



**UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS**

**“IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMATICO EN LOS  
RECURSOS HIDRICOS EN LA CUENCA DEL RIO  
PISCO \_ 2016”**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER  
JOSÉ GERMÁN DULANTO BENAVIDES**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**PISCO - PERÚ  
2017**

## DEDICATORIA

A Dios:

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres: Pedro Luis y Lilia  
Por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me han infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante.

A mi esposa: Milagros.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

## AGRADECIMIENTO

A mis maestros.

Por su gran aporte y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis, por su apoyo ofrecido en este trabajo, por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de nuestra formación profesional y alentarnos en todo momento.

## RESUMEN

Los efectos diferidos y mediatos que se apreciarán solo en el mediano y largo plazo, pueden causar impactos que afectarán de manera irreversible las formas y estructuras de la vida natural y cultural en el planeta. No solo afectará la disponibilidad y forma de aprovechamiento de los recursos naturales si no también y de manera consecuente todo el aparato productivo, de consumo y bienestar, es por tal que el ciclo hidrológico no escapa a la influencia del cambio climático. Por lo cual, es de suma importancia el análisis del impacto del cambio climático en la rama de la hidrología, particularmente a una escala regional, de manera que se pueda entender los futuros cambios potenciales no solo en los recursos hídricos y desastres relacionados al agua, si no también de proveer soporte a los planes de gestión de agua; teniendo en consideración la incertidumbre que naturalmente existe en dicha evaluación.

En esta investigación, se utilizó el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para representar la cuenca del río Pisco, ubicada en la parte central de la costa peruana, con fines de evaluar el efecto del cambio climático en la oferta de agua para fines del siglo XXI. El modelo hidrológico fue calibrado y validado para un periodo total de 11 años (2000 – 2010) obteniéndose los valores de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.850 y 0.802 respectivamente, lo que representa un buen desempeño del modelo hidrológico. La precipitación y temperatura se proyectaron para el escenario A1B, por medio del uso de trece Modelos de Circulación General (MCG) y las variaciones de temperatura regional propuestas por el IPCC. Los resultados de las proyecciones de escorrentía indican un incremento promedio de 32.40% hasta 51.60% en la oferta anual de agua; considerando la variación de la producción de agua a nivel mensual, se proyectan los mayores incrementos en Marzo, Septiembre y Diciembre con variaciones promedio de +57.60%, +135.77% y +77.12% respectivamente, como también se proyecta la disminución de la escorrentía en los meses de Julio y Agosto con descensos de -82.56% y -24.14% respectivamente.

Key words: Hidrología, Cambio climático, SWAT, Pisco, Disponibilidad hídrica

## ABSTRACT

Deferred and medium effects that can be seen only in the medium and long term can cause impacts that irreversibly affect the forms and structures of natural and cultural life on the planet. Not only will it affect the availability and use of natural resources, but also, and consequently, the entire productive, consumer and welfare apparatus, so that the hydrological cycle is not a layer to the influence of climate change. It is therefore of utmost importance to analyze the impact of climate change on the branch of hydrology, particularly on a regional scale, so that future potential changes can be understood not only in water resources and in water-related disasters, But also to provide support to water management plans; Taking into account the uncertainty that naturally exists in such an assessment. This research used the hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for represent the Pisco River Basin, central coast of Perú, in order to evaluate the effect of the climate change on the water production for the XXI Century. The hydrologic model was calibrated and validated for a period of 11 years (2000-2010) getting the Nash-Sutcliffe (NSE) values of 0.850 y 0.802 respectively, that indicates reasonable performance of the hydrological model. The precipitation and temperature are projected for the emission scenario A1B, by using thirteen General Circulation Models (MGC) and the regional temperature changes proposed by the IPCC. The results of the projected runoff indicate a mean increase of 32.40% to 51.60% on the water annual offer; considering the change of the water production in a monthly interval, the most outstanding changes are projected in March, September and December with mean variations of +57.60%, +135.77% y +77.12% respectively, in the same way, it is projected the reduction of the runoff in July and August with decreases of -82.56% y -24.14% respectively.

Hydrology, Climate change, SWAT, Pisco, water availability

## INTRODUCCION

La búsqueda de una perspectiva integral y sistemática que le permita promover la mejor calidad de vida de la población rural, a partir de una combinación adecuada del manejo de los recursos naturales y los factores del desarrollo en el espacio de las cuencas del país. Hoy en día muchas regiones alrededor del mundo están enfrentando desafíos concernientes a los recursos hídricos, que incluyen serios problemas de escasez de agua e inundaciones (OHCHR, 2010; UNEP, 2008). Se ha encontrado que el caudal de los principales ríos de América del Sur ha experimentado una tendencia creciente desde principios de 1970. Se sugiere que esta simultaneidad puede reflejar el impacto de un cambio climático a gran escala. (García y Mechoso, 2005).

La cuenca del río Pisco es uno de los valles de la región con una importante producción agropecuaria; sin embargo, la satisfacción de la demanda de agua se encuentra en una situación vulnerable debido al crecimiento de la población, áreas de cultivo y la sobre explotación de las aguas subterráneas en dicha región.

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

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

**“IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMATICO EN LOS RECURSOS HIDRICOS EN LA  
CUENCA DEL RIO PISCO \_ 2016”**

**TABLA DE CONTENIDOS**

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT .....	v
INTRODUCCION.....	vi
TABLA DE CONTENIDOS .....	vii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	1
1.1 Descripción de la Realidad Problemática.....	1
1.2 Delimitaciones y Definición del Problema.....	2
1.2.1 Delimitaciones.....	2
A. Delimitación Espacial. ....	2
B. Delimitación Temporal. ....	3
C. Delimitación Social. ....	3
D. Delimitación Conceptual.....	4
1. Tecnología de información. ....	4
2. Gestión del Proceso escogido .....	4
1.2.2 Definición del Problema.....	5
1.3 Formulación del Problema. ....	5
1.3.1 Problema principal. ....	5
1.4 Objetivo de la Investigación .....	5
1.5 Hipótesis de la investigación. ....	5
1.6 Variables e Indicadores.....	6
1.6.1 Variable Independiente.....	6

A. Indicadores.....	6
B. Índices. ....	6
1.6.2 Variable Dependiente.....	6
A. Indicadores.....	6
B. Índices.....	6
1.7 Viabilidad de la investigación. ....	6
1.7.1 Viabilidad técnica.....	6
1.7.2 Viabilidad operativa. ....	6
1.7.3 Viabilidad económica. ....	7
1.8 Justificación e Importancia de la Investigación. ....	7
1.8.1 Justificación.....	7
1.8.2 Importancia. ....	7
1.9 Limitaciones de la Investigación.....	8
1.10 Tipo y Nivel de la Investigación.....	8
1.10.1 Tipo de investigación. ....	8
1.10.2 Nivel de investigación. ....	8
1.11 Método y Diseño de la investigación ....	8
1.11.1 Método de la investigación. ....	8
1.11.2 Diseño de la investigación.....	15
1.12 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información.....	15
1.12.1 Técnicas. ....	15
1.12.2 Instrumentos. ....	15
1.13 Cobertura de Estudio ....	29
1.13.1 Universo. ....	29
1.13.2 Muestra.....	29
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO ....	30
2.1 Antecedentes de la Investigación.....	30
2.2 Marco Histórico. ....	40
2.3 Marco Conceptual.....	40
CAPÍTULO III ....	56
SOLUCIÓN PROPUESTA ....	56
3.1 Análisis de la solución propuesta.( Benchmarking.).....	56
3.1.1 Análisis estratégico.....	56
3.1.2 Análisis funcional.....	56
3.1.3 Etapas de la solución ....	57

3.2 Estudio de factibilidad .....	58
3.2.1 Factibilidad técnica. ....	58
3.2.2 Factibilidad operativa. ....	58
3.2.3 Factibilidad económica. ....	58
3.2.4 Factibilidad legal.....	58
3.3 Metodología.....	59
3.4 Propuesta de proyecto .....	59
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	60
RESULTADOS .....	60
4.1. Análisis de resultados .....	60
4.2. Prueba de Hipótesis .....	65
4.2.1. Hipótesis de investigación. ....	65
4.2.2. Hipótesis nula. ....	65
4.2.3. Hipótesis estadística. ....	65
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
CONCLUSIONES.....	77
RECOMENDACIONES.....	79
FUENTES DE INFORMACIÓN .....	82
BIBLIOGRAFIA.....	83
ANEXOS .....	86
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	107
INDICE DE FIGURAS.....	112
INDICE DE CUADROS.....	113

## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

#### 1.1 Descripción de la Realidad Problemática

El Perú cuenta con 106 cuencas hidrográficas por las que escurren 2'043.548,26 millones de metros cúbicos (MMC) al año. Asimismo, cuenta con 12.200 lagunas en la sierra y más de 1.007 ríos, con los que se alcanza una disponibilidad media de recursos hídricos de 2,458 MMC concentrados principalmente en la vertiente amazónica. Sin embargo, su disponibilidad en el territorio nacional es irregular, puesto que casi el 70% de todo el agua precipitada se produce entre los meses de diciembre y marzo, contrastando con épocas de extrema aridez en algunos meses. Además, muchas lagunas han sufrido el impacto de la contaminación por desechos mineros, agrícolas y urbanos, y el asentamiento de pueblos o centros recreativos en sus orillas o franjas marginales.

De hecho, el balance hídrico realizado en la vertiente del Pacífico para proyectar los requerimientos de agua y la oferta de esta, indica que, si bien en agregado se cubre la demanda de agua, en más del 68% de las cuencas de la vertiente el balance es negativo. Por ejemplo, 9 de cada 10 peruanos vive en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas; y 1 de cada 2 se asienta en la costa.

De esta manera, el Perú cuenta con la mayor disponibilidad per cápita de agua dulce renovable en América Latina (74,546 MMC/persona al año), la distribución de los recursos hídricos es asimétrica. La concentración de núcleos urbanos y de las actividades productivas en las tres vertientes hidrográficas genera una situación donde la demanda por recursos hídricos es máxima en las zonas donde la disponibilidad y el abastecimiento de agua son más escasos.

El Perú es un país altamente vulnerable a los efectos adversos del cambio climático, pues presenta siete de las nueve características de vulnerabilidad

reconocidas por la Convención Marco. Por ello, la adaptación al cambio climático es un asunto de inminente prioridad para el país en su camino al desarrollo.

Adaptarse implica modificar el comportamiento, los medios de vida, la infraestructura, las leyes, políticas e instituciones en respuesta a los eventos climáticos experimentados o esperados.

Las pérdidas estimadas como consecuencia de los impactos causados por el cambio climático superan largamente a las inversiones requeridas para prevenirlos y reducir sus riesgos.

Las proyecciones del cambio climático en el Perú muestran que hacia el 2030 habría un aumento de 1°C en la temperatura y 10% de mayor variabilidad en las precipitaciones.

## **1.2 Delimitaciones y Definición del Problema**

### **1.2.1 Delimitaciones**

El Clima en los últimos años viene sufriendo cambios bruscos en su comportamiento, por lo que se hace necesario contar con una herramienta muy importante, el monitoreo y evaluación a tiempo real y climático de las variables hidrometeorológicas, información que permite una eficaz planificación de las actividades para la prevención y mitigación de daños, generados en la cuenca de Pisco.

Este estudio utilizando la herramienta del modelo se realizara en el periodo del año 2016, en la cuenca del rio Pisco que como sistema hidrográfico y ámbito del presente estudio, tiene una superficie de drenaje, desde la naciente hasta la desembocadura al mar de su colector principal de 4,434.50 Km<sup>2</sup>. Sobre los 2,400.70., m.s.n.m., el 62.71%(2780.75Km<sup>2</sup>) de la misma constituye la cuenca húmeda o área neta de aporte a la escorrentía del rio Pisco.

El rio Pisco es la principal fuente hídrica superficial en la cuenca, su escurrimiento se origina en las lagunas de "Pultoc" ubicadas en la Microcuenca "Pucamayo-Santa Ana" de la sub cuenca "Chiris" debido a la ocurrencia de precipitaciones estacionales.

#### **A. Delimitación Espacial.**

La cuenca integrada del río Pisco, se encuentra formada por la cuenca natural del río Pisco, en la Vertiente del Pacífico, Tiene forma de una

media luna cuenta con una área de cuenca que posee 4,434.50 Km<sup>2</sup>, la cual se divide en cuenca húmeda y seca mediante una curva imaginaria que define la precipitación acumulada media anual de 250mm, aguas arriba y aguas debajo respectivamente

Tiene su origen como confluencia de los ríos Chiris y Huaytara a la altura de la localidad de Pámpano, el primero constituye el principal formador, se origina a su vez en la parte más alta de la cuenca de la unión de los ríos Santa Ana y Luicho, los que nacen de la descarga de una serie de lagunas entre las que destacan las de Pultoc, Agnococha y Tacococha.

El presente estudio, se desarrolla en la parte alta de la cuenca del río Pisco (área delimitada a partir de la estación hidrométrica de “Letrayoc - Huancano”, a 682,msnm) debido que el aumento es claro paralelamente con el distanciamiento del litoral marino hacia un mayor nivel altitudinal.

#### **B. Delimitación Temporal.**

Esta investigación es de actualidad, por cuanto el tema de cambio climático en los recursos hídricos es vigente y más aún en el ámbito de educar a los ciudadanos que viven en esta cuenca de estudio.

#### **C. Delimitación Social.**

La preocupación por el cambio climático es de carácter antropocéntrico; es decir, interesa controlar sus efectos perversos sobre todo para la humanidad (y todo lo que la humanidad aprecia, por ejemplo actualmente ciertos aspectos de la Naturaleza). Desde perspectivas biocéntricas (la teoría Gaia, por ejemplo) el cambio climático no sería un problema, pues aún en condiciones biofísica muy diferentes, la Tierra seguiría existiendo. Por tanto, el cambio climático, por encima de otras consideraciones, es un hecho social, puesto que tiene sus causas en gran medida en las actividades humanas, y porque además son las sociedades globales y específicas, así como las personas que componen esas sociedades, quienes finalmente van a sufrir sus consecuencias directa o indirectamente a través del cambio del medio biogeofísico. Es un hecho social también por razón de que su solución (o resolución) no puede hacerse por la naturaleza, por el medioambiente, sino por la sociedad. El análisis del impacto social del

cambio climático es así un área relevante no sólo como ejercicio académico, sino también como información imprescindible para su gestión.

#### **D. Delimitación Conceptual**

Esta investigación abarca dos conceptos fundamentales como el Cambio climático y los recursos hídricos en la Cuenca del río Pisco.

##### **1. Tecnología de información.**

El concepto de tecnología de la información refiere al uso de equipos de telecomunicaciones (Satélites-Información de precipitación TRMM) y computadoras (ordenadores, programa y modelos y análisis estadísticos de hidrología) para la transmisión, el procesamiento y el almacenamiento de datos.

##### **2. Gestión del Proceso escogido.**

Se ha usado como resultado a alcanzar con calidad el proceso de la información y el resultado de los modelos y análisis estadísticos con eficiencia y eficacia los escenarios del cambio climático con las fechas de información hidrometeoro lógica estimada en el estudio.

#### **1.2.2 Definición del Problema**

La información hidrometeorológica en la Cuenca del río está presentando una alteración en los patrones espaciales y temporales de la precipitación y escurrimiento lo cual está afectando el desarrollo socioeconómico de la Provincia y por ende en la Región.

El crecimiento poblacional y demanda de productos agrícolas en la provincia de Pisco, están incrementando la presión sobre los recursos agua y suelo. De manera que, para poder compensar la demanda de agua, se recurrió a un mayor uso de agua subterránea que generó la sobreexplotación de este recurso por lo cual, la situación actual de la satisfacción de la demanda de agua en la cuenca del río Pisco, se encuentra bastante vulnerable.

Se debe tener en cuenta que la precipitación es la variable de mayor importancia en la renovación de agua superficial y recarga de agua

subterránea, factor que define prácticamente la oferta de agua para satisfacer la demanda de agua en la cuenca.

¿De acuerdo a la Cuenca del río Pisco, como se determina o se cuantifica el cambio climático de su régimen hídrico? ¿Influyen los elementos hidrometeoro lógicos en la sostenibilidad de la Cuenca a estudiar? ¿Existe Planificación de los recursos hídricos en la Cuenca del río Pisco? ¿Es eficiente la gestión, en el aprovechamiento y asignación de derechos de agua?

### **1.3 Formulación del Problema.**

#### **1.3.1 Problema principal.**

¿Cómo afecta la variabilidad en el Impacto del Cambio Climático en la disponibilidad de los Recursos Hídricos de la cuenca del río Pisco?

### **1.4 Objetivo de la Investigación**

#### **1.4.1 Objetivo General**

Evaluar el Impacto del Cambio Climático en la eficiente disponibilidad de los Recursos Hídricos en la cuenca del río Pisco.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Aplicar el modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Pisco.
- Realizar el análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT.
- Proyectar el clima para el siglo XXI en base de los modelos CMIP3, MRI 3.1 y MRI 3.2.
- Evaluar escenarios con el modelo SWAT calibrado, en base a la información obtenida de Modelos CMIP3, MRI 3.1 y MRI 3.2

### **1.5 Hipótesis de la investigación.**

#### **1.5.1 Hipótesis Principal:**

El impacto del Cambio Climático influye eficientemente en la disponibilidad de los Recursos Hídricos en la cuenca del río Pisco.

#### **1.5.2 Hipótesis Secundarias:**

El cambio climático afectará a todos los estratos de la sociedad y del medio ambiente, con fuertes repercusiones en el agua y la agricultura, tanto en el presente como en el futuro.

- Los registros de observaciones y las proyecciones climáticas evidenciaran que los recursos de agua dulce son vulnerables y pueden resultar gravemente afectados por el cambio climático.
- Los impactos por el Cambio Climático con qué frecuencia se incrementarían los eventos climatológicos extremos.
- La gestión integrada del recurso hídrico es clave para dar respuestas al cambio climático

## 1.6 Variables e Indicadores

### 1.6.1 Variable Independiente : Impacto del Cambio Climático

- A. Indicadores : Disponibilidad hídrica
- B. Índices : m<sup>3</sup>/seg.

### 1.6.2 Variable Dependiente : Recursos Hídricos

- A. Indicadores : Cantidad
- B. Índices : Hm<sup>3</sup> / cuenca.

## 1.7 Viabilidad de la investigación.

### 1.7.1 Viabilidad técnica

De acuerdo al desarrollo de este estudio de investigación esta viabilidad se expresara en la aplicaciones u especificaciones concretas que se van establecer ya que estas cuestiones técnicas se analizan lo practico o razonable de implantar.

El riesgo de desarrollo para dar inicio este trabajo son bastante bajas ya que existe la disponibilidad de los medios informáticos para construir en el sistema en este caso contamos con las herramientas para ejecutar el modelo y los escenarios climáticos.

### 1.7.2 Viabilidad operativa.

Es totalmente necesario conocer el impacto del cambio climático y sobre todo conocer las herramientas que nos hace más operativo para conocer el incremento o déficit de los recursos hídricos en la temporada actual o con proyecciones a futuro ya sea de corto o mediana plazo como medida sustentable para los pobladores de esta Cuenca en estudio.

Así que se espera que los tomadores de decisiones que se encuentra involucrados en el tema a estudiar sean los primeros en sensibilizarse las

acciones de prevención y mitigación a tomar y sensibilizar a los ciudadanos pisqueños

### **1.7.3 Viabilidad económica.**

No es necesario un estudio de esta viabilidad ya que la justificación económica es obvia ya que el riesgo técnico es bajo pero debemos destacar que el impacto en corto y largo plazo es beneficioso para los ciudadanos que viven en esta cuenca.

## **1.8 Justificación e Importancia de la Investigación.**

### **1.8.1 Justificación**

En el estudio se evaluarán las condiciones meteorológicas e hidrológicas de la cuenca del río Pisco, con el fin de conocer su comportamiento y caracterizar cada una de las variables del ciclo hidrológico. Una vez realizado este proceso, se determinará los posibles impactos que ocasionará el cambio climático en la oferta hídrica superficial de esta cuenca, tomando como variable de entrada los escenarios regionalizados de precipitación y temperatura del periodo.

Desde el punto de vista de la demanda poblacional, nos permitirá conocer el volumen de agua actual y el abastecimiento en un futuro próximo. El estudio hace posible cuantificar las zonas vulnerables, ocurrencia de huaycos, desbordes e inundaciones.

Es por ello que la elaboración, desarrollo y culminación de este estudio, se justifica ya que es un elemento base para la planificación, el desarrollo de los pueblos y elevar el nivel de vida de las poblaciones asentadas en la cuenca del río Pisco.

### **1.8.2 Importancia.**

La culminación de esta investigación es de mucha importancia ya que nos permitirá establecer un marco de referencia sobre los posibles cambios del clima y su efecto en la disponibilidad del agua, y permitirán proponer medidas de adaptación o mitigación de estos efectos.

