

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA**



**“EFECTO DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA HIDROLOGIA DE LA  
CUENCA CHANCAY – HUARAL”**

**Presentado por:**

**HENRY PALOMINO ZAMORA**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE**

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**Lima – Perú**

**2015**

## Tabla de Contenido

<b>I.</b>	<b>RESUMEN .....</b>	<b>9</b>
<b>II.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>III.</b>	<b>REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>13</b>
3.1.	Ciclo hidrológico y su concepción como sistema .....	13
3.2.	Modelos hidrológicos .....	14
3.2.1.	Tipos de modelos hidrológicos .....	15
3.3.	Modelo hidrológico TETIS .....	18
3.3.1.	Parámetros del modelo .....	20
3.3.2.	Calibración del modelo .....	20
3.3.3.	Calibración automática .....	21
3.3.4.	Índices de eficiencia de la modelación .....	22
3.4.	Cambio Climático .....	23
3.4.1.	Escenarios de emisiones para el cambio climático .....	25
3.4.2.	Modelos climáticos .....	27
3.4.3.	CMIP5 ( <i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 5</i> ) .....	28
3.4.4.	Proyección de precipitación y temperatura para el Perú .....	29
3.4.5.	Incertidumbre en la proyección del clima futuro .....	30
<b>IV.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
4.1.	Descripción del área de estudio .....	31
4.1.1.	Ubicación geográfica .....	31
4.1.2.	Climatología .....	32
4.1.3.	Características fisiográficas .....	34
4.2.	Materiales .....	35
4.2.1.	Información geográfica .....	35
4.2.2.	Información climática e hidrométrica observada .....	35
4.2.3.	Información climática proyectada .....	36
4.3.	Métodos .....	37
4.3.1.	Recopilación y procesamiento de información básica .....	38
4.3.2.	Preparación de <i>Inputs</i> y aplicación del modelo TETIS .....	41

4.3.3.	Simulación de escenarios futuros y efectos del cambio climático .....	46
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>47</b>
5.1.	Análisis de sensibilidad de los parámetros correctores para la calibración .....	47
5.2.	Calibración del modelo hidrológico – período 1990 a 1999 .....	48
5.3.	Validación del modelo hidrológico – periodo 1980 a 1989 .....	49
5.4.	Efecto del cambio climático en la precipitación .....	50
5.4.1.	Precipitación observada e histórica .....	50
5.4.2.	Precipitación observada y proyectada, futuro cercano: 2016-2059.....	53
5.5.	Efectos del cambio climático en la oferta hídrica futura de la cuenca .....	55
5.5.1.	Proyección de caudales hacia el año 2059 .....	55
5.4.2.	Persistencia de caudales hacia el año 2059 .....	62
5.5.	Balance Hídrico Futuro .....	64
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>67</b>
<b>VII.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>69</b>
<b>VIII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>70</b>
<b>IX.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>72</b>

## Índice de Cuadros

Cuadro 1: Factores Correctores y los respectivos parámetros ajustados.....	20
Cuadro 2: Rango probable del incremento de la temperatura y nivel del mar para los diferentes RCP.....	26
Cuadro 3: Modelos de sistemas de la tierra y RCPs utilizados en el estudio.....	29
Cuadro 4: Características fisiográficas de la cuenca Chancay – Huaral.....	34
Cuadro 5: Información geográfica utilizada en el modelo TETIS.....	35
Cuadro 6: Estaciones climáticas e hidrométricas utilizadas en el estudio.....	36
Cuadro 7: Escenarios climáticos considerados para las proyecciones de precipitación y temperatura futura: Enero del 2016 a Diciembre del 2059.....	36
Cuadro 8: Valores mensuales de Kc para las diferentes categorías de cobertura en la cuenca Chancay – Huaral.....	43
Cuadro 9: Almacenamiento superficial para las diferentes coberturas presentes en la cuenca.....	44
Cuadro 10: Niveles de rendimiento de un modelo hidrológico en función del índice Nash (E), Error en volumen (Ev) y RSR, para un intervalo temporal mensual.....	45
Cuadro 11: Factores correctores finales e índices de eficiencia obtenidos en la calibración – Estación Santo Domingo – Período Enero 1990 a Diciembre 1999.....	49
Cuadro 12: Coeficiente de correlación (r) para el promedio mensual de la precipitación – Período 1980-1999.....	52
Cuadro 13: Variación porcentual anual de la precipitación futura promedio para los seis escenarios de cambio climático respecto de la observada.....	54
Cuadro 14: Promedio de caudales observados y proyectados a nivel estacional.....	59
Cuadro 15: Variación porcentual de caudales observados y proyectados a nivel estacional.....	59
Cuadro 16: Grado de significancia de las variaciones porcentuales de los caudales proyectados.....	61
Cuadro 17: Grado de significancia de las variaciones porcentuales de caudales promedio anual proyectados hacia 2059.....	62
Cuadro 18: Volumen promedio mensual de la oferta y demanda hídrica (Hm3) – Período 2016-2059.....	65

## Índice de Figuras

Figura 1: Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global. Fuente: Chow (1994).....	14
Figura 2: Representación de un modelo agregado. Fuente: Ramírez (2012). ....	17
Figura 3: Representación gráfica de un modelo distribuido, para una simulación por evento (escala temporal 1 día) y continúa (escala temporal mensual). Fuente: Ramírez (2012)....	18
Figura 4: Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS. Fuente: Francés, et al. (2014). ....	19
Figura 5: Cambios observados en el mundo para la temperatura superficial, nivel del mar y extensión del hielo marino. Fuente: IPCC (2013). ....	24
Figura 6: Evolución de los modelos climáticos. Fuente: IPCC (2001). ....	27
Figura 7: Proyección climática en el Perú hacia el año 2060. Fuente: SENAMHI (2015). 30	
Figura 8: Ubicación geográfica de la cuenca Chancay – Huaral y delimitación del área de drenaje para la estación hidrométrica Santo Domingo. ....	32
Figura 9: Distribución de temperatura mínima, máxima, promedio y evapotranspiración de referencia. Período de análisis: 01 de enero 1980 al 31 de diciembre de 1999. ....	34
Figura 10: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 11: Porcentaje de uso de suelos – <i>Corine Land Cover</i> 2000. Fuente: Ramírez (2012). ....	38
Figura 12: Distribución espacial de la textura (a), del uso de suelo (b), de las zonas geológicas (c) en la cuenca Chancay - Huaral. ....	39
Figura 13: Hidrograma mensual de la estación pluviométrica Santa Cruz. ....	40
Figura 14: Diagrama doble masa para las estaciones Santa Cruz, Pañac y Carac. Período 1980 – 1999. ....	41
Figura 15: Mapas de la distribución de dirección de flujo, celdas acumuladas, pendiente y velocidad en ladera en la cuenca Chancay – Huaral. ....	42
Figura 16: Parámetros hidráulicos del suelo de la cuenca Chancay – Huaral. ....	45
Figura 17: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo. ....	47
Figura 18: Hidrograma mensual del caudal observado, simulado y precipitación media – calibración del modelo hidrológico en la estación santo domingo. Período de análisis: enero 1990 a diciembre 1999.....	49

Figura 19: Hidrograma mensual del caudal observado, simulado y precipitación media – validación del modelo hidrológico en la estación santo domingo. Período de análisis: enero 1980 a diciembre 1989.....	50
Figura 20: Análisis de la precipitación promedio mensual observada e histórica (RCP 4.5). Período 1980-1999. ....	51
Figura 21: Análisis de la precipitación promedio mensual observada e histórica (RCP 8.5). Período 1980-1999. ....	51
Figura 22: Diagrama de cajas de la precipitación observada e histórica – Estación Yantac – Período 1980-1999. ....	52
Figura 23: Variación mensual de la precipitación promedio observada y futura (RCP 4.5). Período: 2016-2059 .....	53
Figura 24: Variación mensual de la precipitación promedio observada y futura (RCP 8.5). Período 2016-2059. ....	54
Figura 25: (a) Serie de caudales mensuales observados entre 1980 – 1999 y proyección de caudales hacia el 2059. (b) Serie de caudales promedio anual observado entre 1980 – 1999 y proyección de caudales hacia el 2059.....	56
Figura 26: Probabilidad de excedencia de distintos caudales proyectados por los modelos climáticos globales .....	57
Figura 27: Diagrama de cajas de los caudales observados y proyectados para el periodo: 2016-2059.....	58
Figura 28: Promedio de caudales observados (1980-1999) y proyectados a nivel estacional para los seis escenarios climáticos futuros (3 MCG x 2 RCP), período 2016-2059. ....	59
Figura 29: Variación porcentual de los caudales proyectados (2016-2059) según los observados (1980-1999).....	60
Figura 30: Persistencia de caudales proyectados al 50%, 75%, 90% y 95% .....	63
Figura 31: Variación porcentual de caudales proyectados respecto al promedio anual observado.....	64
Figura 32: Balance hídrico futuro en la cuenca hasta el año 2059.....	65
Figura 33: Balance hídrico mensual en la cuenca – período 2016-2059.....	66

## Índice de Anexos

Anexo 1: Estaciones con registro de precipitación total mensual. Periodo 1980-1999 .....	73
Anexo 2: Calculo de la evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ). Periodo 1980-1999.....	80
Anexo 3: Hidrograma de las estaciones pluviométricas y diagramas doble masa .....	83
Anexo 4: Aplicación del modelo hidrológico TETIS.....	87
Anexo 5: Variación espacial de la precipitación total anual proyectada hacia el año 2059	97

## I. RESUMEN

El agua es un recurso altamente sensible al clima: el régimen de precipitaciones se está alterando, desencadenando sequías e inundaciones, y los glaciares, fuente importante de este recurso en el país, están siendo amenazados por el aumento de la temperatura global. En ese sentido, se evidencia la importancia de conocer los posibles efectos del cambio climático en la oferta hídrica, preferentemente a nivel de cuenca, teniendo en consideración la incertidumbre que existe en dicha evaluación. El ámbito de estudio de esta investigación es la cuenca Chancay – Huaral, ubicada en la costa central del Perú, y para representar el ciclo hidrológico y producción de la escorrentía se utilizó el modelo hidrológico distribuido TETIS, el cual fue calibrado y validado en un período de 20 años (1980-1999) obteniéndose valores de Nash-Sutcliffe de 0.69 y 0.66 respectivamente, lo que representa un rendimiento bueno del modelo hidrológico para una escala temporal mensual. Las proyecciones de precipitación y temperatura futura utilizadas en el estudio fueron generadas por el SENAMHI como parte del proyecto AMICAF (FAO, 2014), considerándose para tal propósito seis escenarios de cambio climático en base a tres Modelos de Circulación General (GCM-CMIP5) y dos Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs). Analizando solo las estaciones pluviométricas ubicadas dentro de la cuenca, se estima variaciones en la precipitación desde -27% (cabecera de cuenca) hasta 153% (parte media). Los resultados de las proyecciones de escorrentía indican una variación promedio entre -9% y 70% en la oferta anual de agua; considerando las proyecciones a nivel mensual, se estima el mayor incremento para setiembre (166%) y el menor para febrero (-11%). Para el balance hídrico se estableció una oferta al 90% de persistencia; la demanda quedó determinada por las necesidades de agua para uso agrícola y poblacional. Se ha podido identificar la presencia de años en la cual la demanda es insatisfecha, este déficit hídrico se presenta cada cinco años en promedio hasta el 2045.

Palabras clave:

Cambio climático, Chancay-Huaral, GCM, RCP, TETIS, AMICAF.



## ABSTRACT

Water is a highly climate-sensitive resource. Rainfall is being altered, triggering droughts and floods. Glaciers, a major source of water in Peru, are being threatened by rising global temperatures. In this regard, is evident the importance of evaluating the possible effects of climate change on water supply, especially at basin level, taking into consideration the uncertainty in this assessment. The scope of this research is the Chancay- Huaral basin, located in the central coast of Peru. In order to represent the hydrological cycle and runoff production, the hydrological distributed model TETIS was calibrated and validated in a period of 20 years (1980-1999). Nash-Sutcliffe values obtained were 0.69 and 0.66 respectively, which represents a good performance of the hydrological model in a monthly time scale. The projections of precipitation and future temperature used in the study were generated by the SENAMHI as part of AMICAF project (FAO, 2014). Six scenarios of climate change were considered based on three general circulation models (GCM-CMIP5) and two Representative Concentration Pathways (RCPs). Analyzing rainfall stations located within the basin, variations in precipitation were estimated from -27% (head of basin) to 153% (middle). The results of the runoff projections indicate an average change between -9% and 70% in the annual water supply. Considering monthly projections, the largest increase is estimated for September (166%) and the lowest in February (-11%). For water balance the stream flow offer was established in 90% persistence; demand was determined by the needs of water for agricultural use and population. It was possible to identify the presence of years in which demand is unmet, this water deficit occurs every five years on average until 2045.

Key words:

Climate change, Chancay-Huaral, GCM, RCP, TETIS, AMICAF.

## II. INTRODUCCIÓN

El clima y la hidrología están altamente relacionados entre sí. Ambos son afectados por el otro y en el caso del sistema hidrológico, el cambio climático genera variaciones en la temperatura de superficie, la precipitación y tasa de evapotranspiración. El vapor de agua es un componente clave en los gases de efecto invernadero (GEI) y el aumento de estos gases genera cambios en los patrones de temperatura y precipitación afectando el proceso hidrológico, la disponibilidad de los recursos hídricos y el uso del agua para distintos fines económicos (Eslamian, 2014).

El valle del río Chancay – Huaral genera una de las producciones agrícolas más importantes de la costa peruana; sin embargo, como todos los valles de la costa, la satisfacción de la demanda futura de agua presenta incertidumbres debido al crecimiento poblacional, expansión de las áreas de cultivo y otras actividades productivas presentes en la cuenca.

Se requieren modelos hidrológicos para entender las respuestas hidrológicas de una cuenca al cambio climático. En este estudio, se analizó los efectos del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca Chancay – Huaral para un futuro cercano (2016-2059), utilizando para ello el modelo hidrológico TETIS y considerando la nueva generación de Modelos de Circulación General (GCM) que se encuentra disponible en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5); estos Modelos de Sistemas de la Tierra (MST), en comparación con los anteriores Modelos de Circulación General, incorporan componentes adicionales que describen la interacción de la atmósfera con el uso del suelo y la vegetación, así como toman en cuenta explícitamente la química atmosférica, los aerosoles y el ciclo del carbono (SENAMHI, 2015).

## **2.1. OBJETIVO PRINCIPAL**

- Identificar y evaluar los efectos del cambio climático en la hidrología de la cuenca Chancay – Huaral.

## **2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Preparar los datos de entrada presente y futuro requeridos para el modelo hidrológico.
- Calibrar y validar el modelo hidrológico TETIS en la cuenca del río Chancay – Huaral.
- Proyectar el comportamiento hidrológico futuro de la cuenca del río Chancay – Huaral para el período comprendido entre el año 2016 al 2059.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1. Ciclo hidrológico y su concepción como sistema

El ciclo hidrológico se lleva a cabo en tres estratos del sistema terrestre: i) la atmósfera, formada por la capa gaseosa que envuelve al globo terráqueo, ii) la litosfera que corresponde a la porción sólida de la superficie del globo y iii) la hidrosfera, formada por los cuerpos de agua que cubren parte de la superficie terrestre. No existe un lugar definido donde inicie el ciclo hidrológico, pero se considera que en los mares y océanos, por ocupar el 70% de la superficie del planeta, es donde se inicia el ciclo, ya que la evaporación proveniente de ellos es mucho más alta que la proveniente de la tierra y de algunas partes de la atmósfera. (Mejía, 2012).

Los fenómenos hidrológicos son tan complejos que es probable no se lleguen a entender completamente. 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.

El ciclo hidrológico puede ser considerado como un sistema cuyos componentes son precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo. Estos componentes pueden agruparse en subsistemas del ciclo total y analizarse separadamente, posteriormente se combinan los resultados de acuerdo a las interacciones entre los subsistemas; y de esta forma analizar el sistema total.

En la Figura 1, se representa el ciclo hidrológico en tres subsistemas divididos por las líneas punteadas: a) el sistema de agua atmosférica contiene los procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración, b) el sistema de agua superficial contiene los procesos de flujo superficial, escorrentía superficial, nacimiento de agua subsuperficial y subterránea, y escorrentía hacia ríos y océanos, c) el sistema de agua subsuperficial contiene los procesos de infiltración, recarga de acuífero, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea. El flujo subsuperficial ocurre en la capa del suelo cercana a la superficie; el flujo de agua subterránea, en estratos profundos de suelo o roca. (Chow, 1994).

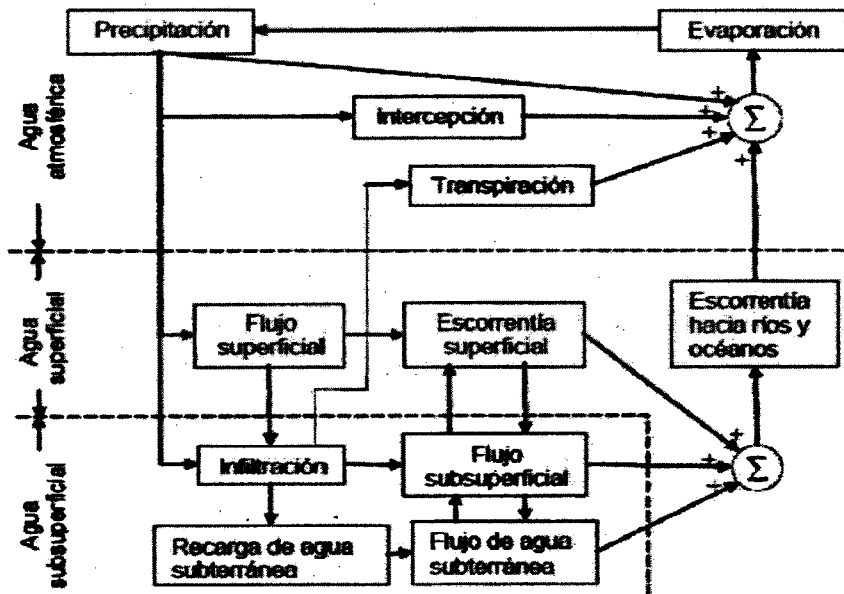


Figura 1: Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global. Fuente: Chow (1994).

### 3.2. Modelos hidrológicos

Para entender los impactos del cambio climático en la hidrología de una cuenca se necesitan modelos hidrológicos. Actualmente, existe una interesante variedad de modelos hidrológicos y la apropiada selección de un modelo se basa principalmente en la correcta comprensión de los objetivos y características del sistema a modelar.

Los siguientes factores deben ser considerados antes de la selección de un modelo hidrológico (Eslamian, 2014):

- Objetivos de modelado - previsión hidrológica, la evaluación del impacto del cambio climático, la influencia humana sobre el régimen hidrológico, etc.
- Sistema para modelar - pequeña cuenca, grande cuenca de río, tramo de río o embalse, etc.
- Elementos hidrológicos a modelar - inundaciones, las descargas diarias, descarga mensual o anual, la calidad del agua, etc.
- El clima y las características fisiográficas del sistema a modelar - cuenca en condiciones áridas, semiáridas o tropicales, etc.
- La disponibilidad de datos en términos de tipo (datos horarios, diarios, mensuales, estacionales o anuales), longitud (longitud en años para la calibración del modelo y validación), y la calidad (porcentaje de datos faltantes, homogeneidad, coherencia de los datos), etc.

- Simplicidad del modelo - número de parámetros del modelo a ser optimizado y facilidad de aplicación del modelo para fines prácticos.

### **3.2.1. Tipos de modelos hidrológicos**

Una de las primeras clasificaciones agrupa a los modelos hidrológicos en dos categorías: i) los modelos físicos representan el sistema sobre una escala reducida, similar a los modelos hidráulicos, ii) los modelos matemáticos representan el sistema en forma matemática, en este caso, se relacionan las variables de salida con las variables de entrada mediante una serie de funciones. La mayoría de los procesos hidrológicos son aleatorios y su magnitud varía con el tiempo y con el espacio, por lo que el desarrollo de un modelo matemático es una tarea muy difícil y requiere de una simplificación, despreciando algunas fuentes de variación. Los modelos matemáticos, a su vez, pueden ser determinísticos o estocásticos. (Mejía, 2012).

#### **3.2.1.1. Modelos determinísticos y estocásticos**

En un modelo determinístico no existe aleatoriedad; siempre una entrada dada producirá una misma salida. Un modelo estocástico al menos tiene salidas parcialmente aleatorias. Podría decirse que los modelos determinísticos hacen pronósticos, mientras que los modelos estocásticos hacen predicciones.

Teniendo en consideración que todos los fenómenos hidrológicos implican algún grado de aleatoriedad; la selección de un modelo determinístico es apropiado cuando la variabilidad de la salida es pequeña en comparación con la variabilidad de otros factores conocidos. Si la variación aleatoria es grande, un modelo estocástico es el más adecuado, porque la salida real podría ser bastante diferente del valor único producido por un modelo determinístico. Por ejemplo, pueden desarrollarse modelos determinísticos razonablemente buenos para la evaporación diaria en un lugar dado, usando información sobre energía disponible y transporte de vapor, pero tal información no puede usarse para desarrollar modelos confiables de precipitación diaria en un lugar, debido a que la precipitación es aleatoria en su mayor parte. Por consiguiente, la mayoría de los modelos de precipitación diaria son estocásticos. (Chow, 1994).

Los modelos determinísticos pueden o no estar completamente basados en principios físicos. En el primer caso serán los modelos de base física. De lo contrario serán conocidos como modelos conceptuales (Puricelli, 2003).

### **3.2.1.2. Modelos de base física y modelos conceptuales**

Los modelos de base física se caracterizan porque su formulación se realiza según los principios y leyes físicas que rigen el transporte del agua en la atmósfera, en la superficie del terreno y a través de un medio poroso. En cambio, un modelo conceptual trata de imitar el proceso hidrológico elaborando sus propias funciones de transferencia, por lo tanto, no se encuentra atado a la estructura formal del conocimiento.

El límite que separa a los modelos físicos de los conceptuales es al menos discutible en hidrología superficial, ya que por lo general los modelos existentes en el mercado son una mezcla de ambos tipos.

Por otra parte, aunque se dispone de los elementos necesarios para la implementación de modelos matemáticos físicamente basados, estos requieren muchísima información, la mayor parte de ella no se encuentra disponible o es muy costosa, también exige rutinas complejas con gran cantidad de parámetros debido a que la realidad es heterogénea y las ecuaciones matemáticas no incluyen estas heterogeneidades. Finalmente, este tipo de modelos son costosos en cuanto a tiempo, almacenamiento y manejo de la información dentro del ordenador.

El desarrollo de los modelos físicamente basados no es dinámico, este problema surge porque a menudo son desarrollados aisladamente o probados sólo para garantizar su precisión y en ocasiones se pierde el objetivo inicial, siendo utilizados en situaciones diferentes para las cuales fueron creados. (Puricelli, 2003).

### **3.2.1.3. Modelos agregados y distribuidos**

La modelación puede desarrollarse sobre una pequeña porción del terreno, tal como una parcela experimental, o sobre un territorio que abarque muchos kilómetros cuadrados de superficie. En consecuencia, el grado de desagregación espacial toma importancia, al considerar la forma en que la variabilidad espacial del proceso hidrológico va a influenciar en la modelación.

**A. Modelos Agregados.-** Estos modelos son de naturaleza cuasi-física. Son modelos simplificados que trabajan con valores integrados espacialmente. Suelen ser de utilidad cuando es necesario obtener, simular o predecir el hidrograma de salida o el caudal pico de una cuenca, con fines de diseño y en pequeñas obras hidráulicas. Como ejemplo se pueden citar el módulo hidrológico MIKE11 (del *Danish Hydraulic Institute*), HEC1/HEC-HMS (del cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos). (Ramírez, 2012).

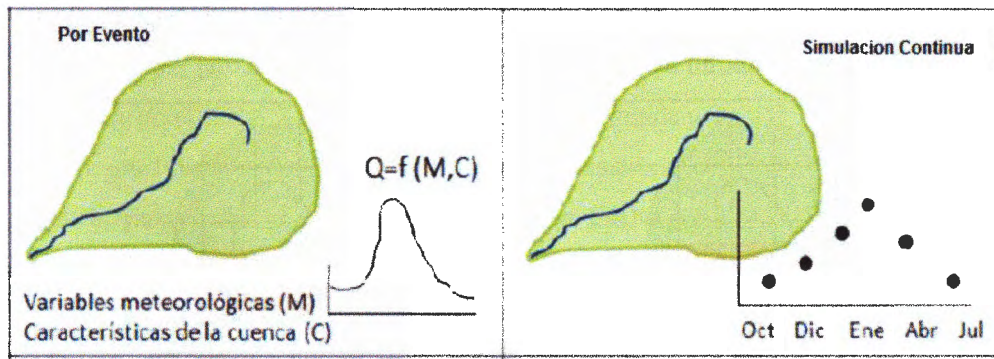


Figura 2: Representación de un modelo agregado. Fuente: Ramírez (2012).

B. **Modelos Distribuidos.**- Este tipo de modelos considera las ecuaciones de conservación de masa, energía y movimiento, para describir el movimiento del agua en superficies y en el subsuelo (zona saturada y no saturada), usando técnicas de discretización numérica tal como el método de las diferencias finitas o de elementos finitos. El cálculo se realiza para cada celda de la grilla que representa la cuenca.

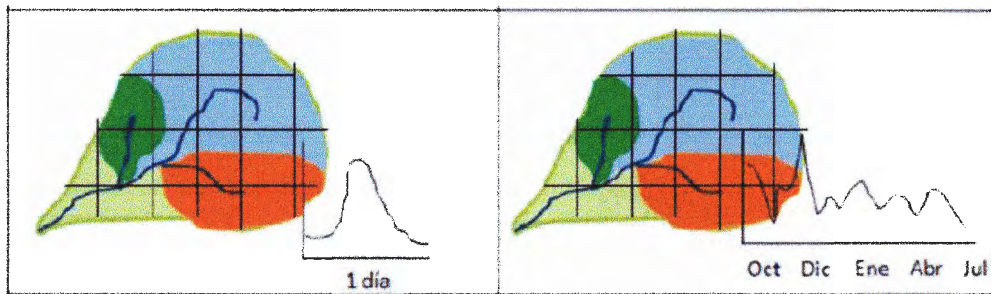
Los modelos distribuidos se pueden discretizar basándose en la definición de una grilla regular donde se realiza el cálculo distribuido o teniendo como base las líneas de escurrimiento y las curvas de nivel. Dentro del primer grupo se puede citar los siguientes modelos distribuidos: ANSWER, SHE, THALES, FLORA y DBSIM y dentro del segundo grupo, el caso más notorio es un modelo hidrológico distribuido utilizado para predicción de zonas saturadas y generación de escurrimiento, TOPOG, similar al modelo TOPMODEL. (Ramírez, 2012).

La modelación distribuida presenta varias ventajas respecto de la agregada, la principal consiste fundamentalmente en la mejor representación de la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados dentro de los procesos hidrológicos, adicionalmente, la modelación distribuida ha surgido en los últimos años para lograr un mejor entendimiento de los procesos a nivel de cuenca y de parcela, aunque en ocasiones requiere de información detallada de la zona de estudio. Este tipo de información detallada día a día se encuentra más a disposición gracias al desarrollo que en los últimos años ha tenido los ordenadores, la cartografía digital, los sistemas de información geográfica y las mediciones con sensores remotos. (Puricelli, 2003).

Según, Ramírez (2012), algunas limitaciones características de los modelos distribuidos son: i) la representación de la heterogeneidad topográfica y climática; ii) la variación entre la escala espacio-tiempo de las observaciones y la utilizada en el modelo; iii) la definición



de la escala de análisis y validez de resultados con distintas precisión; iv) el elevado número de parámetros, no siempre de preciso significado físico.



**Figura 3: Representación gráfica de un modelo distribuido, para una simulación por evento (escala temporal 1 día) y continua (escala temporal mensual). Fuente: Ramírez (2012).**

### 3.3. Modelo hidrológico TETIS

El modelo de simulación hidrológica TETIS, es de tipo distribuido y fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, su principal objetivo es obtener de la mejor forma posible la respuesta hidrológica ocasionada por la precipitación de lluvia o de nieve, teniendo en cuenta los diferentes procesos físicos involucrados.

Es un modelo complejo que representa la cuenca como una malla de celdas interconectadas por la configuración topográfica, derivada de un modelo de elevación digital (DEM), de manera que cada celda tiene asociado un valor para cada parámetro necesario para una correcta caracterización.

El modelo incorpora adecuadamente la variabilidad espacial de los ciclos hidrológicos y su base conceptual, por eso necesita de partida datos observados para permitir su calibración, cumple con el principio de parsimonia, esto es, ante funcionamientos similares, se selecciona el modelo con menos número de parámetros y con ecuaciones lo más simples posibles, representando todos los procesos significativos. (Ramírez, 2012).

En TETIS, la producción de la escorrentía se modela utilizando siete tanques conectados en cada celda de modelación, describiendo las interacciones atmósfera-vegetación-suelo-acuífero, ver Figura 4.

El proceso de producción de la escorrentía comienza con la precipitación (lluvia o nieve,  $X_6$ ), una parte de esta precipitación no llega al suelo y se evapora directamente en las hojas de las plantas (intercepción o evaporación directa,  $Y_6$ ); la porción de agua que llega al suelo se conoce como precipitación efectiva ( $X_1$ ) y una parte de esta precipitación transita por la cuenca y sale de ella producto de la evapotranspiración potencial ( $Y_1$ ), el resto de la

precipitación se denomina excedencia ( $X_2$ ) y es la cantidad de agua susceptible a moverse superficialmente por la ladera (escorrentía directa,  $Y_2$ ) o infiltrarse (agua gravitacional almacenada en el suelo,  $X_3$ ); una fracción del agua infiltrada genera el interflujo ( $Y_3$ ) y la fracción que queda sigue infiltrándose por percolación ( $X_4$ ), una porción del agua percolada genera el flujo base ( $Y_4$ ) y la porción final se sigue percolando generando pérdidas subterráneas ( $X_5$ ) (Francés et al, 2014).

Posteriormente, la escorrentía directa, el interflujo y el flujo base alcanzan la red principal de drenaje siguiendo las direcciones de flujo propuestas por el modelo de elevación digital (DEM); por último, el movimiento del flujo en la red de cauces está gobernada por la onda cinemática y teniendo en cuenta las características geomorfológicas de la red de cauces, en lo que se denomina Onda Cinemática Geomorfológica (Ramos, 2013).

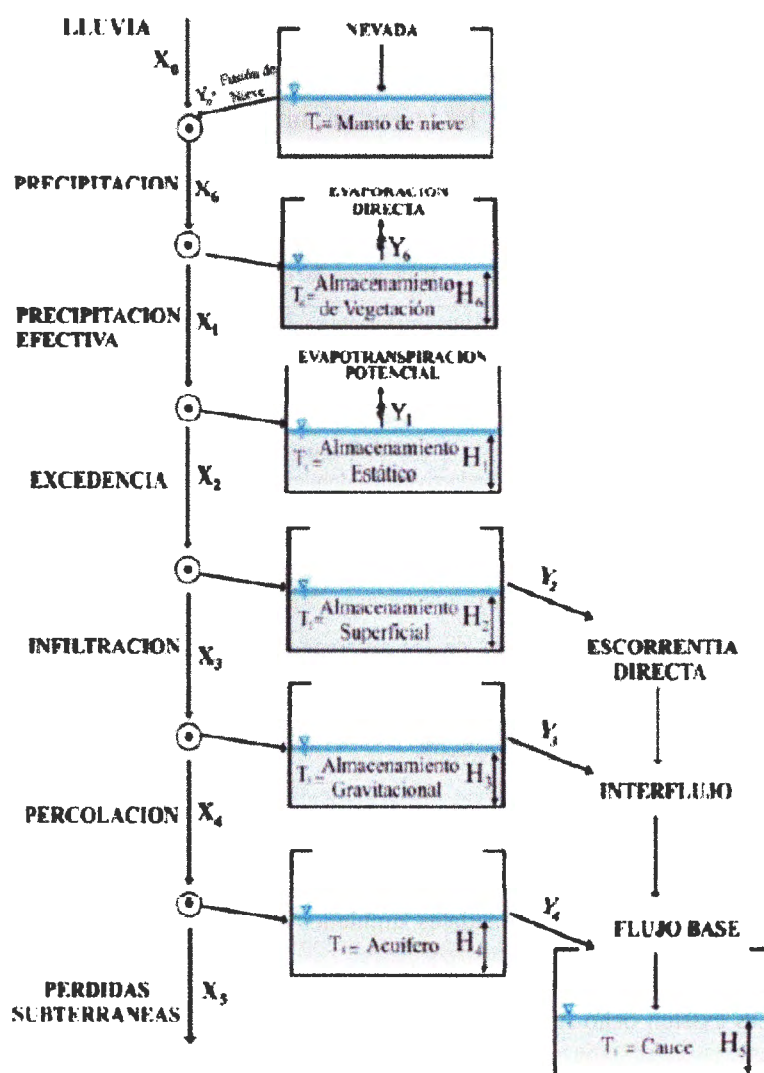


Figura 4: Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS. Fuente: Francés, et al. (2014).

