

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA



**“IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA HIDROLOGÍA
DE LA CUENCA DEL RÍO ICA”**

Presentado por:

CARLOS ROBERTO MARTÍNEZ LOAYZA

TESIS PARA OBTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Lima – Perú

2014

INDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	12
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	13
2.1. La cuenca hidrográfica como unidad de planificación.....	13
2.2. El ciclo hidrológico como sistema	13
2.3. Modelo del sistema hidrológico	14
2.4. Clasificación de los modelos hidrológicos.....	15
2.5. El modelo SWAT - Soil and Water Assessment Tool	16
2.6. Experiencias con SWAT en Perú	19
2.7. Análisis de sensibilidad	19
2.8. Calibración y validación del modelo.....	21
2.9. Cambio climático	22
2.10. Escenarios de Emisiones	24
2.11. Modelos de la Circulación General (MCG)	26
2.12. CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project-Phase 3)	26
2.13. Cambio de escala estadístico.....	27
2.14. Incertidumbre en la predicción del clima futuro	28
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1. Área de estudio.....	29
3.2. Materiales	30
3.3. Métodos.....	33
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	48
4.1. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico	48
4.2. Cambio de escala estadístico y proyección de datos climáticos.....	54
4.3. Efecto del cambio climático en la oferta de agua.....	60
V. CONCLUSIONES	66
VI. RECOMENDACIONES	68
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Parámetros más influyentes obtenidos en el modelo SWAT.....	20
Cuadro 2: Fuentes de información geográfica suministrada al modelo.	30
Cuadro 3: Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas disponibles en el estudio.....	30
Cuadro 4: Descripción de los MCG utilizados	31
Cuadro 5: Cambio de la temperatura media global (°C) con respecto a 1990	31
Cuadro 6: Cobertura Vegetal del ámbito de estudio.....	34
Cuadro 7: Valores finales asignados a las coberturas de suelo	34
Cuadro 8: Características Físico – Químicas de los suelos del ámbito de estudio	36
Cuadro 9: Variables hidrometeorológicas utilizadas en el estudio.....	38
Cuadro 10: Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad	43
Cuadro 11: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo	49
Cuadro 12: Valores de los índices estadísticos de calibración a nivel diario	52
Cuadro 13: Valores de los índices estadísticos de calibración a nivel mensual	53
Cuadro 14: Valores de los parámetros del modelo calibrado	53
Cuadro 15: Factores de ajuste de la precipitación media mensual (1980-1999).....	56
Cuadro 16: Clasificación de los MCG de acuerdo a su ajuste al área de estudio.....	58
Cuadro 17: Variación de precipitación anual por cada estación meteorológica.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global.....	14
Figura 2: Representación esquemática del ciclo hidrológico en SWAT	18
Figura 3: Cambios observados en temperatura, nivel del mar y cobertura de nieve	23
Figura 4: Mapa de ubicación del área de estudio	29
Figura 5: Incremento de la temperatura superficial global respecto a 1980-1999.....	32
Figura 6: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio.....	33
Figura 7: Mapa de vegetación y uso de suelo	35
Figura 8: Mapa de tipo de suelo	36
Figura 9: Mapa de Ubicación de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas	38
Figura 10: Representación del reservorio en el modelo SWAT	42
Figura 11: Cambio de escala por el método CDF.....	46
Figura 12: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo	48
Figura 13: Series de caudales diarios observados y simulados	50
Figura 14: Series de caudales mensuales observados y simulados.....	51
Figura 15: Coeficiente de Pearson de caudales diarios observados y simulados	52
Figura 16: Coeficiente de Pearson de mensuales diarios observados y simulados	52
Figura 17: Series de precipitaciones generadas por los MGC (periodo 1980-1999).....	55
Figura 18: Diagrama de cajas de precipitación observada y simulada (1980-1999).....	57
Figura 19: Precipitación mensual Observada y Proyectada promedio (2080-2099)	59
Figura 20: Función de distribución acumulada de caudales diarios proyectados.....	60
Figura 21: Diagrama de cajas los caudales diarios proyectados.....	61
Figura 22: Diagrama de cajas de los caudales mensuales proyectados	62
Figura 23: Caudales promedio proyectados a finales del siglo XXI (2080-2099)	63
Figura 24: Variación relativa a los caudales medios mensuales observados.....	63
Figura 25: Persistencias de disponibilidad hídrica al 50%, 75%, 90% y 95%	64
Figura 26: Variación de la oferta anual de agua a fines del siglo XXI (2080-2099).....	65

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Estaciones con registros de precipitación medias mensuales ubicadas dentro de la cuenca del Río Ica.....	74
Anexo 2: Estaciones con registros de temperaturas máximas mensuales ubicadas dentro de la cuenca del río Ica	78
Anexo 3: Estaciones con registros de temperaturas mínimas mensuales ubicadas dentro de la cuenca del Río Ica	79
Anexo 4: Diagrama de cajas de los datos diarios de precipitación generados en cada estación meteorológica para el periodo (1980-1999)	80
Anexo 5: Función de distribución de los datos diarios de todos los MGC utilizados en el estudio.....	82
Anexo 6: Diagrama de cajas de los caudales diarios generados en la época seca y húmeda	83
Anexo 7: Diagrama de cajas de los caudales diarios proyectados por cada mes.....	84

ABSTRACT

The hydrological cycle has been substantially influenced by climate change and human activities. It is therefore of utmost importance analyze the impact of climate change on hydrology, particularly on a regional scale, in order to understand potential future changes of water resources and water-related disaster, and provide support for regional water management; nevertheless, we should consider the uncertainty that naturally exist on this kind of evaluation. This research used the hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for represent the Ica River Basin, central coast of Perú, in order to evaluate the effect of the climate change on the water production for the XXI Century. The hydrologic model was calibrated and validated for a period of 11 years (2000-2010) getting the Nash-Sutcliffe (NSE) values of 0.890 y 0.808 respectively, that indicates reasonable performance of the hydrological model. The precipitation and temperature are projected for the emission scenario A1B, by using thirteen General Circulation Models (MGC) and the regional temperature changes proposed by the IPCC. The results of the projected runoff indicate a mean increase of 30.53% to 53.97% on the water annual offer; considering the change of the water production in a monthly interval, the most outstanding changes are projected in March, September and December with mean variations of +59.60%, +133.47% y +74.33% respectively, in the same way, it is projected the reduction of the runoff in July and August with decreases of -86.86% y -21.29% respectively.

Key words:

Hydrology, Climate change, SWAT, Ica, water availability

RESUMEN

El ciclo hidrológico ha estado siendo substancialmente influenciado por el cambio climático y las actividades humanas. Por lo cual, se denota la importancia del análisis del impacto del cambio climático en la hidrología, particularmente a una escala regional, de manera que se pueda entender los futuros cambios potenciales de los recursos hídricos y desastres relacionados al agua, además de proveer soporte a los planes de gestión de agua; sin embargo, debemos también tener en cuenta la incertidumbre que naturalmente existe en dicha evaluación. En esta investigación, se utilizó el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para representar la cuenca del río Ica, ubicada en la parte central de la costa peruana, con fines de evaluar el efecto del cambio climático en la oferta de agua para fines del siglo XXI. El modelo hidrológico fue calibrado y validado para un periodo total de 11 años (2000 – 2010) obteniéndose los valores de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.890 y 0.808 respectivamente, lo que representa un buen desempeño del modelo hidrológico. La precipitación y temperatura se proyectaron para el escenario A1B, por medio del uso de trece Modelos de Circulación General (MCG) y las variaciones de temperatura regional propuestas por el IPCC. Los resultados de las proyecciones de escorrentía indican un incremento promedio de 30.53% hasta 53.97% en la oferta anual de agua; considerando la variación de la producción de agua a nivel mensual, se proyectan los mayores incrementos en Marzo, Septiembre y Diciembre con variaciones promedio de +59.60%, +133.47% y +74.33% respectivamente, como también se proyecta la disminución de la escorrentía en los meses de Julio y Agosto con descensos de -86.86% y -21.29% respectivamente.

Key words:

Hidrología, Cambio climático, SWAT, Ica, Disponibilidad hídrica

I. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos son vitales para preservar la humanidad, seres vivos y ecosistemas. Muchas regiones alrededor del mundo están enfrentando desafíos concernientes a los recursos hídricos, que incluyen serios problemas de escasez de agua e inundaciones (OHCHR, 2010; UNEP, 2008). Se ha encontrado que el caudal de los principales ríos de América del Sur ha experimentado una tendencia creciente desde principios de 1970. Se sugiere que esta simultaneidad puede reflejar el impacto de un cambio climático a gran escala. (García y Mechoso, 2005).

La cuenca del río Ica es uno de los valles más productivos de la costa peruana en base a su actividad agrícola; sin embargo, la satisfacción de la demanda de agua se encuentra en una situación vulnerable debido al crecimiento de la población, áreas de cultivo y la declaración del acuífero de Ica–Villacurí–Lanchas como zona de veda en el año 2011 por la sobreexplotación de las aguas subterráneas en dicha región.

Actualmente los modelos relacionados a la cuenca hidrográfica son esenciales para el análisis de los procesos hidrológicos, como también para el estudio de los impactos naturales y antropológicos relacionados al recurso hídrico. En el presente trabajo se evaluó el efecto del cambio climático en la variación de la oferta de agua de la cuenca del río Ica para fines del siglo XXI, en base al modelo hidrológico SWAT y los Modelos de la Circulación General (MCG) CMIP3 . MRI 3.1 y MRI 3.2. El modelo SWAT se ha utilizado como una herramienta eficaz para modelar los impactos del cambio climático sobre los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos en diversas cuencas alrededor del mundo (Arnold et al., 1998).

La proyección de la disponibilidad de agua en el río Ica permitirá, a los usuarios y encargados de toma de decisiones, entender mejor el funcionamiento de la cuenca en condiciones de cambio climático. De manera que los resultados de esta investigación servirán como un marco de referencia para de planificación y gestión del recurso hídrico en la cuenca.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 LA CUENCA HIDROGRÁFICA COMO UNIDAD DE PLANIFICACIÓN

Dentro de cualquier estudio referido al recurso hídrico, es necesario establecer como unidad de análisis a la cuenca hidrográfica; la UNESCO (1974) denomina como cuenca hidrográfica al área que recoge las aguas que en ella se precipitan o que surgen del subsuelo hacia un colector principal. El nombre del cauce colector es el que, en general, se aplica a la cuenca. El límite horizontal de la cuenca está definido por divisoria de aguas y el vertical por el extremo superior de la vegetación hasta los estratos geológicos limitantes bajo la tierra.

Franquet (2005) distingue la cuenca en parte alta, media y baja, destaca la relación entre ellas: los cambios, uso y manejo en la parte alta, afectan de manera determinante las partes más bajas. Por tanto, la cuenca como sistema natural y socio-económico, debe entenderse como una unidad de planificación integrada, con problemas de mucha complejidad.

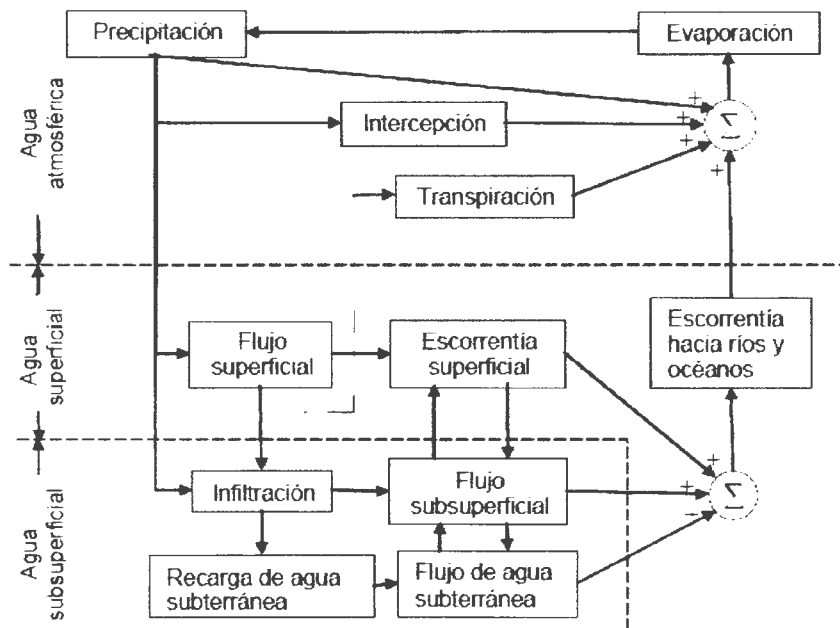
El análisis hidrológico de una cuenca hidrográfica como sistema proporciona un instrumento básico para estudios de planificación ambiental y de desarrollo, ya que constituye una expresión del medio ambiente, donde tiene lugar el ciclo hidrológico, en el cual existen interrelaciones entre componentes con cierto grado de permanencia temporal (Salinas,2003).

2.2 EL CICLO HIDROLÓGICO COMO SISTEMA

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos y es posible que nunca se les entienda en su totalidad. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto, pueden representarse en forma simplificada por medio del concepto de sistema. Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo (Chow, 1994).

Al estudiar el ciclo hidrológico, se estudia la circulación ininterrumpida del agua entre la tierra y la atmósfera, donde se toma en cuenta su distribución y circulación, sus propiedades físicas y químicas, su interacción con el medio ambiente y con los seres vivos y en particular con los seres humanos, sabiendo que éstos ejercen funciones constructivas o destructivas que afectan la circulación y la calidad del agua en la naturaleza.

De manera que el ciclo hidrológico puede ser tratado como un sistema, que a la vez se encuentra subdividido en tres subsistemas: a) el sistema de agua atmosférica, que contiene los procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración; b) el sistema de agua superficial, que contiene los procesos de flujo superficial, escorrentía superficial, nacimientos de agua subsuperficial y subterránea, y escorrentía hacia ríos y océanos; y c) el sistema de agua subsuperficial, que contiene los procesos de infiltración, recarga de acuífero, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea. (Chow, 1994).



Fuente: Chow et al., 1994.

Figura 1: Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global.

2.3 MODELO DEL SISTEMA HIDROLÓGICO

Un modelo de sistema hidrológico es una aproximación del sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas. Central a esta estructura del modelo está el concepto de transformación del sistema, donde las entradas y salidas pueden expresarse en función del tiempo, $I(t)$ y $Q(t)$ respectivamente, donde t pertenece al rango en consideración. El sistema realiza una transformación de la entrada en la salida representada por:

$$Q(t) = \Omega I(t)$$

2.5 EL MODELO SWAT - SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL

La Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua, SWAT, por sus siglas en inglés, es un modelo de dominio público desarrollado conjuntamente por el USDA Servicio de Investigación Agrícola (USDA-ARS) y la Universidad de Texas A & M AgriLife Research, parte de la Universidad de Texas A & M University System.

SWAT incorpora características de varios modelos y proviene directamente del modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins, Williams et al., 1985; Arnold et al., 1990), un modelo continuo que fue desarrollado para simular contaminación por fuentes dispersas para cuencas. Los modelos específicos que contribuyeron significativamente en el desarrollo de SWAT fueron el modelo CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, Knisel, 1980), modelo de escala de parcela diseñado para simular el impacto del manejo de la tierra sobre la producción de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas, GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems, Leonard et al., 1987), modelo de contaminación por fuentes dispersas que hace énfasis sobre las cargas subterráneas de pesticidas y nutrimentos, y EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator, Williams et al., 1984) conocido hoy día como Environmental Policies Integrated Climate (USDA-ARS-BRC, 1997) que fue originalmente desarrollado para simular el impacto de la erosión sobre la productividad de los cultivos y evolucionó al manejo agrícola detallado, a escala de parcelas, para contaminación por fuentes dispersas (Neitsch et al., 2002b).

SWAT es un modelo de tiempo continuo, que opera en un intervalo de tiempo diario y está diseñado para predecir el impacto en el manejo del suelo y la vegetación en la producción de agua, sedimentos y químicos agrícolas en grandes y complejas cuencas con variación en suelos, uso de suelo y condiciones de manejo en largos periodos (Arnold et al., 1998).

La cual es conocida como la ecuación de transformación del sistema. Donde Ω es una función de transferencia entre la entrada y la salida. (Chow, 1994).

Según Ponce (1989) indica que la modelización de los sistemas hidrológicos se basa en la aplicación de expresiones matemáticas y lógicas que definen las relaciones cuantitativas entre las características de flujo (salida) y los factores determinantes del flujo (entrada). Los factores esenciales de los modelos son las variables, (las cantidades físicas de descarga, área de flujo, profundidad de flujo, velocidad media, etc.) y los parámetros (cantidades que controlan el comportamiento de las variables). Cada componente del modelo puede tener una o más variables y parámetros y éstos pueden ser de naturaleza determinística, conceptual o empírica.

2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Se pueden indicar dos tipos de modelo según (Chow, 1994). Un modelo determinístico que no considera aleatoriedad, es decir que una entrada siempre producirá una misma salida. Un modelo estocástico que tiene salidas parcialmente aleatorias.

Luego se clasifican los modelos determinísticos en modelos determinísticos agregados, donde las variaciones espaciales de los procesos y características de la cuenca se representan de manera uniforme en todo el sistema. En contraste los modelos determinísticos distribuidos consideran que los procesos y características varían en distintos puntos del espacio del sistema.

Además se considera la variabilidad temporal, donde se clasifican los modelos determinísticos en flujo permanente, donde la tasa de flujo no cambia con el tiempo. Y modelos de flujo no permanente, donde existe una variación de con respecto al tiempo.

También se puede indicar la clasificación de los modelos de acuerdo a la capacidad de simular una tormenta (modelos eventuales) o una serie de eventos (modelos continuos).

De manera que el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) se clasifica como un modelo determinístico distribuido y de análisis diario a tiempo continuo.

EL modelo está basado en la siguiente ecuación general de balance hídrico:

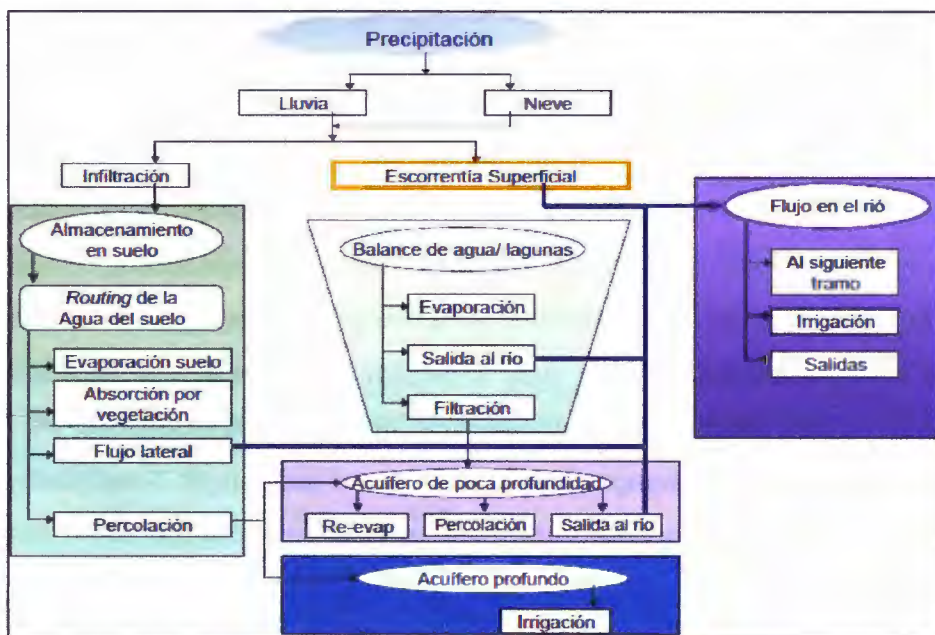
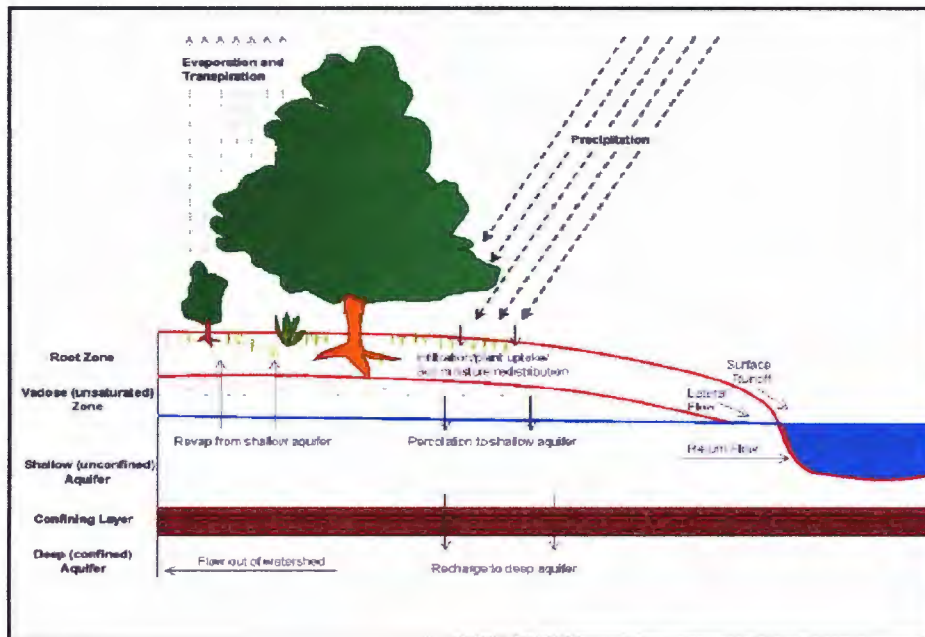
$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mmH₂O); SW_0 es el contenido de agua inicial en el día i (mmH₂O); t es el tiempo (día); R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mmH₂O); Q_{surf} que es la cantidad de escorrentía superficial por día (mmH₂O); w_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en día i (mmH₂O); Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mmH₂O); (Neitsch et al., 2002a).

Características del modelo SWAT:

- Está basado físicamente. En lugar de incorporar ecuaciones de regresión que describan la relación entre las variables de la data de entrada y salida. SWAT requiere información específica del clima, propiedades del suelo, topografía, vegetación, y manejo de prácticas de suelo que ocurren en la cuenca hidrográfica. El proceso físico asociado a movimiento de agua, movimiento de sedimentos, crecimiento de cultivos, ciclo de nutrientes, etc. Son directamente modelados por SWAT usando la data de entrada.
- Los beneficios de este planteamiento son:
 - Cuencas que no cuentan con data de monitoreo (Ej. Data de estación de flujo) pueden ser modeladas.
 - El impacto relativo de una data de entrada alternativa (Ej. Cambios de manejo de prácticas, clima, vegetación, etc.) en la calidad de agua u otras variables de interés pueden ser cuantificadas.
- El uso de data de entrada fácilmente disponible. SWAT puede ser usado para estudiar procesos especializados como el transporte de bacterias, usando la mínima data requerida para lograr que el modelo se ejecute.

- Es computacionalmente eficiente. Simulaciones de grandes cuencas o variedades de estrategias pueden ser ejecutadas sin una excesiva inversión de tiempo y dinero.
- SWAT es un modelo de tiempo continuo, el modelo no está diseñado para simular eventos singulares.



Fuente: Neitsch, 2011

Figura 2: Representación esquemática del ciclo hidrológico en SWAT

2.6 EXPERIENCIAS CON SWAT EN PERÚ

Actualmente se vienen realizando distintos modelos usando SWAT alrededor del mundo, en los diversos temas que puede abarcar: En Perú recientemente se viene implementando el uso de este modelo, como por ejemplo el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) con apoyo del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el Programa de CGIAR "Challenge Program on Water and Food", el martes 19 de marzo del 2013 expusieron el funcionamiento del modelo SWAT en el Río Cañete a funcionarios de ANA para mejorar su gestión en los recursos hídricos.

Además también se expuso en la conferencia internacional SWAT del 2011, el tema "Evaluación del impacto hidrológico de las actividades antropogénicas localizadas en la parte alta de la cuenca del río Jequetepeque" por Yacoub el 2011; donde se simularon, mediante el uso del SWAT, escenarios donde predominarían zonas de agricultura, zonas forestales y zonas mineras; concluyéndose que la actividad de mayor efecto erosivo es la minería.

2.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se define el análisis de sensibilidad como una evaluación de los cambios en las respuestas del modelo en función de los cambios en los valores de entrada del mismo (Nearing et al., 1990).

Tiscareno *et al.* (1994) plantean que las predicciones de los modelos están sujetas a incertidumbres causadas por: a) errores del modelo, ya que éste es una abstracción de la realidad y contiene simplificaciones y aproximaciones de los procesos representados; b) errores en la estimación de los parámetros medidos en el campo y en laboratorio, ya que muchos de los parámetros usados para describir la cuenca son difíciles de medir directamente, y c) un entendimiento incompleto de cómo los valores de los parámetros varían en el espacio y en el tiempo. Es por ello que el análisis de sensibilidad puede ser empleado para evaluar la incertidumbre del modelo en relación a los errores en la estimación de los parámetros.

Los estudios de sensibilidad ayudan a determinar si el modelo produce resultados adecuados en relación a sus parámetros de entrada. Además, suministran información

sobre el nivel de certeza del modelo, proporcionan el entendimiento interno y de los factores que influyen la respuesta del sistema físico (Nearing et al., 1990).

De manera que al realizarse este análisis, se podrá identificar los parámetros más influyentes en el modelo, para posteriormente tenerlos en cuenta en la calibración del modelo.

Por otro lado, Ponce (1989) plantea que los valores de parámetros o variables que causen poca sensibilidad, pueden ser asignados con menos rigurosidad, o con valores "conservadores" o "convencionales", tal como se refiere en la literatura.

En base a la revisión de Carmona (2007) de modelos SWAT elaborados, se muestra los parámetros más influyentes de acuerdo a la finalidad del modelo:

Cuadro 1: Parámetros más influyentes obtenidos en el modelo SWAT.