Además se generara información relevante para futuras investigaciones referentes a generación de caudales, simulaciones de cuenca y escenarios de proyección en el ámbito de estudio

## **1.9 Limitaciones de la Investigación**

Como en toda investigación, siempre hay obstáculos ya sean teóricos, metodológicos o prácticos que dificultan y enmarcan el desarrollo de la investigación. Las limitaciones de la presente investigación son la escasas investigaciones sobre la materia en estudio, asimismo las limitaciones están dadas por el nivel de disponibilidad de información de aforos, equipos, materiales y humanos.

## **1.10 Tipo y Nivel de la Investigación**

### **1.10.1 Tipo de investigación.**

Es aplicada, orientada a realizar las la proyección de escenarios futuros para poder conocer la disponibilidad del recurso hídrico en el futuro.

### **1.10.2 Nivel de investigación.**

Será de nivel exploratoria y explicativa buscando definir claramente el estado actual y futuro de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del rio Pisco.

## **1.11 Método y Diseño de la investigación**

### **1.11.1 Método de la investigación.**

En la presente investigación, se tomaron en cuenta la metodología indicada en el **Figura 1, donde** se diferencian tres principales procesos: Aplicación del SWAT en la cuenca en estudio, la generación de información climática futura y la evaluación del efecto del cambio climático en el siglo XXI.

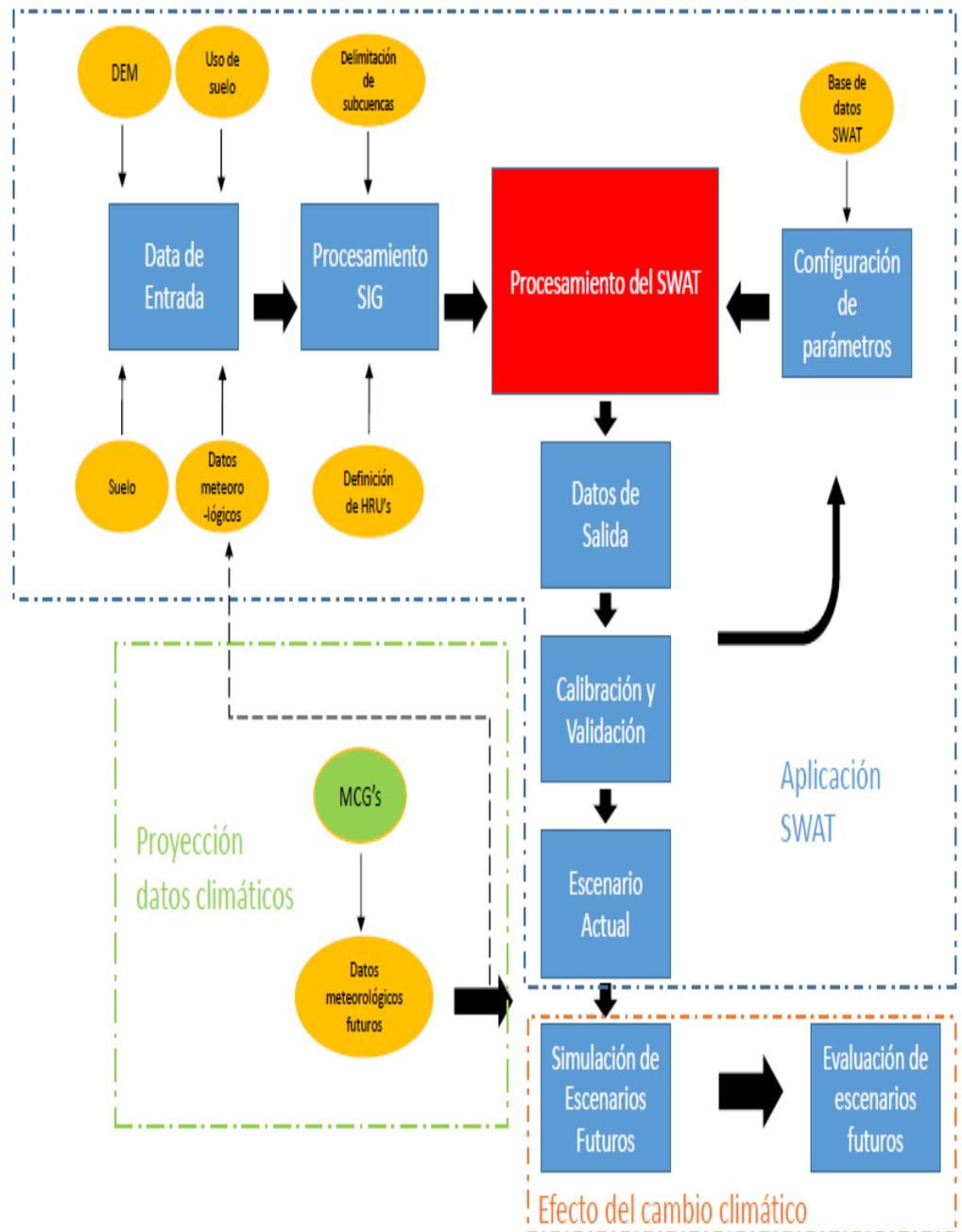


Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio.

### Aplicación del modelo hidrológico SWAT

Datos de entrada suministrados al modelo

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

- **Topografía (DEM)**

Para definir los límites de cuenca y la distribución de la red hídrica del área de estudio, se utilizó el modelo digital de elevaciones global ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) de una resolución espacial de 30 metros. Previamente al ingreso del DEM al modelo SWAT, se realizaron ajustes para llenar vacíos de información. Dentro del área de estudio, se diferencian alturas desde los 305 hasta los 4539 m.s.n.m.

- **Vegetación y uso de la tierra**

La información del Mapa de Coberturas Vegetales elaborado por la Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios (DGAAA-DERN, 2012) y la Dirección Regional de Agricultura de Ica se ve representada en el Cuadro 1, donde se muestra las coberturas que predominan en el ámbito de estudio y su distribución respectiva.

Cuadro 1.- Cobertura Vegetal del ámbito del estudio

COBERTURA	DESCRIPCION	AREA	AREA (%)
AGRICULTURA	Cultivos/Áreas intervenidas	451.2	1.2
DESIERTO	Desierto en zona de clima árido	5716	15.2
MATORRALES	Matorral arbustivo abierto	11094	29.5
PRADERA	Pradera en zona de clima frío	19932	53.0
LAGOS	Cuerpos de agua	414	1.1
TOTAL		37608.0	100

Fuente: Dirección Regional de Agricultura de Ica

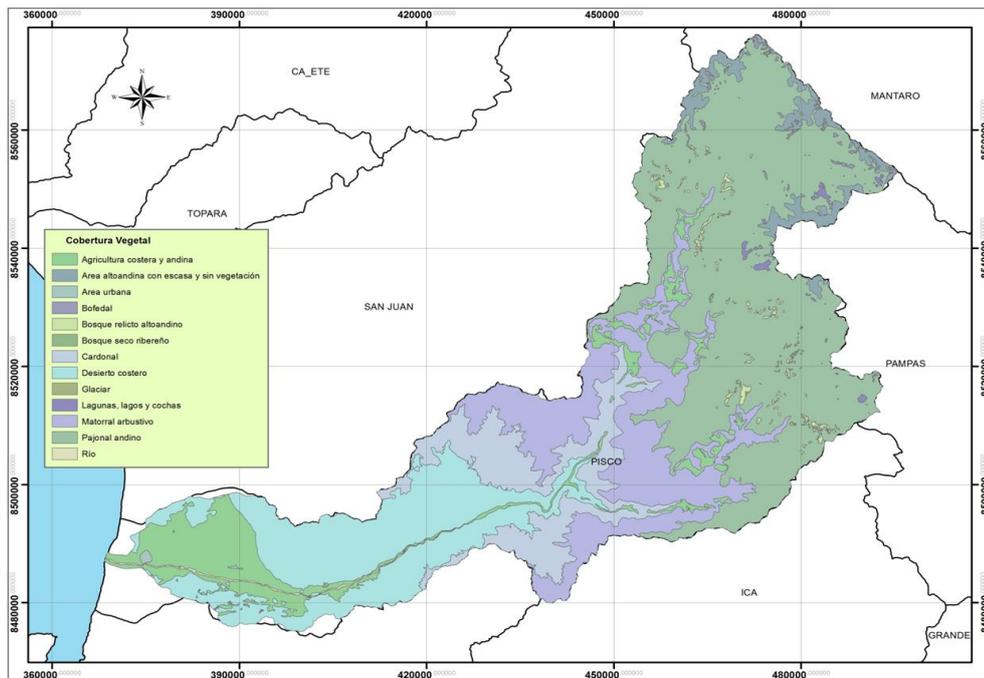
A cada tipo de cobertura se asignó un código de identificación, valor de número de curva y coeficiente de rugosidad; con la finalidad de poder ser ingresados a la base de datos SWAT y posteriormente ser procesadas.

En el **Cuadro 2** se indican los valores asignados a las coberturas y su distribución espacial se muestra en la Figura 2.

**Cuadro 2: Valores finales asignados a las coberturas de suelo**

CODIG	COBERTUR	CN				n	ARE	ARE
		A	B	C	D		A	A
AGRI	AGRICULTU	67	77	85	87	0.15	451.2	1.2
DSRT	DESIERTO	39	63	74	80	0.17	5,706	15.2
MATO	MATORRAL	38	50	70	78	0.15	11,094	17.7
PRAD	PRADERA	31	59	75	79	0.15	19932	53.0
WATR	LAGOS	92	92	92	92	0.01	414	1.1
<b>TOTAL</b>						<b>3,608.0</b>	<b>100</b>	

Figura 2: Mapa de vegetación y uso de suelo



Fuente: Elaboración Propia

- Suelo

La información de suelo fue obtenida a partir del Mapa de Suelos realizado por la Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios (DGAAA-DERN, 2012). En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de suelos en el ámbito de estudio.

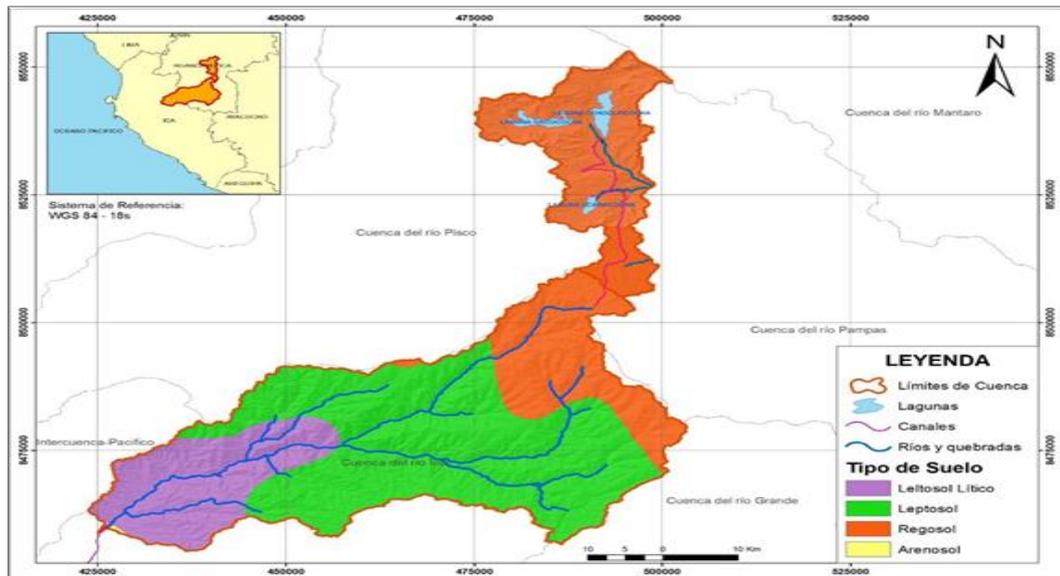
La información de suelos ingresados al modelo, fueron asignados en función de las características físico-químicas de cada tipo de suelo (Cuadro 8); dichos valores fueron estimados teniendo en cuenta información del Centro Internacional de Información y

Referencia del Suelo (ISRIC – World Soil Information) y a las unidades de suelo analizadas en la cuenca vecina del río Cañete en el estudio de Uribe (2011).

**Cuadro 3: Características Físico – Químicas de los suelos del ámbito de estudio**

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

Figura 3: Mapa de tipo de suelo



Fuente: Elaboración Propia

- **Hidrometeorología**

En el presente estudio, se tomaron en cuenta los datos de precipitación y temperatura (máxima y mínima) de las estaciones meteorológicas y aforos de caudal de una estación limnimétrica (LETRAYOC). Estas estaciones fueron seleccionadas en base a que contengan un registro diario y continuo para el periodo simulado (2005-2015) y se distribuyan espacialmente dentro del ámbito del estudio.

### a. Precipitación

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

### b. Temperatura

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

### c. Evapotranspiración

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

$$\lambda E = \frac{\Delta (H - G) + \rho a \bar{a} [e_a - e]}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

Dónde:

$\lambda$ : Tasa de evapotranspiración (mm d-1)

$\lambda$ : Calor latente de vaporización (MJ kg-1)

$\Delta$ : Pendiente entre la presión-temperatura del vapor de saturación (kPa °C-1)

$H$ : Radiación neta (MJ m-2 d-1)

$G$ : Flujo térmico del suelo (MJ m-2 d-1)

$\rho$ : Densidad del aire (kg m-3)

$C_p$ : Calor específico del aire húmedo (MJ kg-1 °C-1)

$e_a - e$ : Déficit e vapor de presión

$a$ : Resistencia de cubierta vegetal (s m-1)

$\bar{a}$ : Resistencia aerodinámica (s m-1)

$\gamma$ : Constante piezométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)

Cuadro 4: Variables hidrometeorológicas utilizadas en el estudio

ESTACION	TIPO	COORDENADAS (WGS84)		VARIABLE S
		ESTE	NORTE	
Santa Ana	PLU	485513	8496293	PP, T°
Cusicancha	CO	467532	8509.33	PP, T°
Ticrapo	PLU	45302	8520.401	PP,
Huancano	CO	432817	8496293	PP, T°
Bernales	CO	395522	8480687	PP, T°
Letrayoc	LIM	419432	8490.003	Q

Fuente: Dz.Ica-SENAMHI

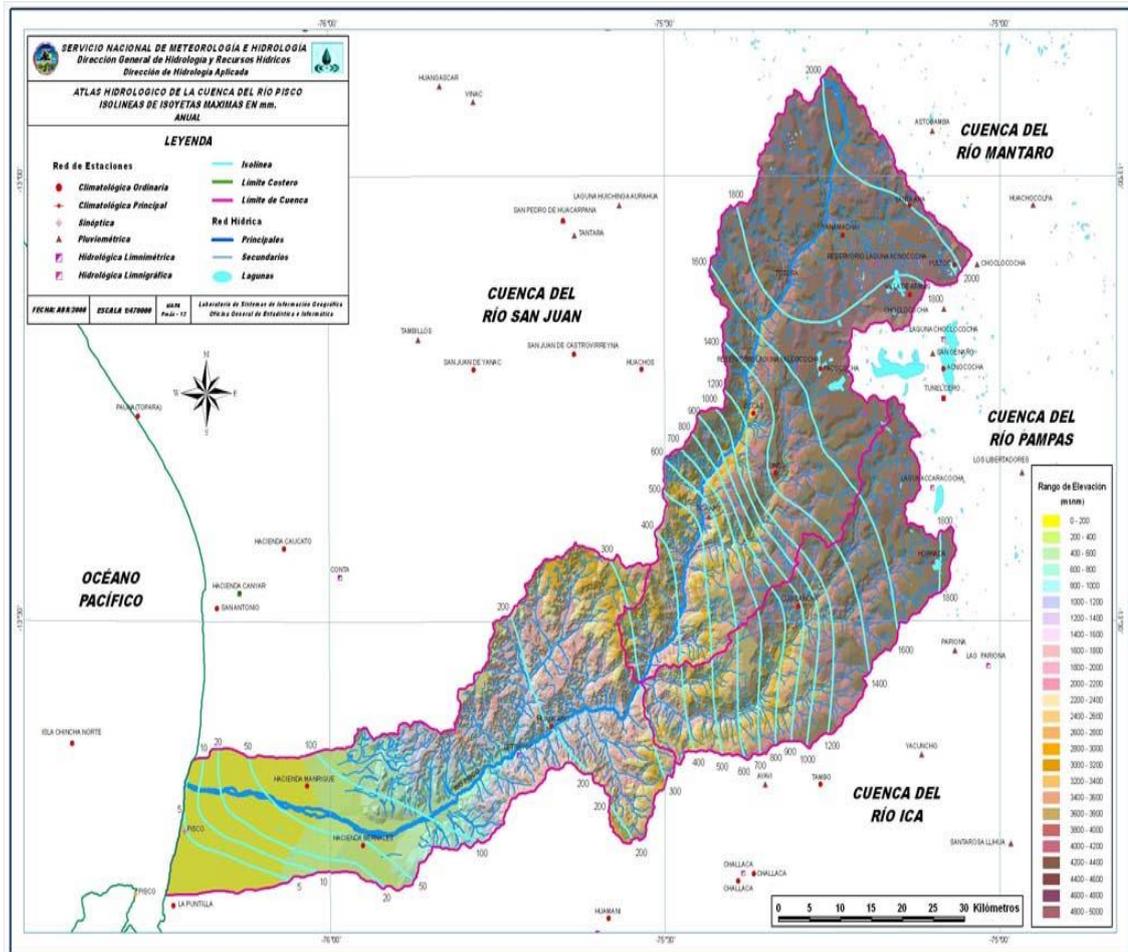


Figura 4: Mapa de Ubicación de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas

### **1.11.2 Diseño de la investigación.**

Para el diseño de la investigación emplearemos el de una investigación con Diseños Experimentales el control y la validez, con el que se logrará el control y la validez externa: Se indicará las coordenadas de cada estación meteorológica utilizada en el modelo para sustraer la información actual correspondiente a cada Modelos de la Circulación General (MCG), luego se realizará el cambio de escala estadístico para obtener una información más precisa a los puntos de ubicación de las estaciones.

## **1.12 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información**

### **1.12.1 Técnicas.**

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

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

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

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

Fase terrestre del ciclo hidrológico.

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

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

Donde  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo (mmH<sub>2</sub>O);  $SW_0$  es el contenido de agua inicial en el día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O);  $t$  es el tiempo (día);  $R_{day}$  es la cantidad de precipitación en el día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O);  $Q_{surf}$  que es la cantidad de escorrentía superficial por día (mmH<sub>2</sub>O);  $w_{seep}$  es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O);  $Q_{qw}$  es la cantidad de flujo de retorno en el día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O); (Neitsch et al., 2002a).

Fase terrestre del ciclo hidrológico.

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

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

Donde  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo (mmH<sub>2</sub>O);  $SW_0$  es el contenido de agua inicial en el día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O);  $t$  es el tiempo (día);  $R_{day}$  es la cantidad de precipitación en el día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O);  $Q_{surf}$  que es la cantidad de escorrentía superficial por día (mmH<sub>2</sub>O);  $w_{seep}$  es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O);  $Q_{qw}$  es la cantidad de flujo de retorno en el día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O); (Neitsch et al., 2002a)

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

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

Donde  $Q_{surf}$  es la escorrentía acumulada del exceso de la lluvia (mm H<sub>2</sub>O),  $R_{day}$  es la lámina de lluvia para el día (mm H<sub>2</sub>O) y  $S$  es el parámetro de retención (mm H<sub>2</sub>O), el cual varía espacialmente debido a los cambios en los suelos, el uso de la tierra, el manejo y la pendiente y temporalmente debido a cambios en el contenido del agua en el suelo.

El parámetro de retención es definido como:

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

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

- Fase de tránsito hidrológico

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

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

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

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

Donde  $q_{ch}$  es el índice de flujo en el canal (m<sup>3</sup>/s),  $A_{ch}$  es el área transversal del flujo en el canal (m<sup>2</sup>),  $R_{ch}$  es el radio hidráulico para una profundidad de flujo dada (m),  $S \cdot p_{ch}$  es la pendiente a través de la longitud del canal (m/m),  $n$  es el coeficiente “n” de Manning para el canal, y  $v_c$  es la velocidad del flujo (m/s).