### 3.3.1. Parámetros del modelo

Los parámetros efectivos de un modelo hidrológico permiten corregir las distintas fuentes de error que afectan el proceso de modelación. Las fuentes más comunes de error se presentan en las variables de entrada o inputs, las variables de salida (generalmente caudales), en la misma conceptualización del modelo y la estimación de sus parámetros. La escala espacial y temporal también afecta la modelación debido a que se agregan procesos no lineales en aquellos donde existe variabilidad espacio – temporal. En el caso del modelo hidrológico TETIS, los parámetros efectivos son ajustados a través de nueve factores correctores, los cuales pueden ser calibrados manualmente o de manera automática con el algoritmo de optimización SCE – UA “Shuffled Complex Evolution”. Por lo tanto, la mayor virtud del modelo TETIS radica en la explícita representación de la variabilidad espacial de las características físicas de la cuenca y en el uso de una estructura separada de factores correctores para la calibración de parámetros efectivos. (Ramos, 2013)

En el Cuadro 1, se presentan los nueve factores correctores que se utilizan para la calibración del modelo hidrológico TETIS.

**Cuadro 1: Factores Correctores y los respectivos parámetros ajustados.**

Factor Corrector	Parámetros del modelo	Símbolo
FC1	Almacenamiento capilar del suelo	Hu
FC2	Factor de vegetación	$\lambda$
FC3	Capacidad de infiltración	Ks
FC4	Velocidad en ladera	$\mu$
FC5	Capacidad de percolación	Kp
FC6	Conductividad hidráulica del interflujo	Kss
FC7	Capacidad de pérdidas del acuífero	Kps
FC8	Conductividad hidráulica del acuífero	Ksa
FC9	Velocidad en los cauces	v

Fuente: Ramos (2013).

Es así que, los mapas elaborados de los diversos parámetros hidrológicos de la cuenca, se terminaron de calibrar con el modelo hidrológico mediante el ajuste de los factores correctores mencionados anteriormente.

### 3.3.2. Calibración del modelo

El modelo hidrológico TETIS puede ser calibrado manual o automáticamente, en ambos casos se busca que la serie de caudales simulados se ajuste óptimamente a la serie de datos observados. Para medir el nivel de ajuste se usa una función objetivo.

En TETIS existen ocho funciones objetivo que pueden usarse para evaluar el rendimiento del modelo; error en volumen, error cuadrático medio – RMSE, índice de Nash–Sutcliffe NSE, el estimador de máxima verosimilitud heteroscedástico – HMLE, el error gaussiano

autocorrelacionado – AMLE, el error de los logaritmos, log Bias NSE, índice de Kling y Gupta (Francés, et. al. 2014).

Los elementos que pueden ser calibrados manual o automáticamente en TETIS son:

- Los factores correctores de los procesos de producción y propagación de la escorrentía.
- Los valores iniciales de las variables de estado de almacenamiento.
- Los coeficientes de la correlación con la altura para la interpolación espacial.
- Los parámetros agregados del sub modelo nieve.

### **3.3.3. Calibración automática**

El algoritmo automático de optimización “*Shuffled Complex Evolution – University of Arizona*”, SCE-UA, es reconocido por ser uno de los más robustos y eficientes para la calibración de modelos lluvia-escorrentía.

El objetivo de este método de optimización es buscar el conjunto óptimo de factores correctores que minimicen una función objetivo, para luego comparar alguna variable observada contra la simulada por el modelo, usualmente el caudal de salida. La función objetivo se selecciona con algún criterio estadístico en función de las características que se quieran preservar en la serie simulada (Ramírez, 2012).

Al momento de la calibración automática se puede obtener múltiples conjuntos de factores correctores que simulen salidas aceptables para una misma función objetivo, esta posibilidad es conocida como equifinalidad y para poder reducir el riesgo de caer en este problema es necesario realizar previamente una calibración manual. Esta calibración manual previa producirá un menor número de iteraciones que convergen a la solución y eso repercutirá directamente en el tiempo de cómputo de la optimización.

El éxito de una adecuada calibración manual está supeditado a la experiencia del modelador y a su conocimiento e interacción con el modelo. En ese sentido, Ramos (2013), recomienda ajustar manualmente primero el flujo base y luego el porcentaje de error en el volumen, esto debido a que son más sensibles a las condiciones iniciales de humedad en el tanque estático y nivel de acuífero; y dejar el ajuste de los caudales máximos para la calibración automática.

En la calibración automática, se tomó como función objetivo de la optimización el índice Nash–Sutcliffe (E), por ser más sensible a los caudales máximos.

En la validación temporal, se usaron los factores correctores obtenidos en la calibración; se simuló la respuesta del sistema utilizando una parte de los datos de la serie temporal que no hayan sido utilizados en la calibración.

### 3.3.4. Índices de eficiencia de la modelación

El índice de Nash–Sutcliffe (E), es conocido en hidrología como un estadístico normalizado del error que determina la magnitud relativa del modelo simulado en relación a un modelo de referencia. Es la relación entre el error cuadrático medio de los valores simulados y la varianza en los datos observados, restado de la unidad. Sus valores adimensionales varían de menos infinito a uno. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$E = 1 - \frac{MSE^{sim}}{MSE^{obs}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y^{promedio})^2}$$

donde:  $MSE^{obs}$ ,  $MSE^{sim}$ , son los errores cuadráticos medios de los datos observados y simulados;  $Y^{obs}$ ,  $Y^{sim}$ , son los datos observados y simulados en el tiempo  $t$ ;  $Y^{promedio}$  es el valor promedio de los datos observados;  $n$  es el número de intervalos temporales.

El índice RSR, es otro estadístico normalizado del error que relaciona la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar de las observaciones; cuyos valores adimensionales varían de cero al infinito (Ramos, 2013). El RSR se calcula con la siguiente ecuación:

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

Donde:  $RMSE^{sim}$  es el error cuadrático medio de los datos observados y simulados;  $STDEV^{obs}$  es la desviación estándar de los datos observados;  $Y^{obs}$ ,  $Y^{sim}$ , son los datos observados y simulados en el tiempo  $t$ ;  $Y^{promedio}$  es el valor promedio de los datos observados;  $n$  es el número de intervalos temporales.

Existe una relación biunívoca entre el índice E y RSR, tal que  $RSR = \sqrt{1-E}$ . Sin embargo, Ramos (2013), emplea estos índices porque cada vez son más difundidos en la hidrología como criterios para la clasificación del rendimiento en la modelación hidrológica. Por lo tanto, se optó también por emplear ambos índices.

El error en volumen (Ev) como índice de eficiencia de la lluvia, no es una medida de la diferencia de descarga como salida hipotética de un modelo de precipitación-escorrentía,

sino más bien una conversión de la lluvia de mm/d a m<sup>3</sup>/d, según la dimensión de la cuenca. En cambio, en la modelación hidrológica, el error en volumen es un indicador de la diferencia en el balance hídrico (Ramos, 2013).

Este índice de eficiencia es adecuado para el análisis de la modelación hidrológica a una escala temporal mensual o anual. Su valor se representa en porcentaje y se calcula con la siguiente ecuación:

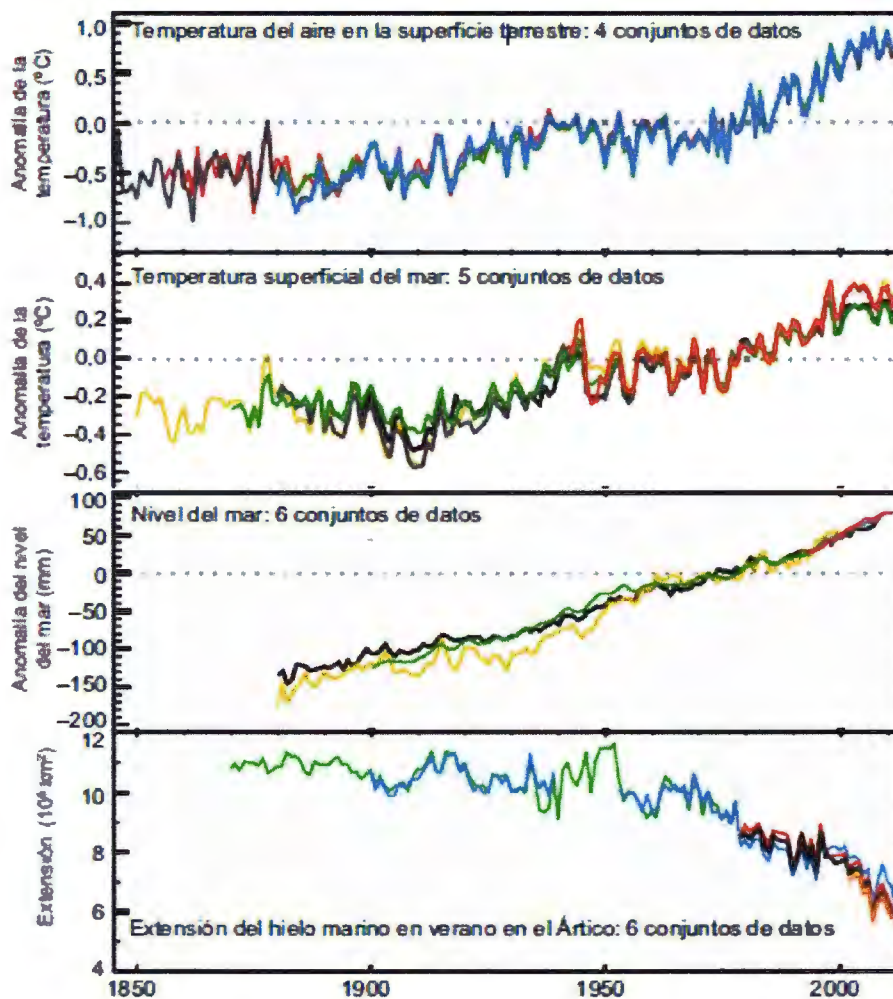
$$E_v = \frac{V^{obs} - V^{sim}}{V^{sim}} * 100$$

Donde:  $V^{obs}$ ,  $V^{sim}$  son los volúmenes de los datos observados y simulados.

### 3.4. Cambio Climático

Se define como la variación del estado del clima, la cual se puede identificar mediante la aplicación de pruebas estadísticas a las alteraciones del valor medio y/o la variabilidad de sus propiedades. Estas variaciones persisten durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. Otra definición está dada por La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la cual en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. Es así que la CMNUCC hace una distinción entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales (IPCC, 2013).

El calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado (ver Figura 5). (IPCC, 2013).



**Figura 5: Cambios observados en el mundo para la temperatura superficial, nivel del mar y extensión del hielo marino. Fuente: IPCC (2013).**

Las observaciones del sistema climático se basan en mediciones directas y en la teledetección desde satélites y otras plataformas. Las observaciones de la temperatura y otras variables a escala mundial comenzaron a efectuarse en la era instrumental, a mediados del siglo XIX, y desde 1950 existen conjuntos de observaciones más completos y diversos. En base a esta información, el IPCC (2013) menciona que la temperatura de la superficie terrestre y oceánica, combinada y promediada globalmente, muestra un calentamiento de 0,85 °C durante el período 1880-2012.

Los riesgos para las fuentes de agua dulce relacionados al cambio climático se incrementarán significativamente con el aumento de los gases de efecto invernadero. Cada grado de calentamiento reducirá las fuentes de agua para la población global por lo menos en un 20% y posiblemente hasta 7% más. (Libélula, 2014).

Considerando las características de vulnerabilidad del Perú, es necesario que se tomen medidas para gestionar el agua con un enfoque de adaptación al cambio climático. Más aún, el Perú tiene una brecha en el abastecimiento de agua para diversos usos y en servicios de saneamiento. (Libélula, 2014).

### **3.4.1. Escenarios de emisiones para el cambio climático**

Un escenario de emisión es la representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiativamente activas (por ejemplo, gases de efecto invernadero, aerosoles), basada en un conjunto coherente de supuestos sobre las fuerzas que las determinan (por ejemplo, el desarrollo demográfico y socioeconómico y la evolución tecnológica) y las principales relaciones entre ellos. Los escenarios de concentraciones, obtenidos a partir de los escenarios de emisión, se introducen en un modelo climático para obtener proyecciones climáticas. Los nuevos escenarios de emisiones para el cambio climático son cuatro y se denominan trayectorias de concentración representativas (RCP). (IPCC, 2013).

#### **3.4.1.1. Trayectorias de concentración representativas (RCP)**

Son trayectorias, porque permiten obtener proyecciones de las concentraciones de los GEI siguiendo su trayectoria a través del tiempo. Son representativas, porque concentran escenarios diferentes pero con forzamientos radiativos similares.

El forzamiento radiativo es la cantidad media de energía solar absorbida por metro cuadrado sobre la tierra y se mide en  $W/m^2$ .

El Proyecto CMIP5 incluye los nuevos escenarios RCP y tienen una compatibilidad con la familia de escenarios B1 y A2 del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (AR4).

- **RCP 2.6.-** Es la trayectoria más ambiciosa en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente  $3 W/m^2$  antes de 2100 y posteriormente disminuye (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las emisiones después de 2100). (IPCC, 2013).

RCP 2.6 necesita la participación temprana de todos los principales emisores, incluidos los de los países en desarrollo. (Jubb, 2014).

- **RCP 4.5.-** Trayectoria de estabilización intermedia en la cual el forzamiento radiativo se estabiliza aproximadamente a  $4,5 W/m^2$  después de 2100 (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las concentraciones después de 2150). (IPCC, 2013).



Según, Jubb (2014), similar al escenario B1; el cual describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima. (IPCC, 2000).

- **RCP 6.0.-** Trayectoria de estabilización intermedia en la cual el forzamiento radiativo se estabiliza aproximadamente a 6,0 W/m<sup>2</sup> después de 2100 (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las concentraciones después de 2150).

- **RCP 8.5.-** Trayectoria alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores superiores a 8,5 W/m<sup>2</sup> en 2100 y sigue aumentando durante un lapso de tiempo (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las emisiones después de 2100 y sean constantes las concentraciones después de 2250). (IPCC, 2013).

Esta trayectoria surge del poco esfuerzo para reducir las emisiones y representa un fracaso para frenar el calentamiento para el año 2100. Es similar al escenario de mayor emisión (A1FI) en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (AR4). (Jubb, 2014). El escenario A1FI presenta una orientación tecnológica a la utilización intensiva de combustibles de origen fósil. (IPCC, 2000).

**Cuadro 2: Rango probable del incremento de la temperatura y nivel del mar para los diferentes RCP.**

	Escenario	2046–2065		2081–2100	
		Media	Rango probable	Media	Rango probable
Cambio en la temperatura media global del aire en superficie (en °C)	RCP2,6	1,0	0,4 a 1,6	1,0	0,3 a 1,7
	RCP4,5	1,4	0,9 a 2,0	1,8	1,1 a 2,6
	RCP6,0	1,3	0,8 a 1,8	2,2	1,4 a 3,1
	RCP8,5	2,0	1,4 a 2,6	3,7	2,6 a 4,8
Elevación media mundial del nivel del mar (en metros)	RCP2,6	0,24	0,17 a 0,32	0,40	0,26 a 0,55
	RCP4,5	0,26	0,19 a 0,33	0,47	0,32 a 0,63
	RCP6,0	0,25	0,18 a 0,32	0,48	0,33 a 0,63
	RCP8,5	0,30	0,22 a 0,38	0,63	0,45 a 0,82

Fuente: IPCC (2013).

### 3.4.2. Modelos climáticos

Las proyecciones de los cambios en el sistema climático se elaboran empleando una jerarquía de modelos climáticos, que van de modelos climáticos sencillos a otros integrales, pasando por modelos de complejidad intermedia, así como modelos del Sistema Tierra. (IPCC, 2013).

La capacidad del modelo para simular las respuestas del sistema climático depende en gran medida del grado de comprensión de los procesos físicos, geofísicos, químicos y biológicos que rigen el sistema climático. La elaboración de modelos climáticos se caracterizó en un principio por el desarrollo separado de los distintos componentes, que luego se fueron acoplando en modelos climáticos integrales. (IPCC, 2001).

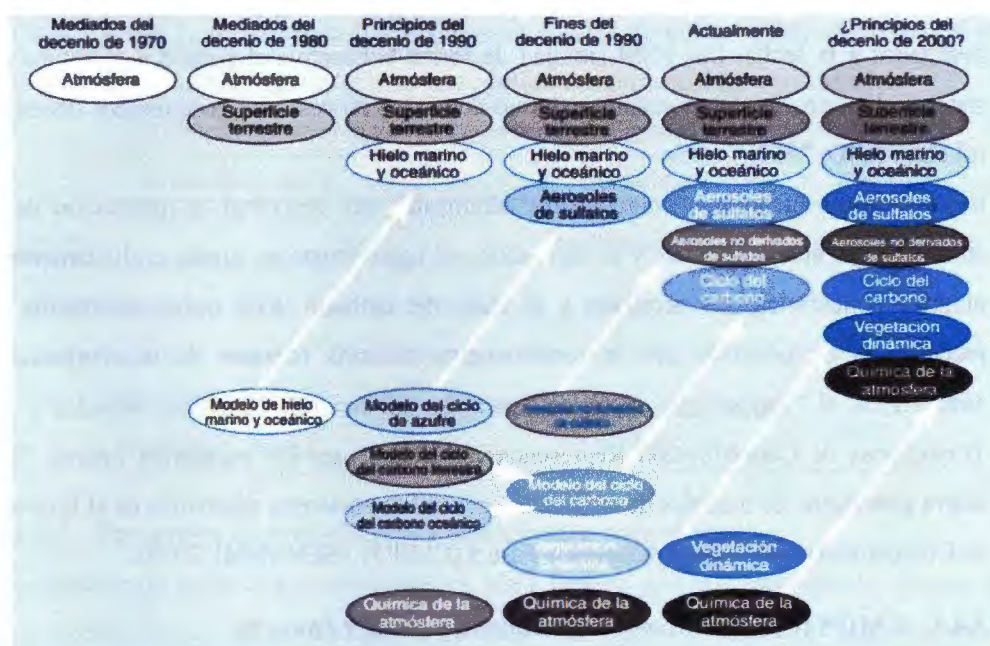


Figura 6: Evolución de los modelos climáticos. Fuente: IPCC (2001).

#### 3.4.2.1. Modelos de circulación general (GCM)

Los Modelos de Circulación General (GCM) son una representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroalimentación, y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas. (IPCC, 2013).

Son la principal herramienta para la prospección del clima de las próximas décadas, simulan flujos de energía, masa y cantidad de movimiento entre los puntos de una retícula tridimensional que se extiende por la atmósfera, océanos y las capas superiores de la litosfera y criósfera. Sin embargo, la resolución espacial de estos modelos es todavía

limitada (aprox. 200 km), por lo que los escenarios globales no permiten analizar la magnitud de los posibles impactos locales, por tanto la tarea de regionalizar los escenarios globales de cambio climático es importante para poder llevar a cabo de la mejor forma estudios de impacto y adaptación, teniendo en cuenta la variabilidad regional o local de la zona de estudio. (SENAMHI, 2015).

Los modelos climáticos mundiales en los que se han acoplado los componentes atmosféricos y oceánicos se conocen también con el nombre de Modelos de la Circulación General Atmósfera–Océano (MCGAO). (IPCC, 2001).

#### **3.4.2.2. Modelos del sistema tierra**

Los Modelos del Sistema Tierra (ESM, por sus siglas en inglés) son los modelos más avanzados a la fecha. Los ESM simulan de forma exhaustiva el pasado y el futuro del sistema climático frente a forzantes externas donde los procesos biogeoquímicos tienen un rol clave (BID, 2012).

Estos modelos incorporan componentes adicionales que describen la interacción de la atmósfera con el uso del suelo y la vegetación, así como toman en cuenta explícitamente la química atmosférica, los aerosoles y el ciclo del carbono. Esta nueva generación de modelos es direccionada por la recientemente definida forzante de la composición atmosférica, el “forzamiento histórico” para las condiciones climáticas actuales y las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) para los escenarios futuros. Esta nueva generación de modelos de circulación general se encuentra disponible en el Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5). (SENAMHI, 2015).

#### **3.4.3. CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*)**

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) fue creado como un protocolo experimental estándar para el estudio de la producción de modelos de circulación general atmósfera – océano (MCGAO); establecido por el Grupo de Trabajo sobre Modelado Acoplado (WGCM) en el marco del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP). (CMIP, 2015).

El CMIP tiene como finalidad evaluar la capacidad de los modelos para simular el clima pasado, presente y futuro, comparando las proyecciones del cambio climático futuro. (IPCC, 2013).

En setiembre del 2008, el Grupo de Trabajo de WCRP sobre Modelamiento Acoplado (WGCM), con el apoyo del Proyecto IGBP AIMES y la participación de 20 grupos de modelamiento climático de todo el mundo, promovieron un nuevo conjunto de

experimentos coordinados para modelos climáticos, constituyendo así la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5).

CMIP5 proporciona un contexto multi-modelo para i) la evaluación de los mecanismos responsables de las diferencias del modelo en evaluaciones poco conocidos relacionados con el ciclo del carbono y las nubes, ii) examinar la "previsibilidad" del clima y explorar la capacidad de los modelos para predecir el clima en escala de tiempo decenal, y, en general, iii) determinar por qué similares modelos de forzamiento producen un rango de respuestas. (CMIP, 2015). La comunidad climatológica utiliza el enfoque multi-modelo como una técnica normalizada para evaluar las proyecciones de variables climáticas específicas. (IPCC, 2013).

En el Cuadro 3, se presentan los modelos de sistema de tierra (ESM) utilizados en este estudio, indicando las trayectorias de concentración representativas consideradas.

**Cuadro 3: Modelos de sistemas de la tierra y RCPs utilizados en el estudio.**

Escenarios climáticos	Código	Institucion	Pais
MPI-ESM-MR – RCP4.5	MPI 4.5	Max Planck Institute	Alemania
MPI-ESM-MR – RCP8.5	MPI 8.5		
CanESM2 – RCP4.5	CANES 4.5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada
CanESM2 – RCP8.5	CANES 8.5		
CNRM-CM5 – RCP4.5	CNRM 4.5	Centre National de Recherches Meteorologiques	Francia
CNRM-CM5 – RCP8.5	CNRM 8.5		

#### **3.4.4. Proyección de precipitación y temperatura para el Perú**

La resolución espacial que presentan los MST (aprox. 200 km), no permite obtener una predicción con un detalle geográfico adecuado para tener en cuenta la incidencia de los cambios climáticos en los distintos climas locales y así poder realizar estudios de impacto. En ese sentido, la técnica de aumento de resolución, conocida como *downscaling* (estadístico y dinámico), permite generar escenarios regionales de cambio climático. (Gutiérrez, 2006; SENAMHI, 2015).

En el Perú, como parte del proyecto AMICAF, el SENAMHI en cooperación con el Grupo de Meteorología de la Universidad de Cantabria, realizó la regionalización estadística (*downscaling*) de seis escenarios climáticos que forman parte del CMIP5 (ver Cuadro 3); obteniendo como resultado la proyección climática hacia el año 2060 de 265 estaciones de precipitación, 105 estaciones de temperatura máxima y 102 de temperatura mínima; distribuidas a nivel nacional. (SENAMHI, 2015).

La regionalización estadística se basa en el uso de las relaciones empíricas entre las observaciones locales de una variable objetivo (predictandos), por ejemplo la precipitación, y las variables a gran escala que determinan el estado de la atmósfera (predictores), por ejemplo, la altura geopotencial o la velocidad del viento.

Existe cada vez menor incertidumbre respecto a las magnitudes de estos cambios a escalas regionales. En los últimos años, los investigadores especializados en la simulación del clima futuro han logrado afinar metodologías que permiten realizar proyecciones climáticas futuras a escala local. (SENAMHI, 2015).

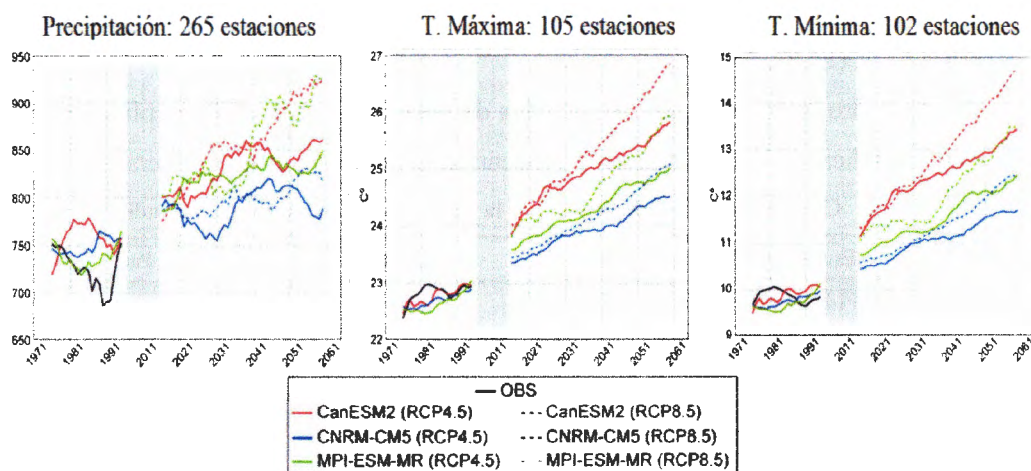


Figura 7: Proyección climática en el Perú hacia el año 2060. Fuente: SENAMHI (2015).

### 3.4.5. Incertidumbre en la proyección del clima futuro

La incertidumbre es el grado de inseguridad, duda o perplejidad que tenemos sobre algún tema. La incertidumbre que se tiene al predecir el clima futuro se da por dos razones. La primera está asociada al desconocimiento de las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero, los cuales favorecieron en los últimos 50 años al calentamiento global. En segundo lugar no se sabe con exactitud los efectos que tendrían estas emisiones sobre el sistema climático. (PROCLIM, 2005).

En el caso de las regionalizaciones de escenarios climáticos (*downscaling*), las fuentes de incertidumbre provienen de: la evolución futura de la sociedad, población, distribución de riqueza, las emisiones de GEI, las modelizaciones utilizadas, las técnicas de regionalización, etc.; sin embargo, estas técnicas de *downscaling* son lo suficientemente robustas para ser utilizadas en planificación y definición de políticas relativas a la actividad humana que se proyecte al futuro más de una década (gestión forestal, planificación hidrológica, urbanística, agrícola, etc.). (SENAMHI, 2015).

## **IV. MATERIALES Y MÉTODOS**

En este capítulo se presenta una descripción de las principales características físicas de la cuenca en estudio, específicamente las que determinan su comportamiento hidrológico y geomorfológico. A partir de esta caracterización se generaron los parámetros necesarios para el funcionamiento del modelo.

### **4.1. Descripción del área de estudio**

#### **4.1.1. Ubicación geográfica**

El estudio se realizó en la cuenca del río Chancay-Huaral (Figura 8) que desemboca en el mar Pacífico con un área drenada de 3062.6 km<sup>2</sup>, caudal medio de 16.571 m<sup>3</sup>/s, altitudes máximas de 5297 msnm y temperatura media de 13.97 °C.

Se ubica en la costa central del Perú hacia el norte del departamento de Lima, abarcando principalmente casi toda la provincia de Huaral. Geográficamente entre las coordenadas 11°00' y 11°39' de latitud sur y los meridianos 76°26' y 77°15' de longitud oeste.





temperaturas nocturnas que a veces descienden por debajo de los 0°C, dando lugar a la ocurrencia de heladas.

El clima Sub-Húmedo y Frío se presenta en el sector altitudinal comprendido entre los 3000 a 4000 m.s.n.m. con una precipitación promedio de 388 mm/año, una temperatura promedio de 12 °C, variando sus valores mínimos entre 1 °C a 4 °C como promedio anual. Se caracteriza por sus precipitaciones regulares y temperaturas netamente frías, las cuales, durante 5 meses al año (Mayo a Septiembre), descienden por debajo de los 0°C.

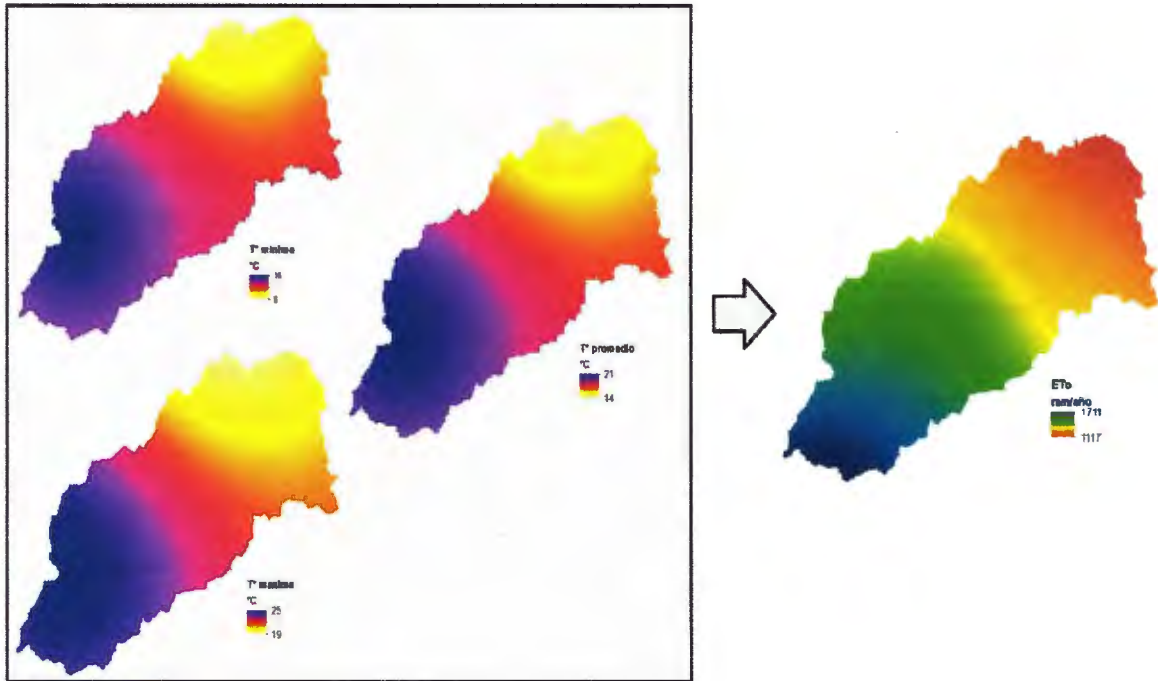
El clima Muy Húmedo y Frígido está comprendido entre los 4000 a 4800 m.s.n.m. con lluvias más intensas, estimándose un promedio de 601 mm de precipitación al año con una distribución menos desuniforme que en las áreas más bajas. Las temperaturas son extremadamente bajas, su promedio anual esta alrededor de los 9 °C llegando en las noches a temperaturas de congelación, generando así continuas e intensas heladas que imposibilitan el desarrollo de cualquier actividad agrícola.

El clima Pluvial y Gélido – Tundra Pluvial Alpino se presenta en un área de muy poca extensión, ubicada sobre los 4800 m.s.n.m. a lo largo de la divisoria de aguas, con un promedio de precipitación anual superior a 680 mm, y una gran proporción de precipitaciones en estado sólido como granizo y nieve, con temperaturas de congelación casi permanente entre los -7 °C y 0°C.

La evapotranspiración de referencia alcanza valores promedios anuales de 1403.4 mm/año, con valores mayores a 1700 mm sobre la zona del litoral y valores algo inferiores a 1120 mm en las zonas altas de la cuenca. Para el período considerado en el estudio, 1980 a 2000, se obtienen valores de 4298 Hm<sup>3</sup>/año de evapotranspiración de referencia.

En la Figura 9 se aprecian los mapas de variación de la temperatura mínima, máxima y promedio; además se muestra el mapa de variación de la evapotranspiración de referencia dentro de la cuenca, calculado por el método de Penman-Monteith para el periodo en estudio (1980-2000).





