

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil



**ANÁLISIS DE PREDICTIBILIDAD DE UN MODELO HIDROLOGICO ESTACIONARIO  
EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÁN**

**DIEGO ANDRÉS ORTIZ SANDOVAL**

**INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**Profesor Guía**

Dr. ENRIQUE MUÑOZ ORTIZ

**Profesor Informante**

Dr. PEDRO TUME

Concepción, Diciembre 2015

## Resumen

La cuenca del Río Chillán se extiende entre el complejo volcánico Nevados de Chillán y la estación fluviométrica Chillán en Esperanza, abarcando alrededor de 210 km<sup>2</sup> de superficie. Esta cuenca se ve afectada por la actividad volcánica, lo que ha influenciado directamente la geología de la cuenca. La región presenta un clima mediterráneo, lo cual implica períodos muy lluviosos en los meses de invierno y períodos de sequía frecuentes en los meses de verano.

El presente estudio tiene la finalidad de analizar la predictibilidad de un modelo hidrológico estacionario en base a datos de pronósticos de precipitación y temperatura sobre la cuenca del Río Chillán. Además se busca conocer a cuántos meses se pueden predecir caudales y el porcentaje de acierto de estas predicciones con un modelo estacionario. Para el análisis se utiliza el modelo hidrológico propuesto por Muñoz (2010) integrando la herramienta de evaluación de modelos *Monte Carlo Analysis toolbox* (MCAT).

El estudio en su primera etapa busca encontrar bandas de caudales simuladas que puedan representar los caudales registrados en la estación Río Chillán en Esperanza. En la segunda etapa se busca obtener porcentajes de aciertos de predicciones, para lo cual se utilizaron pronósticos del *International Research Institute for Climate and Society* (IRI) y bandas de incerteza de caudales simuladas con MCAT y calculadas con la metodología *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE).

Como resultado del estudio se concluye para el modelo hidrológico y su capacidad de predecir que los mejores porcentajes de aciertos de predicciones se obtienen desde los meses que predecirán períodos de estiaje, ya que es en estos períodos las simulaciones no son influenciadas por la variabilidad de las precipitaciones. Por lo tanto se considera el modelo útil para predecir caudales medios mensuales y la planificación de recursos hídricos en una cuenca andina para el período de estiaje.

## **Abstract**

The Chillán River basin extends from the Nevados de Chillán volcanic complex to the Chillán stream-flow station at the catchment outlet, covering about 210 km<sup>2</sup>. This basin is afflicted by volcanic activity which has directly influenced its geology. It has a Mediterranean climate, with a rainy season concentrated in winter and frequent periods of droughts in summer.

This study aims to analyze the predictability of a stationary hydrological model based on precipitation and temperature forecasts for the Río Chillán, furthermore how many months can flow rates be predicted and the success rate of it is also studied. The model proposed by Muñoz (2010) integrated with the Monte Carlo Analysis toolbox (MCAT) is used.

The first stage of the study seeks to find bands that may represent flows simulated and recorded in the Río Chillán station in Esperanza. The second stage is to obtain percentages of correct predictions, for which forecasts from the International Research Institute for Climate and Society (IRI) and bands of uncertainty flow simulated by MCAT and calculated using the methodology Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) are used.

The study concludes that the hydrological model and its ability to predict the percentage of correct predictions are best when obtained from the months that predict periods of drought, as it is in these periods simulations are not influenced by the variability of precipitation. Therefore it is considered a useful model to predict the average monthly flows and planning of water resources in an Andean watershed for the dry season.

## **Agradecimientos**

A mi abuela Emiliana por todo el apoyo estos años.

A Javiera Ortiz por estar en cada paso que doy y a Fabiola Vidal por su apoyo en todo momento.

A mis padres Silvia y Guillermo por su comprensión.

Al Profesor Enrique Muñoz por la ayuda brindada.

Al proyecto Fodecyt 11121287 *Hydrological process dynamics in Andean basins. Identifying the driving forces, and implications in model predictability and climate change impact studies* por hacer posible esta investigación.

## Índice de contenidos

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    Introducción .....	1
1.2    Objetivo General .....	1
1.3    Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO 2.  ÁREA DE ESTUDIO, DATOS Y HERRAMIENTAS  UTILIZADAS. ....	3
2.1    Área de estudio .....	3
2.2    Descripción del modelo hidrológico y herramientas de análisis.....	7
2.2.1    Módulo Pluvial.....	7
2.2.2    Módulo Nival .....	9
2.2.3    Módulo de extracciones .....	10
2.2.4 <i>Monte Carlo Analysis Toolbox</i> (MCAT) .....	10
1.    Dispersión de Parámetros para cada Función Objetivo (Dotty plots Objective Functions) .....	11
2.    Análisis de Identificabilidad General (GIA) .....	11
3.    Análisis de Sensibilidad Regional (RSA) .....	12
2.2.5    Funciones Objetivo .....	13
a)    Error Cuadrático Medio (RMSE):.....	13
b)    Error Cuadrático Medio Transformado (TRMSE):.....	13
c)    Error del Coeficiente de Escorrentía (ROCE):.....	14
2.2.6    Metodología de Cálculo de la Incertidumbre <i>Generalized Likelihood Uncertainty Estimation</i> (GLUE).....	15
2.3    Datos Utilizados en la Modelación .....	16
2.3.1    Registros de Precipitaciones .....	16
2.3.2    Registros de Caudales .....	16
2.3.3    Registros de Temperatura .....	17
2.3.4    Evapotranspiración.....	18
2.3.5    Morfología .....	18
2.3.6    Mapas de pronostico probabilísticos.....	18
CAPÍTULO 3.  METODOLOGÍA .....	20
3.1    Calibración y validación .....	20

3.2	Pronósticos de temperatura y precipitaciones .....	22
3.3	Aciertos de los pronósticos .....	23
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....		24
4.1	Calibración y validación .....	24
4.2	Cálculo de pronósticos .....	34
4.3	Aciertos de las predicciones.....	34
4.4	Variabilidad de los datos.....	40
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....		44
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS.....		46
ANEXO A: Datos de Precipitación .....		49
ANEXO B: Datos de Caudales .....		50
ANEXO C: Datos de Temperatura .....		52
ANEXO D: Datos de pronósticos .....		54
ANEXO E: Análisis de sensibilidad regional y Gráficas de Dotty plots de parámetros para cada Función Objetivo. ....		62
ANEXO F: Pendientes en las iteraciones en la calibración .....		71
ANEXO G: Porcentajes de aciertos de pronósticos. ....		74
ANEXO H: Anomalía en Niño Región 3.4.....		82

## Índice de Figuras

Figura 2–1 Ubicación cuenca Río Chillán en Esperanza (borde azul) y cuenca Río Chillán en Esperanza N°2 (verde). .....	4
Figura 2–2 Curvas de variación estacional cuenca Río Chillán en Esperanza para las probabilidades de excedencia del 5, 25, 50 y 95%. (Toledo, 2014) .....	5
Figura 2–3 Formaciones rocosas presentes en la cuenca con escala geológica 1:1.000.000. (Toledo, 2014) .....	7
Figura 2–4 Esquema conceptual módulo pluvial MHM (Muñoz, 2010). .....	8
Figura 2–5 Esquema conceptual módulo nival MHM (Muñoz, 2010). .....	10
Figura 2–6 Ejemplo gráfica RSA, donde la curva magenta y cian representan el 10 % de las mejores y peores simulaciones respectivamente. ....	12
Figura 2–7 Componentes del hidrograma representados por las cuatro funciones objetivo (Fuente: Van Werkhoven et al., 2008). .....	15
Figura 2–9 Modelo - múltiple de probabilidad de temperatura, Octubre, Noviembre y Diciembre del 2004, hecho en Septiembre 2004. ( <a href="http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/seasonal-climate-forecasts/">http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/seasonal-climate-forecasts/</a> ).....	19
Figura 4–1 Caudales simulados para calibración en la primera iteración, usando la FO RMSE. ....	24
Figura 4–2 Gráfico de caudales para la primera iteración usando la FO RMSE. ....	26
Figura 4–3 Gráfico de caudales para la primera iteración usando la FO TRMSE. ....	26
Figura 4–4 Gráfico de caudales para la primera iteración usando la FO ROCE. ....	26
Figura 4–5 Gráfico de caudales para la última iteración usando la FO RMSE. ....	28
Figura 4–6 Gráfico de caudales para la última iteración usando la FO TRMSE. ....	28
Figura 4–7 Gráfico de caudales para la última iteración usando la FO ROCE. ....	28
Figura 4–8 Gráfico de caudales para la validación usando la FO RMSE. ....	31
Figura 4–9 Gráfico de caudales para la validación usando la FO TRMSE. ....	31
Figura 4–10 Gráfico de caudales para la validación usando la FO ROCE. ....	31
Figura 4–11 Gráfico de las bandas de caudales simuladas con las Funciones Objetivo RMSE, TRMSE, ROCE y caudales registrados para la validación. ....	32
Figura 4–12 Porcentajes de acierto de caudales para cada mes obtenidos del promedio de los años 2004 al 2010, utilizando la F.O. RMSE (A), TRMSE (B) y ROCE (C) .....	36

Figura 4–13 Porcentajes de acierto de caudales desde uno hasta seis meses obtenidos del promedio de los años 2004 al 2010, para cada F.O.....	37
Figura 4–14 Porcentajes de acierto de pronósticos de precipitación estacional para los años 2004-2010. ....	38
Figura 4–15 Gráfico mensual de precipitaciones (mm) para el periodo de 1961-2010.....	40
Figura 4–16 Gráfico mensual de temperaturas (°C) para el periodo de 1961-2010. ....	41
Figura 4–17 Gráfico mensual de evapotranspiración (mm) para el periodo de 1961-2010.....	41
Figura 4–18 Gráfico mensual de caudales registrados (m <sup>3</sup> /s) por la estación Chillán en Esperanza para el periodo de 1961-1994. ....	42
Figura 4–19 Gráfico mensual de caudales registrados (m <sup>3</sup> /s) por la estación Chillán en Esperanza N°2 para el periodo de 2004-2010. ....	42
Figura 4–20 Gráfico mensual de caudales simulados (m <sup>3</sup> /s) para el periodo de 1961-2010. ....	42
Figura E–1 Análisis de sensibilidad regional para la primera iteración usando la FO RMSE.....	62
Figura E–2 Gráficas de Dotty plots para la primera iteración usando la FO RMSE. ....	62
Figura E–3 Análisis de sensibilidad regional para la segunda iteración usando la FO RMSE. ....	63
Figura E–4 Gráficas de Dotty plots para la segunda iteración usando la FO RMSE.....	63
Figura E–5 Análisis de sensibilidad regional para la última iteración usando la FO RMSE.....	64
Figura E–6 Gráficas de Dotty plots para la última iteración usando la FO RMSE.....	64
Figura E–7 Análisis de sensibilidad regional para la primera iteración usando la FO TRMSE. ....	65
Figura E–8 Gráficas de Dotty plots para la primera iteración usando la FO TRMSE. ....	65
Figura E–9 Análisis de sensibilidad regional para la segunda iteración usando la FO TRMSE. ....	66
Figura E–10 Gráficas de Dotty plots para la segunda iteración usando la FO TRMSE. ....	66
Figura E–11 Análisis de sensibilidad regional para la tercera iteración usando la FO TRMSE.....	67
Figura E–12 Gráficas de Dotty plots para la tercera iteración usando la FO TRMSE.....	67
Figura E–13 Análisis de sensibilidad regional para la última iteración usando la FO TRMSE. ....	68
Figura E–14 Gráficas de Dotty plots para la última iteración usando la FO TRMSE. ....	68
Figura E–15 Análisis de sensibilidad regional para la primera iteración usando la FO ROCE.....	69
Figura E–16 Gráficas de Dotty plots para la primera iteración usando la FO ROCE.....	69
Figura E–17 Análisis de sensibilidad regional para la última iteración usando la FO ROCE. ....	70
Figura E–18 Gráficas de Dotty plots para la última iteración usando la FO ROCE.....	70
Figura H–1 Temperatura Superficial del Mar Anomalía en Niño Región 3.4 - 1999 al Presente. (NOAA, <a href="https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst.php#oni">https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst.php#oni</a> ) .....	82

## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Parámetros del modelo pluvial. ....	9
Tabla 2.2: Ubicación y periodo de registro estación fluviométrica Río Chillán en esperanza N°2 (DGA). ....	17
Tabla 3.1: Valores iniciales correspondiente a cada uno de los parámetros considerados para la calibración. ....	20
Tabla 4.1: Resumen de los rangos de valores obtenidos mediante la calibración para los diferentes parámetros según la F.O utilizada. ....	30
Tabla 4.2: Porcentajes de aciertos para calibración y validación, con cada FO ....	33
Tabla 4.3: Valores de la media de precipitaciones (mm) ....	34
Tabla 4.4: Valores de la media de evapotranspiración (mm) ....	34
Tabla A.1: Precipitación Media Mensual Ponderada (mm) ....	49
Tabla B.1: Caudal Medio Mensual Estación Río Chillán en Esperanza Reconstruido (m <sup>3</sup> /s). ....	50
Tabla B.2: Caudal Medio Mensual Estación Río Chillán en Esperanza N°2 Reconstruido (m <sup>3</sup> /s) ...	51
Tabla C.1: Temperatura Media Mensual Ponderada (°C) ....	52
Tabla C.2: Evapotranspiración Potencial Media Mensual Ponderada (mm). ....	53
Tabla D.1: Pronostico de precipitación mensual de los mapas de pronósticos de uno hasta a seis meses (mm) ....	54
Tabla D.2: Pronostico de precipitación mensual de uno hasta a seis meses (mm). ....	56
Tabla D.3: Pronostico evapotranspiración mensual de los mapas de pronósticos de uno hasta a seis meses (mm) ....	58
Tabla D.4: Pronostico de evapotranspiración mensual de uno hasta seis meses (mm) ....	60
Tabla F.1: Pendientes de cada rango después de la primera iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO RMSE. ....	71
Tabla F.2: Pendientes de cada rango después de la segunda iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO RMSE. ....	71
Tabla F.3: Pendientes de cada rango después de la segunda iteración para los parámetros del modelo, usando la FO RMSE. ....	71
Tabla F.4: Pendientes de cada rango de la última iteración para los parámetros del modelo, usando la FO RMSE. ....	71

Tabla F.5: Pendientes de cada rango después de la primera iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO TRMSE. ....	72
Tabla F.6: Pendientes de cada rango después de la segunda iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO TRMSE. ....	72
Tabla F.7: Pendientes de cada rango después de la segunda iteración para los parámetros del modelo, usando la FO TRMSE. ....	72
Tabla F.8: Pendientes de cada rango después de la tercera iteración para los parámetros del modelo, usando la FO TRMSE. ....	72
Tabla F.9: Pendientes de cada rango de la última iteración para los parámetros del modelo, usando la FO TRMSE. ....	73
Tabla F.10: Pendientes de cada rango después de la primera iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO ROCE. ....	73
Tabla F.11: Pendientes de cada rango después de la última iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO ROCE. ....	73
Tabla F.12: Pendientes de cada rango de la última iteración para los parámetros del modelo, usando la FO ROCE. ....	73
Tabla G.1: Porcentaje de acierto de pronóstico de uno hasta seis meses utilizando la F.O. RMSE.	74
Tabla G.2: Porcentaje de acierto de pronóstico de uno hasta seis meses utilizando la F.O. TRMSE. ....	76
Tabla G.3: Porcentaje de acierto de pronóstico de uno hasta seis meses utilizando la F.O. ROCE.	78
Tabla G.4: Resumen de los porcentajes de acierto de caudales para cada mes obtenidos del promedio de los años 2004 al 2010, utilizando la F.O. RMSE. ....	80
Tabla G.5: Resumen de los porcentajes de acierto de caudales para cada mes obtenidos del promedio de los años 2004 al 2010, utilizando la F.O. TRMSE. ....	80
Tabla G.6: Resumen de los porcentajes de acierto de caudales para cada mes obtenidos del promedio de los años 2004 al 2010, utilizando la F.O. ROCE. ....	81
Tabla G.7: Meses que agrupa cada estación para el cálculo promedio de precipitaciones estacionales para realizar un pronóstico. ....	81

# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Introducción**

Conocer la disponibilidad de agua en un futuro próximo es de mucha utilidad para la silvicultura, agricultura e hidroelectricidad entre otras actividades económicas, siendo la agricultura e hidroelectricidad actividades muy importantes en el Chile centro-sur, actividades que dependen directamente de la disponibilidad hídrica de cuencas andinas.

Por lo anterior resulta importante conocer caudales próximos y a cuánto tiempo a futuro se pueden tener predicciones hidrológicas confiables. La modelación hidrológica es una de las herramientas más utilizadas para la gestión y planificación de recursos hídricos. De aquí la importancia de los modelos hidrológicos con los cuales se puede simular y predecir fenómenos hidrológicos a corto, mediano y largo plazo.

El Proyecto de Título busca determinar si con una base de pronósticos climáticos, temperaturas y precipitaciones, se pueden predecir de manera confiable los caudales sobre una cuenca andina. Para ello, como parte del estudio se cuantifica el porcentaje de acierto de las predicciones obtenidas con un modelo estacionario a corto plazo. También resulta interesante conocer cuánto afecta la variabilidad de temperaturas y precipitaciones registradas en los pronósticos de estas mismas desde uno a seis meses y en los pronósticos de caudales simulados sobre la cuenca del Río Chillán.

Con los análisis se busca decidir si lo simulado por un modelo hidrológico se ajusta a los datos registrados con un porcentaje de acierto, de tal modo de determinar si el modelo sirve como herramienta para predecir caudales de manera confiable y por lo tanto para una planificación y gestión del agua adecuada de una cuenca andina.

## **1.2 Objetivo General**

Cuantificar la incertidumbre y predictibilidad con un grado de confianza del modelo estacionario sobre la cuenca del Río Chillán.

### **1.3 Objetivos Específicos**

- Calibrar y validar el modelo hidrológico al caso de la cuenca del Río Chillán, obteniendo un rango o banda de incertidumbre.
- Calcular la predictibilidad del modelo hidrológico estacionario con un grado de confianza.
- Analizar para qué periodo de tiempo se ajusta el modelo y con cuanta probabilidad de éxito.

## **CAPÍTULO 2. ÁREA DE ESTUDIO, DATOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS.**

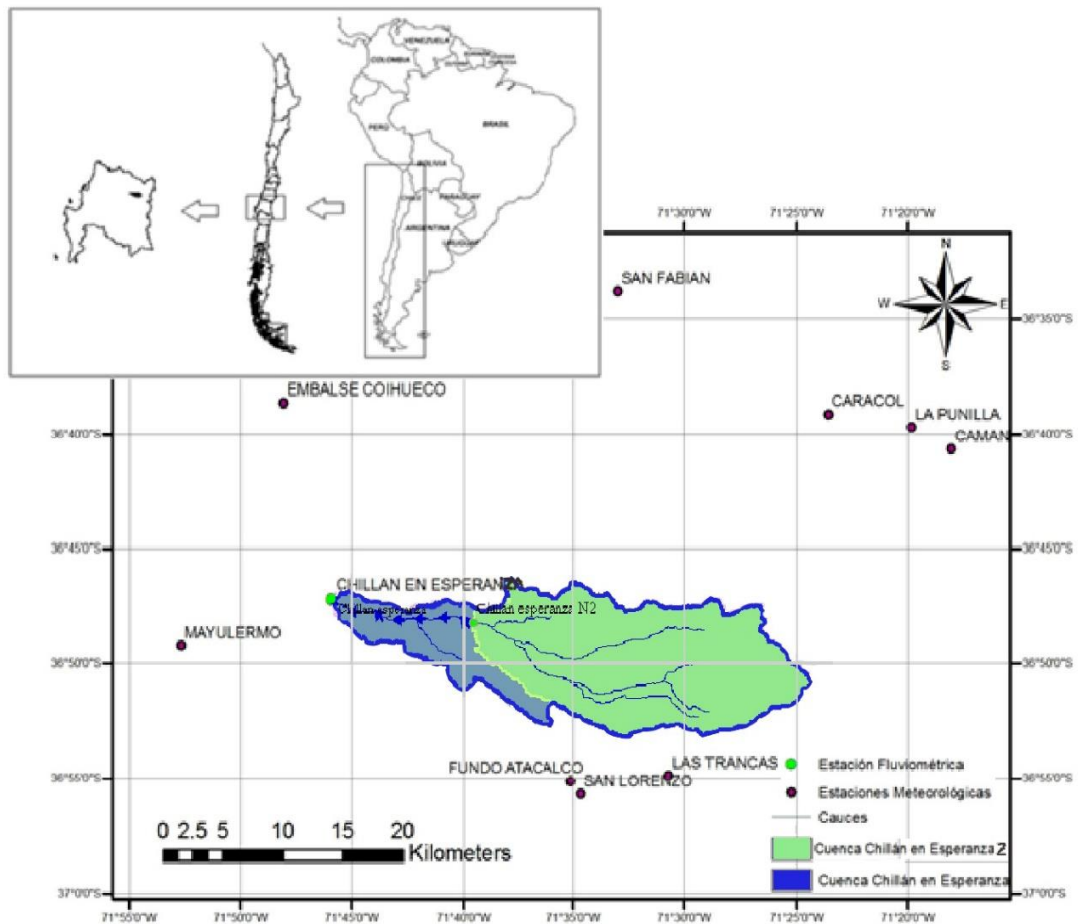
### **2.1 Área de estudio**

El área de estudio corresponde a la cuenca del Río Chillán en Esperanza. La cuenca posee un área de drenaje de 210,4 km<sup>2</sup> y se encuentra ubicada en la provincia de Ñuble, VIII Región, Chile centro-sur (Figura 2-1). Se extiende desde los Nevados de Chillán, hasta la estación fluviométrica del mismo nombre situada en la precordillera, con cotas que van desde los 3200 (msnm) en el extremo Este de la cuenca hasta los 435 (msnm) en la estación fluviométrica Chillán en Esperanza. Esta cuenca se encuentra dentro de la Cordillera de los Andes con coberturas características de hielo y nieve, bosque nativo y escasas plantaciones forestales (Figuerola et al., 2007).

De acuerdo al perfil pluviométrico trazado a los 36°45'S incluido en el estudio de Mardones et al. (2001), existe un gradiente positivo de precipitación a medida que se asciende en altitud hacia el este. De esta forma, en las laderas de sotavento de la Cordillera de Los Andes se registran montos pluviométricos entre 2.500 y 3.000 mm (Henríquez, 2009). La temperatura media anual de la cuenca varía entre los 3°C en invierno a 22°C en verano.

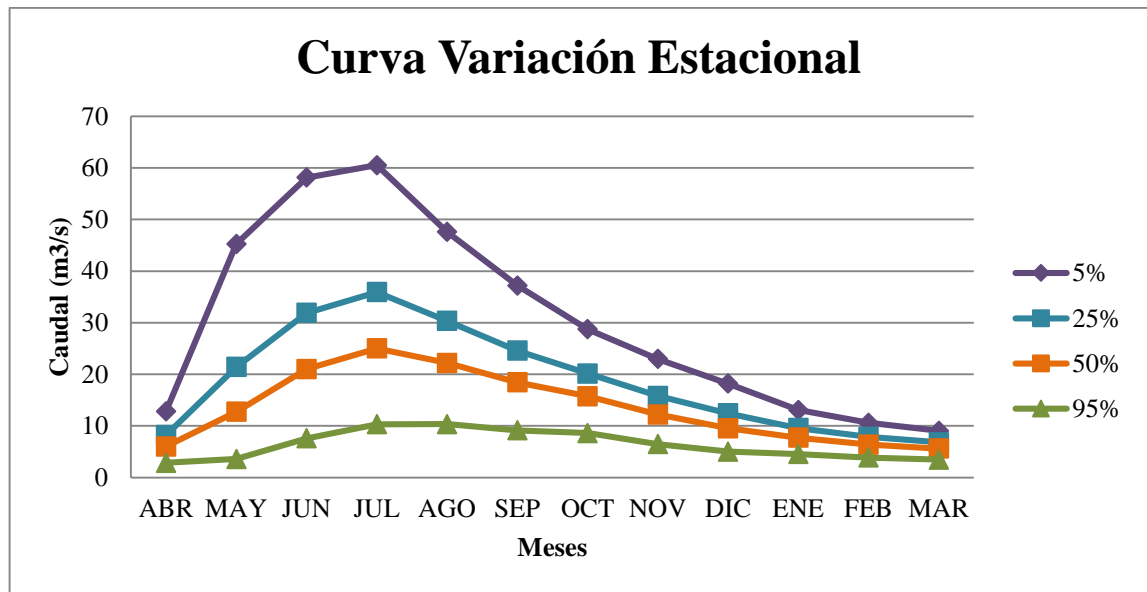
La cuenca presenta un tipo de clima predominantemente Mediterráneo, lo que implica sequías frecuentes en los meses de verano y que la precipitación se concentra en los meses de invierno. En presencia del fenómeno El Niño-Oscilacion del Sur (ENSO) en su fase cálida, hay una tendencia hacia precipitaciones superiores a la media, en las latitudes 35°- 38°S, a finales de primavera (octubre y noviembre), mientras que anomalías opuestas en la precipitación son características durante eventos de la Niña (Montecinos et al., 2000; Montecinos y Aceituno 2003). Esto conduce a alteraciones en los años secos y húmedos.

Según las curvas de variación estacional presentadas por Toledo (2014), el régimen hídrico para la cuenca es del tipo pluvial. De las curvas de variación estacional (Figura 2-2), es posible observar que los mayores caudales se encuentran en los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto (invierno). Mientras que en los meses de Septiembre hasta Abril el caudal disminuye. Con esta curva se confirma que el régimen predominante en la cuenca es pluvial.



**Figura 2–1** Ubicación cuenca Río Chillán en Esperanza (borde azul) y cuenca Río Chillán en Esperanza N°2 (verde).

Adicionalmente para una segunda etapa definida como de pronósticos, se utilizó la cuenca vertiente a la estación Río Chillán en Esperanza N°2 (Figura 2-1), debido a que la estación Río Chillán en Esperanza dejó de operar el año 1994. El área de estudio para la realización de pronósticos se extiende desde los Nevados de Chillán hasta la estación fluviométrica Río Chillán en Esperanza N°2, con cotas que van desde los 3200 (msnm) en el extremo Este de la cuenca hasta los 586 (msnm) en la estación fluviométrica y posee un área de drenaje de 167 km<sup>2</sup>.



**Figura 2–2** Curvas de variación estacional cuenca Río Chillán en Esperanza para las probabilidades de excedencia del 5, 25, 50 y 95%. (Toledo, 2014)

En relación a la geología en la zona de estudio está caracterizada por las siguientes formaciones rocosas según SERNAGEOMIN (2003):

Secuencias Volcánicas:

- Q3i: Período Cuaternario

Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos-basálticos a dacíticos.

Las rocas volcánicas o también llamadas rocas ígneas extrusivas se forman cuando el magma aflora a la superficie terrestre. Esto favorece un alto grado de fracturamiento en la roca. Las lavas basálticas a riolíticas se forman por el enfriamiento rápido de coladas de lava, mientras que los depósitos piroclásticos se forman por material expulsado al aire y que posteriormente cae. Este material puede ser sólido o líquido y al igual que las lavas se enfría rápidamente. Por lo tanto son rocas que se caracterizan por su alta permeabilidad.

- PPI3: Período Plioceno-Pleistoceno

Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados.

La diferencia de esta secuencia con la anterior es su antigüedad por lo que algunas rocas iniciaron el proceso de meteorización dando origen a rocas sedimentarias como las tobas y los conglomerados. Ambas rocas son porosas y pueden llegar a ser permeables. Por lo que esta secuencia también posee una alta permeabilidad. (Toledo, 2014)

#### Rocas Intrusivas:

- Mg: Período Mioceno  
Granodioritas, dioritas y tonalitas.