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

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

Donde:

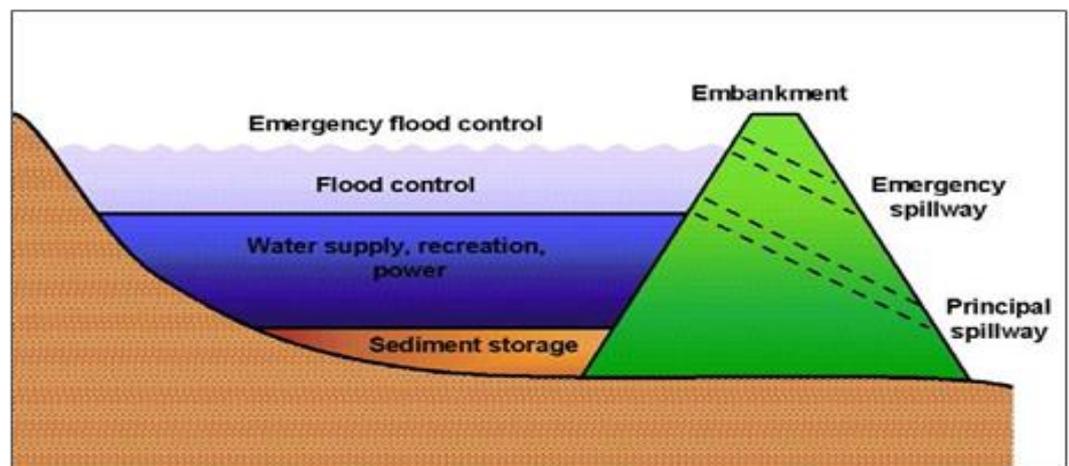
$$V_{stored} = K \cdot q_{out} + K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out})$$

Siendo  $V_{stored}$  el volumen de almacenaje (m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O),  $q_{in}$  es el índice de entrada (m<sup>3</sup>/s),  $q_{out}$  es el índice de descarga (m<sup>3</sup>/s),  $K$  es el tiempo constante de almacenaje del cauce(s) y  $X$  es el factor de peso. Esta ecuación puede ser reacomodada para formar:

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

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

Con respecto a la simulación de reservorios, se consideró el modelo conceptual mostrado en la Figura 5; donde se identifican una salida principal y otra salida de emergencia del reservorio. La información del volumen y área del espejo de agua en las elevaciones de los puntos de salida principal y de emergencia son necesarios para los cálculos de descarga.



**Figura 5: Representación del reservorio en el modelo SWAT**

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

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

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

el día ( $m^3 H_2O$ ) y  $V_{seep}$  es el volumen de agua perdida del cuerpo de agua por infiltración ( $m^3 H_2O$ ).

### **Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico**

#### **Análisis de Sensibilidad**

Se realizó el análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo, por medio de la extensión SWAT-CUP, usando los registros diarios de 7 años correspondientes al periodo de calibración (2000-2006), evaluando 13 parámetros que tienen influencia en la generación de escorrentía superficial descritos en el Cuadro 5; de manera que se logró clasificar el grado de influencia de cada uno de estos parámetros.

Cuadro 5: Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad

<b>PARAMETRO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
v CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva de canal
v CH_N2.rte	Valor de n de Manning del cauce principal
r SOL_AWC(1).sol	Capacidad de agua disponible
r CN2.mgt	Valor del número de curva SCS CN II
v SFTMP.bsn	Temperatura media de congelación de la lluvia
r SOL_K(1).sol	Conductividad hidráulica saturada
v GW_DELAY.gw	Retraso del agua subterránea
v ALPHA_BF.gw	factor alpha del flujo base
v GWQMN.gw	Umbral de profundidad de agua en acuíferos
v ESCO.hru	Coeficiente de compensación de evaporación en
v ALPHA_BNK.rte	Constante de proporcionalidad
r SOL_BD(1).sol	Densidad del suelo a bulbo húmedo
v GW_REVAP.gw	Coeficiente "Revap" de las aguas subterráneas

#### **Calibración**

En el proceso de calibración se consideró el análisis diario en un periodo de 7 años (2000– 2006). Identificados los parámetros más sensitivos, se procedió a asignar valores a los parámetros de entrada

del modelo y generar los caudales simulados. Posteriormente, los caudales simulados serán comparados con los caudales observados (aforados) mediante métodos gráficos y estadísticos como gráficos de serie de tiempo, coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe, PBIAS y RMSE.

**a) Coeficiente de determinación de Pearson (R<sup>2</sup>)**

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

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

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

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

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

### c) Porcentaje BIAS (PBIAS)

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

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

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

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

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

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

### Validación

La fase de validación del modelo, es el proceso donde se demuestra que el modelo de una zona específica es capaz de realizar simulaciones

de suficiente precisión, esta precisión puede variar dependiendo del objetivo (Refsgaard, 1997).

La validación se realizó corriendo el modelo para el periodo (2007 – 2010) usando los parámetros que fueron determinados durante la fase de calibración (2000 – 2006), de manera que se evalúen estos datos generados con datos observados y se logre validar que el modelo es capaz de proyectar datos.

### **Cambio de escala estadístico y proyección de datos climáticos**

Se indican las coordenadas de cada estación meteorológica utilizada en el estudio, para sustraer información regional de la grilla de los MCG; posteriormente, para poder mejorar la resolución de la información climatológica se realiza el cambio de escala estadístico o “downscaling”, obteniéndose información local de mayor precisión en los puntos de ubicación de las estaciones.

Cabe resaltar que los MCG del CMIP3 generan información de resolución entre 150 a 300 Km, en cambio los MCG MRI 3.1 y MRI 3.2 tienen una mayor resolución de 20 Km.

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

#### a) Corrección paramétrica BIAS

rainmod : Datos de precipitación generada

rainGCM : Precipitación obtenida de MCG

amp1: Coeficiente de corrección del promedio

amp2: Coeficiente de corrección de la desviación estándar

$\mu_{FO}$ ,  $\mu_{GCM}$  : Promedio de la data observada,

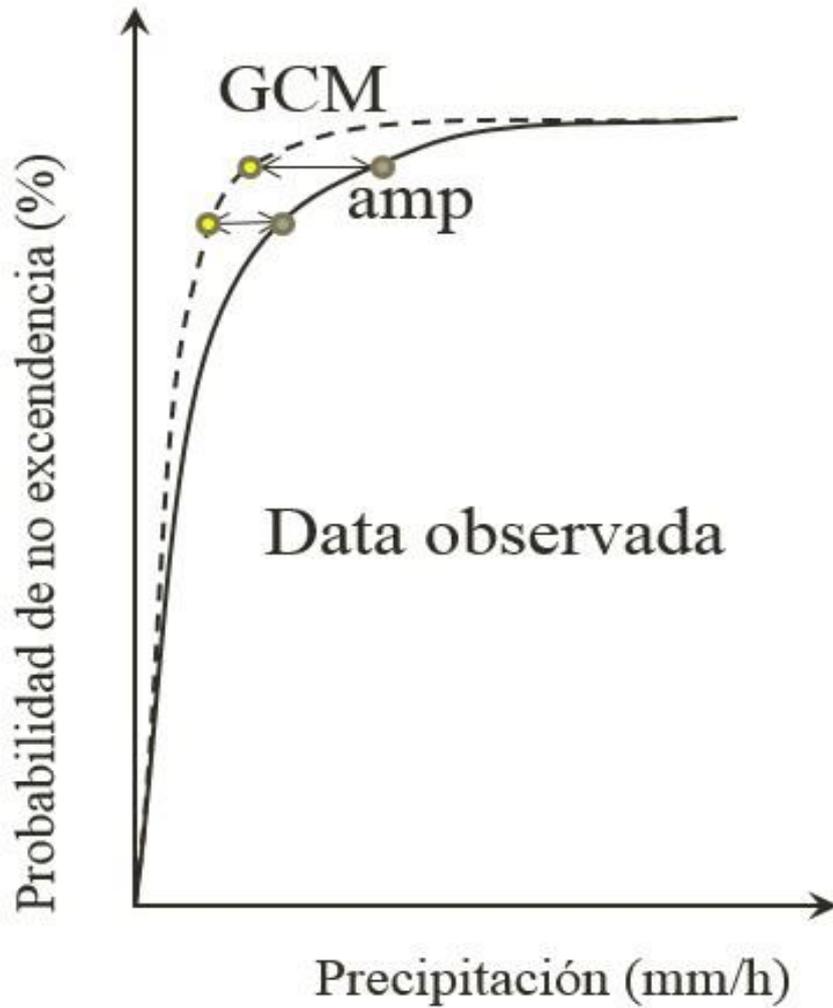
Promedio de la data del MCG  $\sigma_{FO}$ ,  $\sigma_{GCM}$ :

Deriv. Estándar de la data observada,

Deriv. Estándar de la data del MCG

#### b) Cálculo por Función de Distribución Acumulada-CDF

Figura 06: Cambio de escala por el método CDF



Fuente: KomaiK,201

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

$rain_{PNE\_GCM}$  : PNE del MGC

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

(PNE: Probabilidad de no excedencia)

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

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

### **Efecto del cambio climático en la oferta de agua**

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

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

## 1.12.2 MATERIALES E INSTRUMENTOS

### Información geográfica

Se realizó una clasificación y análisis de la información geográfica recopilada, con la finalidad de conseguir que dicha información sea compatible para poder ser ingresada al modelo. La fuente de la información geográfica empleada en el estudio es descrita en el cuadro 6.

Cuadro 6: Fuentes de información geográfica suministrada al modelo.

INFORMACIÓN	DESCRIPCION - FUENTE
<b>TOPOGRAFIA</b>	Imagen ASTER GDEM de resolución 30 m x 30 m- Servidores USGS-NASA
<b>COBERTURA VEGETAL</b>	Mapa de Coberturas Vegetales generales - Dirección General de Asuntos
<b>SUELOS</b>	Mapa de Suelos generales - Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios- (DGAAA-DERN)
<b>CARTOGRAFÍA</b>	Cartas Nacionales de la cuenca del río Pisco - IGN

### Información climática

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

Cuadro 7: Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas disponibles en el estudio

ESTACIO	TIPO	COORD		ALTITU	UBICACIÓN			PERIODO
		Este	Norte		Dpto.	Provincia	Distrito	
Santa Ana	Plu	485513	8559144	4539	Huancavelica	Castrovirreyna	Pilpichaca	1958-
Cusicancha	CO	467532	8509393	3680	Huancavelica	Huaytara	SAN Antonio	1963-2011
Ticrapo	CO	467532	8509393	2174	Huancavelica	Castrovirreyna	Ticrapo	1963-
Huancano	CO	432817	8496293	1019	Ica	Pisco	Huancano	1980-
Bernales	CO	435912	8469091	800	Ica	Pisco	Huancano	1967-
Letrayoc	LIM	194325	8490.00	682	Ica	Ica	Huancano	1999-2010

Fuente: SENAMHI

### Modelos de Circulación General (MCG)

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

Cuadro 8: Descripción de los MCG utilizados

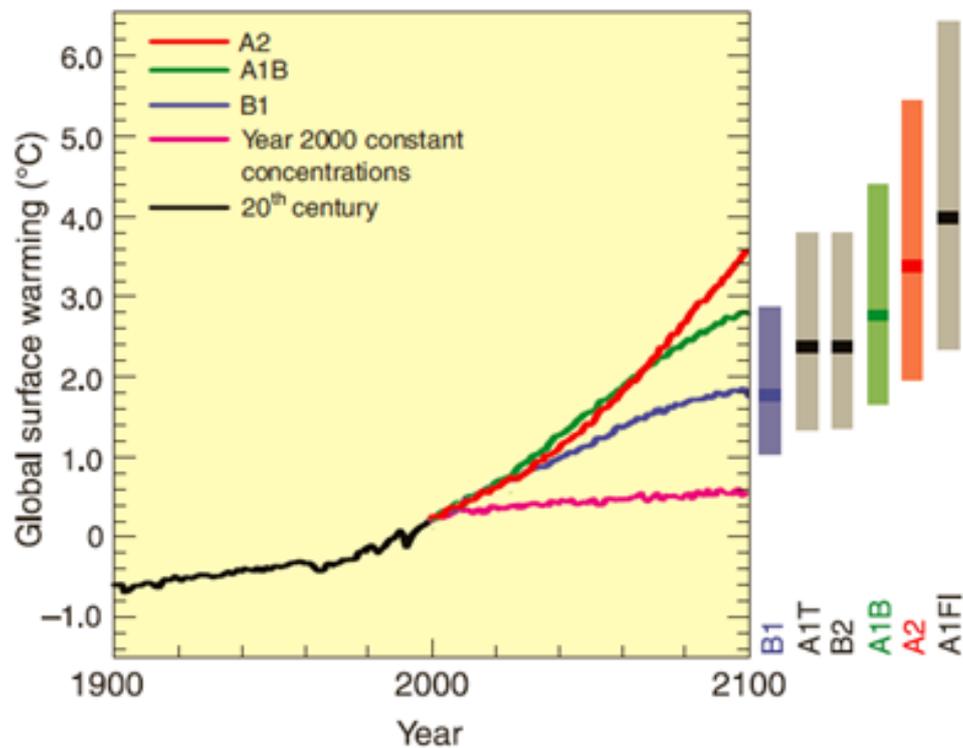
MCG	CÓDIG	SIGLA	INSTITUCION	PAIS
CMIP3	02	CCC	Canadian Centre for Climate Modelling and	Canadá
	03	CNRM	Centre National de Recherches Meteorologiques	Francia
	04	CSIR	Commonwealth Scientific and Industrial Research	Australia
	05	GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA
	06	GISS	Goddard Institute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

En cuanto a la temperatura proyectada para fines del siglo XXI, basados en los resultados de las proyecciones climáticas globales y regionales indicadas en los reportes del IPCC (2007 y 2013); se consideraron las variaciones futuras de temperaturas indicadas en el Cuadro 9, para un escenario de emisión A1B.

Cuadro 9: Cambio de la temperatura media global (°C) con respecto a 1990

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

Fuente: Anexo II - IPCC, 2013



Fuente: Synthesis Report – IPCC, 2007

**Figura 7: Incremento de la temperatura superficial global respecto a 1980-1999**

### Software

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

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



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de la Investigación.

##### **A nivel Mundial:**

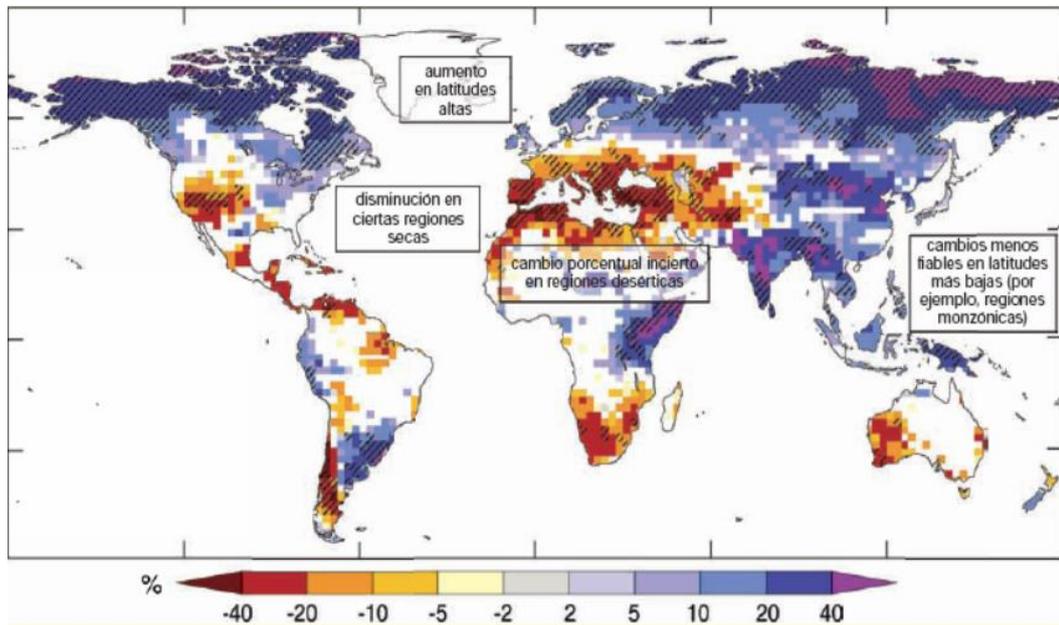
Estudio del Impacto del Cambio Climático sobre los recursos hídricos .Aplicación en las 19 pequeñas cuencas de España. Ing. Pedro Fernández Universidad Politécnica de Madrid.

Según el reporte de la IPCC del 2007 se espera que el cambio climático intensifique el estrés actualmente padecido por los recursos hídricos, debido al crecimiento de la población y al cambio económico y de los usos de la tierra y, en particular, a la urbanización. A escala regional, los bancos de nieve de montaña, los glaciares y los pequeños casquetes de hielo desempeñan un papel crucial con respecto a la disponibilidad de agua dulce.

Según las proyecciones, las pérdidas de masa generalizadas de los glaciares y las reducciones de la cubierta de nieve de los últimos decenios se acelerarían durante el siglo XXI, reduciendo así la disponibilidad de agua y el potencial hidroeléctrico, y alterando la estacionalidad de los flujos en regiones abastecidas de agua de nieve de las principales cordilleras (por ejemplo, Hindu-Kush, Himalaya, Andes), donde vive actualmente más de la sexta parte de la población mundial.

Los cambios en la precipitación y en la temperatura inducen cambios de la escorrentía y de la disponibilidad de agua. Con un grado de confianza alto, la escorrentía aumentaría entre un 10% y un 40% de aquí a mediados de siglo en latitudes superiores y en ciertas áreas tropicales pluviales, incluidas ciertas áreas populosas del este y sureste de Asia, y disminuiría entre un 10% y un 30% en

ciertas regiones secas de latitudes medias y en los trópicos secos, debido a la disminución de las lluvias y a unas tasas de evapotranspiración más altas.



Fuente IPCC-2008

Figura 09: Proyecciones de la escorrentía mundial a finales siglo XXI.

En la Figura 09. Se ilustra los cambios relativos de la escorrentía anual en gran escala (disponibilidad de agua, en valores porcentuales) para el período 2090-2099, respecto del período 1980-1999. Los valores representan la mediana de 12 modelos climáticos para el escenario A1B (IEEE). Las áreas en blanco denotan los lugares en que menos de un 66% de los doce modelos concuerdan en el signo del cambio, y las áreas estriadas, los lugares en que más de un 90% de los modelos coinciden en el signo del cambio.

Hay también un grado de confianza alto en que numerosas áreas semiáridas (por ejemplo, la cuenca mediterránea, el oeste de Estados Unidos, el sur de África o el nordeste de Brasil) padecerán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático. Las áreas afectadas por sequías aumentarían en extensión, y ello podría repercutir negativamente en múltiples sectores: agricultura, suministro hídrico, producción de energía o salud. A nivel regional, la demanda de agua de riego aumentaría sustancialmente por efecto de los cambios climáticos.

Los impactos negativos del cambio climático sobre los sistemas de agua dulce contrarrestan con creces sus efectos beneficiosos (grado de confianza alto). En

las extensiones en que disminuya la escorrentía podría disminuir el valor de los servicios proporcionados por los recursos hídricos (grado de confianza muy alto). En ciertas áreas, los impactos beneficiosos de una más abundante escorrentía anual estarían probablemente atenuados por los efectos negativos de una mayor variabilidad de las precipitaciones y de una alteración estacional de la escorrentía sobre el abastecimiento y calidad del agua y por un mayor riesgo de crecidas.

Las investigaciones disponibles parecen indicar que aumentarán apreciablemente las precipitaciones de lluvia intensas en numerosas regiones, en algunas de las cuales disminuirán los valores medios de precipitación. El mayor riesgo de crecidas que ello supone plantearía problemas desde el punto de vista de la sociedad, de la infraestructura física y de la calidad del agua. Es probable que hasta un 20% de la población mundial llegue a habitar en áreas en que las crecidas aumenten posiblemente de aquí al decenio de 2080. Los aumentos de la frecuencia y gravedad de las crecidas y sequías afectarían negativamente el desarrollo sostenible. El aumento de las temperaturas afectaría también las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lagos y ríos de agua dulce, y sus efectos sobre numerosas especies de agua dulce, sobre la composición de las comunidades y sobre la calidad del agua serían predominantemente adversos. En las áreas costeras, el aumento de nivel del mar agravaría las limitaciones de los recursos hídricos, debido a una mayor salinización de los suministros de agua subterránea.

ALTERNATIVA (2005), en el libro “Desafíos del derecho humano al agua en el Perú” manifiesta que los impactos potenciales del cambio del clima serán probablemente severos. A nivel global se espera que la temperatura y el nivel del mar se incrementen y que haya una mayor frecuencia de eventos climas extremos, como el fenómeno “El Niño”. A nivel más específico se espera que algunos ecosistemas no sean capaces de afrontar este cambio debido principalmente a la exacerbación de la frecuencia y magnitud de las sequías en algunas partes de la tierra y en consecuencia la producción de alimentos se verá afectada.

Las zonas costeras podrían sufrir considerablemente debido al aumento del nivel del mar, así como las vidas y los sustentos de poblaciones costeras, áridas y semiáridas. El riesgo se verá incrementado por la gran incidencia de

estrés de calor y de enfermedades transmitidas por vectores especialmente del trópico y subtropical.

BCEOM – ORSTOM (1999), desarrollo el estudio hidrometeorológico en toda la vertiente peruana del Pacífico, donde determinaron 9 zonas pluviométricas homogéneas, utilizando la metodología del vector regional de índices pluviométrico. En base a esta zonificación se establecen correlaciones entre los vectores representativos de cada zona con índices climáticos globales como Temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 1+2 y Niño 3, y el índice de oscilación del sur (IOS). Donde concluye que los años Niño o Niña son diferentes, tienen duraciones variadas, ocurren en períodos diferentes y su centro de influencia varían, etc.

