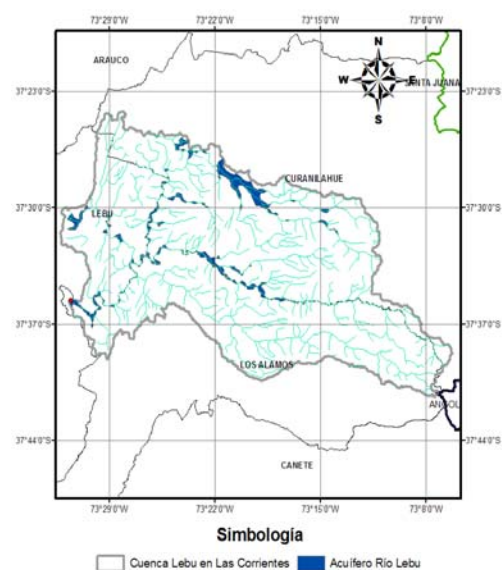


Figura 5.9: Red Hidrográfica LEC

A partir de la utilización de los índices y las correlaciones geomorfológicas, se muestra en las Figuras 5.10 y 5.11 los resultados de la aplicación del modelo GR4J en la cuenca LEC utilizando las estimaciones según $I_{N-S}(X_j)$ e $I_M(X_j)$

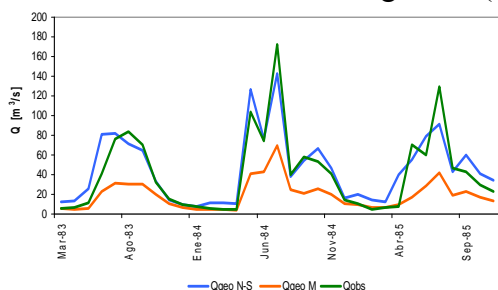


Figura 5.10: Series Caudales Simulados y Observados. Cuenca LEC

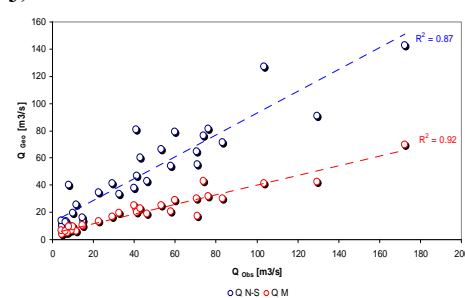


Figura 5.11: Correlaciones entre Caudales Simulados y Observados. Cuenca LEC

Se aprecia en este caso que los parámetros derivados con la función objetivo módulo generan valores de caudal significativamente inferiores a los observados. Al analizar la banda de incertidumbre asociada a la obtención de cada uno de los parámetros del modelo GR4J, generados a partir de los índices geomorfológicos, se obtienen variaciones similares a las presentadas para la cuenca del río Cauquenes en El Arrayán, es decir, se destaca la amplitud de la banda de incertidumbre para el parámetro estimado x_2 , mientras que para el parámetro x_4 , la variabilidad presentada en los resultados es despreciable. Resumiendo los resultados, en las Figuras 5.12 y 5.13 se presentan las bandas de incertidumbre para las simulaciones con los índices I_{N-S} e I_M .

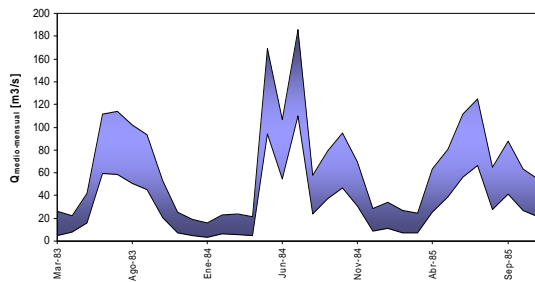


Figura 5.12: Banda de Incertidumbre con índices I_{N-S} . Cuenca LEC.

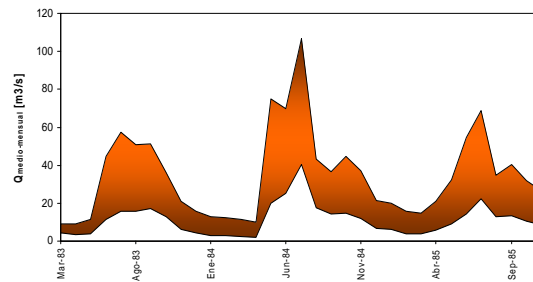


Figura 5.12: Banda de Incertidumbre con índices I_M . Cuenca LEC.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que el modelo GR4J permite simular, sin mucha complejidad, los caudales medios diarios en cuencas pluviales con una precisión razonable, lo que lo hace atractivo para estimaciones preliminares de los recursos hídricos disponibles.

Asimismo, se valida que los parámetros del modelo pueden obtenerse a base de parámetros geomorfológicos, recomendándose aquellos obtenidos con la función objetivo de Nash-Sutcliffe.

REFERENCIAS

- Carvajal L. y E. Roldán, 2007 “Calibración del modelo de Lluvia-Escorrentía agregado GR4J, aplicación: cuenca del río Aburrá” Dyna, julio, año/vol. 74, número 152 Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia
- Edijatno Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlof, Z. et Michel, C., 1999. GR3J : a daily watershed model with three free parameters. 1999 Hydrological Sciences Journal, 44(2), 263-278.
- López D., 2007. “Análisis y Aplicación del Modelo GR4J para Estimación de Caudales Medios Diarios en Cuencas Pluviales de Chile” Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile.
- Perrin , C., Michel C. y V. Andréassian, 2003 “Improvement of a parsimonious model of streamflow simulation” Journal of Hydrology 279, 275–289.
- Salvatierra C. 2008. “Determinación de la Incertidumbre en la Aplicación del Modelo de Simulación Hidrológica GR4J, en Cuencas Pluviales No Controladas en Chile” Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile
- Simonneaux V., Hanich L., Boulet G. y S. Thomas, 2006. “Modelling runoff in the Rheraya catchment (High Atlas, Morocco) using the simple daily model GR4J. Trends over the last decades” IWRA XIII th World Water Congress, Montpellier