Salidas	Parámetros más influyentes	Autores y año
Cantidad y calidad del agua.	Factor de compensación de la evaporación del suelo. Factor de cobertura del canal Factor alfa del agua subterránea Coeficiente revap del agua subterránea Coeficiente de percolación del acuífero profundo Almacenamiento revap Número de curva Capacidad de agua disponible de la capa de suelo.	Kang et al.(2006)
Producción de agua.	Número de curva Capacidad de agua disponible Coeficiente de evaporación del suelo Precipitación.	Reungsang et al. (2005)
Escorrentamiento superficial	Número de curva Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo Factor de compensación de la evaporación del suelo.	Torres et al. (2005)

Escurrimiento	Número de curva	Chaubey et al. (2003)
Producción de agua	Conductividad hidráulica saturada Factor alfa del flujo base Recarga Área de drenaje Longitud del canal Ancho del canal Longitud de la pendiente Capacidad de agua disponible	Spruill et al.(2000)
Flujo base	Coefficiente revap del agua subterránea Profundidad umbral del agua en el acuífero superficial.	Torres et al.(2000)
Producción de sedimentos	Número de subcuencas	Jha et al.(2002)

Fuente: Carmona .2007

2.8 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

La calibración de un modelo consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los valores observados y los calculados, mediante cambios en parámetros de mayor influencia. De manera que estos parámetros de mayor influencia serían identificados posteriormente a un análisis de sensibilidad (Palacios, 1986). Se define también como el proceso reiterado de la búsqueda de valores de los coeficientes que produzcan la menor diferencia entre resultados simulados y observados, lo cual implica la medición, estimación o ajuste de sus valores para mejorar la capacidad predictiva del modelo con respecto a algunas variables en particular. Posteriormente, para corroborar el ajuste, se evalúa al modelo por medio de técnicas estadísticas y coeficientes de eficiencia.

Los principales factores que limitan la correcta calibración de un modelo son la insuficiencia de estaciones meteorológicas en las cercanías de la cuenca, los cortos períodos de monitoreo y la falta de continuidad de los datos, así como la carencia de mediciones de caudales en las estaciones, que generalmente tienen poca representatividad

de la gran parte de las condiciones (solamente pequeñas tormentas y tormentas durante la época de lluvia) (Guzmán et al., 2004).

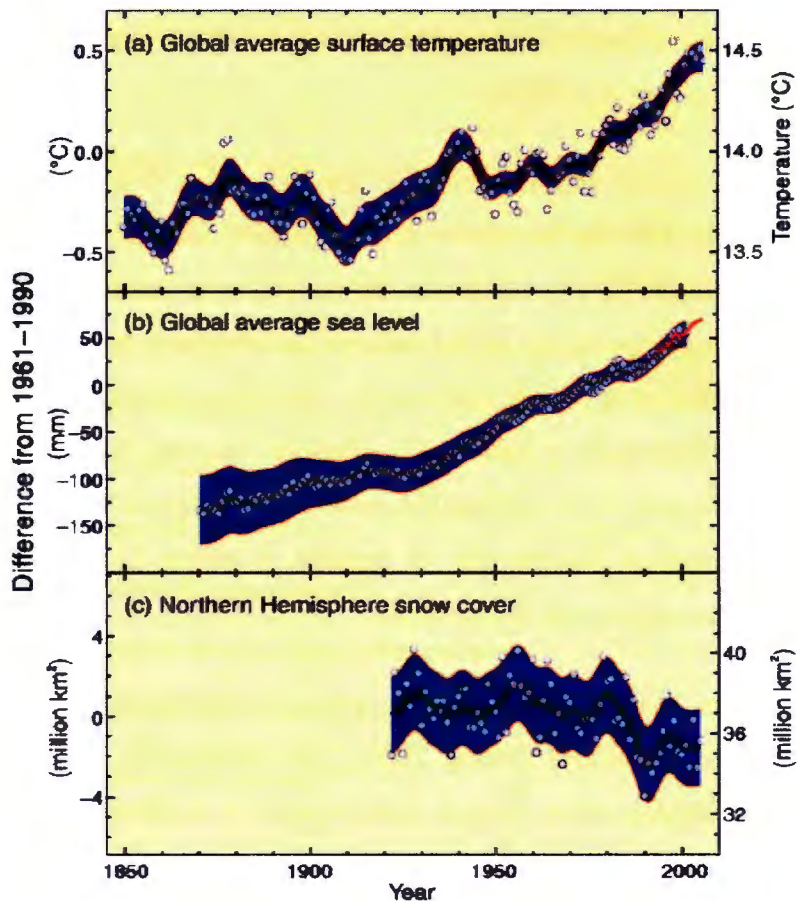
Adicionalmente, debe tenerse siempre presente que es posible destruir la representación física del sistema del modelo por los ajustes de calibración, además de ajustar parámetros erróneos. Según Palacios (1986) la validación del modelo consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los valores calculados y los observados con los parámetros determinados en la fase de calibración, pero en un período diferente. El ajuste entre escurrimientos observados y calculados obtenido durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las estimaciones que se hagan con el modelo y revela si éste puede predecir adecuadamente el comportamiento del sistema.

La validación es un proceso conveniente para la transferencia de resultados o formulación de recomendaciones (Silva, 2002). De tal manera, los modelos pueden convertirse en herramientas útiles para la planificación y el diseño de proyectos de la cuenca estudiada (Torres et al., 2005).

2.9 CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático, según el IPCC, refiere a un cambio en el estado del clima que puede ser identificado (por ejemplo, utilizando pruebas estadísticas) por los cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades, y además este cambio persista durante un período prolongado, típicamente décadas o intervalos mayores. Se refiere a cualquier cambio en el clima a través del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana. Este uso difiere de la de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en donde el cambio climático se refiere a un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados de las temperaturas atmosféricas y oceánicas globales promedio, el derretimiento generalizado de la nieve y el hielo y el aumento del nivel medio del mar.



Fuente: IPCC, 2007

Figura 3: Cambios observados en temperatura, nivel del mar y cobertura de nieve en el hemisferio norte

Gracias a las bases de datos de observaciones históricas disponibles en la actualidad ha sido posible constatar un proceso de calentamiento global en todo el planeta. Desde que se dispone de medidas instrumentales, aproximadamente desde 1850, doce de los trece años más calurosos se han observado en los últimos trece años. Además, se ha registrado un incremento de temperatura media en la superficie terrestre de $0,74^{\circ}\text{C}$ en el último siglo. Este calentamiento global ha ido unido a un aumento en la frecuencia de eventos extremos como sequías, olas de calor y frío, lluvias torrenciales, etc. (Stott et al. 2004), fenómenos con una enorme influencia en el desarrollo de la sociedad así como en la salud (Patz et. al, 2005).

2.10 ESCENARIOS DE EMISIONES

Existen escenarios del “posible clima futuro”, que son derivados de los escenarios de posibles emisiones futuras de gases de efecto invernadero, los cuales se utilizan en modelos climáticos como elemento introducido para el cálculo de proyecciones climáticas.

Cualquier descripción posible del clima futuro dependerá de asunciones sobre las emisiones futuras de los gases de invernadero y otros agentes contaminantes: es decir, dependerán de la opción del panorama de las emisiones. Un panorama en el cual la emisión de gases de invernadero es baja, debe conllevar a un cambio menos rápido del clima que uno en el cual las emisiones son altas. Un panorama del cambio del clima por lo tanto es una descripción coherente de un cambio futuro del clima bajo asunciones específicas sobre el crecimiento de emisiones de gases de invernadero y de otros agentes contaminantes y sobre otros factores que puedan influenciar en el clima futuro.

En el 2000, el IPCC finalizó su Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (REEE) ideados por Nakicenovic y otros. Estos nuevos escenarios examinan el período de 1990 al 2100 e incluyen diversos supuestos socioeconómicos como la población mundial y el producto bruto interno. Los escenarios REEE se han utilizado como base de las proyecciones climáticas de modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) y modelo acoplados.

Los escenarios comprenden una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas y de cambio tecnológico y está constituido de cuatro familias de escenarios: A1, A2, B1 y B2.

- **Escenario A1.** La familia de escenarios y línea evolutiva A1 describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido: la población mundial alcanza su nivel más alto a mitad de siglo y disminuye posteriormente, produciéndose una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficientes. Las cuestiones más importantes son la interacción cultural y social entre las regiones y la capacitación, con una importante reducción de las diferencias regionales en los ingresos per cápita. La familia de los escenarios A1 se divide en tres grupos que describen las distintas direcciones del cambio tecnológico en el sistema energético. Los tres

grupos A1 se distinguen por su énfasis tecnológico: fuentes de energía intensivas de origen fósil A1F1, de origen no fósil (A1T) o un equilibrio entre todas las fuentes A1B (el equilibrio se define como la no dependencia excesiva de una fuente de energía concreta, suponiendo que se apliquen ritmos similares de mejoras en todas las formas de aprovisionamiento energético y en las tecnologías de uso final).

- **Escenario A2.** La familia de escenarios y línea evolutiva A2 describe un mundo muy heterogéneo. La cuestión subyacente es la autosuficiencia y preservación de las identidades locales. Los perfiles de fertilidad en las distintas regiones tienden a converger muy lentamente, lo cual acarrea un aumento continuo constante de la población. El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- **Escenario B1.** La familia de escenarios y línea evolutiva B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial, que alcanza su nivel más alto a mediados del siglo para disminuir posteriormente, como línea evolutiva A1 pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de la información y de los servicios, con reducciones en el consumo de materiales e introducción de tecnologías limpias y de recursos eficaces. En esta línea evolutiva se hace hincapié en las soluciones mundiales a la sostenibilidad económica social y ambiental, lo que comprende una mejora de la equidad.
- **Escenario B2.** La familia de escenarios y línea evolutiva B2 describe un mundo en el que se hace hincapié en las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Se trata de un mundo cuya población mundial crece continuamente, a un ritmo menor al de la línea evolutiva A2, con niveles medios de desarrollo económico y cambios tecnológicos menos rápidos y más variados que en las líneas evolutivas B1 Y A1. Aunque el escenario también está orientado hacia la protección ambiental y a la equidad social, se centra en las escalas: local y regional.

2.11 MODELOS DE LA CIRCULACIÓN GENERAL (MCG)

Los modelos numéricos MCG (General Circulation Models (GCMs) siglas en inglés), representan los procesos físicos de la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie de la tierra; son las herramientas más avanzadas actualmente disponibles para la simulación de la respuesta del sistema climático global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. (IPCC, 2013)

Si bien los modelos más simples también se han utilizado para proporcionar estimaciones a nivel mundial o regional-promediado de la respuesta climática, sólo los MCG, posiblemente en combinación con los modelos regionales anidados, tienen el potencial de proporcionar estimaciones geográficamente y físicamente coherentes de cambio climático regional que se requieren en análisis de impacto. (IPCC, 2013)

Los MCG representan el clima usando una rejilla tridimensional sobre la tierra, que típicamente tienen una resolución horizontal de entre 250 y 600 km. Su resolución es bastante gruesa en relación con la escala de las unidades de exposición en la mayoría de las evaluaciones de impacto. Además, muchos procesos físicos, tales como los relacionados con las nubes, también se producen a escalas más pequeñas y no pueden ser adecuadamente modelados; esta es una fuente de incertidumbre en las simulaciones basadas en GCM del clima futuro. (IPCC, 2013)

Los resultados de los modelos de circulación general (MCG) pueden proporcionar series futuras de precipitación y temperatura sobre un territorio extenso, que se pueden detallar en un área menor mediante técnicas de “downscaling” o “cambio de escala”.

2.12 CMIP3 (COUPLED MODEL INTERCOMPARISON PROJECT-PHASE 3)

En respuesta a una actividad propuesta por las entidades PMIC y WGCM, el PCMDI voluntariamente se ofreció a coleccionar los resultados de los modelos aportados por los principales centros de modelización de todo el mundo. Los resultados de modelos climáticos a partir de simulaciones del clima pasado, presente y futuro que se recogieron mediante el PCMDI, especialmente durante los años 2005 y 2006, constituyen la fase 3 del Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP3). En parte, el WGCM organizó una actividad para permitir que quienes están fuera de los principales centros de modelización, puedan realizar investigaciones de interés para que los científicos del clima

preparen el Cuarto informe de evaluación (AR4) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

El IPCC fue establecido por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa Ambiental de las Naciones Unidas para evaluar la información científica sobre el cambio climático. El IPCC publica informes que resumen el estado de este campo de la ciencia.

Esta colección sin precedentes, de la producción de modelos recientes, se conoce oficialmente como el "WCRP CMIP3 multi-model dataset". Tiene el propósito de servir a Grupo de Trabajo I del IPCC, que se centra en el sistema climático físico - atmósfera, superficie terrestre, océano y el hielo del mar - y la elección de las variables archivadas en el PCMDI que refleja este enfoque. Un conjunto más comprensivo de la producción de un determinado modelo, puede estar disponible en la institución que lo produjo.

Con el consentimiento de los grupos de modelado climático participantes, el WGCM ha declarado el CMIP3 como un multi-modelo de conjunto de código abierto y libre, con fines no comerciales. Después de registrarse y aceptar los "términos de uso", ahora cualquiera puede obtener la salida del modelo a través del portal de datos ESG, ftp, o el servidor OPeNDAP.

2.13 CAMBIO DE ESCALA ESTADÍSTICO

Los métodos de "downscaling" estadístico se basan en modelos que relacionan de forma empírica las variables de circulación a gran escala (predictores), dadas por los modelos de circulación general (GCMs), con las variables locales observadas en superficie (predicando típicamente temperatura y precipitación). Dichos modelos se ajustan utilizando datos del clima presente y son posteriormente aplicados para proyectar localmente las simulaciones futuras de los GCMs, lo que supone su mayor limitación, puesto que se asume su estacionalidad (Wilby et al. 2004). Pese a ello, presentan otras muchas ventajas: Tienen la capacidad de calibrar los desajustes sistemáticos de los GCMs (debidos, por ejemplo, a la grosera representación de la orografía), permiten la selección manual de predictores (incluyendo sólo aquellos que sean reproducidos con mayor fiabilidad) y su pre-proceso (Brands et al. 2001b)

El cambio de escala estadístico (Statistical Downscaling) es una relación estadística que es establecida en base a datos observados de pequeña escala y variables de gran escala (GCM): dicha relación se utilizará posteriormente en los datos del MCG para obtener las variables locales de la salida del MCG. (Hessami, 2004)

2.14 INCERTIDUMBRE EN LA PREDICCIÓN DEL CLIMA FUTURO

En términos simples, la incertidumbre es algo de lo cual no estamos seguros. La incertidumbre que se tiene al predecir el clima futuro se da por dos razones: La primera está asociada al calentamiento global, el cual sabemos que se ha debido en gran parte en los últimos 50 años al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero y a futuro no sabemos cómo van a ser las emisiones de estos gases en el futuro. En segundo lugar, no sabemos con exactitud cuáles van a ser los efectos que tendrán estas emisiones sobre el sistema climático. Debido a estas dos fuentes de incertidumbre, se van a presentar incertidumbres en los escenarios generados por los modelos de circulación de la atmósfera. Existen otras fuentes de incertidumbres como las que provienen de la regionalización y la variabilidad natural que también deben ser consideradas al analizar las salidas de los modelos. (PROCLIM, 2005)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca integrada del río Ica, se encuentra formada por la cuenca natural del río Ica, en la Vertiente del Pacífico, y también parte de la cuenca alta del río Pampas, en la Vertiente del Atlántico, que constituye el Sistema Choclococha.

El presente estudio, se desarrolla en la parte alta de la cuenca del río Ica (área delimitada a partir de la estación hidrométrica “La Achirana”) debido que a partir de esta área se pueden identificar precipitaciones considerables; cubriendo una extensión aproximada de 2 713 km², situados por encima de los 398 m.s.n.m. y localizándose geográficamente entre los paralelos 13° 58' y 13° 4.5' de latitud Sur y los meridianos 75°43' y 74° 59'O de longitud Oeste.

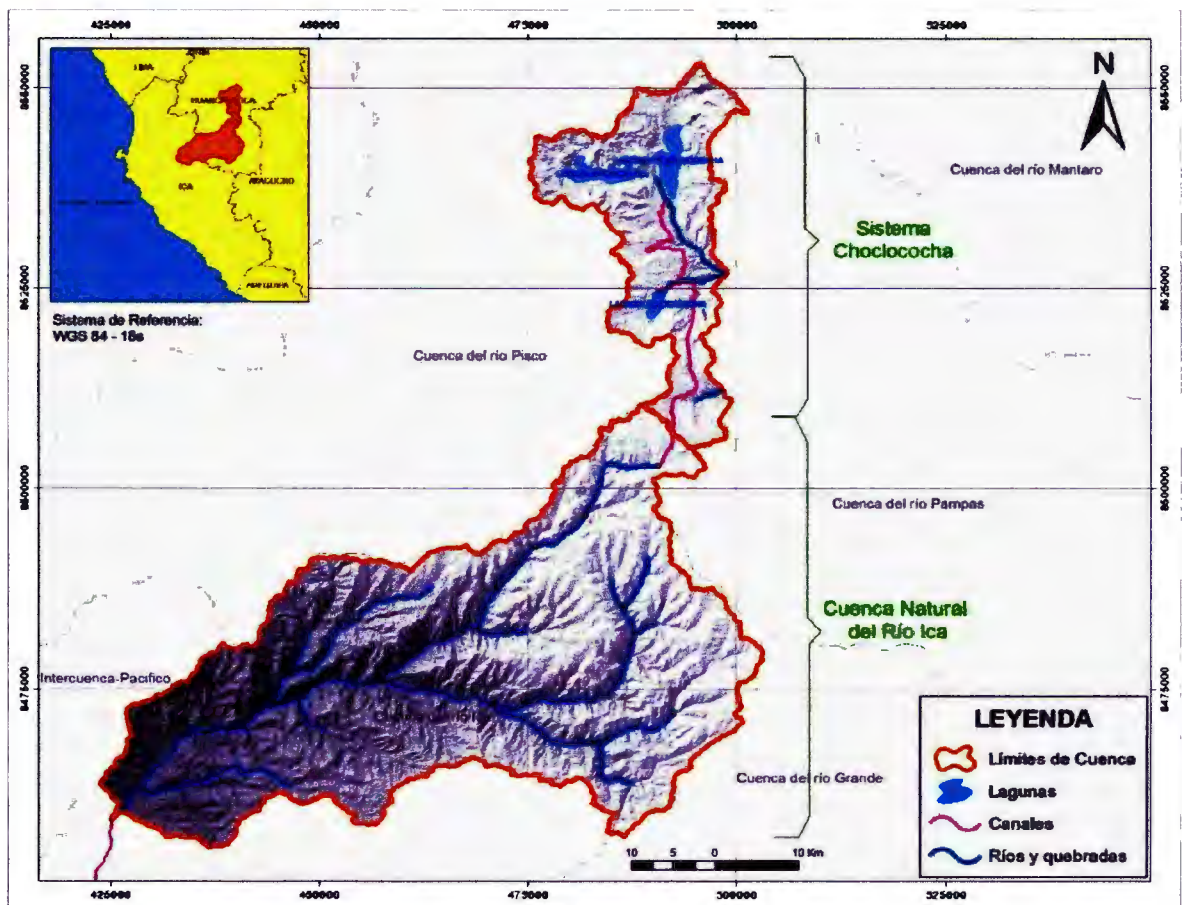


Figura 4: Mapa de ubicación del área de estudio

3.2 MATERIALES

3.2.1 Información geográfica

Se realizó una clasificación y análisis de la información geográfica recopilada, con la finalidad de conseguir que dicha información sea compatible para poder ser ingresada al modelo. La fuente de la información geográfica empleada en el estudio es descrita en el cuadro 2.

Cuadro 2: Fuentes de información geográfica suministrada al modelo.

INFORMACIÓN	DESCRIPCIÓN - FUENTE
TOPOGRAFÍA	Imagen ASTER GDEM de resolución 30 m x 30 m- Servidores USGS-NASA
COBERTURA VEGETAL	Mapa de Coberturas Vegetales generales - Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios-(DGAAA-DERN)
SUELOS	Mapa de Suelos generales - Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios-(DGAAA-DERN)
CARTOGRAFÍA	Cartas Nacionales de la cuenca del río Ica - IGN

3.2.2 Información climática

Se utilizaron los datos registrados por las estaciones meteorológicas disponibles, teniendo en cuenta que se encuentren suficientemente distribuidas para poder representar todo el ámbito de estudio. Con respecto a información de escorrentía, se tuvo disponibilidad a los registros de la estación "La Achirana", a partir del cual se realiza la delimitación de la cuenca que represente el área de estudio.

Cuadro 3: Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas disponibles en el estudio

ESTACION	TIPO	COORD (WGS84)		ALTITUD	UBICACIÓN			PERIODO DISPONIBLE
		Este	Norte		Dpto.	Provincia	Distrito	
Tunel Cero	CO	490972	8535215	4425	Huancavelica	Castrovirreyna	Pilpichaca	1958-2010
Tambo	PLU	470684	8486019	3080	Huancavelica	Huaytara	Tambo	1963-2011
Santiago de Chocorvos	CO	472532	8471060	2700	Huancavelica	Castrovirreyna	Stgo. Chocorvos	1963-2011
Challaca	CO	457792	8475254	1875	Huancavelica	Huaytara	Stgo. Chocorvos	1980-2011
Huamaní	CO	435912	8469091	800	Ica	Ica	S. J. de los Molinos	1964-2010
La Achirana	LIM	425095	8458871	398	Ica	Ica	Ica	1999-2010

Fuente: SENAMHI

3.2.3 Modelos de Circulación General (MCG)

Trece MGC fueron empleados para proyectar la precipitación a fines del siglo XXI en el escenario de emisión A1B, once de los cuales pertenecen al CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project – phase 3) y los dos restantes pertenecientes al Instituto de Investigación Meteorológica (MRI - Meteorological Research Institute).

Cuadro 4: Descripción de los MCG utilizados

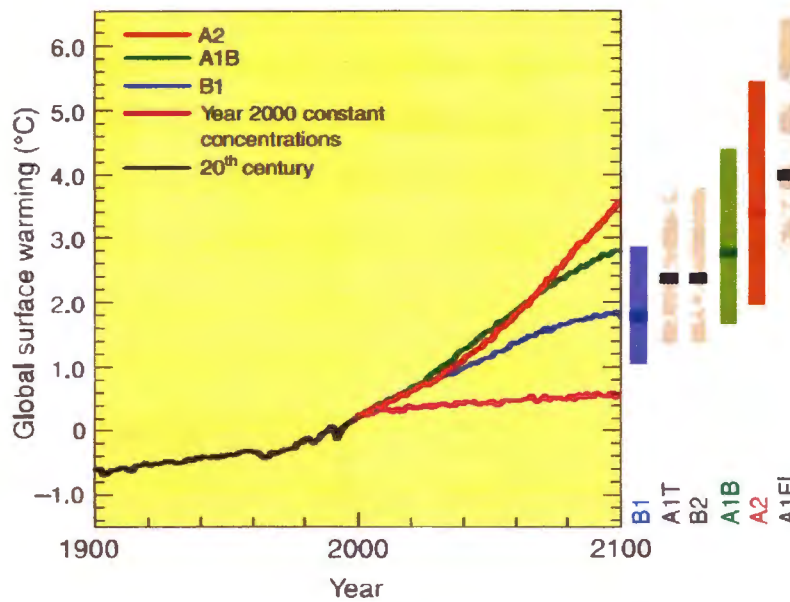
MCG	CÓDIGO	SIGLAS	INSTITUCION	PAIS
CMIP3	02	CCC	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canadá
	03	CNRM	Centre National de Recherches Meteorologiques	Francia
	04	CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	Australia
	05	GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA
	06	GISS	Goddard Institute for Space Studies	USA
	07	INGV	Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia	Italia
	08	INM	Institute of Numerical Mathematics	Rusia
	09	IPSL	Institut Pierre Simon Laplace	Francia
	10	MIUB	Meteorological Institute, University of Bonn	Alemania
	11	MPI	Max-Planck-Institut	Alemania
	12	MRI	Meteorological Research Institute	Japón
MRI	3.1	MRI 3.1	Meteorological Research Institute	Japón
	3.2	MRI 3.2	Meteorological Research Institute	Japón

En cuanto a la temperatura proyectada para fines del siglo XXI, basados en los resultados de las proyecciones climáticas globales y regionales indicadas en los reportes del IPCC (2007 y 2013); se consideraron las variaciones futuras de temperaturas indicadas en el Cuadro 5, para un escenario de emisión A1B.

Cuadro 5: Cambio de la temperatura media global (°C) con respecto a 1990

Año	A1B	A1T	A1FI	A2	B1	B2
1990	0	0	0	0	0	0
2000	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
2040	1.26	1.41	1.27	1.06	0.98	1.18
2050	1.59	1.75	1.86	1.42	1.21	1.44
2060	1.97	2.04	2.5	1.85	1.44	1.69
2070	2.3	2.25	3.1	2.33	1.63	1.94
2080	2.56	2.41	3.64	2.81	1.79	2.2
2090	2.77	2.49	4.09	3.29	1.91	2.44
2100	2.95	2.54	4.49	3.79	1.98	2.69

Fuente: Anexo II - IPCC, 2013



Fuente: Synthesis Report – IPCC, 2007

Figura 5: Incremento de la temperatura superficial global respecto a 1980-1999

3.2.4 Software

Para poder realizar los cálculos y manejos de datos correspondientes a la investigación, se utilizaron los siguientes softwares:

- ArcGIS Desktop 9.3
- ArcSWAT 2009 10.1
- SWAT-CUP 2012 5.1.5
- Matlab R2012a
- R x64 3.1.1
- Microsoft Office 2013

3.2.5 Hardware

Se utilizó una computadora portátil con las siguientes características:

- Procesador Intel CORE i5 – 1.8 GHz
- Memoria RAM de 6 Gb
- Tarjeta de video dedicada 1 Gb
- Disco duro de 750 Gb

3.3 MÉTODOS

En la presente investigación, se tomaron en cuenta la metodología indicada en el Figura 6, donde se diferencian tres principales procesos: Aplicación del SWAT en la cuenca en estudio, la generación de información climática futura y la evaluación del efecto del cambio climático hacia fines del siglo XXI.