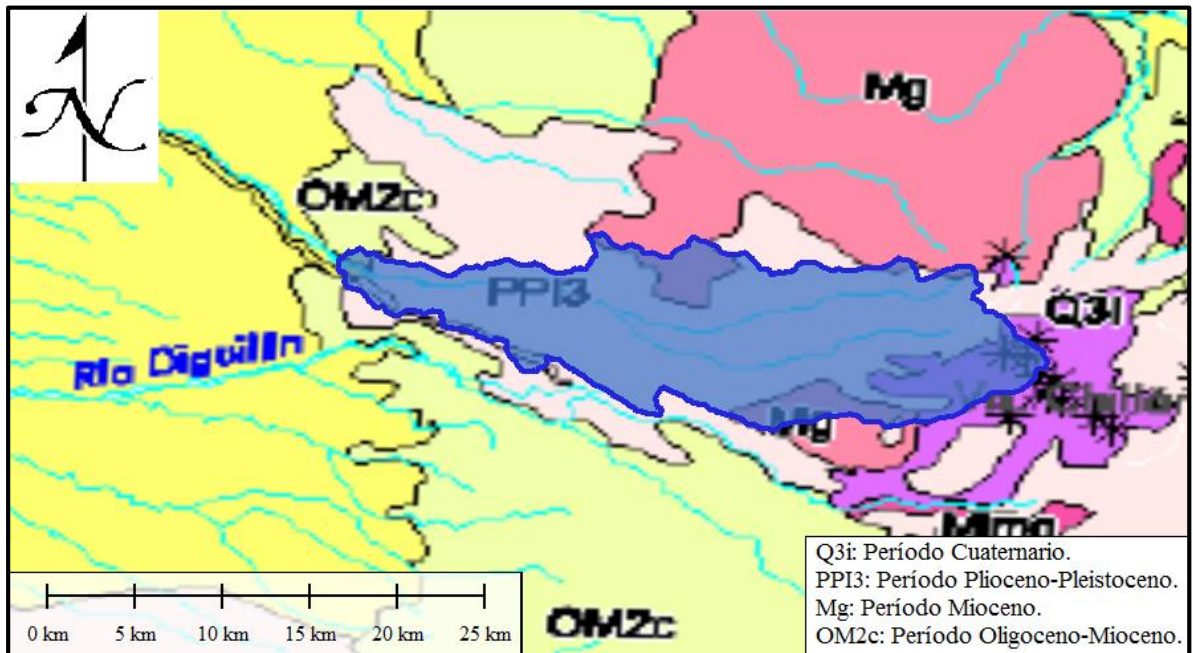
Estas tres rocas intrusivas o plutónicas se forman bajo la superficie debido al lento enfriamiento del magma. El comportamiento está controlado por el grado de meteorización de la roca, en este caso al ser del mioceno se consideran rocas jóvenes por lo tanto no deberían estar muy alteradas. Por lo anterior se consideran como rocas impermeables. Adicionalmente si sufrieran meteorización la diorita tiende a generar suelos arcillosos compresibles, mientras que las tonalitas tienden a generar suelos arenosos con arcilla y limo siendo ambos suelos de baja o nula permeabilidad. (Toledo, 2014)

#### Secuencias Volcanosedimentarias:

- OM2c: Período Oligoceno-Mioceno  
Secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas.

Poseen las mismas características que las secuencias volcánicas solo que son más antiguas y el material de origen volcánico que avanza incorpora material sedimentario. Por ende esta secuencia también posee una alta permeabilidad. (Toledo, 2014)

En la Figura 2-3 muestra que la mayor parte de la cuenca está en formaciones rocosas permeables (OM2c, PPI3 y Q3i). Mientras que una mínima parte está en formaciones rocosas impermeables.



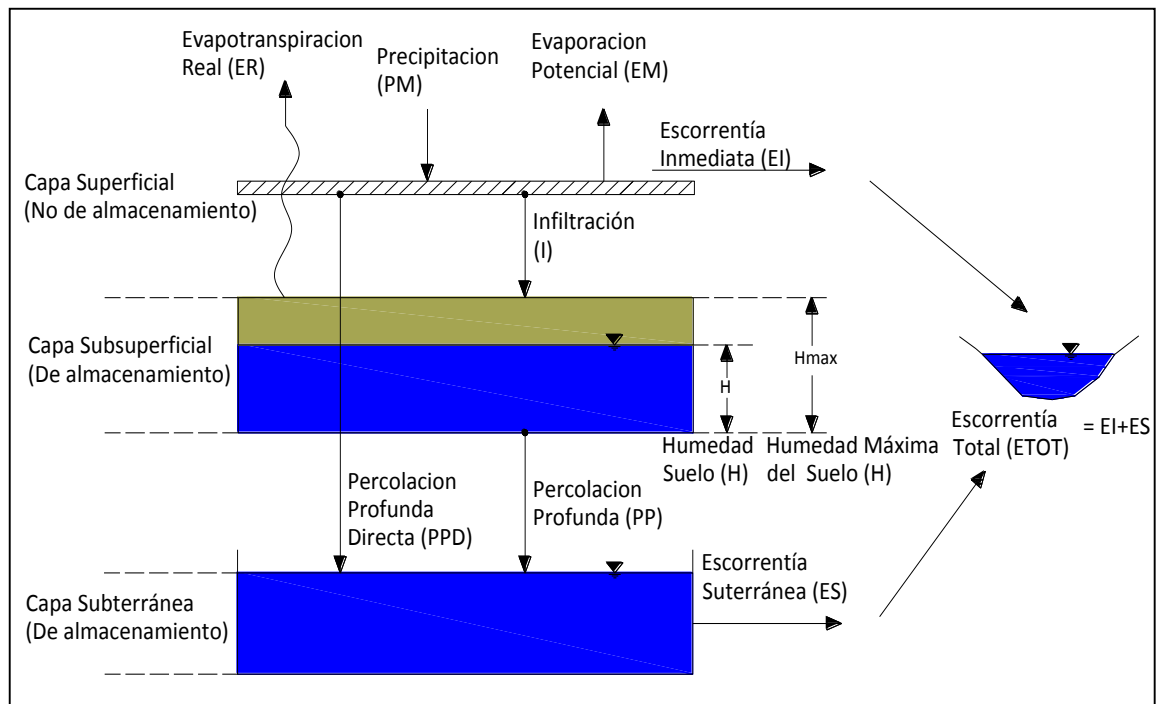
**Figura 2–3** Formaciones rocosas presentes en la cuenca con escala geológica 1:1.000.000.  
(Toledo, 2014)

## 2.2 Descripción del modelo hidrológico y herramientas de análisis

El presente estudio utilizó el Modelo Hidrológico Mensual (MHM) presentado en Muñoz (2010). Este modelo de balance hídrico es de tipo conceptual y agregado. El modelo posee tres módulos relacionados con el cálculo de la escorrentía, uno pluvial, uno nival y un módulo de extracciones y aportes. A continuación se describe cada uno de ellos:

### 2.2.1 Módulo Pluvial

El módulo pluvial considera la cuenca como un sistema de doble almacenamiento, un sistema de almacenamiento subsuperficial y un sistema de almacenamiento subterráneo. La entrada de agua en el modelo es la precipitación mientras que las salidas son la evapotranspiración, la escorrentía directa y la escorrentía subterránea.



**Figura 2-4** Esquema conceptual módulo pluviométrico MHM (Muñoz, 2010).

La Figura 2-4 muestra el proceso del agua hasta su salida. Como datos de entrada para el modelo es necesario conocer la precipitación media mensual (PM) y la evapotranspiración potencial media mensual (EM).

Del agua caída una parte de esta agua se transforma en escorrentía inmediata o directa (EI) otra parte en percolación profunda directa (PPD) e infiltración (I). Esta última pasa a ser almacenada en el estrato de suelo no saturado, en la capa subsuperficial en forma de humedad (H). De esta capa se calcula la evapotranspiración real en función de H y EM. Una parte de la humedad restante queda como humedad en la capa subsuperficial y la otra pasa como percolación profunda (PP) al estrato de suelo saturado, capa subterránea. Por último con una parte del almacenamiento en la capa subterránea se genera la escorrentía subterránea. De esta forma la escorrentía total de la cuenca es la suma de la escorrentía inmediata con la escorrentía subterránea.

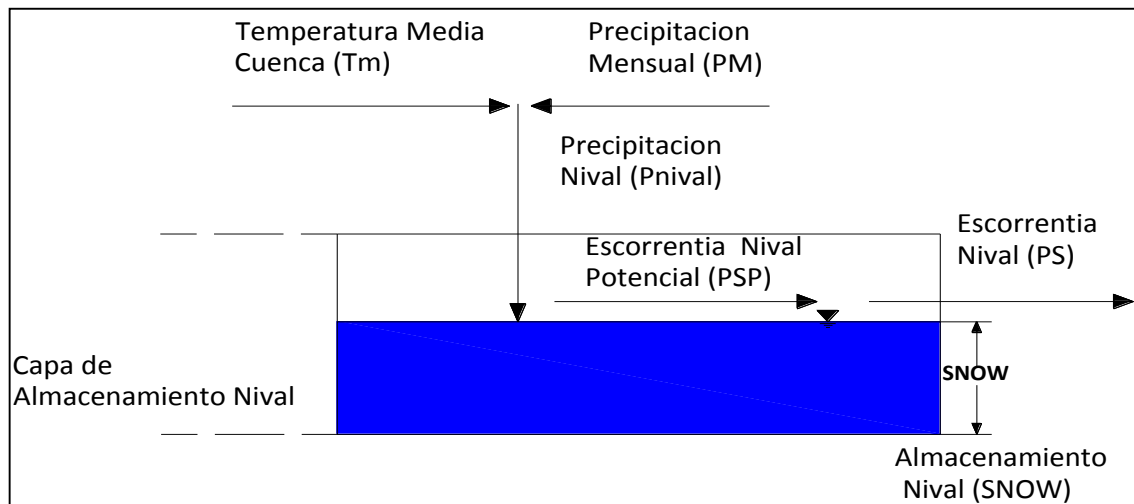
En la Tabla 2.1 se describen los seis parámetros de calibración y los dos factores de modificación de entrada para este módulo.

**Tabla 2.1:** Parámetros del modelo pluvial.

Parámetro		Descripción	Influencia
Pluvial	Cmax	Coefficiente de escorrentía máxima cuando el almacenamiento sub-superficial ésta saturado.	EI
	Plim, mm	Monto de precipitación límite sobre el cual existe percolación profunda directa (PPD).	PPD
	D	Porcentaje de precipitación sobre Plim	PPD
	Hmax, mm	Capacidad máxima de almacenamiento en la Capa sub-superficial.	Cmax y ER
	PORC	Fracción de Hmax que define el contenido de agua en el suelo bajo el cual existen restricciones sobre los procesos de evapotranspiración.	Hcrit y ER
	Ck	Coefficiente de escorrentía subterráneo.	ES
	A	Factor de ajuste de los datos de Precipitación.	PM
	B	Factor de ajuste de los datos evapotranspiración.	PET y ER

### 2.2.2 Módulo Nival

El modelo nival considera como salida la escorrentía producida por el derretimiento de nieve, la cual se distribuye entre la EI y la I.



**Figura 2-5** Esquema conceptual módulo nival MHM (Muñoz, 2010).

La Figura 2-5 muestra que la precipitación nival ( $P_{nival}$ ) se obtiene a través de la temperatura mensual ( $T_m$ ) y de la precipitación ( $PM$ ). La capa de almacenamiento nival es recargada por esta  $P_{nival}$  y desde esta capa se produce una escorrentía nival ( $PS$ ), el valor de esta escorrentía está condicionado por la escorrentía nival potencial ( $PSP$ ) y el almacenamiento nival ( $SNOW$ ).

### 2.2.3 Módulo de extracciones

De Muñoz (2010) se obtiene que el módulo de extracciones y aportes tiene como finalidad incluir alteraciones que modifiquen el régimen natural de respuesta sobre la cuenca.

Las extracciones y aportes se incluyen en el caudal de salida según lo siguiente:

$$Q_{salida}(t) = Q_{producido}(t) + Q_{aporte}(t) - Q_{extracciones}(t) \quad \text{Ec.1}$$

Donde el caudal de salida  $Q_{salida}(t)$  es equivalente al caudal producido  $Q_{producido}(t)$  más el caudal aportante  $Q_{aporte}(t)$  y menos las extracciones (riego, consumo, etc.)  $Q_{extracciones}(t)$ .

### 2.2.4 Monte Carlo Analysis Toolbox (MCAT)

MCAT es una colección de análisis y visualización de funciones de MATLAB integrados a través de una interfaz gráfica de usuario (GUI) (Wagener et al., 2001). Esta herramienta se

ha aplicado a la investigación de la modelación precipitación-escorrentía (e. g. Wagener et al., 2007), y se basa en el análisis de información a partir de un muestreo de Monte Carlo y posterior análisis y postproceso de resultados.

Permite la investigación detallada de la estructura, de sensibilidad de parámetros, identificabilidad y la predicción de la incertidumbre en las salidas de modelos matemáticos (Wagener et al., 2002).

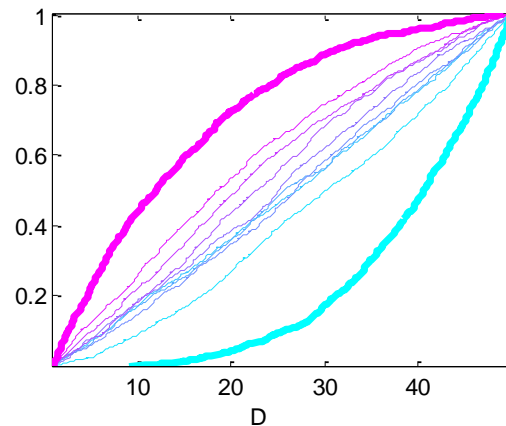
Esta herramienta fue integrada al modelo hidrológico MHM lo que permite hacer más eficiente su calibración y análisis del comportamiento de los procesos simulados (Muñoz et al., 2013b).

El Muestreo de Monte Carlo es una técnica numérica donde se realizan “n” repeticiones de un muestreo aleatorio para obtener la distribución de una entidad probabilística desconocida (parámetros, salidas, etc.). En este estudio, el método de muestreo se utiliza para generar numerosas simulaciones de caudales a partir de un rango de valores aleatorios para los diversos parámetros del modelo. Luego almacena los parámetros y sus medidas de desempeño (funciones objetivo) asociadas para su posterior análisis.

El número de simulaciones al igual que el rango de valores de los parámetros son definidas por el usuario. Entre las herramientas de análisis de MCAT se utilizaron las siguientes:

- 1. Dispersión de Parámetros para cada Función Objetivo (Dotty plots Objective Functions):** Es una gráfica de dispersión que representa el valor que adopta la función objetivo con respecto al parámetro, mientras más uniforme sea la distribución de los puntos en la gráfica menor será la identificabilidad del parámetro. Al contrario, si los puntos en la gráfica muestran claramente un mínimo este parámetro será altamente identificable.
- 2. Análisis de Identificabilidad General (GIA):** El GIA proporciona otro medio de visualización de la identificabilidad de los parámetros del modelo ya que traza la distribución acumulada (cdf) y el histograma del 10% de las mejores simulaciones en términos de la función objetivo que se esté analizando, altas pendientes en la distribución indican alta identificabilidad de los parámetros del modelo, mientras que pendientes bajas indican baja identificabilidad.

**3. Análisis de Sensibilidad Regional (RSA)** (Homberger y Spear, 1981): El análisis de sensibilidad regional determina qué parámetros tienen un efecto significativo en la respuesta del modelo. La sensibilidad de un determinado parámetro se mide mediante curvas de distribución acumulada (cdf) las cuales son creadas a partir de la división de los resultados del muestreo de Monte Carlo en diez grupos de igual tamaño. Para este caso, estas curvas representan desde el 10% de las mejores simulaciones al 10% de las peores simulaciones en relación a la función objetivo que se esté utilizando. Si los parámetros del modelo son sensibles la pendiente de la curva de distribución será alta, por otro lado si los parámetros no muestran sensibilidad la curva de distribución tendrá una pendiente baja o nula. Cuando la pendiente del 10% de las mejores simulaciones sea mayor, los resultados del modelo se verán influenciados positivamente por el parámetro en el rango donde la pendiente es mayor. Por otro parte el 10% de las peores simulaciones permite identificar el rango de valores donde el parámetro no influye sobre el modelo. El 10% de las mejores simulaciones está representado por una gruesa línea color magenta, mientras que el 10% de las peores simulaciones está representado por una gruesa línea color cian (Figura 2-6).



**Figura 2–6** Ejemplo gráfica RSA, donde la curva magenta y cian representan el 10 % de las mejores y peores simulaciones respectivamente.

### 2.2.5 Funciones Objetivo

Con el objetivo de estudiar el comportamiento del modelo hidrológico en diferentes periodos de tiempo y de estudiar la sensibilidad de los procesos asociados a diferentes partes del hidrograma, el estudio se realizó utilizando tres funciones objetivo, dos de las cuales son indicadores estadísticos comunes y una media global de respuesta hidrológica general.

**a) Error Cuadrático Medio (RMSE):** Este indicador opera en función de errores o diferencias simples de un valor simulado respecto de uno observado. Como desventaja se tiene que al no considerar valores relativos o porcentuales, el valor del error depende del orden de magnitud de los valores comparados, y por lo tanto sirve más como un método comparativo para evaluar modelos, que para evaluar el nivel de ajuste (Van Werkhoven et al., 2008). El indicador se enfoca en porciones altas de flujo en el hidrograma.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (S_j - O_j)^2} \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

n: Número total de datos a comparar.

S<sub>j</sub>: Caudal j simulado.

O<sub>j</sub>: Caudal j Observado.

**b) Error Cuadrático Medio Transformado (TRMSE):** Los valores simulados y observados primero se transforman utilizando una transformación Box-Cox, lo que tiene un efecto similar al de una transformación logarítmica. Posteriormente, la medida de desempeño se calcula como la raíz de la sumatoria de las diferencias cuadráticas entre Z<sub>s,t</sub> (flujo transformado simulado para un tiempo t) y Z<sub>o,t</sub> (flujo transformado observado para un tiempo t dividido por número de intervalos de tiempo) (Van Werkhoven et al., 2008). El coeficiente TRMSE se enfatiza en porciones bajas de flujo en el hidrograma.

$$TRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Z_{s,t} - Z_{o,t})^2} \quad \text{Ec.3}$$

$$Z_{s,t} = \frac{(1 + S_j)^\lambda - 1}{\lambda} \quad \text{Ec.4}$$

$$Z_{o,t} = \frac{(1 + O_j)^\lambda - 1}{\lambda} \quad \text{Ec.5}$$

Donde:

n: Número total de datos a comparar.

Sj: Caudal j simulado.

Oj: Caudal j Observado.

$\lambda$ : 0.3

**c) Error del Coeficiente de Escorrentía (ROCE):** Este coeficiente captura el balance hídrico global, debido a que combina los flujos en un sólo descriptor de características hidrológicas, el cual es el coeficiente medio de escorrentía anual (definido como  $\bar{Q}/\bar{P}$ ). En éste coeficiente se comparan las diferencias en valor absoluto entre el cociente medio de escorrentía anual simulado y observado (Van Werkhoven et al., 2008).

$$ROCE = abs\left(\frac{\bar{Q}_s}{\bar{P}} - \frac{\bar{Q}_o}{\bar{P}}\right) \quad \text{Ec.6}$$

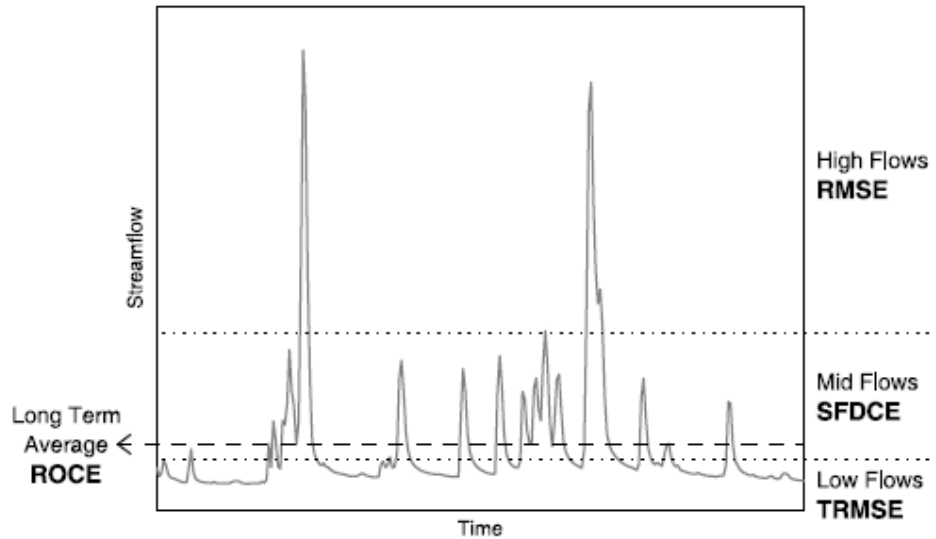
Donde:

$\bar{Q}_s$ : Media de los valores de caudales simulados.

$\bar{Q}_o$ : Media de los valores de caudales observados.

$\bar{P}$ : Media de los valores de precipitaciones medias mensuales.

Como se muestra en la Figura 2-7 cada una está relacionada con una parte del hidrograma ya sea flujos altos (RMSE), flujos bajos (TRMSE), la variabilidad en los flujos de rango medio (SFDCE) y el balance hídrico (ROCE) (Van Werkhoven et al., 2008).



**Figura 2-7** Componentes del hidrograma representados por las cuatro funciones objetivo (Fuente: Van Werkhoven et al., 2008).

### 2.2.6 Metodología de Cálculo de la Incertidumbre *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE)

Para evaluar la incerteza de los resultados asociada a los parámetros del modelo, basta con mantener las variables de entrada y estructura del modelo fijo, y definir un rango de variación conceptual y físicamente razonable de cada parámetro, luego realizar simulaciones sucesivas, para finalmente cuantificar la incerteza a partir de la metodología GLUE. Para lograr esto se puede determinar con MCAT parámetros identificables, esto se logra reduciendo el rango de variación, los cuales se pueden condicionar a un valor fijo o a un rango de variación menor, el rango de variación menor es usando el 90% central de la banda simulada.

Luego, con dichos parámetros limitados a un rango menor que el inicial se puede ejecutar nuevamente MCAT y evaluar la identificabilidad de los parámetros restantes. Este proceso se puede repetir hasta limitar lo máximo posible y dentro de un rango conceptual razonable los parámetros de calibración del modelo (Muñoz et al, 2010).

## **2.3 Datos Utilizados en la Modelación**

### **2.3.1 Registros de Precipitaciones**

La obtención de los registros de precipitación mensual (PM) se realizó a través de estaciones pluviométricas que se encuentran en las cercanías de la cuenca en estudio (Figura 2-1), las estaciones utilizadas fueron, Caman, Caracol, Coihueco Embalse, Mayulermo, Fundo Atacalco, San Lorenzo, San Fabián, Diguillín, La Punilla y Las Trancas, las cuales son controladas por la Dirección General de Aguas (DGA). Las estaciones se encuentran con registros entre 1961 y 2010, completados en Toledo (2014). El modelo requiere como variable de entrada necesita una PM distribuida sobre la cuenca, por lo tanto es necesario calcular la influencia de cada estación pluviométrica en el área de estudio. Para esto se utilizó el método Distancia Inversa Ponderada (IDW). Este método de interpolación supone que a mayor distancia se encuentre el punto menor influencia tendrá en la superficie de interpolación, mientras que entre más cercano este el punto mayor va a ser la influencia. Las series de precipitación media mensual completas, calculadas por Toledo (2014) se muestran en el Anexo A.

### **2.3.2 Registros de Caudales**

Para la calibración y análisis de las predicciones realizadas se utilizaron dos registros de caudales, ya que para la primera etapa del estudio se requiere de un registro de caudales en un período común con las variables de entrada, se utilizaron los registros de la DGA. En el caso de los caudales se utilizó la estación fluviométrica Chillán en Esperanza que funciona como punto de control para la cuenca en estudio para el caso de la calibración. Los datos de caudales completos para esta estación se obtuvieron de Toledo (2014) y se incluyen en el Anexo B.

En la etapa de pronóstico se utilizaron los registros de caudales de la estación fluviométrica Río Chillán en Esperanza N° 2 para comparar las predicciones versus valores observados. Estos registros de caudales también se utilizaron para determinar el porcentaje de acierto de los caudales simulados dentro de la banda de incertidumbre calculada. La Tabla 2.2 muestra

la ubicación de la estación Río Chillán en Esperanza N° 2 y el período de registro para los caudales medios mensuales.

**Tabla 2.2:** Ubicación y periodo de registro estación fluviométrica Río Chillán en esperanza N°2 (DGA).

Estación	Período de Registro	Latitud	Longitud
Río Chillán en esperanza	2003-2014	36° 48' 00"	71° 39' 39"

El período de registro de caudales no se encontraba completo para los años de estudio en consecuencia se realizó una reconstrucción de los datos a través del modelo para realizar el relleno de los datos faltantes. Este relleno es necesario ya que al trabajar con un modelo mensual se necesita que los datos de entrada y salida pertenezcan al mismo período. El periodo usado finalmente fue desde enero de 2004 a diciembre de 2010 por ser los años más completos y utilizar el mínimo de datos rellenos. Por lo tanto, los resultados del estudio no se verán influenciados por la utilización del modelo. Las series completas de caudales para la estación Río Chillán en esperanza N° 2 se presentan en el Anexo B.

### 2.3.3 Registros de Temperatura

Toledo (2014) menciona que dentro y alrededor del área de estudio no se encontraron estaciones con datos de temperaturas medias mensuales (Tm) confiables y continuas. Debido a esto se buscó una fuente de información alternativa. Se utilizó una reconstrucción realizada por el Centro para la Investigación sobre el Clima del Departamento de Geografía de la Universidad de Delaware (UD) (Willmontt y Matsuura, 2012) de series de temperaturas mensuales a escala mundial. Se usaron estos datos ya que se obtuvieron resultados favorables en estudios hidrológicos bajo ambientes de alta variabilidad espacial y de escasez de información como cuencas Andinas (Muñoz, 2011).

La temperatura ponderada en toda la cuenca calculada en Toledo (2014) se incluye en el Anexo C.

### **2.3.4 Evapotranspiración**

Se utilizaron datos de evapotranspiración potencial (EM) en la cuenca calculados en Toledo (2014), donde utilizó el método de Thornwhaite (1948) para la estimación de dichos valores. Dicho método requiere información climatológica y geográfica ya que se basa en la temperatura media mensual (Tm) y la latitud, constituyendo esta última un buen índice de la energía en un lugar específico. Este método tiene buenos resultados en zonas húmedas y con vegetación abundante, características presentes en el área de estudio. La evapotranspiración potencial se muestra en el Anexo C.

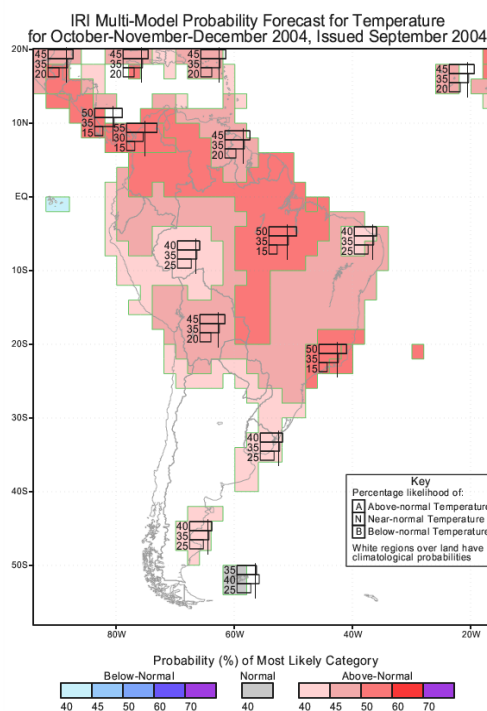
### **2.3.5 Morfología**

Para la caracterización morfológica, se utilizó un Modelo Digital de Terreno (MDT) de la cuenca a partir de imágenes “*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*” (ASTER) de 1 arco segundo de resolución (30 m). Posee una precisión de 7~14 m y cada imagen cubre unos 3600 km<sup>2</sup> de terreno. Además se utilizó el Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84) con huso 19 sur.

### **2.3.6 Mapas de pronóstico probabilísticos**

Para este estudio se utilizaron datos de predicciones de temperaturas y precipitaciones. Tales pronósticos de precipitaciones y temperaturas se obtienen de mapas de pronósticos probabilístico de la página del IRI. Se utilizaron pronósticos desde enero de 2004 a diciembre de 2010. En la Figura 2–9 se muestra un mapa de modelo múltiple de probabilidad de temperatura, en donde se puede obtener información del pronóstico de temperatura desde el mes de Septiembre del 2004 para los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre del mismo año.

Los mapas de probabilidades del pronóstico consideran pronósticos categóricos, en los cuales las anomalías del clima son clasificadas como "Encima del Normal", "Cerca del Normal", o "Debajo del Normal". Los mapas de probabilidad están basados en el pronóstico de un modelo del clima particular así como en el rendimiento histórico de ese modelo (Barnston, 2003).