CEPAL (2009), las proyecciones climáticas muestran un persistente aumento de eventos climáticos extremos, se espera una intensificación de las lluvias en México, las regiones tropicales y el sureste de América del sur, donde el promedio de las cifras que arrojan los modelos climáticos indican un aumento de la precipitación del 10%, con una tendencia creciente el norte, el sureste de América del sur y reducciones en el este de la Amazonía y el nordeste de Brasil, el centro de Chile y la mayor parte de México y Centroamérica. Las proyecciones de días secos consecutivos tienden a incrementarse en México, Centroamérica y en toda América del sur (excepto el Ecuador, noreste de Perú y Colombia), asociadas a cambios positivos o negativos en las precipitaciones menores al 10%.

El Comercio (Suplemento del 8 de noviembre 2009), la lluvia que venía en setiembre, ahora llega en enero del siguiente año. El sol quema y tenemos que usar bloqueador ¿Cuándo se ha visto eso en el campo?; pregunta Julián Pilco, campesino de Anta. Ya no hay nieve en el Apu Ausangate, no hay agua en los puquios, incrementa Cayetano Huanta, también de la región imperial. Hay plagas y enfermedades resistentes; dice Eugenio Colonia de Huaraz, mientras cerca al mar, en Chimbote la maestra Yolanda Lara asegura que constantemente el mar se sale y las bases de las casas se debilitan. En la Amazonía de San Martín, el agricultor Misael Salas Amasifuen cuenta que cayó granizo en su comunidad, “eso nunca había pasado”. Son testimonios que revelan que algo ya está pasando.

Lavado et al (2007), realizó el estudio del Impacto hidrológico del Fenómeno “El Niño” y “La Niña”, en las cuencas de los ríos Piura, Chira, Tumbes y

Zarumilla, utilizando índice de sequías como el IPN (Índice de precipitación Normal) y el IPE (Índice de precipitación estandarizada) para caracterizar el impacto de los eventos ENOS y LNOS (Línea de oscilación del sur) sobre las series estadísticas de precipitación, encontrando que los regímenes de precipitaciones son directamente proporcional a los índices ENOS y LNOS y, esta influencia se da sobre todo en las estaciones cercanas al Océano Pacífico.

Marengo (2007), indica que el calentamiento global va a aumentar la temperatura de la región amazónica entre 6°C a 8°C, pudiendo derivar a un clima más seco con reducciones de las lluvias en un 20%, provocando la sabanización de la cuenca amazónica, esto para un escenario pesimista A2. También los niveles de los ríos, se reducirán provocando la muerte de los peces, comprometiendo el uso de la hidroelectricidad, y aumentar los peligros como incendios forestales.

PNUMA (1992), indica que los cambios de la temperatura y los vientos tendrán repercusiones significativas en el ciclo hidrológico, además es posible que las precipitaciones disminuyan en ciertas zonas y aumenten en otras; no obstante, el aumento de los niveles de evaporación puede reducir la escorrentía incluso en regiones donde se registre aumento de las precipitaciones.

SENAMHI (2006), en el “Balance hídrico superficial cuenca del río Tumbes”, se concluye que el caudal medio anual 111,0 m<sup>3</sup>/s (estación El Tigre) valor que equivale a 2 647,7 mm, significa que en la cuenca del río Tumbes existe un superávit del recurso hídrico, y bajo las condiciones actuales y naturales, el río Tumbes satisface holgadamente las demandas existentes en la cuenca.

SENAMHI (2009), en el estudio de Escenarios de Cambio Climático al año 2030, para la Segunda Comunicación Nacional, concluye que la precipitación total anual muestra incrementos (tendencia positiva) marcados sobre la costa norte del país, mientras que la selva norte presenta disminuciones (tendencias negativas) desde la década de 1960 hasta fines del siglo pasado. El análisis temporal de los últimos 40 años indica que mecanismos de circulación de gran escala modulan la precipitación en períodos, principalmente, decadales o mayores para estas regiones. En el caso de la variabilidad interanual, los eventos ENOS son los responsables, pero su incidencia es mínima, restringida a los eventos más intensos. Por otro lado, la sierra central y sur muestran una

variabilidad interanual muy similar, pero con opuestas, donde los eventos ENOS parecen ser la principal fuente dinámica que modula, con mayor intensidad, estas regiones.

Las tendencias lineales de la temperatura máxima media anual y estacional muestran un predominio de valores positivos (aumento) sobre todo el territorio con valores de  $+0.2$  °C/década en promedio y, en general, estos son estadísticamente significativos en las zonas altas del sur del Perú. También se observa que temperaturas máximas son afectadas por los eventos intensos del ENOS, generando anomalías positivas de diferente intensidad en todo el Perú, caracterizando la variabilidad interanual. Además, se observa evidencias de la posible modulación de estas temperaturas por oscilaciones mayores que la variabilidad interanual.

Las tendencias anuales y estacionales de las temperaturas mínimas promedio son en su mayoría positivas con valores de  $0,1-0,2$  °C/década, con excepción de varias estaciones que están localizadas en la parte norte del Lago Titicaca. Las variaciones temporales muestran que el incremento o disminución de esta variable son graduales (monotónicas) en todo el período del presente análisis y se muestra nítidamente que estas temperaturas son moduladas por oscilaciones mayores que la interanual en mayor intensidad que las observadas en las temperaturas máximas.

Además, la distribución temporal de la temperatura mínima muestra que estas temperaturas son afectadas por las fases del fenómeno ENOS, que altera la variabilidad interanual, dependiendo de su intensidad y la ubicación de la localidad donde se observa la temperatura. Es importante resaltar que las tendencias de las temperaturas mínimas medias incrementaron, en promedio, ligeramente en menor proporción que las temperaturas máximas.

Las tendencias observadas de las temperaturas máxima y mínima, en promedio, en todo el Perú para los 41 años (1965-2006) analizados, es de  $0,1$  °C/década a  $0,2$  °C/década. Estos valores se encuentran dentro del rango calculado para todo el globo terrestre por el IPCC4, entre los años de 1981 a 2005, que es de  $0,18$  °C/década. Como se indicó anteriormente, las tendencias de las temperaturas presentan valores regionales muy particulares que, posiblemente, además de la influencia antropogénica existen otras en algunas estaciones, como las islas de calor, debido al crecimiento de las ciudades y a

alteraciones en las propiedades del suelo por alteraciones en el medio ambiente, como deforestación, etc.

ONU (1992), en el informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, en el Principio 2, se manifiesta que los recursos naturales de la tierra, incluidos, el aire, el agua, la tierra, la flora y la fauna y especialmente muestras representativas de los ecosistemas naturales, deben preservarse en beneficio de las generaciones presentes y futuras mediante una cuidadosa planificación u ordenación, según convenga.

I PPC (2001), en el tercer reporte de evaluación de cambio climático, se indica que el Perú, país tropical, ha sufrido en los últimos años los impactos de eventos climáticos recurrentes y con mayor intensidad, como eventos El Niño y las olas de frío que asolan el sur del país; asimismo, la escasez de lluvias durante el año 2004, ha puesto en riesgo la demanda hídrica del sector agrícola, energético y de la población en general.

#### **A nivel Local:**

En la ciudad de Pisco referente al tema no existe un estudio específico referente al cambio climático teniendo referencia otros como:

- Balance Hídrico Superficial en el Río Ica
- Atlas de la Cuenca del Río Ica; ambos llevados a cabo por la Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos del SENAMHI.

En otros contextos a nivel Nacional Tenemos:

- Modelización de Escenarios de Disponibilidad Hídrica Futura en la cuenca del río Chancay – Lambayeque. Ing. Oscar Felipe .DGH-SENAMHI
- Escenarios de Cambio Climático en la cuencas de los ríos Mantaro y Urubamba .Ing. Grinia Avalos .DGM – SENAMHI.
- Escenarios del Cambio Climático para la cuenca del Río Piura: PROCLIM.

Avances Nacionales Relativos Al Cambio Climático

*Institucionalidad del Perú frente al cambio climático*

El Ministerio del Ambiente es el ente rector del sector ambiental nacional, que coordina en los niveles de gobierno local, regional y nacional. Nació como una respuesta política a las obligaciones ambientales internacionales del Perú en materia ambiental.

El Ministerio del Ambiente, creado mediante D.L. N°1013 del 14 de mayo del 2008, absorbió al Consejo Nacional del Ambiente (CONAM), y tiene como

objetivo la conservación del ambiente, de modo tal que se propicie y asegure el uso sostenible, responsable, racional y ético de los recursos ambientales y del medio que los sustenta, que permita contribuir al desarrollo integral, social, económico y cultural de la persona humana, en permanente armonía con sus entorno, y así asegurar a las presentes y futuras generaciones del derecho de gozar de un ambiente equilibrado para el desarrollo de la vida.

Y es a través del Viceministerio de Desarrollo Estratégico de los Recursos Naturales, que tiene entre sus funciones “Elaborar y coordinar la estrategia nacional frente al cambio climático” y las medidas de adaptación, así como supervisar su implementación.

En el Perú (CONAM, 2005), se ha definido nueve ejes temáticos, teniendo en base a los ejes aprobados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCC):

- a) Inventario y mitigación
- b) Mecanismo de desarrollo limpio
- c) Vulnerabilidad y adaptación
- d) Sistemas de observación del clima e investigación
- e) Difusión, capacitación y participación
- f) Desarrollo y transferencia de tecnologías
- g) Negociaciones internacionales
- h) Sinergias con otras convenciones y/o convenios

En el Perú, son muchas las instituciones públicas y privadas así como diferentes sectores que vienen trabajando en los ejes indicados, los mismos que han sido identificados en razón a la naturaleza de sus actividades.

El intercambio entre las mismas permite apoyar el proceso de formulación integral de políticas para el cambio climático.

Avances nacionales frente al cambio climático. Los avances logrados por el Perú en la gestión del cambio climático, se presenta a continuación:

#### **a) Ratificación del Protocolo de Kyoto**

El Perú ha suscrito y ratificado la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (1992) y el Protocolo de Kyoto (1997), lo que significa que su contenido tiene rango de ley nacional.

### **b) La Comisión Nacional de Cambio Climático**

Desde 1996, CONAM presidió este grupo técnico consultivo, actualmente está bajo la responsabilidad del Ministerio del Ambiente. Entre sus logros, se encuentran los aportes al desarrollo de la Primera Comunicación Nacional. Con DS. 006.2009-MINAM 28 de marzo se nombra una nueva comisión de Cambio Climático, que tiene Función: seguimiento de los sectores públicos y privados concernidos en la materia a través de la implementación de la UNFCCC, así como el diseño y promoción de la Estrategia Nacional de Cambio Climático, orientar e informar a las estrategias, planes y proyectos de desarrollo nacional, regional y local.

Esta nueva comisión está conformada:

- Ministerio del Ambiente.
- Ministerio de Relaciones Exteriores.
- Ministerio de Economía y Finanzas.
- Ministerio de la Producción.
- Ministerio de Agricultura.
- Ministerio de Energía y Minas.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Ministerio de Comercio Exterior y Turismo.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Ministerio de Salud.
- Ministerio de Educación.
- SENAMHI, CONCYTEC, IIAP, IGP, IMARPE y FONAM.
- Asamblea Nacional de Gobiernos Regionales
- Consejo Nacional de Decanos de Colegios Profesionales del Perú y
- Confederación Nacional de Instituciones Empresariales Privadas -CONFIEP.

### **c) La Primera Comunicación Nacional**

En mayo 2001, el Perú presentó su Primera Comunicación Nacional, la misma que contenía el primer inventario de gases de efecto invernadero (con base en el año 1994), las primeras aproximaciones a los estudios de vulnerabilidad del Perú respecto a los recursos hídricos de alta montaña y a los impactos del fenómeno “El Niño”, así como las políticas y medidas que influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero.

#### **d) La Estrategia Nacional de Cambio Climático**

El Perú cuenta con una Estrategia Nacional de Cambio Climático, aprobada mediante Decreto Supremo N° 086 - 2003 - PCM, elaborada por la Comisión Nacional de Cambio Climático que estuvo presidida por el CONAM. Esta estrategia está enmarcada en las políticas 10 (reducción de la pobreza) y 19 (gestión ambiental y desarrollo sostenible) del Acuerdo Nacional.

Por medio de la comisión de Cambio Climático, se ha formulado la Estrategia Nacional de Cambio Climático al 2010, la cual fue aprobada en enero del 2003 por el consejo Directivo de CONAM.

Los objetivos de la estrategia son:

- Reducir los impactos adversos del cambio climático, a través de estudios integrados de vulnerabilidad y adaptación.
- Controlar las emisiones de gases de contaminantes locales y de gases de efecto invernadero (GEI), a través de programas de energía renovable y de eficiencia energética en los diversos sectores productivos.

Actualmente se viene trabajando un diagnóstico sobre el cumplimiento de avances en el marco de la ENCC y propuestas de mejora como insumo para el proceso de actualización.

#### **e) La Agenda Ambiental Nacional**

La Agenda Ambiental Nacional 2015 - 2017, importante instrumento de gestión y planificación del Sistema Nacional de Gestión Ambiental, que ha sido elaborada con el concurso a nivel nacional, regional y local de entidades públicas, privadas y de la sociedad civil, prioriza la implementación de la Estrategia Nacional de Cambio Climático con el enfoque de "Incorporar la variable climática en los planes de desarrollo". Las líneas de trabajo se reflejan en el documento del Anexo. Cabe resaltar que los instrumentos de Zonificación Ecológica Económica y Ordenamiento Territorial pueden ser algunos de los canales finales para lograr esta meta.

#### **f) La Estrategia Nacional para el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)**

Elaborada por CONAM, en el marco del Protocolo de Kyoto y se han realizado las siguientes tareas:

- Identificación del potencial de reducción de emisiones del Perú.
- Análisis del mercado del carbono.
- Propuesta del plan de acción para el MDL

### **g) Estrategias Regionales de Cambio Climático**

Se ha elaborado la guía para la elaboración de la Estrategia Regional frente al cambio climático, que busca apoyar a los Gobiernos Regionales en la tarea de determinar sus propias estrategias frente al CC y facilitar la información regional a la Estrategia Nacional para el cumplimiento de sus metas.

## **2.2 Marco Histórico.**

Desde el origen de la vida, el hombre ha utilizado los recursos naturales para asegurar su supervivencia y crear objetos que le ayudaran a prosperar dentro de un medio difícil y hostil.

La población humana era por entonces muy escasa y los problemas medioambientales, inexistentes, pero el afán del hombre por progresar social y económicamente ha transformado la vida del planeta,

Los restos de su actividad se integraban rápidamente en la naturaleza y no fueron causa de problemas debido a la escasa población existente.

Las culturas más evolucionadas surgieron a partir de la aparición de la metalurgia, la alfarería, y las incipientes producciones de productos químicos, el yeso, la cal, etc.

En este momento las sociedades urbanas comienzan a tener dificultades para eliminar los residuos que producen, sobre todo donde las concentraciones urbanas son más importantes. Los núcleos de menor dimensión y riqueza aún no tenían este tipo de problema medioambiental.

## **2.3 Marco Conceptual**

La cuenca hidrográfica como unidad de planificación

Dentro de cualquier estudio referido al recurso hídrico, es necesario establecer como unidad de análisis a la cuenca hidrográfica; la UNESCO (1974) denomina como cuenca hidrográfica al área que recoge las aguas que en ella se precipitan o que surgen del subsuelo hacia un colector principal. El nombre del cauce colector es el que, en general, se aplica a la cuenca.

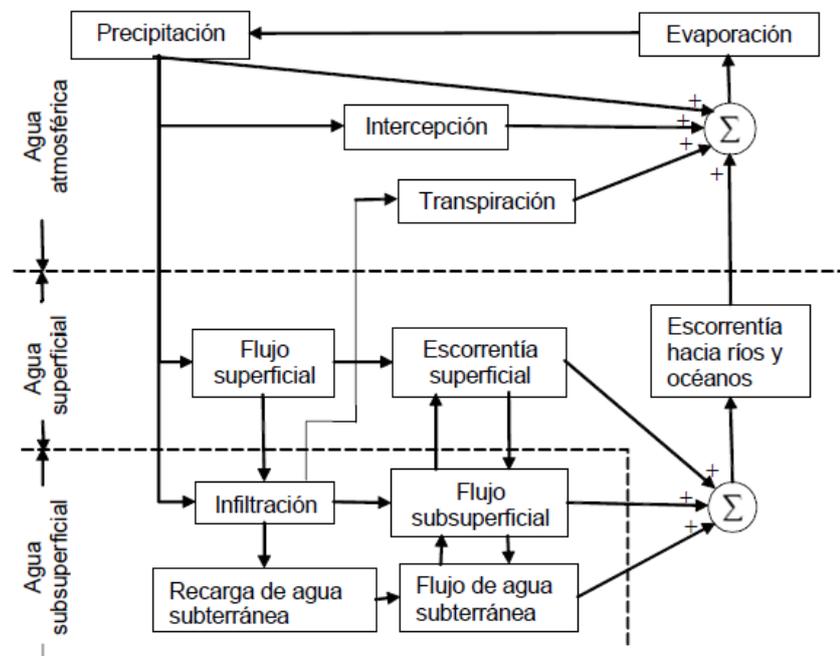
El análisis hidrológico de una cuenca hidrográfica como sistema proporciona un instrumento básico para estudios de planificación ambiental y de desarrollo, ya que constituye una expresión del medio ambiente, donde tiene lugar el ciclo

hidrológico, en el cual existen interrelaciones entre componentes con cierto grado de permanencia temporal (Salinas,2003).

### El ciclo hidrológico como sistema;

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

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



Fuente: Ven Te Chow et al., 1994.

Figura 10: Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global

### **Modelo del sistema hidrológico**

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

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

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

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

### **CLASIFICACION DE LOS MODELOS HIDROLOGICOS**

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

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

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

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

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

### **EL MODELO SWAT - SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL**

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

SWAT es un modelo de tiempo continuo, que opera en un intervalo de tiempo diario y está diseñado para predecir el impacto en el manejo del suelo y la vegetación en la producción de agua, sedimentos y químicos agrícolas en grandes y complejas cuencas con variación en suelos, uso de suelo y condiciones de manejo en largos periodos (Arnold et al., 1998). El modelo está conformado por un conjunto de sub-modelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos.

El modelo hidrológico SWAT está basado en la ecuación general de balance hídrico:

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

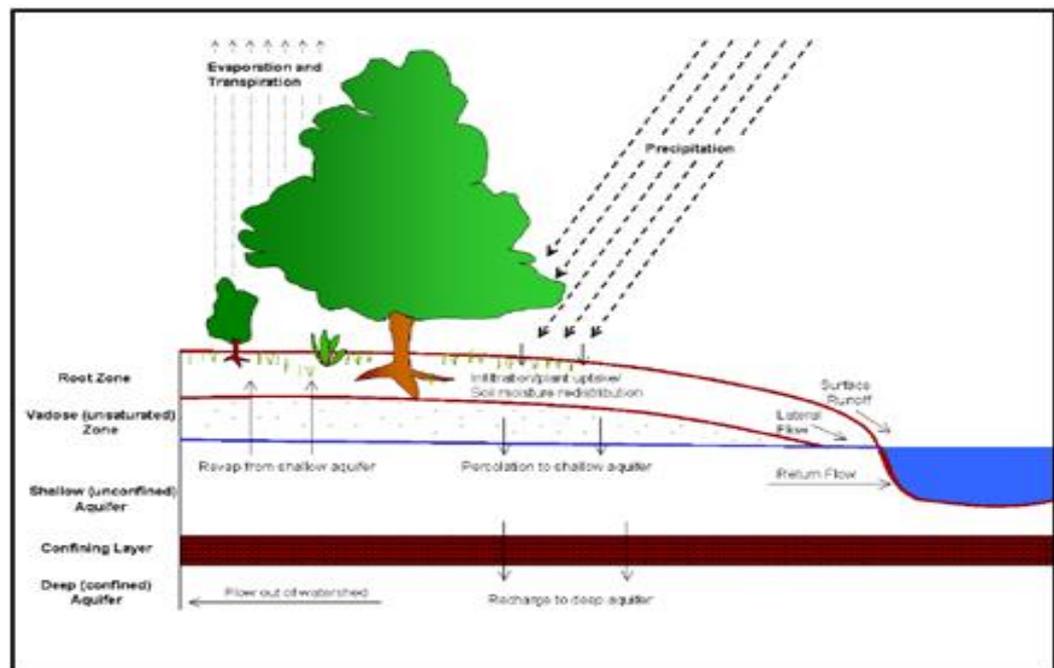
Donde  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo (mmH<sub>2</sub>O);  $SW_0$  es el contenido de agua inicial en el día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O);  $t$  es el tiempo (día);  $R_{day}$  es la cantidad de precipitación en el día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O);  $Q_{surf}$  que es la cantidad de escorrentía superficial por día (mmH<sub>2</sub>O);  $w_{seep}$  es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O);  $Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno en el día  $i$  (mmH<sub>2</sub>O); (Neitsch et al., 2002a).