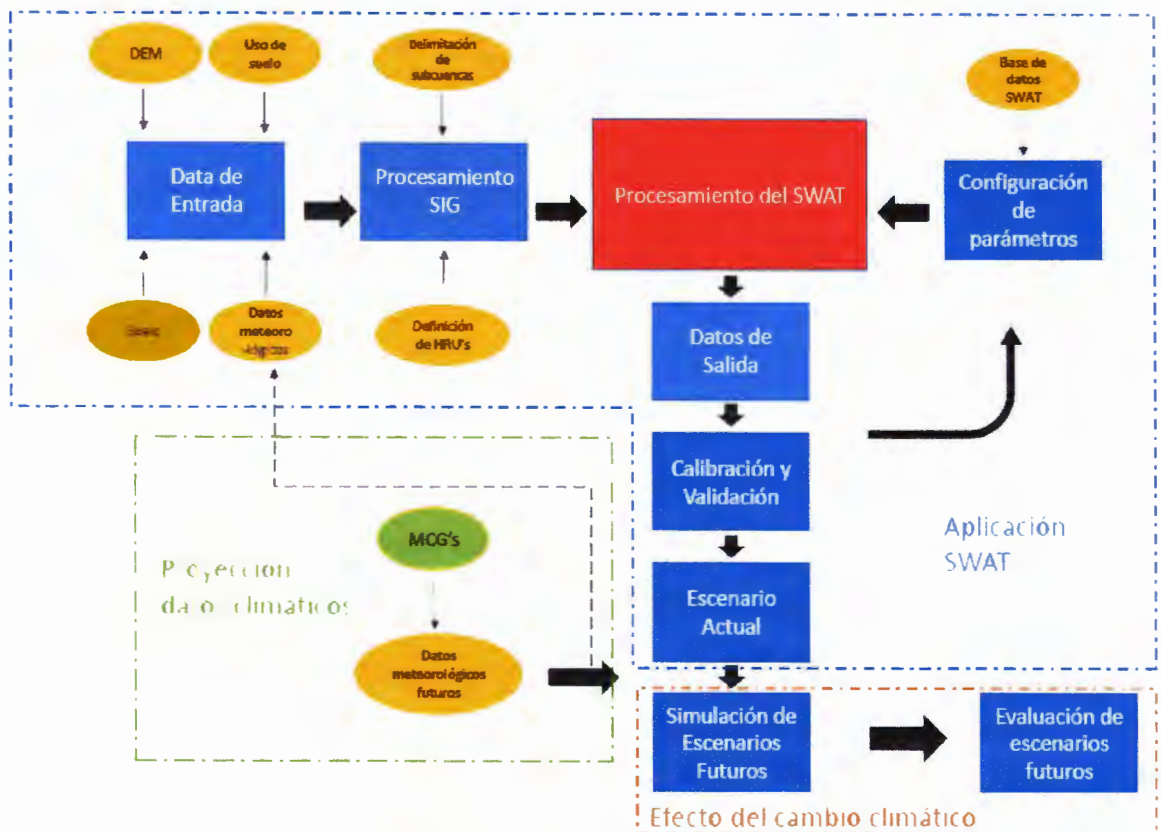


Figura 6: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio

3.3.1 Aplicación del modelo hidrológico SWAT

3.3.1.1 Datos de entrada suministrados al modelo

La siguiente información representa los datos de entrada necesarios para poder elaborar el modelo hidrológico que represente el área en estudio.

- Topografía (DEM)

Para definir los límites de cuenca y la distribución de la red hídrica del área de estudio, se utilizó el modelo digital de elevaciones global ASTER (Advanced Spaceborne

Thermal Emission and Reflection Radiometer) de una resolución espacial de 30 metros. Previamente al ingreso del DEM al modelo SWAT, se realizaron ajustes para llenar vacíos de información. Dentro del área de estudio, se diferencian alturas desde los 398 m.s.n.m. hasta los 4900 m.s.n.m.

- Vegetación y uso de la tierra

La información del Mapa de Coberturas Vegetales elaborado por la Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios (DGAAA-DERN, 2012) se ve representada en el Cuadro 6, donde se muestra las coberturas que predominan en el ámbito de estudio y su distribución respectiva.

Cuadro 6: Cobertura Vegetal del ámbito de estudio

COBERTURA	DESCRIPCION	AREA (Ha)	AREA (%)
AGRICULTURA	Cultivos/Áreas intervenidas	3293	1.2
DESIERTO	Desierto en zona de clima árido	41122	15.2
MATORRALES	Matorral arbustivo abierto	80159	29.5
PRADERA	Pradera en zona de clima frio	143685	53.0
LAGOS	Cuerpos de agua	3019	1.1
TOTAL		271278	100

Fuente: DGAAA-DERN, 2012

A cada tipo de cobertura se asignó un código de identificación, valor de número de curva y coeficiente de rugosidad; con la finalidad de poder ser ingresados a la base de datos SWAT y posteriormente ser procesadas. En el Cuadro 7 se indican los valores asignados a las coberturas y su distribución espacial se muestra en la Figura 7.

Cuadro 7: Valores finales asignados a las coberturas de suelo

CODIGO	COBERTURA	CN				n	AREA (Ha)	AREA (%)
		A	B	C	D			
AGRI	AGRICULTURA	67	77	85	87	0.15	3293	1.2
DSRT	DESIERTO	39	63	74	80	0.17	41122	15.2
MATO	MATORRALES	38	50	70	78	0.15	80159	29.5
PRAD	PRADERA	31	59	75	79	0.15	143685	53.0
WATR	LAGOS	92	92	92	92	0.01	3019	1.1

TOTAL 271278 100

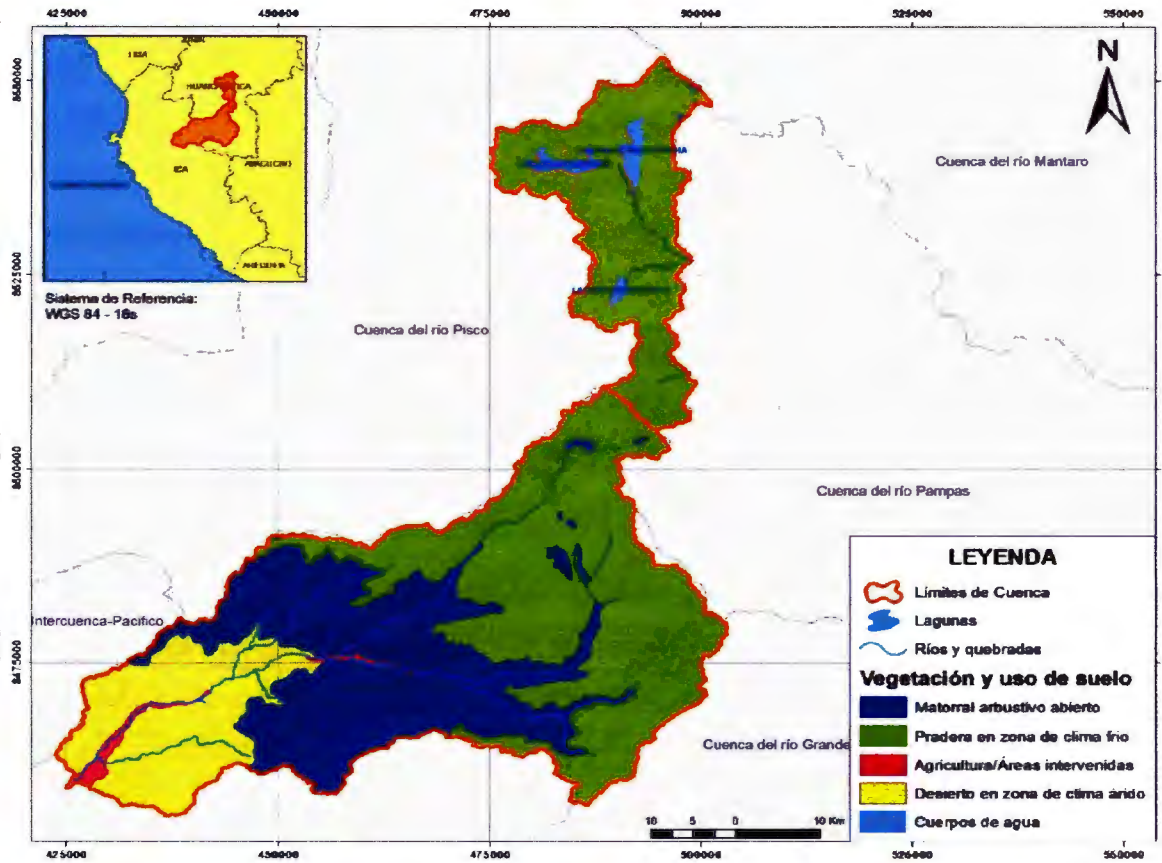


Figura 7: Mapa de vegetación y uso de suelo

- Suelo

La información de suelo fue obtenida a partir del Mapa de Suelos realizado por la Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios (DGAAA-DERN, 2012). En la Figura 8 se muestra la distribución espacial de suelos en el ámbito de estudio.

La información de suelos ingresados al modelo, fueron asignados en función de las características físico-químicas de cada tipo de suelo (Cuadro 8); dichos valores fueron estimados teniendo en cuenta información del Centro Internacional de Información y Referencia del Suelo (ISRIC – World Soil Information) y a las unidades de suelo analizadas en la cuenca vecina del río Cañete en el estudio de Uribe (2011).

Cuadro 8: Características Físico – Químicas de los suelos del ámbito de estudio

CODIGO	SUELO	SOL_BD densidad aparente (g/cm ³)	SOL_AWC disponibilidad de agua en suelo (mm/mm)	SOL_K conductividad hidráulica (mm/hr)	% ARCILLA (CLAY)	% LIMOS (SILT)	% ARENA (SAND)
ARENOSOL	ARENOSOL	1.6	0.08	500	9	14	77
REGOSOL	REGOSOL	1.37	0.18	100	15	40	45
LEPTOSOL	LEPTOSOL	1.35	0.17	90	15	35	50
LEPTOLIT	LEPTOSOL LITICO	1.35	0.18	80	20	35	45

Fuente: ISRIC; Uribe ,2011

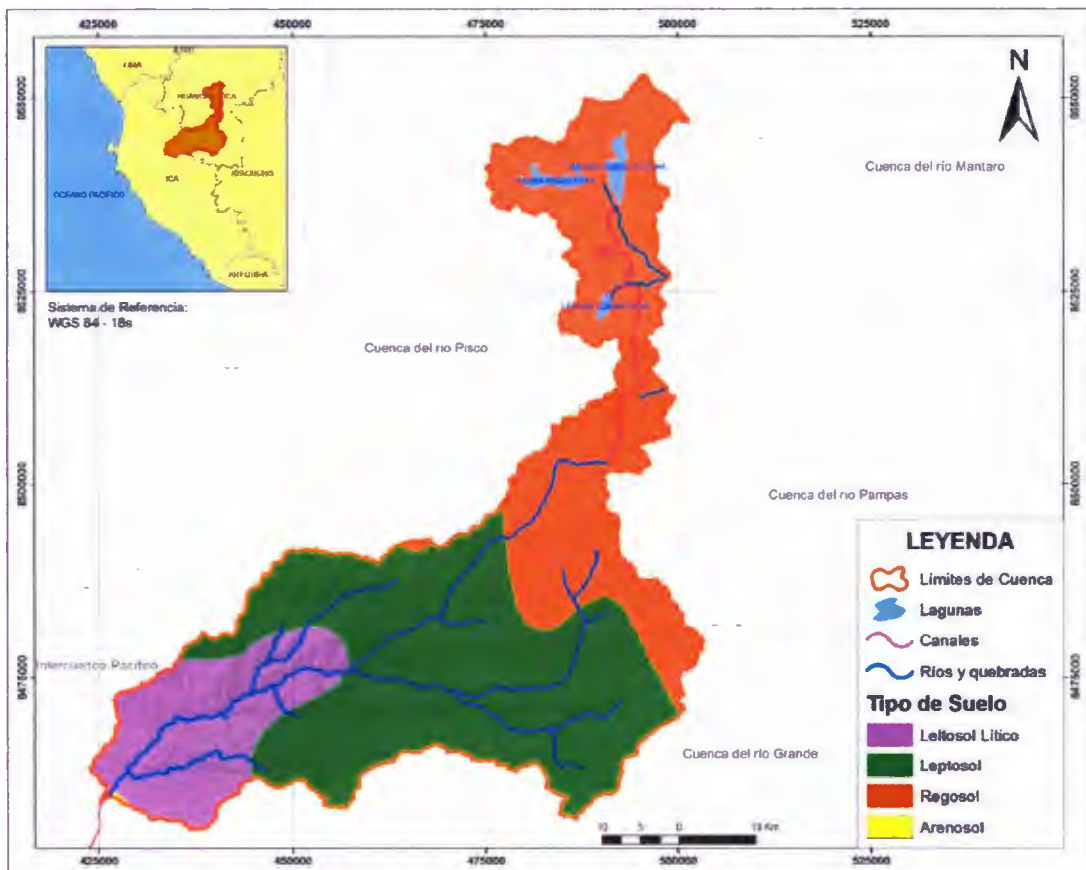


Figura 8: Mapa de tipo de suelo

- Hidrometeorología

En el presente estudio, se tomaron en cuenta los datos de precipitación y temperatura (máxima y mínima) de las estaciones meteorológicas y aforos de caudal de una estación limnimétrica (La Achirana). Estas estaciones fueron seleccionadas en base a que

contengan un registro diario y continuo para el periodo simulado (2000-2010) y se distribuyan espacialmente dentro del ámbito de estudio

a. Precipitación

Para proveer de datos de precipitación diarios al modelo, se emplearon los registros de 5 estaciones meteorológicas; dichas estaciones son referenciadas en el Cuadro 9 y la Figura 9 representa la ubicación de estas.

b. Temperatura

Se utilizaron valores de temperatura (máximos y mínimos) en base al registro de 4 estaciones meteorológicas, referenciadas en el Cuadro 9 y la Figura 9 representa la ubicación de estas.

c. Evapotranspiración

La evapotranspiración se estimó en base a la opción del método de Penman-Monteith (1972) que proporciona el modelo SWAT. La cual se describe en la siguiente ecuación:

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot C_p \cdot [e_z^o - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)}$$

Donde:

E : Tasa de evapotranspiración (mm d^{-1})

λ : Calor latente de vaporización (MJ kg^{-1})

Δ : Pendiente entre la presión-temperatura del vapor de saturación ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

H_{net} : Radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

G : Flujo térmico del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

ρ_{air} : Densidad del aire (kg m^{-3})

C_p : Calor específico del aire húmedo ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

$e_z^o - e_z$: Déficit e vapor de presión

r_c : Resistencia de cubierta vegetal (s m^{-1})

r_a : Resistencia aerodinámica (s m^{-1})

γ : Constante piezométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

Cuadro 9: Variables hidrometeorológicas utilizadas en el estudio

ESTACION	TIPO	COORDENADAS (WGS84)		VARIABLES
		ESTE	NORTE	
Tunel Cero	CO	490972	8535215	PP, T°
Tambo	PLU	470684	8486019	PP
Santiago de Chocorvos	CO	472532	8471060	PP, T°
Challaca	CO	457792	8475254	PP, T°
Huamaní	CO	435912	8469091	PP, T°
La Achirana - Ica	LIM	425095	8458871	Q

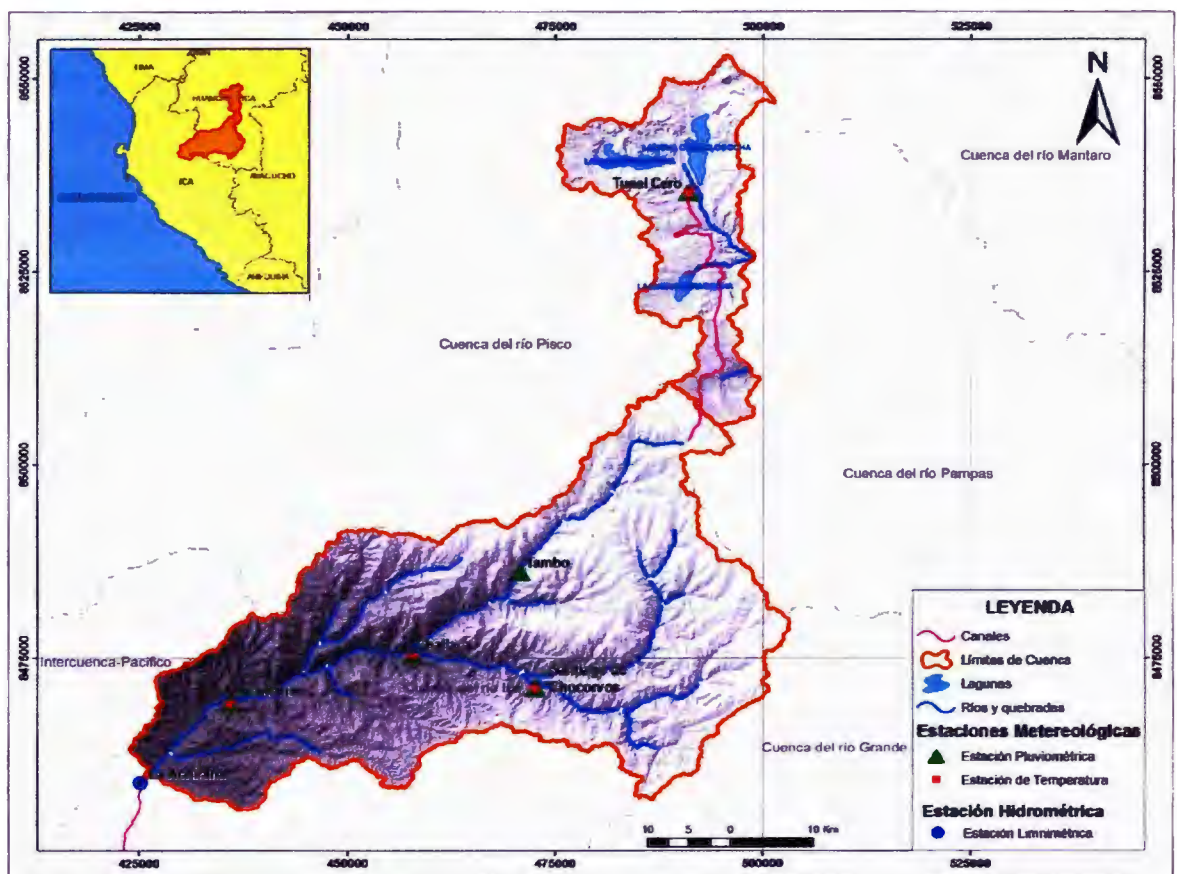


Figura 9: Mapa de Ubicación de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas

3.3.1.2 Procesamiento de datos – Modelo SWA I

Para la presente investigación, se utilizó el modelo hidrológico SWAT 2009 diseñado para el entorno Windows.

En SWAT (Soil and Water Assessment Tool) la cuenca es dividida en subcuencas y/o unidades de respuesta hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés), donde cada subcuenca es asumida homogénea con parámetros representativos de la subcuenca entera (Jha et al., 2002; Neitsch et al., 2002b; Gowda et al., 1999; Bingner et al., 1997). Según Gowda et al. (1999) las HRUs han sido muy exitosas para la predicción de flujo, ya que permiten al modelo diferenciar la evapotranspiración de varios cultivos y suelos.

La escorrentía se calcula por separado para cada subcuenca y se transita para tener el escurrimiento total de la cuenca. Ello incrementa la precisión y ofrece una mejor descripción física del balance hídrico (Neitsch et al., 2002a)

La simulación hidrológica en SWAT es separada en dos principales divisiones. La primera división es la fase terrestre del ciclo hidrológico, controles de cantidad de agua, carga de sedimentos, nutrientes y plaguicidas hacia el canal principal en cada subcuenca. La segunda división es el tránsito del ciclo hidrológico el cual puede ser definido como el movimiento del agua, sedimentos, nutrientes y plaguicidas a través de la red de canales de la cuenca en las salidas (Neitsch et al., 2002a).

- Fase terrestre del ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico en las simulaciones de SWAT se basa en la siguiente ecuación de balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mmH₂O); SW_0 es el contenido de agua inicial en el día i (mmH₂O); t es el tiempo (día); R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mmH₂O); Q_{surf} que es la cantidad de escorrentía superficial por día (mmH₂O); W_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en día i (mmH₂O); Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mmH₂O); (Neitsch et al., 2002a).

El cálculo del escurrimiento superficial se realiza usando una técnica modificada del Número de Curva, propuesta por el Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service U.S., 1972).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)}$$

Donde Q_{surf} es la escorrentía acumulada del exceso de la lluvia (mm H₂O), R_{day} es la lámina de lluvia para el día (mm H₂O) y S es el parámetro de retención (mm H₂O), el cual varía espacialmente debido a los cambios en los suelos, el uso de la tierra, el manejo y la pendiente y temporalmente debido a cambios en el contenido del agua en el suelo.

El parámetro de retención es definido como:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Donde CN es el número de curva del día. El escurrimiento solamente ocurrirá cuando la $R_{day} > 0.2S$.

- Fase de tránsito hidrológico

Una vez que SWAT determina las cargas de agua generadas, las cargas son transitadas a través de la red de cauces de la cuenca (Neitsch et al., 2002b).

Los cauces dentro del modelo SWAT son definidos como canales de flujo abierto y son calculados en base a la ecuación de Manning para definir la tasa y velocidad de flujo.

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} \cdot R_{ch}^{2/3} \cdot S/p_{ch}^{1/2}}{n}$$

$$v_c = \frac{R_{ch}^{2/3} \cdot S/p_{ch}^{1/2}}{n}$$

Donde q_{ch} es el índice de flujo en el canal (m³/s), A_{ch} es el área transversal del flujo en el canal (m²), R_{ch} es el radio hidráulico para una profundidad de flujo dada (m), S/p_{ch} es la pendiente a través de la longitud del canal (m/m), n es el coeficiente “n” de Manning para el canal, y v_c es la velocidad del flujo (m/s).

El agua es transitada a través de una red de cauces usando el método de tránsito de escorrentía de Muskingum, el cual es una variación del modelo de onda cinemática. Como se define por la ecuación de Manning, el área de flujo transversal se asume ser directamente proporcional a la descarga para un segmento de cauce dado.

Utilizando esta suposición, el volumen del almacenaje de prisma puede ser expresada como una función de descarga, $K \cdot q_{out}$, donde K es el proporción de almacenaje a descarga y tiene la dimensión del tiempo. De una manera similar, el volumen de almacenaje parcial se puede expresar como $K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out})$, donde X es un factor de peso que controla la importancia relativa del flujo de entrada y del flujo de salida en determinar el almacenaje en un cauce. El sumar estos términos nos provee un valor para el total de almacenaje

Donde:

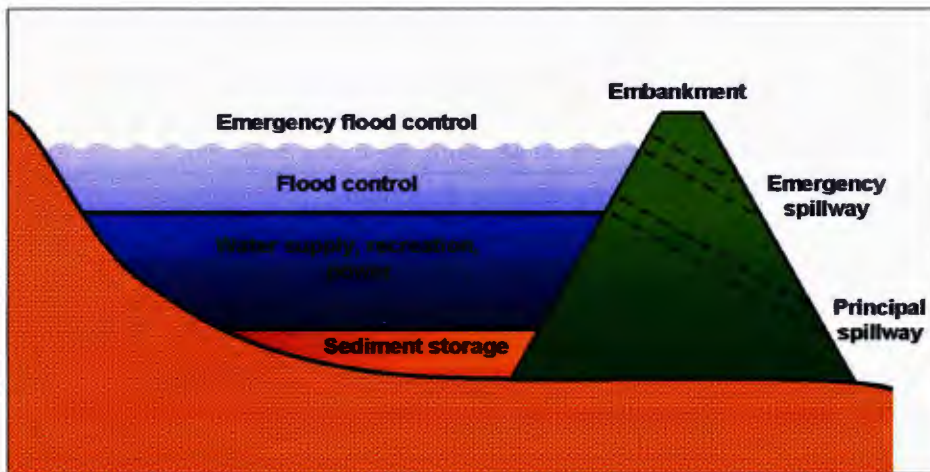
$$V_{storage} = K \cdot q_{out} + K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out})$$

Siendo $V_{storage}$ el volumen de almacenaje ($m^3 H_2O$), q_{in} es el índice de entrada (m^3/s), q_{out} es el índice de descarga (m^3/s), K es el tiempo constante de almacenaje del cauce(s) y X es el factor de peso. Esta ecuación puede ser reacomodada para formar:

$$V_{storage} = K \cdot (X \cdot q_{in} + (1 - X) \cdot q_{out})$$

Una discusión más detallada del modelo de tránsito de flujo por onda cinemática puede ser encontrada en Chow (1994).

Con respecto a la simulación de reservorios, se consideró el modelo conceptual mostrado en la Figura 10: donde se identifican una salida principal y otra salida de emergencia del reservorio. La información del volumen y área del espejo de agua en las elevaciones de los puntos de salida principal y de emergencia son necesarios para los cálculos de descarga.



Fuente: Neitsch, 2011

Figura 10: Representación del reservorio en el modelo SWAT

El balance hídrico de los reservorios es calculado de la siguiente manera:

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep}$$

Donde V es el volumen de agua en el estancamiento al final del día ($m^3 H_2O$), V_{stored} es el volumen de agua almacenada en el cuerpo de agua al principio del día ($m^3 H_2O$), V_{flowin} es el volumen de agua que entra al cuerpo de agua durante el día ($m^3 H_2O$), V_{pcp} es el volumen de precipitación en el cuerpo de agua durante el día ($m^3 H_2O$), V_{evap} es el volumen de agua removida del cuerpo de agua por evaporación durante el día ($m^3 H_2O$) y V_{seep} es el volumen de agua perdida del cuerpo de agua por infiltración ($m^3 H_2O$).

3.3.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico

3.3.2.1 Análisis de Sensibilidad

Se realizó el análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo, por medio de la extensión SWAT-CUP, usando los registros diarios de 7 años correspondientes al periodo de calibración (2000-2006), evaluando 13 parámetros que tienen influencia en la generación de escorrentía superficial descritos en el Cuadro 10; de manera que se logró clasificar el grado de influencia de cada uno de estos parámetros.