**Figura 2–8** Modelo - múltiple de probabilidad de temperatura, Octubre, Noviembre y Diciembre del 2004, hecho en Septiembre 2004. (<http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/seasonal-climate-forecasts/>).

Para pasar de los mapas a datos de pronósticos, se le asignó un número a la clasificación de los mapas, así para la precipitación se definieron las categorías, (1) Seco, (2) Normal y (3) húmeda. Del mismo modo, para la temperatura las categorías, (1) Fría, (2) Normal y (3) Caliente. Las tablas de pronósticos de temperaturas y precipitaciones se muestran en el Anexo D. Cabe mencionar que con los pronósticos de temperaturas se hizo el pronóstico de evapotranspiración potencial.

Estudios realizados han utilizado herramientas similares, como Interacción agua superficial-subterránea en una cuenca andina de Chile centro-sur. Vulnerabilidad ante escenarios de variabilidad climática (Zuñiga, 2011), Incerteza en las variables de entrada de un modelo hidrológico conceptual. Implicancias sobre la predictibilidad (Ortiz, 2011) y *Evaluating seasonal climate forecasts from user perspectives* (Hartmann et. al 2002).

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Calibración y validación

Para realizar la calibración y validación se utilizaron 34 años de registros (1961-1994). Con los primeros 17 años (1961-1977) se realizó la calibración y para la validación se utilizaron los 17 años siguientes (1978-1994). Esta etapa de calibración y validación se realizó con el objetivo de validar el modelo y representar el comportamiento hidrológico de la cuenca del Río Chillán en Esperanza, para posteriormente poder realizar las predicciones de caudales en la cuenca del Río Chillán en Esperanza N° 2.

El rango inicial para cada uno de los parámetros del modelo fue definido de tal forma que representen los procesos hidrológicos en que interceden, para esto se toma en cuenta estudios previos elaborados con el modelo (e.g. Zuñiga 2011, Toledo 2014). La Tabla 3.1 muestra los valores iniciales utilizados para realizar la primera iteración.

**Tabla 3.1:** Valores iniciales correspondiente a cada uno de los parámetros considerados para la calibración, obtenidos de Toledo 2014.

<b>Parámetros del Modelo</b>		
Limite	Inferior	Superior
Cmax	0.1	0.7
Hmax (mm)	200	700
D %	1	100
Plim (mm)	50	1000
PORC %	1	100
Ck	0.1	0.7
<b>Factor de Modificación de Entrada</b>		
Limite	Inferior	Superior
A	0.85	2
B	0.85	2

Para la calibración se realizó un proceso iterativo con MCAT. En donde primero se definió el rango para cada uno de los parámetros y factores (Tabla 3.1), luego se ingresaron los rangos a MHM-MCAT y se escogió la componente pluvial ya que la cuenca presenta este régimen.

Una vez obtenidos los resultados se analizaron los rangos de incertidumbre de los factores de modificación de las entradas A y B separándolos en intervalos que contenían el 10% del parámetro. Luego a cada uno de los diez intervalos de las entradas A y B se les calculó la pendiente, con el fin de poder acotar el rango de incertidumbre total.

Para escoger los rangos de valores de los factores de modificación de las entradas y de los parámetros del modelo que fueran representativos y de una forma objetiva, se decidió tener por condición que las pendientes debían ser mayores a 1.75, ya que de esta forma se podía seguir teniendo una banda de caudales sin acotar demasiado el rango, pero a la vez quitar los valores del rango que muestran sensibilidad (pendiente muy baja). Esto se puede apreciar en las gráficas del análisis de sensibilidad regional, pero no se decidió ocupar esta opción ya que es subjetiva y la decisión del rango de valores ya entra a una mayor discusión.

Para tener un rango de valores acotado, se analizaron cada una de las pendientes de los diez rangos generados buscando el mínimo valor del primer rango que cumple la condición y el valor máximo del último rango que cumple la condición antes mencionada. Luego se utilizaron estos dos nuevos valores de entrada para el parámetro y se realizó una nueva iteración. En el caso que el rango de incertidumbre no cumplió con la condición de pendiente se dejó el rango completo puesto que el parámetro no era identificable.

El proceso de iteración se realizó para cada factor de modificación de entrada hasta que ningún rango cumplió la condición de pendiente mayor a 1.75, cuando esto ocurrió se siguió de igual forma con los parámetros del modelo, así se analizaron los rangos de todos los parámetros del modelo que cumplieron la condición de pendiente y si la condición se cumplió se realizó otra iteración hasta que los rangos del parámetro cumplieron con una pendiente mayor a 1.75. Se repitió el proceso para cada una de las funciones objetivo.

Teniendo los rangos de valores y utilizando la metodología GLUE para definir las bandas de incertidumbre, fue posible determinar el porcentaje de acierto en cada una de las iteraciones. Es decir se calculó cuántas veces el caudal registrado en la cuenca quedaba contenido en la banda de caudales simulada por el modelo, para las distintas funciones objetivo. La metodología GLUE fue utilizada de modo que a la banda de incertidumbre de caudales obtenida se utilizara el 90% central de los caudales simulados. También se calculó el porcentaje de acierto para los periodos de estiaje (diciembre, enero, febrero marzo), recesión

(agosto, septiembre, octubre y noviembre) y llenado (abril, mayo, junio y julio) de la cuenca para las tres funciones objetivo consideradas en el estudio.

### **3.2 Pronósticos de temperatura y precipitaciones**

Con los mapas de pronóstico de temperatura y precipitaciones, se construyó una base de datos con las predicciones que afectan a la zona en estudio desde enero de 2004 a diciembre de 2010. Se consideró dicho periodo debido a la disponibilidad de datos de caudales para la comparación. Luego los mapas de pronósticos se transformaron a datos de pronósticos, para esto se le asignó un número a la clasificación de los mapas, así para la precipitación se definieron las categorías, (1) Seco, (2) Normal y (3) húmeda. Del mismo modo, para la temperatura las categorías, (1) Fría, (2) Normal y (3) Caliente, si es que el pronóstico estuvo bajo lo normal, normal o sobre lo normal respectivamente en precipitaciones y temperaturas. En los mapas probabilísticos donde no se vio información de pronóstico se asumió un pronóstico normal.

Como el modelo necesita la evapotranspiración potencial como dato de ingreso, con los pronósticos de temperatura se hizo el pronóstico de evapotranspiración.

El registro de precipitaciones medias mensuales se separó en terciles y a cada tercil se le calculó la media, con lo cual dependiendo el valor de las tablas de pronósticos (bajo lo normal, normal o sobre lo normal) se le asignó el valor correspondiente, por ejemplo, si para un mes el pronóstico era normal se le asignó el valor de la media del tercil central. De igual forma se realizó para la evapotranspiración.

De esta forma se construyeron las bases de datos de pronostico mensual (Anexo D), con pronósticos desde 1 hasta 6 meses. Con las tablas de pronósticos de precipitaciones y evapotranspiración, además de los rangos de incertidumbre de los parámetros antes calculados se pudo hacer uso del MCAT, con lo cual se obtuvo una banda de pronósticos de caudales para 6 meses. Por ejemplo, si se tenía un registro hasta enero del 2005, se obtenía un pronóstico de febrero hasta julio del mismo año, de esta manera se fue avanzando mes a mes desde diciembre del 2003 hasta junio del 2012 completando los pronósticos hasta diciembre del 2012.

### **3.3 Aciertos de los pronósticos**

El cálculo de los porcentajes de acierto de los pronósticos de caudales se realizó comparando los caudales registrados en la estación Río Chillán en Esperanza N°2 con las bandas de pronósticos de caudales simuladas por el modelo cada 6 meses y para cada una de las funciones objetivo. Los aciertos se realizaron registrando las veces que el caudal registrado queda contenido en la banda de caudales simulada de pronósticos.

Adicionalmente se calculó el porcentaje de acierto del pronóstico de precipitaciones, esto se hizo calculando los percentiles 0.33 y 0.66 de los registros de precipitaciones mensuales, los que sirvieron como límites para definir que la precipitación bajo lo normal quedo bajo el percentil 0.33, las precipitaciones normales quedaron entre los percentiles 0.33-0.66 y para las precipitaciones sobre lo normal las que fueron mayores al percentil 0.66.

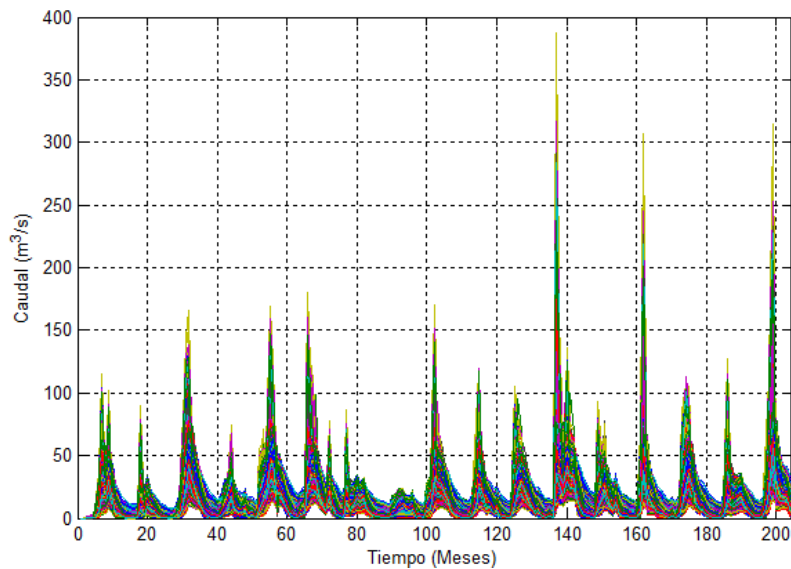
Se consideró estación a un periodo de tres meses, de este modo también se pudo calcular la precipitación estacional como la suma de tres meses consecutivos.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.1 Calibración y validación

La Figura 4-1 muestra los caudales simulados utilizando los parámetros del modelo y factores de modificación de entrada antes de la calibración utilizando la función objetivo RMSE.

Los gráficos de análisis de sensibilidad regional y gráficas de *Dotty plots* se muestran en el Anexo E.



**Figura 4–1** Caudales simulados antes de la calibración, usando la FO RMSE.

En el Anexo F se muestran las pendientes para cada uno de los rangos de 10% del total en la primera iteración para los dos factores de modificación de las entradas utilizando la FO RMSE, TRMSE y ROCE. Para la primera iteración utilizando RMSE, se observa que el factor B no mostró sensibilidad, por lo tanto se mantuvo el rango de valores para todas las iteraciones. El factor A cumplió la condición de pendiente mayor a 1.75 en algunos rangos, por lo que se modificó el rango de valores del factor al mínimo valor del primer rango que cumplió la condición y el máximo valor del último rango que cumplió con la condición, así el nuevo rango de valores definido para el factor A fue entre 1.17 y 1.51.

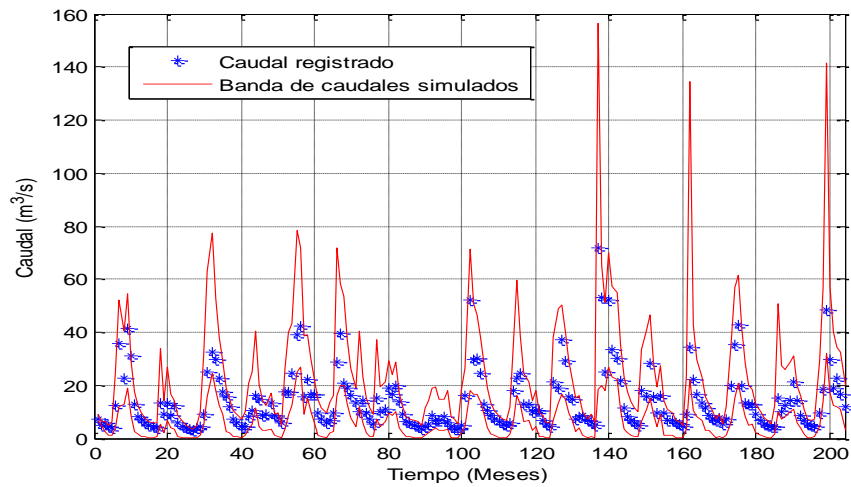
Al igual que para el caso anterior, el factor B no mostró sensibilidad utilizando TRMSE, por lo tanto se mantuvo el intervalo de valores para todas las iteraciones. En el factor A sí hubo

rangos que cumplieron con la condición de pendiente mayor a 1.75, por lo que se modificó el rango de valores del factor al mínimo valor del primer rango que cumple la condición y el máximo valor del último rango que cumple con la condición, siendo el nuevo rango de valores para el factor A de 1.23 a 1.61.

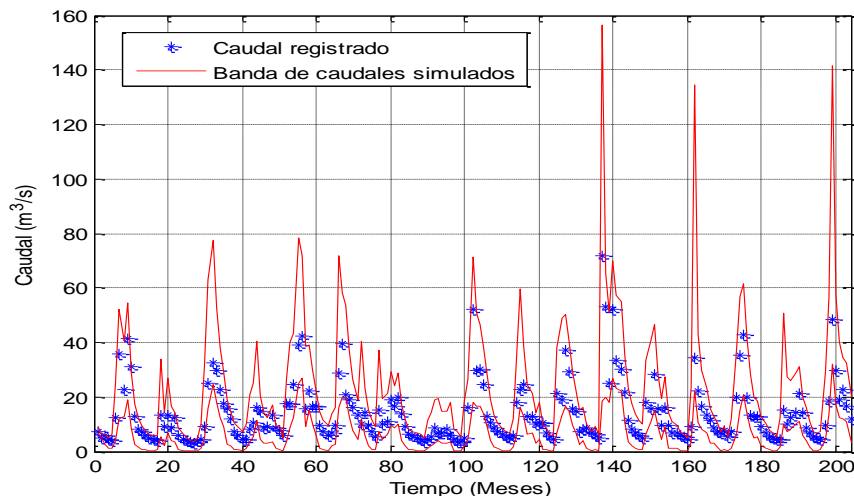
Con ROCE no se observó sensibilidad sobre el factor B, por lo que no se modificó el rango de valores para las siguientes iteraciones, el factor A en cambio sí cumplió la condición de pendiente mayor a 1.75, por lo que el rango de valores calculado para el parámetro A en la siguiente iteración se definió entre 1.29 y 1.53.

Las Figuras 4-2, 4-3 y 4-4 muestran las bandas de caudales simulados considerando una incertidumbre de 90% para la primera iteración, junto con los caudales registrados en la estación Río Chillán en Esperanza para las FO RMSE, TRMSE y ROCE respectivamente. Para RMSE se calculó el porcentaje de acierto como la cantidad de veces que el caudal registrado quedaba contenido en la banda de caudales simulada. Como resultado se obtuvo que el total de porcentaje de acierto fue de 97.6%, además se calcularon los porcentajes de acierto en estiaje, recesión y llenado siendo estos 94.1%, 98.5% y 100% respectivamente. Para la FO TRMSE también se obtuvo el total de porcentaje de acierto que fue de 97.6% y se obtuvieron los porcentajes de acierto en estiaje, recesión y llenado siendo 94.1%, 98.5% y 100% respectivamente.

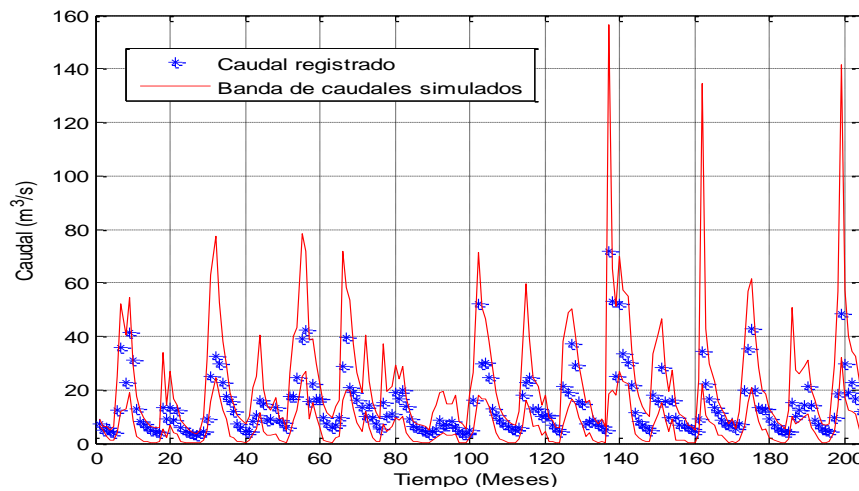
Utilizando la FO ROCE, como resultado se obtuvo que el total de porcentaje de acierto fue de 97.6% y los porcentajes de acierto en estiaje (94.1%), recesión (98.5%) y llenado (100%). Para la primera iteración se pudo observar que los porcentajes de aciertos utilizando las tres funciones objetivos son iguales, esto debido a que los valores iniciales de los parámetros considerados en la calibración fueron los mismos.



**Figura 4-2** Gráfico de caudales para la primera iteración usando la FO RMSE.



**Figura 4-3** Gráfico de caudales para la primera iteración usando la FO TRMSE.



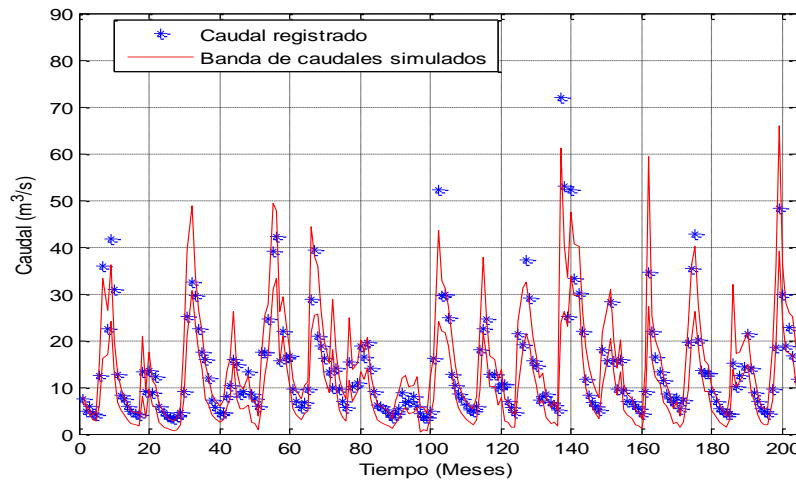
**Figura 4-4** Gráfico de caudales para la primera iteración usando la FO ROCE.

Para la función objetivo RMSE se realizaron tres iteraciones, en la segunda iteración los factores de modificación A y B no cumplieron la condición de pendiente mayor a 1.75, luego de analizar los factores de modificación se analizaron los parámetros del modelo. Cmax y Ck cumplieron con la condición de pendiente mayor a 1.75, mostrando sensibilidad. Luego se calculó que el nuevo rango de valores para los parámetros, donde el rango para Cmax fue de 0.21 a 0.41 y para el parámetro Ck entre 0.19 y 0.33, estos valores fueron ingresados en la última simulación. Los porcentajes de acierto para la segunda iteración utilizando RMSE fueron, total de porcentaje de acierto 87.3%, los porcentajes de acierto de estiaje, recesión y llenado fueron 73.5%, 94.1% y 94.1% respectivamente. Se observó que la banda de caudales simulada se estrechó y que los porcentajes de acierto disminuyeron con respecto a la primera simulación.

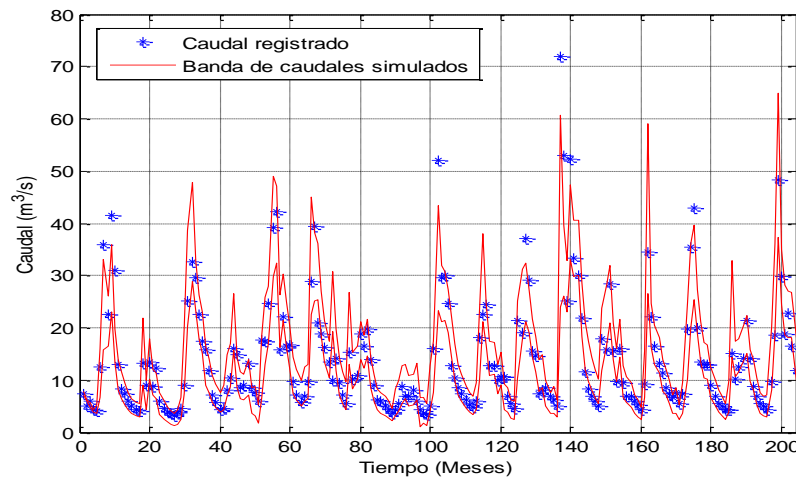
Utilizando TRMSE se realizaron cuatro iteraciones, en la segunda iteración no se observó sensibilidad en los factores A y B. Al analizar los parámetros del modelo, Cmax y Ck mostraron sensibilidad, por lo que se calculó que el nuevo rango de valores, siendo para Cmax entre 0.17 y 0.36 y para Ck entre 0.1 y 0.31, estos valores fueron utilizados en el ingreso para la tercera iteración. Realizada la tercera iteración de observo que Ck cumplio con la condición de pendiente, por lo que se debió modificar el rango de valores acotando el parámetro, lo que arrojó como resultado que el rango de Ck fuera entre 0.18 y 0.22.

Para la segunda y tercera iteración utilizando TRMSE se calculó el porcentaje de acierto de la igual forma que en los casos anteriores y se obtuvo los siguientes resultados, el total de porcentaje de acierto para la segunda iteración fue de 88.7%, para los porcentajes de acierto de estiaje, recesión y llenado los resultados fueron 86.8%, 86.8% y 92.7% respectivamente. En el caso de la tercera iteración los resultados fueron, porcentaje total de acierto 84.8%, para los porcentajes de acierto de estiaje, recesión y llenado fueron 86.8%, 82.4% y 85.3% respectivamente.

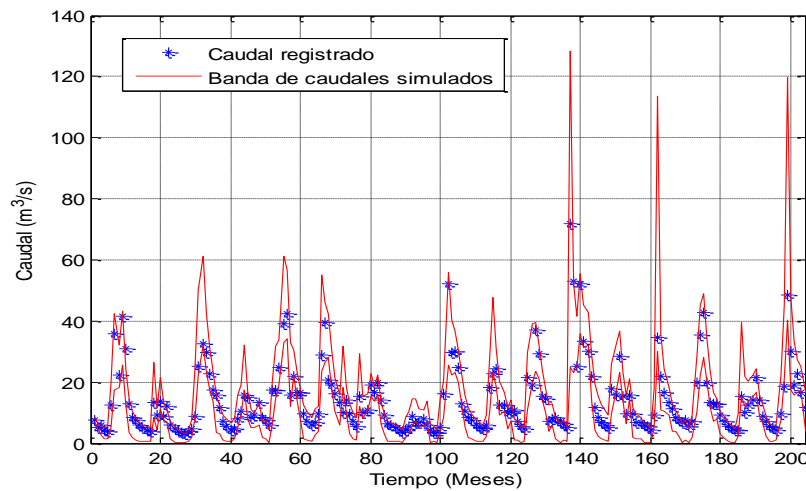
Se observó que al ir acodando los parámetros el porcentaje de acierto va disminuyendo debido a que la banda de incertidumbre se acota y van quedando fuera de esta los caudales registrados más extremos.



**Figura 4-5** Gráfico de caudales para la última iteración usando la FO RMSE.



**Figura 4-6** Gráfico de caudales para la última iteración usando la FO TRMSE.



**Figura 4-7** Gráfico de caudales para la última iteración usando la FO ROCE.

En la tercera iteración para la FO RMSE, cuarta iteración para la FO TRMSE y segunda iteración en la FO ROCE, se observó que ninguna pendiente cumplió con la condición de pendiente mayor a 1.75, con lo que los rangos de valores obtenidos son los definitivos para la validación y el posterior análisis de pronósticos.

En las Figuras 4-5, 4-6 y 4-7 se observa la banda de caudales simulados considerando una incertidumbre de 90% para la última iteración, junto con los caudales registrados en la estación Río Chillán en Esperanza para las FO RMSE, TRMSE y ROCE.

Para la última iteración se obtuvo que el total de porcentaje de acierto fue de 76%, los porcentajes de acierto de estiaje, recesión y llenado fueron 67.7%, 85.3% y 75% respectivamente utilizando la FO RMSE.

Usando la FO TRMSE se obtuvo que el total de porcentaje de acierto fue de 82.4%, los porcentajes de acierto de estiaje, recesión y llenado fueron 82.4%, 80.9% y 83.8% respectivamente. Con esto se observa que los porcentajes de acierto para todo el tiempo estudiado son superiores al 80%.

Con la FO ROCE el total de porcentaje de acierto fue de 82.4%, los porcentajes de acierto en estiaje, recesión y llenado fueron 76.5%, 80.9% y 89.7% respectivamente.

En la Tabla 4.1 se observan los rangos de valores finales de todos los parámetros según cada FO utilizada. Se acotaron todos los parámetros que cumplieron con la condición de pendiente mayor a 1.75 y para los que no la cumplieron desde la primera iteración se mantuvieron los rangos iniciales.

En relación a los factores de modificación de entrada sólo mostró una pendiente mayor a 1.75 el factor A relacionado con la precipitación.

El factor B asociado a la modificación de la evapotranspiración potencial no mostró ninguna pendiente mayor a 1.75 por lo que sugiere insensibilidad del modelo a los procesos relacionados con la evapotranspiración potencial.

El parámetro de escorrentía subterránea  $C_k$  mostró identificabilidad en las mismas funciones que  $C_{max}$ .

Los parámetros del modelo no mostraron identificabilidad cuando se trabajó con la función ROCE.

**Tabla 4.1:** Resumen de los rangos de valores obtenidos mediante la calibración para los diferentes parámetros según la F.O utilizada.

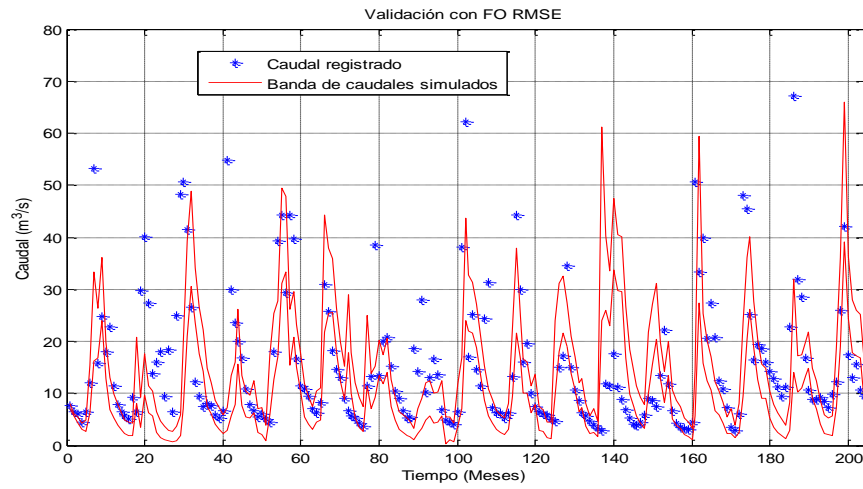
<b>Parámetros del Modelo</b>						
	<b>RMSE</b>		<b>TRMSE</b>		<b>ROCE</b>	
Limite	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Cmax	0.21	0.41	0.17	0.36	0.1	0.7
Hmax (mm)	200	700	200	700	200	700
D %	1	100	1	100	1	100
Plim (mm)	50	1000	50	1000	50	1000
PORC %	1	100	1	100	1	100
Ck	0.19	0.33	0.18	0.22	0.1	0.7
<b>Factor de Modificación de Entrada</b>						
	<b>RMSE</b>		<b>TRMSE</b>		<b>ROCE</b>	
Limite	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
A	1.17	1.51	1.23	1.61	1.29	1.53
B	0.85	2	0.85	2	0.85	2

Las Figuras 4-8 a 4-10 muestran las gráficas de caudales registrados y banda de caudales simulados realizada desde los años 1978 a 1994 utilizando los rangos de valores obtenidos en la calibración para la validación, utilizando las funciones objetivo RMSE, TRMSE y ROCE respectivamente.