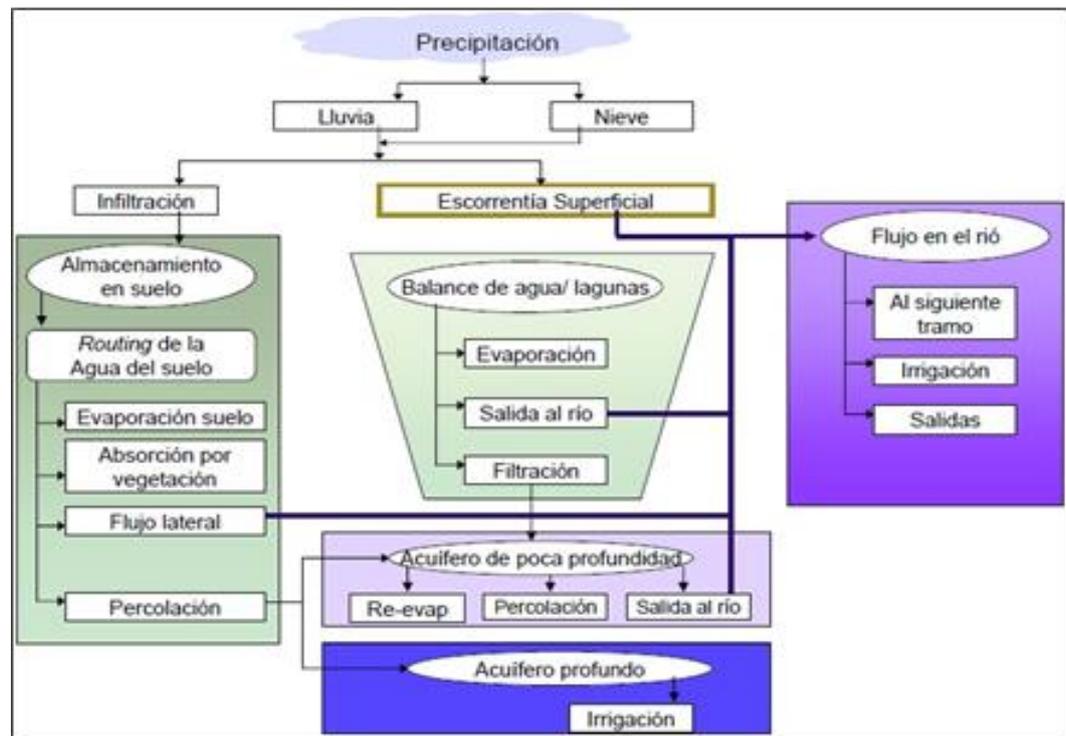
Características del modelo SWAT:

- Está basado físicamente. En lugar de incorporar ecuaciones de regresión que describan la relación entre las variables de la data de entrada y salida, SWAT requiere información específica del clima, propiedades del suelo, topografía, vegetación, y manejo de prácticas de suelo que ocurren en la cuenca hidrográfica. El proceso físico asociado a movimiento de agua, movimiento de sedimentos, crecimiento de cultivos, ciclo de nutrientes, etc. Son directamente modelados por SWAT usando la data de entrada.

Los principales componentes del modelo incluyen: el clima, hidrología, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos. En SWAT, una cuenca se divide en subcuencas múltiples, que están divididos en unidades de respuesta hidrológica (URH's) que consisten en áreas homogéneas de uso de la tierra y características del suelo, las cuales son identificadas dentro de un espacio de simulación de SWAT..

- Los beneficios de este planteamiento son:
  - Cuencas que no cuentan con data de monitoreo (Ej. Data de estación de flujo) pueden ser modeladas.
  - El impacto relativo de una data de entrada alternativa (Ej. Cambios de manejo de prácticas, clima, vegetación, etc.) en la calidad de agua u otras variables de interés pueden ser cuantificadas.
- El uso de data de entrada fácilmente disponible, SWAT puede ser usado para estudiar procesos especializados como el transporte de bacterias, usando la mínima data requerida para lograr que el modelo se ejecute.
- Es computacionalmente eficiente. Simulaciones de grandes cuencas o variedades de estrategias pueden ser ejecutadas sin una excesiva inversión de tiempo y dinero.
- SWAT es un modelo de tiempo continuo, el modelo no está diseñado para simular eventos singulares.





Fuente: Neitsch, 2011

Figura 11: Representación esquemática del ciclo hidrológico en SWAT

## EXPERIENCIAS CON SWAT EN PERÚ

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

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

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

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

Tiscareno *et al.* (1994) plantean que las predicciones de los modelos están sujetas a incertidumbres causadas por:

- a) errores del modelo, ya que éste es una abstracción de la realidad y contiene simplificaciones y aproximaciones de los procesos representados;
- b) errores en la estimación de los parámetros medidos en el campo y en laboratorio, ya que muchos de los parámetros usados para describir la cuenca son difíciles de medir directamente.
- c) un entendimiento incompleto de cómo los valores de los parámetros varían en el espacio y en el tiempo.

Es por ello que el análisis de sensibilidad puede ser empleado para evaluar la incertidumbre del modelo en relación a los errores en la estimación de los parámetros.

Los estudios de sensibilidad ayudan a determinar si el modelo produce resultados adecuados en relación a sus parámetros de entrada. Además, suministran información sobre el nivel de certeza del modelo, proporcionan el entendimiento interno y de los factores que influyen la respuesta del sistema físico (Nearing et al., 1990).

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

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

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

**Cuadro 10: Parámetros más influyentes obtenidos en el modelo SWAT.**

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

Fuente: Carmona ,2007

### **CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO**

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

Los principales factores que limitan la correcta calibración de un modelo son la insuficiencia de estaciones meteorológicas en las cercanías de la cuenca, los cortos períodos de monitoreo y la falta de continuidad de los datos, así como la carencia de mediciones de caudales en las estaciones, que generalmente tienen poca representatividad de la gran parte de las condiciones (solamente pequeñas tormentas y tormentas durante la época de lluvia) (Guzmán et al., 2004).

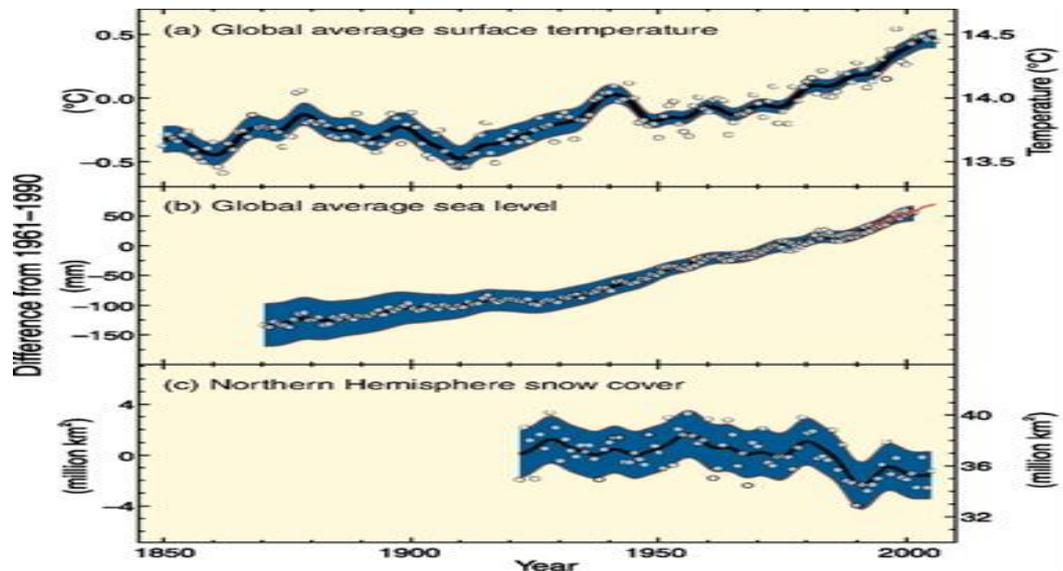
Adicionalmente, debe tenerse siempre presente que es posible destruir la representación física del sistema del modelo por los ajustes de calibración, además de ajustar parámetros erróneos. Según Palacios (1986) la validación del modelo consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación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

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

### **CAMBIO CLIMÁTICO**

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

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



Fuente: IPCC, 2007

Figura 12: Cambios observados en temperatura, nivel del mar y cobertura de nieve en el hemisferio norte

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

## ESCENARIOS DE EMISIONES

Existen escenarios del “posible clima futuro”, que son derivados de los escenarios de posibles emisiones futuras de gases de efecto invernadero,

los cuales se utilizan en modelos climáticos como elemento introducido para el cálculo de proyecciones climáticas.

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

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

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

- **Escenario A1.** La familia de escenarios y línea evolutiva A1 describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido; la población mundial alcanza su nivel más alto a mitad de siglo y disminuye posteriormente, produciéndose una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficientes. Las cuestiones más importantes son la interacción cultural y social entre las regiones y la capacitación, con una importante reducción de las diferencias regionales en los ingresos per cápita. La familia de los escenarios A1 se divide en tres grupos que describen las distintas direcciones del cambio tecnológico en el sistema energético. Los tres grupos A1 se distinguen por su énfasis tecnológico: fuentes de energía intensivas de origen fósil A1F1, de origen no fósil (A1T) o un equilibrio

entre todas las fuentes A1B (el equilibrio se define como la no dependencia excesiva de una fuente de energía concreta, suponiendo que se apliquen ritmos similares de mejoras en todas las formas de aprovisionamiento energético y en las tecnologías de uso final).

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

### **MODELOS DE LA CIRCULACIÓN GENERAL (MCG)**

Los modelos numéricos MCG (General Circulation Models (GCMs) siglas en inglés), que representan los procesos físicos de la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie de la tierra, son las herramientas más avanzadas

actualmente disponibles para la simulación de la respuesta del sistema climático global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero . (IPCC, 2013).

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

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

Los resultados de los modelos de circulación global (MCG) pueden proporcionar series futuras de precipitación y temperatura sobre un territorio extenso, que se pueden detallar en un área menor mediante técnicas de “downscaling” o “cambio de escala”. Los métodos de downscaling estadístico se basan en modelos que relacionan de forma empírica las variables de circulación a gran escala (predictores), dadas por los modelos de circulación global (MCGs), con las variables locales observadas en superficie (predictandos; típicamente temperatura y precipitación). Dichos modelos se ajustan utilizando datos del clima presente y son posteriormente aplicados para proyectar localmente las simulaciones futuras de los MCGs (Wilby et al., 2004).

### **CMIP3 (COUPLED MODEL INTERCOMPARISON PROJECT-PHASE 3)**

En respuesta a una actividad propuesta por las entidades PMIC y WGCM, el PCMDI voluntariamente se ofreció a coleccionar los resultados de los modelos aportados por los principales centros de modelización de todo el mundo, Los resultados de modelos climáticos a partir de simulaciones del clima pasado, presente y futuro que se recogieron mediante el PCMDI,

especialmente durante los años 2005 y 2006, constituyen la fase 3 del Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP3). En parte, el WGCM organizó una actividad para permitir que quienes están fuera de los principales centros de modelización, puedan realizar investigaciones de interés para que los científicos del clima preparen el Cuarto informe de evaluación (AR4) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

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

Esta colección sin precedentes, de la producción de modelos recientes, se conoce oficialmente como el "WCRP CMIP3 multi-model dataset".

Tiene el propósito de servir a Grupo de Trabajo 1 del IPCC, que se centra en el sistema climático físico - atmósfera, superficie terrestre, océano y el hielo del mar - y la elección de las variables archivadas en el PCMDI que refleja este enfoque. Un conjunto más comprensivo de la producción de un determinado modelo, puede estar disponible en la institución que lo produjo.

Con el consentimiento de los grupos de modelado climático participantes, el WGCM ha declarado el CMIP3 como un multi-modelo de conjunto de código abierto y libre, con fines no comerciales.

Después de registrarse y aceptar los "términos de uso", ahora cualquiera puede obtener la salida del modelo a través del portal de datos ESG, ftp, o el servidor OPeNDAP

### **CAMBIO DE ESCALA ESTADÍSTICO**

Los métodos de "downscaling" estadístico se basan en modelos que relacionan de forma empírica las variables de circulación a gran escala (predictores), dadas por los modelos de circulación general (GCMs), con las variables locales observadas en superficie (predicando típicamente temperatura y precipitación). Dichos modelos se ajustan utilizando datos del clima presente y son posteriormente aplicados para proyectar localmente las simulaciones futuras de los GCMs, lo que supone su mayor limitación,

puesto que se asume su estacionalidad (Wilby et al. 2004). Pese a ello, presentan otras muchas ventajas: Tienen la capacidad de calibrar los desajustes sistemáticos de los GCMs (debidos, por ejemplo, a la grosera representación de la orografía), permiten la selección manual de predictores (incluyendo sólo aquellos que sean reproducidos con mayor fiabilidad) y su pre-proceso (Brands et al. 2001b)

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

### **INCERTIDUMBRE EN LA PREDICCIÓN DEL CLIMA FUTURO**

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

## CAPÍTULO III

### SOLUCIÓN PROPUESTA

#### 3.1 Análisis de la solución propuesta. (Benchmarking).

##### 3.1.1 Análisis estratégico

Los enfoques actuales en análisis estratégicos, como las normas operativas recomendadas por expertos, suelen resultar inadecuadas cuando se trata de abordar impactos del cambio climático. Estos enfoques solo incorporan riesgos conocidos y son incapaces de abordar los impactos de riesgos e incertidumbres desconocidos, incluyendo los que provienen del cambio climático. En el futuro cercano, se convertirá en una prioridad clave el análisis estratégico y gestionar el riesgo y hacer frente a la incertidumbre en las cuencas fluviales. Esto se puede lograr utilizando diversas medidas, incluyendo monitorear peligros y riesgos, disminuir los riesgos desconocidos por medio de la investigación de sistemas y determinar el ámbito y clase de incertidumbres relevantes. Estas acciones pueden reducir a un mínimo la incertidumbre existente.

##### 3.1.2 Análisis funcional

Los recursos hídricos forman parte de ecosistemas complejos que todavía no se conocen en su totalidad. Como el cambio climático agrega más riesgos e incertidumbres, se necesita un análisis funcional más que el estilo de gestión hídrica que sea suficientemente flexible para acomodarse a un cambio permanente. El monitoreo y la evaluación de desempeño son parte esencial de un análisis funcional al estilo de gestión capaz de adaptarse, que constituye la piedra angular del “aprendizaje social”, o sea, aprender con las partes interesadas la mejor forma de gestionar el recurso hídrico compartido.

### 3.1.3 Etapas de la solución

Si no existe una solución fácil para el cambio climático, entonces ¿de quién es la responsabilidad de abordar el problema? Algunos profesionales del agua preferirían creer que no es suya. Después de todo, son los sectores de la economía que consumen energía quienes han creado este problema. ¿No tendría que ser también suya la responsabilidad de solucionarlo disminuyendo la cantidad de dióxido de carbono y otras emisiones de gases de efecto invernadero que se generan con el empleo de carbón, petróleo y gas? Lamentablemente, no resultan fáciles. Aunque los gobiernos y algunas industrias progresistas están comenzando a asumir responsabilidad por sus emisiones, ya hemos dejado atrás el punto en que se podía evitar el calentamiento actual de la Tierra. Peor aún, las reducciones de emisiones que se han acordado hasta ahora son demasiado pequeñas como para tener un impacto significativo en la tendencia hacia el calentamiento. La mayoría de los expertos consideran que el Protocolo de Kyoto fue “un primer paso”. Sea para bien o para mal, el cambio climático sin duda alguna se convertirá en una preocupación creciente de los profesionales del agua alrededor del mundo. Cada vez más, la gestión de los recursos hídricos va consistiendo en reconciliar utilizaciones y demandas diferentes y cambiantes del agua. Se ha demostrado que la gestión convencional de los recursos hídricos resulta débil por ser demasiado inflexible para abordar los retos actuales con los que se enfrenta el sector. En este sentido, se puede ver la adaptación al cambio climático como una oportunidad para reforzar la tendencia hacia una mayor flexibilidad en la forma en que se gestiona y planifica el uso del agua. Puede convertirse en una fuerza positiva que robustezca esfuerzos actuales y nuevos por innovar la gestión del agua. Por esta razón, incluso los profesionales más escépticos del agua harían muy bien en informarse más acerca de cómo adaptarse con éxito al cambio climático.

Esto sugiere que los datos y premisas a partir de los cuales se ha planificado y gestionado la utilización del agua en el pasado ya no se pueden seguir considerando como válidos para el futuro. Lamentablemente, los indicios generales de cambio climático y sus impactos todavía no son lo suficientemente precisos como para constituir una base confiable que induzca a cambiar las decisiones actuales cotidianas en la gestión hídrica. Debido a temperaturas más

elevadas y a una mayor humedad, que desestabilizan la atmósfera global y el ciclo hidrológico, las pautas del tiempo se están volviendo cada vez más difíciles de pronosticar. Existe una considerable incertidumbre en cuanto a la tasa e incluso a la dirección del cambio, tanto en el ámbito regional como en el local.

## **3.2 Estudio de factibilidad**

### **3.2.1 Factibilidad técnica.**

Las herramientas principales técnicas que estamos utilizando en este estudio son los modelos:

Los modelos climáticos constituyen la herramienta más confiable disponible en la actualidad para la generación de información acerca de las perspectivas climáticas futuras en la escala de decenios a un siglo en respuesta a acciones antrópicas o cambios naturales en los forzamientos externos del sistema climático.

### **3.2.2 Factibilidad operativa.**

Dentro de la parte operativa es la aplicación del modelo SWAT en la cuenca del río Pisco, cumpliéndose con los procesos que van a permitir determinar la evaluación de la sensibilidad, calibración y validación del modelo en mención.

### **3.2.3 Factibilidad económica.**

Este modelo como es modelo gratuito que se baja de la Web, su gasto no representa un desembolso económico en la adquisición de ese modelo, más bien la importancia que si se reconsidera es tal como se ha definido en el plan de tesis el mayor gasto es en la operación de campo debido a las actividades hidrometeorológicas y el recojo de información y la evaluación de escenarios con este modelo calibrado, en base de la información obtenida en los modelos CMIP3, MRI3.1 y MRI3.2.

### **3.2.4 Factibilidad legal**

Toda la parte factibilidad legal se encuentra dentro de:

- A. Constitución 1993.
- B. Código Civil.
- C. Legislación de los recursos naturales (RN).
- D. Legislación ambiental sobre el agua.

- E. Legislación sanitaria sobre el agua.
- F. Ley Orgánica del Poder Ejecutivo, Ley 29158.
- G. Ley Orgánica de Gobiernos Regionales, Ley 27867
- H. Ley Orgánica de Municipalidades, Ley 27972.
- I. Leg. Penal (responsabilidades y delitos) sobre el agua.
- J. Mec. Alternos a la Solución de Conflictos (MARC)
- K. Ley 29338 y Reglamento de los Recursos Hídricos.

### **3.3 Metodología**

La metodología planteada en el presente estudio parte del análisis de los cambios en las características climáticas regionales bajo escenarios de cambio climático usando las simulaciones de los modelos de circulación general. Es claro que el análisis de los modelos debe estar condicionado al uso de aquellos que tienen aplicación en la región de estudio, es decir, aquellos que representan de manera adecuada, por ejemplo, los fenómenos físicos macro climáticos que influyen en el comportamiento climático de la zona, en este caso la cuenca del río Pisco, lo cual obliga a realizar una selección de los mismos que sean físicamente coherentes con la región de estudio.

### **3.4 Propuesta de proyecto.**

Para el diseño de la investigación se realizó los Diseños Experimentales el control y la validez, con el que se lograra el control y la validez externa:

Se indicó las coordenadas de cada estación meteorológica utilizada en el modelo para sustraer la información actual correspondiente a cada Modelos de la Circulación General (MCG), luego se realizará el cambio de escala estadístico para obtener una información más precisa a los puntos de ubicación de las estaciones, control de la calidad de la información hidrometeoro lógica.

Todas estas herramientas se aplicaron desarrollando en su punto de acuerdo al índice de este estudio.