Cuadro 10: Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN
v_CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva de canal
v_CH_N2.rte	Valor de n de Manning del cauce principal
r_SOL_AWC(1).sol	Capacidad de agua disponible
r_CN2.mgt	Valor del número de curva SCS CN II
v_SFTMP.bsn	Temperatura media de congelación de la lluvia
r_SOL_K(1).sol	Conductividad hidráulica saturada
v_GW_DELAY.gw	Retraso del agua subterránea
v_ALPHA_BF.gw	factor alpha del flujo base
v_GWQMN.gw	Umbral de profundidad de agua en acuíferos poco profundos
v_ESCO.hru	Coefficiente de compensación de evaporación en suelo
v_ALPHA_BNK.rte	Constante de proporcionalidad
r_SOL_BD(1).sol	Densidad del suelo a bulbo húmedo
v_GW_REVAP.gw	Coefficiente "Revap" de las aguas subterráneas

3.3.2.2 Calibración

En el proceso de calibración se consideró el análisis diario en un periodo de 7 años (2000–2006). Identificados los parámetros más sensitivos, se procedió a asignar valores a los parámetros de entrada del modelo y generar los caudales simulados. Posteriormente, los caudales simulados serán comparados con los caudales observados (aforados) mediante métodos gráficos y estadísticos como gráficos de serie de tiempo, coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe, PBIAS y RMSEI.

a) Coeficiente de determinación de Pearson (R^2)

El coeficiente de correlación de Pearson describe el grado de colinealidad entre data simulada y observada. Tiene un rango de 0 a 1, donde $r=0$ refiere que no existe alguna relación lineal y valores de $r=1$ indican una perfecta relación lineal. Valores mayores a 0.5 normalmente son considerados aceptables (Santhi et al., 2001, Van Liew et al., 2003).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S}) \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \right]}$$

b) Coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE)

El Coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) es un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual (“ruido”) comparada con la varianza de la información observada (Nash and Sutcliffe, 1970). NSE indica cuan bien se ajustan las curvas de datos observados y simulados. Los valores de $NSE > 0.5$ son considerados satisfactorios, valores entre $0.54 < NSE < 0.65$ considerados adecuados y valores $NSE > 0.65$ considerados de muy buen ajuste. (Moriassi et al., 2007)

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]$$

c) Porcentaje BIAS (PBIAS)

El cual mide la tendencia promedio de la data simulada y es comparada homológamente con la data observada. El valor óptimo del PBIAS es cero, valores cercanos a 0 indican mejor precisión del modelo; valores positivos indican subestimación de la tendencia y valores negativos indican sobrestimación del de la tendencia. Valores menores de $PBIAS < 15\%$ indican un ajuste satisfactorio. (Moriassi et al., 2007)

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

d) Relación de RMSE y la desviación estándar de las observaciones (RSR)

Siendo el factor RMSE uno de los factores estadísticos de índice de error más usados, se utilizó el factor RSR evaluar el modelo de realizado en esta investigación. El factor RSR estandariza el factor RMSE usando la derivación estándar de las observaciones, combinando tanto un índice de error y la información adicional recomendada por Legates y McCabe (Moriassi et al., 2007).

Mientras menor sea el valor de RSR, indicará un mejor desempeño de simulación del modelo: valores $RSR \leq 0.70$ consideran a la simulación como satisfactoria.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y^{mean})^2}}$$

3.3.2.3 Validación

La fase de validación del modelo, es el proceso donde se demuestra que el modelo de una zona específica es capaz de realizar simulaciones de suficiente precisión, esta precisión puede variar dependiendo del objetivo (Reisgaard, 1997). La validación se realizó corriendo el modelo para el periodo (2007 – 2010) usando los parámetros que fueron determinados durante la fase de calibración (2000 – 2006), de manera que se evalúen estos datos generados con datos observados y se logre validar que el modelo es capaz de proyectar datos.

3.3.3 Cambio de escala estadístico y proyección de datos climáticos

Se indican las coordenadas de cada estación meteorológica utilizada en el estudio, para sustraer información regional de la grilla de los MCG; posteriormente, para poder mejorar la resolución de la información climatológica se realiza el cambio de escala estadístico o “downscaling”, obteniéndose información local de mayor precisión en los puntos de ubicación de las estaciones. Cabe resaltar que los MCG del CMIP3 generan información de resolución entre 150 a 300 Km, en cambio los MCG MRI 3.1 y MRI 3.2 tienen una mayor resolución de 20 Km.

Los cálculos de la precipitación por medio del Cambio de escala estadístico se presentan a continuación:

a) Corrección paramétrica BIAS

$$rain_{mod}' = amp_1 \times rain_{GCM}$$

$$amp_1 = \frac{\mu_{FO}}{\mu_{GCM}}$$

$$rain_{mod} = amp_2 \times (rain_{mod}' - \mu_{FO}) + \mu_{FO}$$

$$amp_2 = \frac{\sigma_{FO}}{amp_1 \sigma_{GCM}}$$

$rain_{mod}$: Datos de precipitación generada

$rain_{GCM}$: Precipitación obtenida de MCG

amp_1 : Coeficiente de corrección del promedio

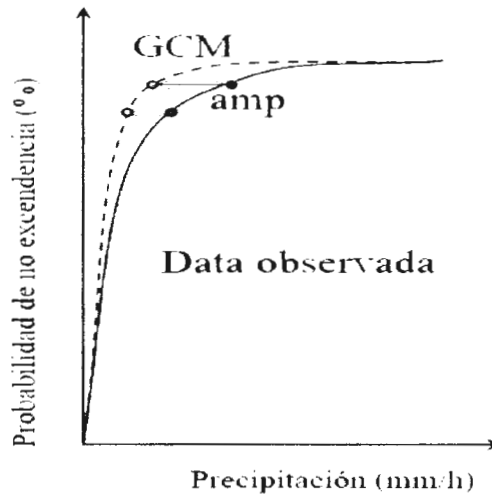
amp_2 : Coeficiente de corrección de la desviación estándar

μ_{FO} , μ_{GCM} : Promedio de la data observada, Promedio de la data del MCG

σ_{FO} , σ_{GCM} : Deriv. Estándar de la data observada, Deriv. Estándar de la data del MCG

b) Cálculo por Función de Distribución Acumulada-CDF

Figura 11: Cambio de escala por el método CDF



Fuente: Komai K, 2012

$$rain_{mod} = amp \times rain_{GCM}$$

$$amp = \frac{rain_{PNE-FO}}{rain_{PNE-GCM}}$$

$rain_{PNE-GCM}$: PNE del MGC

$rain_{FO}$: PNE de los datos observados

(PNE: Probabilidad de no excedencia)

Para validar la información climatológica proyectada a fines del siglo XXI, se generaron series de precipitaciones en el periodo (1980-1999) para cada estación meteorológica a partir de los trece Modelos de Circulación General (MGC) usados en esta investigación, con la finalidad de poder compararlas con la serie de precipitación observada y poder analizar el desempeño de cada MGC.

Realizada la validación del desempeño de los MGC en el periodo (1980-1999), se considera apropiada la proyección de la precipitación a futuro. Cada MGC realizará las proyecciones de precipitación en base a las consideraciones que tomaron cada institución para la predicción de escenarios futuros; en esta investigación se proyectaron los datos climatológicos para un escenario de emisión A1B, considerado un escenario futuro moderado donde existirá un creciente desarrollo económico, además de un balance entre el uso de energía fósil y nuevas tecnologías energéticas.

3.3.4 Efecto del cambio climático en la oferta de agua

Obtenidas las precipitaciones proyectadas por los MGC y las temperaturas generadas en base a las variaciones proyectadas para fines del siglo XXI, estos datos son ingresados al modelo hidrológico calibrado para poder generar las series de caudales que corresponderían al periodo (2080-2099) para cada MGC utilizado.

Para poder analizar el efecto del cambio climático en la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Ica, se realizó un análisis de las proyecciones de caudales a nivel diario, mensual, anual y estacional (periodo seco y periodo húmedo). Donde se utilizaron distintas herramientas gráficas y estadísticas para poder examinar las variaciones entre los datos observados y proyectados, resaltando el análisis en las frecuencias (histogramas y funciones de distribución acumulada), distribuciones, valores atípicos (diagrama de cajas) y análisis de los caudales generados en distintos percentiles (10%, 50%, 75%, 90%).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

4.1.1 Análisis de Sensibilidad

Mediante el análisis de sensibilidad, se identifican los parámetros que tienen una influencia significativa en los resultados del modelo con respecto a las observaciones reales. Los resultados están representados en la Figura 12.

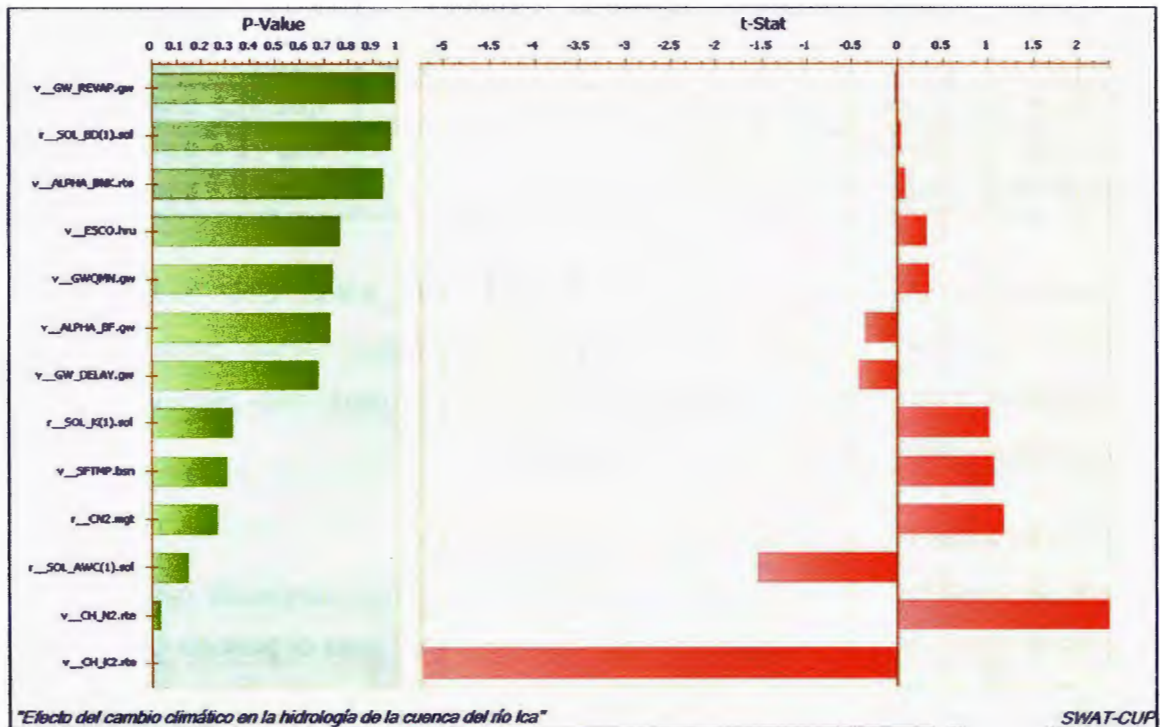


Figura 12: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo

En la Figura 12, el factor t-Stat provee una medida de sensibilidad que define al parámetro con mayor valor absoluto como el más sensible; por otro lado, el factor p-value determina la significancia de la sensibilidad, siendo los valores más cercanos a cero los de mayor significancia. Se clasificaron los parámetros analizados obteniéndose un ranking de estos, el cual se muestra en el cuadro 11.

Cuadro 11: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN	t-Stat	P-Value	Ranking
v__CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva de canal	-5.25	0.00	1
v__CH_N2.rte	Valor de n de Manning del cauce principal	2.34	0.03	2
r__SOL_AWC(1).sol	Capacidad de agua disponible	-1.53	0.15	3
r__CN2.mgt	Valor del número de curva SCS CN II	1.15	0.27	4
v__SFTMP.bsn	Temperatura media de congelación de la lluvia	1.05	0.31	5
r__SOL_K(1).sol	Conductividad hidráulica saturada	1.01	0.33	6
v__GW_DELAY.gw	Retraso del agua subterránea	-0.43	0.67	7
v__ALPHA_BF.gw	factor alpha del flujo base	-0.36	0.72	8
v__GWQMN.gw	Umbral de profundidad de agua en acuíferos poco profundos	0.34	0.73	9
v__ESCO.hru	Coefficiente de compensación de evaporación en suelo	0.31	0.76	10
v__ALPHA_BNK.rte	Constante de proporcionalidad	0.08	0.94	11
r__SOL_BD(1).sol	Densidad del suelo a bulbo húmedo	0.03	0.97	12
v__GW_REVAP.gw	Coefficiente "Revap" de las aguas subterráneas	-0.02	0.99	13

De manera que, los parámetros CH_K2, CH_N2, SOL_AWC, CN2 Y SFTMP son indicados como los de mayor sensibilidad con respecto a los demás parámetros en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Ica. Por lo cual, estos parámetros fueron prioridad en su variación para la fase de calibración.

4.1.2 Calibración y validación del modelo hidrológico

La serie de caudales generados por el modelo calibrado fue comparada con la serie de datos observados de la estación hidrológica "La Achirana" para el periodo (2000-2010), por medio de métodos gráficos y estadísticos.

En la Figura 13 y Figura 14 se puede observar la comparación gráfica de las series de caudales (observados y simulados) a nivel diario y mensual respectivamente, donde se aprecia la simulación satisfactoria de la estacionalidad de flujos de escorrentía, tanto para el periodo de calibración y validación del modelo.

La existencia de cierta discordancia en los meses de Septiembre, Octubre, Noviembre, Mayo y Junio, se relaciona a que en dichos meses la principal fuente de agua son los derivados del sistema de embalses Choclococha.

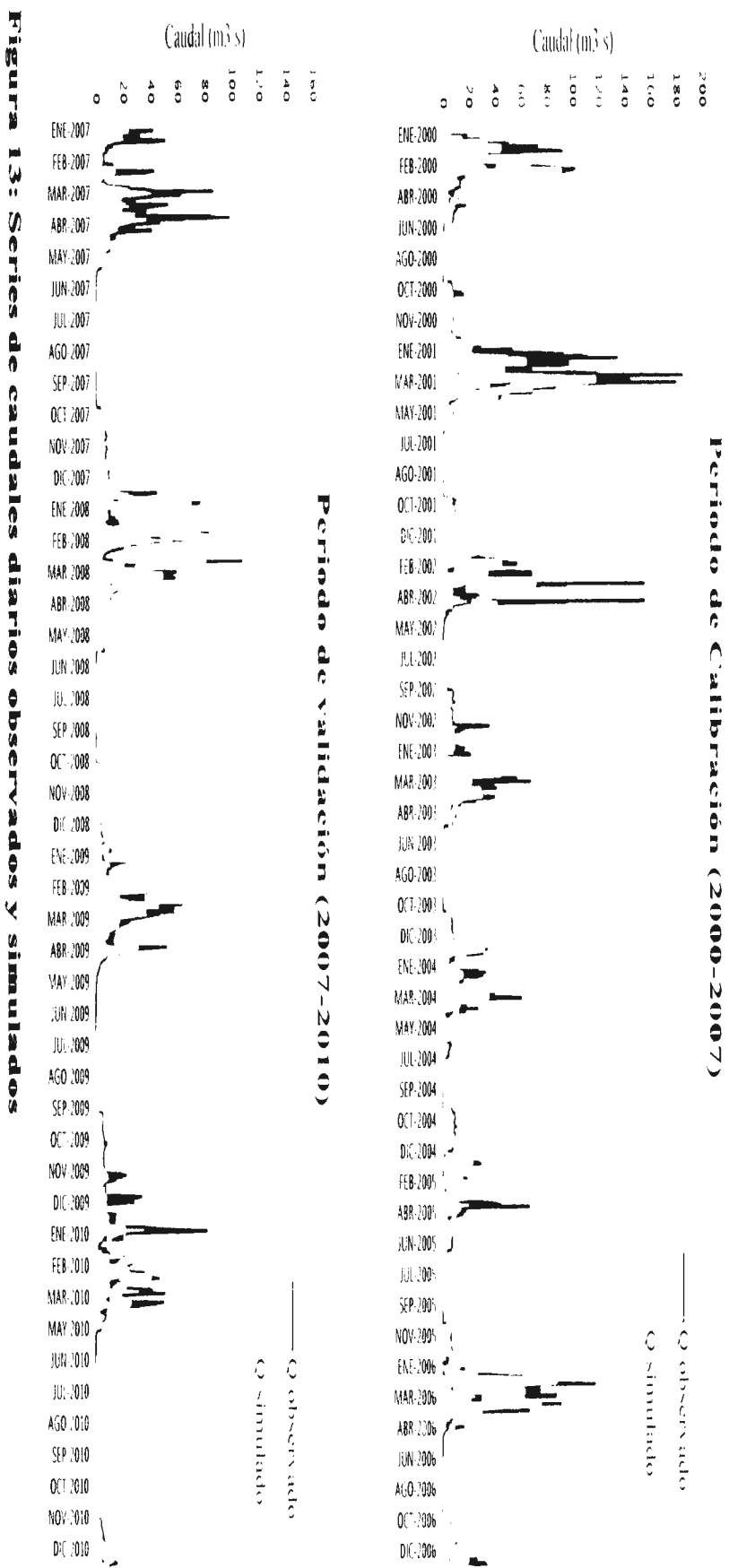


Figura 13: Series de caudales diarios observados y simulados

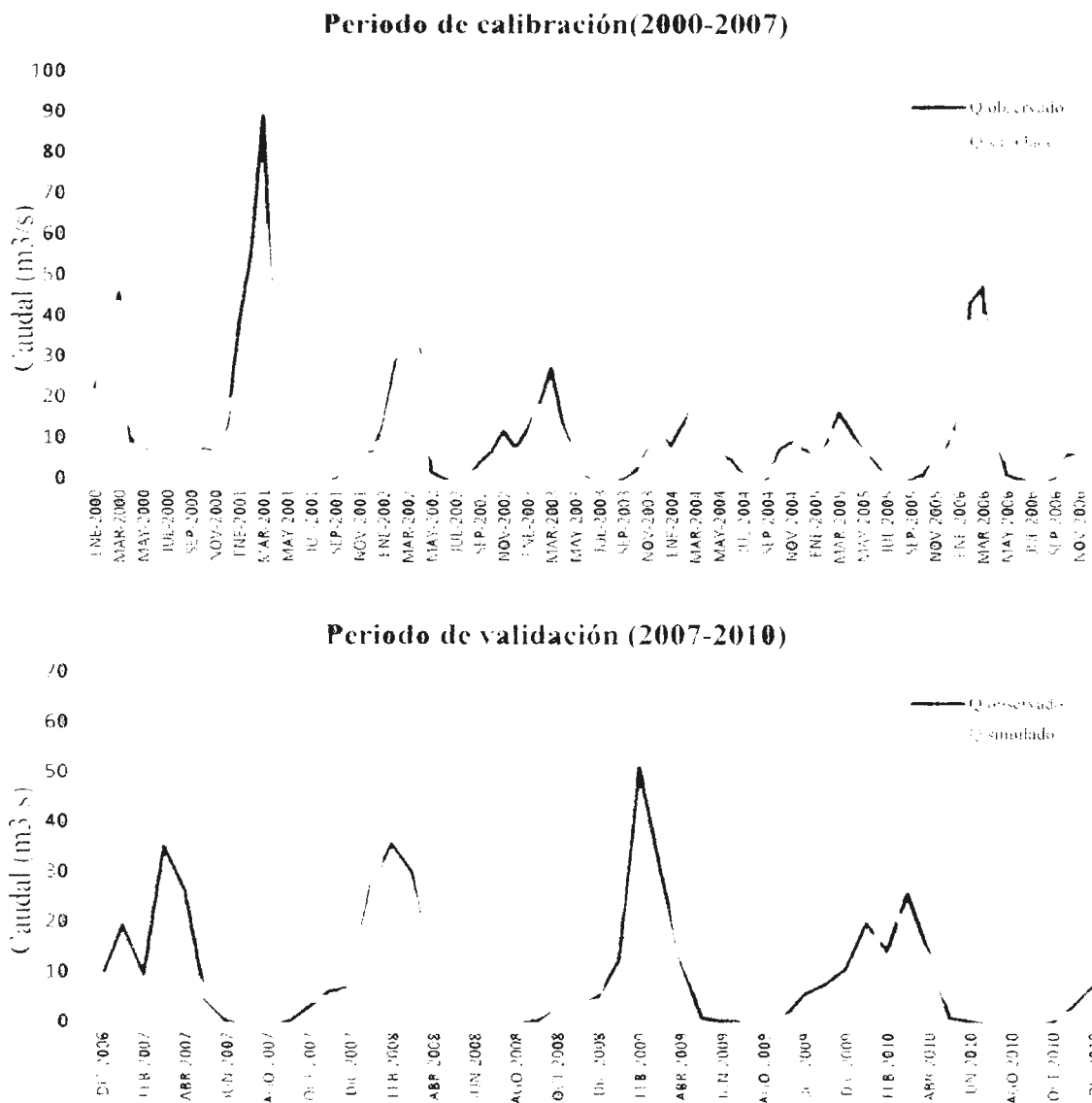


Figura 14: Series de caudales mensuales observados y simulados

Teniendo en cuenta que cada serie de caudales presenta 4018 datos (2557 y 1461 datos en la fase de calibración y validación respectivamente) a nivel diario y 132 datos (84 y 48 datos en la fase de calibración y validación respectivamente) a nivel mensual; la comparación entre las series hidrológicas observada y calibrada por medio de métodos estadísticos indican un ajuste satisfactorio. Obteniéndose valores R^2 mayores a 0.5 que indican un ajuste aceptable, valores de NS entre 0.54 y 0.65 que indican un ajuste adecuado, valores absolutos de PBIAS menores al 15% indican un ajuste bueno a muy bueno y valores de RSR menores a 0.6 indicando un ajuste bueno a muy bueno.

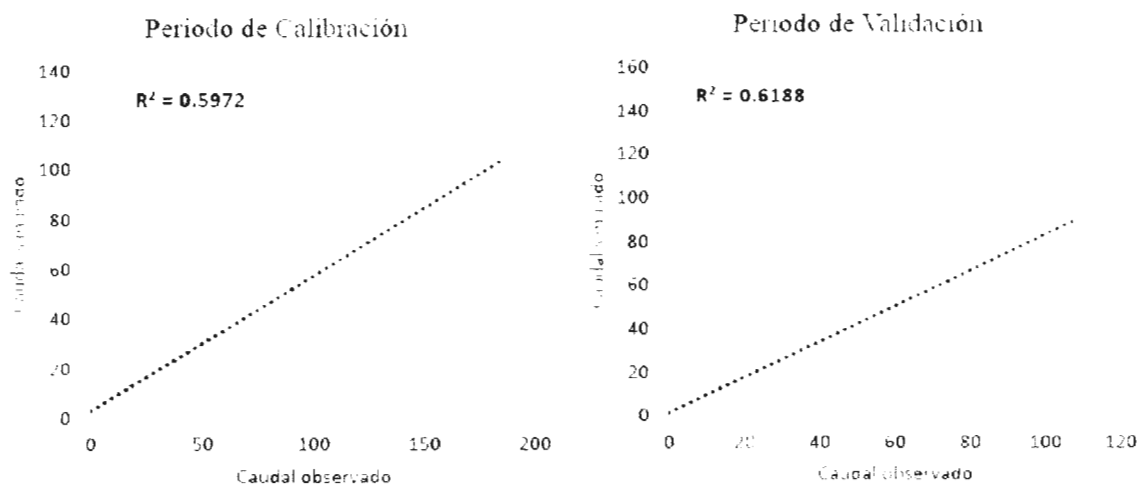


Figura 15: Coeficiente de Pearson de caudales diarios observados y simulados

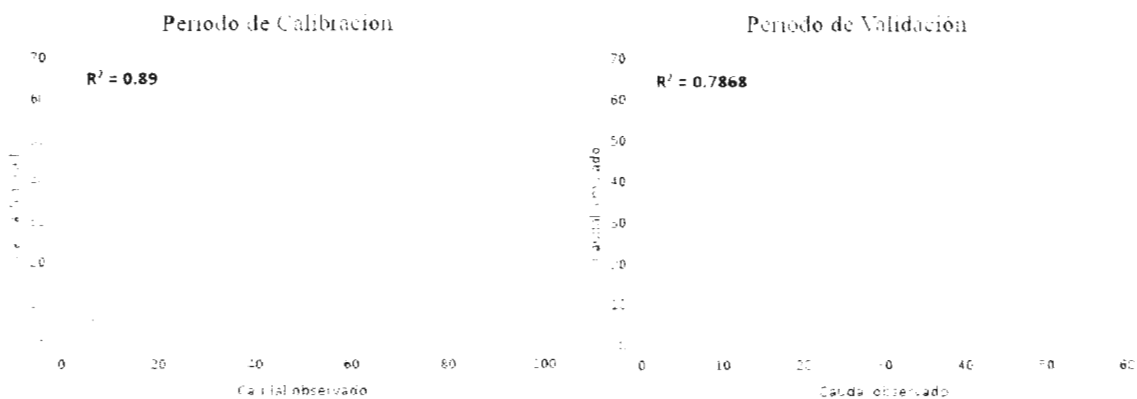


Figura 16: Coeficiente de Pearson de mensuales diarios observados y simulados

Cuadro 12: Valores de los índices estadísticos de calibración a nivel diario

Índice		Calibración	Validación
Coeficiente de determinación de Pearson	R^2	0.597	0.619
Coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe	NS	0.591	0.555
Porcentaje BIAS	PBIAS	12.31%	2.84%
Relación de RMSE y la desviación estándar	RSR	0.393	0.545

Cuadro 13: Valores de los índices estadísticos de calibración a nivel mensual

Índice		Calibración	Validación
Coefficiente de determinación de Pearson	R ²	0.890	0.787
Coefficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe	NS	0.813	0.805
Porcentaje BIAS	PBIAS	11.62%	1.88%
Relación de RMSE y la desviación estándar	RSR	0.397	0.543

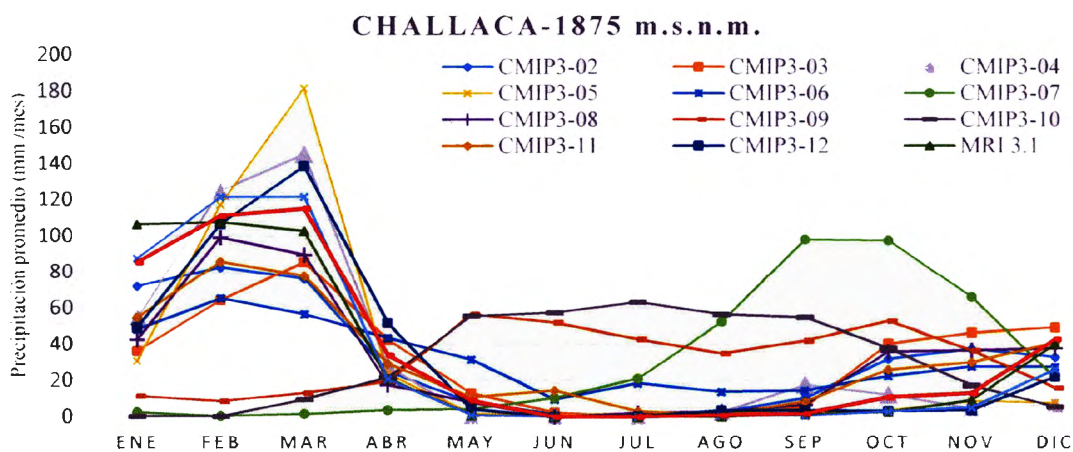
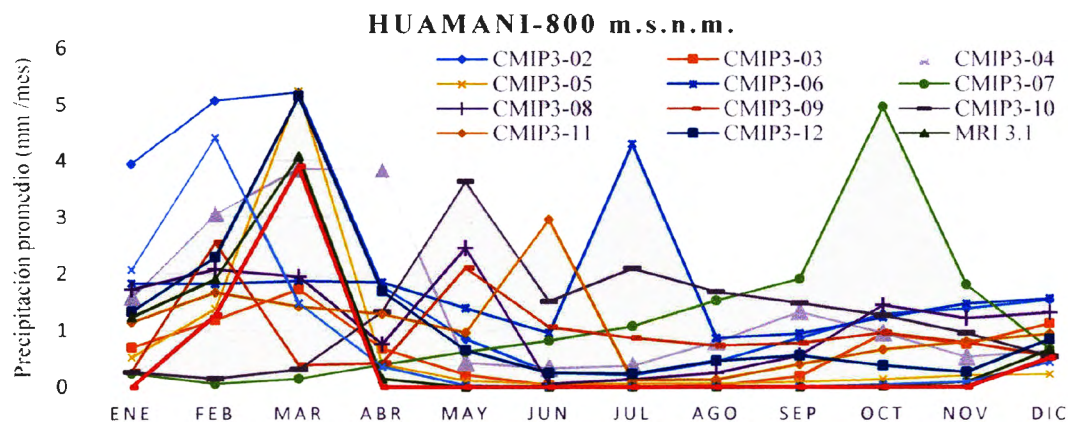
Lograda la calibración y validación satisfactoria del modelo hidrológico, se indica en el Cuadro 14 el set de parámetros del modelo hidrológico calibrado que representan al área de estudio.