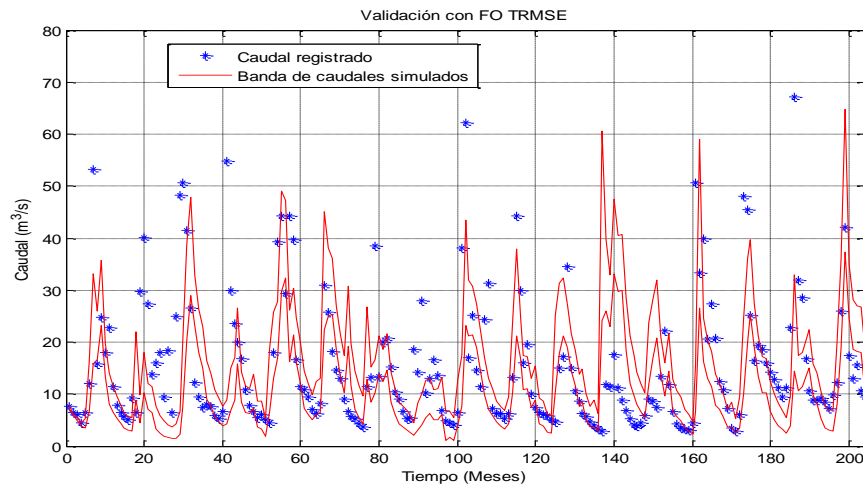
Como resultado de la Figura 4-8 se obtuvo que el total de porcentaje de acierto fue de 75.5%, además se obtuvo los porcentajes de acierto de estiaje, recesión y llenado que dieron 83.8%, 69.1% y 73.5% respectivamente utilizando FO RMSE.

Para la Figura 4-9 utilizando FO TRMSE se obtuvo que el total de porcentaje de acierto fue de 64.7%, los porcentajes de acierto de estiaje, recesión y llenado que fueron 61.8%, 58.8% y 73.5% respectivamente.

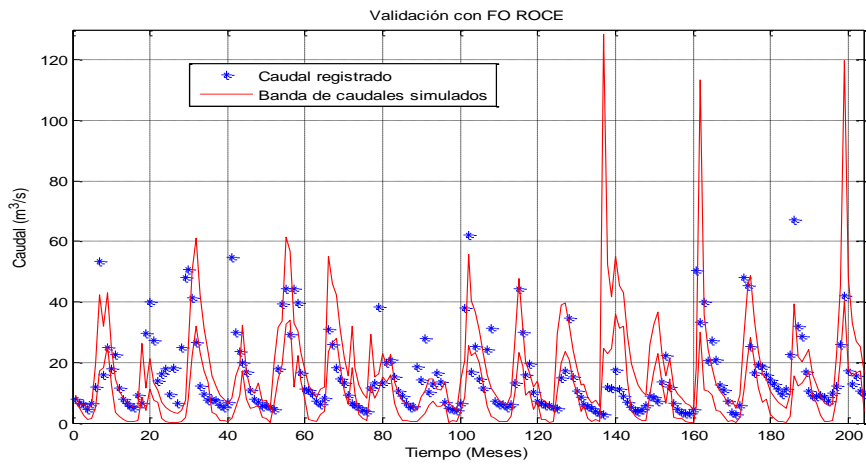
Utilizando la FO ROCE el total de porcentaje de acierto fue de 82.4%, los porcentajes de acierto de estiaje (85.3%), recesión (73.5%) y llenado (88.2%).



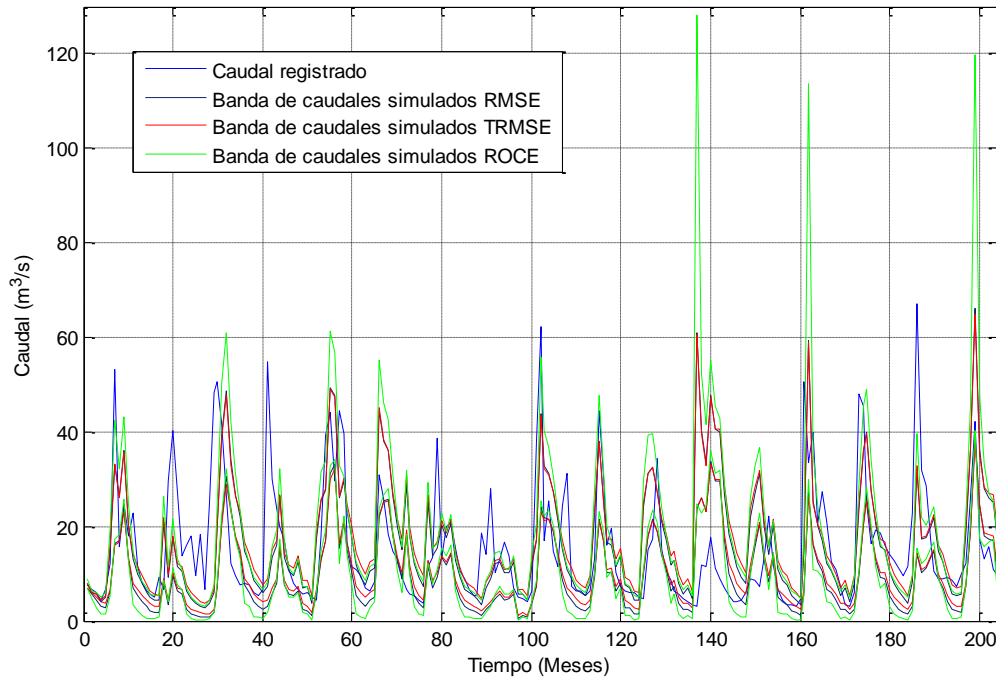
**Figura 4-8** Gráfico de caudales para la validación usando la FO RMSE.



**Figura 4-9** Gráfico de caudales para la validación usando la FO TRMSE.



**Figura 4-10** Gráfico de caudales para la validación usando la FO ROCE.



**Figura 4–11** Gráfico de las bandas de caudales simuladas con las Funciones Objetivo RMSE, TRMSE, ROCE y caudales registrados para la validación.

La Figura 4-11 muestra los caudales registrados y banda de caudales simulados realizada desde los años 1978 a 1994 utilizando los rangos de valores obtenidos en la calibración para la validación de las tres funciones objetivo (RMSE, TRMSE y ROCE). En esta figura se observa el ancho de cada banda de caudales simulados, siendo la mayor la de la FO ROCE seguida por RMSE y finalmente TRMSE. Esto explica en algún modo los porcentajes de acierto en validación, ya que al ser la banda de caudales simulada más ancha es mayor la probabilidad de que el caudal registrado quedara contenido en esta.

La Tabla 4.2 resume todo lo calculado, se observa que el porcentaje de acierto con la FO RMSE es casi igual en la calibración y validación, esta función objetivo también muestra porcentajes de acierto similares en llenado. Para TRMSE se observa que tiene la mayor diferencia en los porcentajes de acierto entre calibración y validación. Al analizar los porcentajes de acierto se observa que esta no supera el 70% en validación, por lo que se supone una función objetivo con baja predictibilidad del modelo en el caso de estudio.

Para la función ROCE se observa que el porcentaje total de aciertos es igual en calibración y validación, pero hay diferencias si se analizan por porcentajes de acierto de estiaje, recesión y llenado, donde el porcentaje de acierto mayor se presenta en llenado seguido por recesión y estiaje como se muestra en la Tabla 4.2. De los aciertos en calibración y validación se observó que la FO ROCE entrega los mayores porcentajes de acierto, siendo en ambas el total de aciertos mayor a 80%, esto se debe a que la banda de incertidumbre es más amplia en relación a las otras FO utilizadas.

**Tabla 4.2:** Porcentajes de aciertos para calibración y validación, con cada FO

Función Objetivo	Acierto	Porcentaje de aciertos (%)	
		Calibración (1961-1967)	Validación (1978-1991)
<b>RMSE</b>	Total (Promedio anual)	76.0	75.5
	Estiaje (Diciembre-Marzo)	67.6	83.8
	Recesión (Agosto-Noviembre)	85.3	69.1
	Llenado (Abril-Julio)	75.0	73.5
<b>TRMSE</b>	Total (Promedio anual)	82.4	64.7
	Estiaje (Diciembre-Marzo)	82.4	61.8
	Recesión (Agosto-Noviembre)	80.9	58.8
	Llenado (Abril-Julio)	83.8	73.5
<b>ROCE</b>	Total (Promedio anual)	82.4	82.4
	Estiaje (Diciembre-Marzo)	76.5	85.3
	Recesión (Agosto-Noviembre)	80.9	73.5
	Llenado (Abril-Julio)	89.7	88.2

## 4.2 Cálculo de pronósticos

De los datos de precipitaciones (Anexo A) y evapotranspiración (Anexo C), se calcularon los datos de las Tablas 4.3 y 4.4 que muestran la media de los terciles superior, central e inferior ordenados de mayor a menor para cada mes, para precipitaciones y evapotranspiración respectivamente.

**Tabla 4.3:** Valores de la media de precipitaciones (mm)

Categoría	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sobre N.	59.3	95.0	119.2	241.3	692.4	670.2	573.0	410.0	325.6	261.8	132.6	85.8
Normal	15.8	20.4	34.1	125.4	302.7	418.0	317.3	262.3	153.2	114.3	51.0	33.9
Bajo N.	2.9	6.2	8.1	45.2	114.6	228.7	185.0	139.5	68.4	48.6	18.6	6.2

**Tabla 4.4:** Valores de la media de evapotranspiración (mm)

Categoría	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sobre N.	122.7	98.0	79.7	49.6	34.9	23.5	21.4	26.7	38.1	60.6	85.3	112.6
Normal	111.4	86.6	70.3	44.8	29.4	19.6	18.2	23.4	34.0	53.6	76.9	104.1
Bajo N.	104.8	81.6	65.7	39.7	25.7	14.4	14.9	19.3	30.2	50.2	69.8	95.7

Con los datos anteriores y los mapas de pronósticos obtenidos del IRI., se hizo un pronóstico desde cada mes registrado a un horizonte de uno hasta seis meses para el período 2004 a 2010 según se muestra en el Anexo D.

Con los pronósticos (precipitaciones y evapotranspiración), los caudales en la estación Río Chillán en Esperanza N°2 y los parámetros definidos se usó MCAT., así se obtuvieron bandas de incertidumbre de caudales pronosticados de uno hasta 6 meses.

Los datos de porcentajes de acierto para las tres funciones objetivo utilizadas en este estudio se muestran en las tablas del Anexo F.

## 4.3 Aciertos de las predicciones

La Figura 4-12 muestra los porcentajes de aciertos de los promedios mensuales obtenidos de la comparación de la banda de caudales simuladas y los caudales registrados por la estación Río Chillán en Esperanza N°2 y para las funciones objetivo RMSE, TRMSE y ROCE.

De la Figura 4-12 (A), se observa que desde el mes de noviembre se presentan los pronósticos con mayores porcentaje de acierto promedio a seis meses con la FO RMSE (63.9%), el porcentaje de acierto promedio a un mes es mayor desde los meses de enero y diciembre con un 85.7%.

Desde marzo y abril se presentan los porcentajes de aciertos de pronóstico de caudales más bajos para los meses que siguen desde uno hasta seis meses.

En la Figura 4-12 (B), utilizando la FO TRMSE se observa que desde el mes de noviembre se presentan los pronósticos con mejor porcentaje de acierto a seis meses con un 47.2%, para el pronóstico a un mes el porcentaje de acierto es mayor desde el mes de febrero con un 85.7%. Desde marzo se presentan los porcentajes de aciertos de pronóstico de caudales menores para los seis meses que siguen y para el pronóstico a un solo mes el porcentaje de acierto de las predicciones menor fue desde el mes de abril con un 4.8%.

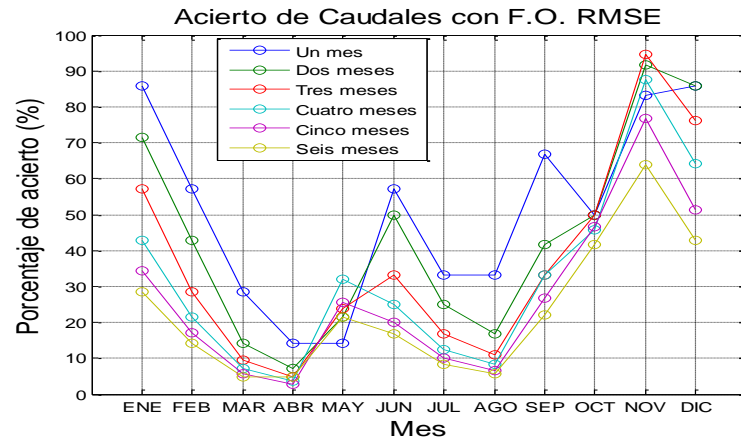
De la Figura 4-12 (C), utilizando la FO ROCE se observa que desde el mes de noviembre se presentan los pronósticos con mejor porcentaje de acierto a seis meses con un 75% de acierto, el porcentaje de acierto a un mes es mayor desde los meses de enero y diciembre con un 100% de acierto.

Desde marzo se presentan los porcentajes más bajos de aciertos de pronóstico de caudales para los meses posteriores.

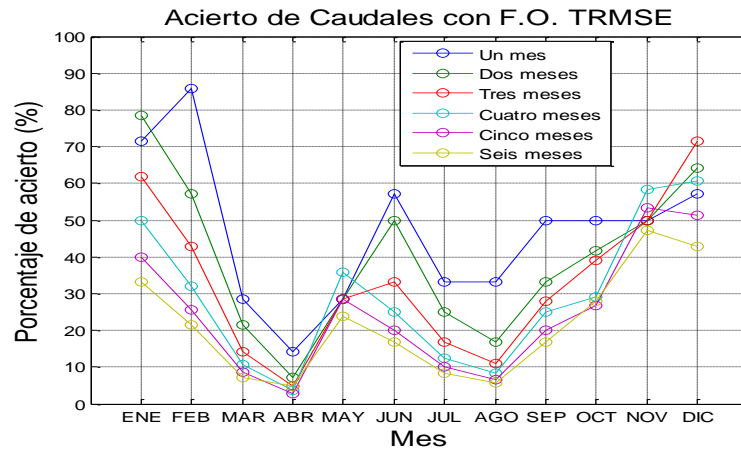
En las Tablas G.4, G5 y G6 (Anexo G) se muestran los vales de los porcentajes de acierto promedio para cada mes utilizando las funciones objetivo RMSE, TRMSE y ROCE.

Al comparar la FO RMSE y TRMSE se observa que los porcentajes de acierto en estiaje son mayores utilizando la función TRMSE, ya que esta función objetivo se basa en periodos bajos de flujo, por lo tanto representa mejor los caudales en estiaje que la función RMSE, en cambio la FO RMSE mostró mejores porcentajes de acierto en periodo de recesión.

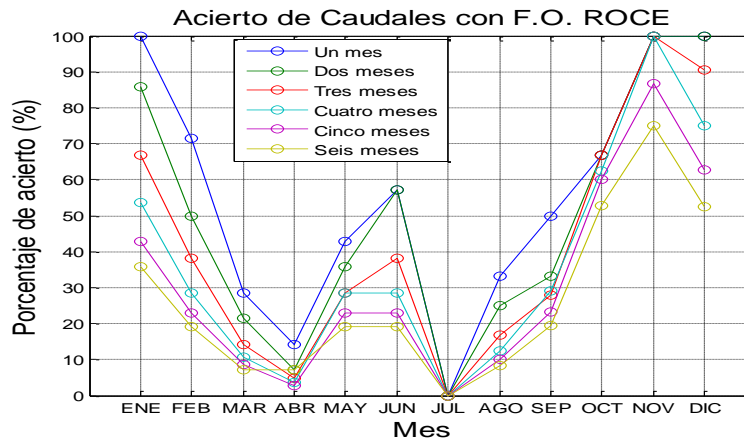
Para la FO ROCE se observó que los porcentajes de acierto son mayores en comparación a las otras funciones, ya que basa en el balance global hídrico.



(A)

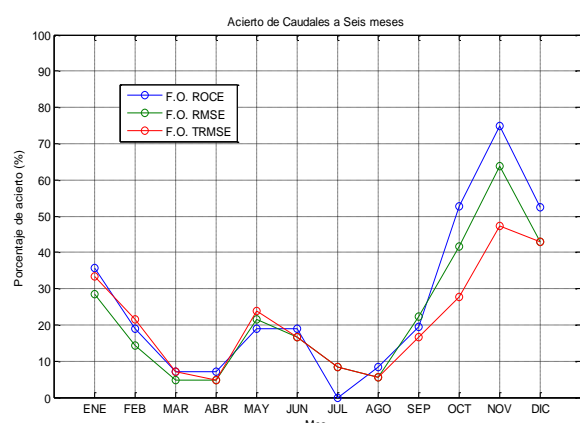
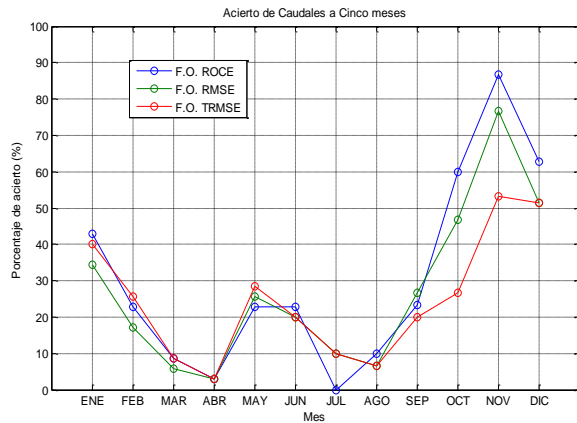
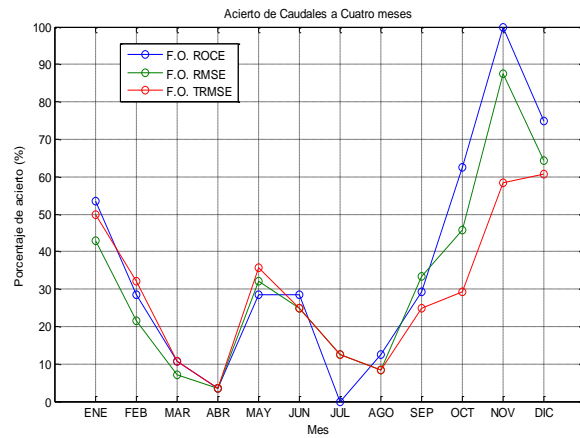
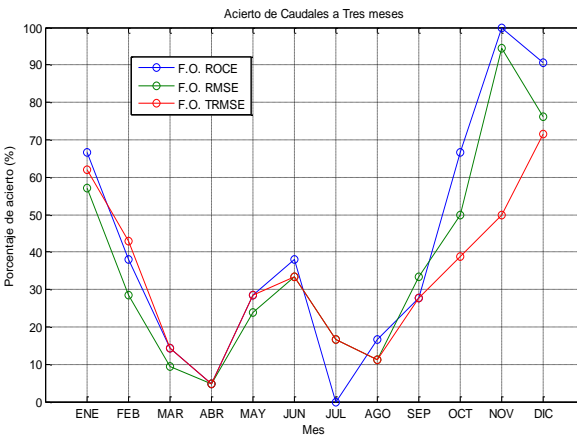
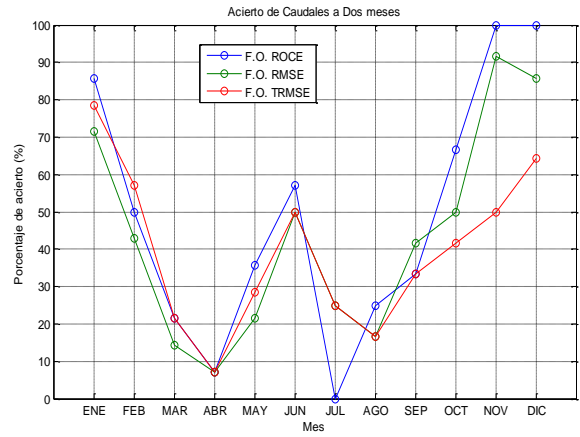
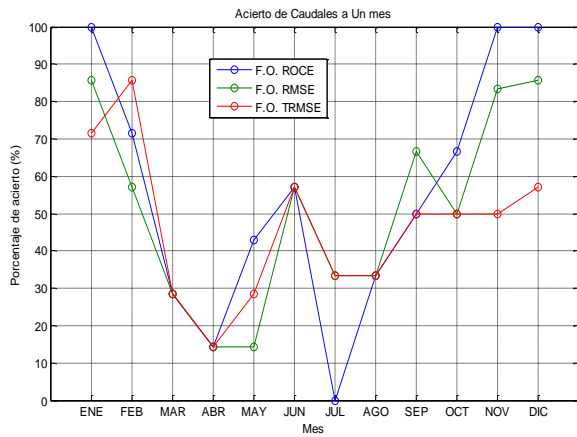


(B)



(C)

**Figura 4–12** Porcentajes de acierto de caudales para cada mes obtenidos del promedio de los años 2004 al 2010, utilizando la F.O. RMSE (A), TRMSE (B) y ROCE (C)



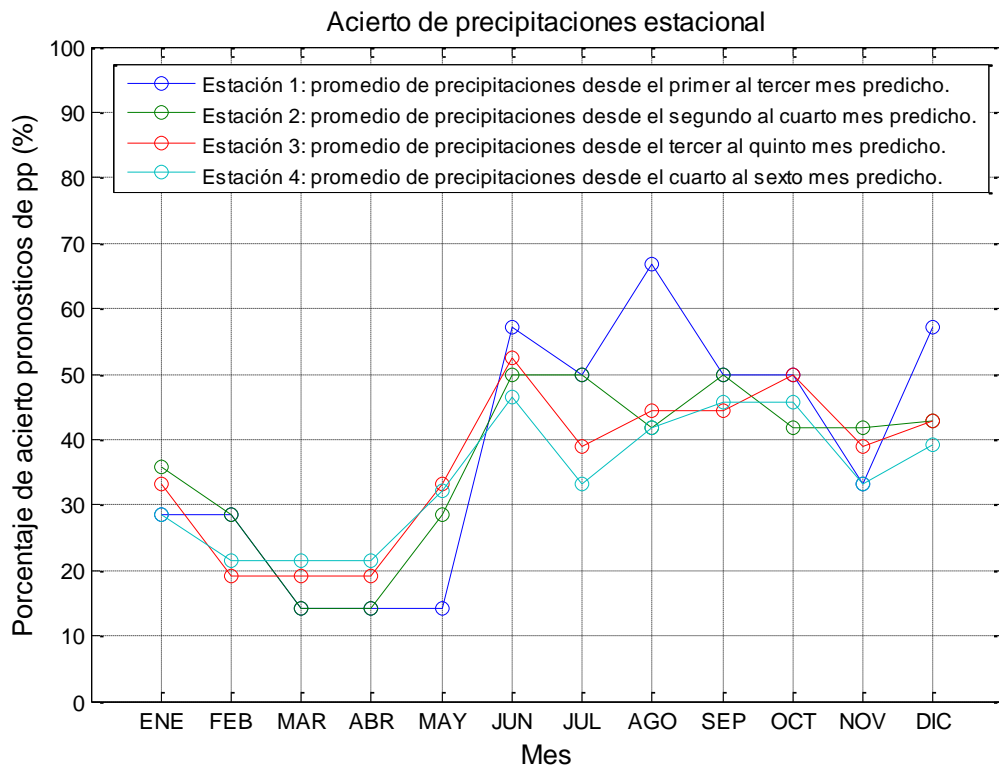
**Figura 4-13** Porcentajes de acierto de caudales desde uno hasta seis meses obtenidos del promedio de los años 2004 al 2010, para cada F.O.

La Figura 4-13 muestra los porcentajes de aciertos mensuales de los caudales simulados, comparando las tres funciones objetivo utilizadas, con porcentajes de aciertos de pronóstico a un mes hasta los seis meses. Desde los meses de enero, noviembre y diciembre se observa que la FO que presenta los mejores porcentajes de acierto para todas las variaciones temporales es la ROCE llegando al 100% de aciertos desde noviembre, esta misma FO es la que presenta el peor porcentaje de acierto desde el mes de julio con 0%.

Desde el mes de julio la FO TRMSE fue la que presentó mejor acierto en comparación a RMSE y ROCE para el pronóstico desde uno a seis meses.

Con respecto a los porcentajes de acierto de caudales se puede apreciar que estos empiezan a disminuir desde noviembre a abril y aumentan desde agosto a noviembre, esto se da para la predicción a uno hasta los seis meses.

La predictibilidad es mayor en recesión que en llenado lo que se debe a la imprecisión en las predicciones de precipitaciones debido a que estas presentan una mayor variabilidad.



**Figura 4-14** Porcentajes de acierto de pronósticos de precipitación estacional para los años 2004-2010.

Figura 4-14 muestra los porcentajes de acierto de pronósticos de precipitaciones estacionales desde cada mes, donde una estación agrupa tres meses. Por ejemplo la primera estación para la predicción desde enero es, febrero, marzo y abril, la segunda marzo, abril y mayo, de igual modo para la tercera y cuarta estación. La Tabla G.7 muestra todas las estaciones para cada mes.

Desde enero a mayo se observan los aciertos más bajos y desde junio a diciembre los más altos, esto se debe a que desde enero se a mayo se realizó el pronóstico para meses que presentan la mayor variabilidad de precipitaciones como el caso de abril mayo y junio y julio. De la Figura 4-14 también se observa que ninguna predicción de precipitaciones estacionales logró un porcentaje de aciertos mayor al 70 %. Por lo tanto los pronósticos de precipitaciones no resultan totalmente adecuados para poder hacer una predicción de caudales.

De los resultados obtenidos se puede observar que los mayores porcentajes de acierto son obtenidos desde los meses que predecirán periodos de estiaje, como el caso de noviembre, siendo este mes desde el cual se obtuvieron los porcentajes de aciertos mayores, ya que las predicciones fueron para los meses de diciembre a abril, por lo que está considerando los cuatro meses de estiaje.

De lo anterior se puede comprobar que el modelo realiza mejores predicciones para los meses de estiaje ya que las predicciones desde noviembre son superiores al 80% desde uno hasta cuatro meses y en dos de las tres funciones objetivo (RMSE y ROCE) utilizadas en el estudio. De igual forma se puede observar que los porcentajes de acierto para las predicciones realizadas para llenado disminuyen, esto comienza a ocurrir desde enero a abril en donde por cada mes considerado de llenado los porcentajes de acierto van disminuyendo. Lo anterior tiene relación con la variabilidad estacional de precipitaciones dado que los meses con mayor variabilidad son los de periodo de llenado, luego los de recesión y finalmente los meses del periodo de estiaje presentan la menor variabilidad en precipitaciones. Considerando lo anterior, para realizar un pronóstico hay mayor probabilidad de tener éxito si se realiza para un periodo en que la variabilidad de precipitaciones es menor ya que el rango donde se están pronosticando caudales es más acotado. Para la variabilidad de la evapotranspiración no es posible distinguir que esta afecte a los porcentajes de acierto en los pronósticos de caudales

ya que no presenta cambios significativos de variabilidad mes a mes, como se observa en la Figura 4-17.

Al analizar los porcentajes de aciertos por año se observó que el año 2006 arrojó la menor cantidad de aciertos para las tres funciones objetivo, lo que no debería ocurrir por la variabilidad de las precipitaciones, ya que este año corresponde a un año niña como se puede ver en el Anexo H, lo que indicaría que las precipitaciones para este año serían bajas y se esperaría una baja variabilidad en las precipitaciones. Pero del *Boletín Climático del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile* desde su publicación de mayo de 2006, indica que el fuerte déficit pluviométrico que se registraba en la región central de Chile se anuló bruscamente a principios de junio como resultado de intensas precipitaciones asociadas al paso de un sistema frontal lo que se prolongó durante los meses de llenado, también se pudo observar cómo se presentó el inicio del periodo de recesión en donde la precipitación acumulada durante agosto de 2006 fue deficitaria, con excepción de la zona comprendida entre las regiones VI y VIII donde llovió más que el promedio climatológico. Dado lo anterior, se puede explicar lo bajo o nulo de los porcentajes de aciertos para el año 2006, para el cual se pronosticaba un año seco y sin embargo se registraron episodios de intensas precipitaciones

#### 4.4 Variabilidad de los datos

Las Figuras 4-15 a 4-20 muestran la variabilidad mensual de precipitaciones, temperaturas, evapotranspiración y caudales.