**Figura 9: Distribución de temperatura mínima, máxima, promedio y evapotranspiración de referencia. Período de análisis: 01 de enero 1980 al 31 de diciembre de 1999.**

#### 4.1.3. Características fisiográficas

Existe una correspondencia entre las características fisiográficas de una cuenca y su régimen hidrológico. (ANA, 2011). Estas características pueden determinar la naturaleza de la descarga de un curso de agua, siendo además de importancia para a) establecer comparaciones entre cuencas, b) interpretar de forma clara fenómenos pasados, c) efectuar previsiones de descarga de un río. (Mejía, 2012).

Estos factores se calcularon a partir de un DEM con tamaño de celda 250 x 250 m obtenido del ASTER GDEM (*Aster Global Digital Elevation Model*). (MINAM, 2013).

**Cuadro 4: Características fisiográficas de la cuenca Chancay – Huaral**

Parámetros	Valor
Area (km <sup>2</sup> )	3062.6
Perímetro (km)	327.8
Altitud media (msnm)	2679.3
Pendiente media (m/m)	0.446
Coefficiente de Compacidad	1.7
Factor de forma	0.374
Longitud de cauce principal (km)	90.46
Pendiente de cauce principal (%)	3.07

## 4.2. Materiales

### 4.2.1. Información geográfica

El modelo hidrológico TETIS necesita diversos mapas de entrada (*inputs*) para realizar los cálculos hidrológicos necesarios para determinar la escorrentía superficial.

Inicialmente se utilizaron mapas topográficos, geológicos, de cobertura vegetal y uso de suelos (ver Cuadro 5); a partir de ellos se calcularon los parámetros que describen la variabilidad espacial de las características de los suelos, del sustrato y de la cubierta vegetal a escala de cuenca.

**Cuadro 5: Información geográfica utilizada en el modelo TETIS.**

Informacion	Descripcion - Fuente
Topografía	Imagen ASTER GDEM de resolución 30 x 30 m - Servidores USGS-NASA
Cobertura Vegetal	Mapa de coberturas vegetales generales - Direccion General de Asuntos Ambientales Agrarios (DGAAA-DERN)
Suelos	Mapa de suelos generales - Direccion General de Asuntos Ambientales Agrarios - (DGAAA-DERN)
Geología	Intituto Geologico, Minero y Metalurgico - INGEMMET

### 4.2.2. Información climática e hidrométrica observada

El modelo hidrológico TETIS requiere de información climática para su funcionamiento y de caudales o puntos de aforo para la calibración y validación del modelo. En el Cuadro 6, se observa las estaciones utilizadas en el estudio, y en la Figura 8, la ubicación de dichas estaciones, pertenecientes a la red del SENAMHI. (ANA, 2011).

**Cuadro 6: Estaciones climáticas e hidrométricas utilizadas en el estudio.**

Nombre	Dpto.	Provincia	Distrito	E (m)	N (m)	ALT. (msnm)	Información Climática	Periodo
Andahuasi	Lima	Huaura	Sayan	256075	8768359	470	PP	1957-2007
Huamantanga	Lima	Canta	Huamantanga	309125	8728153	3392	PP	1964-2007
Huarangal	Lima	Lima	Carabaylo	271168	8696548	410	PP	1980-2007
Huaros	Lima	Canta	Huaros	329066	8739330	3585	PP	1963-2007
Huayan	Lima	Huaral	Huaral	269076	8733416	350	PP, T° (max, min)	1963-2007
Pachamachay	Lima	Huaura	Leoncio Prado	299722	8777878	4200	PP	1988-2007
Pallac	Lima	Huaral	Atavillos Bajo	303567	8744713	2333	PP	1963-2007
Paríacancha	Lima	Canta	Huaros	336332	8741212	3800	PP	1968-2007
Río Pallanga	Junín	Yauli	Sta. Barbara de Carhuacayan	341661	8767047	4633	PP	1968-1982
Santa Cruz	Lima	Huaral	Sta. Cruz de Andamarca	321667	8761413	3700	PP	1963-2007
Tupe	Lima	Huaura	Santa Leonor	319724	8783525	4450	PP	1969-1991
Yantac	Junín	Yauli	Marcapomacocha	347219	8746796	4600	PP	1968-2007
Santo Domingo	Lima	Huaral	Huaral	276119	8740569	640	Q	1921-2007
Alcantarilla	Lima	Huaura	Huaura	221359	8777272	120	T° (max, min)	1967-2010
Picoy	Lima	Huaura	Santa Leonor	310534	8792661	3075	T° (max, min)	1967-2011
Matucana	Lima	Huachochiri	Matucana	349860	8690836	2431	T° (max, min)	1964-2011

Fuente: SENAMHI

#### 4.2.3. Información climática proyectada

Para el análisis de los impactos del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca se utilizaron 3 MST diferentes y dos trayectorias de concentración representativas (RCP 4.5 y RCP 8.5), haciendo un total de seis escenarios de cambio climático pertenecientes al CMIP5 y regionalizados estadísticamente en el marco del proyecto AMICAF.

En el Cuadro 7, se presentan los seis escenarios climáticos y el período proyectado de la información climática futura.

**Cuadro 7: Escenarios climáticos considerados para las proyecciones de precipitación y temperatura futura: Enero del 2016 a Diciembre del 2059.**

Escenarios climáticos	Código
MPI-ESM-MR – RCP4.5	MPI 4.5
MPI-ESM-MR – RCP8.5	MPI 8.5
CanESM2 – RCP4.5	CANES 4.5
CanESM2 – RCP8.5	CANES 8.5
CNRM-CM5 – RCP4.5	CNRM 4.5
CNRM-CM5 –RCP8.5	CNRM 8.5

### 4.3. Métodos

En la Figura 10 se presenta el diagrama de flujo de la metodología seguida en el presente estudio, como es la identificación de los efectos del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca Chancay – Huaral.

Esta metodología cuenta de tres fases o procesos: (1) Recopilación de información básica, (2) Preparación de *Inputs* y aplicación del modelo hidrológico TETIS, (3) Simulación de escenarios futuros y evaluación del cambio climático.

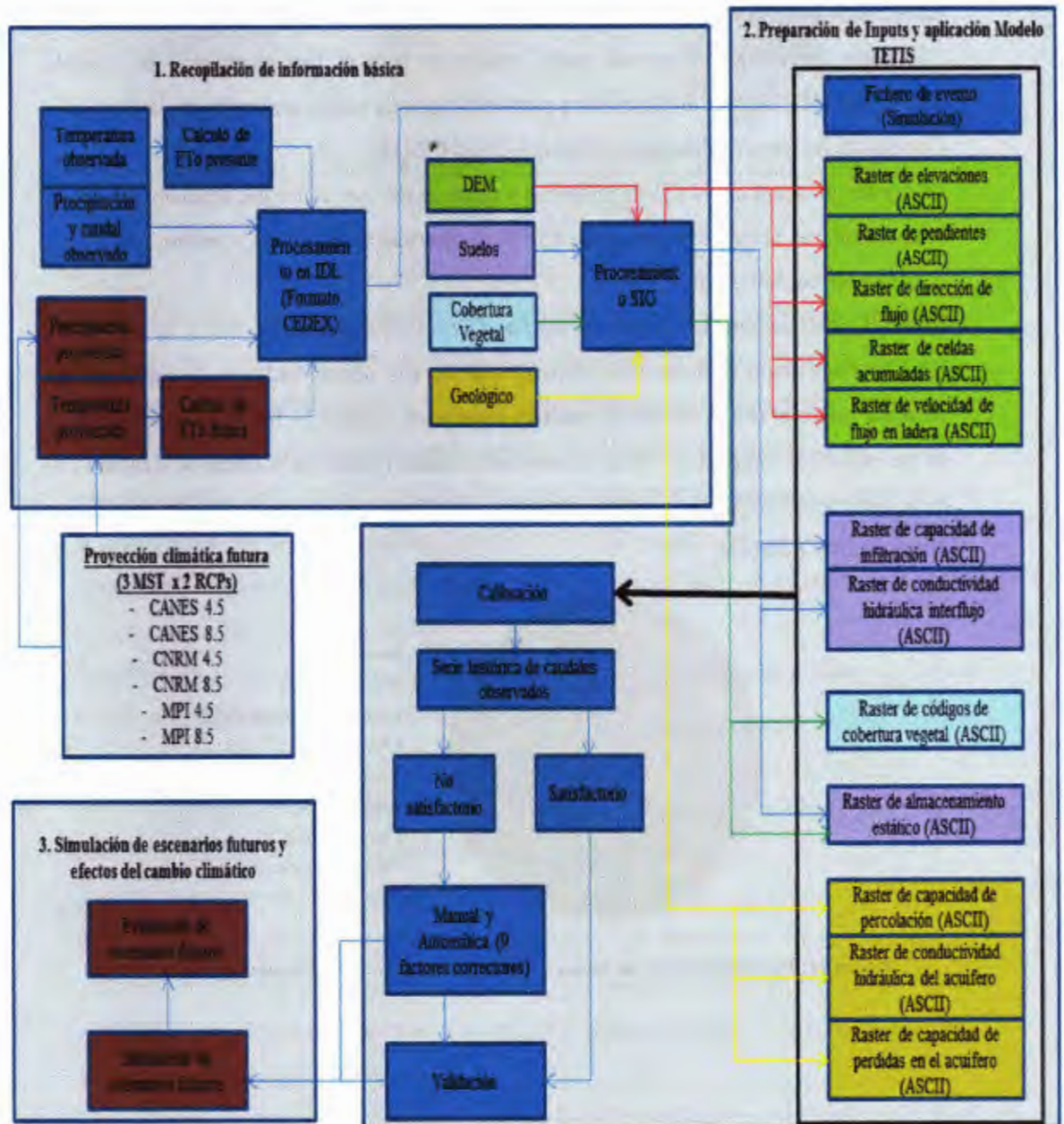


Figura 10: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio. Fuente: Elaboración propia.

### 4.3.1. Recopilación y procesamiento de información básica

#### 4.3.1.1. Suelos

El relieve está formado por la cadena montañosa de los andes, un valle interandino y una llanura costera; con una elevación media de 2679.3 msnm que varía de 6 a 5297 msnm.

El modelo digital de elevación, obtenido del ASTER GDEM (*Aster Global Digital Elevation Model*), se trabajó a una resolución espacial de 250 x 250 m y a esa misma resolución espacial se elaboró los mapas de pendiente, velocidad del flujo en ladera, direcciones de flujo y celdas acumuladas. (Ver Figura 8).

Los raster derivados del tipo de suelo, necesarios para el funcionamiento del modelo hidrológico TETIS, fueron obtenidos a partir del mapa de suelos realizado por la Dirección General de Asuntos Ambientales (DGAAA-DERN, 2012).

La cuenca presenta un 49.6% de andesitas y tobas (areniscas, limolitas, arcillas); 30.7% de rocas intrusivas acidas e intermedias; 13.1% de alternancia de lutitas y arenas; y 6.6% de conglomerados, lutitas, areniscas.

Según la clasificación realiza por *Corine Land Cover 2000* (Ramírez, 2012); la cuenca del río Chancay-Huaral presenta una ocupación de terreno denominada por la superficie de montaña matorral (58 % de toda la cuenca), vegetación escasa (37 %), las áreas de cultivos en general representan el 4.7 % de la cuenca (Frutales, Hortalizas y Zonas de Regadío), el área restante (0.3 %) es ocupada por otras clasificaciones como Pastizales Naturales, Nieve, Ríos y Ramblas.

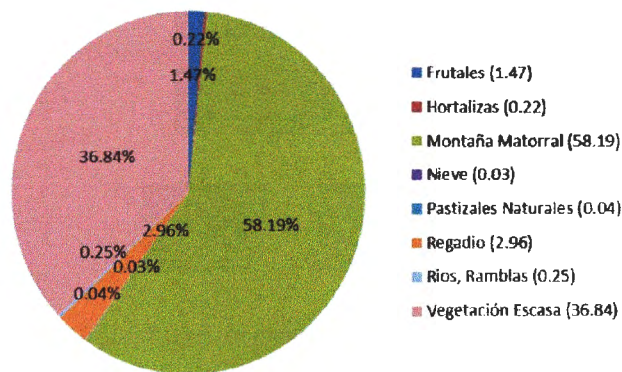
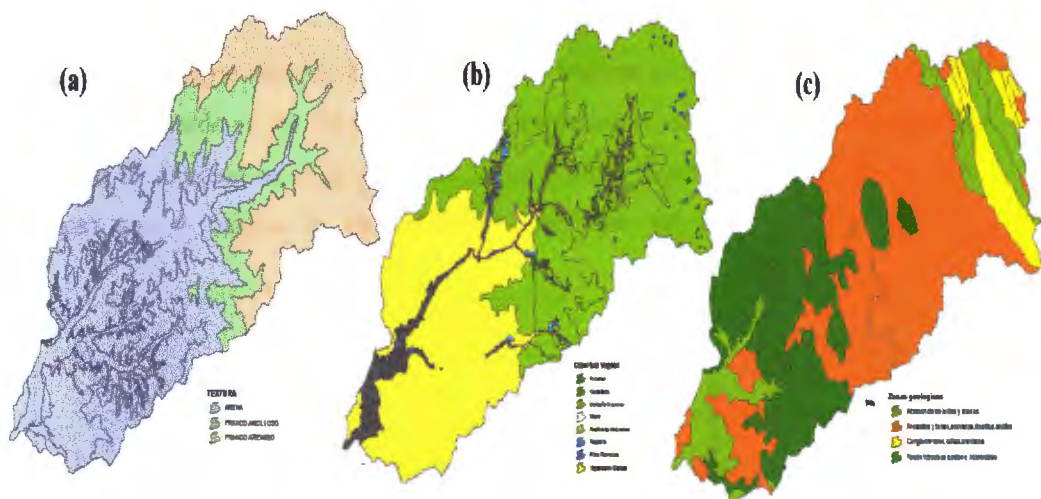


Figura 11: Porcentaje de uso de suelos – *Corine Land Cover 2000*. Fuente: Ramírez (2012).





**Figura 12: Distribución espacial de la textura (a), del uso de suelo (b), de las zonas geológicas (c) en la cuenca Chancay - Huaral.**

#### 4.3.1.2. Series de precipitación, temperatura y caudal

Para el modelamiento del comportamiento hidrológico de la cuenca se utilizó series de precipitación, temperatura y caudal de las estaciones ubicadas dentro y fuera de la cuenca. Para el caso de estaciones pluviométricas, se utilizaron tres estaciones dentro de la cuenca y nueve en cuencas aledañas, haciendo un total de 12 estaciones de precipitación. En el caso de la temperatura y otras variables climáticas se utilizó una estación ubicada dentro de la cuenca y tres en cuencas aledañas, haciendo un total de cuatro estaciones climáticas. Por último, para los datos de caudales se utilizó los de la estación Santo Domingo.

##### A. Precipitación y caudal

Para ingresar la información de las 12 estaciones de precipitación al modelo TETIS, se realizó un pre procesamiento y adecuación al formato compatible con el modelo. Para tal propósito se utilizó el *software* IDL y se cambió el formato de los datos a CEDEX. Los datos de caudales de la estación Santo Domingo tuvieron el mismo tratamiento para cambiar el formato a CEDEX y poder ingresarlos al modelo.

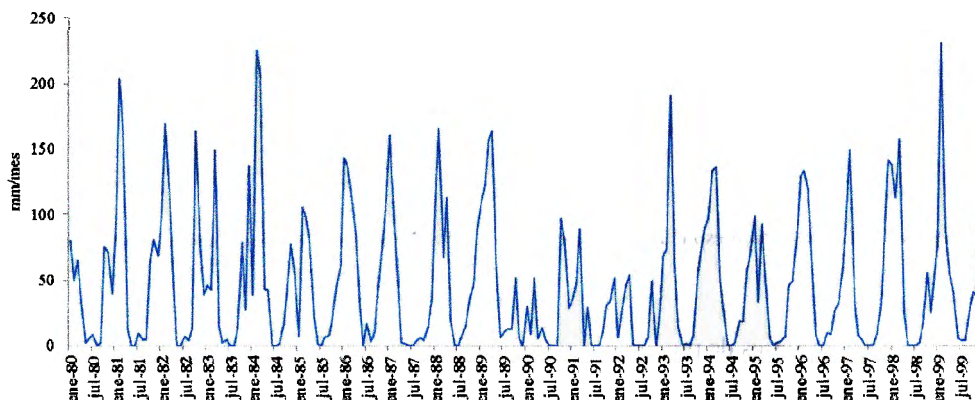
##### i) Análisis de consistencia de los datos de precipitación

El análisis de consistencia se realiza con la finalidad de determinar los posibles errores sistemáticos que ocurren al momento de medir una variable hidrológica. Cuando existen estos errores se observan saltos y tendencias en las series de los datos, en este caso, se dice que los datos son inconsistentes.

El análisis de consistencia se realizó a las series históricas mensuales mediante un análisis gráfico, doble masa y estadístico.

- Análisis gráfico

El análisis gráfico consiste en analizar visualmente la información original con la finalidad de identificar posibles saltos o tendencias. En la Figura N° 13, se observa el hidrograma mensual de la estación Santa Cruz y en el Anexo 1 y 3, se presenta la información pluviométrica de todas las estaciones utilizadas en el estudio y sus respectivos hidrogramas.



**Figura 13: Hidrograma mensual de la estación pluviométrica Santa Cruz.**

- Análisis Doble Masa

El análisis doble masa se utiliza para detectar errores que pueden haberse producido durante la obtención de la información. El diagrama doble masa consiste en comparar un patrón promedio de precipitaciones anuales con las precipitaciones anuales acumuladas de la estación en estudio, este gráfico debe seguir una tendencia lineal de pendiente constante. En este estudio, para un mejor análisis se decidió agrupar las estaciones teniendo en consideración la cercanía dentro de la cuenca y la similitud altitudinal; de esta manera, se estableció la siguiente agrupación:

- Doble masa, estación Santa Cruz, Carac y Pallac.
- Doble Masa, estación Pariacancha, Huaros y Huamantanga.
- Doble Masa, estación Pallanga, Yantac y Tupe.

En el Anexo 3, se muestran los diferentes doble masa de las diferentes estaciones agrupadas.

Luego de realizar el análisis doble masa a las estaciones utilizadas en el estudio, se concluye que son estaciones confiables y homogéneas, por tal motivo, no se consideró necesario desarrollar un análisis estadístico.

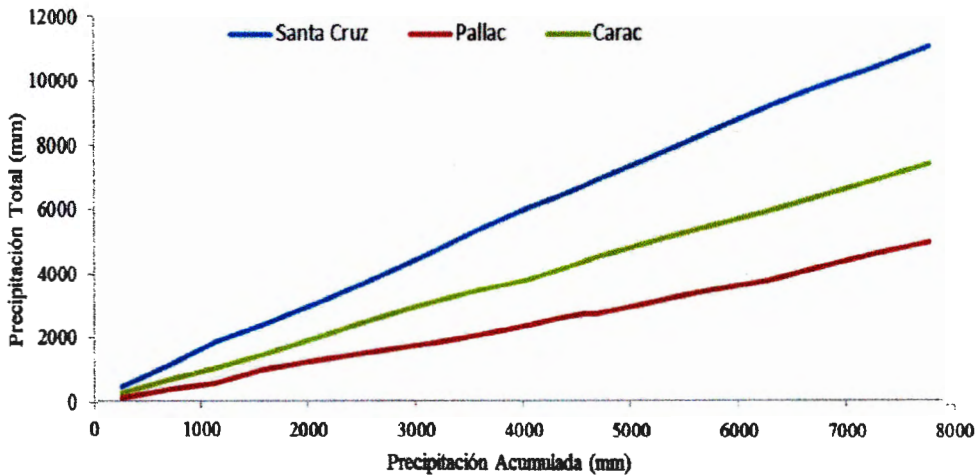


Figura 14: Diagrama doble masa para las estaciones Santa Cruz, Pallac y Carac. Período 1980 – 1999.

## B. Temperatura

Los datos de temperatura fueron procesados para calcular la evapotranspiración de referencia mediante el método de Penman-Monteith (FAO, 2006). Posteriormente, de la misma forma que para la precipitación, se cambió el formato de los datos de evapotranspiración a CEDEX.

### 4.3.2. Preparación de *Inputs* y aplicación del modelo TETIS

#### 4.3.2.1. Fichero de evento

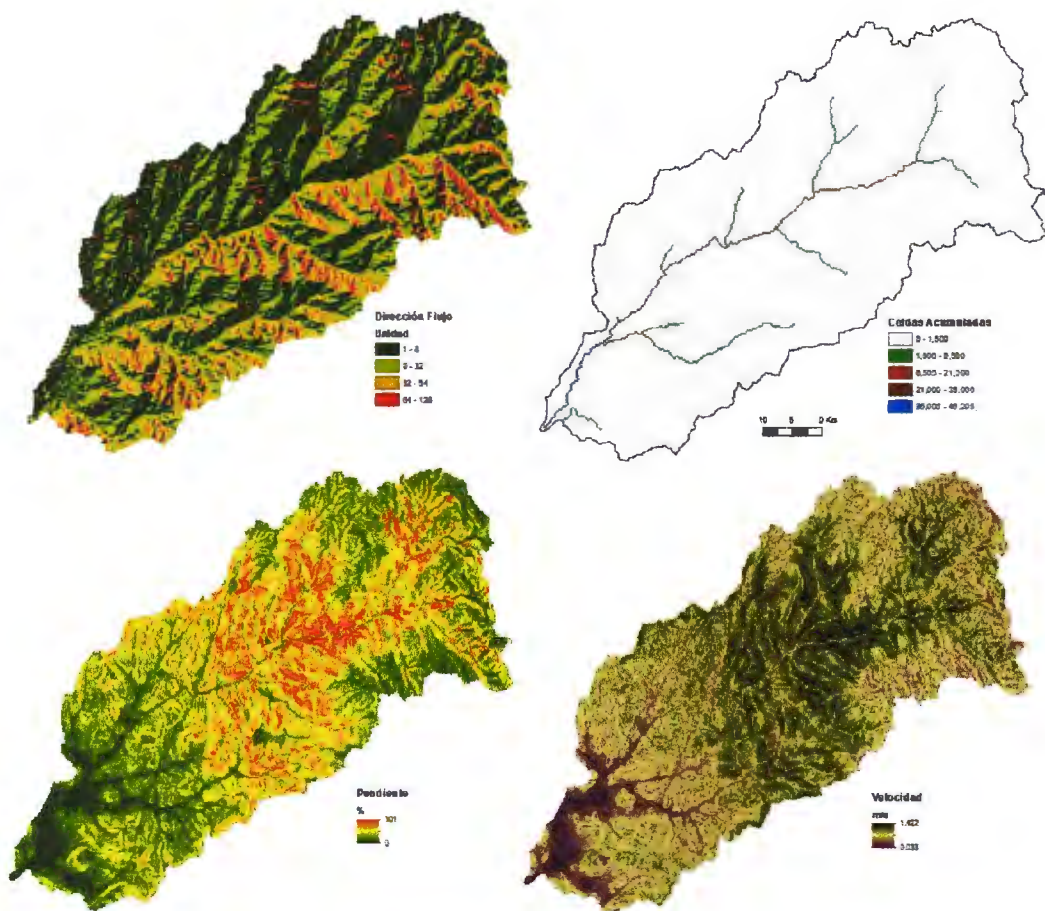
El fichero de evento contiene la información de precipitación, evapotranspiración y caudales en formato CEDEX, además contiene información del período y resolución temporal de los datos usados en la simulación.

#### 4.3.2.2. Parámetros derivados del Modelo Digital de Elevación (DEM)

A partir del DEM, se elaboraron mapas que representan las características geomorfológicas y las relaciones topológicas de la red de drenaje, estos mapas necesarios para el modelo TETIS son:

- Mapa de pendientes.
- Mapa de velocidad de flujo en ladera.
- Mapa de dirección de flujo.
- Mapa de celdas acumuladas.





**Figura 15: Mapas de la distribución de dirección de flujo, celdas acumuladas, pendiente y velocidad en ladera en la cuenca Chancay – Huaral.**

#### 4.3.2.3. Parámetro derivado del mapa de cobertura vegetal

Para poder simplificar la gran variedad de usos que se le da al suelo, el mapa de cobertura vegetal fue reclasificado de acuerdo a las ocho categorías que se describen a continuación:

- **Montaña matorral.-** Se le asigna tres tipos de cobertura vegetal, matorral boscoso de transición, landas y matorrales y vegetación esclerófila, entre sus características predomina la totalidad del porcentaje de recubrimiento de la superficie sobre la que crecen.
- **Pastizales naturales.-** Dentro de esta categoría se incluye toda área cuya vegetación predominante consiste en hierbas y pastizales.
- **Vegetación escasa.-** Todo espacio que este ocupado por roca o donde no exista ningún tipo de vegetación.

- Regadío.- Cultivos regados permanente o periódicamente, usando una infraestructura permanente (canales de riego, redes de drenaje). La mayoría de estos cultivos no pueden cultivarse sin un aporte artificial de agua.
- Frutales.- Parcelas plantadas con árboles frutales y terrenos principalmente agrícolas, especies frutales simples o mezclados, árboles frutales asociados con superficies de pastos permanentes.
- Hortalizas.- Tierras dedicadas al cultivo tradicional de verduras y hortalizas. Suelen ser cultivos estacionales con poco desarrollo de biomasa y que habitualmente sólo cubren un pequeño porcentaje del terreno sobre el que están cultivadas. En esta categoría se encuentran las áreas determinadas como mosaico de cultivos.
- Ríos y ramblas.- En esta categoría se incluye toda superficie de agua como, ríos, ramblas, lagos, etc.
- Nieve.- Toda zona recubierta por glaciares y nieve permanente.

Posteriormente, para calcular la evapotranspiración de los cultivos, además de la ETo es necesario determinar el coeficiente de cultivo o Kc, denominado también factor de vegetación. (Ramírez, 2012).

En el Cuadro 8, se presentan los factores de vegetación para las distintas categorías de uso de suelo presentes en la cuenca.

**Cuadro 8: Valores mensuales de Kc para las diferentes categorías de cobertura en la cuenca Chancay – Huaral.**

Clases de Vegetación	Factores ETo (Kc)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Montaña Matorral	0.6	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.8	0.8	0.8	0.75	0.7	0.6
Frutales	0.62	0.62	0.6	0.59	0.57	0.55	0.55	0.55	0.55	0.59	0.6	0.63
Regadío	0.2	0.2	0.5	0.83	0.85	0.91	0.93	0.93	0.93	0.91	0.85	0.2
Hortalizas	0.2	0.2	0.2	0.73	1	1.05	1.1	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2
Vegetación Escasa	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Nieve	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Pastizales Naturales	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Ríos, Ramblas	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Fuente: Ramírez (2012)

Una parte del agua precipitada no logra escurrir superficialmente por el terreno ni a penetrar en el suelo por las condiciones impuestas por la vegetación y composición de la superficie. Para la aplicación del modelo TETIS se consideró el Almacenamiento superficial, como la porción de lluvia que se almacena en superficies por encharcamiento y no forma parte de la escorrentía superficial o sub superficial porque se pierde de nuevo a la

atmósfera por evaporación, formando así, parte de la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo (Hu). (Ramírez, 2012).

**Cuadro 9: Almacenamiento superficial para las diferentes coberturas presentes en la cuenca.**

Clasificación usos del suelo	Clasificación CLC 2006	Prof. Raíces (m)	Almac. Superf (mm)
Montaña matorral	Paramos y landas	0.70	6.00
	Vegetación esclerófila	0.70	6.00
	Bosques de transición, arbustos	0.70	5.00
Pastizales naturales	Pastizales	0.60	6.00
	Praderas naturales	0.60	6.00
Vegetación escasa	Playas, dunas, arenas	0.00	0.00
	Roca desnuda	0.02	0.00
	Áreas con escasa vegetación	0.02	3.00
	Zonas quemadas	0.00	0.00
Regadio	Tierras regadas permanentemente	0.50	6.00
	Campos de arroz	0.75	6.00
Frutales	Árboles frutales y plantaciones de bayas	1.50	6.00
	Terreno principalmente ocupado por agricultura	0.75	6.00
Hortalizas	Áreas agro-forestal	0.55	4.00
	Forma de cultivos complejos	0.70	6.00
Ríos, ramblas	Pantanos	0.00	0.00
	Turberas	0.00	0.00
	Marismas Salinas	0.00	0.00
	Cursos de agua	0.00	0.00
	Cuerpos de agua	0.00	0.00
	Lagunas costeras	0.00	0.00
	Mares y océanos	0.00	0.00
Nieve	Glaciales y nieve permanente	0.00	0.00

Fuente: Ramírez (2012)

#### 4.3.2.4. Parámetros hidráulicos del suelo

El modelo hidrológico TETIS requiere de parámetros hidráulicos del suelo y subsuelo, en función de la información textural, geológica y del uso de suelo.

- Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo, Hu (mm). Este mapa incluye el almacenamiento capilar del suelo y el almacenamiento superficial debido a las depresiones del terreno.
- Conductividad hidráulica del suelo, Ks (mm/h). Utilizada en los procesos de infiltración y en la estimación del flujo sub superficial.
- Conductividad hidráulica del acuífero, Kp (mm/h). Utilizada en los procesos de percolación, perdidas subterráneas y en la estimación del flujo base.
- Conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso por percolación, Kps.
- Conductividad hidráulica horizontal saturada del suelo, Kss.
- Conductividad hidráulica horizontal saturada del estrato rocoso, Ksa.

Para los tres últimos parámetros es válida la siguiente aproximación:  $K_{ss}=K_s$ ,  $K_{sa}=K_p$  y  $K_{ps}=0.1K_p$ , posteriormente, la estructura separada de los parámetros en TETIS permite la calibración de las diferentes conductividades hidráulicas a través de cinco factores correctores. (Ramírez, 2012).

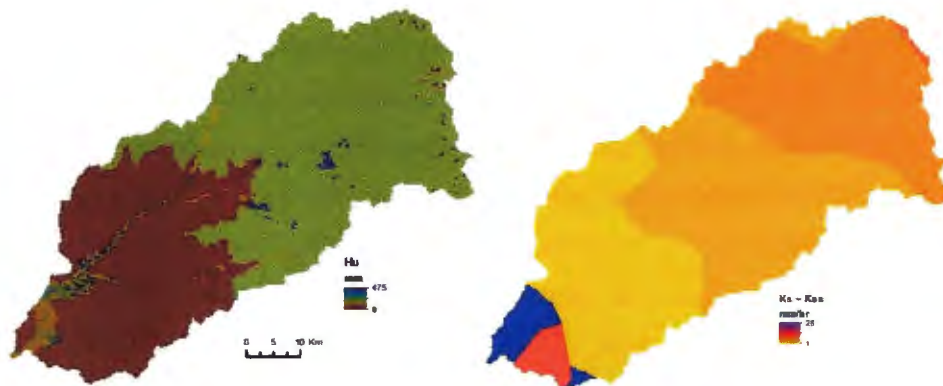


Figura 16: Parámetros hidráulicos del suelo de la cuenca Chancay – Huaral.

#### 4.3.2.5. Calibración y validación

- Calibración

Después de ingresar el evento de simulación y todos los *inputs* al modelo TETIS, se realizó la primera simulación y se procedió a calibrar los factores correctores en base a la optimización de los índices de eficiencia Nash-Sutcliffe, Error volumen (Ev) y RSR.

El modelo TETIS fue calibrado para el período de 1990-1999 y en el Cuadro, se aprecia los niveles de rendimiento de modelos hidrológicos a una escala mensual.

Cuadro 10: Niveles de rendimiento de un modelo hidrológico en función del índice Nash (E), Error en volumen (Ev) y RSR, para un intervalo temporal mensual.

Rendimiento	RSR	E	Ev
Muy Bueno	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < E \leq 1.00$	<10%
Bueno	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < E \leq 0.75$	10-15%
Satisfactorio	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < E \leq 0.65$	
Insatisfactorio	$RSR > 0.70$	$E \leq 0.50$	
Desfavorable			15-25%

Fuente: Ramos (2013).

- Validación

El proceso de validación de un modelo hidrológico trata de demostrar la capacidad de dicho modelo para realizar predicciones en un punto determinado para períodos distintos al de la calibración. De esta manera, se puede afirmar que un modelo fue validado si su

precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o límites aceptables.

La validación se realizó para un periodo de tiempo distinto (1980-1999) usando para la simulación los factores correctores optimizados en la calibración.

#### **4.3.3. Simulación de escenarios futuros y efectos del cambio climático**

Luego de la calibración y validación del modelo hidrológico TETIS, se realizó la simulación de los seis escenarios futuros, obteniendo series de caudales con los cuales se pudo evaluar los posibles efectos del cambio climático teniendo como período de comparación los caudales observados en la estación Santo Domingo desde enero 1980 a diciembre 1999.