Cuadro 14: Valores de los parámetros del modelo calibrado

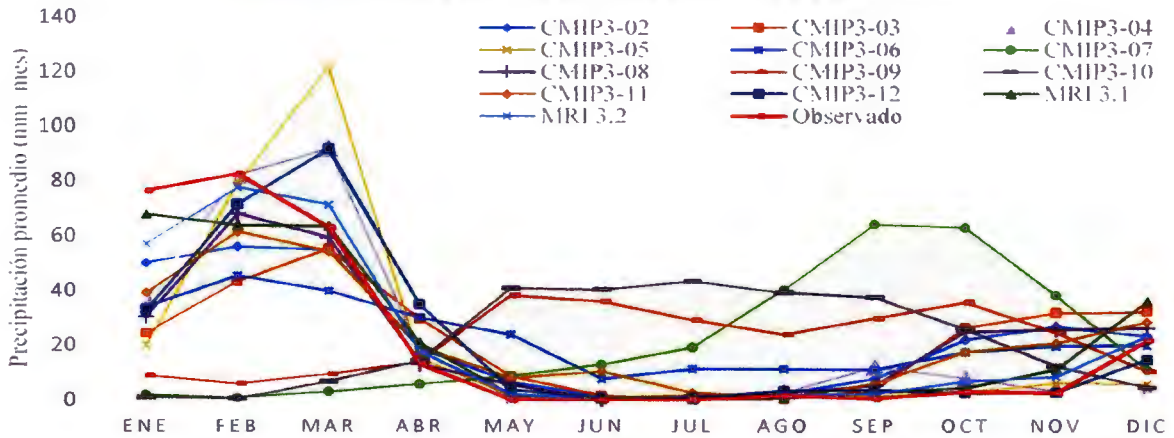
PARAMETRO	DESCRIPCIÓN	UNIDADE S	RANGO		VALOR INICIAL	VALOR CALIBRADO
			MAX	MIN		
CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva de canal	mm/hr	-0.01	500	2	4
CH_N2.rte	Valor de n de Manning del cauce principal	-	-0.01	0.3	0.017	0.02
SOL_AWC(1).sol	Capacidad de agua disponible	mm/mm	0	1	0.05-0.15	0.075 - 0.17
CN2.mgt	Valor del número de curva SCS CN II	-	35	98	70-82	74 - 89
SFTMP.bsn	Temperatura media de congelación de la lluvia	°C	-20	20	0.5	0.5
SOL_K(1).sol	Conductividad hidráulica saturada	mm/hr	0	2000	100-500	80 - 500
GW_DELAY.gw	Retraso del agua subterránea	días	0	500	80	100
ALPHA_BF.gw	Factor alpha del flujo base	días	0	1	0.15	0.15
GWQMN.gw	Umbral de profundidad de agua en acuíferos poco profundos	mm	0	5000	0	0
ESCO.hru	Coefficiente de compensación de evaporación en suelo	-	0	1	0	0
ALPHA_BNK.rte	Factor alpha del flujo base para almacenamiento de banco	días	0	1	0.3	0.3
SOL_BD(1).sol	Densidad del suelo a bulbo húmedo	g/cm3	0.9	2.5	1.35-1.6	1.35 - 1.6
GW_REVAP.gw	Coefficiente "Revap" de las aguas subterráneas	-	0.02	0.2	0.02	0.02

4.2 CAMBIO DE ESCALA ESTADÍSTICO Y PROYECCIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS

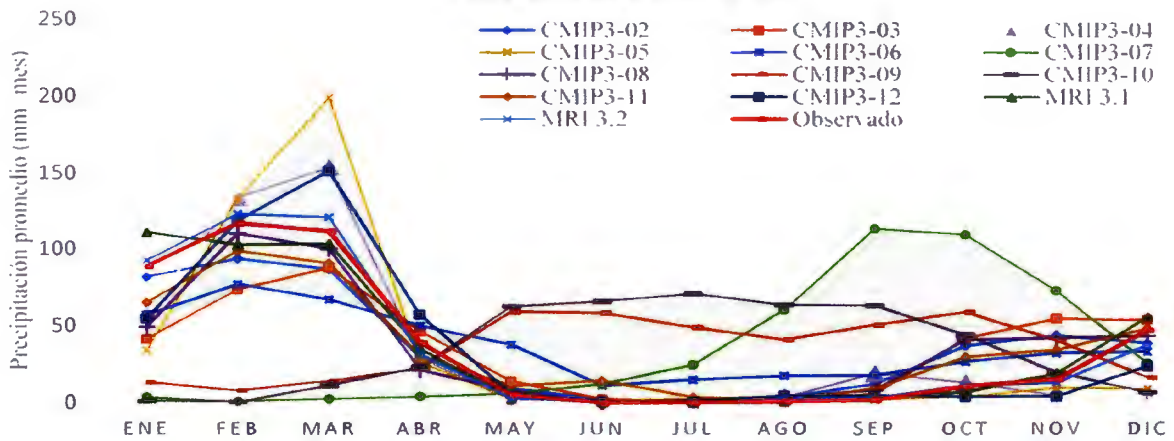
Se realizó el cambio de escala estadístico para cada MGC con respecto a cada estación meteorológica usada en esta investigación, con la finalidad de obtener información local de mejor precisión a partir de cada MGC para el periodo 1980 – 1999. Obteniéndose las siguientes figuras:



SANTIAGO DE CHOCORVOS-2700 m.s.n.m.



TAMBO-3038 m.s.n.m.



TUNEL CERO-4425 m.s.n.m.

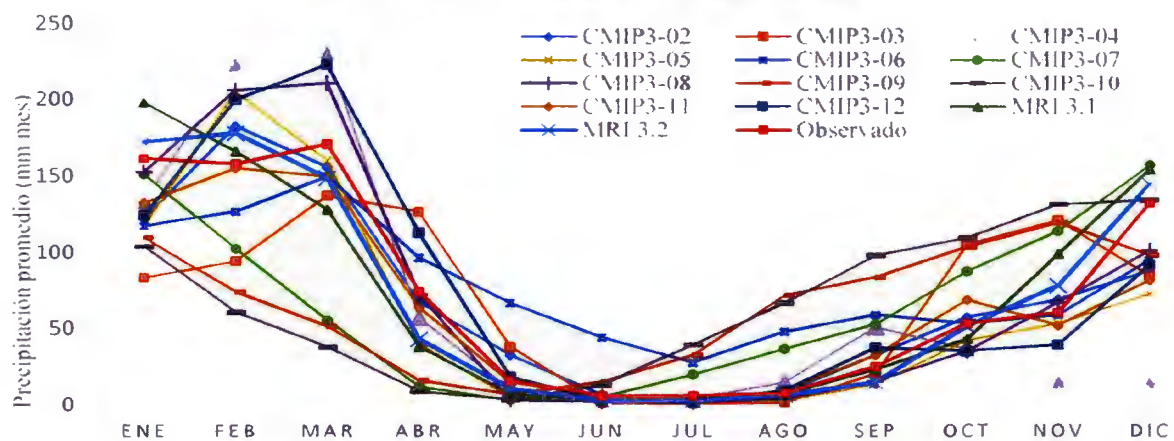


Figura 17: Series de precipitaciones generadas por los MGC (periodo 1980-1999)

Donde se observa que en la estación Huamani (800 m.s.n.m), la cual se encuentra cercana al área desértica de la cuenca de Ica, presenta mayor discordancia en el cálculo de la lluvia. Lo que esta relacionado a la dificultad de los GCM en el cálculo de la precipitación en zonas áridas

Los resultados indican que tres de los trece MGC [CMIP3-07(INGV-Italia), CMIP3-09(IPSL-Francia), CMIP3-10(MIUB-Alemania)] no presentan la capacidad de poder simular la estacionalidad de la precipitación en el ámbito de estudio. Sin embargo, los demás modelos lograron demostrar tener la capacidad aceptable de poder simular la estacionalidad de la precipitación, resaltando los mejores ajustes a los modelos: CMIP3-02(CCC-Francia), CMIP3-11(MPI-Alemania), CMIP3-12(MRI-Japón), MRI 3.1 (Japón) y MRI 3.2 (Japón). Se debe considerar que en la mayoría de modelos la cantidad de lluvia calculada tiende a ser levemente subestimada.

Cuadro 15: Factores de ajuste de la precipitación media mensual (1980-1999)

MCG	CÓDIGO	SIGLAS	PAIS	R ²	BIAS
CMIP3	2	CCC	Canadá	0.860	6.00%
	3	CNRM	Francia	0.671	14.70%
	4	CSIRO	Australia	0.767	5.90%
	5	GFDL	USA	0.814	8.00%
	6	GISS	USA	0.768	5.50%
	7	INGV	Italia	0.051	-7.50%
	8	INM	Rusia	0.786	14.90%
	9	IPSL	Francia	0.034	9.00%
	10	MIUB	Alemania/Korea	0.004	-3.60%
	11	MPI	Alemania	0.875	3.60%
	12	MRI	Japón	0.822	14.80%
	MRI	3.1	MRI 3.1	Japón	0.926
3.2		MRI 3.2	Japón	0.964	6.10%

Mediante el análisis del diagrama de cajas, elaborado en base a datos de precipitación total mensual (periodo 1980 – 1999) observados y simulados de todas las estaciones meteorológicas usadas, se puede apreciar cómo se distribuyen los datos de precipitación observada para poder compararlos con las distribuciones de las precipitaciones generadas por los MGC.

Dentro de la distribución de los datos observados, debemos tener en cuenta que los MGC no poseen la capacidad de poder predecir eventos relacionados al fenómeno del Niño, lográndose identificar que la mayoría los eventos atípicos más elevados refieren a eventos del fenómeno del Niño en los años 1986, 1991, 1995 y 1998.

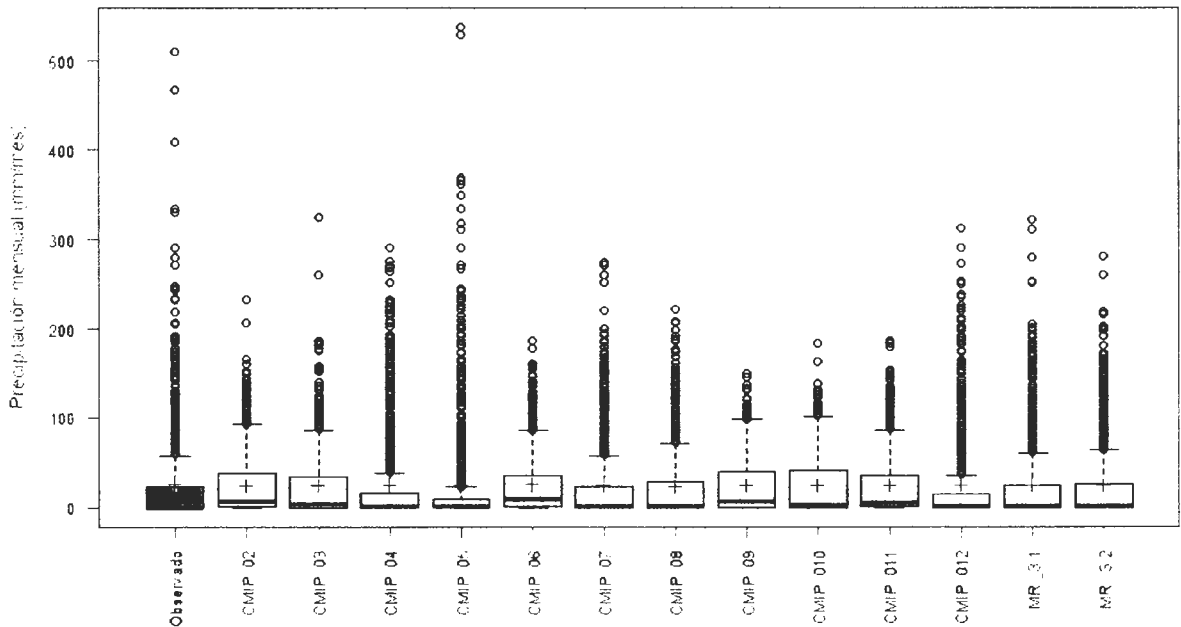


Figura 18: Diagrama de cajas de precipitación observada y simulada (1980-1999)

En base a la Figura 18 y el análisis de la distribución de cada estación (Anexo 4), se identifican que las distribuciones de los modelos CMIP3-04(CSIRO- Australia), CMIP3-07(INGV-Italia), CMIP3-08(INM- Rusia), CMIP3-12 (MRI-Japón) , MRI-3.1 (Japón) y MRI-3.2 (Japón) representan un ajuste aceptable de la distribución de valores de precipitación, resaltando los ajustes de los modelos: CMIP3-08(INM- Rusia), MRI-3.1 (Japón) y MRI-3.2 (Japón).

De manera que, en base a los análisis descritos anteriormente, la capacidad de ajuste de los MGC en la región de estudio fueron clasificados como se indica en el Cuadro 16. Dicha clasificación será de bastante importancia para identificar las series caudales proyectados de mayor relevancia, que deberán haber sido generadas en base a los MGC de mejor ajuste.

Cuadro 16: Clasificación de los MCG de acuerdo a su ajuste al área de estudio

CLASIFICACIÓN	MCG	INSTITUCIÓN	PAIS
Alto ajuste	MRI-3.2	MRI	Japón
	MRI-3.1	MRI	Japón
	CMIP3-08	INM	Rusia
	CMIP3-12	MRI	Japón
	CMIP3-04	CSIRO	Australia
Regular ajuste	CMIP3-02	CCC	Canadá
	CMIP3-03	CNRM	Francia
	CMIP3-06	GISS	USA
	CMIP3-11	MPI	Alemania
Bajo ajuste	CMIP3-05	GFDL	USA
	CMIP3-07	INGV	Italia
	CMIP3-09	IPSL	Francia
	CMIP3-010	MIUB	Alemania

Posteriormente se proyectaron los datos de precipitación diaria en cada estación meteorológica para el periodo 2080 -2099. En el Figura 19 se muestran las precipitaciones mensuales promedio observadas y las precipitaciones proyectadas promedio de los MGC de mejor ajuste, donde se puede diferenciar las variaciones de precipitación por cada mes del año. Se puede diferenciar un incremento notable de precipitación en los meses de Febrero y Marzo, especialmente en las estaciones de mayor precipitación como Challaca, Tambo y Tunel Cero.

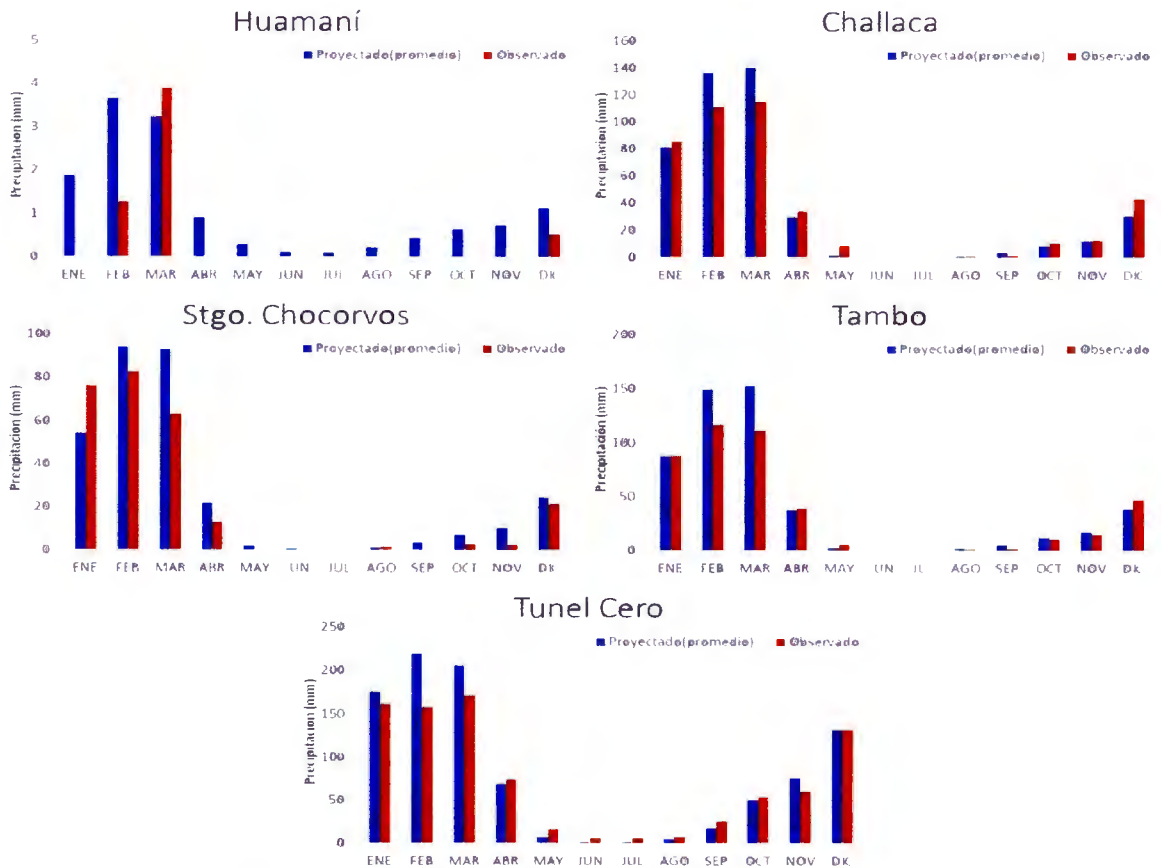


Figura 19: Precipitación mensual Observada y Proyectada promedio (2080-2099)

Teniendo en cuenta un análisis de precipitación anual generada, se proyecta una variación promedio desde 5.55% a 134.81% en las estaciones meteorológicas empleadas en el estudio (Cuadro 17). Sin embargo, teniendo en cuenta el incremento de las láminas de lluvia, se identifican que las estaciones ubicadas en la parte más alta de la cuenca serán las que producirán los cambios más notables en la hidrología de la cuenca en estudio.

Cuadro 17: Variación de precipitación anual por cada estación meteorológica

Estación	Elevación msnm	Variación Anual	
		mm	%
Humaní	800	7.67	134.81%
Challaca	1875	23.47	5.55%
Stgo. Chocorvos	2700	49.61	18.80%
Tambo	3038	67.57	15.41%
Tunel Cero	4425	89.27	10.23%

4.3 EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA OFERTA DE AGUA

El efecto del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica fue analizado en base a las variaciones que generaron la precipitación y temperatura sobre la escorrentía en periodos diarios, mensuales, anuales y estacionales. A continuación se muestran los resultados del análisis de las proyecciones de la oferta de agua para el periodo 2080-2099.

Se analizaron las escorrentías diarias proyectadas, considerándose los generados por los modelos de mejor ajuste a las condiciones de la región de estudio. En la Figura 20 se muestra la distribución de los caudales, apreciándose que para todos los modelos seleccionados los caudales mayores a 23 m³/s presentan una mayor probabilidad de ser excedidos, dicha probabilidad irá disminuyendo acorde incrementa la magnitud de los caudales.

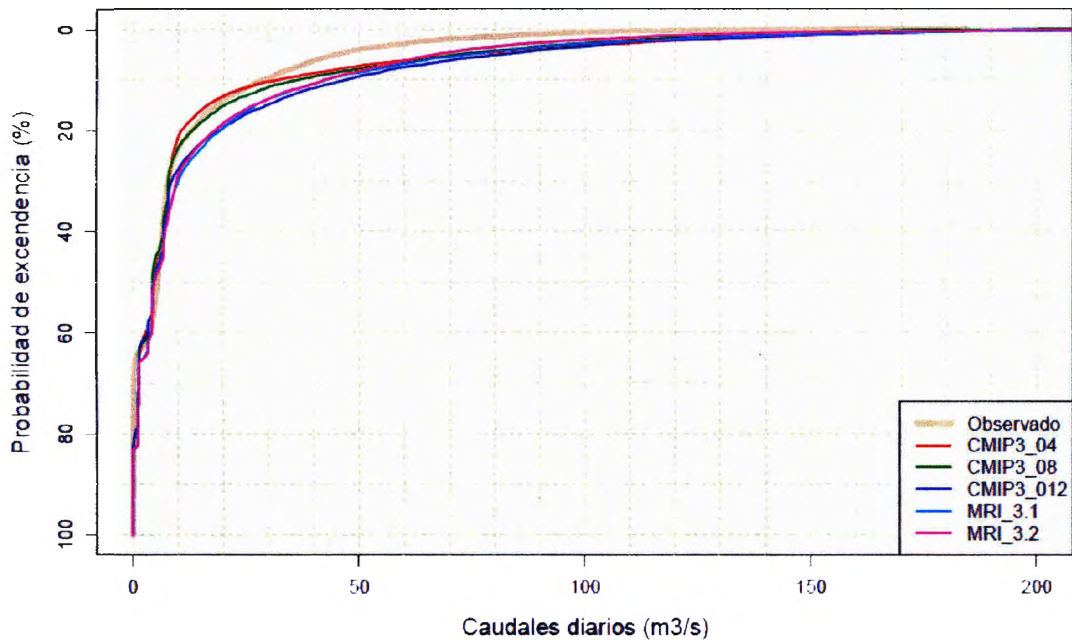


Figura 20: Función de distribución acumulada de caudales diarios proyectados

Los modelos de mayor resolución (MRI 3.1 y MRI 3.2) indican mayores variaciones, como el incremento de hasta 5.41% de la probabilidad de excedencia para caudales de 10 m³/s a 30 m³/s y el incremento de hasta 4.42% de probabilidad de excedencia para los caudales de 30 m³/s a 60 m³/s. Sin embargo, el modelo CMIP3-04 (CSIRO-Australia) indican una leve disminución de 1.33% en la posibilidad que los caudales de 10 m³/s a 23 m³/s sean excedidos.

Teniendo en cuenta la Figura 20 y las funciones de distribución de los demás modelos (Anexo 5), se considera que el efecto del cambio climático tiende a incrementar la posibilidad de excedencia (mayor frecuencia) de caudales mayores a $10 \text{ m}^3/\text{s}$ con respecto a las posibilidades actuales; lo que significa una mayor disponibilidad de agua para los distintos sectores de producción en el área en estudio.

Para poder analizar el efecto del cambio climático en los caudales de mayor magnitud, se distribuyeron los caudales proyectados en diagramas de cajas. En la Figura 21, se aprecia que los caudales diarios proyectados llegan a alcanzar magnitudes mayores a los observados, siendo el modelo MRI 3.2 el que proyecta el evento más alto de $410.87 \text{ m}^3/\text{s}$.

Teniendo en cuenta los caudales generados por los modelos de mejor ajuste, se induce la ocurrencia de eventos diarios mayores a los eventos máximos ocurridos en el intervalo observado 2000-2010 ($184.4 \text{ m}^3/\text{s}$) para finales del siglo XXI; proyectándose producirse eventos máximos de $219.52 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $410.87 \text{ m}^3/\text{s}$.