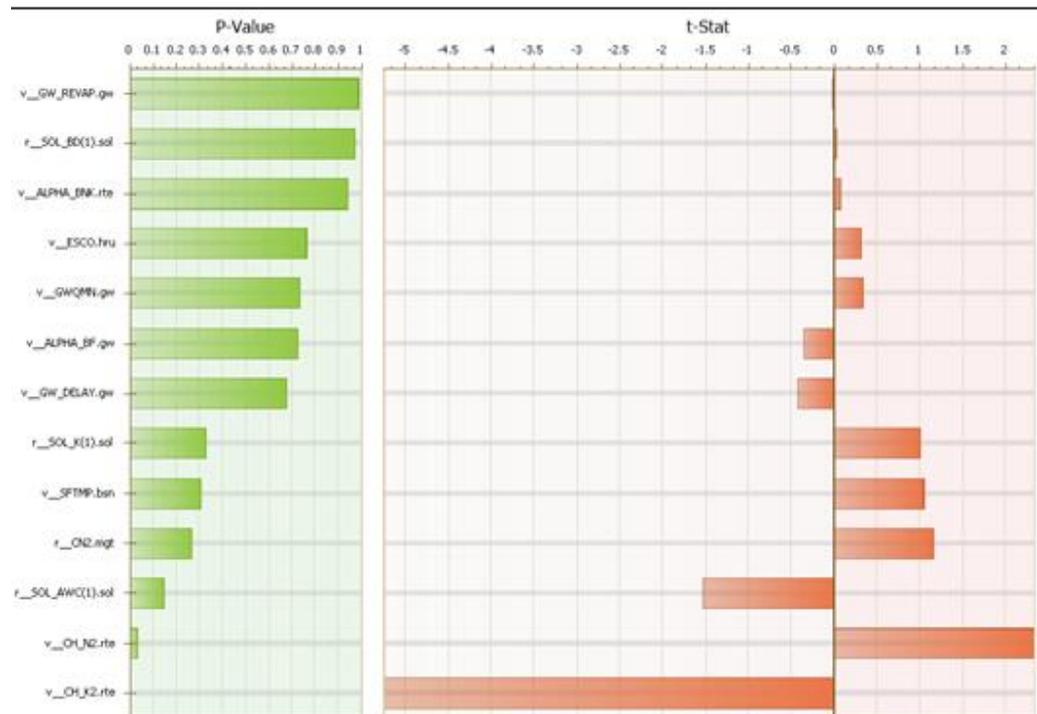
## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

#### 4.1. Análisis de resultados de Sensibilidad, Calibración y Validación del Modelo Hidrológico.

##### 4.1.1. Análisis de Sensibilidad

Mediante el análisis de sensibilidad, se identifican los parámetros que tienen una influencia significativa en los resultados del modelo con respecto a las observaciones reales. Los resultados están representados en la Figura 13.



*"Efectos del Cambio Climático en la Hidrología de la Cuenca del río Pisco".*

**Figura 13: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo.**

En la Figura 13, el factor t-Stat provee una medida de sensibilidad que define al parámetro con mayor valor absoluto como el más sensible; por

otro lado, el factor p-value determina la significancia de la sensibilidad, siendo los valores más cercanos a cero los de mayor significancia. Se clasificaron los parámetros analizados obteniéndose un ranking de estos, el cual se muestra en el cuadro 11.

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

PARAMETR	DESCRIPCIÓN	t-Stat	P-Value	Rankin
v CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva de canal	-5.25	0.00	1
v CH_N2.rte	Valor de n de Manning del cauce principal	2.34	0.03	2
r SOL_AWC(	Capacidad de agua disponible	-1.53	0.15	3
r CN2.mgt	Valor del número de curva SCS CN II	1.15	0.27	4
v SFTMP.bsn	Temperatura media de congelación de la	1.05	0.31	5
r	Conductividad hidráulica saturada	1.01	0.33	6
v GW_DELA	Retraso del agua subterránea	-0.43	0.67	7
v	factor alpha del flujo base	-0.36	0.72	8
	Umbral de profundidad de agua en			9
v ESCO.hru	Coeficiente de compensación de	0.31	0.76	10
v ALPHA_BN	Constante de proporcionalidad	0.08	0.94	11
r	Densidad del suelo a bulbo húmedo	0.03	0.97	12
v GW_REVA	Coeficiente "Revap" de las aguas	-0.02	0.99	13

De manera que, los parámetros CH\_K2, CH\_N2, SOL\_AWC, CN2 Y SFTMP son indicados como los de mayor sensibilidad con respecto a los demás parámetros en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Pisco. Por lo cual, estos parámetros fueron prioridad en su variación para la fase de calibración.

#### 4.1.2. Calibración y validación del modelo hidrológico

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

En la Figura 12 y Figura 13 se puede observar la comparación gráfica de las series de caudales (observados y simulados) a nivel diario y mensual respectivamente, donde se aprecia la simulación satisfactoria de la estacionalidad de flujos de escorrentía, tanto para el periodo de calibración y validación del modelo.

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

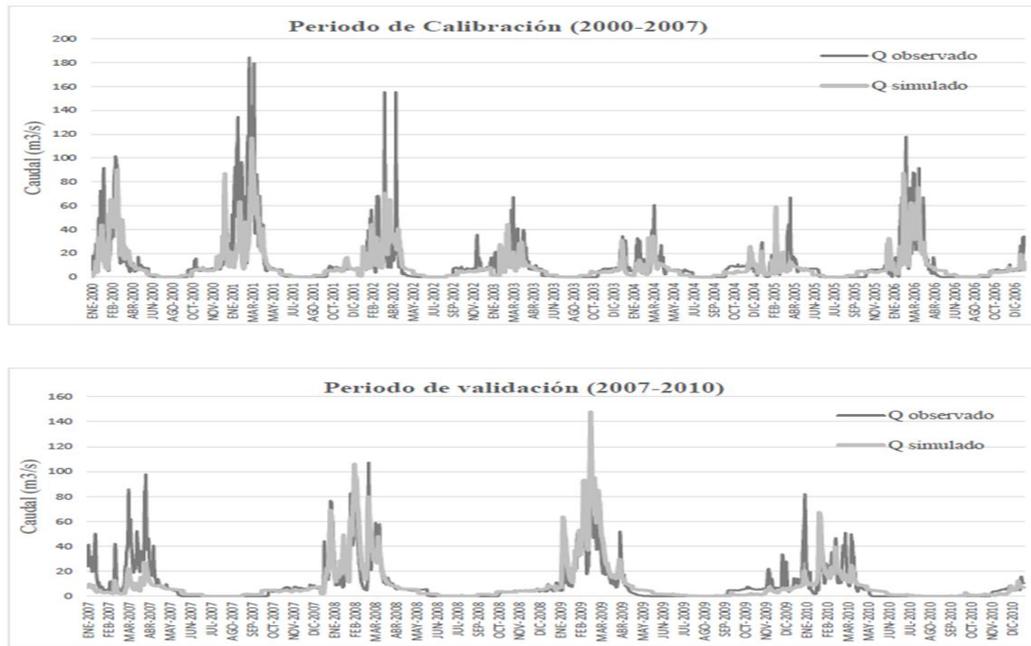


Fig.14, Serie de Caudales diarios y observados y simulados, reporte A

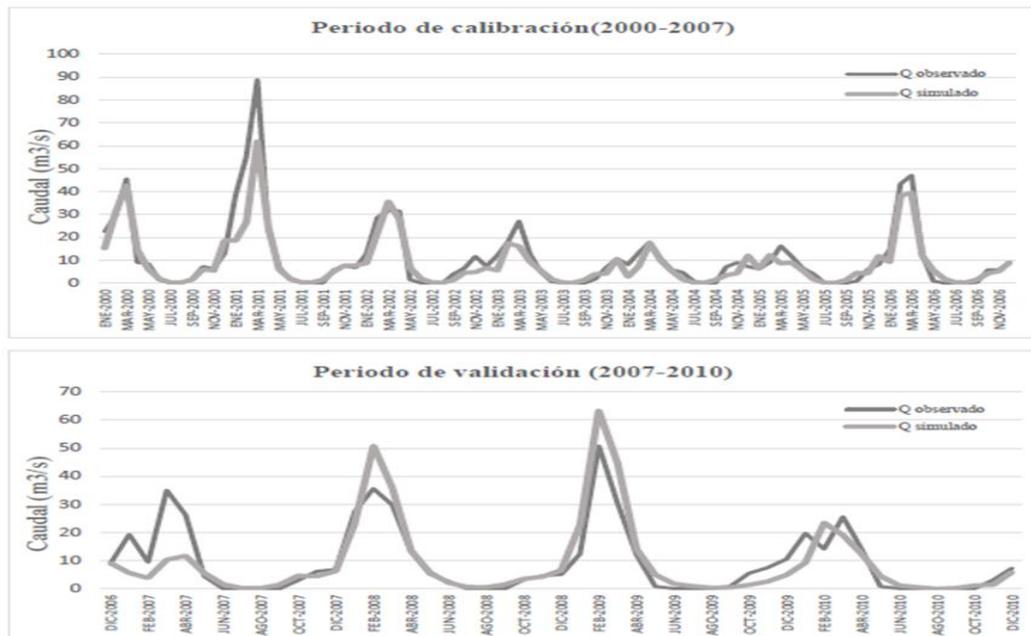


Fig.15, Serie de Caudales mensuales observados y simulados, reporte B

Teniendo en cuenta que cada serie de caudales presenta 4018 datos (2557 y 1461 datos en la fase de calibración y validación respectivamente) a nivel diario y 132

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

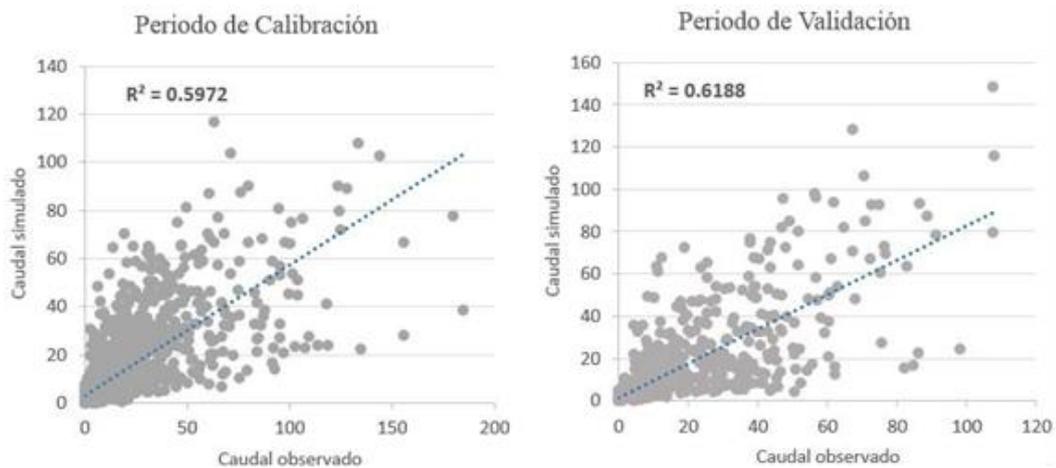


Figura 16: Coeficiente de Pearson de caudales diarios observados y simulados

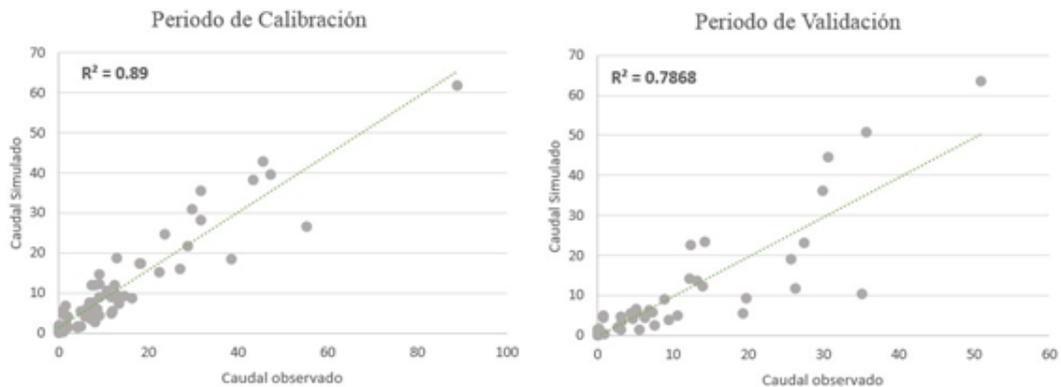


Figura 17: Coeficiente de Pearson de mensuales diarios observados y simulados

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

Índic		Calibració	Validación
	R	0.597	0.619
Coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe	NS	0.591	0.555
Porcentaje BIAS	PBIAS	12.31%	2.84%
Relación de RMSE y la desviación estándar	RSR	0.393	0.545

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

Índic		Calibració	Validación
	R	0.890	0.787
Coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe	NS	0.813	0.805
Porcentaje BIAS	PBIAS	11.62%	1.88%
Relación de RMSE y la desviación estándar	RSR	0.397	0.543

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

**Cuadro 14: Valores de los parámetros del modelo calibrado**

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

## **4.2. Prueba de Hipótesis**

### **4.2.1. Hipótesis de investigación.**

Los cambios de los patrones de las precipitaciones y temperatura por efecto del cambio climático afectara la Disponibilidad de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Pisco.

### **4.2.2. Hipótesis nula.**

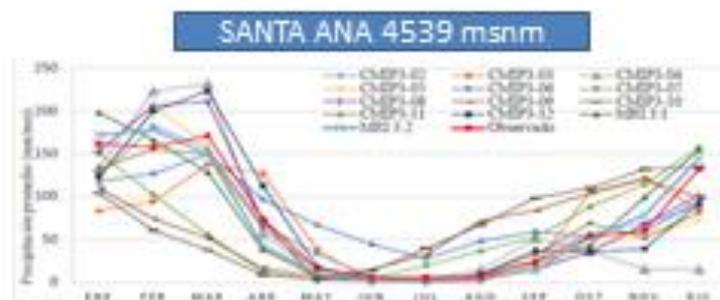
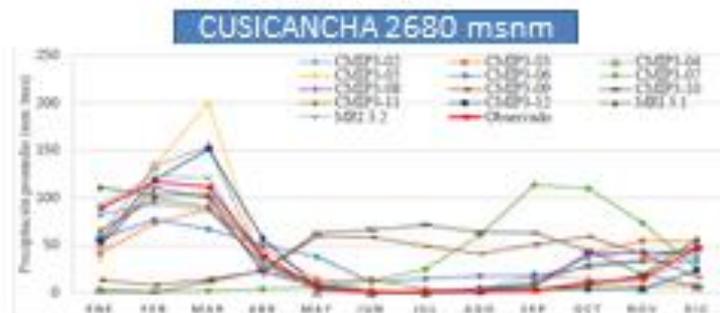
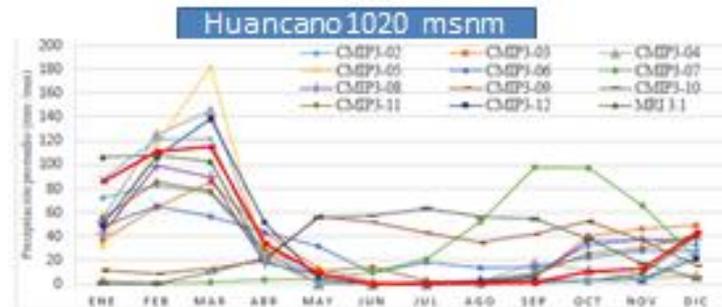
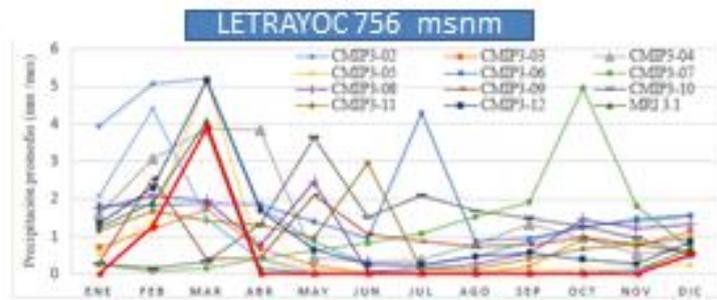
La hipótesis nula es una afirmación que no se rechaza ya que los datos utilizados de la muestra son verdaderos y estadísticamente se aplicó la distribución T Student.

### **4.2.3. Hipótesis estadística.**

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

## **CAMBIO DE ESCALA ESTADÍSTICO Y PROYECCIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS**

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



Donde se observa que en la estación Letrayoc (756 m.s.n.m), la cual se encuentra en la mayor parte de área agrícola de la cuenca de Pisco, presenta mayor discordancia en el cálculo de la lluvia. Lo que está relacionado a la dificultad de los GCM en el cálculo de la precipitación en zonas áridas

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

Se debe considerar que en la mayoría de modelos la cantidad de lluvia calculada tiende a ser levemente subestimada.

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

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

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

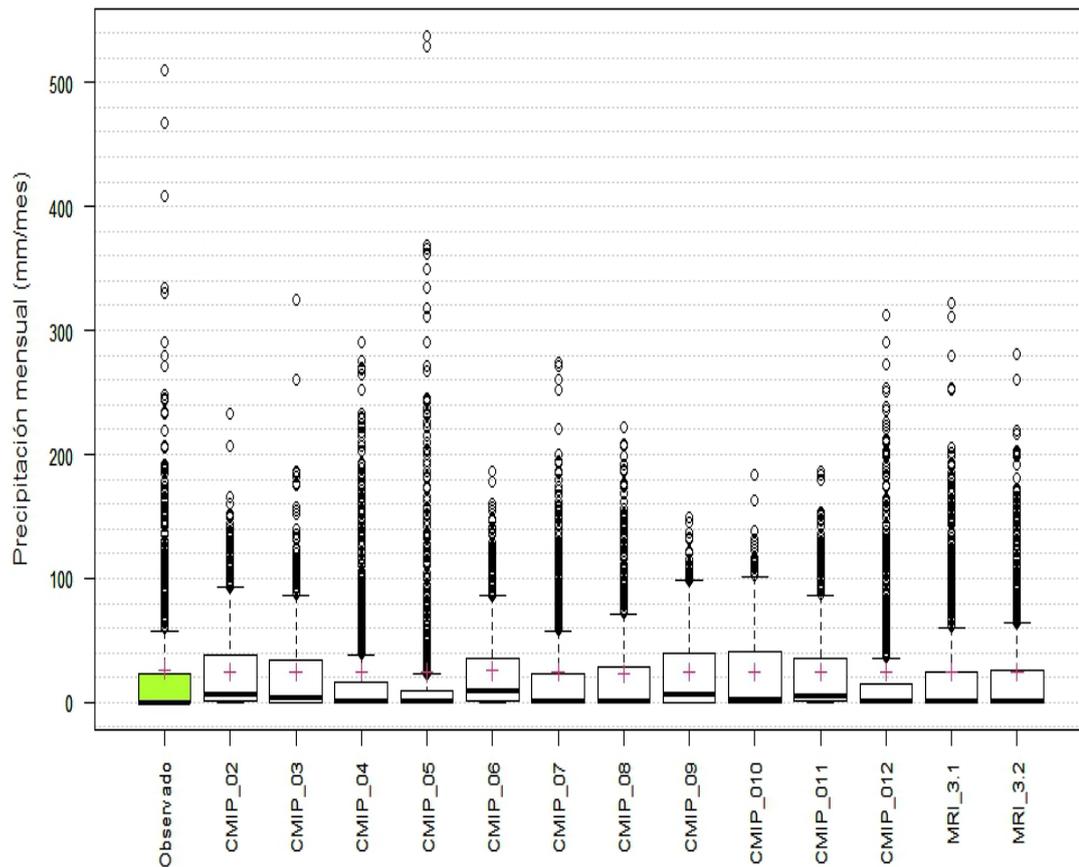


Figura 18: Diagrama de cajas de precipitación observada y simulada (1980-1999)

En base a la Figura 16 y el análisis de la distribución de cada estación (Anexo 4), se identifican que las distribuciones de los modelos CMIP3-04(CSIRO- Australia), CMIP3- 07(INGV-Italia), CMIP3-08(INM- Rusia), CMIP3-12 (MRI-Japón) , MRI-3.1 (Japón) y MRI-3.2 (Japón) representan un ajuste aceptable de la distribución de valores de precipitación, resaltando los ajustes de los modelos: CMIP3-08(INM- Rusia), MRI-3.1 (Japón) y MRI-3.2 (Japón).