El análisis de los impactos del cambio climático en la oferta hídrica del río Chancay – Huaral se realizó a nivel mensual, estacional (invierno, otoño, primavera, verano) y anual.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros correctores para la calibración

El análisis de sensibilidad tiene como principal objetivo identificar él o los parámetros de mayor significancia en la respuesta del modelo con respecto a las observaciones reales.

En la Figura 17, se observa el rango de variación de los distintos parámetros usados en la calibración y la respuesta del modelo, usando como criterio de eficiencia la función objetivo Nash – Sutcliffe.

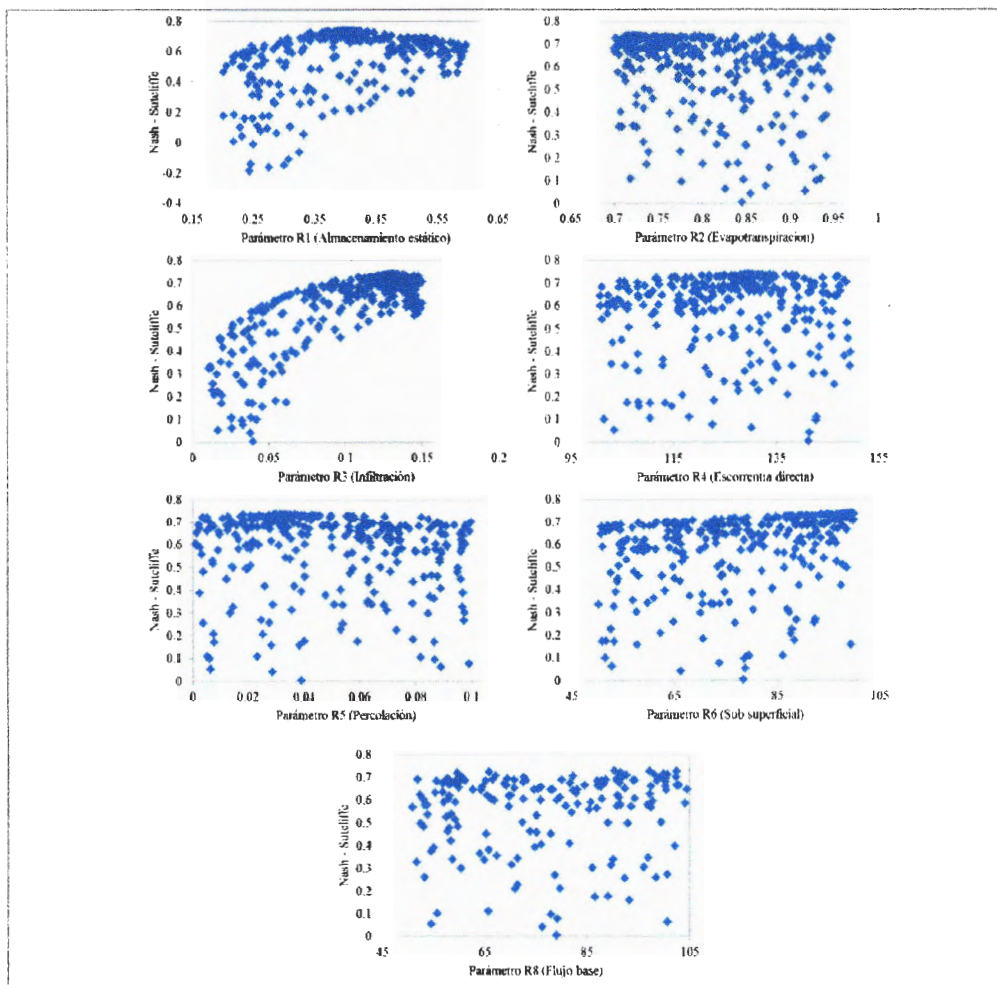


Figura 17: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo.

Analizando los distintos diagramas de la Figura 17, se puede indicar que los parámetros de mayor sensibilidad para la modelación hidrológica de la cuenca Chancay – Huaral son los de Almacenamiento estático (R1) e Infiltración (R3) en comparación con los demás parámetros utilizados.

Por lo tanto, el rango de variación de estos parámetros (R1 y R3) fueron priorizados en la fase de calibración del modelo.

## **5.2. Calibración del modelo hidrológico – período 1990 a 1999**

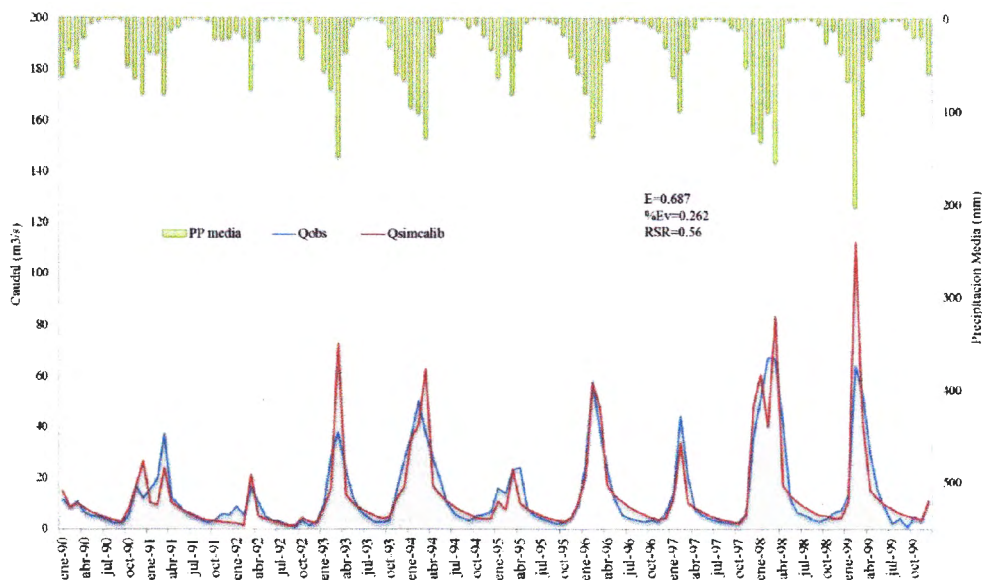
El modelo hidrológico distribuido Tetis fue calibrado en la estación Santo Domingo, por ser la única estación hidrométrica en la cuenca perteneciente a la red de estaciones del SENAMHI.

Como primer paso para la calibración, se realizó una simulación con todo el registro de caudales históricos considerados en el estudio, enero 1980 a diciembre 1999, en esta primera simulación se identificó el período donde los picos y tendencia de los caudales simulados asemejen a los observados, siendo este periodo el considerado para la calibración del modelo, enero 1990 a diciembre 1999 (Figura 18).

Posteriormente, el proceso de calibración, tanto manual como automática, se realizó ajustando los nueve factores correctores del modelo y considerando como índices de eficiencia el Error Volumétrico, Nash-Sutcliffe y RSR, obteniendo, después de simulaciones sucesivas, los valores finales de los factores correctores e índices de eficiencia mostrados en la Figura 18; respecto a los valores de los índices de eficiencia, estos se encuentran en un nivel de rendimiento Bueno para modelos hidrológicos con intervalo temporal mensual. Ver Cuadro 11.

En el Cuadro 11 se presentan los valores finales de los factores correctores, como resultado de la calibración del modelo hidrológico.





**Figura 18: Hidrograma mensual del caudal observado, simulado y precipitación media – calibración del modelo hidrológico en la estación santo domingo. Período de análisis: enero 1990 a diciembre 1999.**

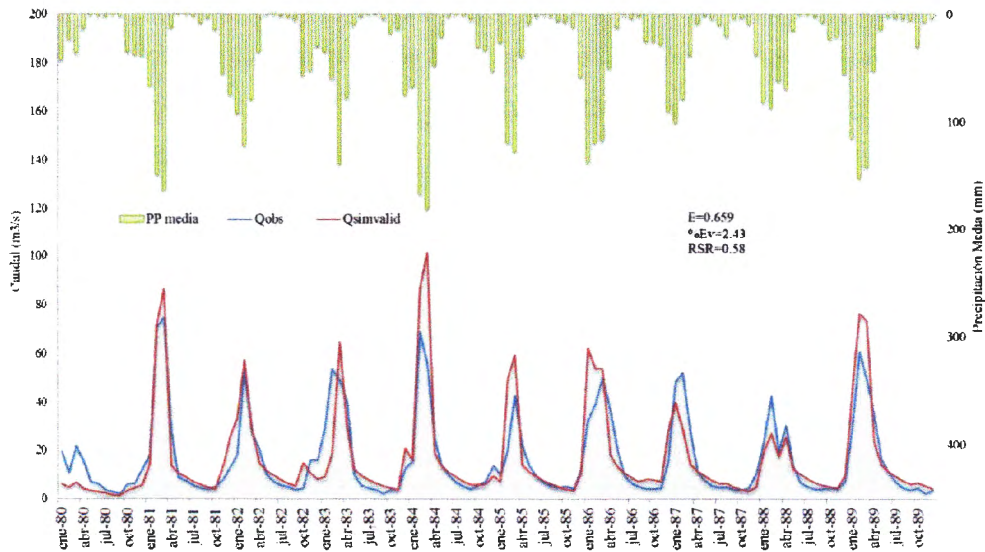
**Cuadro 11: Factores correctores finales e índices de eficiencia obtenidos en la calibración – Estación Santo Domingo – Período Enero 1990 a Diciembre 1999**

Factores correctores	Codigo	Valor
Almacenamiento estático	H1	0.35
Evapotranspiración	H2	0.91
Infiltración	H3	0.06
Esorrentía directa	H4	133.24
Percolación	H5	0.00
Sub superficial	H6	85.23
Perdidas subterráneas	H7	0.00
Flujo base	H8	75.07
Velocidad en los cauces	H9	1.00

### 5.3. Validación del modelo hidrológico – periodo 1980 a 1989

El modelo Tetis fue validado en la estación hidrométrica Santo Domingo, en el período enero 1980 a diciembre 1989. En la Figura 19 se observa el resultado gráfico de la validación y los valores obtenidos de los índices de eficiencia.





**Figura 19: Hidrograma mensual del caudal observado, simulado y precipitación media – validación del modelo hidrológico en la estación santo domingo. Período de análisis: enero 1980 a diciembre 1989.**

#### 5.4. Efecto del cambio climático en la precipitación

##### 5.4.1. Precipitación observada e histórica

Luego de la calibración y validación del modelo, y antes de empezar las simulaciones con la información futura de los seis escenarios de cambio climático; se realizó un análisis comparativo, en siete estaciones utilizadas en el estudio, entre los datos de precipitación observados e históricos generados por los escenarios de cambio climático para el período de 1980-1999.

En los gráficos siguientes (Figura 20 y 21), se puede observar que los seis escenarios considerados (3 MCG X 2 RCP) en el estudio tienden a representar adecuadamente la estacionalidad de la lluvia, exceptuando en las estaciones ubicadas en la parte seca de la cuenca, asimismo se aprecia que en general se estima una mayor intensidad de la lluvia para el período seco (junio-setiembre) y menor para el período húmedo (enero-marzo).

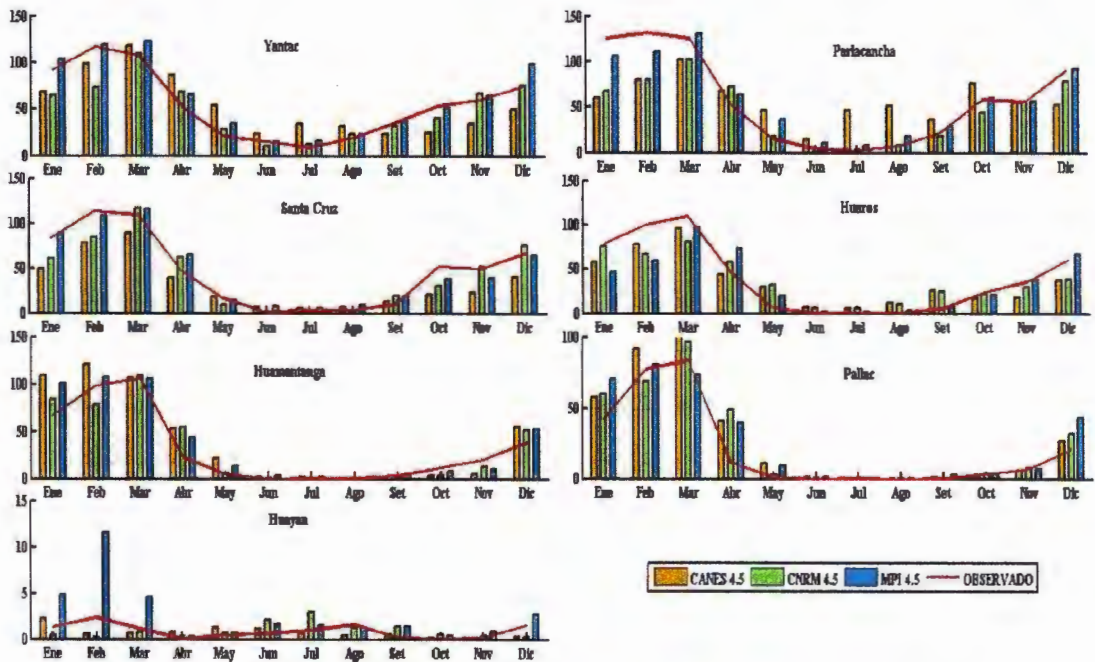


Figura 20: Análisis de la precipitación promedio mensual observada e histórica (RCP 4.5). Período 1980-1999.

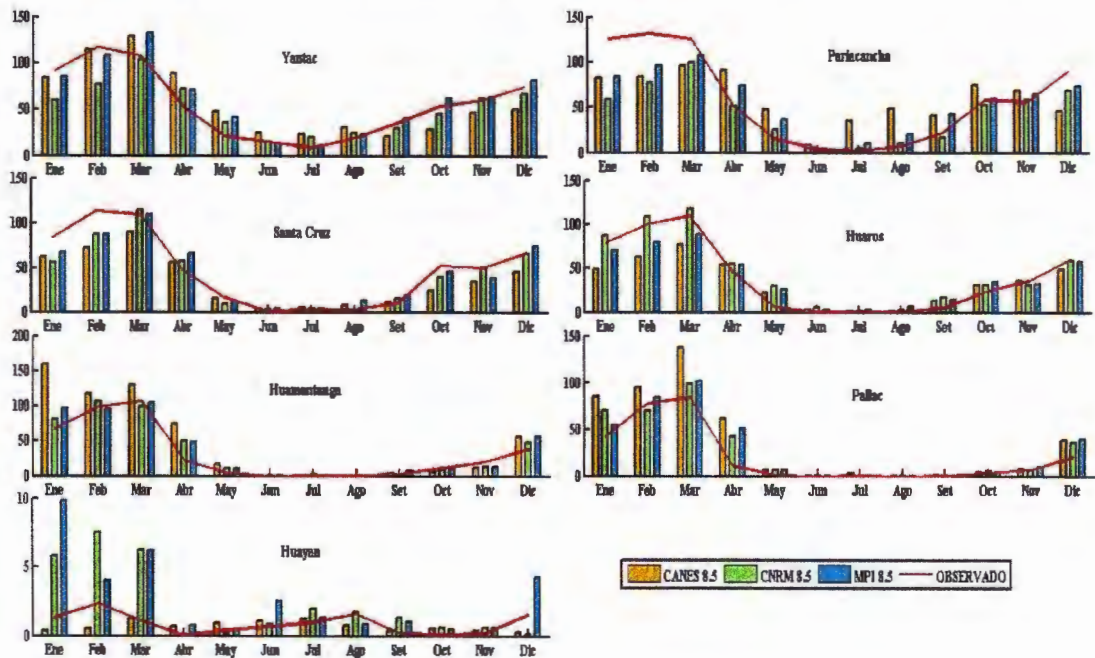


Figura 21: Análisis de la precipitación promedio mensual observada e histórica (RCP 8.5). Período 1980-1999.

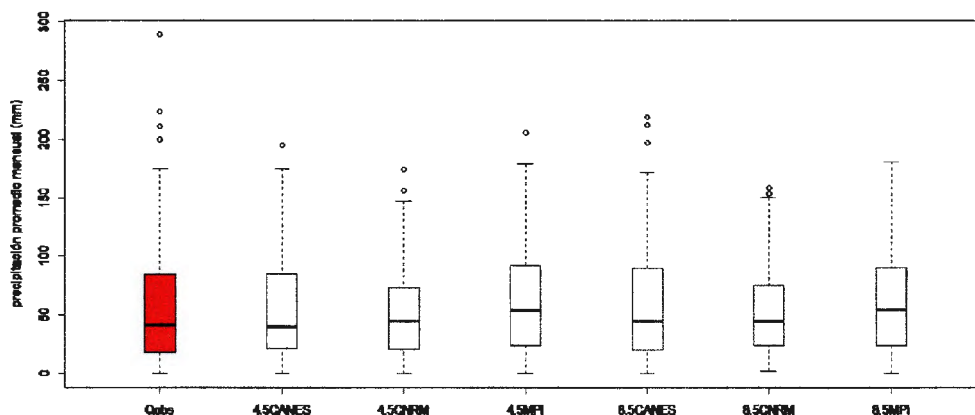
Como se mencionó anteriormente, en la estación Huayan, ubicada en la parte desértica de la cuenca, se aprecia la dificultad de los modelos climáticos para representar la intensidad y estacionalidad de la lluvia en zonas áridas, por tal razón, se privilegió el uso de las estaciones ubicadas por encima de los 2000 m.s.n.m; correspondiente a la parte húmeda de la cuenca.

**Cuadro 12: Coeficiente de correlación (r) para el promedio mensual de la precipitación – Período 1980-1999**

Modelo	Yantac	Pariacancha	Santa Cruz	Huaros	Huamantanga	Pallac	Huayan	Promedio
4.5 CANES	0.42	0.35	0.56	0.43	0.66	0.64	0.04	0.45
4.5 CNRM	0.52	0.62	0.60	0.48	0.61	0.56	-0.02	0.48
4.5 MPI	0.61	0.74	0.68	0.59	0.65	0.61	-0.02	0.55
8.5 CANES	0.52	0.48	0.62	0.52	0.63	0.58	-0.01	0.48
8.5 CNRM	0.50	0.58	0.57	0.43	0.62	0.59	0.02	0.47
8.5 MPI	0.59	0.61	0.55	0.56	0.63	0.55	-0.07	0.49
Promedio	0.53	0.56	0.60	0.50	0.63	0.59	-0.01	0.49

En el Cuadro 12, considerando el coeficiente de Pearson (r), se determinó que los modelos presentan valores de correlación aceptables ( $> 0.5$ ) para las estaciones ubicadas por encima de los 2000 m.s.n.m. (Pallac 2333 a Yantac 4600 m.s.n.m), destacando los modelos 4.5 CNRM, 4.5 MPI y 8.5 MPI. En este análisis se concluye también la poca capacidad de los modelos climáticos para representar la precipitación en la estación Huayan (350 m.s.n.m), ubicada en la parte seca de la cuenca.

Siguiendo con el análisis de la precipitación observada e histórica de los GCM, el diagrama de cajas nos da la oportunidad de saber entre que valores fluctúan la mayoría de los datos de las series, comparar las medias entre los datos observados y simulados e identificar valores atípicos.



**Figura 22: Diagrama de cajas de la precipitación observada e histórica – Estación Yantac – Período 1980-1999.**

En la Figura 22, se observan valores atípicos en los datos observados de la estación Yantac, estos valores corresponden a los meses de marzo 1980, febrero 1981, febrero 1997 y febrero 1999, los cuales pueden ser relacionados con anomalías climáticas ocurridas a causa del Fenómeno del Niño en diferentes intensidades. De esta forma, se puede apreciar que los modelos GCM no logran representar adecuadamente estos eventos atípicos.

Analizando el diagrama de cajas, para esta estación y demás utilizadas en el estudio, todos los modelos presentan distribuciones similares al de los datos observados, siendo los más representativos los modelos 4.5 CANES, 8.5 CANES, 8.5 MPI.

#### 5.4.2. Precipitación observada y proyectada, futuro cercano: 2016-2059

Posteriormente, se comparó la precipitación total mensual de los datos observados para cada estación, con los proyectados de los GCM para el periodo 2016-2059, en los siguientes gráficos (Figuras 23 y 24), se observa que las estaciones, a excepción de Yantac, ubicadas por encima de los 3500 msnm (Huaros, Santa Cruz, Pariacancha) presentan una disminución de la precipitación para el período húmedo (Enero-Marzo) y un aumento para el período seco (Junio-Setiembre); para las estaciones ubicadas en la parte húmeda de la cuenca y hasta los 3500 msnm (Pallac, Huamantanga) se presenta un aumento de la precipitación en el período húmedo, manteniéndose una similitud en el período seco. En la estación Huayan, ubicada en la parte seca de la cuenca, se presenta una discordancia mes a mes que no cumple con ninguna tendencia descrita anteriormente, resultado probable de la poca capacidad de los GCM para representar la precipitación en climas desérticos.

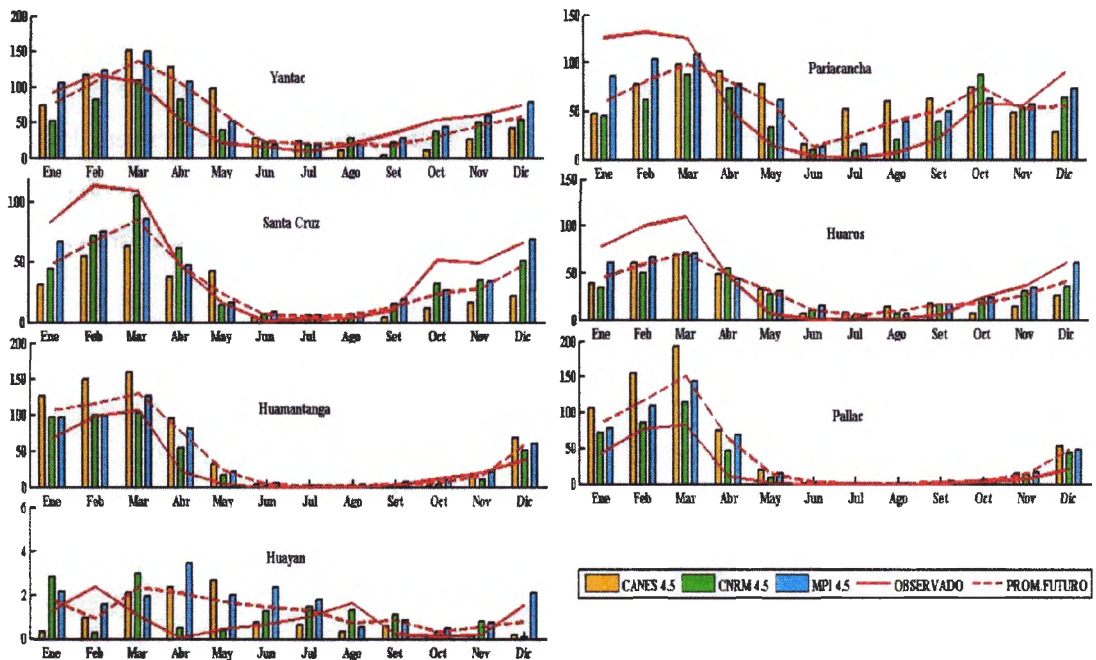


Figura 23: Variación mensual de la precipitación promedio observada y futura (RCP 4.5). Período: 2016-2059



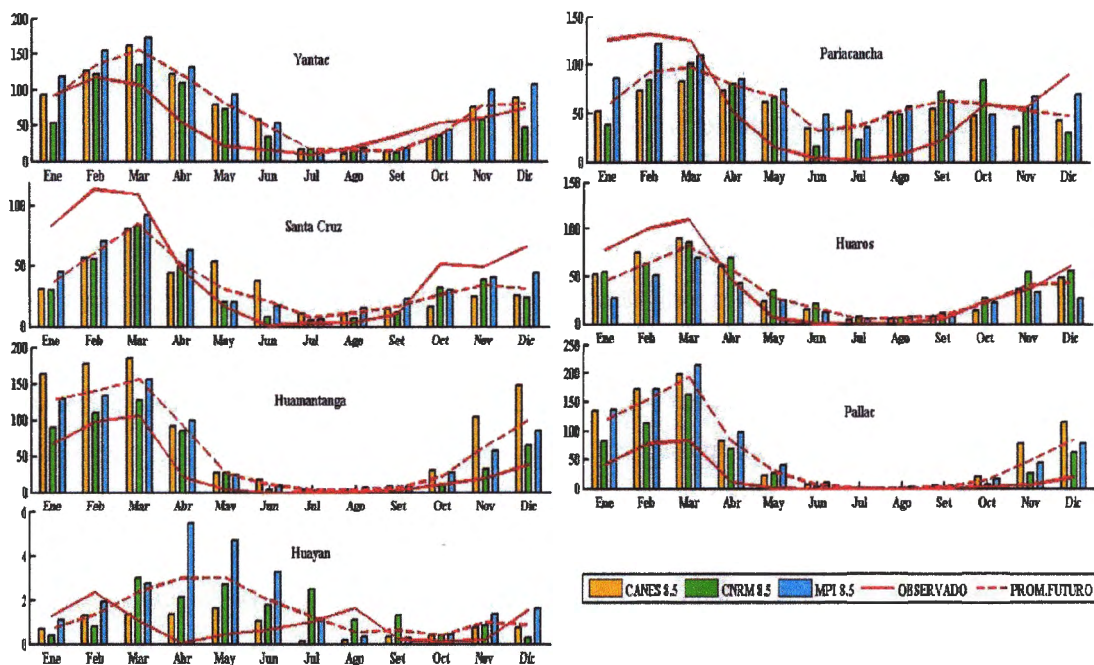


Figura 24: Variación mensual de la precipitación promedio observada y futura (RCP 8.5). Período 2016-2059.

Considerando la precipitación anual proyectada, se estiman variaciones de -26.5% a 152.6% en las estaciones utilizadas en el estudio (Cuadro 13), sin embargo, analizando las estaciones ubicadas dentro de la cuenca (Santa Cruz, Pallac y Huayan), se observa una variación negativa de -26.5% para la estación Santa Cruz ubicada en la cabecera de cuenca, por lo tanto, siendo esta zona donde se produce la mayor cantidad de precipitación, se debe tener en cuenta la posibilidad de una menor oferta hídrica en la cuenca para el periodo considerado en el estudio.

**Cuadro 13: Variación porcentual anual de la precipitación futura promedio para los seis escenarios de cambio climático respecto de la observada.**

Estación	Altitud msnm	Variación Anual (mm)	
		mm	%
Yantac	4600	128.16	19.5
Pariacancha	3800	25.26	3.7
Santa Cruz	3700	-147.43	-26.5
Huaros	3585	-70.14	-15.0
Huamantanga	3392	277.80	75.1
Pallac	2333	374.07	152.6
Huayan	350	5.31	50.0

## **5.5. Efectos del cambio climático en la oferta hídrica futura de la cuenca**

### **5.5.1. Proyección de caudales hacia el año 2059**

Una vez que se comprobó el “buen” rendimiento del modelo TETIS para la representación hidrológica de la cuenca, y luego de hacer un análisis de la precipitación histórica y futura, se procedió a realizar la simulación de caudales hacia el año 2059 en la estación hidrométrica santo domingo.

Para analizar los impactos de cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca, se realizó un análisis de caudales a nivel mensual, estacional y anual.

En la Figura 25 (a) se observa la serie de caudales mensuales observados entre 1980 – 1999 y las series generadas hacia el 2059 para las seis proyecciones climáticas futuras.

En la Figura 25 (b) se presenta el promedio anual de los caudales entre 1980 – 1999 en comparación con los caudales promedio anual simulados hacia el 2059.

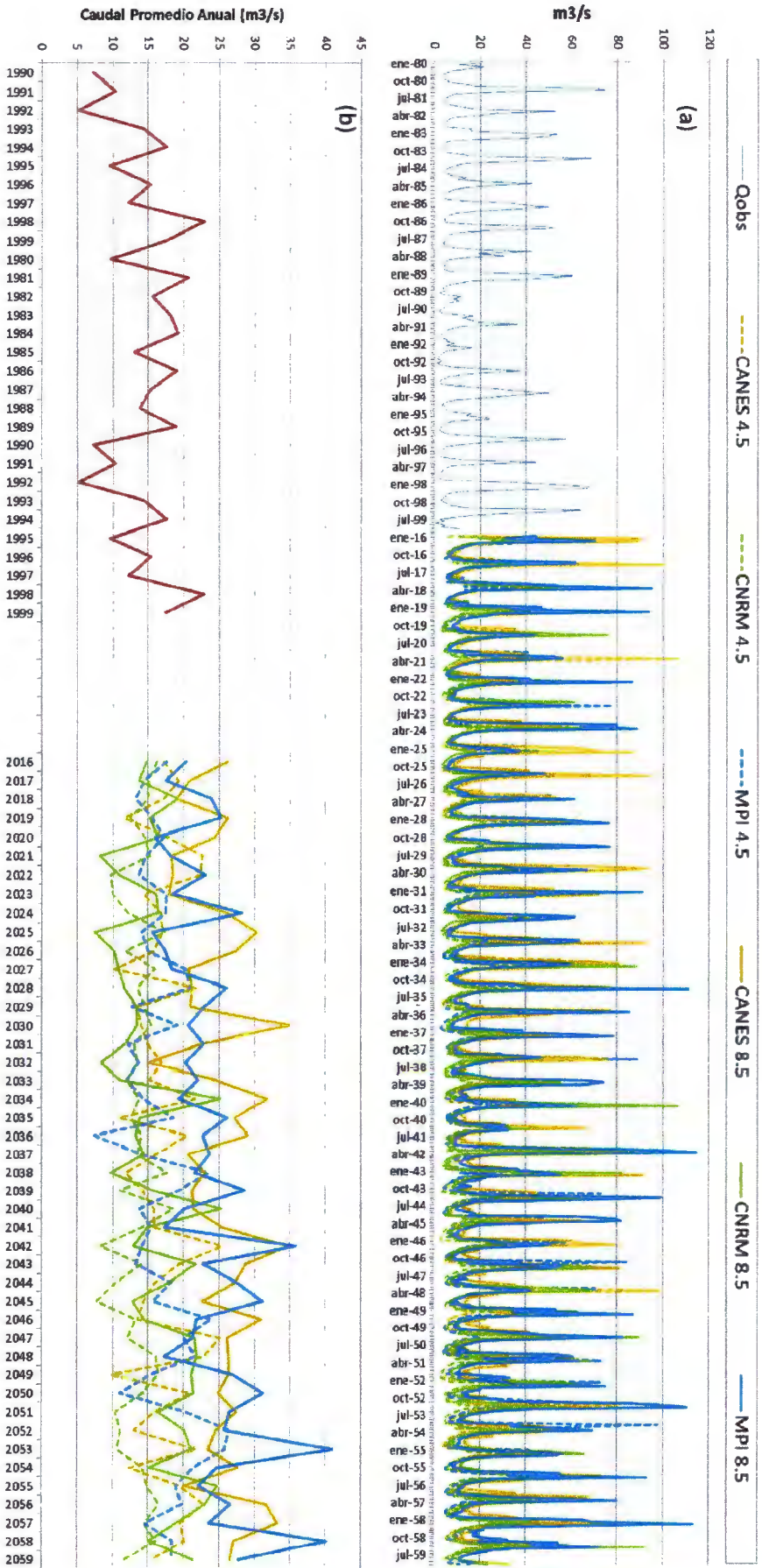


Figura 25: (a) Serie de caudales mensuales observados entre 1980 – 1999 y proyección de caudales hacia el 2059. (b) Serie de caudales promedio anual observado entre 1980 – 1999 y proyección de caudales hacia el 2059.

### a. Análisis de caudales a nivel mensual

En la Figura 26 se observa la probabilidad de excedencia para determinados caudales; por ejemplo, si se considera un evento *probable* como aquel cuya probabilidad de excedencia supera el 50% y caso contrario un evento *improbable*, para los datos observados entre 1980-1999, ha sido *probable* la excedencia de un caudal de 5 m<sup>3</sup>/s, sin embargo, prácticamente en todos los modelos utilizados, menos CNRM 4.5, es *probable* que se exceda un caudal de 10 m<sup>3</sup>/s y según el modelo analizado el evento *probable* a ser excedido es de 15 m<sup>3</sup>/s.