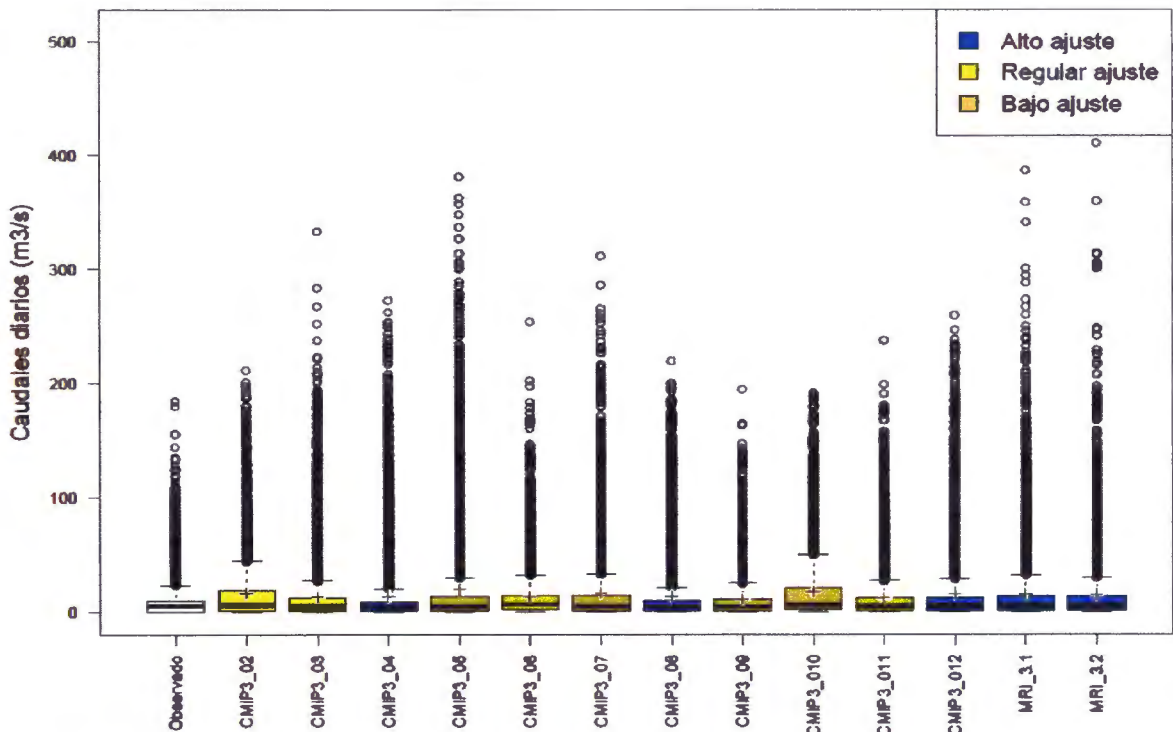


Figura 21: Diagrama de cajas los caudales diarios proyectados

La Figura 22, elaborada en base a caudales medios mensuales, también se observa la tendencia de que los caudales proyectados superen los caudales máximos observados ($88.9 \text{ m}^3/\text{s}$): llegando a proyectarse un caudal medio mensual de hasta $242.48 \text{ m}^3/\text{s}$. Teniendo en cuenta los caudales generados por los modelos de mejor ajuste, se proyecta caudales medios mensuales de hasta $191.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se debe recalcar que los MGC no consideran en sus cálculos los eventos extremos como el fenómeno del Niño; por lo que los incrementos proyectados de las frecuencias de eventos de grandes magnitudes, representan una gran alerta por los efectos de inundación y sedimentación que estos pudieran causar.

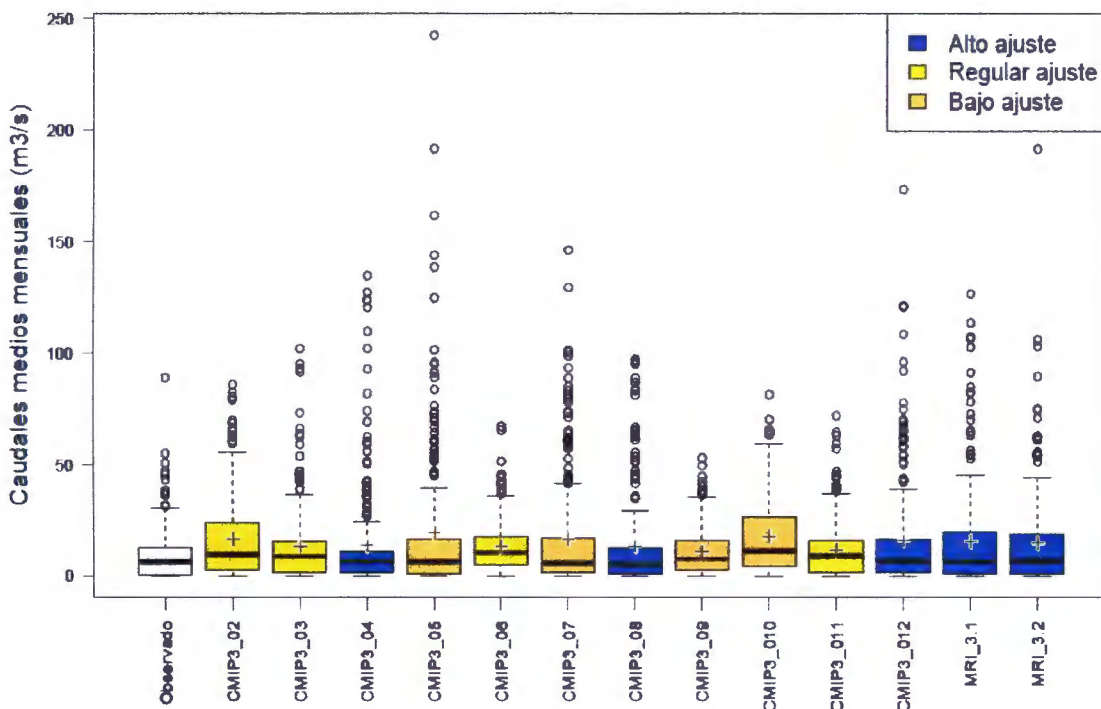


Figura 22: Diagrama de cajas de los caudales mensuales proyectados

En base a la Figura 23, donde se representa el caudal promedio de cada mes del año acomodado de acuerdo al periodo húmedo o seco al que pertenece, de manera que se pueda diferenciar los cambios de estacionalidad que se proyectan. Donde se puede indicar que existe una tendencia en el mes de Septiembre (periodo seco) de producir más agua y dar inicio al periodo húmedo, lo que indica el acortamiento del periodo seco para finales del siglo XXI en la región de estudio.

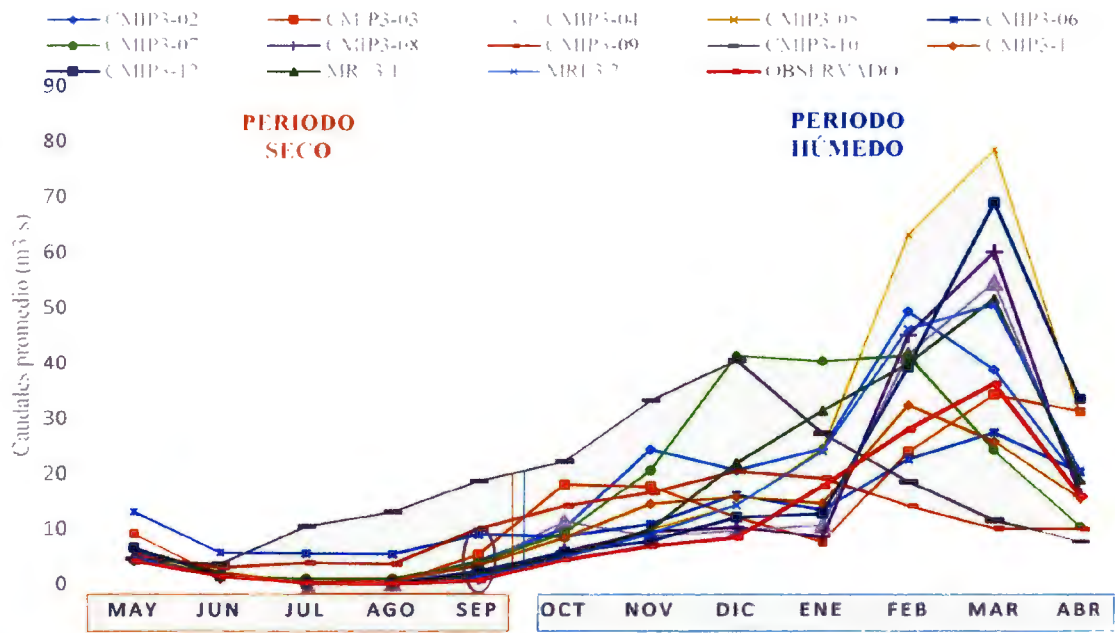


Figura 23: Caudales promedio proyectados a finales del siglo XXI (2080-2099)

En la Figura 24 se indican las variaciones de escorrentía por efecto del cambio climático, con respecto a cada mes del año, donde se tomaron en cuenta los resultados de los modelos de alto ajuste por presentar la mejor capacidad de simular las condiciones de la región en estudio. Se pueden identificar variaciones desde +161.23% a -51.96% en el periodo húmedo (Octubre - Abril) y variaciones de +225.67% a -88.96% en el periodo seco (Mayo - Septiembre).

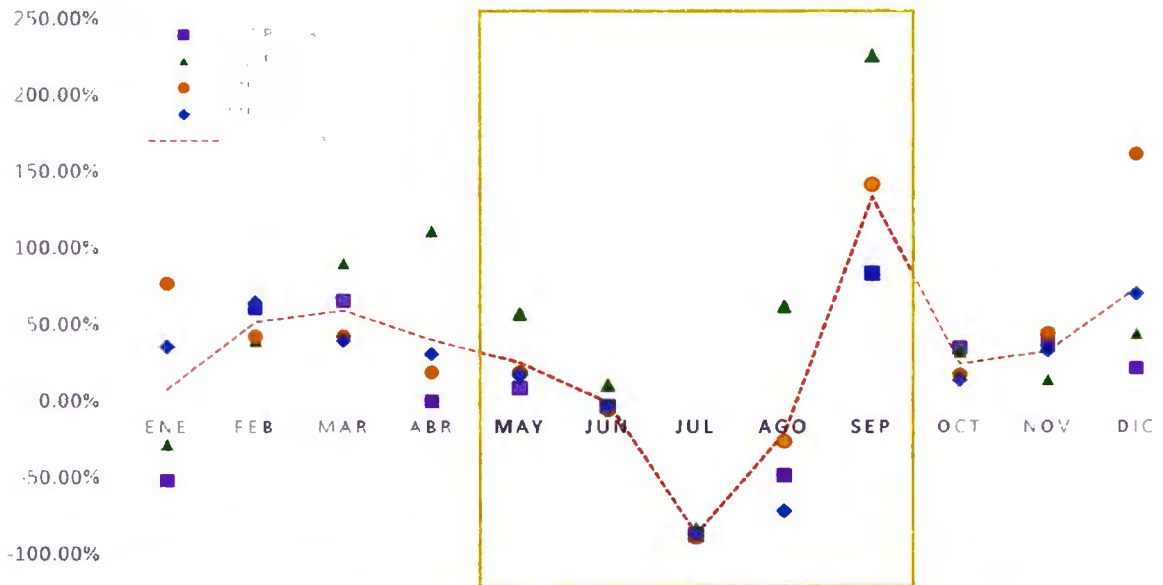


Figura 24: Variación relativa a los caudales medios mensuales observados

Realizando un promedio de las variaciones de cada mes, se observa en la Figura 24 que las variaciones más altas se generan en los meses de Julio y Septiembre, los cual se atribuye a que los valores promedio mensuales de escorrentía observados en dichos meses son valores bastante pequeños, por lo que un aumento en magnitud de escorrentía proyectada representa una amplia variación en porcentajes. También se debe tener en cuenta que en la Figura 24, se muestra que las variaciones proyectadas en los meses de Febrero, Marzo, Mayo, Junio, Julio, Septiembre y Noviembre presentan bastante concordancia, por lo que se indica una mayor certeza en dichos meses.

La variación promedio indica que en todos los meses del periodo húmeda (Octubre – Abril) se proyecta un incremento de la oferta de agua desde +8.10% a +74.33%, indicando los meses de Marzo y Diciembre con los mayores incrementos de +59.60% y +74.33% respectivamente. Sin embargo, se proyecta también una disminución de la escorrentía en los meses de julio y agosto con descensos de hasta -86.86% y -21.29% respectivamente.

En la Figura 25 se observan las curvas de disponibilidad hídrica de los caudales observados y proyectados por los MGC de mejor ajuste, donde se puede identificar un incremento en casi todos los meses para la persistencia al 50% especialmente en los meses de febrero y marzo. Con respecto a la ocurrencia de caudales proyectados al 75%, se identifican los mayores incrementos en los meses de febrero y mayo para la mayoría de MGC; sin embargo, en los meses de enero y abril existe una tendencia al descenso de los caudales.

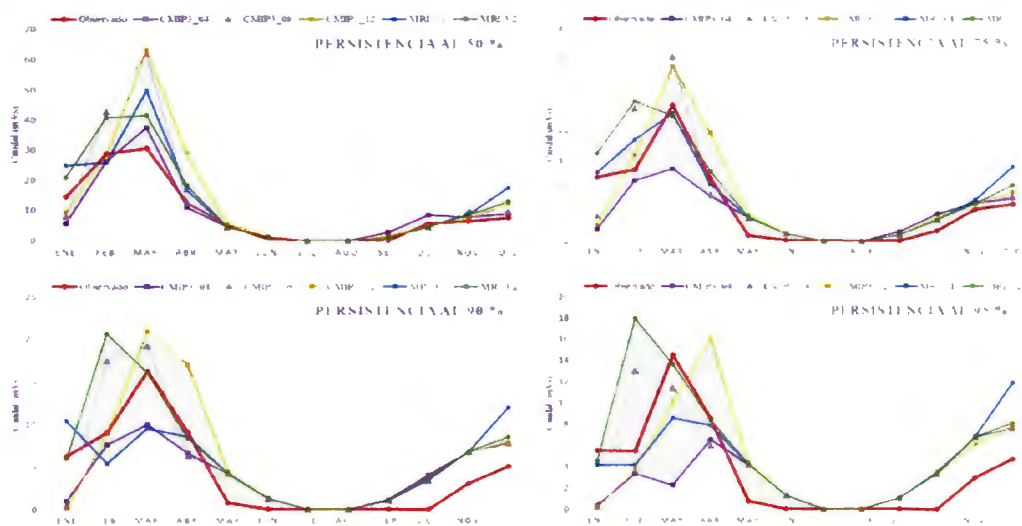


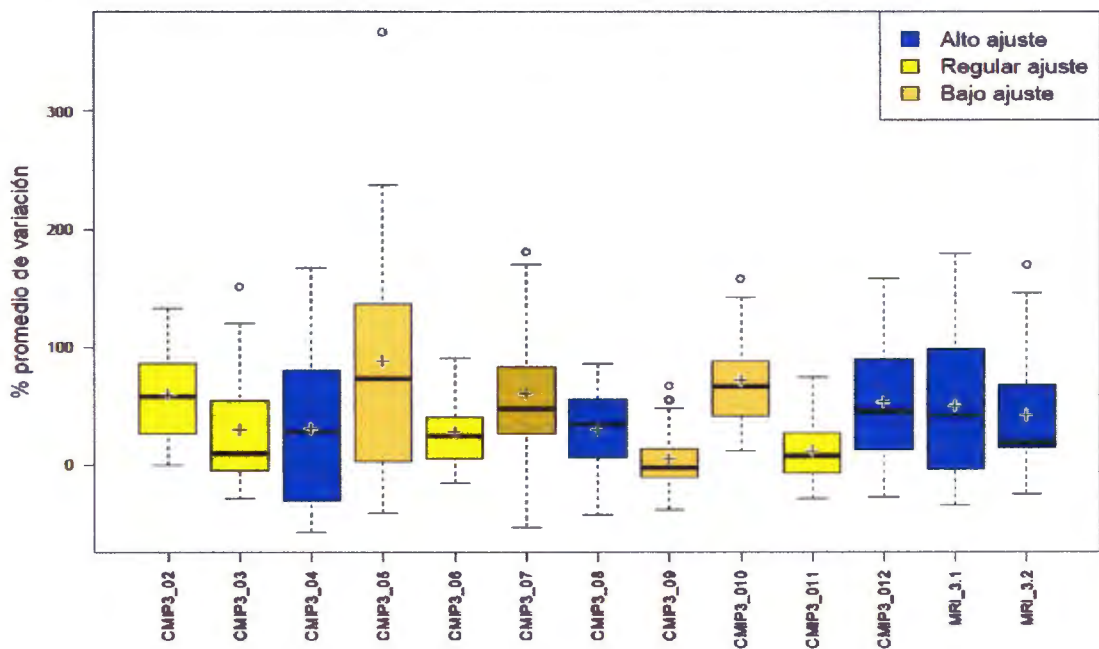
Figura 25: Persistencias de disponibilidad hídrica al 50%, 75%, 90% y 95%

Para una disponibilidad hídrica del 90%, se identifica una tendencia al incremento de los caudales en los meses de febrero, mayo, junio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre; también existe una tendencia al descenso del caudal en el mes de enero. Teniendo en cuenta una disponibilidad hídrica del 95%, se proyecta una tendencia al incremento de caudales en los meses de febrero, mayo, junio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre; también existe una tendencia al descenso en los meses de enero y marzo. Considerar que los incrementos de los meses de mayo, junio, septiembre, octubre y noviembre se encuentran influenciados por los aportes proyectados del sistema Choclococha.

La Figura 26 muestra los cambios relativos a la esorrentía anual promedio registrada en la estación hidrológica “La Achirana” por efecto del cambio climático. Donde se identifican variaciones de oferta de agua dentro de un rango de +367.61% a -56.42%, teniendo en cuenta resultados de todos los MGC empleados en el estudio.

Teniendo en consideración las variaciones promedio de los modelos de alto ajuste, se indica que la variación de la oferta anual de agua para fines del siglo XXI (2080 – 2099) representará un incremento de +30.53% a +53.97% con respecto a la producción anual promedio del área de estudio en el periodo observado (2000-2010).

Figura 26: Variación de la oferta anual de agua a fines del siglo XXI (2080-2099)



V. CONCLUSIONES

- Tanto en la calibración y validación del modelo hidrológico se obtuvieron valores de R^2 , NS, PBIAS y RSR que deducen el rendimiento satisfactorio del modelo hidrológico SWAT, considerándose el modelo elaborado con capacidad suficiente de simular la cuenca en estudio.
- Se realizó el cambio de escala (“downscaling”) y proyección de la precipitación hacia fines del siglo XXI de manera satisfactoria; logrando simular la distribución y estacionalidad de la precipitación para el periodo observado (1980-1999).

Los modelos CMIP3-04 (CSIRO-Australia), CMIP3-08 (INM-Rusia), CMIP3-12 (MRI-Japón), MRI 3.1 (Japón) y MRI 3.2 (Japón) obtuvieron un mejor ajuste al área de estudio, cuyas proyecciones fueron tomadas con mayor consideración en esta investigación.

En la proyección de precipitación para el periodo 2080 – 2099, se resalta un incremento promedio de 28.4% y 28.1% en los meses de febrero y marzo respectivamente.

- En base a la serie de caudales proyectados por los modelo de mejor ajuste, para fines del siglo XXI (2080-2099) en el escenario de emisión A1B, se proyectan:

Incrementos de hasta 5.41% en la probabilidad de excedencia de los caudales mayores a 10 m³/s, el cual irá disminuyendo acorde incrementemente la magnitud de los caudales.

Eventos diarios de magnitudes máximas desde 219.52 m³/s hasta 410.87 m³/s, representan incrementos de 19.04% hasta 122.8% con respecto a los eventos diarios máximos observados en la actualidad. Considerando caudales medios mensuales, se proyectan generar hasta 191.3 m³/s en promedio, llegando a superar en un 115.18% al caudal medio mensual máximo observado.

Los caudales mensuales del periodo húmedo (Octubre - Abril) variarán en un +41.66% en promedio, que representa un incremento aproximado de 7.65 m³/s; ocurriendo los mayores incrementos en los meses de Diciembre y Marzo con

variaciones de +74.33% y +59.6% respectivamente. Por otra parte, el periodo seco (Mayo – Septiembre) variará en un +10.0% en promedio, que representa un incremento aproximado de 0.36 m³/s, pese a la disminución promedio de escorrentía en los meses de Julio y Agosto, de hasta -86.86% y -21.29% respectivamente.

La oferta anual promedio de agua incrementará en un rango de +30.53% a +53.97% con respecto a la oferta observada del periodo 2000-2010; lo cual siendo aprovechado podrá satisfacer las futuras demandas de distintos sectores (población, industria, energía) si se planifica un adecuado manejo y gestión del recurso hídrico.

VI. RECOMENDACIONES

- Continuar la investigación, incluyendo el análisis de más escenarios de emisión para obtener un panorama más amplio del efecto cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Ica; considerando que los resultados de esta investigación proyectan mayor disponibilidad de agua y eventos diarios de esorrentía de altas magnitudes.
- Proseguir la ampliación del proyecto Tambo – Ccaracocha, para lograr aprovechar la mayor disponibilidad de agua que se proyecta en esta investigación.
- Debido a la baja disponibilidad de información hidrológica diaria, se utilizó una estación hidrológica para realizar la calibración del modelo hidrológico. Se recomienda emplear más estaciones hidrológicas en la calibración del modelo para poder obtener una representación más exacta de la cuenca.
- Proseguir realizando más estudios de cambio climático en nuestro país, de manera que se logre establecer un marco de referencia sobre los posibles cambios del clima y su efecto en la disponibilidad del agua, permitiendo proponer medidas de adaptación o mitigación ante estos efectos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNOLD J.G., SRINIVASAN, R.S., MUTTIAH, J.R., WILLIAMS, (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment -- Part 1: Model development". Journal of the American Water Resources Association.

CARMONA A. (2013). Ajuste de la producción de agua simulada por el modelo swat y análisis de sensibilidad ante características hidrológicas del suelo en una cuenca pequeña de alta pendiente.

CHOW, VEN TE. (1994). "Hidrología aplicada". Ed. McGraw Hill Interamericana, S. A. Santafé de Bogotá, Colombia.

FRANQUET, J. (2005). Agua que no has de beber...60 respuestas al plan hidrológico nacional. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.eumed.net> [Consulta: 2006, Febrero 07].

GARCIA N., MECHOSO C. (2005). Variability in the discharge of South American rivers and in climate. Hydrol. Sci. 50 (3), 459–478.

GUZMÁN, E.; J. BONINI Y D. MATAMOROS. (2004). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) para la predicción de caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica caso de estudio: cuenca del río Chaguana. Revista Tecnológica 17 (1): 152 – 161 p.

HESSAMI M., QUARDA T., GACHON P., ST-HILAIRE A., SELVA F., BOBEE B. (2004). "Evaluation of statistical downscaling method over several regions of eastern Canada", 57th Canadian water resources association annual congress.

INRENA. (2002) - Dirección General De Aguas Y Suelos - ATDR Ica- Balance Hidrológico De La Cuenca Integral Del Rio Ica [E. Chavarri]

IPCC. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt,

M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

KOMAI K. (2012). Application and Problems of GCM for Projection on Water Resources for Agricultural Production in Peru. Kitami Institute of Technology -Japan

MORIASI J, ARNOLD M, VAN LIEW R, BINGNER R, HARMEL T, VEITH. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. ASABE Vol. 50(3): 885–900

NASH J. AND SUTCLIFFE J. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. J. Hydrology 10(3): 282-290.

NEARING M, DEER-ASCOUGH L, LAFLIN J. (1990). Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 33 (3): 839–849 p

NEITSCH S, ARNOLD J, KINIRY J, SRINIVASAN R, WILLIAMS J. (2002). Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000. GSWRI. Report 02-02. BRC Report 02-06. TR-192. College Station, Texas: Texas Water Resources Institute

NEITSCH S, ARNOLD J, KINIRY J, SRINIVASAN R, WILLIAMS J. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2009. Texas: Texas Water Resources Institute Report N° 406

OHCHR, U.-H., WHO, (2010). The right to water. In: Office of the United Nations High Commissioner for Human Rights, U.H., World Health Organization, (Eds.), Human Rights: Fact Sheet N° 35. United Nations Office, Geneva, pp. 1–56.

PATZ J, CAMPBELL-LENDRUM D, HOLLOWAY T, FOLEY J. (2005). Impact of regional climate change on human health. Nature 17:310–317.

ZHANG P, LIU R*, BAO Y, WANG J, YU W, SHEN Z. (2013). Uncertainty of SWAT model at different DEM resolutions in a large mountainous watershed.

PEIACC. (2011). "Problemática del Agua en la Cuenca del Río Ica".

PROCIIM (Programa Nacional de Fortalecimiento de Capacidades para Manejar el Impacto del Cambio Climático y la Contaminación del Aire). (2005). Escenarios del cambio climático en el Perú al 2050 - Cuenca del Río Piura.

REFSGAARD, J. (1997). Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models. *J. Hydrol.* 198(1): 69-97.

SALEH A, ARNOLD J, GASSMAN P, HAUK L, ROSENTHAL W, WILLIAMS J, MACFARLAND A. (2000). Application of SWAT for the upper North Bosque River watershed. *Trans. ASAE* 43(5): 1077-1087.

SALINAS, J. (2003). Aplicaciones de la simulación hidrológica en zonas áridas. Encuentro medioambiental almeriense: en busca de soluciones. Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Almería. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.gem.es> [Consulta: 2006, Febrero 07].

SANTHI C, ARNOLD J, WILLIAMS J, DUGAS W, SRINIVASAN R, HAUCK L. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37(5): 1169-1188.

TISCARENO M, LOPES V, STONE J, LANE L. (1994). Sensitivity analysis of the WEPP watershed model for rangeland applications II: Channel processes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 37 (1): 151 – 158

TORRES E, OROPEZA J, FERNÁNDEZ D. (2000). Aplicación del modelo SWAT en la cuenca "El Tejocote". Atlacomulco, estado de México. X Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 4. Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas Chihuahua. Chihuahua, México.

UNEP. (2008). *Vital Water Graphics – An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters*, 2nd ed. United Nations Environmental Programme, Nairobi, Kenya.

URIBE N. (2011). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil And Water Assessment Tool) a la cuenca del Río Cañete.

WILBY R, CHARLES S, ZORITA E, TIMBAL B, WHETTON P, MEARNNS L. (2004). Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting Material of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

YUE-PING XU, XUJIE ZHANG, QIHUA RAN, YE TIAN. (2013). Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Qiantang River Basin, East China. Journal of Hydrology 483 (2013) 51–60

ANEXOS

Anexo 1: Estaciones con registros de precipitación medias mensuales ubicadas dentro de la cuenca del Río Ica.

Cuadro 1: Precipitación promedio mensual en milímetros de la estación Huamani.

AÑO	ESTACION HUAMANÍ											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1981	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NA	NA	0.00
1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NA	NA	0.00	0.00	0.00
1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1984	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1985	0.00	0.43	0.00	NA	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15
1986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NA	0.00	0.00
1987	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1988	0.00	0.00	1.63	0.00	0.00	NA	NA	0.00	0.00	NA	0.00	NA
1989	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	NA
1990	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	NA	NA	NA
1991	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00
1992	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NA	NA	NA	NA	NA
1993	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NA	NA	0.00
1994	0.00	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1995	0.00	0.00	0.00	0.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1996	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1997	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1998	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1999	NA	0.15	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
2000	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2001	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2002	0.00	0.24	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2003	0.09	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2005	0.00	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2006	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2008	0.37	0.22	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2009	0.00	0.49	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 2: Precipitación promedio mensual en milímetros de la estación Challaca.