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

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

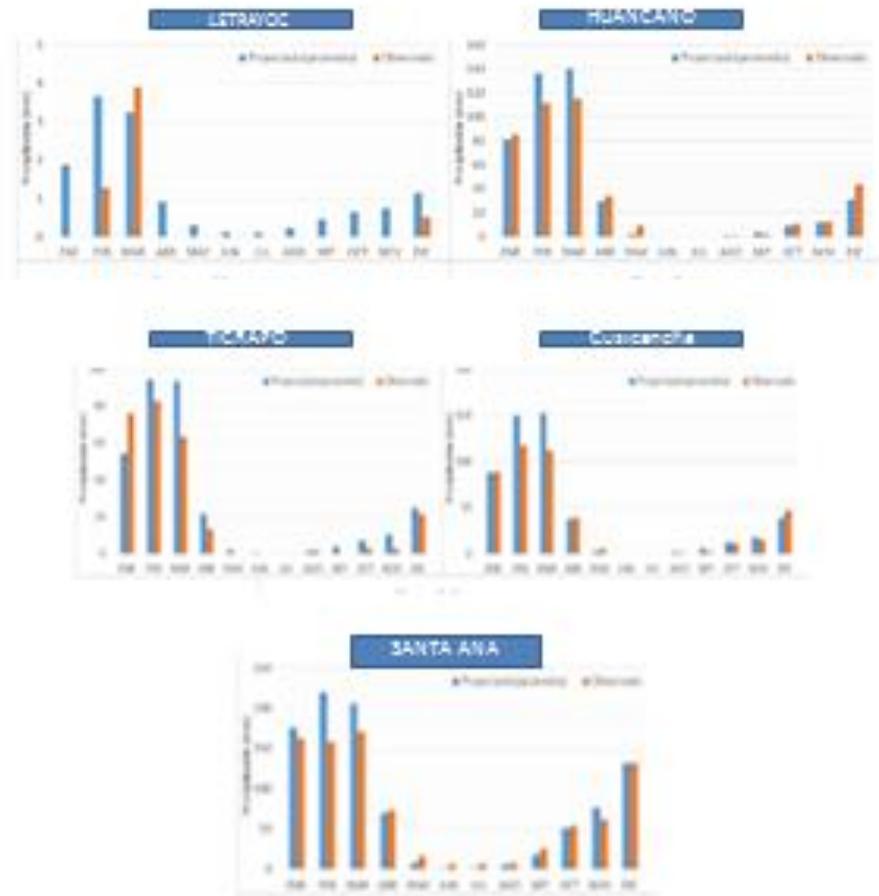
CLASIFICACIÓN	MCG	INSTITUCIÓN	PAÍS
<b>Alto ajuste</b>	MRI-3.2	MRI	Japón
	MRI-3.1	MRI	Japón
	CMIP3-08	INM	Rusia
	CMIP3-12	MRI	Japón
	CMIP3-04	CSIRO	Australia
<b>Regular ajuste</b>	CMIP3-02	CCC	Canadá
	CMIP3-03	CNRM	Francia
	CMIP3-06	GISS	USA
	CMIP3-11	MPI	Alemania
<b>Bajo ajuste</b>	CMIP3-05	GFDL	USA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

Posteriormente se proyectaron los datos de precipitación diaria en cada estación meteorológica para el periodo 2080 -2099.

En el Figura 19 se muestran las precipitaciones mensuales promedio observadas y las precipitaciones proyectadas promedio de los MGC de mejor ajuste, donde se puede diferenciar las variaciones de precipitación por cada mes del año.

Se puede diferenciar un incremento notable de precipitación en los meses de febrero y Marzo, especialmente en las estaciones de mayor precipitación como Ticrapo, Cusiancha y San Ana.

Ver histogramas de la figura 19.



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

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

**Cuadro 17: Variación de precipitación anual por cada estación meteorológica**

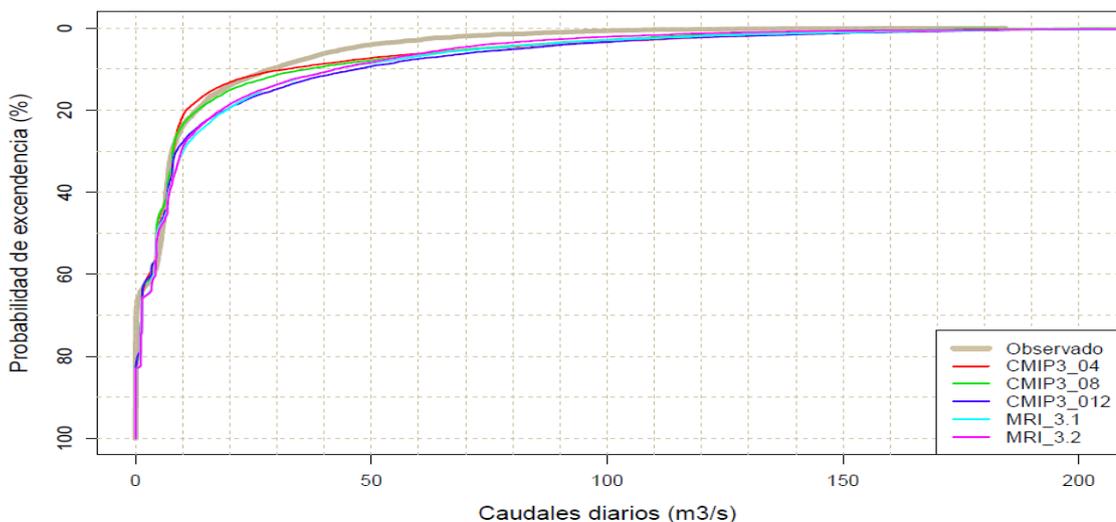
Estación	Elevación msnm	Variación Anual	
		m	%
Letrayoc	682	7.	134.81%
Huancano	1019	2	5.55%
Ticrapo	2174	4	18.80%
Cusicancha	2680	6	15.41%
Santa Ana	4539	8	10.23%

Fuente: Maestro de estaciones - SENAMHI

### EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA OFERTA DE AGUA

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

Se analizaron las escorrentías diarias proyectadas, considerándose los generados por los modelos de mejor ajuste a las condiciones de la región de estudio. En la Figura 20., se muestra la distribución de los caudales, apreciándose que para todos los modelos seleccionados los caudales mayores a 20 m<sup>3</sup>/s presentan una mayor probabilidad de ser excedidos, dicha probabilidad irá disminuyendo acorde incrementa la magnitud de los caudales.



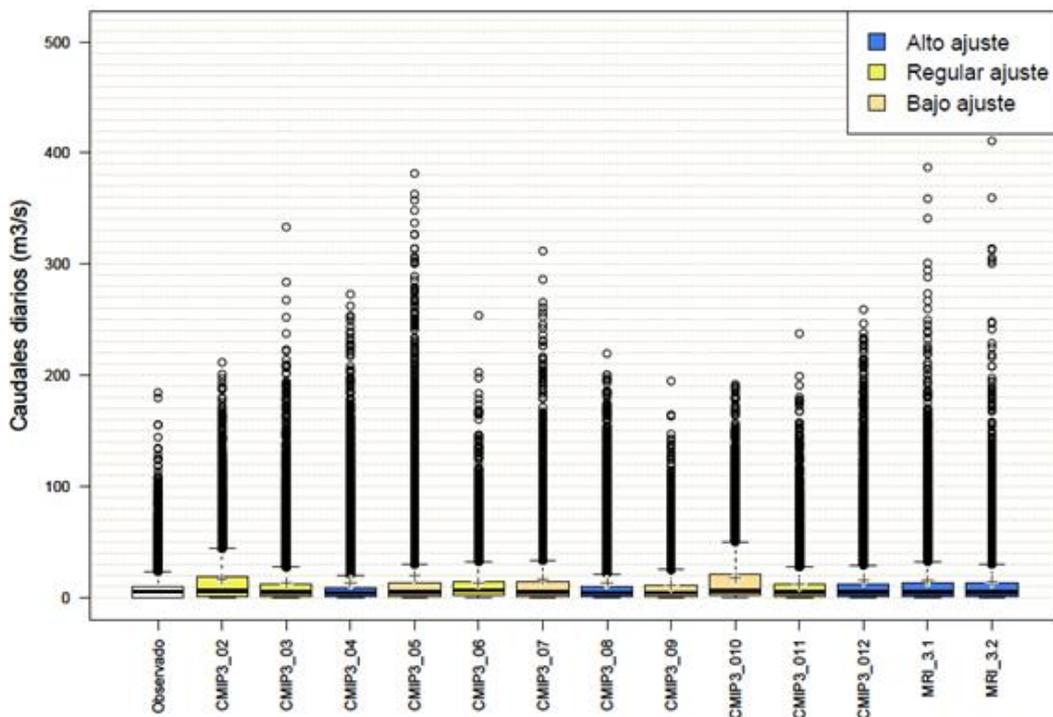
**Figura 20: Función de distribución acumulada de caudales diarios proyectados**

Los modelos de mayor resolución (MRI 3.1 y MRI 3.2) indican mayores variaciones, como el incremento de hasta 5.21% de la probabilidad de excedencia para caudales de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  y el incremento de hasta 4.82% de probabilidad de excedencia para los caudales de  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Sin embargo, el modelo CMIP3-04 (CSIRO-Australia) indican una leve disminución de 1.13% en la posibilidad que los caudales de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $23 \text{ m}^3/\text{s}$  sean excedidos.

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

En la Figura 21, se aprecia que los caudales diarios proyectados llegan a alcanzar magnitudes mayores a los observados, siendo el modelo MRI 3.2 el que proyecta el evento más alto de  $460.45 \text{ m}^3/\text{s}$ . Teniendo en cuenta los caudales generados por los modelos de mejor ajuste, se induce la ocurrencia de eventos diarios mayores a los eventos máximos ocurridos en el intervalo observado 2000-2010 ( $205.50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) para finales del siglo XXI; proyectándose producirse eventos máximos de  $205.50 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $460.45 \text{ m}^3/\text{s}$ .

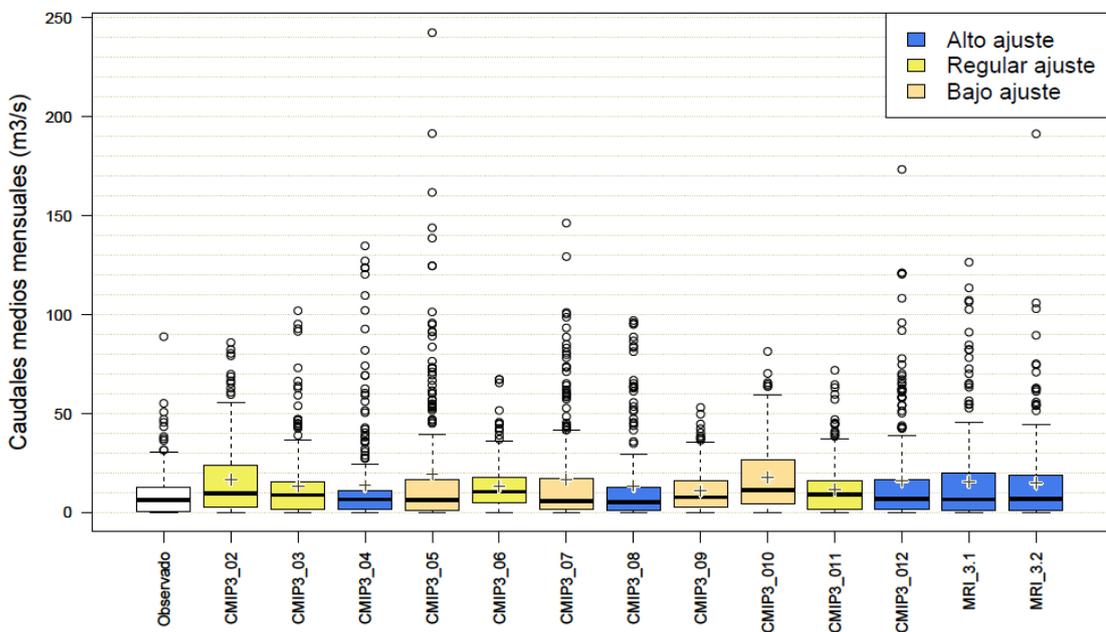


**Figura 21: Diagrama de cajas los caudales diarios proyectados**

La Figura 22, elaborada en base a caudales medios mensuales, también se observa la tendencia de que los caudales proyectados superen los caudales máximos observados (m<sup>3</sup>/s); llegando a proyectarse un caudal medio mensual de hasta 255.28 m<sup>3</sup>/s.

Teniendo en cuenta los caudales generados por los modelos de mejor ajuste, se proyecta caudales medios mensuales de hasta 195.8 m<sup>3</sup>/s.

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



**Figura 22: Diagrama de cajas de los caudales mensuales proyectados**

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

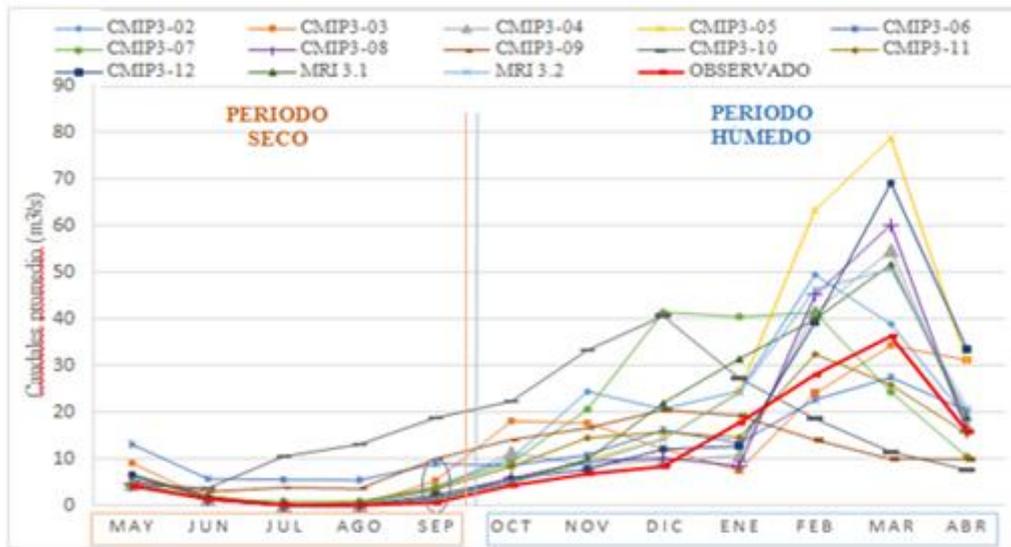


Figura 23: Caudales promedio proyectados a finales del siglo XXI (2080-2099)

En la Figura 24 se indican las variaciones de escorrentía por efecto del cambio climático, con respecto a cada mes del año, donde se tomaron en cuenta los resultados de los modelos de alto ajuste por presentar la mejor capacidad de simular las condiciones de la región en estudio.

Se pueden identificar variaciones desde +161.20% a -54.96% en el periodo húmedo (Octubre - Abril) y variaciones de +225.67% a -88.96% en el periodo seco (Mayo – Septiembre).

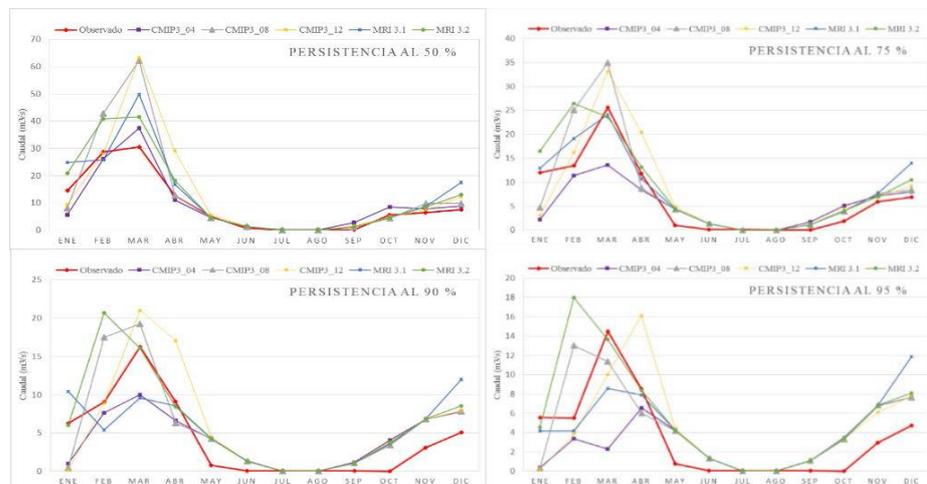


Figura 24: Variación relativa a los caudales medios mensuales observados

Realizando un promedio de las variaciones de cada mes, se observa en la Figura 23 que las variaciones más altas se generan en los meses de Julio y Septiembre, los cual se atribuye a que los valores promedio mensuales de escorrentía observados en dichos meses son valores bastante pequeños, por lo que un aumento en magnitud de escorrentía proyectada representa una amplia variación en porcentajes. También se debe tener en cuenta que en la Figura 24, se muestra que las variaciones proyectadas en los meses de Febrero, Marzo, Mayo, Junio, Julio, Septiembre y Noviembre presentan bastante concordancia, por lo que se indica una mayor certeza en dichos meses.

La variación promedio indica que en todos los meses del periodo húmeda (Octubre – Abril) se proyecta un incremento de la oferta de agua desde +8.10% a +77.12%, indicando los meses de Marzo y Diciembre con los mayores incrementos de +57.60% y +77.12% respectivamente. Sin embargo, se proyecta también una disminución de la escorrentía en los meses de julio y agosto con descensos de hasta -82.56% y -24.14% respectivamente.

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

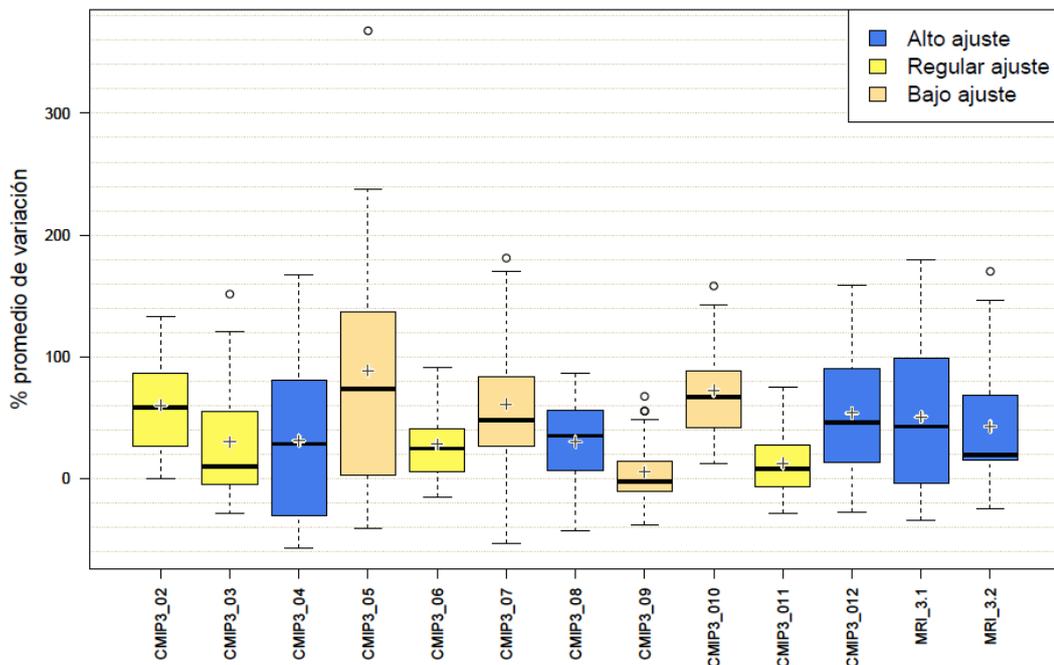


**Figura 25: Persistencias de disponibilidad hídrica al 50%, 75%, 90% y 95%**

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

La Figura 26 muestra los cambios relativos a la escorrentía anual promedio registrada en la estación hidrológica "Letrayoc" por efecto del cambio climático. Donde se identifican variaciones de oferta de agua dentro de un rango de +452.16% a -51.24%, teniendo en cuenta resultados de todos los MGC empleados en el estudio.

Teniendo en consideración las variaciones promedio de los modelos de alto ajuste, se indica que la variación de la oferta anual de agua para fines del siglo XXI (2080 – 2099) representará un incremento de +35.73% a +73.37% con respecto a la producción anual promedio del área de estudio en el periodo observado (2000-2010).



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

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

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

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

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

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

Incrementos de hasta 5.41% en la probabilidad de excedencia de los caudales mayores a 10 m<sup>3</sup>/s, el cual irá disminuyendo acorde incrementalmente la magnitud de los caudales.

Eventos diarios de magnitudes máximas desde 205.50 m<sup>3</sup>/s hasta 460.45 m<sup>3</sup>/s, representan incrementos de 18.05% hasta 132.5% con respecto a los eventos diarios máximos observados en la actualidad. Considerando caudales medios mensuales,

Los caudales mensuales del periodo húmedo (Octubre - Abril) variarán en un +41.66% en promedio, que representa un incremento aproximado de 7.65 m<sup>3</sup>/s; ocurriendo los mayores incrementos en los meses de Diciembre y Marzo con variaciones de +77.12% y +57.60% respectivamente. Por otra parte, el periodo seco (Mayo - Septiembre) variará en un +10.0% en promedio, que representa un incremento aproximado de 0.36 m<sup>3</sup>/s, pese a la disminución promedio de escorrentía en los meses de Julio y Agosto, de hasta -82.56% y -24.14% respectivamente.