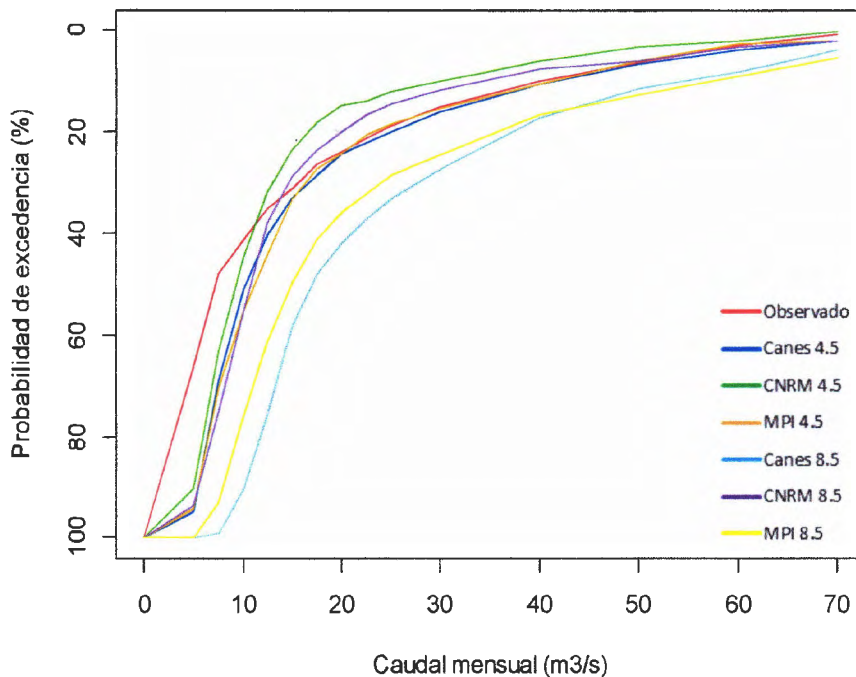


Figura 26: Probabilidad de excedencia de distintos caudales proyectados por los modelos climáticos globales

Los modelos CANES 8.5 y MPI 8.5 son los que presentan mayores incrementos en las probabilidades de excedencia, por ejemplo, para caudales entre 15 a 30 m<sup>3</sup>/s, existe hasta un 26.9% mayor de probabilidad de excedencia, y para caudales entre 30 a 50 m<sup>3</sup>/s existe hasta un 12.3% mayor de probabilidad de excedencia. Por otro lado, el modelo CNRM 4.5, presenta una disminución de hasta -8.9% en la probabilidad de que sean excedidos los caudales entre 15 a 30 m<sup>3</sup>/s y hasta -3.9% para caudales comprendidos entre 30 a 50 m<sup>3</sup>/s.

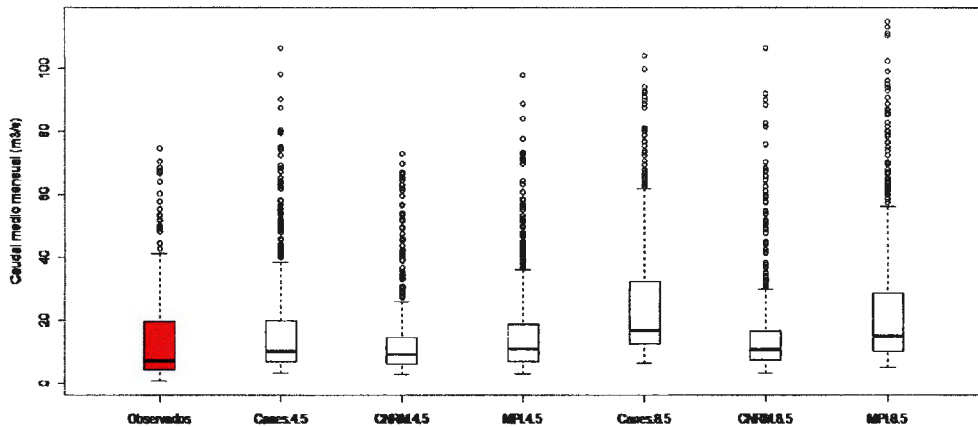
De esta forma, considerando las probabilidades de excedencia graficadas en la Figura 26, se estima que el efecto del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca tiende a incrementar la probabilidad de excedencia de caudales mayores a 10 m<sup>3</sup>/s con respecto a



los datos observados en el período 1980-1999, por lo tanto, la posibilidad de excedencia sugiere una mayor disponibilidad de agua para las distintas actividades productivas en la cuenca.

Realizando un análisis de diagrama de cajas para los caudales observados y proyectados mensualmente, podemos comparar la distribución y media de los datos, así como también los caudales máximos. En la Figura 27 se aprecia la tendencia de que los caudales máximos proyectados superen los observados ( $74.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ), siendo el modelo MPI 8.5, el que proyecta caudales máximos de hasta  $114.9 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Asimismo, considerando que los GCM no logran simular adecuadamente eventos extremos como el Fenómeno del Niño, cabe pensar en la posibilidad de que estos caudales máximos proyectados puedan ser superados cuando exista la presencia de este fenómeno, lo cual representa una gran alerta por las posibles inundaciones que se puedan generar.



**Figura 27: Diagrama de cajas de los caudales observados y proyectados para el periodo: 2016-2059**

**b. Análisis de caudales a nivel estacional**

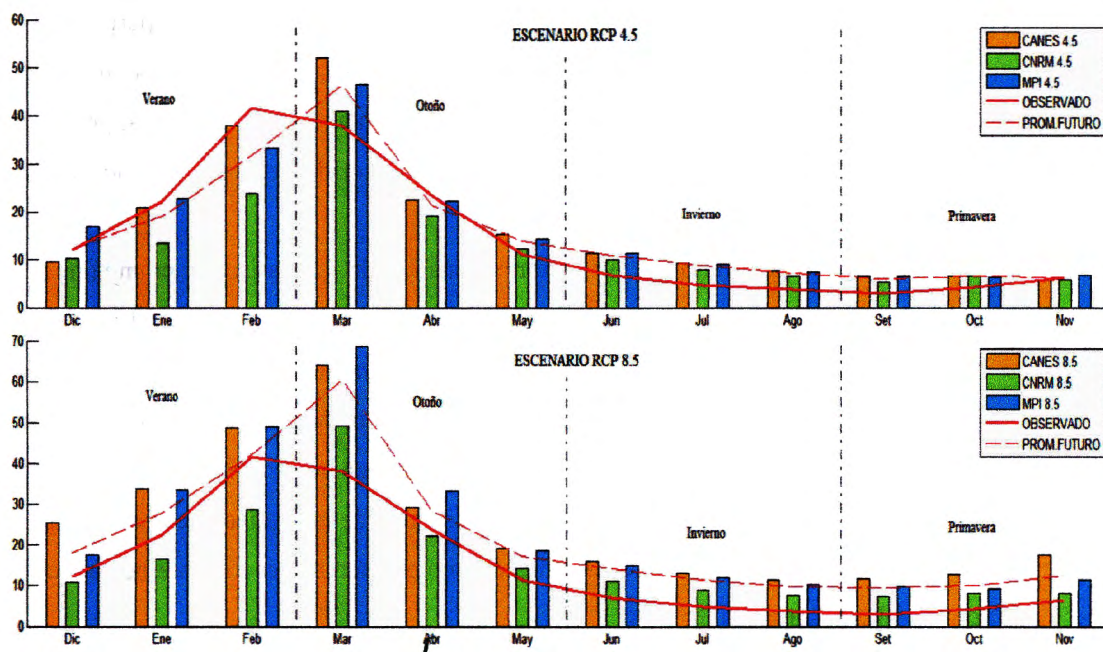
Con el propósito de analizar los efectos del cambio climático a nivel estacional, en los Cuadros 14, 15 y Figura 28 se ordenaron los caudales mensuales de acuerdo a las estaciones del año, de esta forma, se puede apreciar que los mayores caudales se presentan en el mes de marzo (otoño), mientras que para el periodo observado desde 1980-1999 el mayor caudal se presentó en febrero (verano). Esto indicaría que existe una tendencia al desplazamiento estacional de los caudales mayores.

**Cuadro 14: Promedio de caudales observados y proyectados a nivel estacional.**

Período	Escenario	Variación promedio estacional			
		Verano (Dic-Feb)	Otoño (Mar-May)	Invierno (Jun-Ago)	Primavera (Set-Nov)
1980-1999	Observado	25.3	24.3	5.1	4.5
	4.5 CANES	22.8	29.9	9.4	6.4
	4.5 CNRM	15.9	24.1	8.1	5.9
Futuro cercano: 2016 - 2059	4.5 MPI	24.3	27.6	9.3	6.5
	8.5 CANES	35.9	37.3	13.3	13.9
	8.5 CNRM	18.6	28.4	9.1	7.7
	8.5 MPI	33.2	40.1	12.2	10.0

**Cuadro 15: Variación porcentual de caudales observados y proyectados a nivel estacional**

Período	Escenario	$\Delta$ % Promedio estacional			
		Verano (Dic-Feb)	Otoño (Mar-May)	Invierno (Jun-Ago)	Primavera (Set-Nov)
Futuro cercano: 2016 - 2059	4.5 CANES	-10.0	23.5	83.3	41.0
	4.5 CNRM	-37.3	-0.5	57.2	30.9
	4.5 MPI	-4.0	14.0	81.1	43.7
	8.5 CANES	41.8	53.9	159.1	207.4
	8.5 CNRM	-26.6	17.3	77.4	70.9
	8.5 MPI	31.2	65.3	138.2	120.4



**Figura 28: Promedio de caudales observados (1980-1999) y proyectados a nivel estacional para los seis escenarios climáticos futuros (3 MCG x 2 RCP), período 2016-2059.**

En la Figura 29 se muestra las variaciones porcentuales de la escorrentía generada por los modelos climáticos respecto al promedio mensual de los datos observados.

En el período seco (Mayo-Setiembre) se presentan variaciones de 10.1 a 294.3% y para el período húmedo (Octubre – Abril) de -42.2 a 198.5%, siendo para ambos periodos, el modelo 4.5 CNRM el que presenta las menores variaciones y el modelo 8.5 CANES las mayores.

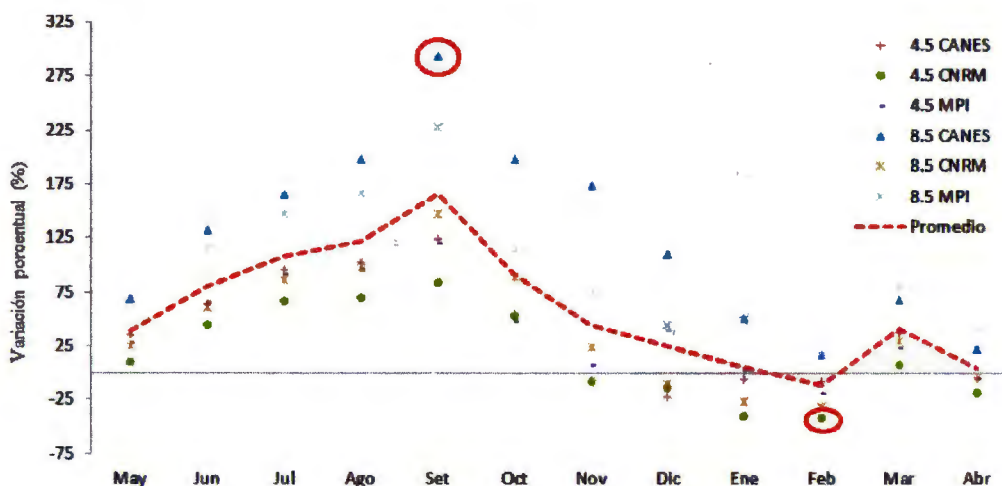


Figura 29: Variación porcentual de los caudales proyectados (2016-2059) según los observados (1980-1999)

Además, en la Figura 29 se identifica que las mayores variaciones porcentuales se presentan en los meses de agosto y setiembre (Período Seco), esto debido a que el caudal promedio de los datos observados en estos meses presentan valores pequeños, por lo tanto, cualquier aumento en la magnitud de escorrentía proyectada genera una amplia variación en porcentaje.

Lo mencionado anteriormente se reafirma analizando la variación promedio de los caudales generados por los GCM, la cual indica que en todos los meses del período seco existe un aumento progresivo del porcentaje de variación, iniciando con un 38.9% en mayo hasta 166.4% en setiembre, sin embargo, para el período húmedo la tendencia es decreciente, empezando con un 92.5% en octubre hasta un mínimo de -11.3% en febrero.

Con la intención de analizar el grado de significancia de las variaciones porcentuales, se realizó una clasificación por niveles teniendo como criterio el coeficiente de variación de los caudales observados ( $\delta = \sigma/\bar{x}$ ).

En el Cuadro 16, se observa el resultado de la clasificación realizada, de esta manera, los meses pintados de rojo presentan variaciones muy significativas; los de amarillo, variaciones significativas y los meses sin pintar presentan variaciones no significativas.

Las variaciones más significativas se presentan entre los meses de junio a noviembre, siendo los modelos CANES 8.5 y MPI 8.5 los que presentan variaciones significativas en la mayoría de los meses del año.

Por lo mencionado anteriormente, considerando que los modelos que presentan variaciones no significativas en la mayoría de meses son los que tienen una mayor capacidad de predecir los caudales futuros; se calculó el promedio de las variaciones porcentuales, exceptuando los modelos CANES 8.5 y MPI 8.5; es así que entre los meses de noviembre a mayo se estiman variaciones desde -25.5% hasta 24.5% y entre los meses de junio a octubre, variaciones desde 58.9% hasta 119%.

**Cuadro 16: Grado de significancia de las variaciones porcentuales de los caudales proyectados**

	Enc	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Prom.Obs.	22.31	41.57	37.96	23.58	11.21	6.85	4.79	3.78	2.93	4.25	6.39	12.04
Desv.Est.Obs.	12.35	21.84	17.27	10.58	4.54	2.15	1.32	1.07	1.03	1.02	4.52	7.78
$\delta$	55.33	52.54	45.50	44.88	40.48	31.45	27.63	28.36	35.14	24.07	70.83	64.61
CANES 4.5	-6.01	-8.76	37.48	-4.74	35.39	64.60	94.99	102.31	124.88	55.62	-7.16	-21.69
CNRM 4.5	-40.40	-42.23	7.65	-18.61	10.13	44.16	66.16	69.69	84.19	52.73	-8.09	-14.47
MPI 4.5	2.28	-19.77	22.22	-5.62	27.43	66.01	91.31	95.71	119.63	46.96	6.67	39.08
CANES 8.5	51.03	16.82	68.25	23.26	69.47	132.23	166.13	198.75	294.28	198.49	173.49	110.76
CNRM 8.5	-26.93	-31.10	29.50	-6.22	25.15	60.66	86.35	96.56	147.41	88.21	24.29	-10.42
MPI 8.5	49.87	17.09	80.31	40.93	65.71	116.07	147.24	166.86	228.01	113.15	76.02	45.28

■ Variación muy significativa  $X \in [-\infty, -2\delta > U < +2\delta, +\infty]$ 
■ Variación significativa  $X \in [-2\delta, -\delta > U < +\delta, +2\delta]$ 
 Variación no significativa  $X \in [-\delta, +\delta]$

### c. Análisis de caudales a nivel anual

A nivel anual se analizó las variaciones de los caudales proyectados hacia el 2059 respecto a los observados entre 1980 – 1999.

En el Cuadro 17, se observa que el modelo CanES 8.5 presenta una variación porcentual muy significativa (75.7%) y el modelo MPI 8.5 una variación porcentual significativa (67.1%); para los demás modelos las variaciones resultaron no significativas y el modelo CNRM 4.5 es el único que proyecta un caudal promedio anual menor al observado entre 1890 – 1999. Por lo tanto, se puede estimar que en el futuro cercano existirá una mayor oferta hídrica en la cuenca en comparación con la observada entre 1980 – 1999.

**Cuadro 17: Grado de significancia de las variaciones porcentuales de caudales promedio anual proyectados hacia 2059.**

Período	Escenario	Caudal promedio anual (m <sup>3</sup> /s)	Δ % Promedio anual
1980-1999	Observado	14.29	δ = 34.1
Futuro cercano: 2016 - 2059	4.5 CANES	17.13	19.9%
	4.5 CNRM	13.50	-5.5%
	4.5 MPI	16.94	18.5%
	8.5 CANES	25.10	75.7%
	8.5 CNRM	15.96	11.7%
	8.5 MPI	23.87	67.1%

#### 5.4.2. Persistencia de caudales hacia el año 2059

El análisis de persistencia de caudales observados y proyectados se grafica en la Figura 30. Para los cuatro niveles evaluados (50, 75, 90 y 95%) la tendencia es similar, todos los modelos presentan un incremento de caudales en los meses de mayo a noviembre y marzo, en los meses de diciembre a febrero, según el modelo analizado, los caudales pueden aumentar o disminuir.

Considerando el promedio de todos los modelos utilizados, al 50% de persistencia se alcanzó un caudal promedio anual de 17.3 m<sup>3</sup>/s, al 75 % de 13.5 m<sup>3</sup>/s, al 90 % de 10.8 m<sup>3</sup>/s y al 95% de 9.5 m<sup>3</sup>/s.

Considerando los modelos que presentan variaciones no significativas en la mayoría de los meses (CANES 4.5, CNRM 4.5, MPI 4.5, CNRM 8.5); al 50% de persistencia se logró un caudal promedio anual de 14.6 m<sup>3</sup>/s, al 75% de 10.8 m<sup>3</sup>/s, al 90% de 8.7 m<sup>3</sup>/s y al 95% de 7.6 m<sup>3</sup>/s.



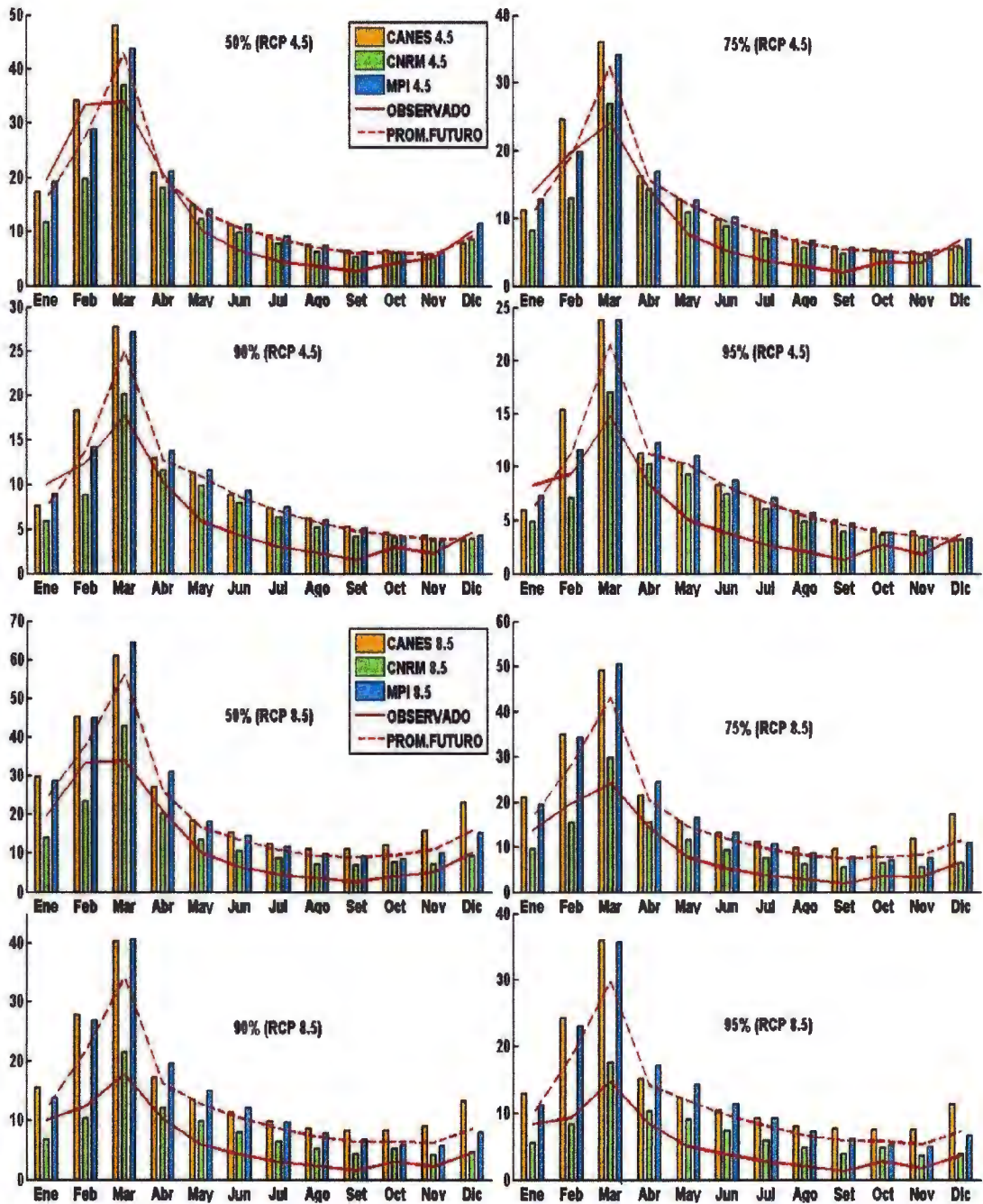


Figura 30: Persistencia de caudales proyectados al 50%, 75%, 90% y 95%

En la Figura 31 se muestra el diagrama de cajas de las variaciones porcentuales de los caudales proyectados respecto al promedio observado en la estación Santo Domingo para el período 1980-1999, de esta forma se identifican variaciones de -49.4 % hasta 177 %.

Analizando las variaciones promedio de todos los GCM utilizados, se puede estimar que la oferta hídrica en la cuenca tendrá variaciones de -8.8% hasta 69.5%, asimismo,

considerando los modelos con variaciones de menor significancia (CANES 4.5, CNRM 4.5, MPI 4.5 Y CNRM 8.5) se obtiene una variación promedio menor al 25% y con los dos modelos restantes (CANES 8.5 y MPI 8.5) una variación promedio superior al 50%, lo que resulta, considerando todos los modelos, en una variación promedio de 26.7%.

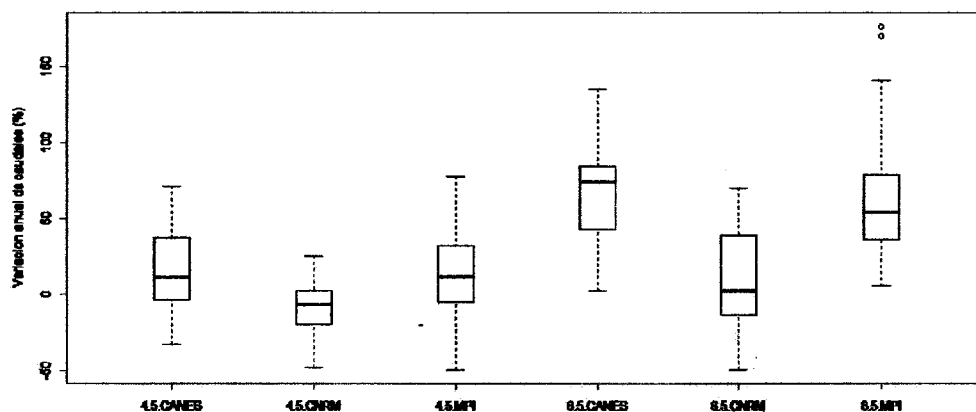


Figura 31: Variación porcentual de caudales proyectados respecto al promedio anual observado

### 5.5. Balance Hídrico Futuro

La oferta hídrica futura de la cuenca está determinada por el caudal promedio proyectado de los GCM a una persistencia del 90%, se consideró así debido a que la demanda se calculó en base a los requerimientos hídricos para la agricultura y uso poblacional, siendo mayor la persistencia solicitada para proyectos de abastecimiento de agua potable (90%) que para la agricultura (75%), de esta forma, la oferta hídrica promedio anual proyectada es de 340 Hm<sup>3</sup>. La demanda hídrica de uso agrícola en la cuenca fue considerada en base a la misma información que presenta la Autoridad Nacional de Agua en el estudio hidrológico realizado para la cuenca Chancay – Huaral en el año 2011.

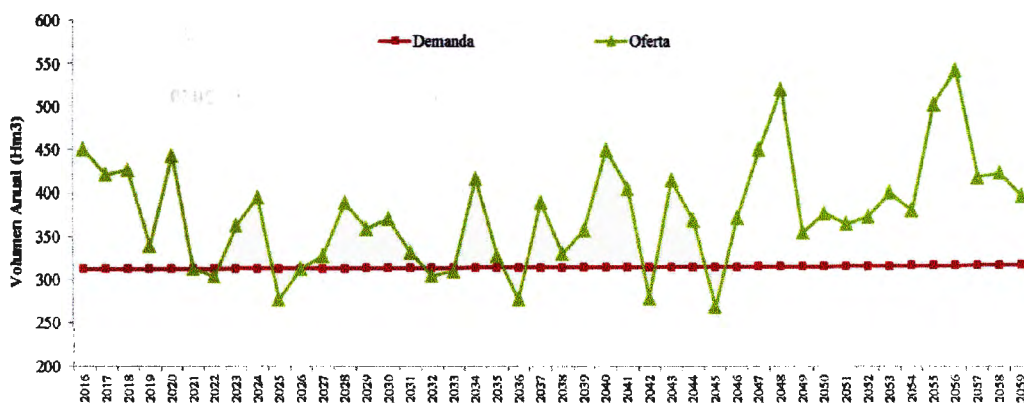
Cabe mencionar que la oferta de agua subterránea no fue considerada en vista que la estación santo domingo se encuentra ubicada aguas arriba del área de explotación del agua subterránea (acuífero).

En el ámbito de la cuenca se ubican 17 comisiones de regantes con un área total bajo riego de 24034 ha, de acuerdo a la Propuesta de Asignaciones de Agua en Bloques – Volúmenes Anuales y Mensuales para la Formalización de los Derechos de Uso de Agua en el valle Chancay – Huaral realizado en el año 2004 por el PROFODUA. El requerimiento hídrico promedio anual de las 17 comisiones asciende a 310.2 Hm<sup>3</sup>.

El consumo de agua de uso doméstico se calculó multiplicando el número de habitantes y el requerimiento per cápita diario (60 litros).

La estimación de la población futura se basa en los resultados de los censos nacionales del año 2007, la cual indica una tasa de crecimiento poblacional de 2.7%, obteniéndose una población futura para el año 2059 de 318928 habitantes; por lo tanto, el consumo de agua de uso poblacional en promedio será de 4.2 Hm<sup>3</sup>.

La demanda hídrica promedio total en la cuenca alcanza los 314.4 Hm<sup>3</sup> y en la Figura 32 se presenta el balance hídrico hasta el año 2059.



**Figura 32: Balance hídrico futuro en la cuenca hasta el año 2059**

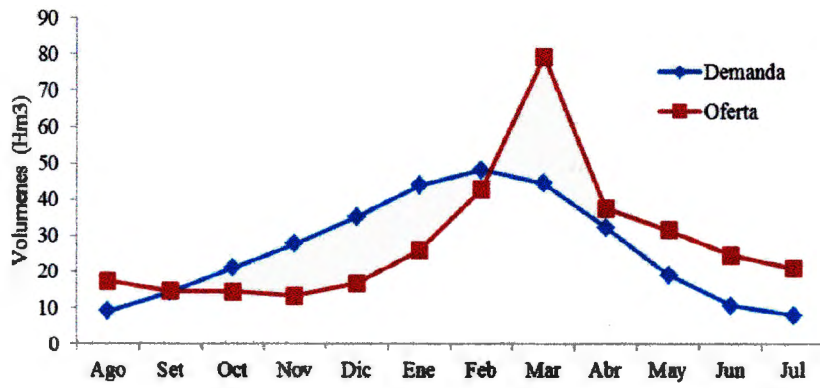
En la Figura 32 se puede observar que existen varios años en el cual la demanda supera la oferta (años secos), este déficit hídrico se presenta cada cinco años en promedio hasta el año 2045 alcanzando un déficit medio de 25 Hm<sup>3</sup>, después de este año, se observa la tendencia a presentarse años en la cual la oferta supera claramente la demanda (años húmedos).

Realizando un balance hídrico a nivel mensual, en el Cuadro 18 y Figura 33, se aprecia que la máxima demanda se presenta en el mes de febrero (48.2 Hm<sup>3</sup>) y la máxima oferta en el mes de marzo (79.3 Hm<sup>3</sup>); se observa también que existe un déficit hídrico entre los meses de octubre a febrero alcanzando un promedio mensual de 12.6 Hm<sup>3</sup>, sin embargo, entre los meses de marzo a setiembre se presenta un superávit promedio de 12.6 Hm<sup>3</sup>.

**Cuadro 18: Volumen promedio mensual de la oferta y demanda hídrica (Hm3) – Período 2016-2059**

Meses	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Oferta	17.37	14.66	14.46	13.26	16.89	26.08	42.88	79.27	37.60	31.71	24.78	21.06
Demanda	8.98	14.28	21.09	27.80	35.31	43.92	48.21	44.56	32.36	19.19	10.64	8.07





**Figura 33: Balance hídrico mensual en la cuenca – período 2016-2059**

## VI. CONCLUSIONES

Se logró realizar seis proyecciones de caudales futuros hacia el año 2059 para dos escenarios de emisión de gases invernadero (RCP 4.5 y RCP 8.5) y tres modelos de circulación general MCG (MPI-ESM-MR, CNRM-CM5 y CANESM2). En base a estas proyecciones futuras se evaluó los efectos del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca, y de esta forma cumplir con los objetivos planteados en el estudio.

- a) Para la aplicación del modelo hidrológico distribuido TETIS se preparó datos *inputs* de entrada; uno de ellos corresponde a un archivo episodio que contiene la información de temperatura, precipitación y caudal. Además información espacial de suelos, geología, cobertura vegetal, MED y parámetros hidrológicos en formato ASCII – ArcGIS con un tamaño de celda de 250 m x 250 m.
- b) En los procesos de calibración y validación del modelo hidrológico distribuido TETIS, se obtuvieron valores de Nash – Sutcliffe (0.69, 0.66); error volumétrico (0.26, 2.43) y RSR (0.56, 0.58) respectivamente, estos valores indican una eficiencia “buena” del modelo para ambos procesos, según Moriasi et al. (2007) y Donigian y Imhoff (2002), citado por Ramos (2013).
- c) En la precipitación futura, se observó una disminución de la lluvia para la época más húmeda y un aumento para la época seca. Por ejemplo, en la estación “Santa Cruz”, ubicada sobre los 3700 msnm, se obtuvo una disminución de precipitación en el período más lluvioso de 39% y un incremento de 233% para el período seco.
- d) Considerando los dos escenarios de emisión de GEI (RCP 4.5 y RCP 8.5), para el período húmedo se obtiene un incremento promedio del caudal mensual de 29%, siendo el mes de marzo donde se presenta la mayor variación (54%). Asimismo, para el período seco se espera un incremento promedio de 103%. Además, teniendo en cuenta que los posibles efectos del cambio climático generaran un incremento de

la temperatura media en la cuenca y por consiguiente una mayor evapotranspiración, se puede concluir que la cuenca trata de amortiguar estos posibles efectos del cambio climático aumentando la precipitación en la época seca, provocando a su vez un incremento de la precipitación total anual y de los caudales medios anuales en la parte baja de la cuenca.

## **VII. RECOMENDACIONES**

- a) Se recomienda realizar planes para la gestión del recurso hídrico por parte de la Junta de Usuarios de agua, Comisión de Regantes y la Autoridad Administrativa del Agua, teniendo en consideración los posibles efectos del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca, analizados y descritos en este estudio.
- b) Ante la posibilidad de que se presenten años donde la demanda resulte insatisfecha, a pesar de una mayor producción de caudales, se sugiere realizar estudios detallados de demandas futuras y también de hidrología subterránea con fines de aprovechamiento hídrico.
- c) Los modelos climáticos seguirán mejorando con el tiempo, continuaran incorporando más variables del sistema climático y también los futuros escenarios de emisiones de GEI; se sugiere continuar investigando los efectos en la hidrología de esos futuros cambios y mejoras, ya que los resultados presentados en este trabajo se enmarcan en los avances hasta hoy desarrollados de los modelos climáticos y las consideraciones actuales de los posibles escenarios de emisión de GEI.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA (Autoridad Nacional del Agua, PE). 2011. Evaluación de Recursos Hídricos superficiales en la cuenca del río Chancay-Huaral. Lima, PE. s.e. 181 p.

BID (Banco Interamericano de Desarrollo, US). 2015. #adaptación: ideas sobre adaptación al cambio climático para un futuro sostenible (en línea). Consultado el 10 de setiembre del 2015. Disponible en

<http://kp.iadb.org/Adaptacion/es/Paginas/CentrodeConocimiento/Formulaci%C3%B3n-de-escenarios--clim%C3%A1ticos.aspx>

CHOW, VT. MAIDMENT, DR. MAYS, LW. 1994. Hidrología aplicada. Trad. JG Saldarriaga. Santafé de Bogotá, CO. McGraw-Hill. p. 2-13.