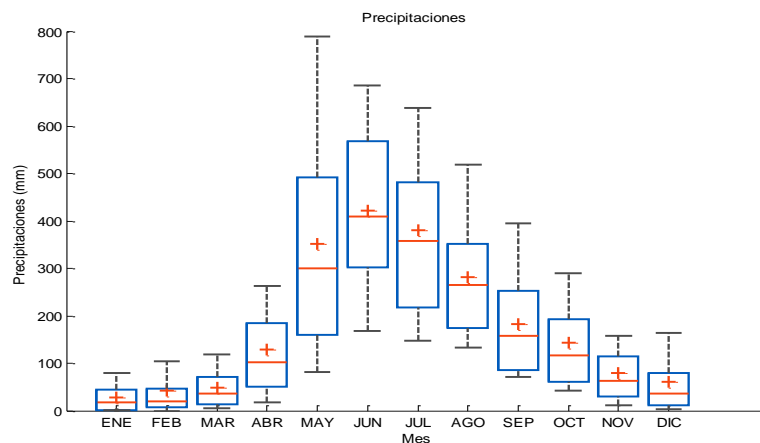
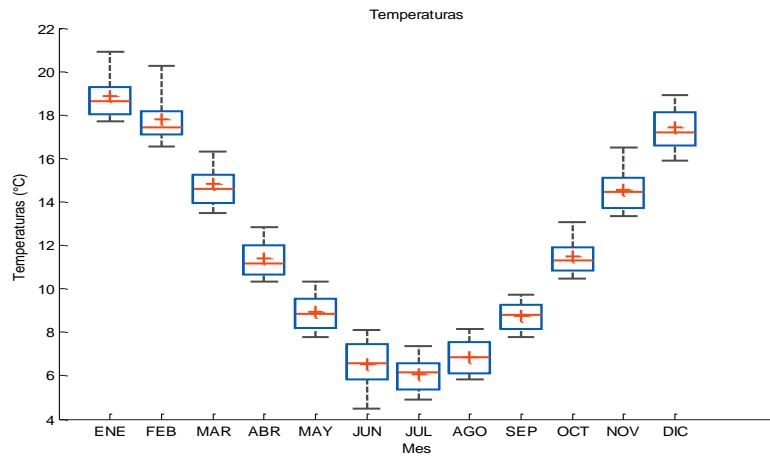


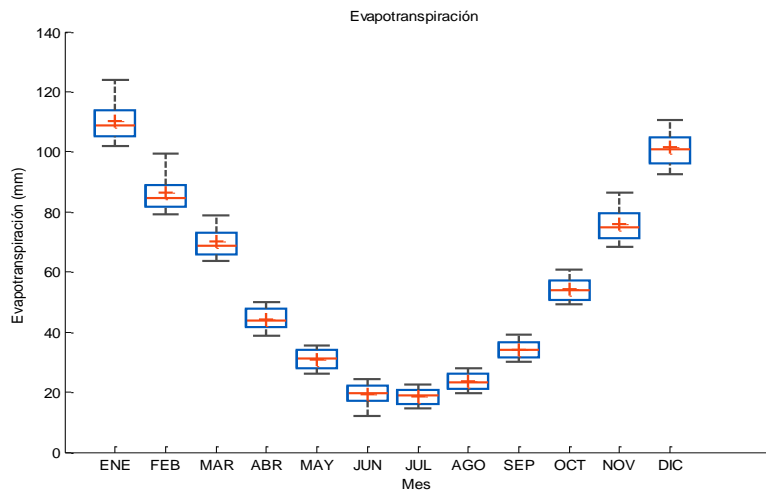
Figura 4-15 Gráfico mensual de precipitaciones (mm) para el periodo de 1961-2010.

En la Figura 4-15 se muestra la variabilidad mensual de las precipitaciones desde el año 1961 al 2010, se puede ver que los meses que presentaron mayor variabilidad de precipitaciones fueron mayo, junio y julio. Los meses que presentaron una variabilidad más baja son los meses de enero y febrero.

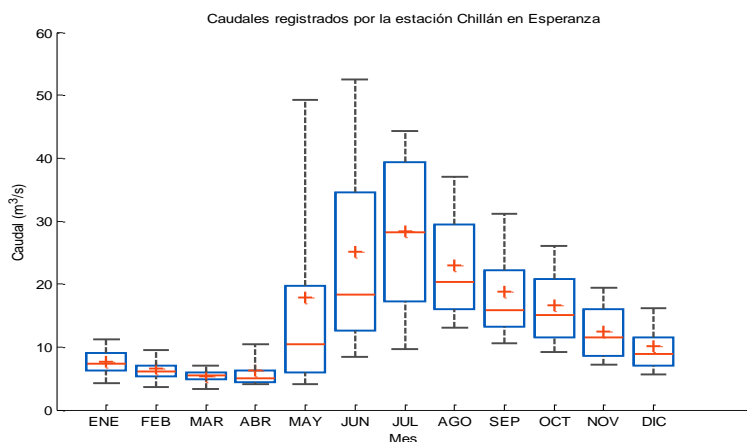
En la Figura 4-16 se puede ver la variabilidad mensual de las temperaturas desde el año 1961 al 2010, se puede ver que la variabilidad es similar para todos los meses del año, lo mismo ocurre con la Figura 4-17 que muestra la variabilidad de la evapotranspiración.



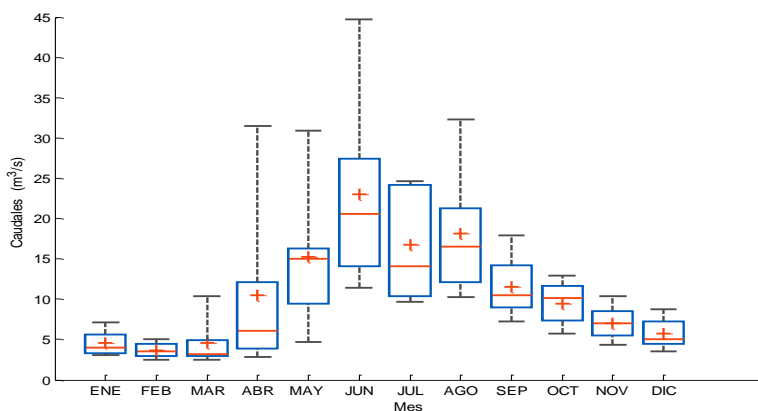
**Figura 4-16** Gráfico mensual de temperaturas (°C) para el periodo de 1961-2010.



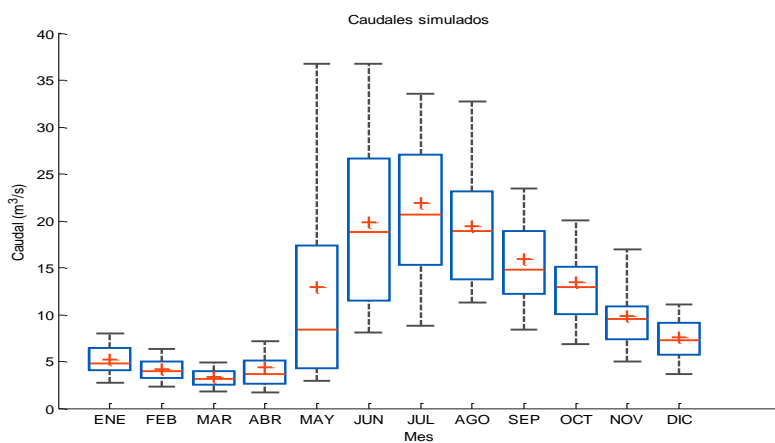
**Figura 4-17** Gráfico mensual de evapotranspiración (mm) para el periodo de 1961-2010.



**Figura 4-18** Gráfico mensual de caudales registrados ( $m^3/s$ ) por la estación Chillán en Esperanza para el periodo de 1961-1994.



**Figura 4-19** Gráfico mensual de caudales registrados ( $m^3/s$ ) por la estación Chillán en Esperanza N°2 para el periodo de 2004-2010.



**Figura 4-20** Gráfico mensual de caudales simulados ( $m^3/s$ ) para el periodo de 1961-2010.

La Figura 4-18 muestra la variabilidad mensual de los caudales registrados por la estación Chillán en Esperanza para el periodo de 1961-1994. Se observa que los meses que presentan mayor variabilidad de caudales son mayo, junio y julio. Los meses que presentaron una variabilidad más baja son enero, febrero y marzo.

La Figura 4-19 muestra la variabilidad mensual de los caudales registrados por la estación Chillán en Esperanza N°2 para el periodo de 2004-2010. Donde se observa un comportamiento similar al caso anterior.

La Figura 4-20 muestra la variabilidad mensual de los caudales simulados para el periodo de 1961-2010. De igual forma que en las dos figuras anteriores se puede ver que los meses que presentaron mayor variabilidad de caudales fueron mayo, junio y julio. Los meses que presentaron una variabilidad más baja son los meses de enero, febrero y marzo. La variabilidad de caudales aumenta desde abril y comienza a disminuir en agosto.

De la variabilidad de caudales se observa que los caudales ya sean registrados o simulados presentan una variabilidad menor desde septiembre y esta va disminuyendo hasta la variabilidad más baja en marzo, para luego volver a aumentar en abril. Se observa que la variabilidad de los caudales tiene directa relación con la variabilidad de las precipitaciones ya que es en los mismos meses donde se presentan las variabilidades bajas y altas, para la cuenca de estudio no se presenta influencia de la evapotranspiración.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

De la calibración y validación se obtuvo que las bandas de incertidumbre cumplen con porcentajes de acierto sobre el 75% para las tres funciones objetivos utilizadas (RMSE, TRMSE y ROCE), por lo tanto el rango de valores obtenidos para los parámetros del modelo son correctos para realizar un pronósticos de caudales desde uno hasta seis meses.

Al cuantificar la predictibilidad del modelo hidrológico estacionario se obtiene que los porcentajes de acierto de los pronósticos son superiores al predecir a un mes y disminuye al aumentar la ventana de predicción. Lo anterior se observa con los pronósticos para las tres FO utilizadas en el estudio. Las FO RMSE y ROCE entregan porcentajes de acierto que superan el 80% desde los meses de enero, noviembre y diciembre. Para los meses de llenado los porcentajes de acierto son mayores al utilizar las FO RMSE y TRMSE, que entregaron porcentajes de acierto iguales para junio, julio y agosto, a pesar de no superar el 60%, superaron hasta en un 33% a la FO ROCE en el mes de Julio. Las predicciones desde los meses de llenado no superan el 40% de acierto en promedio.

Al comparar los períodos en los que se ajusta el modelo hidrológico estacionario y los porcentajes de acierto de las predicciones en estos periodos, se observa que los porcentajes de acierto comienzan a disminuir desde noviembre a abril y a incrementarse desde agosto a noviembre. Para las predicciones realizadas desde los meses de abril a agosto los porcentajes de acierto varían aumentando y disminuyendo. Se concluye que las predicciones realizadas con el modelo hidrológico estacionario desde el periodo de estiaje utilizando la FO RMSE a tres meses tienen en promedio un 70% de confianza, utilizando la FO TRMSE las predicciones a dos meses tienen en promedio un 59% de confianza y utilizando la FO ROCE las predicciones a tres meses tienen en promedio un 81% de confianza.

La alta variabilidad de precipitaciones causa que los porcentajes de acierto de precipitaciones sean bajos, lo que lleva finalmente a que los porcentajes de acierto de caudales disminuyan, por lo tanto las deficiencias en las predicciones se deben a que los pronósticos de precipitaciones son deficientes.

La capacidad predictiva del modelo hidrológico estacionario está condicionada por la calidad de los pronósticos de precipitaciones, donde los mejores porcentajes de aciertos de

predicciones se obtienen desde los meses que predecirán períodos de estiaje, ya que es en estos períodos las simulaciones no son influenciadas por la variabilidad de las precipitaciones. Por lo tanto se considera el modelo hidrológico estacionario y el método utilizado útil para predecir caudales medios mensuales y para la planificación de recursos hídricos en una cuenca andina con predicciones desde el período de estiaje.

## CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

Barnston, T. (2003). Predicciones climáticas del IRI para los países andinos. Servicios de Información y Predicción del Clima y Aplicaciones Agrometeorológicas para los países Andinos, 46.

Figueroa, R., Palma, A., Ruiz, V., Niell, X. (2007). Análisis comparativo de índices bióticos utilizados en la evaluación de las aguas en un río mediterráneo de Chile: río Chillán, VIII Región. *Revista Chilena de Historia Natural*, pp. 225-242.

Hartmann, H. C., Pagano, T. C., Sorooshian, S., & Bales, R. (2002). Confidence builders: Evaluating seasonal climate forecasts from user perspectives. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(5), 683-698.

Henríquez C. (2009). El proceso de urbanización en la cuenca del río Chillán y su capacidad adaptativa ante precipitaciones extremas. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. *Estudios geográficos*, Vol. LXX, 266, pp. 155-179.

Hornberger, G. y Spear, R. (1981). An approach to the preliminary analysis of environmental systems, *J. Environ. Manage.* 12, pp.7-18.

Mardones, M., Hernández, H., Cristi, O., Sánchez, A., Carrasco, P., Millán, J. y Peña, L. (Eds.). (2001). Geografía VIII Región del BíoBío. Santiago: Instituto Geográfico Militar (IGM).

Montecinos, A., Díaz, A. y Aceituno, P. (2000). Seasonal Diagnostic and Predictability of Rainfall in Subtropical South America Based on Tropical Pacific SST. *Journal of Climate*, Vol. 13, No 4, pp. 746-758.

Montecinos, A. y Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate*, Vol. 16, No 2, pp. 281-296.

Muñoz, E. (2010). Desarrollo de un modelo hidrológico como herramienta de apoyo para la gestión del agua. Aplicación a la cuenca del río Laja, Chile. *Tesis Master*, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, España.

Muñoz, E. (2011). Perfeccionamiento de un modelo hidrológico: aplicación de análisis de identificabilidad dinámico y uso de datos grillados. *Tesis Doctoral*, Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, Chile.

Muñoz E., J.L. Arumí, D. Rivera y F. Daroch (2013b). Modelo hidrológico MHM con la plataforma de análisis de incertidumbre MCAT. *XXI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*, Concepción, Chile.

SERNAGEOMIN (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Publicación Geológica Digital*, No. 4. Santiago.

Toledo, C. (2014). Dinámica de los procesos hidrológicos en la cuenca del Río Chillán. Proyecto de título, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.

Van Werkhoven, K., T. Wagener, P. Reed y Y. Tang (2008), Characterization of watershed model behavior across a hydroclimatic gradient. *Water Resour.*

Wagener, T., Boyle, D. P., Lees, M. J., Wheater, H. S., Gupta, H. V., y Sorooshian, S. (2001). A framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), pp. 13–26.

Wagener, T., y Wheater, H. S. (2002). A generic framework for the identification of parsimonious rainfall-runoff models. *In Integrated Assessment and Decision Support* (Proc. First Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society). Vol. 1, pp. 434-439.

Wagener, T. y Kollat, J. (2007). Numerical and visual evaluation of hydrological and environmental models using the Monte Carlo analysis toolbox. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 22, pp. 1021-1033.

Willmott, C. y Matsuura, K. (2012) Terrestrial air temperature and precipitation: monthly and annual time series (1900–2010) (Version 3.01). Center for Climatic Research. University of Delaware, Newark, DE, USA. <http://climate.geog.udel.edu/~climate/>, Base de datos consultada en Noviembre, 2013.

Zuñiga, R. (2011). Interacción agua superficial-subterránea en una cuenca andina de Chile centro-sur. Vulnerabilidad ante escenarios de variabilidad climática. Proyecto de título, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.

## ANEXO A: Datos de Precipitación

Tabla A.1: Precipitación Media Mensual Ponderada (mm).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1961	82.90	3.40	82.97	16.88	112.71	304.66	459.96	306.27	426.20	113.21	1.47	2.88
1962	3.04	0.00	20.57	72.36	82.30	409.03	73.99	231.18	99.01	98.86	16.56	1.42
1963	1.17	7.45	47.66	113.40	159.56	324.61	536.26	600.46	316.28	185.03	148.13	23.38
1964	52.76	6.74	37.67	32.62	143.10	232.34	216.64	341.75	80.49	53.91	89.41	180.09
1965	49.80	103.48	6.41	349.20	357.45	344.71	607.23	518.24	84.21	258.04	157.92	101.47
1966	0.00	5.57	9.47	206.82	162.81	621.08	445.88	370.80	180.01	88.05	55.90	392.85
1967	148.10	44.60	28.16	29.98	424.73	111.09	149.97	229.95	166.73	231.26	69.95	37.04
1968	0.41	47.39	70.48	71.75	34.37	157.81	146.99	174.61	161.84	106.34	126.19	177.48
1969	0.85	59.71	44.81	258.84	255.34	593.16	358.13	305.42	228.04	128.95	47.89	9.29
1970	30.81	2.70	46.75	74.37	183.84	358.92	502.13	243.61	80.05	124.78	52.53	168.23
1971	14.24	59.04	3.95	52.15	468.36	411.45	381.26	260.97	138.08	100.96	31.79	142.81
1972	32.35	0.96	120.35	43.58	961.89	449.16	290.81	515.17	368.74	365.91	115.44	5.29
1973	1.26	9.93	39.05	57.52	434.62	346.40	363.62	133.39	47.54	227.18	5.58	17.47
1974	64.21	3.51	35.59	0.00	389.18	821.44	193.75	116.50	103.01	39.23	62.28	54.31
1975	0.83	127.55	14.06	183.55	389.78	483.50	475.89	226.31	100.88	61.48	120.48	46.07
1976	35.12	31.14	35.66	17.37	200.76	496.15	174.52	174.89	218.43	244.92	105.99	105.47
1977	48.28	0.00	42.03	96.54	359.40	493.95	831.24	289.50	155.21	187.19	219.75	33.23
1978	4.26	18.84	0.00	0.19	334.92	274.69	994.50	133.03	349.67	255.03	222.81	6.10
1979	44.88	29.98	6.40	96.47	362.34	142.60	630.87	571.39	265.44	59.81	236.45	162.91
1980	0.41	327.93	67.19	533.56	676.55	581.53	455.68	217.97	122.21	0.64	81.03	85.27
1981	79.71	17.40	107.06	176.19	1010.47	216.65	277.51	218.20	148.42	86.77	33.41	28.48
1982	73.92	83.75	72.45	67.45	491.02	759.85	637.58	386.03	491.64	398.34	66.07	3.16
1983	87.98	15.73	1.14	129.01	282.26	512.00	481.52	250.41	221.27	54.59	7.52	15.20
1984	15.89	104.53	51.50	83.97	597.98	363.18	595.48	198.36	266.17	249.56	30.26	12.50
1985	51.42	4.58	40.04	180.32	498.07	232.30	331.40	83.88	207.53	334.96	85.38	0.14
1986	15.20	32.68	88.82	251.41	814.01	599.55	184.48	318.91	92.51	119.32	361.04	10.80
1987	0.00	10.71	126.21	45.54	232.89	204.02	688.89	354.48	252.65	182.89	41.64	10.74
1988	22.39	0.00	89.97	79.93	105.07	431.25	287.99	441.20	90.63	89.86	26.38	36.28
1989	17.61	20.53	20.74	2.54	72.82	423.17	368.46	269.26	78.84	61.39	20.98	79.43
1990	20.14	33.53	177.31	160.10	197.66	158.87	187.00	210.02	394.02	65.60	64.74	6.73
1991	29.40	6.87	13.23	218.85	788.42	301.98	380.06	99.93	241.15	147.69	43.56	157.54
1992	0.31	23.91	91.04	234.66	878.94	498.40	182.53	158.25	147.44	145.40	74.93	74.58
1993	20.58	0.00	59.15	227.78	531.11	728.32	287.29	293.05	73.81	146.06	55.52	72.80
1994	18.02	18.86	13.55	263.51	181.03	492.35	469.67	59.36	262.25	140.59	44.21	70.93
1995	0.42	15.50	19.19	220.09	110.79	604.69	546.09	298.78	70.90	107.36	11.43	0.00
1996	7.66	34.26	117.84	137.33	130.57	305.49	120.82	278.92	41.89	50.75	80.63	27.63
1997	19.38	46.92	6.20	327.83	234.49	686.14	275.37	167.99	258.91	290.39	144.86	31.20
1998	5.82	9.41	24.66	110.84	182.22	167.67	111.35	145.48	85.74	1.45	30.77	43.11
1999	8.95	46.78	6.01	51.52	317.95	457.10	110.64	395.35	407.64	39.59	11.33	7.64
2000	0.99	223.97	6.30	98.26	140.91	1001.19	212.26	301.85	460.02	74.74	42.85	50.62
2001	119.29	14.51	14.46	122.98	630.72	314.99	971.69	324.64	57.64	51.20	77.44	0.00
2002	0.24	249.93	211.16	104.54	419.29	360.03	270.65	579.59	174.82	439.92	116.70	47.96
2003	42.50	0.03	5.09	23.68	169.94	598.31	248.06	152.12	180.73	159.79	113.88	58.60
2004	0.00	17.25	110.31	311.94	71.28	419.02	406.30	168.13	177.31	192.90	126.37	87.05
2005	8.38	0.00	43.41	23.39	533.87	568.33	394.14	556.73	79.38	43.23	92.55	59.80
2006	66.07	20.66	27.09	155.57	219.81	643.85	538.52	304.47	207.79	199.62	6.94	143.05
2007	15.43	78.67	38.75	115.90	78.26	178.93	358.21	171.26	77.83	76.10	10.51	35.37
2008	9.69	18.61	16.59	119.31	640.56	206.08	300.59	351.80	87.02	43.79	30.33	10.39
2009	5.41	17.95	3.86	62.51	449.55	395.01	222.69	391.25	105.14	169.47	127.01	23.34
2010	17.87	47.34	11.16	11.69	85.71	340.57	305.87	188.59	30.88	83.53	43.36	54.59

## ANEXO B: Datos de Caudales

**Tabla B.1:** Caudal Medio Mensual Estación Río Chillán en Esperanza Reconstruido  
(m<sup>3</sup>/s).

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1961	7.39	4.94	6.01	4.22	4.03	12.55	36.01	22.5	41.6	30.94	12.89	8.39
1962	7.47	6.03	4.92	4.43	4.07	13.18	9.07	13.53	8.7	12.25	6.01	4.55
1963	3.76	3.55	3.24	3.84	4.57	8.95	25.25	32.56	29.57	22.63	17.51	15.8
1964	11.87	7.2	5.69	4.28	4.59	8.1	10.39	15.95	14.9	8.57	9.05	13.28
1965	8.48	7.62	5.95	17.58	17.49	24.61	39.14	42.32	15.71	22.08	16.41	16.66
1966	9.6	7.1	5.74	6.8	9.61	28.8	39.35	20.86	18.92	16.24	13.34	9.86
1967	14.12	9.48	7.07	5.57	15.38	10.17	10.98	18.85	16.46	19.7	13.99	9.02
1968	6.24	6	5.1	4.42	3.62	4.42	5.47	8.71	6.79	6.94	7.99	5.95
1969	4.33	3.67	3.47	4.94	16.13	52.16	29.64	29.95	24.75	12.85	10.35	8.58
1970	7.45	6.13	5.26	4.75	5.95	18.04	22.54	24.51	12.66	12.68	9.95	10.61
1971	10.7	6.96	5.54	4.62	21.48	19.12	37.17	29.09	15.54	14.6	7.35	8.12
1972	8.51	6.8	6.27	5.04	71.99	52.91	25.1	52.36	33.32	30.03	21.96	11.64
1973	8.37	6.83	5.9	5.02	17.9	15.71	28.4	15.55	9.62	15.91	9.43	6.9
1974	6.92	5.93	5.38	4.41	9.13	34.52	22	16.4	13.26	11.45	8.49	7.46
1975	6.69	7.67	5.51	7.27	19.65	35.45	42.84	20.01	13.44	12.99	13.08	9.11
1976	6.97	5.41	4.95	4.43	4.43	15.16	10.12	12.6	14.22	21.45	14.19	8.88
1977	6.97	5.41	4.95	4.41	9.6	18.52	48.31	29.9	18.94	22.81	16.59	11.78
1978	7.76	6.51	6.08	4.49	6.49	12.02	53.29	15.81	24.85	17.99	22.78	11.5
1979	7.8	6.42	5.69	5.07	9.28	6.5	29.69	40.16	27.31	13.8	16.11	18
1980	9.52	18.4	6.48	24.94	48.24	50.67	41.5	26.65	12.2	9.5	7.46	7.97
1981	7.7	5.93	5.22	6.73	54.75	29.88	23.61	19.91	16.87	10.8	7.82	6.73
1982	5.54	6	5.16	4.52	17.96	39.29	44.3	29.43	44.34	39.74	16.53	11.35
1983	10.75	9.43	7.11	6.29	8.24	30.95	25.81	18.19	14.59	13.08	9.14	6.61
1984	5.73	5.29	4.29	3.78	11.4	13.27	38.53	13.36	20.03	20.88	15.21	10.51
1985	9.02	6.63	5.3	5.39	18.51	14.19	27.99	10.25	13.02	16.54	13.61	6.96
1986	4.94	4.57	4.11	6.42	38.14	62.15	17.08	25.25	14.68	11.54	24.42	31.3
1987	7.3	6.35	6.25	5.35	6.27	13.14	44.35	29.97	15.96	19.58	10.13	7.37
1988	6.42	6.02	5.9	5.03	4.71	14.96	17.26	34.58	15.09	10.57	8.65	6.21
1989	5.62	4.71	3.92	3.28	2.96	11.79	11.41	17.52	11.3	8.91	6.94	5.28
1990	4.05	3.9	4.46	5.94	8.99	8.61	7.37	13.46	22.25	11.77	6.64	4.36
1991	3.53	3.34	3.08	4.55	50.58	33.43	39.93	20.59	27.32	20.81	12.48	10.8
1992	7.34	3.47	2.93	6.03	48.07	45.5	25.16	16.49	19.33	18.55	15.94	14.22
1993	12.89	11.23	9.41	11.34	22.73	67.26	31.85	28.59	16.91	10.63	8.86	8.85
1994	9.27	8.41	7.27	9.8	12.21	25.97	42.06	17.33	13.03	15.63	10.68	9.4

**Tabla B.2:** Caudal Medio Mensual Estación Río Chillán en Esperanza N°2 Reconstruido  
(m<sup>3</sup>/s).

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2004	3.20	2.83	11.12	4.77	15.70	20.56	14.10	16.48	11.47	11.86	6.99	4.97
2005	3.99	3.52	3.20	6.11	14.98	27.90	24.22	33.79	18.34	13.09	10.60	8.84
2006	7.26	5.17	5.20	8.68	33.03	47.20	24.66	18.95	15.13	10.10	8.99	7.81
2007	6.00	4.64	4.18	3.61	4.27	14.09	10.26	10.12	9.88	7.22	5.38	4.32
2008	3.84	3.22	2.95	34.22	16.49	14.21	23.96	14.61	7.07	5.56	4.13	3.39
2009	3.04	2.47	2.36	13.24	14.57	26.16	10.60	22.08	10.51	10.96	7.27	5.56
2010	4.40	3.93	3.08	2.67	7.67	11.00	9.56	11.30	8.62	7.62	5.88	5.01