AÑO	ESTACION CHALLACA											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	0.00	6.85	6.63	0.86	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	NA	NA	NA
1981	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1982	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1983	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1984	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1985	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.29	0.37	NA
1986	4.91	6.62	5.43	1.21	0.65	0.00	0.00	0.29	0.00	0.05	0.46	3.54
1987	4.72	4.07	0.89	0.40	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.07
1988	3.28	3.93	2.91	2.45	1.36	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.20
1989	0.75	5.64	4.06	1.27	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	1.13	0.00	0.00
1990	3.29	0.69	3.86	1.01	0.27	0.00	0.00	0.03	0.28	0.12	1.32	1.00
1991	0.98	2.36	4.99	2.02	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	2.21	0.00	0.00
1992	0.88	0.49	2.36	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.15	0.49
1993	2.89	5.11	7.54	2.54	0.51	0.00	0.00	0.00	0.39	0.38	1.51	2.60
1994	4.87	6.75	5.52	1.65	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	1.22
1995	1.25	1.91	3.11	1.63	0.09	0.00	0.00	0.00	0.17	0.21	2.47	3.02
1996	4.40	5.53	4.60	1.43	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.15	1.05
1997	4.37	4.47	1.57	0.05	0.01	0.00	0.00	0.11	0.12	0.00	0.82	5.59
1998	9.35	6.81	7.92	1.18	0.43	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	2.18
1999	3.75	8.70	5.61	2.46	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	1.49	0.17	2.71
2000	1.13	1.08	0.65	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
2001	0.36	1.66	1.06	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00
2002	0.11	0.81	0.49	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00
2003	0.39	0.68	0.62	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
2004	0.00	0.32	0.81	0.04	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37
2005	0.17	0.90	0.19	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54
2006	0.55	2.16	0.91	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.13	0.23
2007	0.32	0.32	0.57	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
2008	1.58	2.18	1.66	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
2009	1.19	1.91	0.49	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.01
2010	0.07	0.40	0.05	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10

Cuadro 3: Precipitación promedio mensual en milímetros de la estación Santiago de Chocorvos.

AÑO	ESTACION SANTIAGO DE CHOCORVOS											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	0.38	0.61	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1981	0.39	1.88	2.70	1.27	0.00	0.00	0.00	0.47	0.00	0.02	0.02	0.12
1982	0.17	0.39	4.16	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00
1983	0.03	0.05	3.29	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.46
1984	3.89	6.86	3.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	1.26	1.16
1985	0.58	5.48	2.75	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	NA	0.00	0.00	5.29
1986	16.45	3.68	1.78	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.07
1987	1.53	0.39	0.91	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1988	0.76	0.67	1.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
1989	8.01	16.69	3.82	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

1990	0.02	0.18	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57
1991	0.55	1.01	0.80	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00
1992	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NA	NA	NA
1993	NA	NA	1.80	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33
1994	2.73	4.16	2.81	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45
1995	1.46	0.06	3.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.19
1996	0.35	4.11	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18
1997	0.25	1.23	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	0.08	0.00	0.00	1.55
1998	8.75	4.84	2.82	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.46
1999	0.52	3.72	2.81	1.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.35	0.00	0.23
2000	2.40	2.86	2.39	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	1.37
2001	1.70	3.19	4.54	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.00
2002	0.45	1.94	1.74	0.65	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.33	0.17
2003	0.62	1.45	1.83	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90
2004	0.44	0.92	2.96	0.20	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.01	0.69
2005	1.28	1.89	0.67	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	1.05
2006	1.58	4.03	3.21	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.30	0.83
2007	0.69	0.54	1.46	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.16
2008	3.95	5.08	3.33	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48
2009	3.15	3.90	1.52	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.67	0.17
2010	0.47	1.76	1.40	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55

Cuadro 4: Precipitación promedio mensual en milímetros de la estación Tambo.

AÑO	ESTACION TAMBO											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	1.35	1.32	2.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	3.21	0.00	0.32
1981	1.75	5.78	3.82	2.24	0.00	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	0.01	0.59
1982	0.97	2.20	3.33	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.11	0.14
1983	1.06	1.79	0.59	2.95	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.66
1984	2.91	7.84	2.58	0.07	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.08	2.94
1985	1.00	7.41	1.94	0.77	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	2.94
1986	5.74	6.06	4.20	1.31	0.32	0.00	0.00	0.16	0.00	0.14	0.20	2.20
1987	3.60	3.59	1.07	0.11	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00
1988	4.65	1.86	2.65	0.80	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72
1989	1.99	7.35	6.06	1.54	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	0.00
1990	0.86	0.00	3.41	0.68	0.16	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	2.58	6.06
1991	4.69	2.92	3.25	0.60	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	1.66	1.12	0.82
1992	0.00	0.00	0.10	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	NA	NA
1993	NA	NA	10.77	5.79	0.82	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	2.13	1.52
1994	2.20	1.86	4.84	1.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.52	1.52
1995	3.54	2.04	9.01	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.35	1.35	0.85
1996	3.40	8.31	3.63	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.09
1997	0.98	2.46	0.83	0.00	0.02	0.00	0.00	0.11	1.06	0.01	0.04	3.47
1998	10.67	1.99	3.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56	2.25
1999	2.94	14.59	3.81	4.11	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	0.00	0.96
2000	4.21	4.68	5.32	1.89	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	0.20	5.05
2001	2.48	3.11	7.90	2.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.73	0.19
2002	3.46	3.71	6.66	3.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.32	0.10

2003	1.94	3.91	2.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.64
2004	0.68	1.69	3.23	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	2.03
2005	1.42	1.82	2.32	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.13
2006	1.87	5.61	5.00	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.50	0.87
2007	0.84	0.52	2.78	0.84	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52
2008	4.03	5.90	3.97	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35
2009	3.58	7.82	3.74	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.77	0.58
2010	0.90	3.14	1.77	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.65

Cuadro 5: Precipitación promedio mensual en milímetros de la estación Tunel Cero.

AÑO	ESTACION TUNEL CERO											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	3.92	3.99	4.88	1.72	0.62	0.40	0.73	1.06	1.34	3.91	1.91	2.27
1981	3.66	6.73	3.47	1.37	0.12	0.15	0.02	2.47	0.62	2.34	2.52	4.74
1982	5.08	6.90	2.15	3.12	0.20	0.05	0.14	0.85	2.77	2.77	4.44	1.48
1983	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1.28	2.71	6.26
1984	5.18	11.94	5.16	3.57	1.41	1.20	0.04	0.58	0.82	2.57	4.91	4.51
1985	2.88	5.23	5.40	3.42	1.59	0.96	0.40	0.25	1.01	1.07	2.21	3.95
1986	6.51	8.84	6.74	3.48	1.23	0.04	0.72	0.92	0.69	1.05	1.80	3.99
1987	6.73	3.44	2.62	2.17	0.40	0.33	0.90	1.13	0.63	0.82	1.60	2.46
1988	7.42	5.77	3.76	2.53	0.73	0.23	0.00	0.02	0.76	1.98	1.99	4.51
1989	7.19	4.44	6.64	2.87	0.62	0.59	0.31	1.66	0.86	2.94	1.29	1.35
1990	6.52	1.05	2.61	0.79	1.71	1.21	0.41	0.79	1.42	1.49	3.22	3.91
1991	2.68	5.93	4.75	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1992	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1.74
1993	9.33	6.42	8.55	9.12	0.24	0.05	0.25	0.15	1.18	4.48	4.70	8.55
1994	6.53	9.12	6.01	NA	1.04	0.00	0.54	0.00	1.51	2.19	2.86	4.12
1995	5.33	4.24	3.61	2.25	0.31	0.00	0.00	NA	0.56	2.21	3.17	2.75
1996	5.71	6.81	5.68	3.77	1.12	0.00	0.20	0.41	0.85	1.08	1.27	3.86
1997	4.29	4.86	2.74	1.68	0.83	0.00	0.01	0.82	1.07	1.46	2.72	4.47
1998	7.43	5.25	4.74	1.64	0.00	0.43	0.00	0.23	0.58	1.48	2.56	3.14
1999	3.70	8.21	5.51	2.81	1.75	0.02	0.07	0.05	0.80	3.48	1.19	4.93
2000	6.91	8.16	6.53	2.00	1.07	0.00	0.31	0.23	1.06	4.10	1.97	5.53
2001	8.20	4.83	5.66	2.76	0.43	0.27	0.42	0.16	1.05	1.47	2.50	2.46
2002	3.26	6.73	5.55	1.90	1.07	0.30	0.77	0.18	1.37	1.39	2.50	3.88
2003	3.65	5.92	4.80	1.88	0.33	0.02	0.04	0.16	0.08	2.04	1.36	5.75
2004	1.64	6.06	4.53	4.05	0.20	0.33	0.12	0.23	1.44	0.83	1.92	5.67
2005	3.25	4.39	8.45	1.43	0.29	0.00	0.00	0.07	0.46	0.45	1.60	4.30
2006	5.40	4.88	4.61	2.56	0.02	0.57	0.00	0.38	0.82	1.82	2.68	4.26
2007	6.38	4.26	6.99	2.53	0.72	0.31	0.10	0.22	0.88	1.35	1.74	3.72
2008	6.81	5.52	3.55	1.05	0.16	0.00	0.00	0.43	0.36	1.68	1.42	4.45
2009	5.49	5.98	5.47	2.76	0.60	0.14	0.18	0.25	0.88	1.97	2.26	4.49
2010	5.25	5.84	4.38	2.50	0.86	0.52	0.37	0.97	1.09	2.02	2.60	3.58

Anexo 2: Estaciones con registros de temperaturas máximas mensuales ubicadas dentro de la cuenca del río Ica

Cuadro 6: Temperaturas máximas en (°C) para la estación Challaca.

AÑO	ESTACION CHALLACA											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	24.69	24.28	25.06	24.69	28	29	26.5	26	28	28	26.5	26
2001	26.5	26	26.5	28	27.5	27.5	26.5	28.5	25.5	26.5	28.5	27
2002	25.5	25.5	26.5	26	28	26.5	27.5	27	26.6	27	25.52	25.08
2003	24.69	24.28	25.06	24.69	26	26.2	26.5	27	27.5	27	26.5	26.5
2004	26.5	26	25.5	26.5	28.5	26.6	27	26.5	26	26	26.6	26.5
2005	26	25.5	26	26.5	26.8	27	27	26.5	27.5	27	26.5	26
2006	27	27	26.5	26.5	26.5	27.2	28	27	28	27.5	27	27
2007	26.5	26.5	26.5	26	28	27	26.5	27.5	27.5	26.5	26.5	26
2008	24.5	25.5	25	26.5	26.5	27.5	27	26.5	27	27.5	27.5	26.5
2009	27	25	26	25.4	26.5	27.5	28	28.5	29.5	27.5	26.5	27.5
2010	26.5	27	27.6	24.69	25.55	25.62	25.55	25.48	25.67	25.83	25.52	25.08

Cuadro 7: Temperaturas máximas en (°C) para la estación Huamani.

AÑO	ESTACION HUAMANI											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	30.8	32	32.2	30.8	29.2	28.6	26.8	26.4	28.4	30.2	29.8	30.8
2001	31.2	32.2	29.71	32.2	29.8	25.6	25.4	26.6	28.8	29.8	30.4	31.8
2002	31	31.8	32.2	30.8	29.6	26.2	25.4	27.4	27.8	31.2	31.2	31.2
2003	30.4	32.4	32.2	30.8	29.2	27.6	26.2	28.4	28.4	29.8	29.2	29.2
2004	32.6	32.6	32	31.2	28.8	26.4	26.8	27.6	28.4	29	30.4	30.2
2005	31.4	30.8	32	31.2	29	28.6	27.2	26.8	27.8	28.6	30.2	29.8
2006	30.2	31.8	32.4	30.4	29.6	26.6	25.2	27.6	29.6	29.4	30.2	30.2
2007	30.8	32.8	31.8	30.8	32	25.8	27.4	28.4	27.8	28.4	29.4	30.4
2008	30.8	31.4	31.6	30.8	29.8	26	26.4	26.2	27.6	29.4	30.7	31.2
2009	31.2	31.6	31.8	31.8	29.6	26.8	25.6	25.2	28.2	29.8	31.8	30.6
2010	31.4	31.4	31.8	29.07	27.52	25.19	23.58	25.2	26.88	27.48	28.3	28.61

Cuadro 8: Temperaturas máximas en (°C) para la estación Santiago de Chocorvos.

AÑO	ESTACION SANTIAGO DE CHOCORVOS											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	20.64	19.91	20.11	21.49	22.79	22.23	22.21	22.87	22.59	22.31	21.63	21.17
2001	20.64	19.91	20.11	21.49	22.79	25	23.6	23.5	22.5	22.5	21.5	23.2
2002	22	21.2	22.5	22.5	23.5	24.6	22.6	25.5	22.59	23.5	22.5	23

2003	23	22	22.5	22.6	23.5	22.5	23	25.5	22.7	23.1	22.7	22
2004	23	21.5	21.8	23.8	24.5	23.5	23.2	23.2	23.5	23.6	23	21.5
2005	22	23.5	21.6	24.4	24	23.5	23.5	23	23.5	23.5	24	21.5
2006	22.5	20	20.6	23.1	23	24	24.5	24.2	23.8	23.5	25.4	22.5
2007	22.5	22.5	21.6	22.6	24.5	23.4	23.6	23.5	23.5	23.5	23	21.8
2008	21	19.6	19.5	24	23.2	23	23.5	24	23.5	23.5	23	22.5
2009	21	19.5	20.5	24	24.5	24.5	24.5	24.5	25.5	24.5	23	22.6
2010	20.64	19.91	20.11	21.49	22.79	22.23	22.21	22.87	22.59	22.31	21.63	21.17

Anexo 3: Estaciones con registros de temperaturas mínimas mensuales ubicadas dentro de la cuenca del Río Ica

Cuadro 8: Temperaturas mínimas en (°C) para la estación Challaca.

AÑO	ESTACION CHALLACA											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	13.06	13.5	13.38	11.59	7.5	6.5	8	8	8.5	10.5	9	10.5
2001	10.5	11.5	10	10.5	8.5	8.5	8.5	9	9	10	9.5	10.5
2002	10.5	12	13	10	9	9.5	8.2	8.5	10	11.5	11.29	11.89
2003	13.06	13.5	13.38	11.59	10	9.5	8.2	8.5	9.5	10	10	11.5
2004	11.2	11.5	11.5	9.5	7.6	8.5	8.5	8.5	10	9.8	10.8	11
2005	11	12.5	12	11	7.5	8.5	8	8.5	10	10	8.5	10
2006	11.2	13	12	10	8	6	8	9	9.5	10	10.5	11.2
2007	12.5	11	12	12	9	9.5	8.5	8	8	10	9.5	11
2008	12	11.5	10	10	8.5	7.5	8	8.5	9.5	9.5	10.5	10.5
2009	11.5	13	10.6	10.5	8.5	8.5	8	7.5	9.5	11	10	11.5
2010	11	13.5	10.6	11.59	9.56	9.9	9.58	10.2	10.8	11.53	11.29	11.89

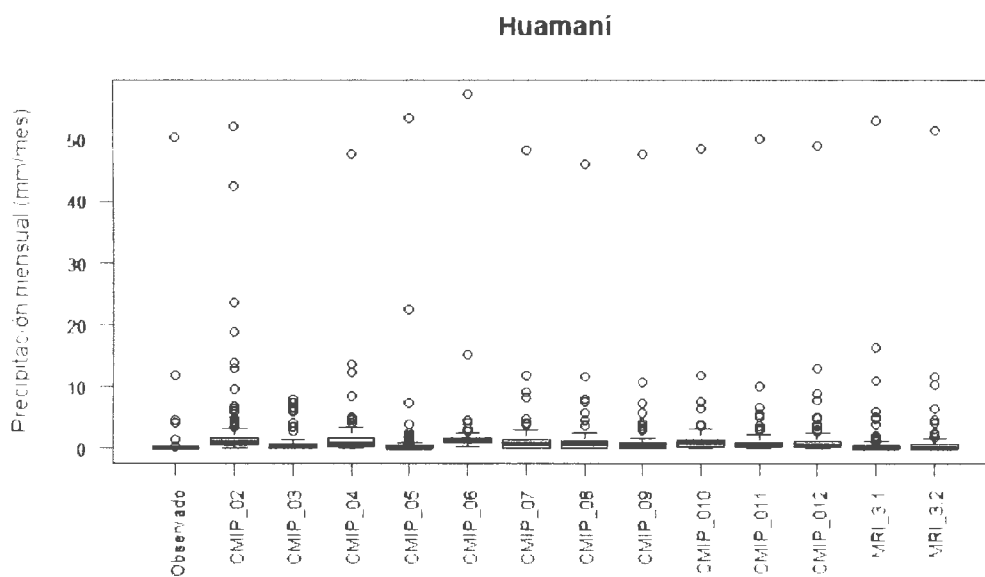
Cuadro 9: Temperaturas mínimas en (°C) para la estación Huamani.

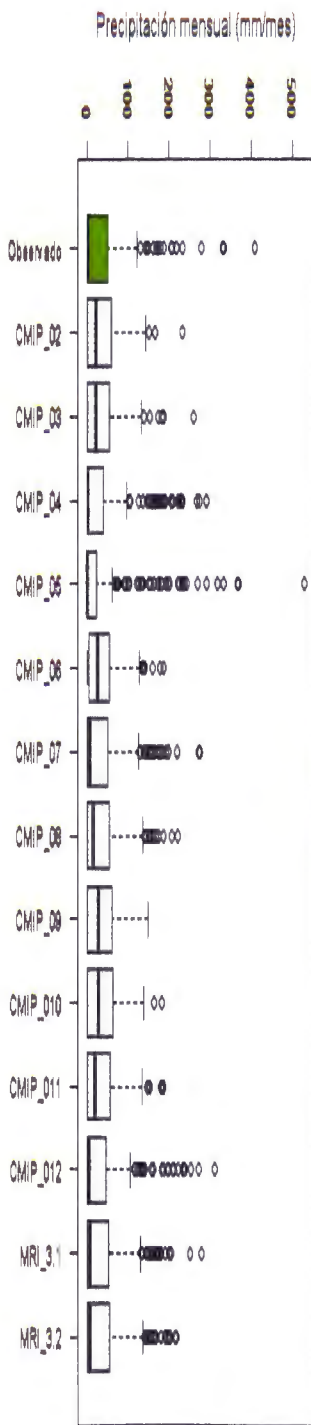
AÑO	ESTACION HUAMANI											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	15	15.4	15.2	16	10.4	6.2	5	7.4	7	9.2	9	12.6
2001	14.4	15.6	15.5	13.2	9.2	5.5	5.5	4.5	8.5	10.4	11.6	12.6
2002	11.2	16.4	16.4	14.2	13.6	9	7.4	7.4	6.6	10	11.2	13.2
2003	15.2	16.6	16.8	13.6	12	7.4	4.6	5.2	7.2	8.6	9.2	10.6
2004	14.2	14.2	14.4	9.8	8.4	5.4	3.2	5.2	7.6	8.4	10.4	11.2
2005	12.6	13.8	13.6	13	10	8.4	7.2	7.6	9.2	9.4	11.4	13.2
2006	14.6	17.2	17	15.2	12.2	8	7	8.6	8.6	10	9.8	14
2007	16.2	17	16.2	14.2	10.2	8.4	6.4	6.2	7.4	9	11	11.8
2008	14.6	17	17.4	15	10.4	7.4	5.6	7.2	8.2	9.8	12.2	12.8
2009	14.8	16.6	16.2	15	12.4	7.2	8.6	9.19	8.6	9.6	11.4	13.4
2010	15	16.6	16	14.95	11.81	10.08	9.28	9.19	10.43	11.6	12.75	14.35

Cuadro 10: Temperaturas mínimas en (°C) para la estación Santiago de Chocorvos.

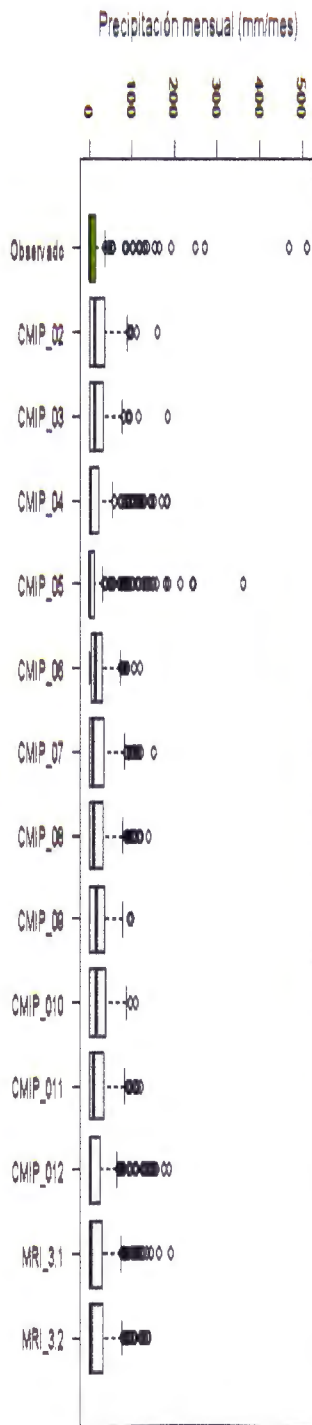
AÑO	ESTACION SANTIAGO DE CHOCORVOS											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	9.4	9.7	9.67	9.43	9.03	9.03	8.68	9.06	9.86	9.57	9.06	9.27
2001	9.4	9.7	9.67	9.43	9.03	9.03	8.68	9.06	9.86	9.57	9.06	9.27
2002	9.4	9.7	9.67	9.43	9.03	9.03	8.68	9.06	9.86	9.57	9.06	9.27
2003	9.4	9.7	9.67	9.43	9.03	9.03	8.68	8.4	8.8	8	8.6	9.2
2004	7.4	7.1	9.2	5.8	8.2	9.2	7.4	8.1	7.8	7.8	8.6	8.2
2005	7.4	9.4	9	8.2	6.4	8	6	7.6	8.4	8.6	6.8	8
2006	8	9.6	9.2	7.4	7	7.2	5.6	8	8.6	6.4	7.8	8
2007	8	6	9.6	8.2	7.2	6	7.6	8.2	8.6	7.8	8	7.2
2008	7.2	8.2	6.4	7.4	5.8	7.6	7	6.6	7.8	6.8	8.8	7.4
2009	8.6	8	7.4	8	7.2	6.2	7.6	6.8	8	8	5.4	9.27
2010	9.4	9.7	9.67	9.43	9.03	9.03	8.68	9.06	9.86	9.57	9.06	9.27

Anexo 4: Diagrama de cajas de los datos diarios de precipitación generados en cada estación meteorológica para el periodo (1980-1999)

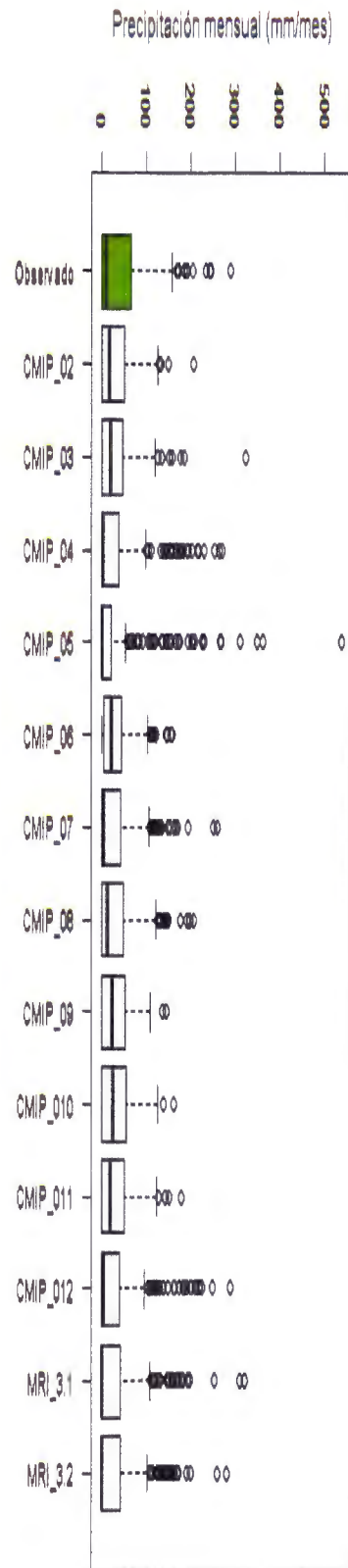




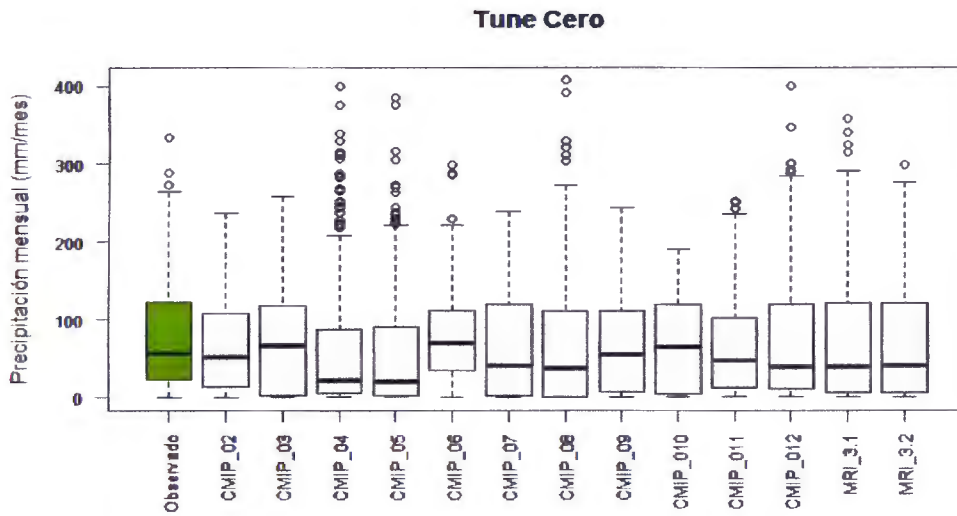
Tambo



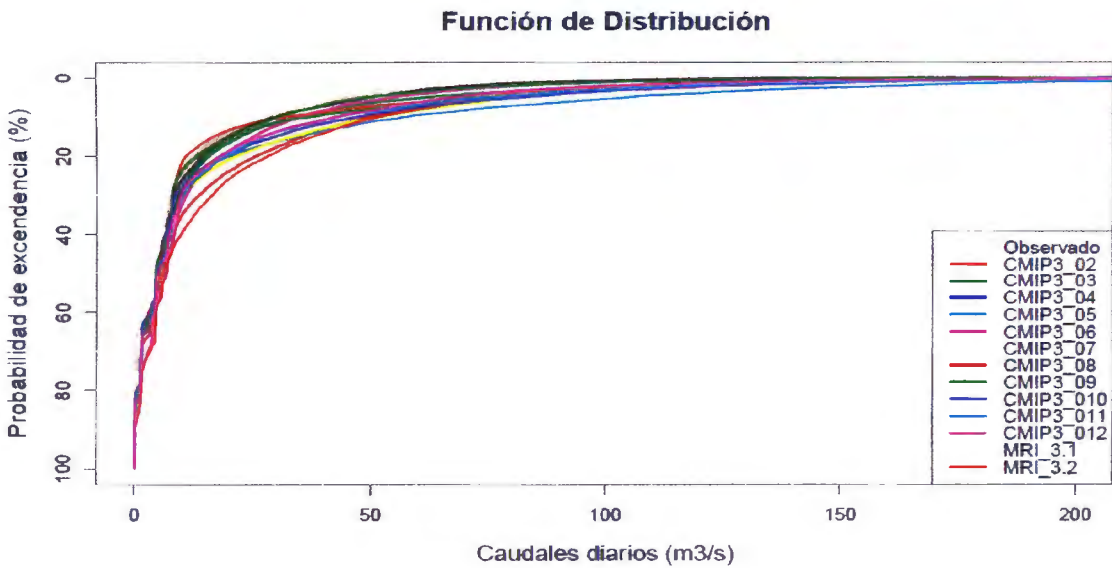
Santiago de Chocorvos



Chailaca



Anexo 5: Función de distribución de los datos diarios de todos los MGC utilizados en el estudio