CMIP. 2015. CMIP: Coupled Model Intercomparison Project, WCRP: World Climate Research Programme (en línea). Consultado el 28 de Agosto del 2015. Disponible en <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/index.html?submenuheader=0>

ESLAMIAN, S. 2014. Handbook of engineering hydrology: modeling, climate change, and variability. Boca Raton, Florida, US. Taylor & Francis. p. 71-81.

FRANCÉS, F. VÉLEZ, J. MÚNERA, JC. MEDICI, C. BUSSI, G. 2014. Descripción del Modelo Conceptual Distribuido de Simulación Hidrológica TETIS v.8. Valencia, ES. Universitat Politècnica de València. 87 p.

FRANCÉS, F; VÉLEZ, JJ; MÚNERA, JC; MEDICI, C; BUSSI, G; REAL, J. 2014. Manual del usuario: Programa TETIS v.8.3.0. Valencia, ES. Universitat Politècnica de València. 94 p.

GUTIÉRREZ, JM; PONS, MR. 2006. Modelización numérica del cambio climático: bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la Península Ibérica (en línea). Revista C&G 20 (3-4): 15-28.

- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, CH). 2001. Tercer informe de evaluación: Cambio climático 2001, la base científica (en línea).
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, CH). 2013. Cambio climático 2013, bases físicas: Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes (en línea).
- JUBB, I. CANADELL, P. DIX, M. 2013. Representative concentration pathways (RCPs) (en línea). s.l. Australian Government, AU.
- LIBÉLULA (Gestión en Cambio Climático y Comunicación, PE). 2014. Agua y cambio climático (en línea).
- MEJÍA, JA. 2012. Hidrología aplicada. Perú. Q & P Impresores. p. 19-24.
- Ministerio del Ambiente, PE. 2013. Geoservidor (en línea). Consultado el 15 de marzo del 2014. Disponible en [http://geoservidor.minam.gob.pe/geoservidor/download\\_raster.aspx](http://geoservidor.minam.gob.pe/geoservidor/download_raster.aspx)
- PURICELLI, MM. 2003. Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica. Tesis Doctoral. Valencia, ES. Universitat Politècnica de València. 434 p.
- PROCLIM (Programa de Cambio Climático y Calidad de Aire, PE). 2005. Escenarios del cambio climático en el Perú al 2050: Cuenca del río Piura (en línea). 2 ed. Lima, PE. SENAMHI.
- RAMÍREZ, LM. 2012. Análisis de la implementación de un modelo hidrológico distribuido con información estándar en España. Tesis Mag. Sc. Valencia, ES. Universitat Politècnica de València. 297 p.
- RAMOS, L. 2013. Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida. Tesis Doctoral. Valencia, ES. Universitat Politècnica de València. 215 p.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). 2015. Regionalización estadística de escenarios climáticos en Perú. p. 3-24.

## **IX. ANEXOS**

**Anexo 1: Estaciones con registros de precipitación medias mensuales. Periodo 1980 - 1999**

**Anexo 2: Evapotranspiración de referencia media mensual generada. Periodo 1980 – 1999**

**Anexo 3: Hidrogramas de las estaciones pluviométricas y análisis doble masa.**

**Anexo 4: Aplicación del modelo hidrológico TETIS.**

**Anexo 5: Variación espacial de la precipitación total anual proyectada hacia el año 2059.**

**Anexo 1: Estaciones con registro de precipitación total mensual. Periodo 1980-1999**

Años	Estación Yantac											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	45.60	89.40	211.00	25.20	19.80	5.20	23.90	6.80	53.50	145.90	100.10	72.60
1981	159.10	223.70	133.50	51.60	5.20	5.50	3.70	25.70	58.30	33.50	39.80	123.30
1982	70.10	84.40	67.60	43.20	3.00	0.70	11.90	36.10	26.30	57.40	88.60	66.50
1983	91.00	68.10	104.00	47.50	8.70	13.30	0.00	1.40	22.80	36.20	41.80	124.40
1984	82.70	175.00	157.00	27.70	19.80	14.60	3.40	6.40	32.30	40.20	23.00	22.80
1985	29.70	84.30	93.00	113.80	61.40	34.70	2.90	7.80	38.30	0.00	50.00	40.70
1986	55.20	75.00	98.10	45.40	19.70	0.00	17.90	15.60	17.60	16.60	36.50	78.40
1987	105.40	94.60	47.60	14.30	5.20	4.00	10.60	12.80	12.40	16.00	35.70	65.60
1988	108.10	138.30	83.40	73.60	8.80	0.00	0.60	2.00	4.90	33.90	30.10	93.60
1989	107.90	113.60	126.70	50.00	22.30	29.70	17.00	55.90	41.50	52.20	19.30	19.00
1990	111.10	21.50	65.40	29.20	44.10	69.90	3.90	16.90	42.30	97.90	97.80	91.50
1991	36.60	81.90	103.20	39.60	31.50	17.70	19.40	0.20	33.30	72.20	40.90	20.80
1992	34.50	51.00	106.50	40.40	13.40	17.80	11.30	24.50	8.50	70.90	40.70	2.70
1993	95.40	110.60	88.70	95.80	25.50	8.50	7.00	27.00	4.40	34.90	81.90	58.00
1994	92.40	90.50	103.70	60.20	25.60	9.80	9.10	16.70	31.60	35.80	64.20	78.40
1995	91.20	47.00	110.10	33.00	22.30	4.10	3.40	12.30	84.50	58.60	75.70	63.60
1996	117.80	124.50	98.90	60.10	23.40	0.50	1.10	21.20	28.80	52.30	56.00	99.50
1997	114.60	199.80	70.20	41.60	27.80	0.00	10.10	62.10	67.10	42.80	136.60	153.90
1998	167.50	175.30	138.80	50.70	5.30	30.70	0.00	24.50	39.00	108.90	41.20	84.20
1999	126.40	289.50	133.70	128.30	29.20	41.40	23.40	6.20	57.50	65.80	105.00	130.70

Años	Estación Andahuasi											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00
1981	0.00	0.00	0.00	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1982	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1983	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1984	0.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1985	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1986	0.00	0.50	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1987	0.10	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00
1988	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80
1989	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00
1990	2.60	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1991	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1992	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1993	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1994	0.00	0.00	0.20	0.10	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1995	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1996	0.00	0.30	2.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



1997	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1998	0.00	8.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00
1999	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Años	Estación Huamantanga											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	45.30	14.60	52.70	1.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.90	82.30	70.50
1981	25.00	124.20	120.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.80	5.70	15.20	33.20
1982	51.70	71.10	79.10	51.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.50	40.40	22.20
1983	8.70	92.80	180.60	29.10	2.60	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00	7.70	47.70
1984	121.30	204.00	203.90	47.60	19.70	0.00	0.00	0.00	14.10	47.60	27.60	1.20
1985	12.40	108.90	103.60	8.90	0.00	0.00	0.00	0.00	4.90	5.70	7.30	29.00
1986	60.50	66.30	139.50	84.50	14.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.10
1987	136.30	117.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.80	2.80	3.10
1988	76.20	43.30	61.60	12.70	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.90	97.50
1989	120.60	94.80	167.90	0.20	0.60	0.00	0.00	0.00	0.10	0.50	0.70	0.20
1990	31.70	33.50	58.40	1.20	10.10	0.00	0.00	0.00	0.00	32.90	40.50	42.50
1991	16.10	50.20	115.40	18.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.60	8.60	8.90
1992	7.10	32.50	48.30	9.40	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	10.60	2.50	11.80
1993	101.40	95.40	155.60	49.50	7.80	0.00	0.00	0.00	2.90	7.80	48.10	49.10
1994	76.50	143.30	96.20	19.30	15.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.90	36.50
1995	75.20	61.30	77.70	15.60	9.40	0.00	0.00	0.00	2.70	11.90	39.20	53.60
1996	64.80	96.20	128.30	19.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.20	4.00	29.70
1997	53.30	121.20	33.10	3.30	4.50	0.00	0.00	1.20	20.20	5.70	33.90	105.80
1998	186.00	126.80	184.30	31.70	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40	3.70	2.90	26.70
1999	67.60	266.60	111.20	33.70	7.40	0.00	1.90	0.00	4.20	13.20	13.50	42.30

Años	Estación Huarangal											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1981	0.00	1.60	0.40	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.50	0.00	0.00	0.00
1984	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1985	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	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	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.10
1989	0.00	12.30	26.00	0.00	0.00	4.00	13.00	9.10	9.00	1.40	0.00	0.20
1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	41.30	11.90	0.00	0.00	0.00	0.00
1991	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1992	0.00	1.80	0.00	3.40	0.00	11.20	29.60	3.80	0.70	0.00	0.00	0.00
1993	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	2.50	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00
1994	0.00	0.00	0.00	0.00	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	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1996	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1997	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1998	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1999	0.00	3.80	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Años	Estación Huaros											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	119.70	19.00	64.50	24.90	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	66.10	68.60	60.40
1981	0.00	190.10	246.90	132.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.80	17.00	76.20
1982	106.50	160.10	18.40	34.50	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	11.80	38.80	40.40
1983	25.00	0.00	53.60	37.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	88.30
1984	213.10	285.00	279.00	152.70	45.70	0.00	0.00	0.00	0.00	49.60	123.40	101.10
1985	0.00	68.40	171.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	78.70
1986	53.30	115.10	91.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.20
1987	94.30	35.30	36.90	13.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.80
1988	99.90	43.90	26.60	77.00	7.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	101.00
1989	99.90	93.40	136.60	59.70	19.10	0.00	12.60	0.00	53.10	0.00	0.00	6.90
1990	29.30	19.40	32.70	12.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	103.30	87.90	10.70
1991	46.50	41.90	122.60	28.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.10	28.80	26.50
1992	28.30	7.90	75.00	19.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.80	0.00	34.90
1993	83.40	111.90	192.00	70.40	4.20	0.00	0.00	2.50	6.30	37.70	113.60	104.60
1994	97.10	155.90	141.70	81.90	9.60	0.00	2.60	4.10	10.70	4.00	102.60	51.50
1995	82.90	48.80	100.50	62.30	8.90	2.40	0.00	5.40	12.20	35.90	39.10	85.00
1996	89.10	149.00	128.80	59.80	8.40	0.00	0.00	0.90	5.00	12.90	14.20	48.10
1997	73.90	110.30	20.30	6.80	2.60	0.00	0.00	0.00	6.20	24.30	48.00	105.50
1998	139.00	122.90	150.20	28.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.70	29.60	15.90	38.30
1999	86.20	219.90	99.80	30.90	19.50	0.60	0.00	0.00	10.50	16.40	22.70	70.10

Años	Estación Huayan											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1981	3.50	0.10	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	3.70	0.00	0.00	1.60	0.00
1982	0.00	1.80	0.00	0.00	1.40	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1983	2.20	1.10	5.00	0.50	0.00	0.00	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
1984	0.00	3.50	1.00	0.00	1.80	0.00	0.00	0.10	1.90	0.00	0.00	0.30
1985	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.10	0.00	0.00	0.00	0.00
1986	0.00	0.30	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	14.40
1987	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60
1988	4.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.70	0.20	0.00	0.00	0.10
1989	0.00	12.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00	0.00
1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.70	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	8.90
1991	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00
1992	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	2.70	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00

1993	0.00	0.00	0.00	0.00	3.60	1.10	2.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1994	0.40	0.10	0.00	0.00	1.00	0.70	0.00	0.10	0.00	0.20	0.60	0.00
1995	0.00	0.00	1.70	0.00	0.00	0.00	1.20	1.80	0.60	0.00	0.00	0.00
1996	0.00	0.00	7.20	0.10	0.00	2.80	0.70	0.90	0.10	0.00	0.10	0.00
1997	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.10	0.10	1.70	0.00	6.70
1998	9.70	15.90	5.60	0.00	0.90	1.80	1.70	2.70	1.10	0.10	0.10	0.00
1999	3.60	12.00	0.90	0.10	0.00	2.00	1.30	1.40	0.50	0.00	1.50	0.00

Años	Estación Pachamachay											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	132.70	49.50	169.10	121.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	249.70	119.00	66.90
1981	64.50	265.70	298.20	98.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.00	47.30	185.70
1982	102.00	255.20	120.60	51.60	0.50	0.00	0.00	0.00	1.50	9.30	93.00	86.00
1983	105.20	68.70	135.30	15.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.60	335.70
1984	186.70	182.10	89.80	14.90	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	57.50	62.90	130.00
1985	139.60	266.90	101.50	19.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.60	0.90	53.60	102.10
1986	107.50	100.90	257.80	34.70	2.70	0.00	0.00	0.00	0.00	14.50	83.00	387.10
1987	450.90	129.00	153.20	100.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	128.00	120.40	96.90
1988	111.10	69.50	102.80	104.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47.90	109.60
1989	135.10	106.70	78.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	136.00	107.70	19.20
1990	37.40	11.40	77.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	56.10	131.40	154.50	75.50
1991	83.60	65.90	124.60	16.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.50	19.00	45.00
1992	42.70	84.90	70.00	52.50	0.00	0.00	0.00	0.00	19.40	36.20	37.00	57.50
1993	132.60	132.30	221.80	39.80	0.00	0.00	0.00	0.00	36.50	81.30	62.20	119.40
1994	166.60	150.90	168.40	32.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	33.30	22.50	89.20
1995	135.40	112.10	69.90	75.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.80	128.80
1996	92.20	161.50	103.40	82.70	14.80	4.30	0.00	3.30	1.70	7.00	12.60	76.40
1997	45.30	256.90	58.00	39.70	0.00	0.00	0.00	0.00	20.20	70.30	69.40	362.40
1998	506.00	335.10	227.50	72.30	0.00	0.00	0.00	0.00	21.30	48.10	45.50	147.30
1999	231.00	340.00	99.50	112.00	63.70	0.00	0.00	0.00	0.00	95.60	156.80	174.50

Años	Estación Pallac											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	23.80	21.60	11.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.30	0.00	0.00
1981	43.50	94.10	152.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1982	52.40	42.10	62.80	7.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.00	19.40	0.00
1983	15.00	158.00	215.20	20.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00
1984	18.50	124.10	164.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	0.00	12.60
1985	0.00	67.10	56.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1986	69.90	58.20	50.30	12.50	4.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	60.20
1987	41.30	40.20	29.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00
1988	60.80	72.20	25.50	27.50	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.00
1989	79.50	168.00	89.70	9.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00
1990	25.50	14.50	48.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.20	19.70	55.30

1991	18.50	28.70	77.60	6.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.40	2.00	0.00
1992	0.50	7.00	12.30	2.30	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	2.70	0.20	2.40
1993	28.50	84.60	141.20	16.20	4.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	9.00	23.30
1994	53.80	62.30	114.20	27.10	2.00	0.00	0.00	0.00	2.60	0.00	11.00	14.30
1995	37.60	55.40	52.90	9.90	2.50	0.00	1.00	0.00	0.00	3.40	21.60	32.70
1996	47.30	98.00	79.70	15.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30	0.00	0.40
1997	21.00	79.20	35.90	4.90	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	3.20	50.60	162.40
1998	150.00	81.20	167.40	30.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	23.90
1999	54.30	185.70	82.00	24.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.10	2.00	4.80

Años	Estación Pariacancha											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	141.70	59.50	178.20	40.50	11.10	8.00	3.00	4.30	10.90	120.20	80.90	80.20
1981	165.40	215.90	140.70	17.90	1.00	0.20	0.00	19.80	11.50	32.60	92.50	93.90
1982	113.50	187.60	73.10	46.10	0.00	0.00	3.40	18.50	21.70	64.10	88.60	57.30
1983	122.60	71.00	92.00	62.80	0.00	0.00	0.00	0.00	33.60	85.20	35.00	149.60
1984	105.50	223.20	164.80	37.60	11.90	15.60	2.90	6.60	8.90	88.50	71.30	107.50
1985	47.40	143.90	122.00	74.30	24.50	7.70	1.30	0.00	52.70	7.20	45.70	87.50
1986	176.00	144.60	145.50	67.00	31.00	0.00	1.50	20.70	0.00	15.60	59.90	162.10
1987	173.80	113.20	90.80	31.40	5.80	0.00	3.90	13.70	21.20	24.00	62.70	135.90
1988	173.80	132.50	129.60	105.50	22.80	0.00	0.00	6.20	31.30	49.90	37.10	95.10
1989	171.90	193.40	157.50	51.80	19.30	7.20	11.20	11.50	21.50	75.00	7.70	7.40
1990	130.60	43.50	51.30	28.60	14.50	15.90	0.00	3.00	5.60	132.30	110.20	61.00
1991	47.90	76.90	134.90	36.40	25.80	0.00	4.00	0.00	19.50	82.00	30.30	47.90
1992	39.40	47.00	121.10	46.40	5.50	0.00	6.50	0.00	7.00	62.40	19.40	47.90
1993	137.60	115.70	173.20	94.30	19.30	0.00	1.40	2.50	24.90	57.40	99.80	148.30
1994	151.60	141.80	163.00	64.50	33.30	4.50	2.00	0.00	29.40	19.90	50.40	59.50
1995	103.60	70.60	129.30	59.80	17.30	4.20	1.00	12.20	26.00	48.30	39.80	115.80
1996	105.90	146.70	129.30	58.30	20.90	0.00	0.00	3.60	21.90	37.30	36.30	75.00
1997	117.20	165.60	32.80	20.90	8.10	2.20	2.70	12.60	39.80	35.90	71.50	110.00
1998	175.70	113.10	152.70	37.30	0.70	5.00	0.00	4.90	24.10	65.70	30.10	46.40
1999	113.40	226.50	125.70	53.00	28.60	9.10	1.40	5.30	32.70	63.20	54.20	119.80

Años	Estación Pallanga											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	99.70	84.20	275.60	66.80	51.60	39.20	34.90	11.40	142.30	182.20	116.50	40.80
1981	290.90	248.80	332.10	59.20	5.20	5.20	23.00	37.60	72.30	160.00	204.60	235.10
1982	328.50	155.00	347.50	19.00	19.90	2.90	8.30	30.00	39.40	51.90	135.10	144.40
1983	160.90	63.90	10.30	81.70	6.80	9.80	10.80	2.50	9.40	83.60	166.00	115.10
1984	46.00	286.40	345.30	14.10	22.50	17.50	33.10	36.40	29.90	88.40	105.60	64.80
1985	54.60	182.40	253.20	123.40	51.60	81.20	32.20	17.30	16.60	56.30	120.10	236.80
1986	122.20	158.50	130.90	30.50	61.50	1.90	51.60	50.20	14.10	37.40	63.60	71.90
1987	320.10	134.20	30.30	22.20	26.80	20.40	23.50	10.20	14.80	15.10	61.80	87.50
1988	77.60	230.60	46.30	124.50	19.80	1.80	16.10	21.30	24.30	129.70	268.40	155.30

1989	41.90	112.70	110.20	84.60	31.50	27.30	12.80	43.20	60.10	64.40	39.10	65.90
1990	217.40	56.70	142.60	57.90	42.20	42.50	27.30	68.40	23.60	58.30	137.90	53.30
1991	59.90	98.80	382.60	45.40	64.70	29.50	9.90	10.20	32.10	83.60	29.20	13.90
1992	95.90	95.60	248.00	79.80	37.60	51.90	12.80	10.60	7.10	147.20	52.50	35.30
1993	372.50	345.30	276.30	127.10	45.60	1.30	18.10	7.10	17.10	91.30	126.70	73.40
1994	131.80	91.90	209.70	65.60	54.30	8.40	8.60	16.30	24.00	51.60	151.90	188.00
1995	69.60	83.10	53.50	79.70	57.20	15.30	15.50	10.20	125.00	64.60	43.60	88.30
1996	127.90	182.10	243.00	104.50	28.20	10.70	17.90	6.80	31.00	180.70	47.50	107.90
1997	176.30	390.50	33.10	131.70	53.10	3.20	16.10	94.80	91.20	224.70	39.80	237.30
1998	30.00	121.90	222.80	68.50	9.20	39.10	32.90	19.20	75.50	201.30	11.30	104.60
1999	171.80	471.30	335.30	60.60	19.70	40.10	8.30	8.90	51.10	157.90	73.10	293.40

Años	Estación Santa Cruz											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	80.20	50.20	65.30	33.80	2.50	5.20	8.50	0.00	2.30	75.60	70.90	39.20
1981	96.40	203.80	164.00	12.00	0.00	0.00	9.50	4.80	4.50	65.90	80.80	68.30
1982	102.30	169.80	109.40	44.90	0.00	0.00	7.40	3.90	12.40	163.50	77.90	38.60
1983	45.60	42.80	149.10	15.20	2.10	4.40	0.00	0.00	12.70	78.40	27.20	137.30
1984	38.70	225.80	208.10	43.20	43.00	0.00	0.00	1.40	16.70	47.40	77.10	54.50
1985	7.40	105.20	97.90	78.70	23.00	1.30	0.00	6.90	7.80	22.70	44.70	60.90
1986	143.40	136.20	113.40	84.70	34.40	0.00	16.90	3.00	10.20	46.10	71.10	111.90
1987	160.30	106.90	48.10	2.10	1.60	0.00	0.00	4.10	5.90	4.00	14.50	35.30
1988	111.40	166.30	67.10	112.40	18.90	0.00	0.00	8.10	15.20	37.10	46.20	88.00
1989	106.30	122.40	157.00	163.50	65.50	5.60	9.90	12.30	12.50	51.40	5.70	0.00
1990	30.30	9.10	51.70	5.50	13.70	3.70	0.00	0.00	0.00	96.80	80.80	29.00
1991	34.90	47.30	89.00	0.00	29.30	0.00	0.00	0.00	10.30	31.00	33.20	51.50
1992	5.80	24.30	45.80	54.30	0.00	0.00	0.00	0.00	6.50	49.00	0.00	22.40
1993	67.90	73.70	191.10	59.70	13.90	0.00	1.80	0.00	7.20	53.10	72.90	89.00
1994	96.20	133.10	136.40	52.00	27.30	0.00	0.00	2.00	18.40	18.00	56.90	68.60
1995	98.70	33.00	92.30	50.60	5.50	0.00	2.00	3.00	6.50	45.40	49.20	81.80
1996	129.00	133.00	119.10	56.40	8.30	0.00	0.00	9.60	9.10	26.80	31.80	59.60
1997	102.40	148.60	35.60	7.80	4.60	0.00	0.00	0.60	9.80	28.90	88.20	141.20
1998	138.00	112.30	157.30	24.20	0.00	0.00	0.00	2.60	15.80	55.50	25.10	54.20
1999	74.70	230.50	87.10	54.10	40.60	5.00	3.50	3.80	25.00	41.10	38.00	100.90

Años	Estación Tupe											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	18.80	15.10	26.10	9.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	15.40	63.40	88.60
1981	142.10	211.70	215.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	78.60	115.50	145.80
1982	137.90	246.80	215.20	110.40	0.00	0.00	0.00	0.00	4.80	9.60	36.90	84.90
1983	179.80	79.80	179.20	0.00	0.00	3.60	0.00	0.00	0.00	49.20	38.00	178.80
1984	132.80	263.60	290.70	40.60	9.60	1.80	0.00	0.00	0.00	94.00	112.00	4.80
1985	0.00	202.00	219.00	78.40	0.00	0.00	0.00	0.20	9.00	4.00	4.80	121.60
1986	172.80	193.20	136.20	102.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	4.40	44.10	74.20

1987	238.90	159.40	15.80	80.60	20.00	0.00	0.00	0.00	31.20	105.10	98.10	62.10
1988	140.80	104.60	118.20	211.10	0.00	0.00	0.00	0.00	6.80	39.60	50.00	106.10
1989	197.60	191.30	200.20	85.40	0.00	0.00	0.00	0.00	18.40	62.90	20.00	45.10
1990	94.80	98.40	102.80	0.40	0.00	2.60	0.00	1.40	2.80	125.20	136.80	15.90
1991	124.80	62.40	186.00	56.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.30	163.00
1992	57.00	32.90	77.30	31.40	3.60	0.00	0.00	0.00	10.80	86.80	33.00	44.70
1993	104.80	85.50	203.60	123.70	0.80	0.00	0.00	0.20	16.10	55.20	100.10	151.40
1994	125.20	232.90	252.00	20.20	0.30	0.00	0.00	0.00	1.70	1.00	8.40	98.50
1995	52.20	0.20	59.70	46.00	0.00	0.00	0.00	1.20	10.80	4.10	34.70	142.80
1996	211.20	187.20	248.80	52.70	0.10	0.00	0.00	2.60	0.00	10.70	33.10	32.60
1997	201.40	126.10	59.50	9.10	0.30	0.00	0.10	0.10	0.50	35.60	44.00	161.80
1998	244.10	72.10	217.40	104.50	16.60	0.10	0.10	0.10	0.20	61.10	99.90	58.10
1999	116.20	232.90	259.20	17.10	0.00	0.00	0.00	0.00	22.10	14.40	40.50	153.00

Anexo 2: Calculo de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>). Periodo 1980-1999

Años	Estación Alcantarilla											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	142.61	123.67	133.08	125.77	95.57	74.23	70.32	68.68	82.69	101.06	115.45	116.82
1981	128.30	119.61	119.14	103.51	78.25	62.39	59.75	70.30	80.45	94.16	101.26	120.57
1982	133.77	122.44	126.98	111.54	98.44	69.08	67.76	68.87	81.94	101.92	103.04	125.86
1983	135.69	127.24	140.06	117.77	101.14	79.53	73.89	81.37	82.42	107.73	116.45	120.53
1984	136.97	123.13	129.34	106.66	96.54	71.49	76.72	82.22	89.39	106.24	101.52	138.97
1985	137.23	128.22	138.92	111.64	87.89	67.88	63.00	65.81	74.78	93.39	104.49	123.82
1986	134.80	119.41	122.94	108.46	85.56	57.44	64.18	60.40	78.94	95.29	100.48	114.35
1987	132.66	132.90	133.61	115.74	87.76	63.81	68.73	71.11	94.40	98.43	107.27	127.14
1988	115.91	121.86	124.22	111.97	100.88	69.55	59.05	68.47	77.15	97.94	108.74	115.98
1989	132.84	122.94	128.70	104.79	79.31	57.91	67.25	66.69	69.39	101.43	106.35	131.41
1990	146.79	137.47	140.42	116.63	82.00	59.76	59.33	66.47	82.34	95.03	96.35	112.67
1991	135.44	130.63	131.81	109.60	92.09	66.28	64.12	67.19	81.19	86.11	105.43	126.43
1992	136.69	126.43	140.75	110.49	103.41	62.10	54.38	65.27	77.33	96.27	112.03	133.43
1993	134.14	128.96	135.57	115.75	83.01	74.66	61.66	75.50	86.71	99.63	164.52	119.80
1994	124.55	111.11	134.73	112.12	86.95	66.26	59.79	68.10	94.23	91.33	106.82	109.73
1995	130.73	128.22	134.82	115.14	97.57	70.56	55.58	70.96	78.07	95.06	117.83	144.95
1996	138.14	134.77	128.56	109.83	89.58	45.90	57.63	69.64	81.97	92.05	98.56	117.72
1997	129.10	131.69	135.94	107.05	104.99	92.68	90.71	86.22	93.74	107.87	106.02	107.57
1998	122.26	113.97	139.23	126.07	89.19	67.86	67.17	65.38	77.55	108.77	104.46	119.78
1999	123.00	112.87	128.45	113.47	93.62	60.89	57.32	71.01	78.94	100.68	109.35	114.66

Años	Estación Picoy											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	92.35	88.38	90.76	92.95	91.55	88.95	89.94	98.27	108.21	98.07	93.24	100.48
1981	89.09	76.99	81.32	93.07	91.94	84.71	91.42	93.27	106.68	99.31	83.55	91.43
1982	89.45	76.85	85.86	87.78	94.96	85.98	96.67	106.82	100.38	103.56	95.36	103.16
1983	110.87	101.52	90.62	89.40	95.04	85.95	95.07	101.34	98.05	110.93	112.09	90.50
1984	85.13	71.63	77.52	80.10	81.42	76.66	90.17	99.55	104.01	98.48	92.07	100.47
1985	91.54	73.69	83.80	78.64	90.32	87.07	94.92	99.35	103.37	102.48	107.80	96.56
1986	90.11	69.93	79.98	81.77	93.40	90.14	98.79	99.59	103.03	111.64	110.40	101.13
1987	93.89	82.21	99.67	94.90	97.89	93.58	99.26	108.97	108.17	117.35	100.30	96.14
1988	85.64	91.66	93.55	84.71	96.35	92.72	100.72	109.98	103.77	108.78	97.90	96.58
1989	85.81	78.09	74.76	83.50	95.59	83.14	99.00	102.13	103.91	95.56	114.10	109.34
1990	96.84	90.64	102.10	93.89	93.63	84.56	94.39	111.15	116.53	106.79	103.33	109.19
1991	112.53	93.20	95.48	95.66	94.29	94.30	103.33	110.21	112.40	108.13	108.61	117.22
1992	117.75	103.09	96.90	96.21	97.67	88.93	97.38	106.49	111.40	112.95	110.91	115.73
1993	98.40	88.41	89.49	87.94	95.65	94.23	97.92	108.74	109.50	109.95	99.50	95.37
1994	96.69	83.65	95.44	90.69	95.54	89.43	97.65	103.92	100.94	112.58	102.67	103.17
1995	99.64	83.74	85.54	92.03	91.75	86.40	92.20	103.25	103.92	102.11	100.71	100.29
1996	81.72	79.26	79.13	82.57	87.12	88.58	92.54	96.52	100.85	106.49	104.99	98.93
1997	83.20	81.79	102.96	96.61	95.18	81.54	95.07	101.66	99.72	107.49	100.13	89.70

1998	96.72	79.31	85.97	89.26	97.06	84.48	91.15	97.47	107.22	104.74	104.41	94.16
1999	82.65	67.10	77.31	80.55	81.52	84.55	89.38	102.53	95.45	98.65	100.79	87.34