## ANEXO C: Datos de Temperatura

**Tabla C.1: Temperatura Media Mensual Ponderada (°C).**

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1961	17.33	17.37	14.52	11.24	9.88	5.22	6.59	8.17	8.23	11.89	14.10	17.03
1962	18.40	17.27	15.55	10.55	8.47	6.49	4.89	7.20	8.11	11.69	15.40	17.83
1963	18.23	17.90	14.02	12.28	7.77	5.72	6.72	7.65	8.03	11.34	12.82	16.90
1964	18.73	16.57	13.39	10.78	8.77	4.79	5.29	6.10	8.38	12.16	14.47	17.07
1965	19.30	18.15	15.99	10.85	7.77	8.89	6.16	6.07	7.78	10.69	14.17	16.07
1966	17.63	15.55	13.72	11.85	8.97	6.96	5.76	5.85	7.78	9.79	13.57	15.67
1967	17.93	16.00	13.85	10.48	9.27	3.29	4.49	5.23	7.45	10.86	13.67	16.85
1968	17.75	17.50	13.82	10.71	9.50	6.82	6.25	7.40	9.28	10.49	14.88	15.56
1969	18.35	15.85	13.47	11.08	8.37	6.29	6.26	6.20	8.48	9.56	13.20	16.85
1970	17.93	17.13	14.25	11.91	8.50	5.59	5.49	5.10	8.18	10.42	13.40	15.70
1971	16.80	16.07	13.25	9.53	8.47	5.34	6.82	6.07	8.18	11.29	14.50	16.10
1972	18.28	17.10	13.25	10.55	9.47	7.49	5.09	6.82	8.23	9.56	13.35	17.10
1973	18.16	16.91	14.38	10.36	8.13	7.30	6.12	7.10	9.31	11.55	14.98	17.71
1974	18.76	17.83	14.70	10.89	10.57	6.59	5.45	8.46	9.00	12.02	13.70	15.85
1975	17.99	16.88	13.97	11.84	9.27	7.55	5.82	6.45	9.60	12.21	13.45	16.19
1976	17.69	16.78	13.00	10.44	8.80	6.25	5.40	6.53	8.58	11.32	14.45	17.28
1977	18.85	17.43	14.35	11.99	9.83	7.22	6.29	7.10	9.44	12.05	13.93	17.23
1978	17.65	17.23	14.25	11.54	9.73	6.79	8.62	6.00	9.48	11.12	14.60	17.13
1979	17.85	17.10	13.97	10.51	9.13	4.97	6.17	8.05	7.73	10.75	13.65	16.65
1980	18.93	18.05	15.37	10.18	9.57	6.39	6.16	7.57	8.48	10.76	13.00	16.83
1981	18.20	17.60	15.17	13.35	11.25	7.46	7.36	7.27	8.80	10.96	13.50	16.25
1982	18.63	17.27	14.62	12.41	10.25	6.54	7.46	7.65	10.30	11.56	13.60	17.83
1983	19.17	17.77	15.17	12.25	8.15	4.51	5.34	6.66	7.83	11.99	15.10	17.85
1984	18.63	16.70	14.62	10.85	8.07	4.16	5.86	6.07	9.65	13.21	14.69	18.16
1985	18.03	21.20	18.07	12.67	9.73	8.76	6.59	7.15	10.13	12.88	16.84	18.69
1986	18.93	18.99	16.31	11.85	10.35	7.56	7.36	8.52	10.25	14.55	13.77	17.70
1987	20.02	20.56	18.45	13.20	8.22	7.45	7.86	8.81	8.85	13.88	16.52	18.59
1988	19.17	18.13	15.25	11.95	7.75	6.52	4.94	6.37	8.13	10.95	14.58	17.01
1989	18.85	18.48	14.07	11.58	8.17	7.35	6.19	6.77	8.63	11.42	14.85	17.65
1990	18.88	17.40	14.25	11.28	8.70	6.50	5.99	7.95	8.93	11.02	14.08	16.55
1991	18.33	17.80	15.30	12.41	9.73	6.55	6.26	6.10	9.21	10.49	14.03	15.90
1992	18.63	17.47	16.17	11.11	8.97	6.02	4.86	7.10	8.88	10.70	14.10	16.43
1993	19.04	18.23	15.87	11.58	8.50	7.49	5.26	6.65	8.38	11.32	14.00	16.58
1994	18.31	16.63	15.00	11.21	9.43	8.57	6.36	5.53	9.75	11.74	14.45	17.71
1995	18.21	16.83	13.90	12.31	9.13	7.07	4.82	5.93	8.54	11.12	14.03	18.14
1996	17.93	17.13	15.27	10.65	8.77	4.42	6.59	7.65	9.23	11.69	14.80	17.07
1997	19.68	17.13	14.80	13.21	10.65	7.91	7.02	7.37	9.50	10.91	13.95	16.60
1998	18.13	16.92	14.42	11.15	10.65	6.69	5.97	6.00	7.93	11.80	13.75	19.81
1999	20.91	17.38	13.95	10.73	8.90	6.59	5.46	7.47	9.35	12.85	16.61	18.91
2000	19.89	17.92	15.58	12.82	9.56	7.39	5.16	7.99	8.97	13.05	15.06	19.04
2001	17.71	17.91	13.80	9.91	8.57	6.22	6.25	6.70	8.03	11.52	15.09	20.90
2002	20.91	19.83	14.07	10.31	8.43	4.29	5.72	6.90	8.78	11.12	14.47	17.82
2003	20.25	18.66	15.00	10.81	8.05	8.42	5.35	6.57	8.91	11.65	16.35	17.02
2004	21.14	17.10	15.17	11.88	7.69	7.52	6.66	6.95	8.78	11.12	15.54	18.62
2005	20.05	21.38	14.75	10.21	8.20	6.52	6.42	6.65	8.10	10.66	16.49	18.52
2006	18.24	17.90	13.75	10.86	8.30	8.09	7.12	7.17	8.78	11.02	16.14	17.85
2007	20.05	18.56	14.72	10.81	7.15	4.62	4.89	3.77	7.88	10.82	16.09	18.52
2008	21.82	21.71	17.98	10.61	8.17	6.19	7.12	6.50	8.95	11.86	17.66	19.99
2009	21.81	20.26	14.97	12.48	9.00	5.82	5.29	7.63	7.43	10.95	12.25	18.52
2010	20.85	18.55	19.03	12.97	9.42	7.96	6.04	8.51	11.12	13.28	16.02	17.37

**Tabla C.2: Evapotranspiración Potencial Media Mensual Ponderada (mm).**

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1961	100.12	84.52	68.96	44.41	35.65	14.99	21.25	30.00	32.42	57.79	73.88	99.58
1962	107.29	83.53	74.51	40.73	29.18	19.26	14.50	25.33	31.44	56.10	81.78	104.86
1963	107.01	88.11	66.62	49.99	27.02	17.09	22.14	28.10	31.95	55.12	66.38	99.25
1964	111.11	80.81	63.64	43.26	31.76	14.14	16.98	21.84	34.21	60.68	77.52	101.10
1965	113.88	88.84	77.25	42.25	26.32	28.44	19.34	20.62	29.98	50.36	73.94	92.41
1966	104.80	76.23	66.97	49.78	33.84	23.11	19.79	21.84	32.63	48.43	73.44	92.92
1967	107.28	79.22	68.13	43.56	35.52	9.89	15.09	19.50	31.44	55.13	74.56	101.54
1968	103.73	85.79	65.53	42.43	34.48	21.17	20.32	27.06	38.13	50.26	79.56	89.92
1969	109.49	77.65	65.21	45.70	30.93	20.29	21.53	23.10	35.71	46.73	70.69	100.70
1970	106.42	84.89	69.50	49.61	31.39	17.62	18.40	18.32	34.15	51.52	71.83	92.58
1971	99.28	79.38	64.47	38.78	31.79	17.07	24.17	22.96	34.73	57.31	79.47	96.04
1972	108.30	84.20	63.18	42.50	35.11	24.36	16.44	25.23	33.79	45.93	70.78	101.67
1973	105.86	81.60	67.97	40.06	27.93	22.44	19.28	25.11	37.51	55.53	79.34	104.27
1974	109.73	86.68	69.36	42.15	38.15	19.49	16.42	30.75	35.57	57.82	70.59	90.54
1975	105.03	81.81	66.03	47.52	33.17	23.66	18.40	22.62	39.35	59.93	70.02	93.89
1976	104.07	82.26	61.69	41.85	32.09	19.57	17.56	23.88	35.43	55.96	77.69	102.84
1977	109.87	83.80	66.79	46.97	34.39	21.43	19.25	24.31	37.18	57.37	71.41	99.73
1978	101.79	83.11	66.75	45.28	34.44	20.24	28.98	20.12	37.96	52.55	76.39	99.63
1979	105.23	84.13	67.23	42.21	33.53	14.94	20.60	30.67	31.30	52.64	72.58	98.39
1980	111.45	88.48	73.88	39.32	34.24	19.15	19.54	27.28	33.59	51.11	66.84	98.09
1981	104.86	84.60	71.31	53.48	40.46	22.16	23.23	24.83	33.83	50.70	68.37	92.44
1982	107.63	82.33	67.71	48.46	35.71	18.54	23.38	26.17	40.89	53.83	68.62	103.46
1983	112.64	86.30	72.07	48.71	27.59	12.16	15.98	22.83	29.87	57.59	79.54	104.79
1984	109.13	80.32	69.30	42.35	27.66	11.26	18.27	20.70	39.18	65.43	77.40	107.51
1985	98.95	104.01	84.86	45.91	29.98	23.81	17.18	20.84	36.05	57.02	85.49	105.65
1986	107.50	90.87	75.42	43.50	34.09	20.62	21.23	27.95	38.28	69.34	66.92	99.94
1987	113.73	99.34	86.83	48.02	23.36	18.66	21.48	27.29	29.47	62.54	82.66	104.28
1988	113.07	88.83	72.97	47.68	26.30	19.50	14.80	21.97	31.73	51.98	76.71	99.20
1989	110.10	90.38	65.41	45.20	27.51	22.08	19.04	23.11	33.47	53.94	77.67	103.09
1990	111.16	84.66	67.35	44.60	30.49	19.57	18.90	29.00	35.79	52.63	73.73	96.19
1991	106.98	86.86	73.28	49.90	34.76	19.60	19.80	20.81	36.97	49.33	73.14	91.32
1992	109.39	85.15	78.70	43.83	31.72	17.86	14.69	25.30	35.64	50.85	73.92	95.36
1993	111.68	89.07	76.24	45.46	29.11	22.82	15.73	22.82	32.55	53.66	72.47	95.67
1994	106.17	79.26	70.83	43.42	32.87	26.76	19.71	17.96	39.01	55.83	75.10	103.50
1995	106.57	81.48	65.60	49.82	32.53	21.86	14.62	20.42	34.11	53.47	73.64	107.75
1996	104.28	82.99	73.27	41.54	30.75	12.19	21.19	27.58	37.21	56.51	78.28	99.81
1997	115.24	81.29	68.60	52.28	37.33	23.46	21.50	24.85	36.75	49.81	70.63	94.34
1998	105.02	81.13	67.59	43.30	38.37	19.77	18.32	20.00	30.29	56.38	70.78	119.11
1999	123.87	82.18	62.86	39.48	29.15	18.15	15.20	24.70	35.35	60.52	87.40	110.59
2000	115.45	84.75	71.70	48.90	31.30	20.47	13.66	26.25	32.75	60.82	76.16	110.76
2001	102.01	87.04	64.00	37.37	29.32	18.05	19.35	22.92	30.74	54.70	79.38	127.28
2002	125.07	98.50	65.22	38.94	28.43	11.22	17.12	23.50	34.04	51.97	74.98	104.08
2003	119.40	90.61	69.72	40.49	26.16	25.35	15.19	21.44	33.82	54.05	86.33	97.31
2004	125.88	80.80	70.43	45.37	24.43	21.75	19.88	22.79	32.92	50.61	80.60	108.76
2005	117.35	107.30	67.57	37.07	26.26	17.91	18.72	21.26	29.40	47.62	86.63	107.68
2006	105.46	86.71	63.35	41.59	27.91	24.77	22.52	24.68	34.06	51.41	85.91	104.30
2007	119.47	91.51	69.96	42.21	23.88	12.82	14.67	11.59	30.63	51.32	86.63	110.17
2008	128.45	107.35	84.13	35.82	23.49	14.68	18.98	18.18	30.30	50.75	91.13	115.71
2009	131.08	100.43	69.33	48.39	29.93	15.72	14.85	25.71	26.65	49.70	59.61	108.10
2010	120.73	86.52	91.03	47.36	28.64	20.84	15.19	26.44	40.92	59.41	79.78	95.51

## ANEXO D: Datos de pronósticos

**Tabla D.1:** Pronostico de precipitación mensual de los mapas de pronósticos de uno hasta a seis meses (mm).

Año	Mes	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6
2001	DIC	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
2002	ENE	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	FEB	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	MAR	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	ABR	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	MAY	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Normal
	JUN	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	JUL	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Normal	Normal
	AGO	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	SEPT	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Bajo normal
	OCT	Normal	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Normal
	NOV	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	DIC	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
2003	ENE	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal
	FEB	Normal	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Normal
	MAR	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal	Normal
	ABR	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal
	MAY	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal	Normal	Normal
	JUN	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal
	JUL	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal
	AGO	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	SEPT	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal
	OCT	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal
	NOV	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Normal	Normal
	DIC	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
2004	ENE	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	FEB	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal	Normal
	MAR	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	ABR	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Normal	Normal
	MAY	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal	Normal	Normal
	JUN	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal	Normal
	JUL	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	AGO	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	SEPT	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	OCT	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal	Bajo normal	Normal
	NOV	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal
	DIC	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
2005	ENE	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	FEB	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Normal	Normal
	MAR	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal	Normal	Normal
	ABR	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Normal	Normal
	MAY	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Normal	Normal
	JUN	Normal	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Bajo normal
	JUL	Normal	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Normal
	AGO	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal
	SEPT	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Normal	Normal
	OCT	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal	Normal	Normal
	NOV	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	DIC	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
2006	ENE	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	FEB	Normal	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Normal
	MAR	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal	Normal



**Tabla D.2:** Pronostico de precipitación mensual de uno hasta a seis meses (mm).

Año	Mes	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6
2003	DIC	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92
2004	ENE	15.82	15.82	15.82	15.82	15.82	15.82
	FEB	6.16	6.16	6.16	6.16	20.36	20.36
	MAR	34.11	34.11	34.11	34.11	34.11	34.11
	ABR	125.38	125.38	125.38	45.22	125.38	125.38
	MAY	114.64	114.64	114.64	302.71	302.71	302.71
	JUN	228.70	228.70	228.70	228.70	418.01	418.01
	JUL	317.28	317.28	317.28	317.28	317.28	317.28
	AGO	262.33	262.33	262.33	262.33	262.33	262.33
	SEPT	153.23	153.23	153.23	153.23	153.23	153.23
	OCT	48.63	48.63	48.63	114.27	48.63	114.27
	NOV	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03	132.59
	DIC	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92
2005	ENE	15.82	15.82	15.82	15.82	15.82	15.82
	FEB	20.36	20.36	20.36	6.16	20.36	20.36
	MAR	8.10	8.10	8.10	34.11	34.11	34.11
	ABR	125.38	125.38	125.38	241.26	125.38	125.38
	MAY	302.71	302.71	302.71	692.41	302.71	302.71
	JUN	418.01	418.01	418.01	418.01	228.70	228.70
	JUL	317.28	317.28	317.28	317.28	185.05	317.28
	AGO	139.50	139.50	139.50	139.50	139.50	262.33
	SEPT	153.23	153.23	153.23	68.39	153.23	153.23
	OCT	48.63	48.63	48.63	114.27	114.27	114.27
	NOV	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03
	DIC	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92
2006	ENE	15.82	15.82	15.82	15.82	15.82	15.82
	FEB	20.36	20.36	20.36	20.36	6.16	20.36
	MAR	8.10	8.10	8.10	8.10	34.11	34.11
	ABR	45.22	45.22	45.22	45.22	125.38	125.38
	MAY	302.71	302.71	302.71	302.71	302.71	302.71
	JUN	670.22	670.22	670.22	670.22	418.01	418.01
	JUL	317.28	317.28	317.28	317.28	317.28	185.05
	AGO	262.33	262.33	262.33	262.33	262.33	262.33
	SEPT	153.23	153.23	153.23	153.23	153.23	153.23
	OCT	114.27	114.27	114.27	114.27	114.27	114.27
	NOV	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03
	DIC	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92
2007	ENE	15.82	15.82	15.82	15.82	15.82	2.92
	FEB	20.36	20.36	20.36	20.36	20.36	20.36
	MAR	34.11	34.11	34.11	8.10	8.10	34.11
	ABR	125.38	125.38	125.38	125.38	125.38	125.38
	MAY	302.71	302.71	302.71	302.71	302.71	302.71
	JUN	418.01	418.01	418.01	418.01	228.70	228.70
	JUL	185.05	185.05	185.05	185.05	185.05	317.28
	AGO	139.50	139.50	139.50	139.50	139.50	262.33
	SEPT	68.39	68.39	68.39	68.39	153.23	153.23
	OCT	48.63	48.63	48.63	114.27	114.27	114.27
	NOV	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03	18.64
	DIC	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92

2008	ENE	15.82	15.82	15.82	2.92	15.82	2.92
	FEB	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16
	MAR	34.11	34.11	34.11	8.10	34.11	8.10
	ABR	125.38	125.38	125.38	125.38	45.22	45.22
	MAY	114.64	114.64	114.64	114.64	302.71	302.71
	JUN	418.01	418.01	418.01	418.01	418.01	418.01
	JUL	317.28	317.28	317.28	317.28	317.28	317.28
	AGO	262.33	262.33	262.33	262.33	262.33	262.33
	SEPT	68.39	68.39	68.39	153.23	153.23	153.23
	OCT	114.27	114.27	114.27	114.27	114.27	114.27
	NOV	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03	18.64
	DIC	33.92	33.92	33.92	33.92	6.21	6.21
2009	ENE	15.82	15.82	15.82	2.92	2.92	2.92
	FEB	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16
	MAR	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	34.11
	ABR	45.22	45.22	45.22	45.22	125.38	125.38
	MAY	114.64	114.64	114.64	302.71	302.71	302.71
	JUN	418.01	418.01	418.01	418.01	418.01	418.01
	JUL	572.99	572.99	572.99	317.28	317.28	317.28
	AGO	262.33	262.33	262.33	262.33	262.33	262.33
	SEPT	153.23	153.23	153.23	153.23	153.23	153.23
	OCT	114.27	114.27	114.27	114.27	114.27	114.27
	NOV	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03
	DIC	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92
2010	ENE	15.82	15.82	15.82	59.33	15.82	15.82
	FEB	94.97	94.97	94.97	20.36	20.36	20.36
	MAR	34.11	34.11	34.11	34.11	34.11	34.11
	ABR	125.38	125.38	125.38	125.38	125.38	125.38
	MAY	302.71	302.71	302.71	302.71	302.71	302.71
	JUN	228.70	228.70	228.70	418.01	418.01	228.70
	JUL	185.05	185.05	185.05	185.05	185.05	317.28
	AGO	139.50	139.50	139.50	139.50	139.50	262.33
	SEPT	68.39	68.39	68.39	68.39	153.23	153.23
	OCT	48.63	48.63	48.63	114.27	114.27	114.27
	NOV	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03	51.03
	DIC	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92

**Tabla D.3:** Pronostico evapotranspiración mensual de los mapas de pronósticos de uno hasta a seis meses (mm).

Año	Mes	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6
2001	DIC	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
2002	ENE	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
	FEB	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
	MAR	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	ABR	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
	MAY	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
	JUN	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Sobre normal	Normal
	JUL	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	AGO	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	SEPT	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	OCT	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	NOV	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
DIC	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	
2003	ENE	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal
	FEB	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	MAR	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	ABR	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	MAY	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
	JUN	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Sobre normal	Sobre normal
	JUL	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal
	AGO	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
	SEPT	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
	OCT	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	NOV	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
DIC	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal	
2004	ENE	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Normal	Sobre normal
	FEB	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal
	MAR	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Sobre normal
	ABR	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Sobre normal	Normal
	MAY	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Normal	Normal
	JUN	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal
	JUL	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
	AGO	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
	SEPT	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	OCT	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	NOV	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
DIC	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	
2005	ENE	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	FEB	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Normal	Normal
	MAR	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal
	ABR	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Normal	Normal
	MAY	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	JUN	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	JUL	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Normal	Normal	Normal
	AGO	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal
	SEPT	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Normal	Normal
	OCT	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
	NOV	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
DIC	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	
2006	ENE	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Sobre normal
	FEB	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal
	MAR	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal
	ABR	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal
	MAY	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
	JUN	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
	JUL	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	AGO	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal
SEPT	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	

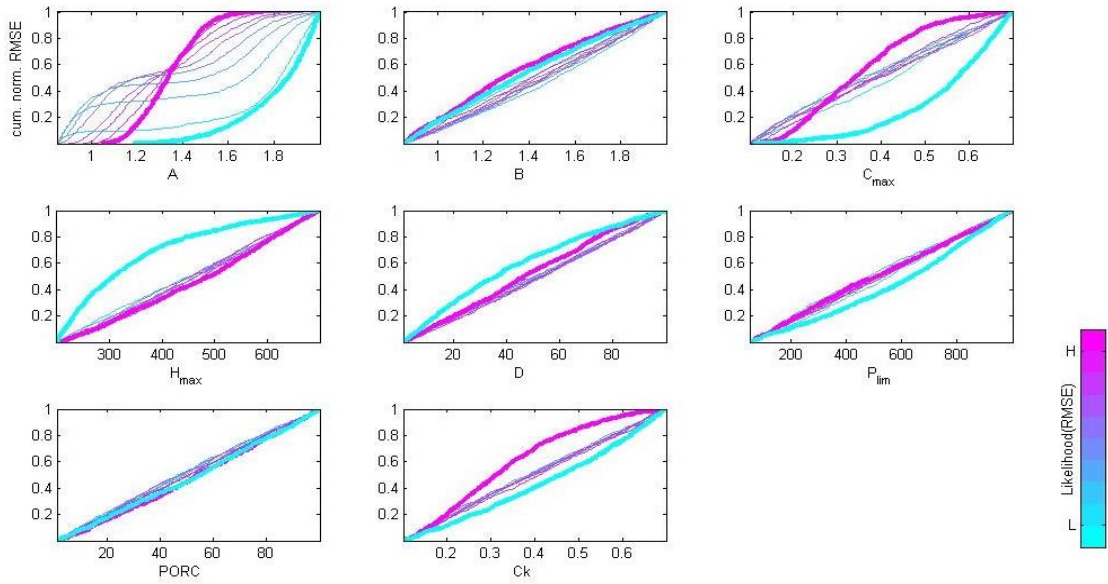
2007	OCT	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal
	NOV	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	DIC	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	ENE	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	FEB	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	MAR	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	ABR	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Bajo normal
	MAY	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	JUN	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
	JUL	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Sobre normal
	AGO	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Sobre normal
	SEPT	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Sobre normal
2008	OCT	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal
	NOV	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	DIC	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
	ENE	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal
	FEB	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	MAR	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal
	ABR	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal
	MAY	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
	JUN	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	JUL	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	AGO	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	SEPT	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Normal	Normal
2009	OCT	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal
	NOV	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
	DIC	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
	ENE	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Normal	Normal
	FEB	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
	MAR	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Sobre normal	Normal
	ABR	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
	MAY	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
	JUN	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
	JUL	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Sobre normal
	AGO	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal
	SEPT	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Sobre normal
2010	OCT	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal
	NOV	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal
	DIC	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal
	ENE	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal
	FEB	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Sobre normal
	MAR	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	ABR	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal
	MAY	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	JUN	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	JUL	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	AGO	Normal	Normal	Normal	Normal	Sobre normal	Sobre normal
	SEPT	Sobre normal	Sobre normal	Sobre normal	Normal	Normal	Normal
OCT	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	
NOV	Normal	Normal	Normal	Normal	Bajo normal	Bajo normal	
DIC	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	Bajo normal	

**Tabla D.4:** Pronostico de evapotranspiración mensual de uno hasta seis meses (mm).

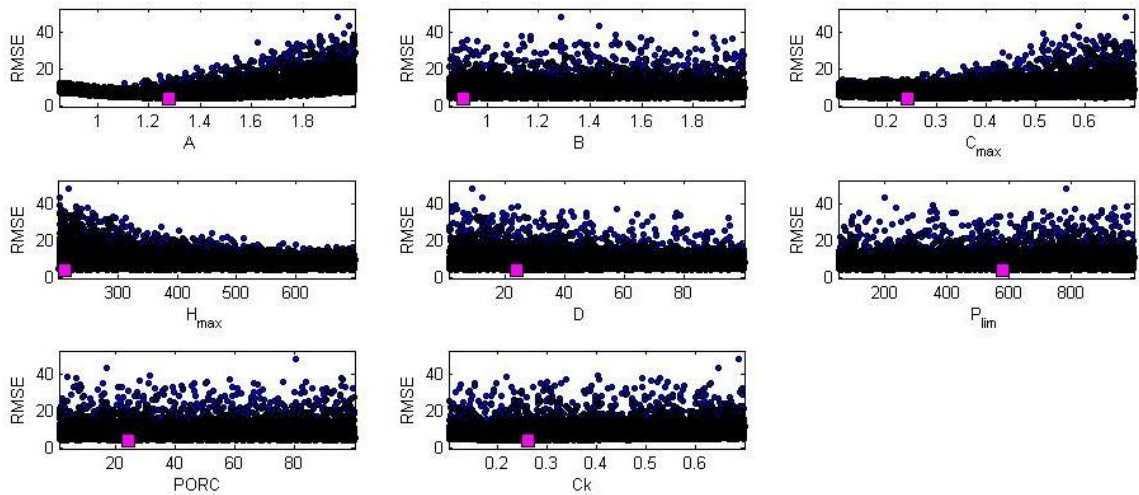
Año	Mes	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6
2003	DIC	112.59	112.59	112.59	104.06	104.06	104.06
2004	ENE	111.38	111.38	111.38	122.67	111.38	122.67
	FEB	86.59	86.59	86.59	98.03	98.03	86.59
	MAR	79.67	79.67	79.67	79.67	70.33	79.67
	ABR	49.57	49.57	49.57	44.79	49.57	44.79
	MAY	29.37	29.37	29.37	34.91	29.37	29.37
	JUN	23.48	23.48	23.48	23.48	23.48	19.57
	JUL	21.39	21.39	21.39	21.39	18.19	18.19
	AGO	26.66	26.66	26.66	26.66	23.42	23.42
	SEPT	34.00	34.00	34.00	34.00	34.00	34.00
	OCT	53.60	53.60	53.60	53.60	53.60	53.60
	NOV	76.91	76.91	76.91	76.91	76.91	76.91
	DIC	104.06	104.06	104.06	104.06	104.06	112.59
2005	ENE	111.38	111.38	111.38	111.38	111.38	111.38
	FEB	86.59	86.59	86.59	98.03	86.59	86.59
	MAR	79.67	79.67	79.67	79.67	79.67	79.67
	ABR	44.79	44.79	44.79	49.57	44.79	44.79
	MAY	29.37	29.37	29.37	29.37	29.37	29.37
	JUN	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57
	JUL	14.86	14.86	14.86	18.19	18.19	18.19
	AGO	23.42	23.42	23.42	26.66	26.66	26.66
	SEPT	34.00	34.00	34.00	38.11	34.00	34.00
	OCT	60.56	60.56	60.56	60.56	53.60	53.60
	NOV	85.26	85.26	85.26	85.26	76.91	76.91
	DIC	104.06	104.06	104.06	104.06	104.06	104.06
2006	ENE	122.67	122.67	122.67	111.38	111.38	122.67
	FEB	86.59	86.59	86.59	86.59	86.59	98.03
	MAR	79.67	79.67	79.67	79.67	79.67	79.67
	ABR	49.57	49.57	49.57	49.57	49.57	44.79
	MAY	34.91	34.91	34.91	34.91	29.37	29.37
	JUN	23.48	23.48	23.48	19.57	19.57	19.57
	JUL	18.19	18.19	18.19	18.19	18.19	18.19
	AGO	23.42	23.42	23.42	23.42	23.42	26.66
	SEPT	34.00	34.00	34.00	34.00	34.00	34.00
	OCT	53.60	53.60	53.60	60.56	60.56	53.60
	NOV	76.91	76.91	76.91	76.91	76.91	76.91
	DIC	104.06	104.06	104.06	104.06	104.06	104.06
2007	ENE	111.38	111.38	111.38	111.38	111.38	111.38
	FEB	86.59	86.59	86.59	86.59	86.59	86.59
	MAR	70.33	70.33	70.33	70.33	70.33	70.33
	ABR	44.79	44.79	44.79	44.79	44.79	39.69
	MAY	29.37	29.37	29.37	29.37	29.37	29.37