Anexo 6: Diagrama de cajas de los caudales diarios generados en la época seca y húmeda

Figura 6a: Diagrama de cajas de caudales diarios de la época húmeda

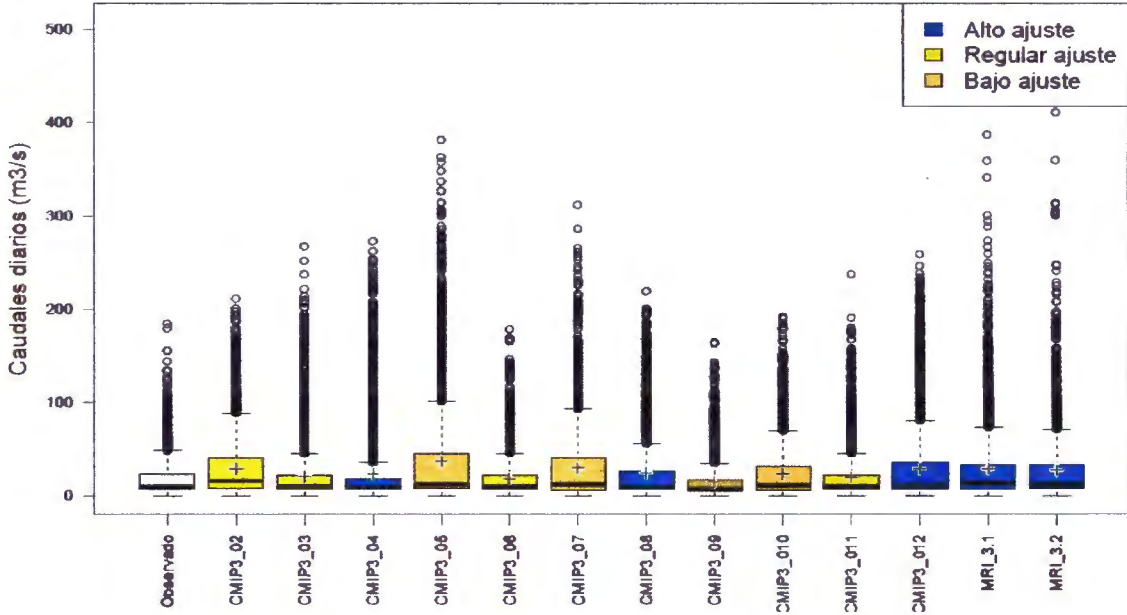
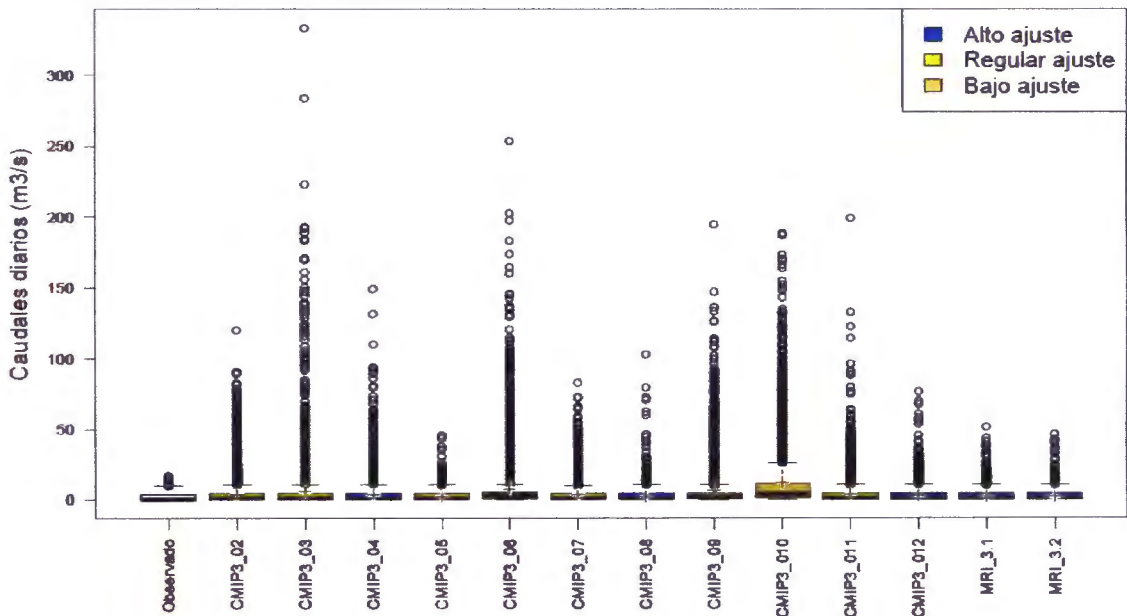
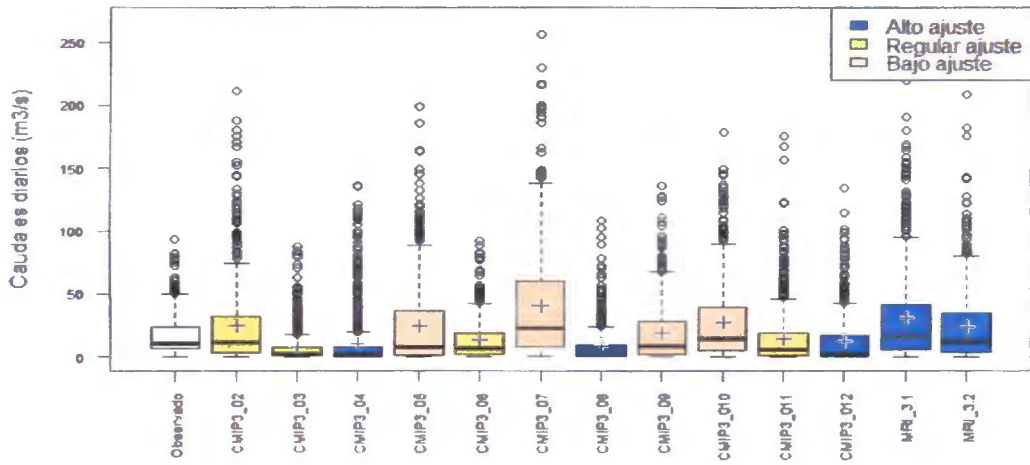


Figura 6b: Diagrama de cajas de caudales diarios de la época seca

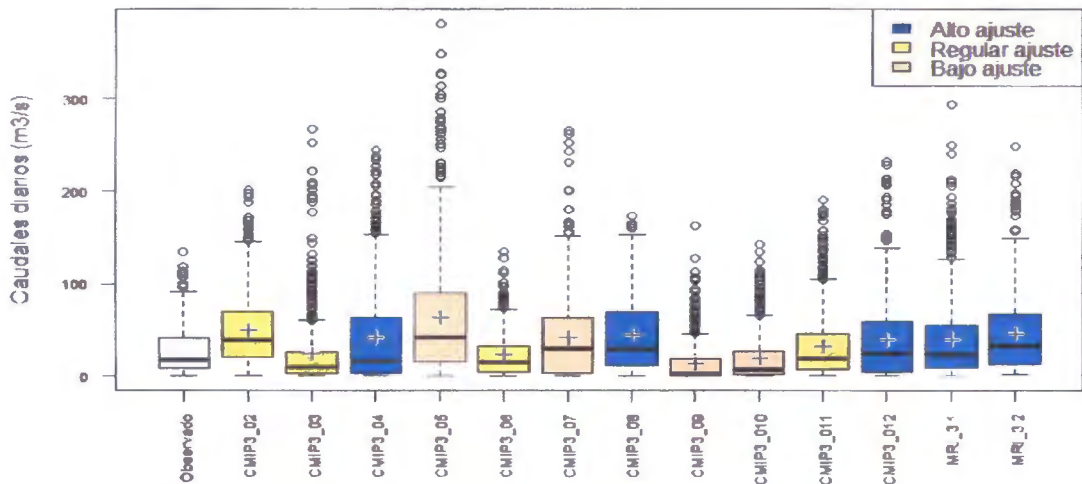


Anexo 7: Diagrama de cajas de los caudales diarios proyectados por cada mes del año

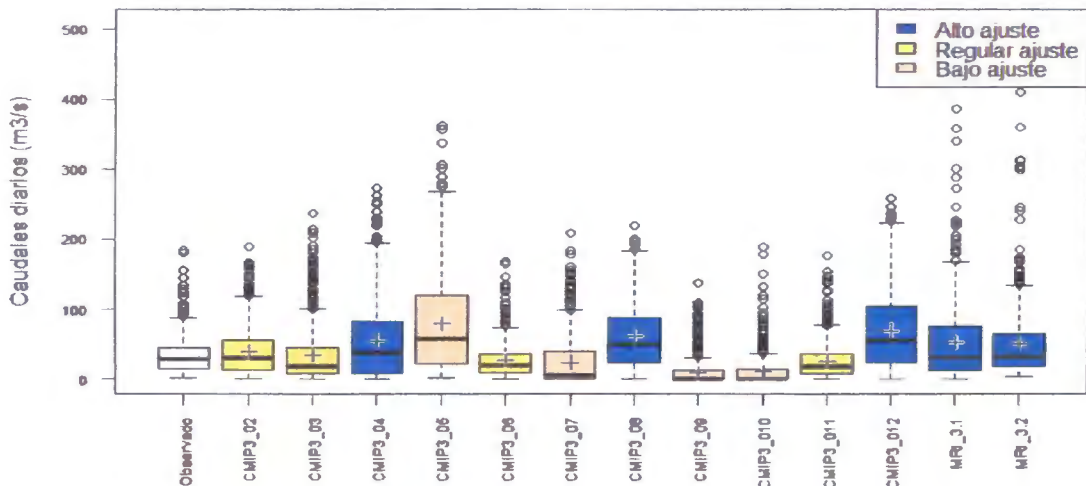
enero

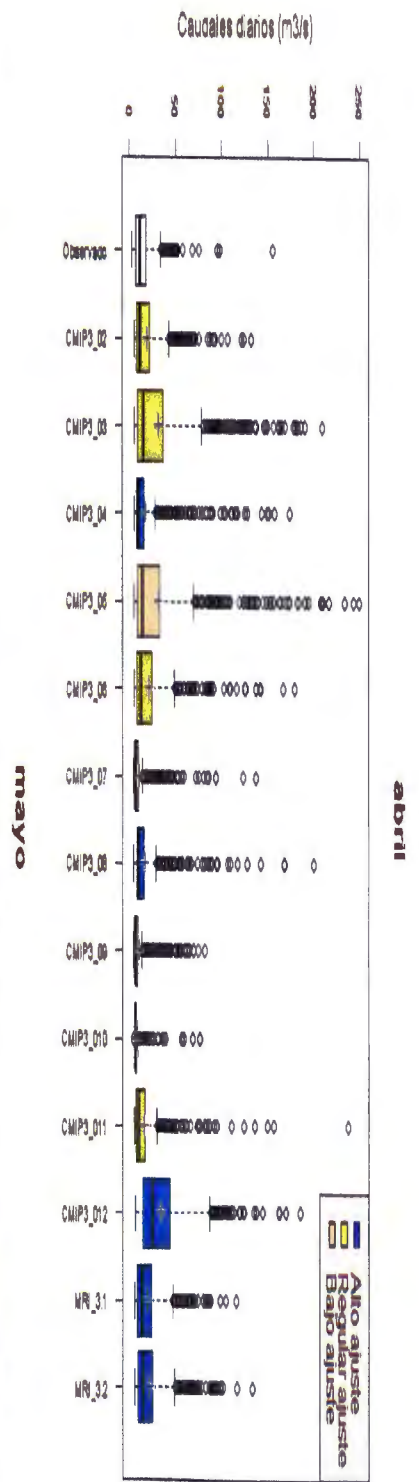
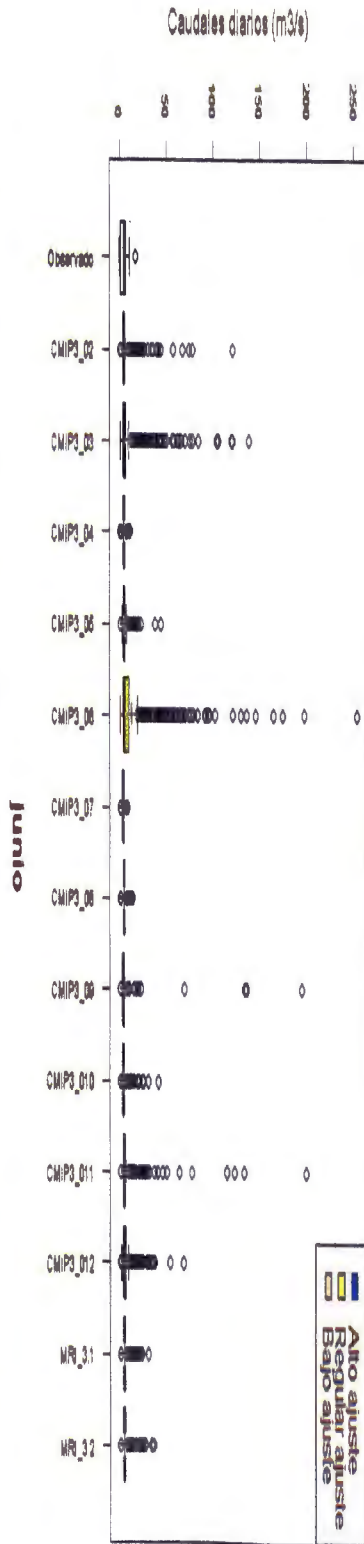
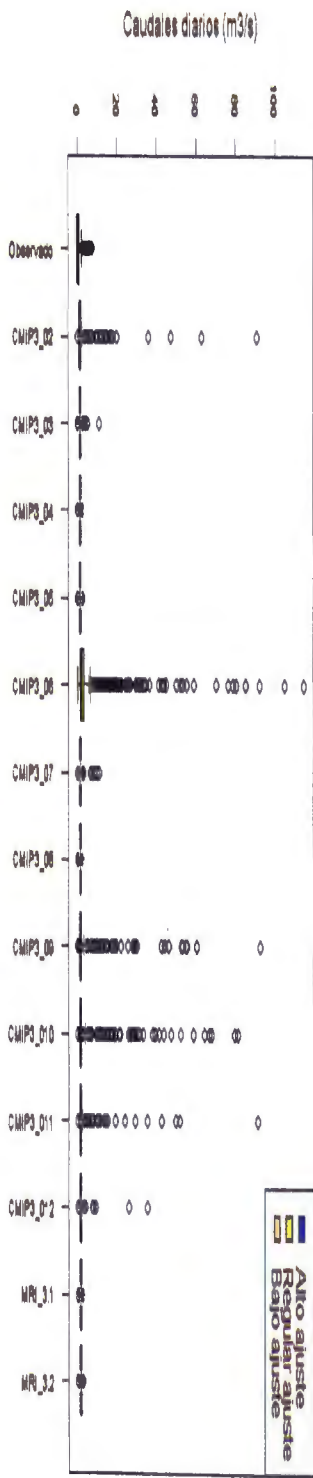


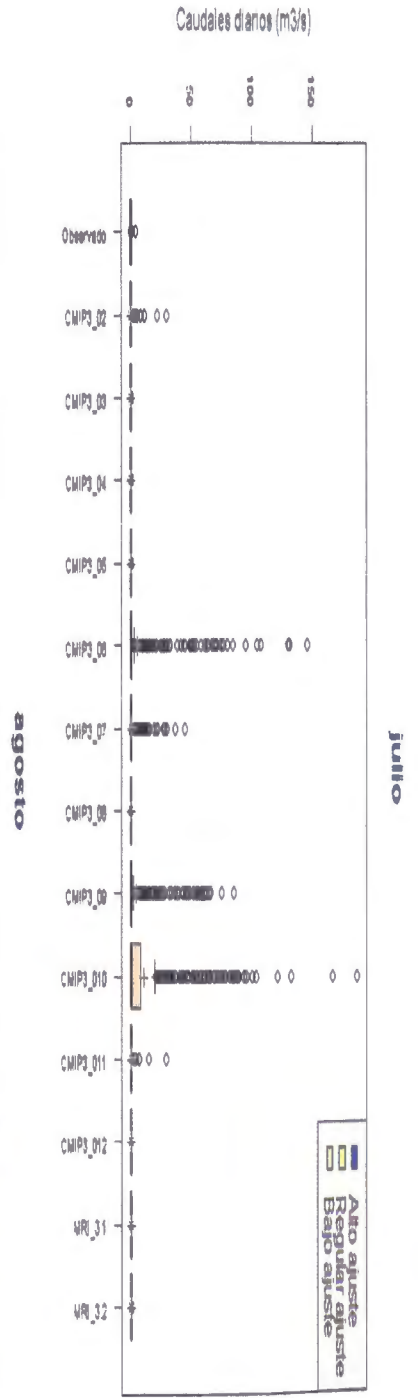
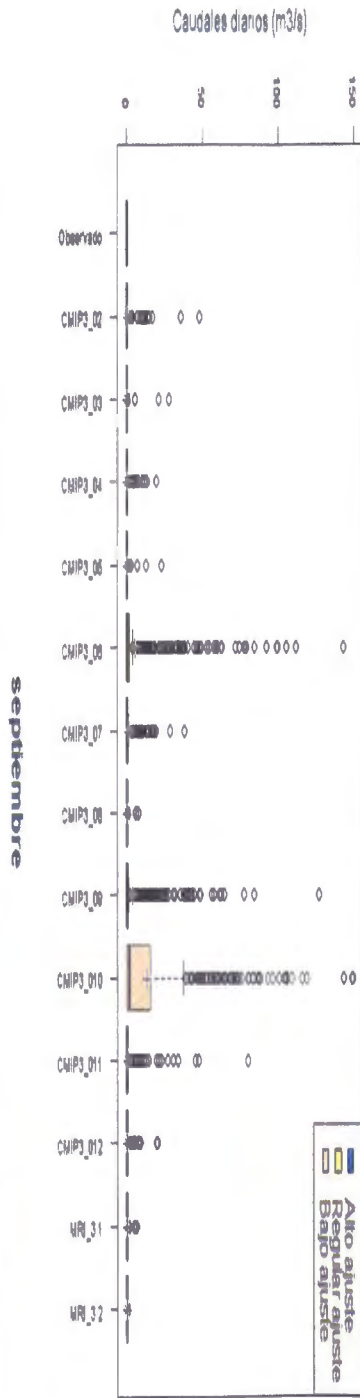
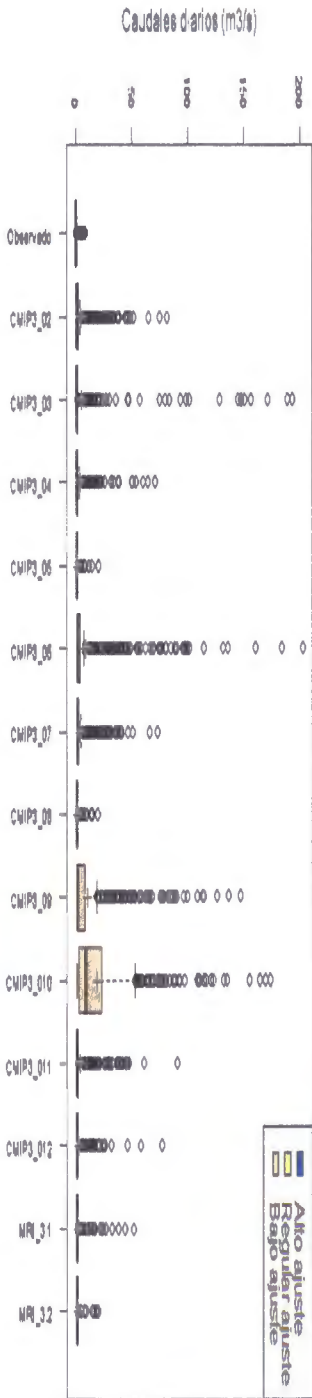
febrero

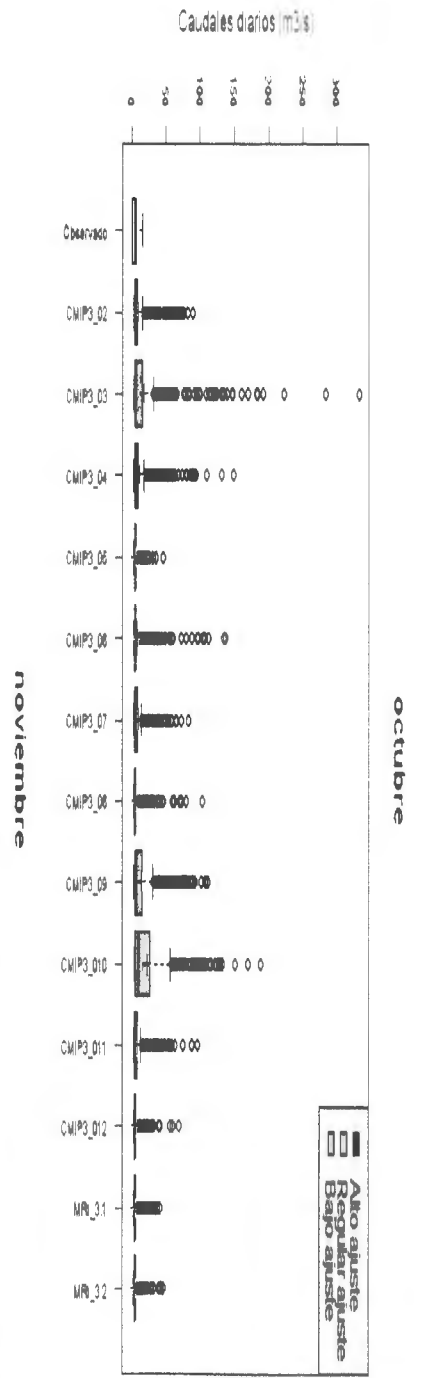
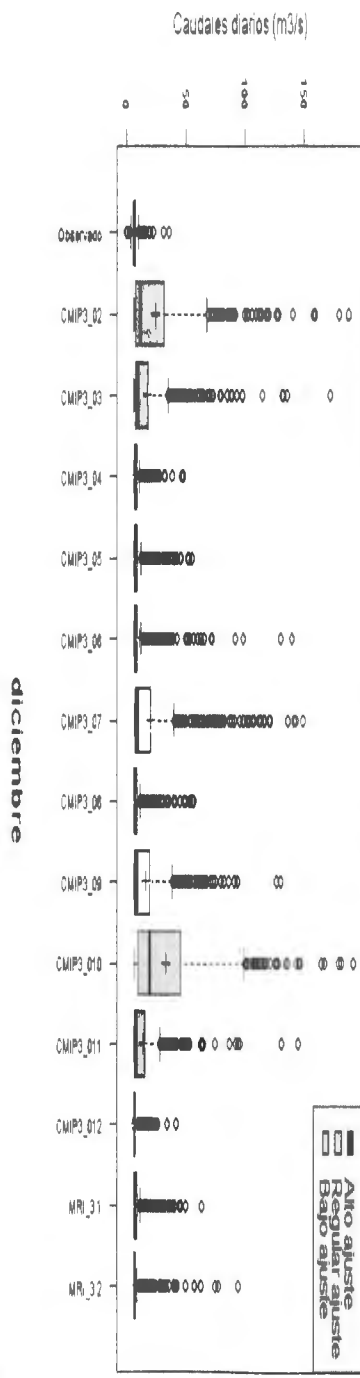
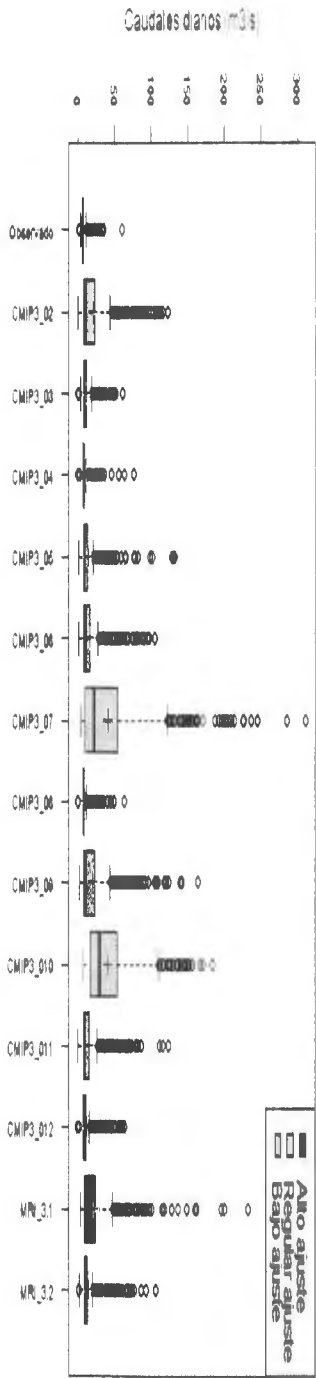


marzo









octubre