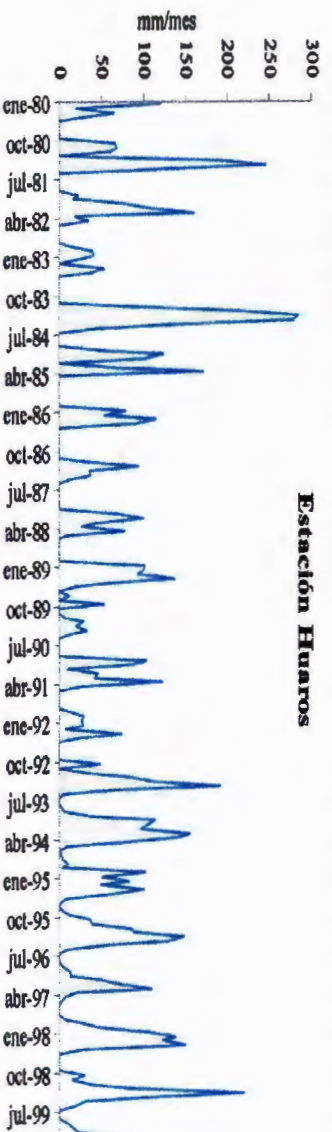
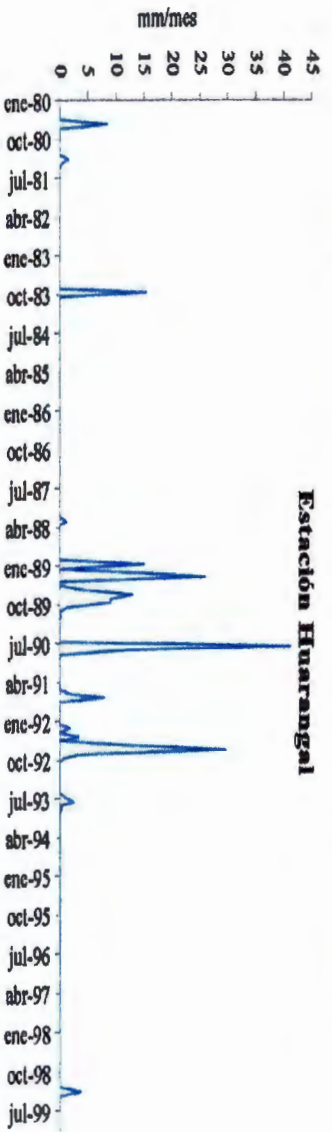
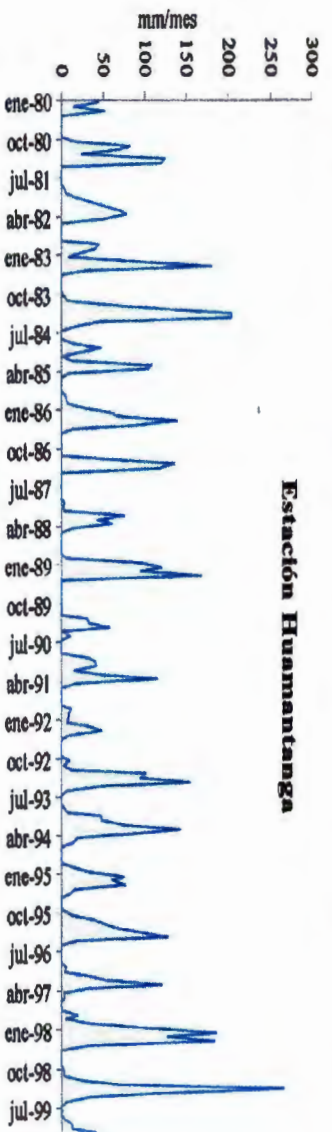
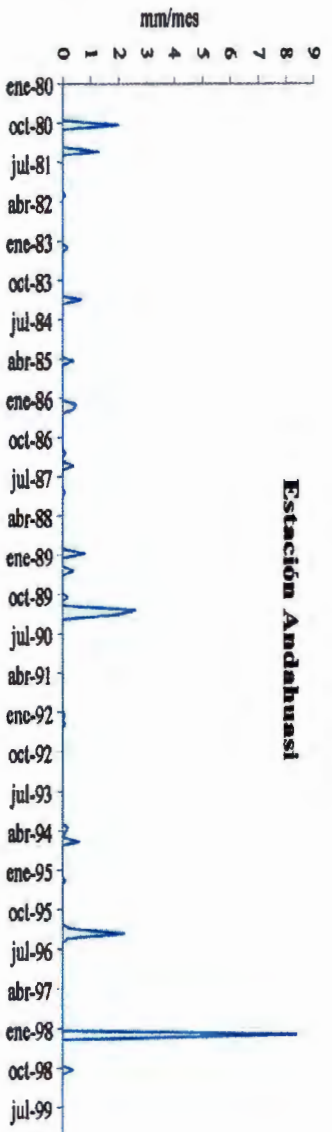
Años	Estación Matucana											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	133.72	121.62	124.59	111.58	104.16	96.25	102.89	113.42	121.51	125.78	135.23	135.61
1981	128.90	116.21	112.97	115.34	108.23	102.08	118.90	132.00	138.08	147.11	139.25	135.00
1982	143.70	114.99	128.86	121.91	109.97	105.92	118.90	112.83	132.09	148.98	144.68	149.61
1983	143.86	117.52	116.81	111.47	108.66	103.18	115.71	117.89	125.36	148.98	144.68	128.44
1984	108.10	90.24	93.30	94.92	97.33	91.04	99.37	117.14	125.22	126.12	125.45	129.79
1985	115.36	101.07	108.60	94.76	100.61	108.14	106.29	113.48	121.01	141.77	136.38	117.90
1986	114.06	92.36	108.45	102.44	109.47	100.54	116.54	120.65	130.06	148.31	141.09	129.77
1987	115.95	112.89	120.03	109.23	108.35	105.00	109.52	119.98	130.30	142.16	140.79	128.22
1988	110.39	111.30	112.30	100.31	107.26	111.47	114.17	122.91	128.80	147.46	141.70	125.47
1989	111.78	92.56	93.05	98.38	101.19	88.32	103.13	108.46	119.20	131.37	135.55	137.47
1990	128.71	119.07	121.35	108.39	97.14	93.14	98.31	114.32	124.66	123.31	113.14	122.11
1991	130.57	108.16	101.52	102.55	97.17	90.33	94.96	106.64	116.93	125.15	127.08	129.49
1992	127.46	119.32	116.46	103.83	99.21	90.88	95.17	112.77	121.75	127.98	132.14	137.12
1993	119.62	101.55	115.02	102.84	100.49	95.53	102.94	111.16	122.04	127.80	126.68	125.21
1994	127.50	108.20	120.54	110.36	106.73	101.88	117.91	121.10	128.84	145.08	140.67	137.30
1995	133.15	118.14	122.08	115.52	112.89	99.44	107.23	121.73	128.51	136.06	137.06	137.11
1996	113.67	115.84	108.93	109.25	111.18	103.47	112.30	123.27	129.37	142.52	142.95	141.32
1997	117.63	118.06	137.02	123.96	120.75	107.87	120.80	137.44	143.30	160.21	152.12	141.77
1998	135.81	122.40	122.08	127.86	121.74	107.41	116.41	130.73	151.67	162.43	160.29	152.58
1999	142.47	116.13	128.61	120.04	112.41	113.93	122.51	136.49	140.75	154.25	154.39	141.02

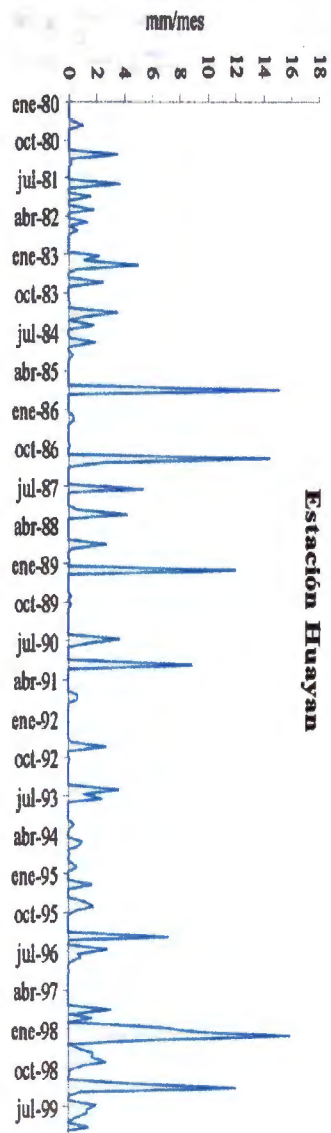
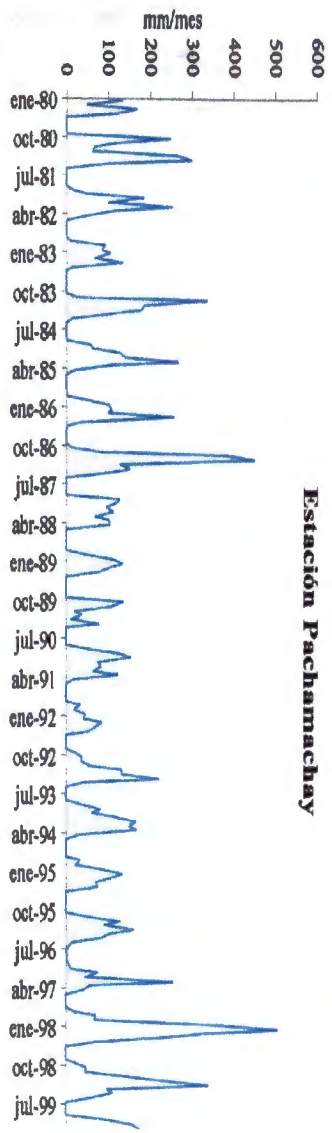
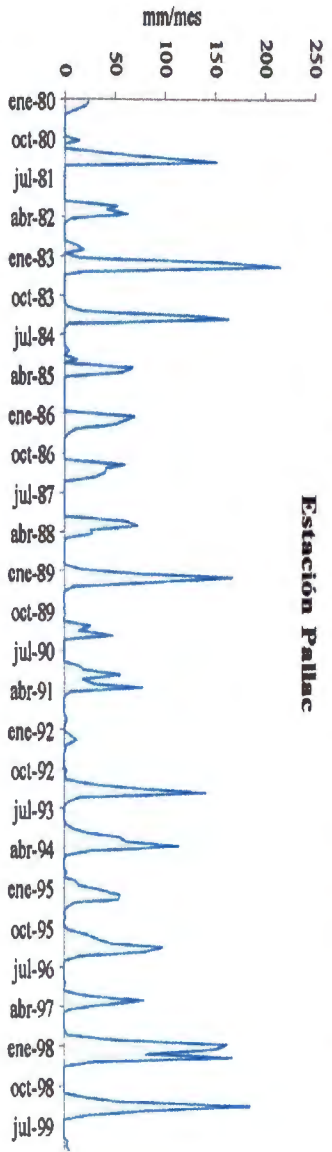
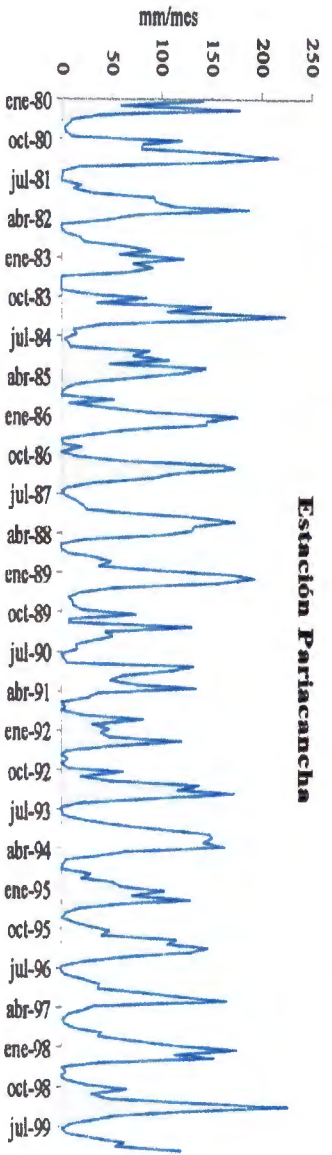
Años	Estación Huayan											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	169.29	161.25	170.70	153.39	119.24	92.31	89.78	101.67	114.04	143.32	147.94	153.01
1981	163.01	151.96	167.57	139.27	121.29	93.41	85.18	99.16	119.85	142.53	143.52	156.38
1982	165.55	155.97	175.03	151.09	125.56	92.16	94.34	95.41	119.70	138.73	124.26	163.01
1983	162.98	144.48	159.41	132.19	117.44	103.45	87.10	100.51	111.35	141.06	151.95	159.11
1984	173.92	161.13	165.02	142.48	128.00	92.52	96.93	110.29	124.82	147.17	140.65	170.92
1985	175.80	164.50	174.47	148.09	128.79	95.93	89.78	107.89	114.48	140.77	151.54	162.77
1986	177.04	157.50	155.08	139.65	114.62	85.13	86.33	90.89	114.49	144.64	145.15	156.70
1987	167.15	155.12	152.05	138.00	114.62	83.07	88.82	100.81	126.42	140.01	147.80	161.03
1988	173.85	159.13	155.79	140.19	117.90	100.78	98.82	104.11	113.54	148.27	153.95	158.22
1989	179.20	152.33	155.74	146.79	116.92	82.32	88.32	95.88	107.86	143.16	151.27	170.63
1990	178.53	159.96	158.80	146.75	121.38	80.19	83.52	100.53	122.12	144.00	149.66	157.10
1991	167.73	151.61	150.19	142.94	113.69	94.24	84.21	96.92	116.05	123.93	141.90	164.26
1992	171.93	157.16	153.52	125.19	124.04	83.75	68.78	87.58	104.13	127.79	139.41	158.69
1993	154.24	149.45	163.98	134.63	97.80	86.58	75.09	94.47	109.02	134.77	125.30	142.94
1994	154.46	147.49	164.00	140.18	109.81	87.44	83.48	90.31	123.89	123.76	131.89	141.06
1995	156.91	154.85	170.15	140.81	125.60	101.52	81.55	87.65	106.89	129.51	137.84	165.65

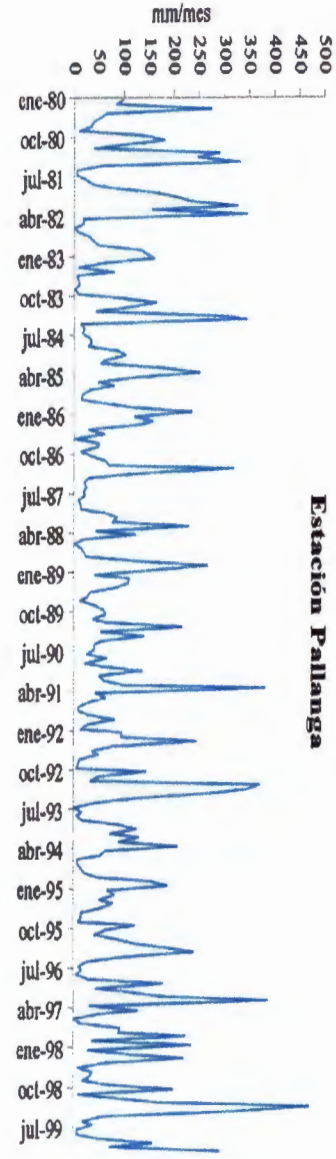
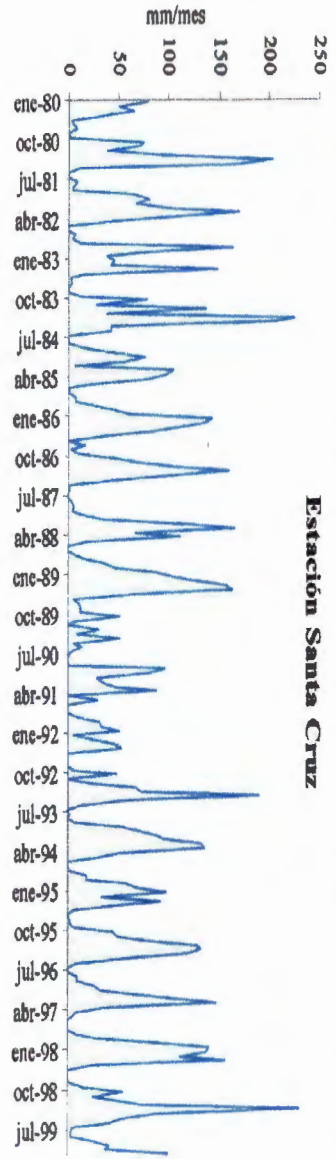
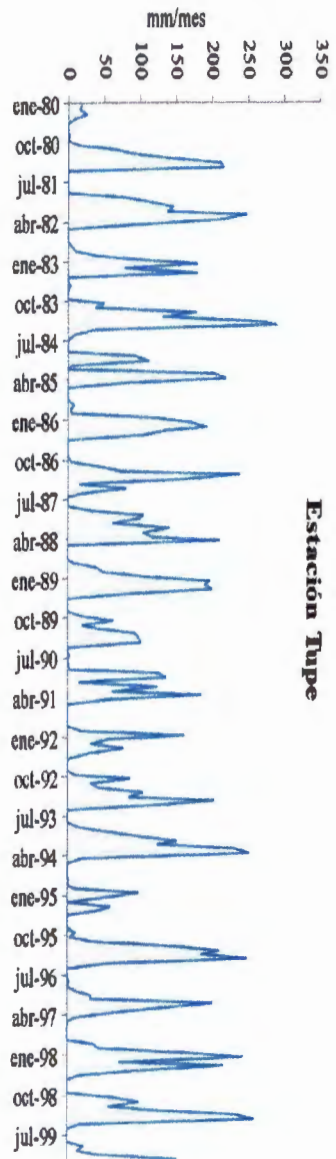
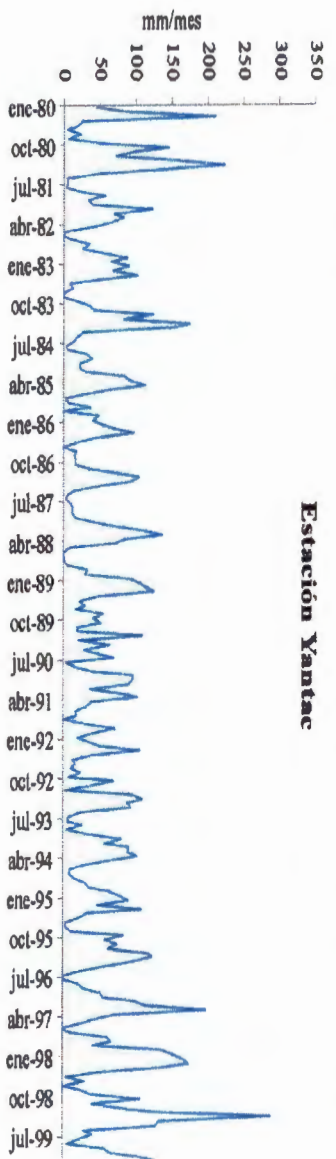


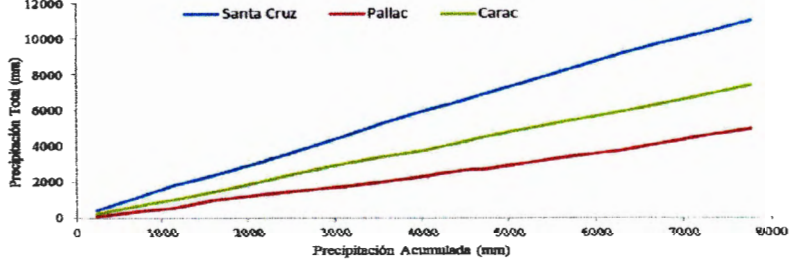
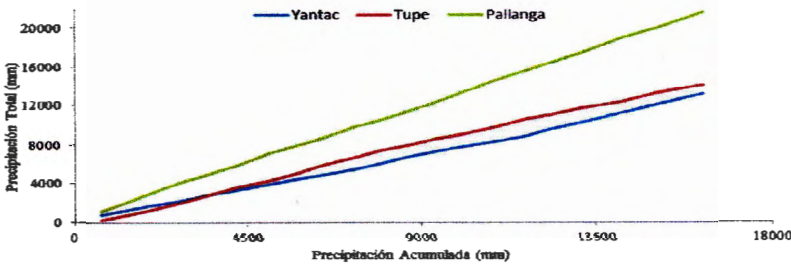
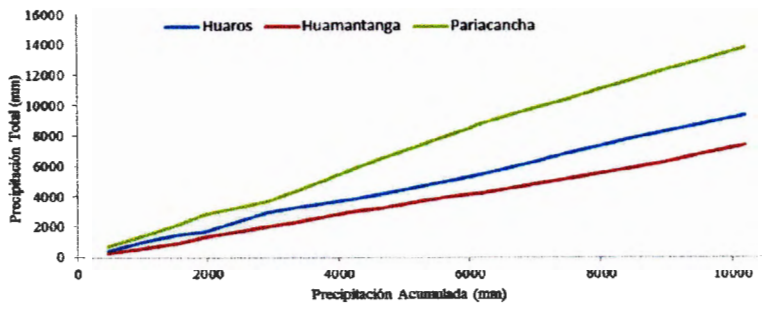
1996	173.17	169.24	166.23	138.16	116.85	77.01	89.35	95.71	113.70	131.13	129.61	150.61
1997	156.23	157.53	170.60	140.81	109.06	105.20	107.24	107.55	115.63	126.93	134.16	132.58
1998	142.74	134.42	159.50	144.58	113.03	82.02	80.61	86.03	108.15	137.85	133.38	143.70
1999	154.43	138.70	167.97	147.13	127.67	91.92	82.68	95.19	112.80	137.77	131.84	140.56

**Anexo 3: Hidrograma de las estaciones pluviométricas y diagramas doble masa**











## Anexo 4: Aplicación del modelo hidrológico TETIS

### 1. Creación de inputs

#### 1.1. Creación del fichero de evento

En base a la información de temperatura se calcula la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) mediante la fórmula de Hargreaves. Si se tuviera información adicional de humedad relativa, velocidad del viento y otros, se puede utilizar la fórmula de Penman – Monteith.

La información de las estaciones de temperatura y los datos de ET<sub>o</sub> calculados se debe ordenar de la misma forma que se indica en la Figura 31, y luego se debe guardar el archivo creado en un formato tipo: Texto con formato (delimitado por espacios) (\*.prn).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	120					Numero de datos a simular			
2	349860	269046	310534	221359		Coordenada Este de las Estaciones			
3	8690836	8733385	8792661	8777272		Coordenada Norte de las Estaciones			
4	2431	350	3075	120		Altitud o cota			
5	133.72	169.29	92.35	142.61		Primer dato de ET <sub>o</sub> (Enero 1980)			
6	121.62	161.25	88.38	123.67					
7	124.59	170.7	90.76	133.08					
8	111.58	153.39	92.95	125.77					
9	104.16	119.24	91.55	95.57					
10	96.25	92.31	88.95	74.23					
11	102.89	89.78	89.94	70.32					
12	113.42	101.67	98.27	68.68					
13	121.51	114.04	108.21	82.69					
14	125.78	143.32	98.07	101.06					
15	135.23	147.94	93.24	115.45					
16	135.61	153.01	100.48	116.82					
17	128.9	163.01	89.09	128.3					
18	116.21	151.96	76.99	119.61					
19	112.97	167.57	81.32	119.14					
20	115.34	139.27	93.07	103.51					

Se ordena sucesivamente hasta el ultimo dato (Diciembre 1999)

A Primera estacion  
B Segunda estacion  
C Tercera estacion  
D Cuarta estacion

Figura 1: Orden de los datos de ET<sub>o</sub> para crear el fichero de simulación del modelo TETIS.

La cantidad y el nombre de las estaciones a la cual corresponde los datos de la Figura 31, se ordena de la forma descrita en la Figura 32. El formato en el cual se guarda esta información también es de tipo: Texto con formato (delimitado por espacios) (\*.prn).

La información de precipitación y caudal observado se ordena de la misma forma que la ET<sub>o</sub> y se guarda el archivo con el mismo tipo de formato.

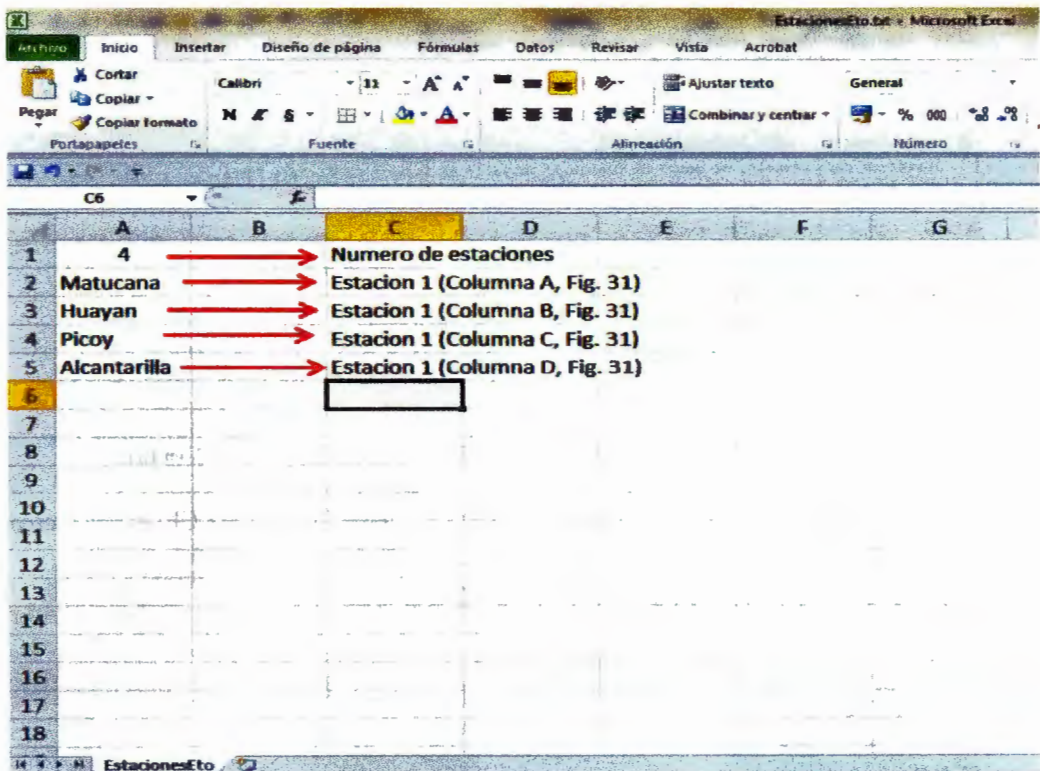
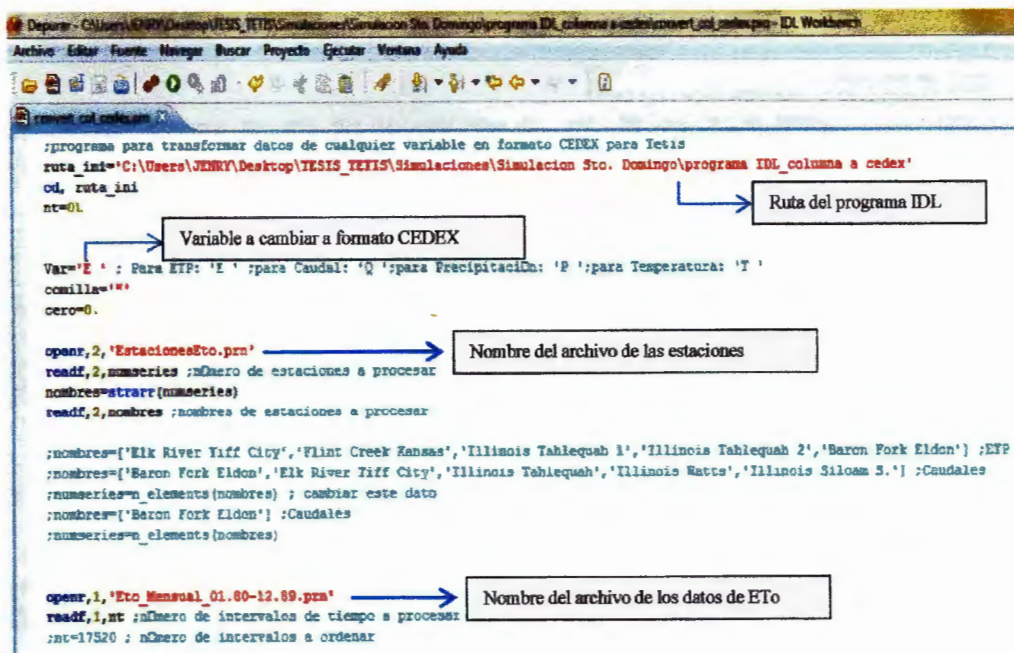


Figura 2: Orden de las estaciones de ETo para crear el fichero de simulación del modelo TETIS

Luego de tener los datos de ETo, precipitación y caudales ordenados adecuadamente, se realiza el cambio de formato a CEDEX (compatible con TETIS) con la ayuda del programa IDL (*Powering Visualization and Analysis*). Figura 33.





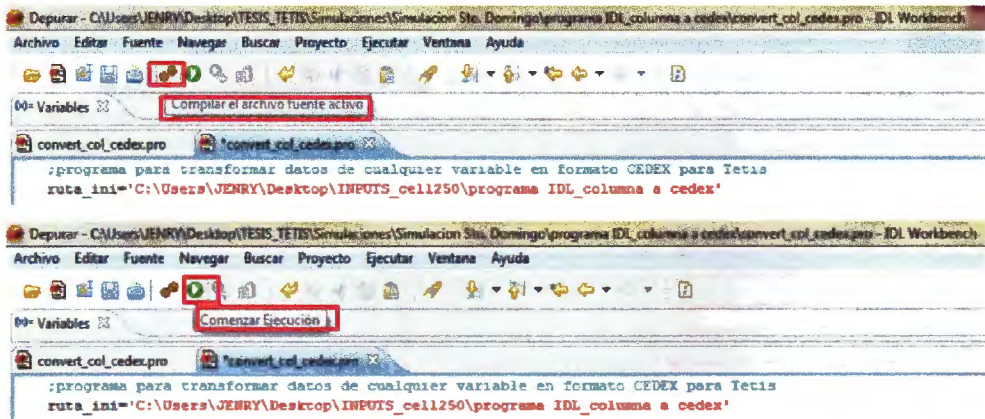


Figura 3: Secuencia de comandos para cambiar los datos de ETO a CEDEX en IDL.

Luego de tener los datos de ETO, precipitación y caudal en formato CEDEX, se crea el archivo de Simulación de evento. Figura 34.

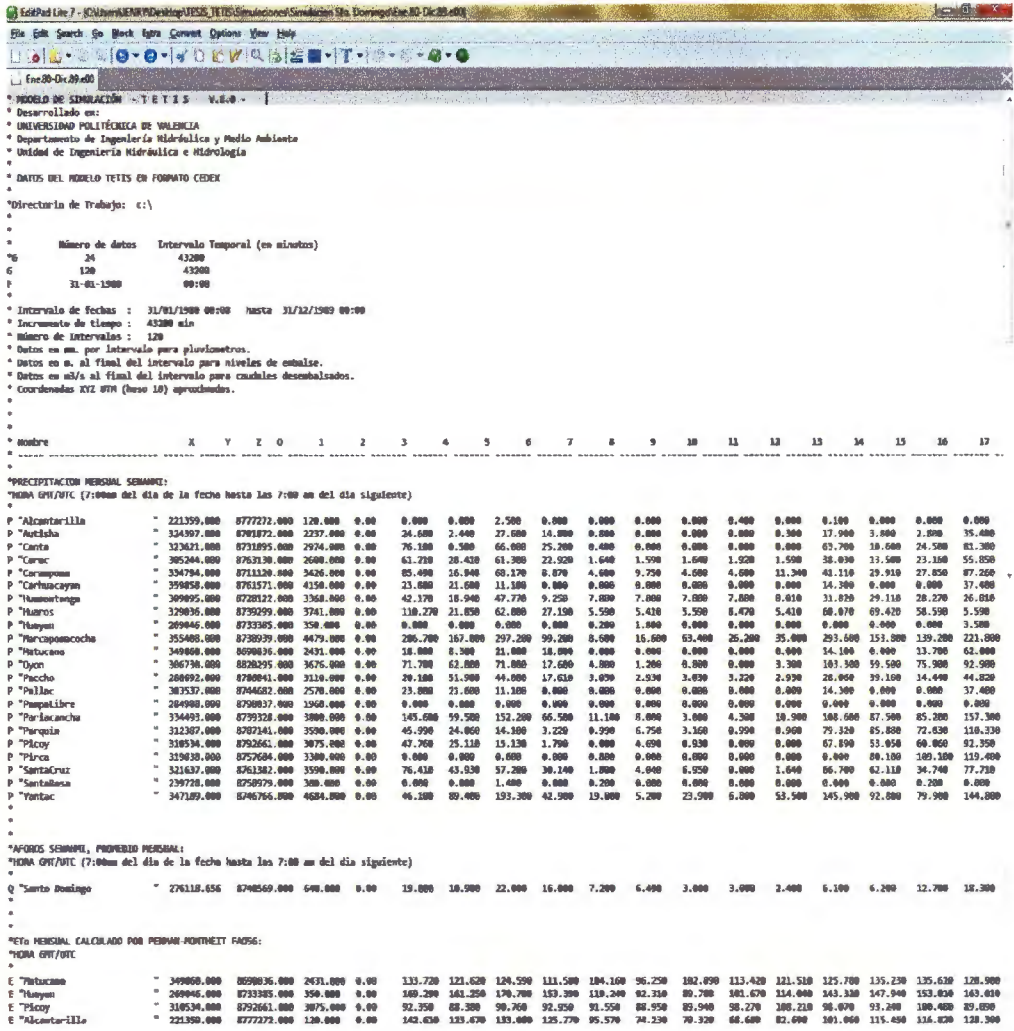


Figura 4: Fichero de simulación de evento en formato CEDEX para TETIS.



### 1.2. Mapas derivados del modelo de elevación digital (DEM)

En base al DEM y con ayuda de herramientas GIS, se generaron los mapas en formato ASCII: i) dirección de flujo, ii) celdas acumuladas, iii) pendientes ( $S_0$ ) y iv) velocidad de flujo en ladera ( $V=1.4142*\sqrt{S_0}$ ).