	JUN	23.48	23.48	23.48	19.57	19.57	19.57
	JUL	18.19	18.19	18.19	18.19	21.39	21.39
	AGO	23.42	23.42	23.42	23.42	26.66	26.66
	SEPT	34.00	34.00	34.00	34.00	38.11	38.11
	OCT	53.60	53.60	53.60	53.60	53.60	60.56
	NOV	76.91	76.91	76.91	76.91	76.91	76.91
	DIC	112.59	112.59	112.59	104.06	104.06	104.06
2008	ENE	111.38	111.38	111.38	111.38	111.38	122.67
	FEB	86.59	86.59	86.59	86.59	86.59	86.59
	MAR	79.67	79.67	79.67	79.67	79.67	70.33
	ABR	49.57	49.57	49.57	49.57	49.57	44.79
	MAY	34.91	34.91	34.91	34.91	29.37	29.37
	JUN	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57
	JUL	18.19	18.19	18.19	18.19	18.19	18.19
	AGO	23.42	23.42	23.42	23.42	23.42	23.42
	SEPT	34.00	34.00	34.00	38.11	34.00	34.00
	OCT	53.60	53.60	53.60	60.56	60.56	53.60
	NOV	85.26	85.26	85.26	85.26	76.91	76.91
	DIC	112.59	112.59	112.59	104.06	104.06	104.06
2009	ENE	111.38	111.38	111.38	122.67	111.38	111.38
	FEB	98.03	98.03	98.03	86.59	86.59	86.59
	MAR	79.67	79.67	79.67	70.33	79.67	70.33
	ABR	49.57	49.57	49.57	44.79	44.79	44.79
	MAY	34.91	34.91	34.91	34.91	29.37	29.37
	JUN	23.48	23.48	23.48	23.48	19.57	19.57
	JUL	21.39	21.39	21.39	18.19	18.19	21.39
	AGO	23.42	23.42	23.42	23.42	23.42	26.66
	SEPT	34.00	34.00	34.00	34.00	38.11	38.11
	OCT	60.56	60.56	60.56	60.56	60.56	53.60
	NOV	85.26	85.26	85.26	85.26	85.26	85.26
	DIC	112.59	112.59	112.59	112.59	112.59	104.06
2010	ENE	122.67	122.67	122.67	122.67	111.38	111.38
	FEB	98.03	98.03	98.03	86.59	86.59	98.03
	MAR	70.33	70.33	70.33	70.33	70.33	70.33
	ABR	44.79	44.79	44.79	44.79	44.79	49.57
	MAY	29.37	29.37	29.37	29.37	29.37	29.37
	JUN	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57
	JUL	18.19	18.19	18.19	18.19	18.19	18.19
	AGO	23.42	23.42	23.42	23.42	26.66	26.66
	SEPT	38.11	38.11	38.11	34.00	34.00	34.00
	OCT	53.60	53.60	53.60	53.60	53.60	50.21
	NOV	76.91	76.91	76.91	76.91	69.79	69.79
	DIC	95.71	95.71	95.71	95.71	95.71	95.71

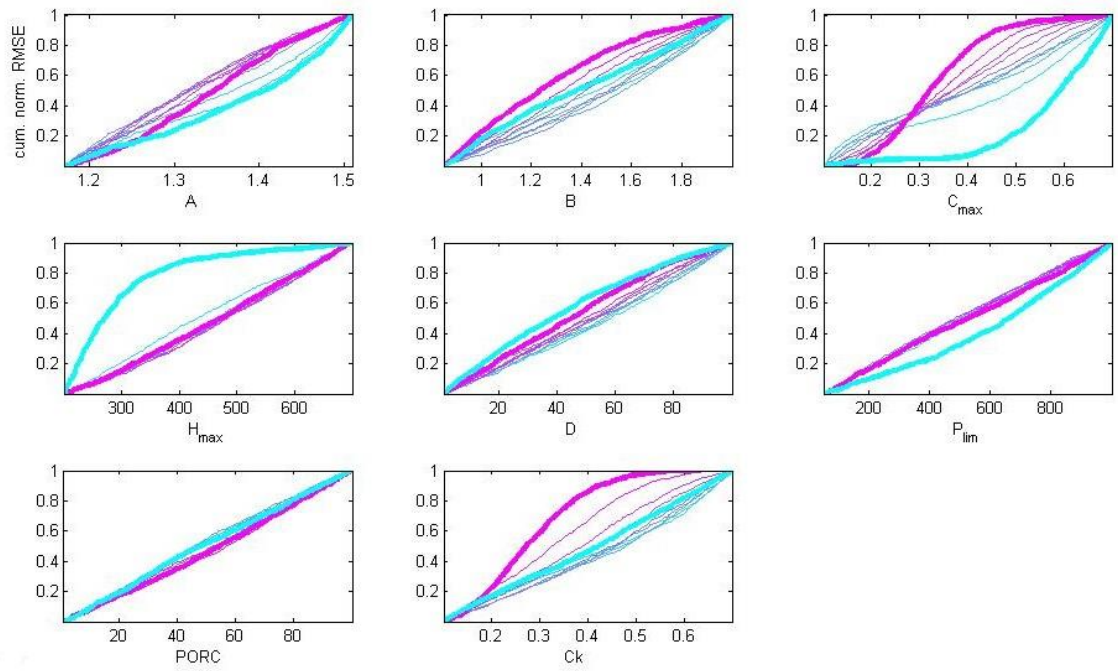
**ANEXO E: Análisis de sensibilidad regional y Gráficas de Dotty plots de parámetros para cada Función Objetivo.**



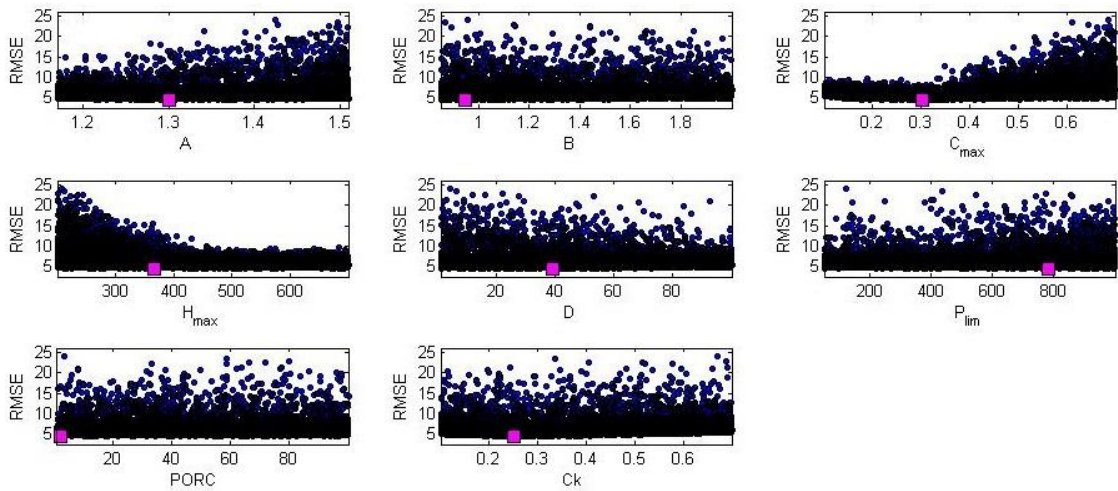
**Figura E–1** Análisis de sensibilidad regional para la primera iteración usando la FO RMSE.



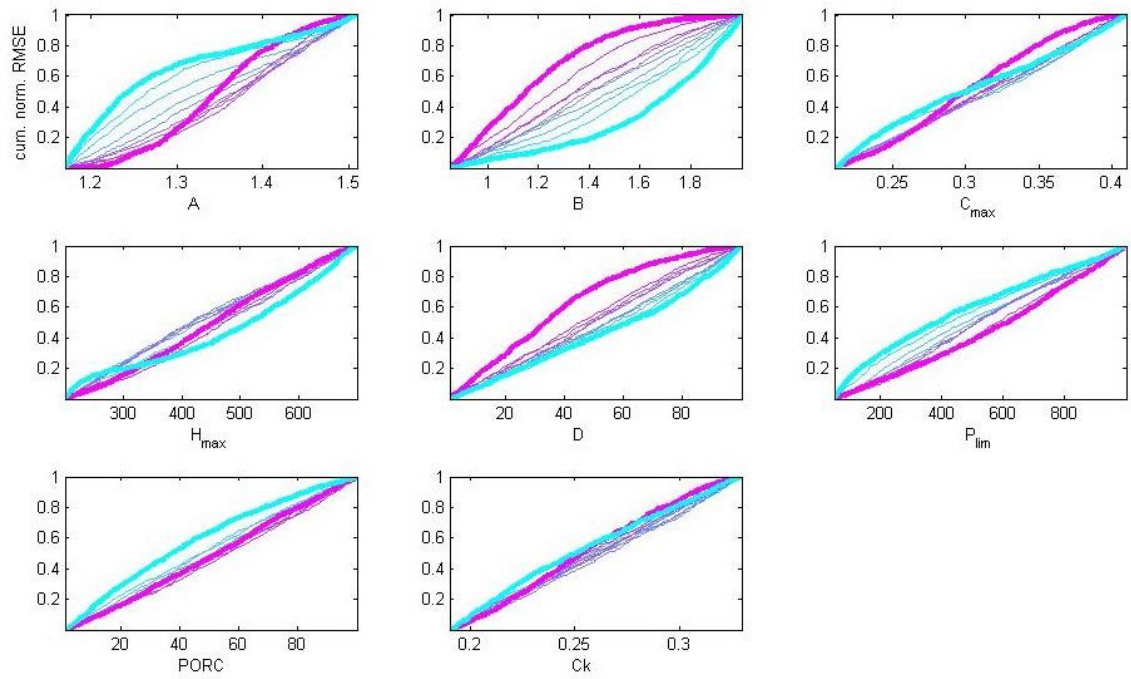
**Figura E–2** Gráficas de Dotty plots para la primera iteración usando la FO RMSE.



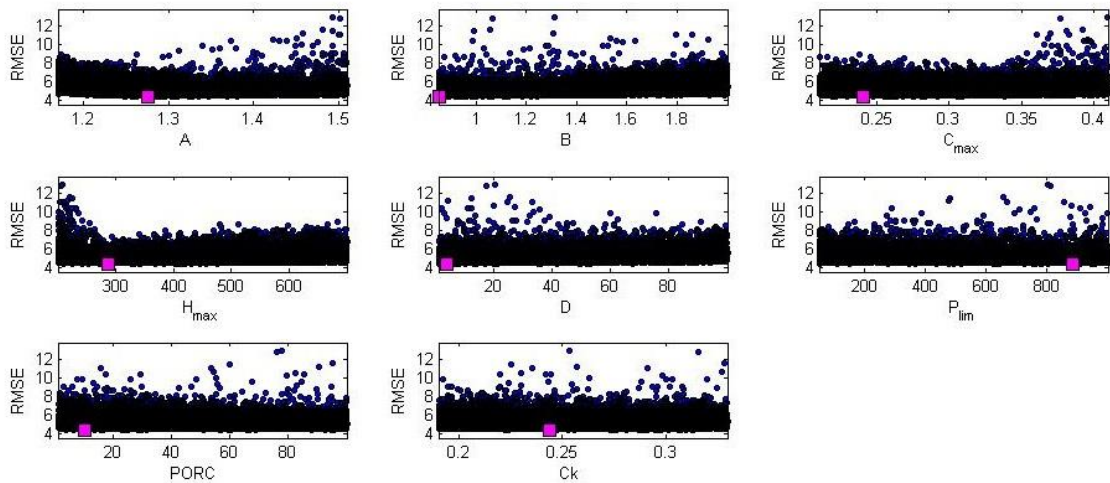
**Figura E-3** Análisis de sensibilidad regional para la segunda iteración usando la FO RMSE.



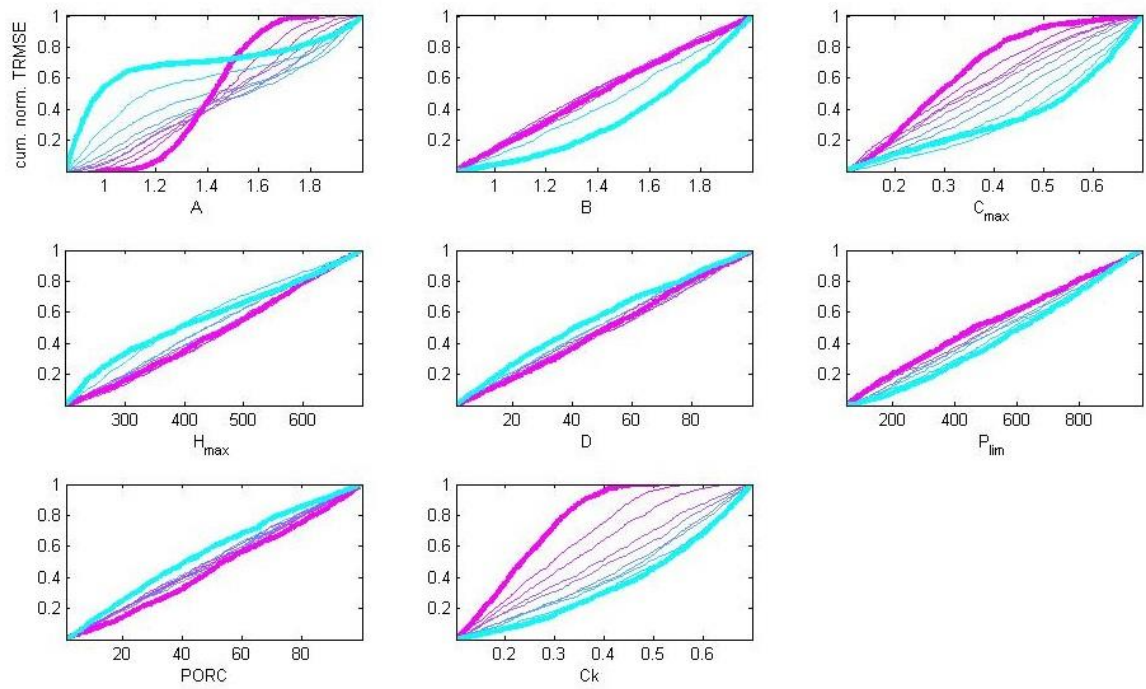
**Figura E-4** Gráficas de Dotty plots para la segunda iteración usando la FO RMSE.



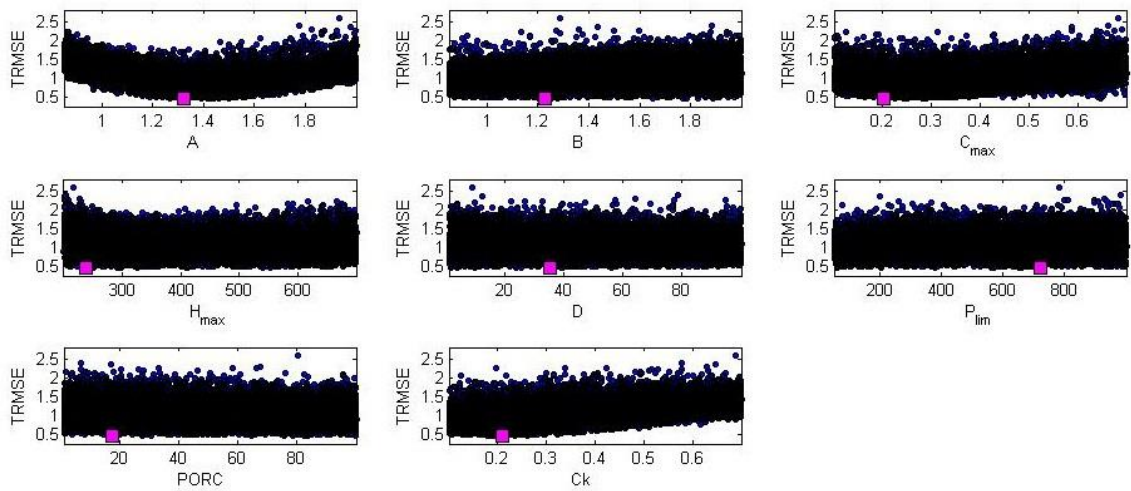
**Figura E-5** Análisis de sensibilidad regional para la última iteración usando la FO RMSE.



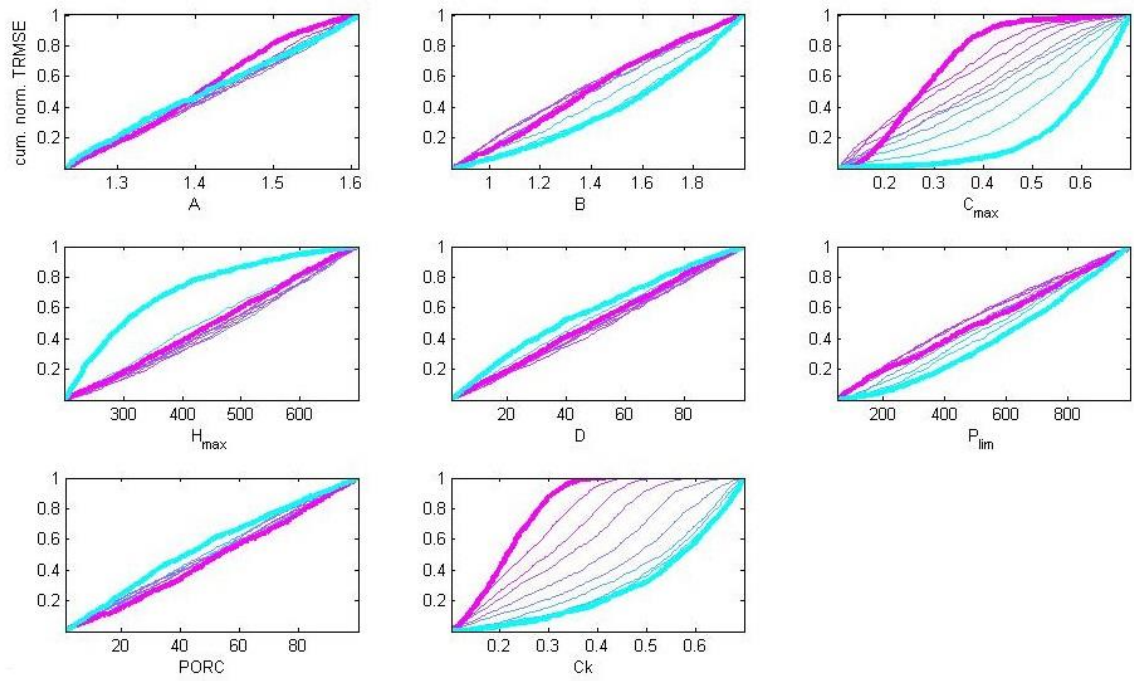
**Figura E-6** Gráficas de Dotty plots para la última iteración usando la FO RMSE.



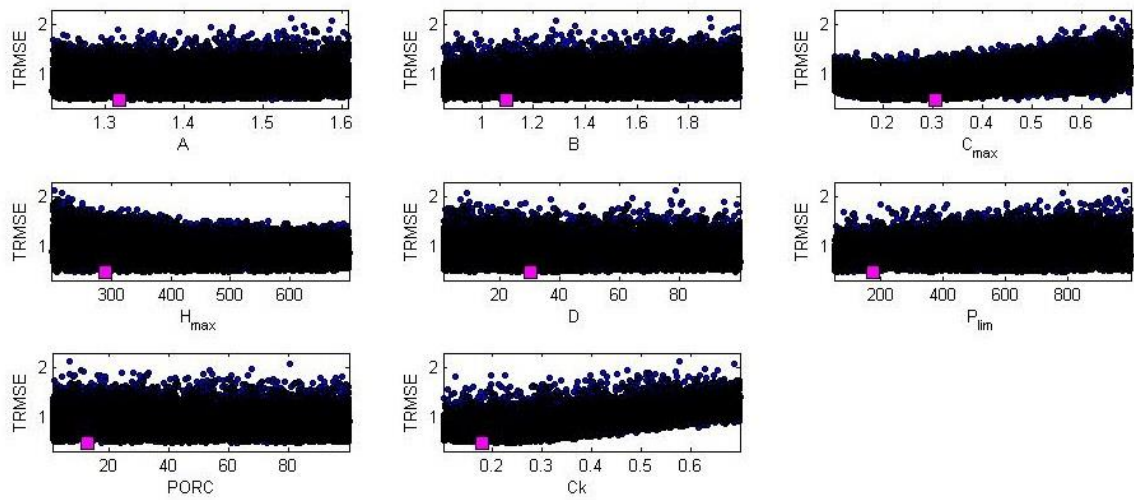
**Figura E-7** Análisis de sensibilidad regional para la primera iteración usando la FO TRMSE.



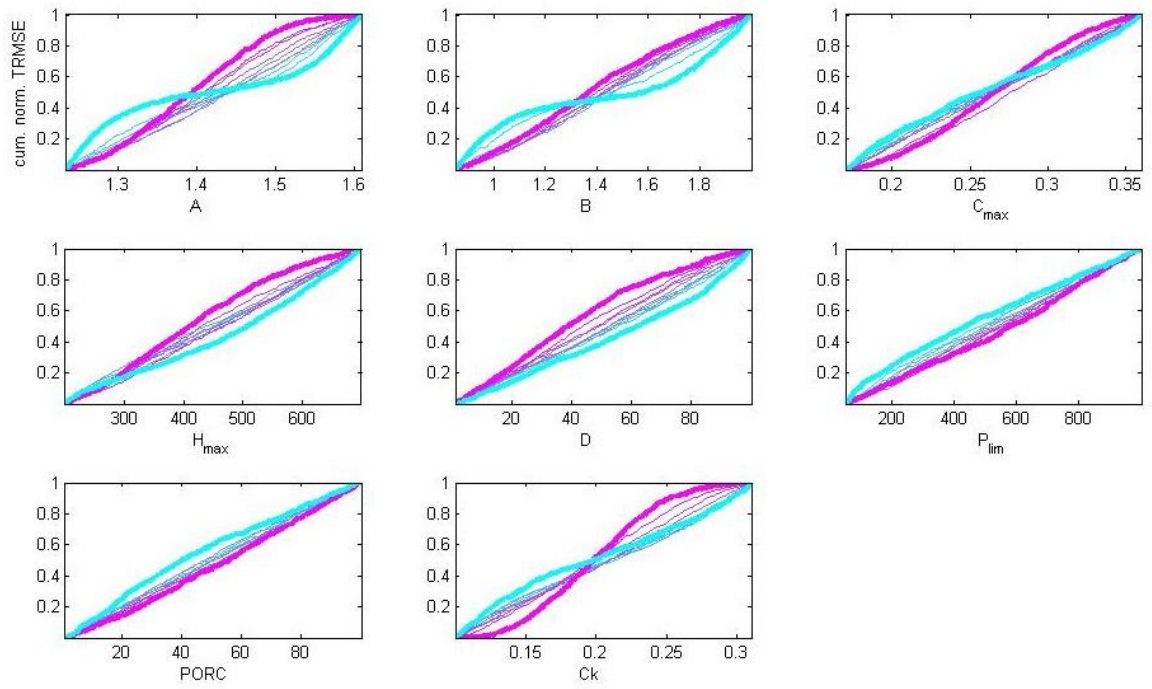
**Figura E-8** Gráficas de Dotty plots para la primera iteración usando la FO TRMSE.



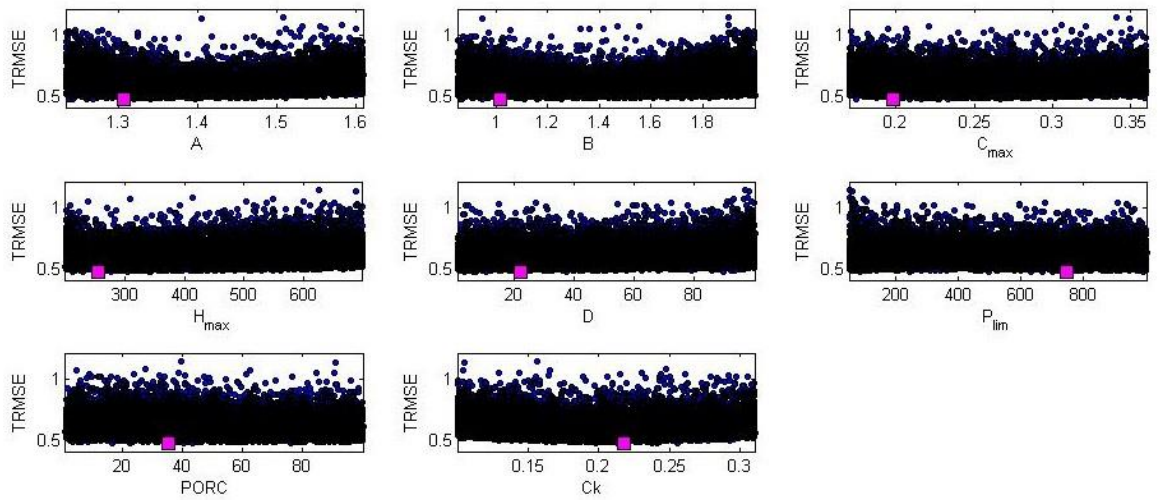
**Figura E-9** Análisis de sensibilidad regional para la segunda iteración usando la FO TRMSE.



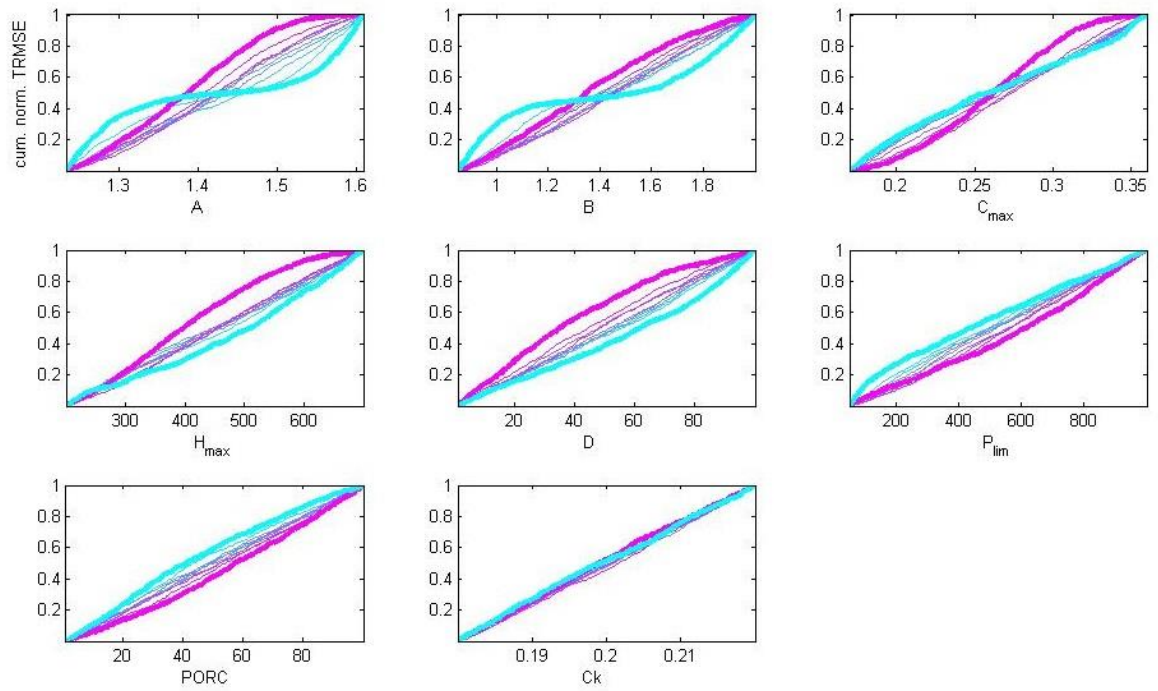
**Figura E-10** Gráficas de Dotty plots para la segunda iteración usando la FO TRMSE.



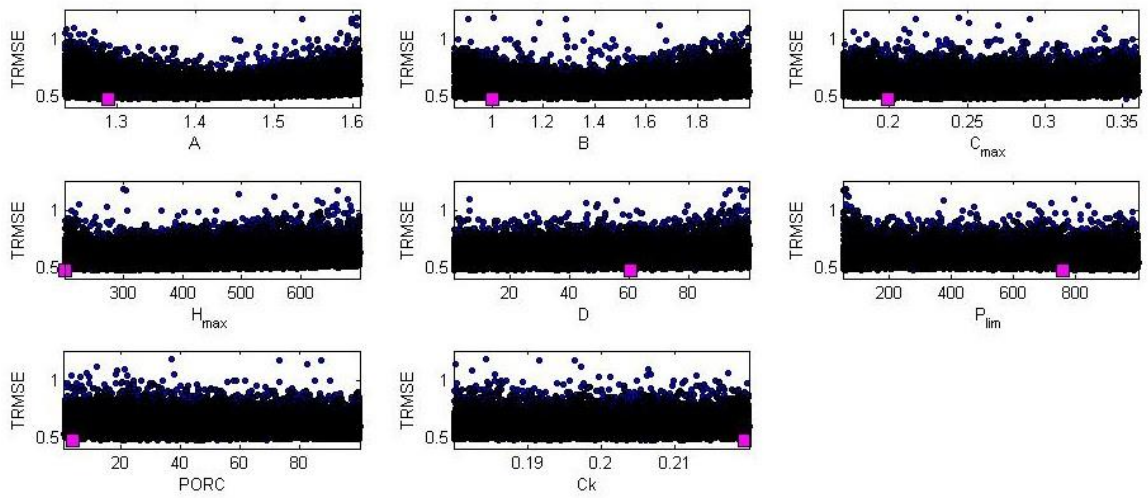
**Figura E-11** Análisis de sensibilidad regional para la tercera iteración usando la FO TRMSE.