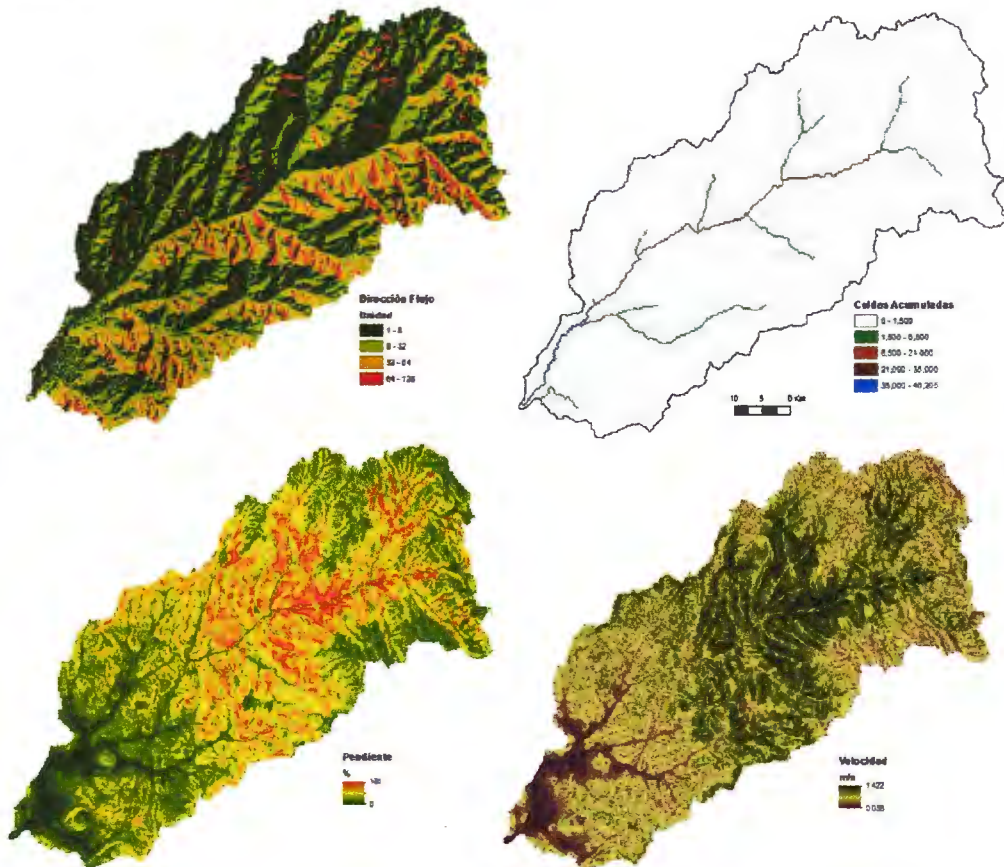


Figura 5: Mapas derivados del DEM para la aplicación del modelo TETIS.

### 1.3. Mapa derivado de la cobertura vegetal

Para poder simplificar la gran variedad de usos que se le da al suelo, el mapa de cobertura vegetal fue reclasificado de acuerdo a las ocho categorías que se describen a continuación:

- Montaña matorral.- Se le asigna tres tipos de cobertura vegetal, matorral boscoso de transición, landas y matorrales y vegetación esclerófila, entre sus características predomina la totalidad del porcentaje de recubrimiento de la superficie sobre la que crecen.
- Pastizales naturales.- Dentro de esta categoría se incluye toda área cuya vegetación predominante consiste en hierbas y pastizales.

- Vegetación escasa.- Todo espacio que este ocupado por roca o donde no exista ningún tipo de vegetación.
- Regadío.- Cultivos regados permanente o periódicamente, usando una infraestructura permanente (canales de riego, redes de drenaje). La mayoría de estos cultivos no pueden cultivarse sin un aporte artificial de agua.
- Frutales.- Parcelas plantadas con árboles frutales y terrenos principalmente agrícolas, especies frutales simples o mezclados, árboles frutales asociados con superficies de pastos permanentes.
- Hortalizas.- Tierras dedicadas al cultivo tradicional de verduras y hortalizas. Suelen ser cultivos estacionales con poco desarrollo de biomasa y que habitualmente sólo cubren un pequeño porcentaje del terreno sobre el que están cultivadas. En esta categoría se encuentran las áreas determinadas como mosaico de cultivos.
- Ríos y ramblas.- En esta categoría se incluye toda superficie de agua como, ríos, ramblas, lagos, etc.
- Nieve.- Toda zona recubierta por glaciares y nieve permanente.

Posteriormente, para calcular la evapotranspiración de los cultivos, además de la ETo es necesario determinar el coeficiente de cultivo o Kc, denominado también factor de vegetación. (Ramírez, 2012).

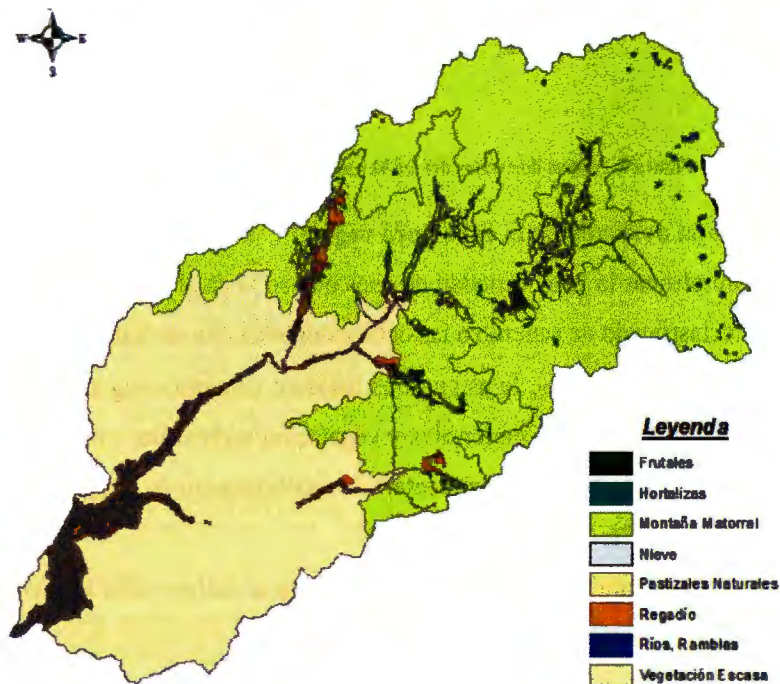


Figura 6: Mapa de cobertura vegetal para aplicación del modelo TETIS.

#### 1.4. Mapa derivado de la textura y geología

En base a los mapas de textura y geología se generan los parámetros hidráulicos del suelo y subsuelo: i) Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo ( $H_u$ ); ii) Conductividad hidráulica del suelo ( $K_s$ ); iii) Conductividad hidráulica del acuífero ( $K_p$ ); iv) Conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso por percolación, ( $K_{ps}=0.1 \cdot K_p$ ); v) Conductividad hidráulica horizontal saturada del suelo, ( $K_{ss}=K_s$ ); vi) Conductividad hidráulica horizontal saturada del estrato rocoso, ( $K_{sa}=K_p$ ).

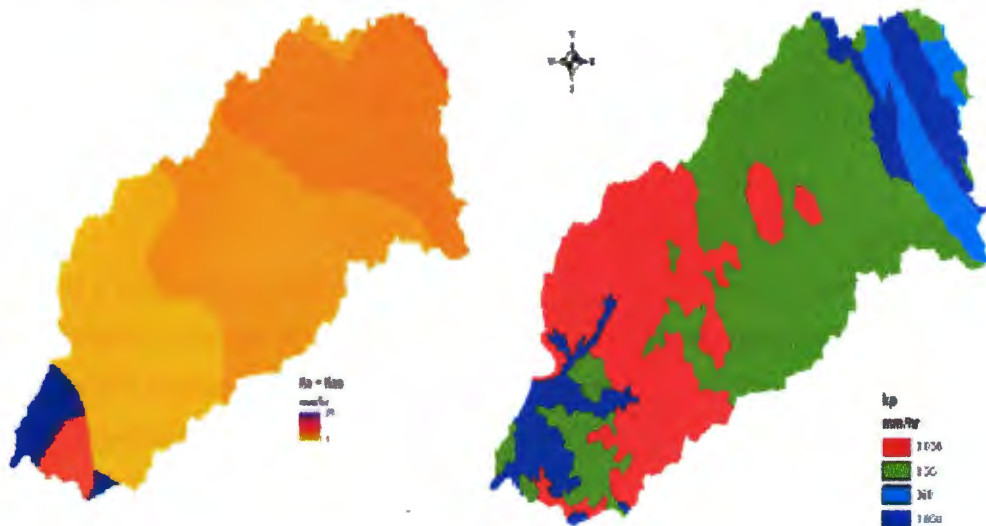


Figura 7: Parámetros hidráulicos del suelo (figura izquierda) y subsuelo (figura derecha).

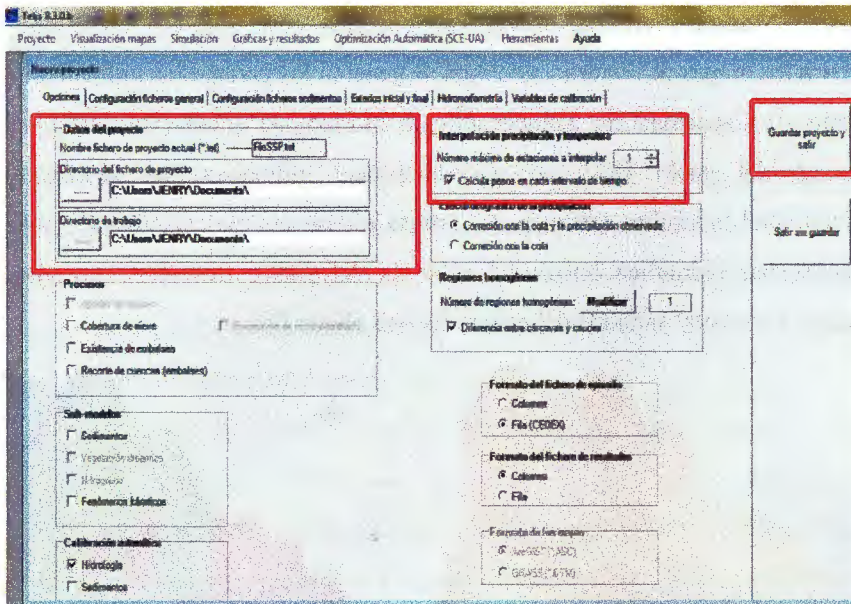
## 2. Secuencia de comandos para la simulación en TETIS

- Iniciamos el programa TETIS y creamos un “Nuevo Proyecto”

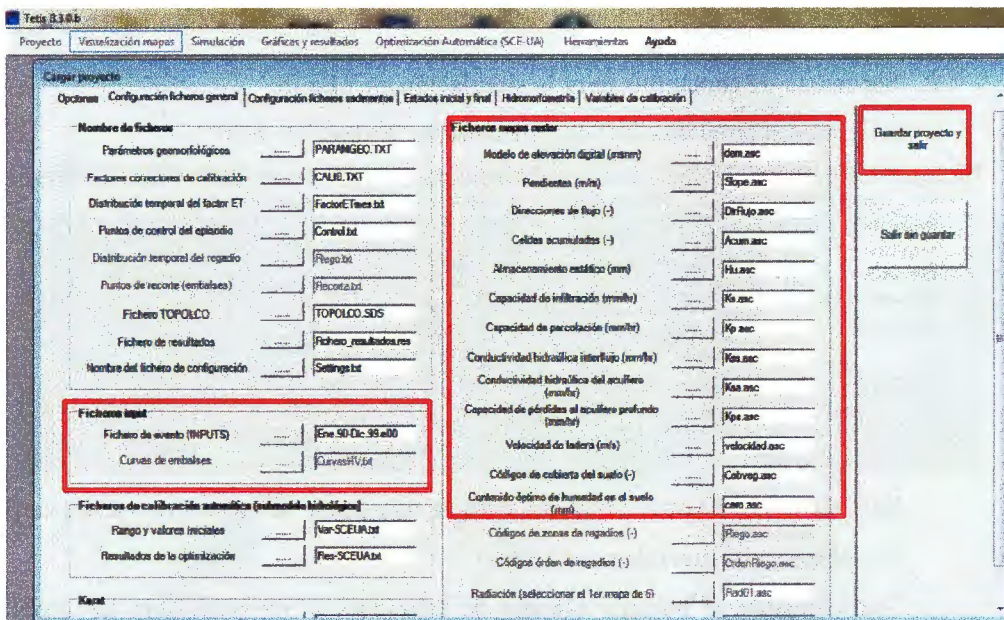


- En Datos del proyecto: Direccionamos la ruta donde se encuentra nuestra carpeta de trabajo y el fichero de simulación.
- Seleccionamos el número máximo de estaciones a interpolar para los datos de precipitación y temperatura. Los demás campos se mantienen constantes a menos que tengamos información referida a ese campo.
- Seleccionamos “Guardar proyecto y salir”





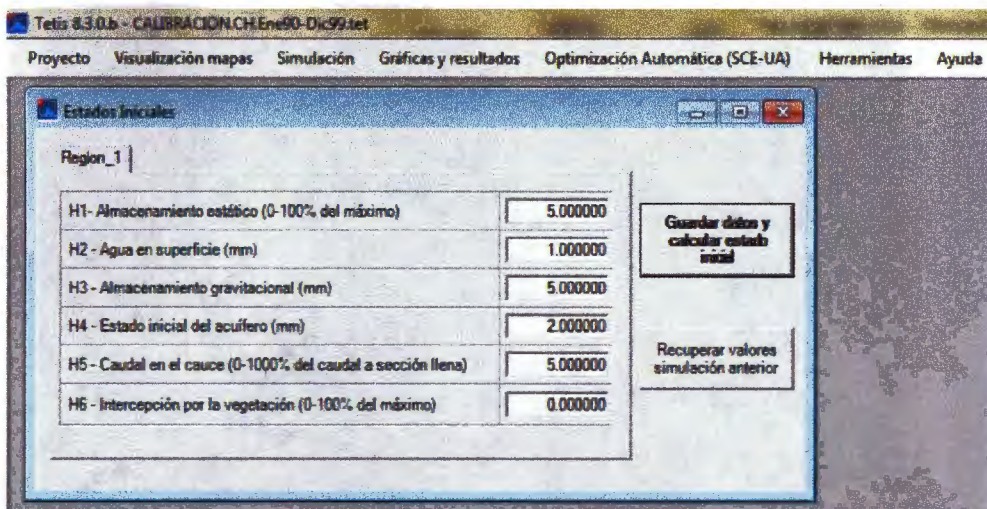
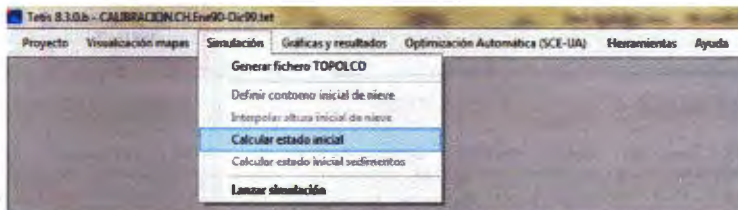
- Ahora en la pestaña de Proyecto, cargamos el proyecto creado y vamos a la pestaña de “Configuración ficheros general” y direccionamos todos los parámetros que habíamos calculado previamente. Los demás ficheros se generan automáticamente.
- Si se trabaja con el sub modelo de sedimentos se debe llenar la información de la pestaña “configuración ficheros sedimentos”, en caso contrario seleccionamos “guardar proyecto y salir”



- Ahora seleccionamos la pestaña de “Simulación” y generamos el fichero TOPOLCO.

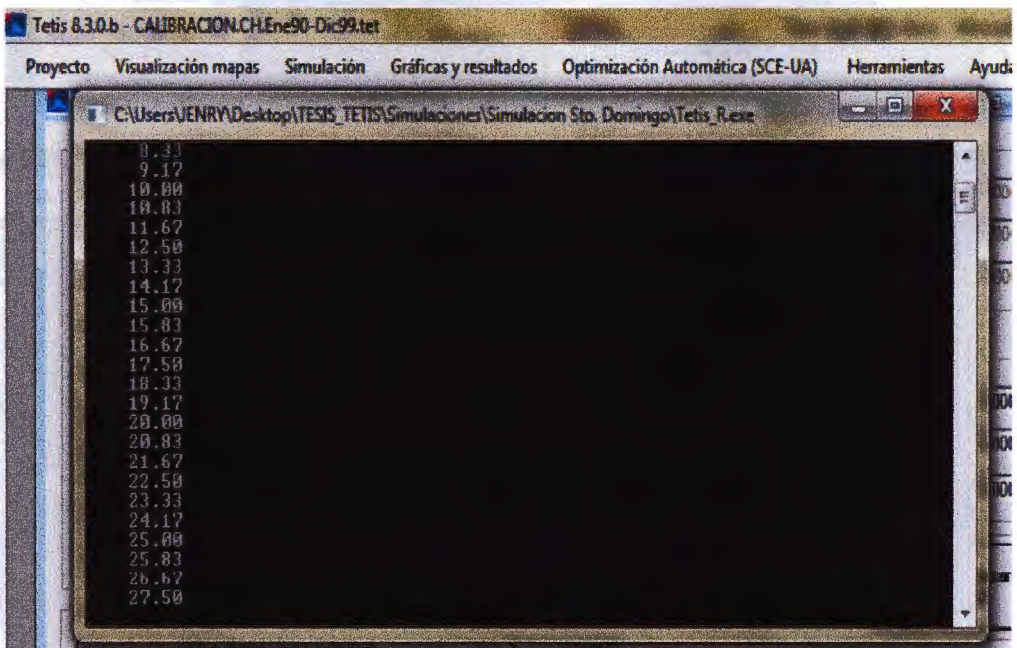
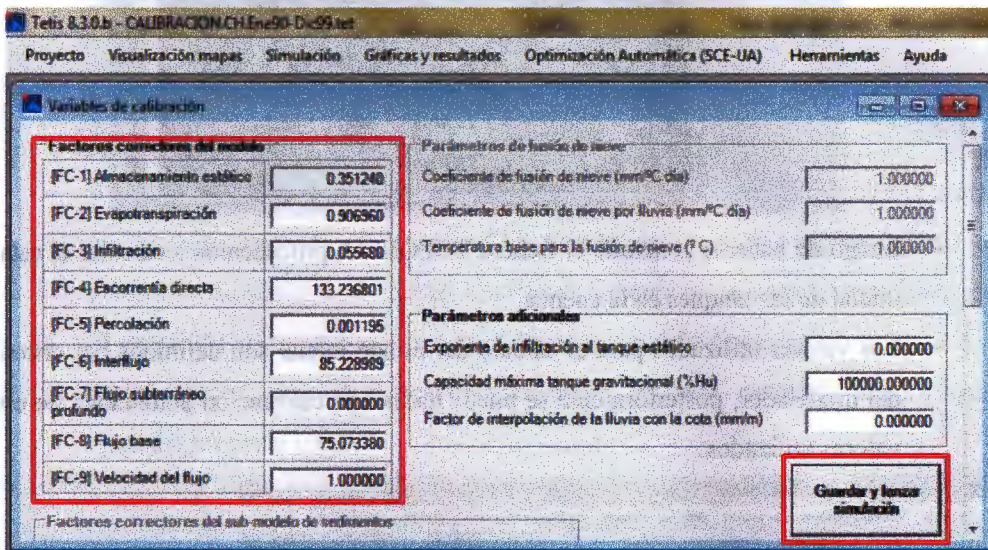
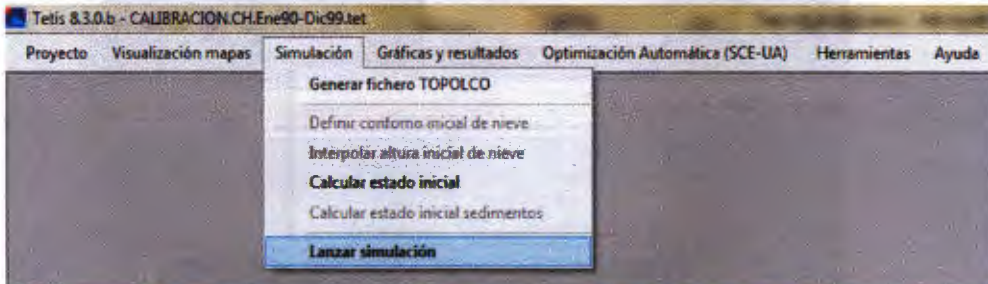


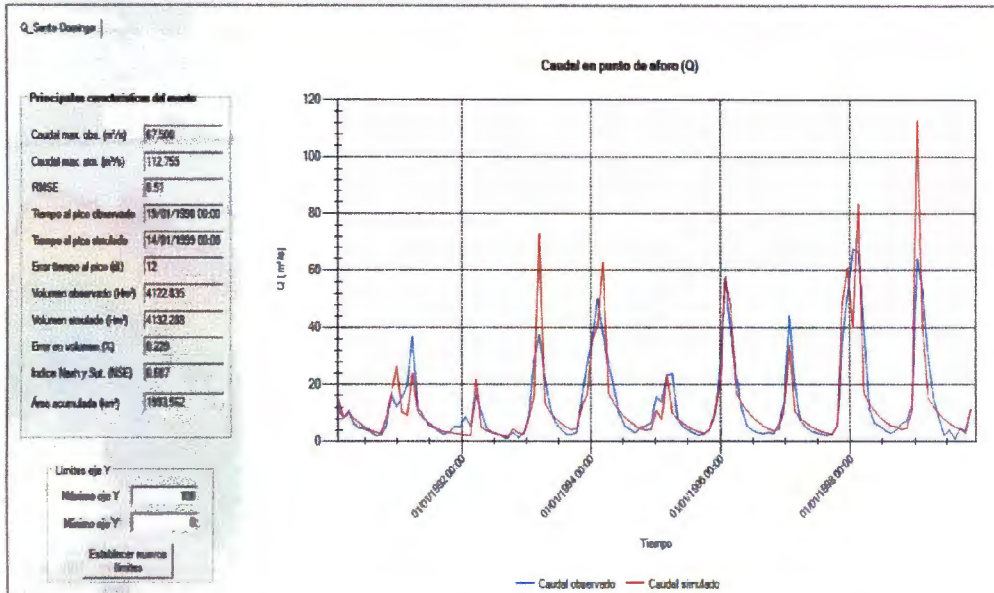
- Luego de haberse generado el fichero TOPOLCO, procedemos a calcular el estado inicial de los tanques en la cuenca.
- Los valores utilizados para el cálculo del estado inicial son definidos por criterios del modelador, posteriormente se puede hacer una calibración automática de estos valores utilizados.





- Una vez calculado el estado inicial, seleccionamos “Lanzar simulación” y colocamos los factores correctores iniciales para la modelación, posteriormente estos factores iniciales pueden ser calibrados automáticamente.





- Por último, luego de lanzar la simulación, se puede realizar la calibración automática de los factores correctores y además seleccionar la función objetivo que se quiere utilizar para el ajuste de la serie de caudales simulados.

**Variables**

**Factores correctores**

Limite inferior rango de búsqueda	Valor inicial	Limite superior rango de búsqueda	
<input type="checkbox"/> [FC-1] Almacenamiento estático subterráneo	0.3	0.275	0.35
<input type="checkbox"/> [FC-2] Evapotranspiración	0.7	0.73244	0.95
<input checked="" type="checkbox"/> [FC-3] Infiltración	0.01	0.094130	0.15
<input type="checkbox"/> [FC-4] Escorrentía directa	50	73.777603	150
<input checked="" type="checkbox"/> [FC-5] Percolación	0.001	0.00588	0.3
<input type="checkbox"/> [FC-6] Interflujos	50	76.114899	100
<input type="checkbox"/> [FC-7] Flujo subterráneo prolongado	0.00000	0	1.00000
<input type="checkbox"/> [FC-8] Flujo base	25	53.205591	75
<input type="checkbox"/> [FC-9] Velocidad del flujo en cauces	0.00000	0.50000	1.00000

**Estados iniciales**

Limite inferior rango de búsqueda	Valor inicial	Limite superior rango de búsqueda	
<input type="checkbox"/> [H-1] Almacenamiento estático (%)	0.00000	50.0000	100.000
<input type="checkbox"/> [H-2] Agua en superficie (mm)	0.00000	0.50000	1.00000
<input type="checkbox"/> [H-3] Almacenamiento gravitacional (mm)	0.00000	0.50000	1.00000
<input type="checkbox"/> [H-4] Nivel del acuífero (mm)	0.00000	0.50000	1.00000
<input type="checkbox"/> [H-5] Cauce a sección llena (%)	0.00000	50.0000	100.000

**Otras variables**

Limite inferior rango de búsqueda	Valor inicial	Limite superior rango de búsqueda	
<input type="checkbox"/> Factor de interpolación de la lluvia con la cota	0.00000	0.50000	1.00000
<input type="checkbox"/> Factor de fusión grado-día	0.00000	1.00000	0.50000
<input type="checkbox"/> Factor de fusión grado-día por lluvia	0.00000	1.00000	0.50000
<input type="checkbox"/> Temperatura base de fusión de nieve			

**Función objetivo**

Total de intervalos temporales: 120  
Calcular la F.O. a partir de: 1

**Funciones objetivo**

- Índice de Nash y Sutcliffe (NSE)
- RMSE
- HMLE - parámetro de forma: 2.00
- RMSE mensual - número de días: 30
- Coeficiente de eficiencia
- Error porcentual autocorr.
- Volumen acumulado
- Error de logaritmos
- Log-likes NSE
- Índice de Nash - Subtítulo por rangos
- Índice de Nash y Gupta (NGI)
- Ponderado por el área acumulada
- Calibración multi-evento

Unidad de caudal 1: 0.00000  
Unidad de caudal 2: 24.0000  
Peso flash 1: 0.75000



Anexo 5: Variación espacial de la precipitación total anual proyectada hacia el año 2059

Escenario Climático RCP 4.5

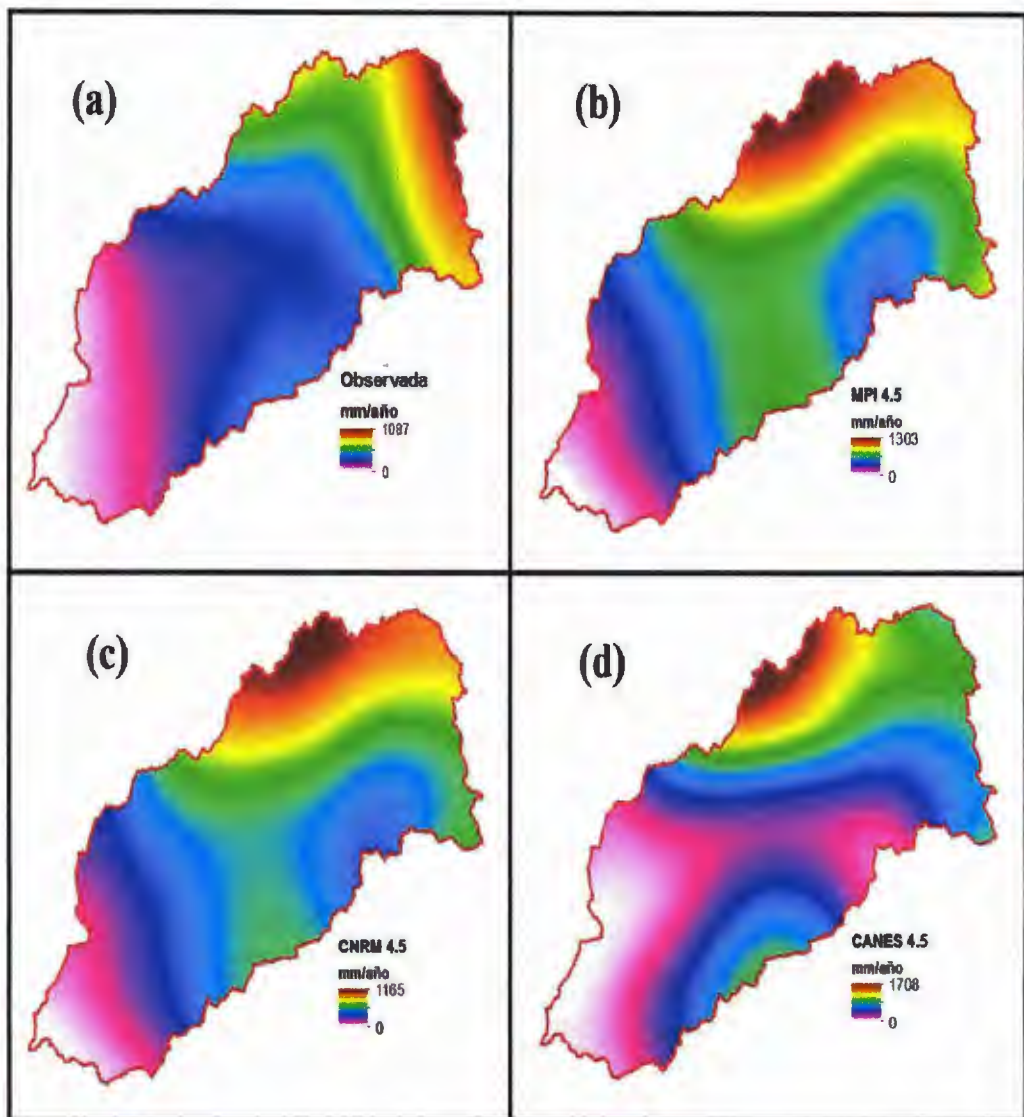


Figura 1: Distribución espacial de la precipitación total anual; (a) observada en el período 1980-1999, y proyectada futura en el período 2016-2059 para; (b) modelo MPI 4.5, (c) modelo CNRM 4.5 y (d) modelo CanES 4.5.



## Escenario Climático RCP 8.5

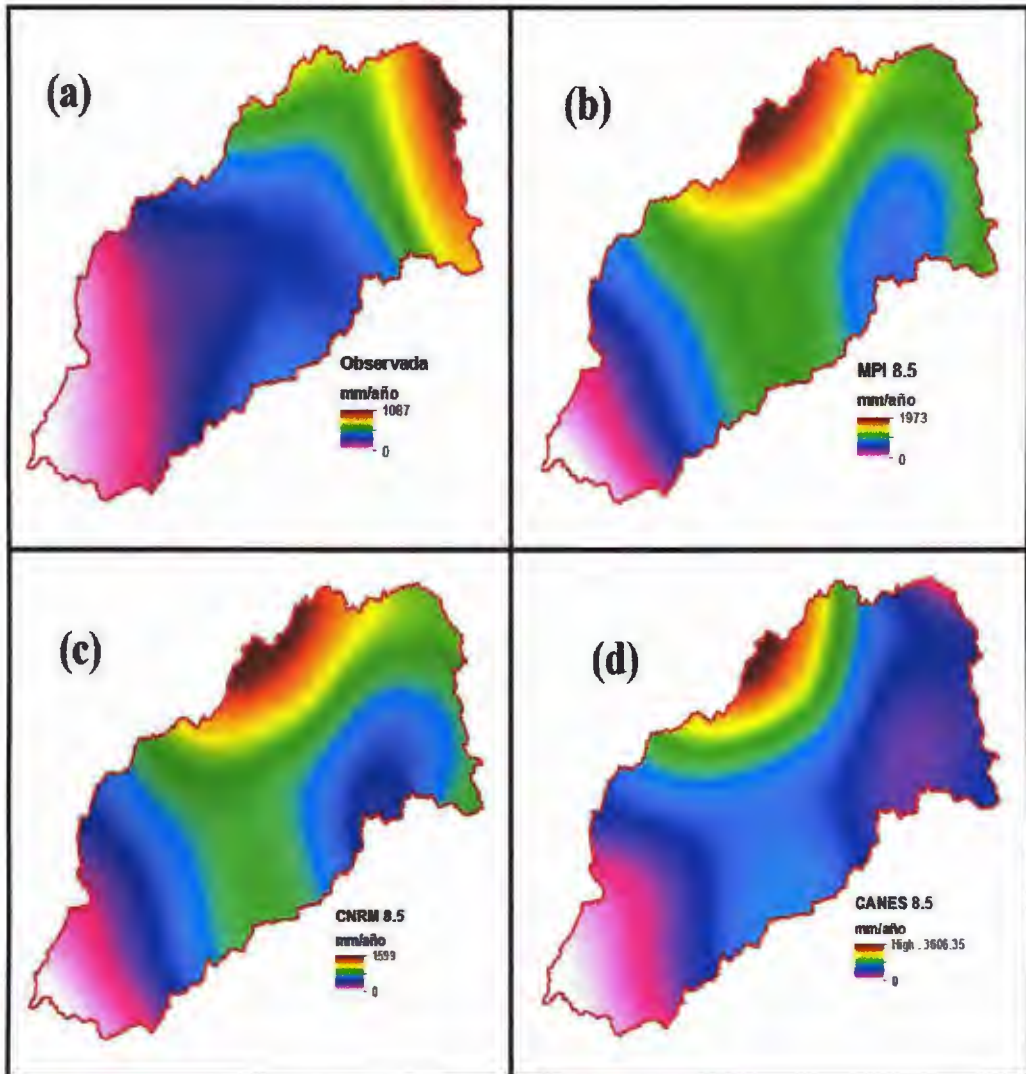


Figura 2: Distribución espacial de la precipitación total anual; (a) observada en el periodo 1980-1999, y proyectada futura en el periodo 2016-2059 para; (b) modelo MPI 8.5, (c) modelo CNRM 8.5 y (d) modelo CanES 8.5.