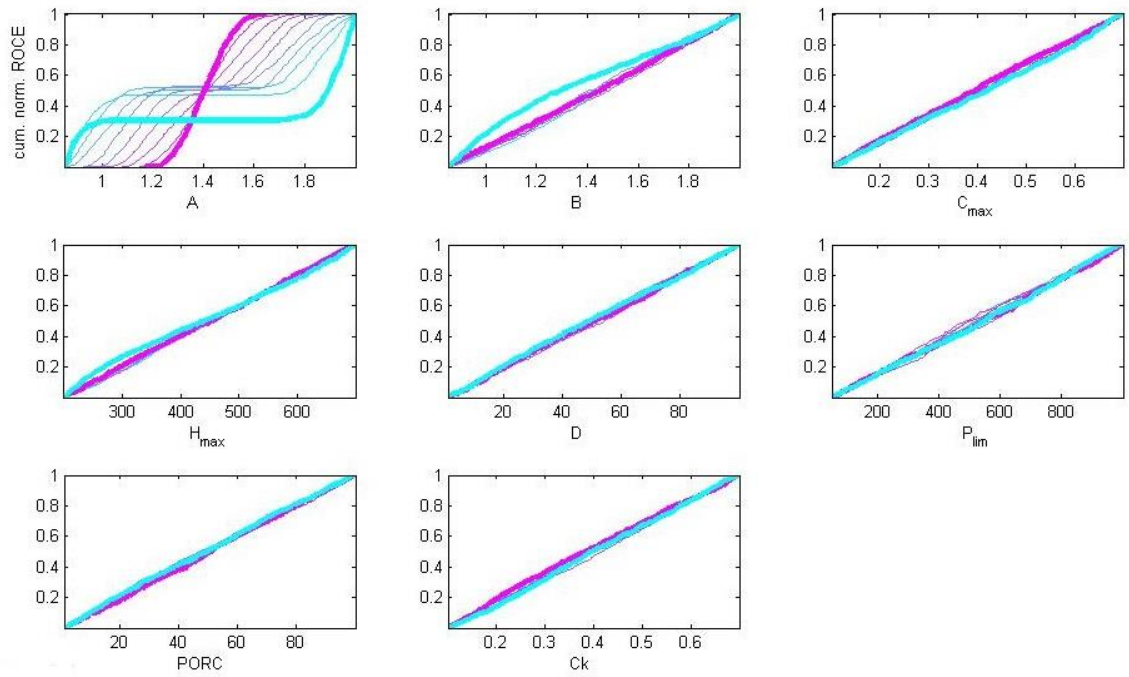
**Figura E-12** Gráficas de Dotty plots para la tercera iteración usando la FO TRMSE.



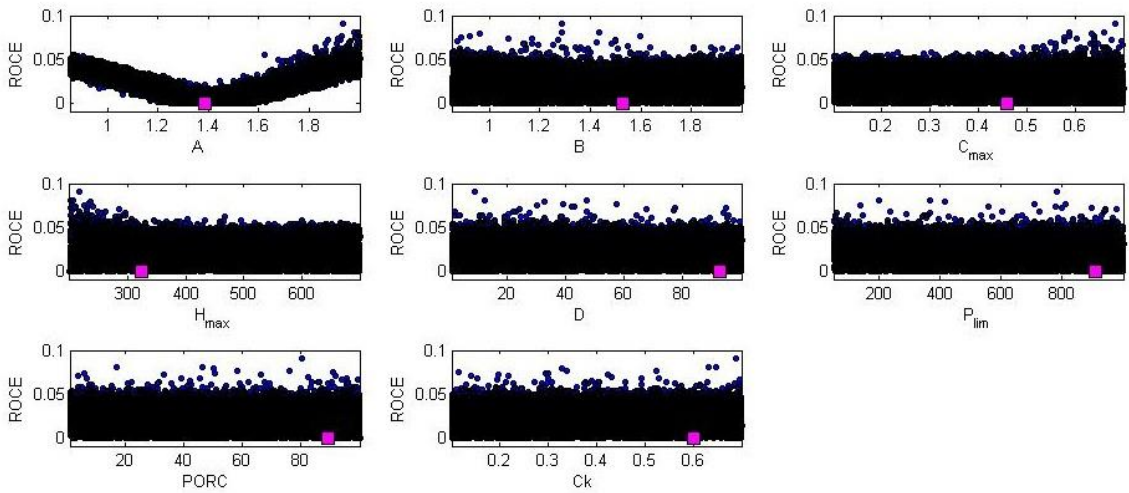
**Figura E-13** Análisis de sensibilidad regional para la última iteración usando la FO TRMSE.



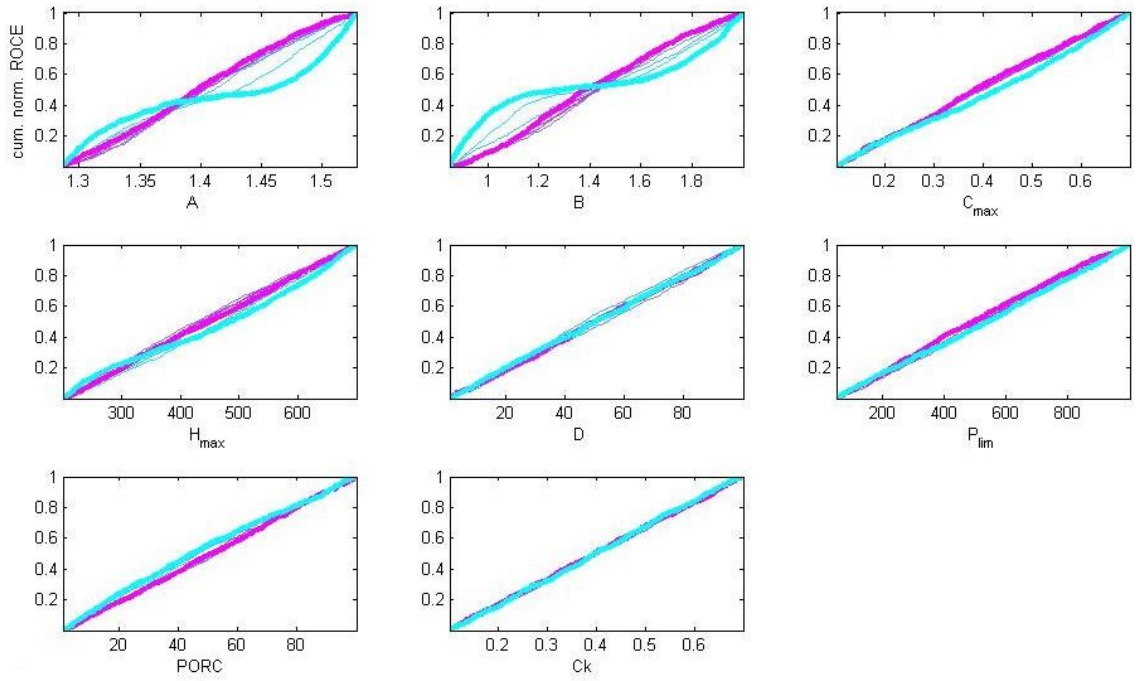
**Figura E-14** Gráficas de Dotty plots para la última iteración usando la FO TRMSE.



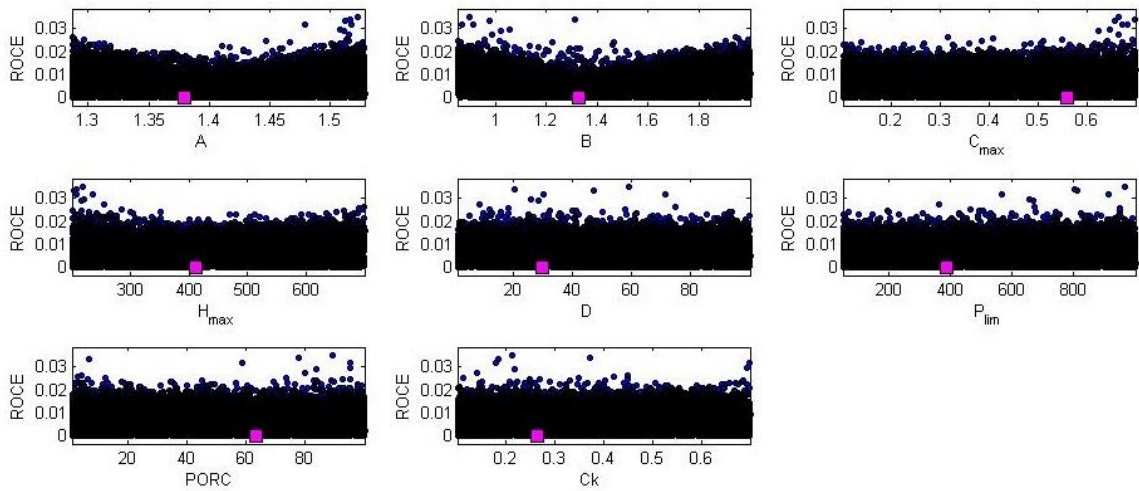
**Figura E-15** Análisis de sensibilidad regional para la primera iteración usando la FO ROCE.



**Figura E-16** Gráficas de Dotty plots para la primera iteración usando la FO ROCE.



**Figura E-17** Análisis de sensibilidad regional para la última iteración usando la FO ROCE.



**Figura E-18** Gráficas de Dotty plots para la última iteración usando la FO ROCE.

## ANEXO F: Pendientes en las iteraciones en la calibración

**Tabla F.1:** Pendientes de cada rango después de la primera iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO RMSE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0.90	2.20	2.83	3.13	3.51	3.55	2.63	2.52	2.36	0.53
B	1.67	1.12	1.27	1.35	1.26	1.00	0.90	0.81	0.78	0.64

**Tabla F.2:** Pendientes de cada rango después de la segunda iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO RMSE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0.57	0.98	1.34	1.16	1.24	1.42	1.20	1.22	0.87	0.78
B	1.67	1.12	1.27	1.35	1.26	1.00	0.90	0.81	0.78	0.64

**Tabla F.3:** Pendientes de cada rango después de la segunda iteración para los parámetros del modelo, usando la FO RMSE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cmax	0.75	1.78	2.32	2.24	2.79	2.20	1.97	1.81	1.17	0.26
Hmax	0.70	1.05	0.93	1.04	1.04	1.12	1.15	0.94	1.15	1.09
Da	1.24	1.05	1.21	1.03	1.16	1.23	1.09	0.99	0.84	0.63
Plim	1.05	0.99	1.15	0.96	0.88	0.87	1.11	0.89	1.08	1.15
PORC	0.94	0.83	0.95	0.92	1.02	1.03	1.13	1.15	1.04	1.14
Ck	1.03	1.71	2.18	2.41	2.32	1.92	2.10	1.55	1.15	0.28

**Tabla F.4:** Pendientes de cada rango de la última iteración para los parámetros del modelo, usando la FO RMSE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cmax	0.74	1.03	1.24	1.44	1.46	1.26	1.27	1.15	0.97	0.54
Hmax	0.74	0.91	1.01	1.24	1.16	1.34	1.13	0.92	1.16	0.80
Da	1.63	1.57	1.34	1.45	1.63	1.61	1.34	0.91	0.67	0.37
Plim	0.82	0.79	0.77	0.91	0.96	1.17	1.42	1.13	1.15	1.36
PORC	0.83	0.93	1.06	0.99	1.02	1.12	1.23	0.97	1.00	1.00
Ck	0.81	1.19	1.18	1.19	1.31	1.15	1.02	1.05	0.95	0.64

**Tabla F.5:** Pendientes de cada rango después de la primera iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO TRMSE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0.44	1.91	2.32	3.01	2.76	3.11	3.24	2.21	1.82	0.52
B	1.14	0.95	0.95	1.17	1.08	1.01	0.96	0.99	0.81	1.03

**Tabla F.6:** Pendientes de cada rango después de la segunda iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO TRMSE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0.97	0.92	0.97	1.33	1.42	1.33	1.30	1.14	0.84	0.56
B	0.91	0.89	1.27	1.14	1.38	1.19	1.08	0.93	0.75	0.83

**Tabla F.7:** Pendientes de cada rango después de la segunda iteración para los parámetros del modelo, usando la FO TRMSE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cmax	0.97	2.05	2.52	2.56	2.12	2.54	2.16	1.87	1.20	0.24
Hmax	0.93	0.97	1.07	0.97	1.09	1.08	0.97	1.19	0.98	0.88
Da	1.06	0.95	1.03	1.19	0.97	0.97	0.95	1.13	0.98	0.87
Plim	1.24	1.20	0.78	1.07	0.99	0.80	1.04	1.07	0.95	1.07
PORC	0.86	0.80	0.93	1.12	1.17	0.95	0.95	1.12	1.18	1.11
Ck	1.83	2.55	2.72	3.26	3.49	3.17	2.43	2.51	2.08	0.57

**Tabla F.8:** Pendientes de cada rango después de la tercera iteración para los parámetros del modelo, usando la FO TRMSE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cmax	0.55	1.07	1.24	1.42	1.42	1.40	1.37	1.22	1.00	0.59
Hmax	0.87	1.27	1.35	1.35	1.31	1.32	1.11	1.01	0.78	0.54
Da	1.25	1.24	1.33	1.38	1.36	1.29	1.28	0.79	0.63	0.57
Plim	0.91	0.93	0.78	0.81	1.16	0.96	1.41	1.26	1.09	1.03
PORC	0.78	0.81	1.01	1.08	0.93	1.17	1.10	1.10	1.08	1.14
Ck	0.47	1.46	1.52	1.87	1.90	1.73	1.88	1.53	1.24	0.37

**Tabla F.9:** Pendientes de cada rango de la última iteración para los parámetros del modelo, usando la FO TRMSE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cmax	0.55	1.07	1.26	1.54	1.50	1.69	1.50	1.43	1.36	0.43
Hmax	0.98	1.22	1.39	1.49	1.38	1.41	1.19	1.10	0.81	0.45
Da	1.70	1.31	1.64	1.38	1.35	1.15	0.97	0.99	0.65	0.48
Plim	0.96	0.69	0.82	0.81	1.02	1.12	1.21	1.35	1.35	1.19
PORC	0.68	0.76	0.91	1.09	1.16	1.00	1.14	1.14	1.35	1.22
Ck	1.03	1.02	1.00	1.17	1.06	1.01	1.00	0.90	0.86	1.04

**Tabla F.10:** Pendientes de cada rango después de la primera iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO ROCE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0.96	3.04	4.05	5.13	4.14	4.30	4.17	4.18	2.65	0.99
B	1.07	0.91	0.99	0.90	0.93	1.12	0.97	1.14	0.92	1.17

**Tabla F.11:** Pendientes de cada rango después de la última iteración para los factores de modificación de entrada, usando la FO ROCE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	1.00	0.92	1.09	1.28	1.28	1.09	1.17	0.94	0.91	0.68
B	0.73	1.04	1.39	1.29	1.43	0.97	1.09	1.03	0.82	0.78

**Tabla F.12:** Pendientes de cada rango de la última iteración para los parámetros del modelo, usando la FO ROCE.

Parámetro	Pendientes de cada rango									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cmax	1.13	0.99	0.90	1.12	1.24	1.02	0.96	0.90	0.99	0.87
Hmax	0.97	0.98	1.21	0.97	0.96	0.92	0.98	1.10	1.02	0.97
Da	0.96	0.98	0.95	0.98	1.21	1.03	0.91	0.85	1.15	1.10
Plim	1.00	1.16	1.09	1.18	1.02	0.98	0.96	1.07	0.95	0.76
PORC	1.04	0.91	1.00	0.94	1.05	0.97	1.14	0.99	1.11	0.91
Ck	1.11	0.93	1.07	0.97	1.01	1.06	1.01	0.90	0.94	1.08

## ANEXO G: Porcentajes de aciertos de pronósticos.

**Tabla G.1:** Porcentaje de acierto de pronóstico de uno hasta seis meses utilizando la F.O. RMSE.

Mes	% Acierto a 6 meses, usando FO RMSE					
	1 mes	2 meses	3 meses	4 meses	5 meses	6 meses
dic-03	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
ene-04	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
feb-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mar-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-04	0.0	0.0	0.0	25.0	20.0	16.7
jun-04	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
jul-04	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
ago-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-04	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
oct-04	100.0	100.0	100.0	75.0	80.0	83.3
nov-04	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
dic-04	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
ene-05	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
feb-05	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
mar-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jun-05	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
jul-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-05	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
sep-05	100.0	50.0	33.3	50.0	40.0	33.3
oct-05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3
nov-05	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
dic-05	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
ene-06	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
feb-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mar-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-06	0.0	0.0	33.3	50.0	40.0	33.3
jun-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jul-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
oct-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov-06	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3

dic-06	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
ene-07	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
feb-07	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
mar-07	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
abr-07	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	33.3
may-07	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
jun-07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jul-07	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
ago-07	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
sep-07	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
oct-07	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3
nov-07	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
dic-07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ene-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
feb-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mar-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-08	0.0	0.0	0.0	25.0	20.0	16.7
jun-08	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
jul-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
oct-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov-08	0.0	50.0	66.7	75.0	60.0	50.0
dic-08	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
ene-09	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
feb-09	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
mar-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-09	0.0	0.0	0.0	25.0	20.0	16.7
jun-09	0.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
jul-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-09	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
oct-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov-09	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3
dic-09	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
ene-10	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
feb-10	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
mar-10	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
abr-10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-10	0.0	50.0	66.7	50.0	40.0	33.3
jun-10	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3

**Tabla G.2:** Porcentaje de acierto de pronóstico de uno hasta seis meses utilizando la F.O. TRMSE.

Mes	% Acierto a 6 meses, usando FO TRMSE					
	1 mes (%)	2 meses (%)	3 meses (%)	4 meses (%)	5 meses (%)	6 meses (%)
dic-03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ene-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
feb-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mar-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-04	0.0	0.0	0.0	25.0	20.0	16.7
jun-04	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
jul-04	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
ago-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-04	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
oct-04	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	33.3
nov-04	0.0	0.0	0.0	25.0	20.0	16.7
dic-04	0.0	50.0	66.7	50.0	40.0	33.3
ene-05	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
feb-05	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
mar-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jun-05	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
jul-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-05	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
sep-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
oct-05	100.0	100.0	100.0	75.0	80.0	83.3
nov-05	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
dic-05	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
ene-06	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
feb-06	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
mar-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-06	0.0	0.0	33.3	50.0	40.0	33.3
jun-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jul-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
oct-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov-06	100.0	100.0	66.7	75.0	80.0	83.3
dic-06	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3

ene-07	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
feb-07	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
mar-07	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
abr-07	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	33.3
may-07	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
jun-07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jul-07	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
ago-07	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
sep-07	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
oct-07	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
nov-07	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
dic-07	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
ene-08	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
feb-08	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
mar-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-08	0.0	0.0	0.0	25.0	20.0	16.7
jun-08	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
jul-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
oct-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
dic-08	0.0	0.0	33.3	25.0	20.0	16.7
ene-09	0.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
feb-09	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
mar-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-09	0.0	0.0	0.0	25.0	20.0	16.7
jun-09	0.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
jul-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-09	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
oct-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov-09	0.0	0.0	33.3	50.0	60.0	50.0
dic-09	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
ene-10	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
feb-10	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
mar-10	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
abr-10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-10	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
jun-10	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3

**Tabla G.3:** Porcentaje de acierto de pronóstico de uno hasta seis meses utilizando la F.O.  
ROCE.

Mes	% Acierto a 6 meses, usando FO ROCE					
	1 mes	2 meses	3 meses	4 meses	5 meses	6 meses
dic-03	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
ene-04	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
feb-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mar-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-04	0.0	0.0	0.0	25.0	20.0	16.7
jun-04	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
jul-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-04	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
oct-04	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
nov-04	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
dic-04	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
ene-05	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
feb-05	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
mar-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-05	0.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
jun-05	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
jul-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-05	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
sep-05	100.0	50.0	33.3	50.0	40.0	33.3
oct-05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3
nov-05	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
dic-05	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
ene-06	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
feb-06	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
mar-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-06	0.0	0.0	33.3	25.0	20.0	16.7
jun-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jul-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
oct-06	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
nov-06	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
dic-06	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3

ene-07	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
feb-07	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
mar-07	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
abr-07	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	33.3
may-07	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
jun-07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jul-07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-07	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
sep-07	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
oct-07	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3
nov-07	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
dic-07	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
ene-08	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
feb-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mar-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-08	100.0	50.0	33.3	50.0	40.0	33.3
jun-08	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
jul-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
oct-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov-08	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
dic-08	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
ene-09	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
feb-09	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
mar-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
abr-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
may-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jun-09	0.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
jul-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ago-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sep-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
oct-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nov-09	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3
dic-09	100.0	100.0	100.0	100.0	80.0	66.7
ene-10	100.0	100.0	100.0	75.0	60.0	50.0
feb-10	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
mar-10	100.0	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
abr-10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7
may-10	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3
jun-10	100.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3

**Tabla G.4:** Resumen de los porcentajes de acierto de caudales para cada mes obtenidos del promedio de los años 2004 al 2010, utilizando la F.O. RMSE.

Mes	Un mes (%)	Dos meses (%)	Tres meses (%)	Cuatro meses (%)	Cinco meses (%)	Seis meses (%)
Enero	85.7	71.4	57.1	42.9	34.3	28.6
Febrero	57.1	42.9	28.6	21.4	17.1	14.3
Marzo	28.6	14.3	9.5	7.1	5.7	4.8
Abril	14.3	7.1	4.8	3.6	2.9	4.8
Mayo	14.3	21.4	23.8	32.1	25.7	21.4
Junio	57.1	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
Julio	33.3	25.0	16.7	12.5	10.0	8.3
Agosto	33.3	16.7	11.1	8.3	6.7	5.6
Septiembre	66.7	41.7	33.3	33.3	26.7	22.2
Octubre	50.0	50.0	50.0	45.8	46.7	41.7
Noviembre	83.3	91.7	94.4	87.5	76.7	63.9
Diciembre	85.7	85.7	76.2	64.3	51.4	42.9

**Tabla G.5:** Resumen de los porcentajes de acierto de caudales para cada mes obtenidos del promedio de los años 2004 al 2010, utilizando la F.O. TRMSE.

Mes	Un mes (%)	Dos meses (%)	Tres meses (%)	Cuatro meses (%)	Cinco meses (%)	Seis meses (%)
Enero	71.4	78.6	61.9	50.0	40.0	33.3
Febrero	85.7	57.1	42.9	32.1	25.7	21.4
Marzo	28.6	21.4	14.3	10.7	8.6	7.1
Abril	14.3	7.1	4.8	3.6	2.9	4.8
Mayo	28.6	28.6	28.6	35.7	28.6	23.8
Junio	57.1	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7
Julio	33.3	25.0	16.7	12.5	10.0	8.3
Agosto	33.3	16.7	11.1	8.3	6.7	5.6
Septiembre	50.0	33.3	27.8	25.0	20.0	16.7
Octubre	50.0	41.7	38.9	29.2	26.7	27.8
Noviembre	50.0	50.0	50.0	58.3	53.3	47.2
Diciembre	57.1	64.3	71.4	60.7	51.4	42.9

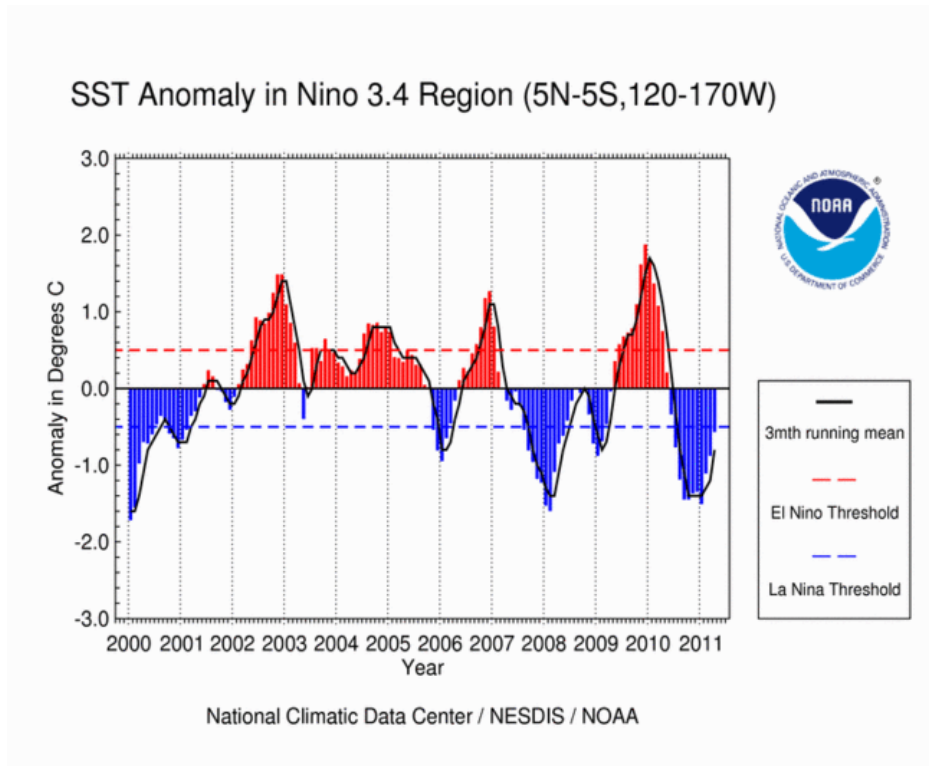
**Tabla G.6:** Resumen de los porcentajes de acierto de caudales para cada mes obtenidos del promedio de los años 2004 al 2010, utilizando la F.O. ROCE.

Mes	Un mes (%)	Dos meses (%)	Tres meses (%)	Cuatro meses (%)	Cinco meses (%)	Seis meses (%)
Enero	100.0	85.7	66.7	53.6	42.9	35.7
Febrero	71.4	50.0	38.1	28.6	22.9	19.0
Marzo	28.6	21.4	14.3	10.7	8.6	7.1
Abril	14.3	7.1	4.8	3.6	2.9	7.1
Mayo	42.9	35.7	28.6	28.6	22.9	19.0
Junio	57.1	57.1	38.1	28.6	22.9	19.0
Julio	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Agosto	33.3	25.0	16.7	12.5	10.0	8.3
Septiembre	50.0	33.3	27.8	29.2	23.3	19.4
Octubre	66.7	66.7	66.7	62.5	60.0	52.8
Noviembre	100.0	100.0	100.0	100.0	86.7	75.0
Diciembre	100.0	100.0	90.5	75.0	62.9	52.4

**Tabla G.7:** Meses que agrupa cada estación para el cálculo promedio de precipitaciones estacionales para realizar un pronóstico.

Mes desde donde se realiza el pronostilco	Estación 1			Estación 2			Estación 3			Estación 4		
Enero	Feb	Mar	Abr	Mar	Abr	May	Abr	May	Jun	May	Jun	Jul
Febrero	Mar	Abr	May	Abr	May	Jun	May	Jun	Jul	Jun	Jul	Ago
Marzo	Abr	May	Jun	May	Jun	Jul	Jun	Jul	Ago	Jul	Ago	Sep
Abril	May	Jun	Jul	Jun	Jul	Ago	Jul	Ago	Sep	Ago	Sep	Oct
Mayo	Jun	Jul	Ago	Jul	Ago	Sep	Ago	Sep	Oct	Sep	Oct	Nov
Junio	Jul	Ago	Sep	Ago	Sep	Oct	Sep	Oct	Nov	Oct	Nov	Dic
Julio	Ago	Sep	Oct	Sep	Oct	Nov	Oct	Nov	Dic	Nov	Dic	Ene
Agosto	Sep	Oct	Nov	Oct	Nov	Dic	Nov	Dic	Ene	Dic	Ene	Feb
Septiembre	Oct	Nov	Dic	Nov	Dic	Ene	Dic	Ene	Feb	Ene	Feb	Mar
Octubre	Nov	Dic	Ene	Dic	Ene	Feb	Ene	Feb	Mar	Feb	Mar	Abr
Noviembre	Dic	Ene	Feb	Ene	Feb	Mar	Feb	Mar	Abr	Mar	Abr	May
Diciembre	Ene	Feb	Mar	Feb	Mar	Abr	Mar	Abr	May	Abr	May	Jun

## ANEXO H: Anomalía en Niño Región 3.4



**Figura H-1** Temperatura Superficial del Mar Anomalía en Niño Región 3.4 - 1999 al Presente. (NOAA, <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst.php#oni>)