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

## RECOMENDACIONES

- Continuar la investigación, incluyendo el análisis de más escenarios de emisión para obtener un panorama más amplio del efecto cambio climático en la hidrología de la cuenca del río pisco; considerando que los resultados de esta investigación proyectan mayor disponibilidad de agua y eventos diarios de esorrentía de altas magnitudes.
- Cumplimiento del Plan de afianzamiento hídrico del valle de Pisco, para lograr aprovechar la mayor disponibilidad de agua que se proyecta en esta investigación.
- Ampliar la capacidad de Almacenamiento de las 05 lagunas que se encuentra en la parte alta de la cuenca para tener un mayor aprovechamiento del recurso hídrico en la época de estiaje.
- Debido a la baja disponibilidad de información hidrológica diaria, se utilizó una estación hidrológica para realizar la calibración del modelo hidrológico. Se recomienda emplear más estaciones hidrológicas en la calibración del modelo para poder obtener una representación más exacta de la cuenca, considerar una en la parte alta y baja.
- Proseguir realizando más estudios de cambio climático y gestión de riesgo y desastres en nuestro país, de manera que se logre establecer un marco de referencia sobre los posibles cambios del clima y su efecto en la disponibilidad del agua, permitiendo proponer medidas de adaptación o mitigación ante estos efectos y riesgos que se puedan tener debido a su manifestación sísmica de dicha cuenca.

## FUENTES DE INFORMACIÓN

1. **Arnold, J.G., P.M. Allen, and G. Bernhardt.** 1993. A comprehensive Surface ground water flow model. *J. Hydrol.* 142:47-69.
2. **Avalos, G.** 2000. Validación del pronóstico de precipitación del modelo regional Eta/SENAMHI durante periodos secos y lluviosos. Tesis para optar el título de Ingeniero Meteorólogo. 98 pp., UNALM.
3. **Beniston, M.** 2000. Environmental change in mountains and uplands. Eds. Oxford University Press, USA, 172 pp.
4. **Brown, L.C. and T.O. Barnwell, Jr.** 1987. The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual. EPA document EPA/600/3-87/007. USEPA, Athens, GA.
5. **Ghan, S; Shippert, T.** 2006. Physically based Global Downscaling: Climate Change Projections for a Full Century. *J. of Climate - Vol. 19.* 1589-1603 pp.
6. **Leung, L; Ghan, S.** 1998. Parameterizing Subgrid Orographic precipitation and Surface Cover in Climate Models. *AMS.* 3271-3291pp.
7. **El Riego,** 2001. Cálculo de las necesidades diarias de agua, 2001
8. [http://www.elriego.com/dom/informate/Calculos/indice\\_calcneces\\_tiemprriegos.htm](http://www.elriego.com/dom/informate/Calculos/indice_calcneces_tiemprriegos.htm)
9. **MANSILLA E. CARINA Y ROMERO I. ROSA,** 2004. Calibración de secciones de aforo en puntos estratégicos del río Ica para una gestión óptima de los recursos hídricos
10. **Monteith, J.L.** 1965. Evaporation and the environment. p. 205-234. *In* The state and movement of water in living organisms. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge Univ. Press, London, U.K.
11. **Musy, André,** 2001. Cours "Hydrologie générale" . Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. IATE/HYDRAM. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagement. Capitulo 1. El ciclo hidrológico.
12. **USDA Soil Conservation Service.** 1983. National Engineering Handbook Section 4 Hydrology, Chapter 19.
13. **Williams, J.R., A.D. Nicks, and J.G. Arnold.** 1985. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(6): 970-986.

## BIBLIOGRAFIA

1. ARNOLD J G, R SRINIVASAN, R S MUTTIAH, J R WILLIAMS. (1998). "Large área hydrologic modeling and assessment – Part 1: Model development". Journal of the American Water Resources Association.
2. CARMONA A. (2013). Ajuste de la producción de agua simulada por el modelo swat y análisis de sensibilidad ante características hidrológicas del suelo en una cuenca pequeña de alta pendiente.
3. CHOW, VEN TE. (1994). "Hidrología aplicada". Ed. McGraw Hill Interamericana, S. A. Santa fe de Bogotá, Colombia.
4. FRANQUET, J. (2005). Agua que no has de beber...60 respuestas al plan hidrológico nacional. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.eumed.net> [Consulta: 2006, Febrero 07].
5. GARCIA N, MECHOSO C. (2005). Variability in the discharge of South American rivers and in climate. Hydrol. Sci. 50 (3), 459–478.
6. GUZMÁN, E.; J. BONINI Y D. MATAMOROS. (2004). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) para la predicción de caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica caso de estudio: cuenca del río Chaguana. Revista Tecnológica 17 (1): 152 – 161 p.
7. HESSAMI M, QUARDA T, GACHON P, ST-HAILAIRE A, SELVA F, BOBEE B.(2004). "Evaluation of statistical downscaling method over several regions of eastern Canada", 57th Canadian water resources association annual congress.
8. INRENA. (2002) - Dirección General De Aguas Y Suelos - ATDR Ica- Balance Hidrológico De La Cuenca Integral Del Rio Ica [E. Chavarri]
9. IPCC. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt,
10. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
11. IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley

- (eds.]). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
12. KOMAI K. (2012). Application and Problems of GCM for Projection on Water Resources for Agricultural Production in Peru. Kitami Institute of Technology – Japan.
  13. MORIASI J, ARNOLD M, VAN LIEW R, BINGNER R, HARMEL T, VEITH. (2007).
  14. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. ASABE Vol. 50(3): 885–900
  15. NASH J, AND SUTCLIFFE J. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. J. Hydrology 10(3): 282-290.
  16. NEARING M, DEER-ASCOUGH L, LAFLÉN J. (1990). Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 33 (3): 839–849 p
  17. NEITSCH S, ARNOLD J, KINIRY J, SRINIVASAN R, WILLIAMS J. (2002). Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000. GSWRL Report 02-02, BRC Report 02-06, TR-192. College Station, Texas: Texas Water Resources Institute.
  18. NEITSCH S, ARNOLD J, KINIRY J, SRINIVASAN R, WILLIAMS J. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2009. Texas: Texas Water Resources Institute Report N° 406
  19. OHCHR, U.-H., WHO, (2010). The right to water. In: Office of the United Nations High Commissioner for Human Rights, U.H., World Health Organization, (Eds.), Human Rights: Fact Sheet N8 35. United Nations Office, Geneva, pp. 1–56.
  20. PATZ J, CAMPBELL-LENDRUM D, HOLLOWAY T, FOLEY J. (2005). Impact of regional climate change on human health. Nature 17:310–317.
  21. ZHANG P, LIU R\*, BAO Y, WANG J, YU W, SHEN Z, (2013). Uncertainty of SWAT model at different DEM resolutions in a large mountainous watershed. PETACC, (2011). “Problemática del Agua en la Cuenca del Río Ica”.
  22. PROCLIM (Programa Nacional de Fortalecimiento de Capacidades para Manejar el Impacto del Cambio Climático y la Contaminación del Aire),

- (2005). Escenarios del cambio climático en el Perú al 2050 - Cuenca del Río Piura.
23. REFSGAARD, J. (1997). Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models. *J. Hydrol.* 198(1): 69-97.
  24. MACFARLAND A. (2000). Application of SWAT for the upper North Bosque River watershed. *Trans. ASAE* 43(5): 1077-1087.
  25. SALINAS, J. (2003). Aplicaciones de la simulación hidrológica en zonas áridas. Encuentro medioambiental almeriense: en busca de soluciones. Departamento de Ingeniería Rural, Universidad de Almería. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.gem.es> [Consulta: 2006, Febrero 07].
  26. SANTHI C, ARNOLD J, WILLIAMS J, DUGAS W, SRINIVASAN R, HAUCK L.(2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37(5): 1169-1188.
  27. TISCARENO M, LOPES V, STONE J, LANE L. (1994). Sensitivity analysis of the WEPP watershed model for rangeland applications II: Channel processes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 37 (1): 151 – 158
  28. TORRES E, OROPEZA J, FERNÁNDEZ D. (2000). Aplicación del modelo SWAT en la cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, estado de México. X Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 4. Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas Chihuahua, Chihuahua, México.
  29. UNEP. (2008). *Vital Water Graphics – An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters*, 2nd ed. United Nations Environmental Programme, Nairobi, Kenya.
  30. URIBE N. (2011). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil And Water Assessment Tool) a la Cuenca del Río Cañete.
  31. WILBY R, CHARLES S, ZORITA E, TIMBAL B, WHETTON P, MEARNES L. (2004). Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting Material of the Intergovernmental Panel on Climate Change.









Cuadro E: Precipitación promedio mensual en mm de la estación Santa Ana.

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

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

Cuadro F: Temperaturas máximas en (°C) para la estación Huancano.

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

Cuadro G: Temperaturas máximas en (°C) para la estación Bernales.

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

Cuadro H: Temperaturas máximas en (°C) para la estación CusicanCHA

AÑO	ESTACION CO-CUSICANCHA											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	20.64	19.91	20.11	21.49	22.79	22.23	22.21	22.87	22.59	22.31	21.63	21.17
2001	20.64	19.91	20.11	21.49	22.79	25	23.6	23.5	22.5	22.5	21.5	23.2
2002	22	21.2	22.5	22.5	23.5	24.6	22.6	25.5	22.59	23.5	22.5	23
2003	23	22	22.5	22.6	23.5	22.5	23	25.5	22.7	23.1	22.7	22
2004	23	21.5	21.8	23.8	24.5	23.5	23.2	23.2	23.5	23.6	23	21.5
2005	22	23.5	21.6	24.4	24	23.5	23.5	23	23.5	23.5	24	21.5
2006	22.5	20	20.6	23.1	23	24	24.5	24.2	23.8	23.5	25.4	22.5
2007	22.5	22.5	21.6	22.6	24.5	23.4	23.6	23.5	23.5	23.5	23	21.8
2008	21	19.6	19.5	24	23.2	23	23.5	24	23.5	23.5	23	22.5
2009	21	19.5	20.5	24	24.5	24.5	24.5	24.5	25.5	24.5	23	22.6
2010	20.64	19.91	20.11	21.49	22.79	22.23	22.21	22.87	22.59	22.31	21.63	21.17

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

Cuadro I: Temperaturas mínimas en (°C) para la estación Huancano

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

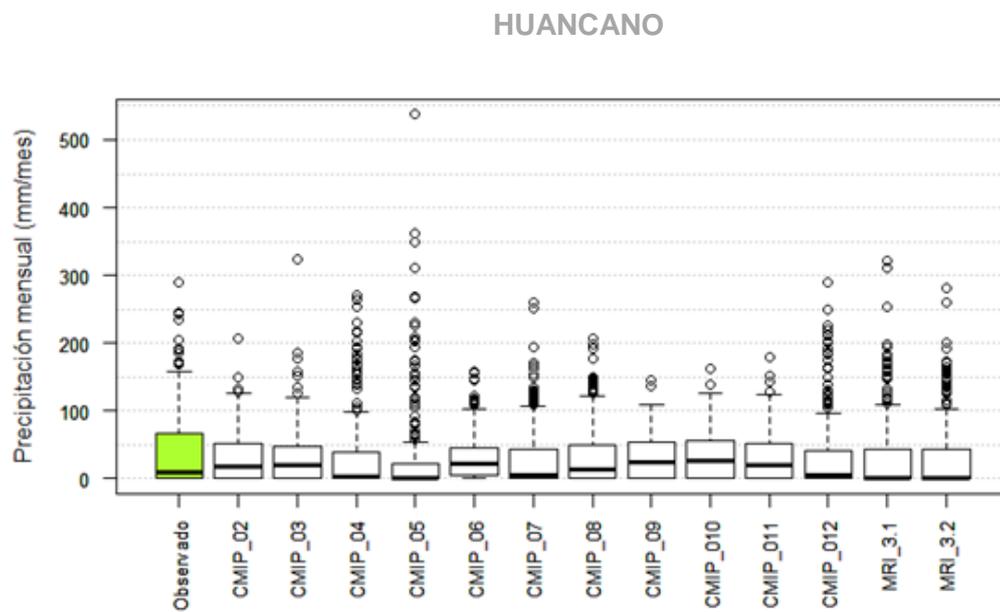
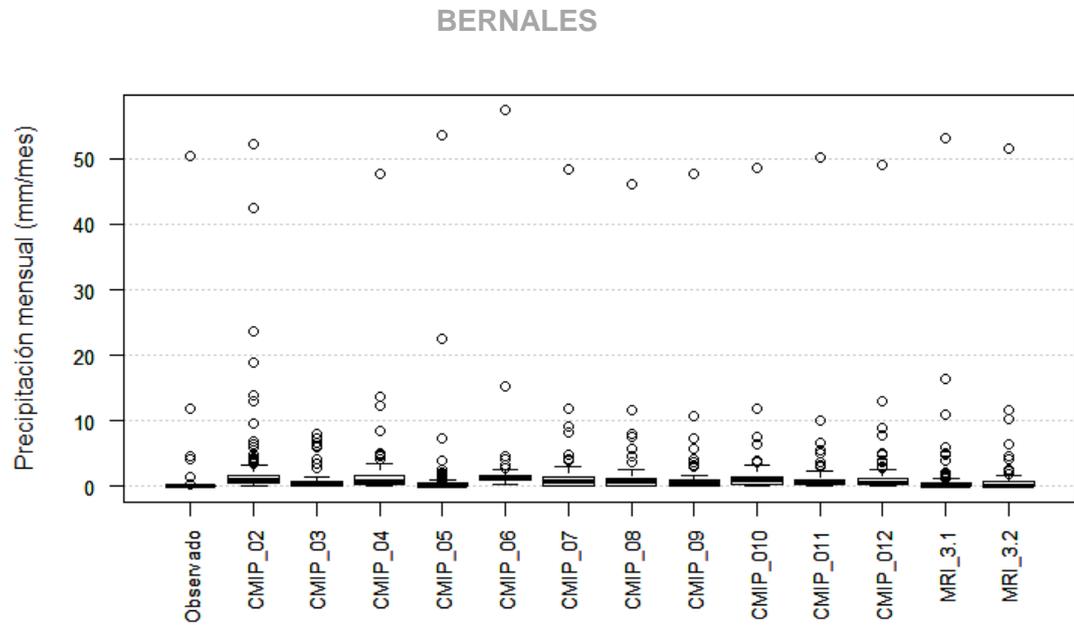
Cuadro J: Temperaturas mínimas en (°C) para la estación Bernales.

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

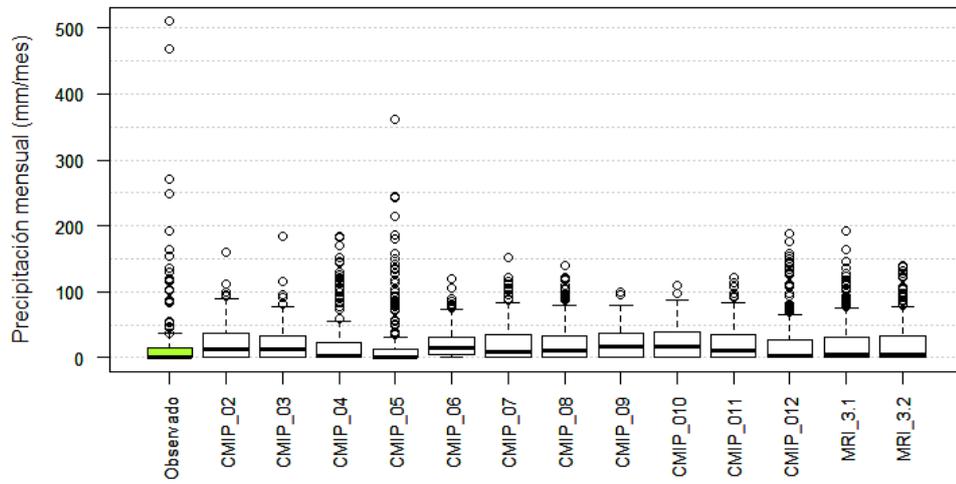
Cuadro K: Temperaturas mínimas en (°C) para la estación Cusicancha

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

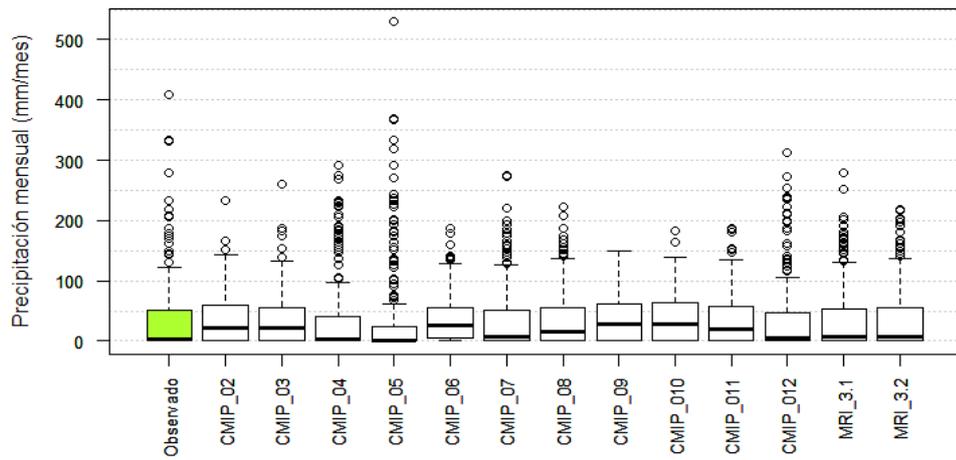
**Anexo 4:** Diagrama de cajas de los datos diarios de precipitación generados en cada estación meteorológica para el periodo (1980-1999)



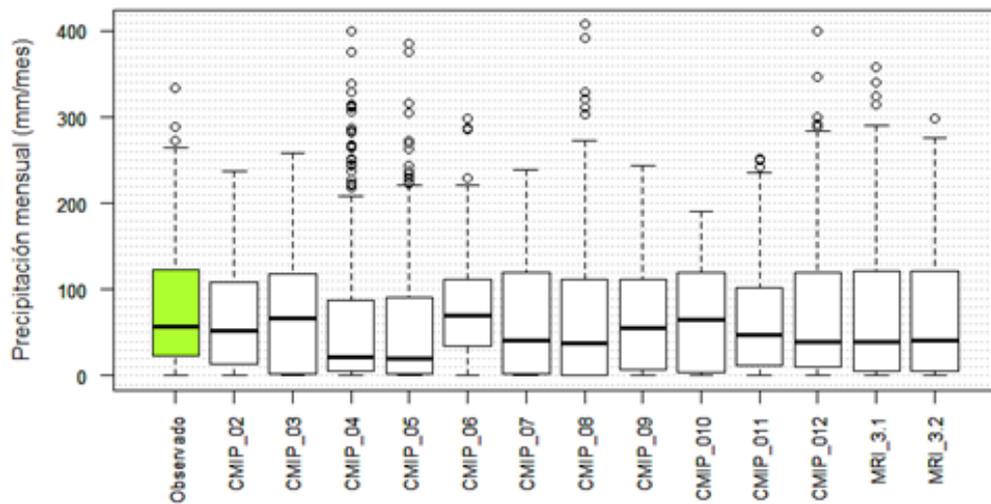
### TICRAPO



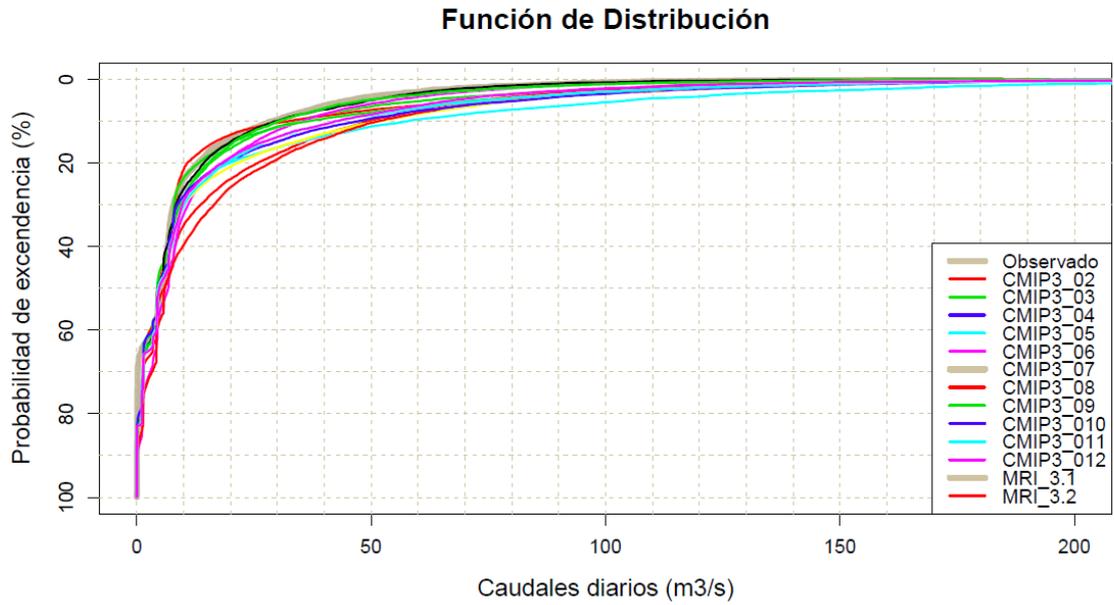
### CUSICANCHA



### SANTA ANA



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



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

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

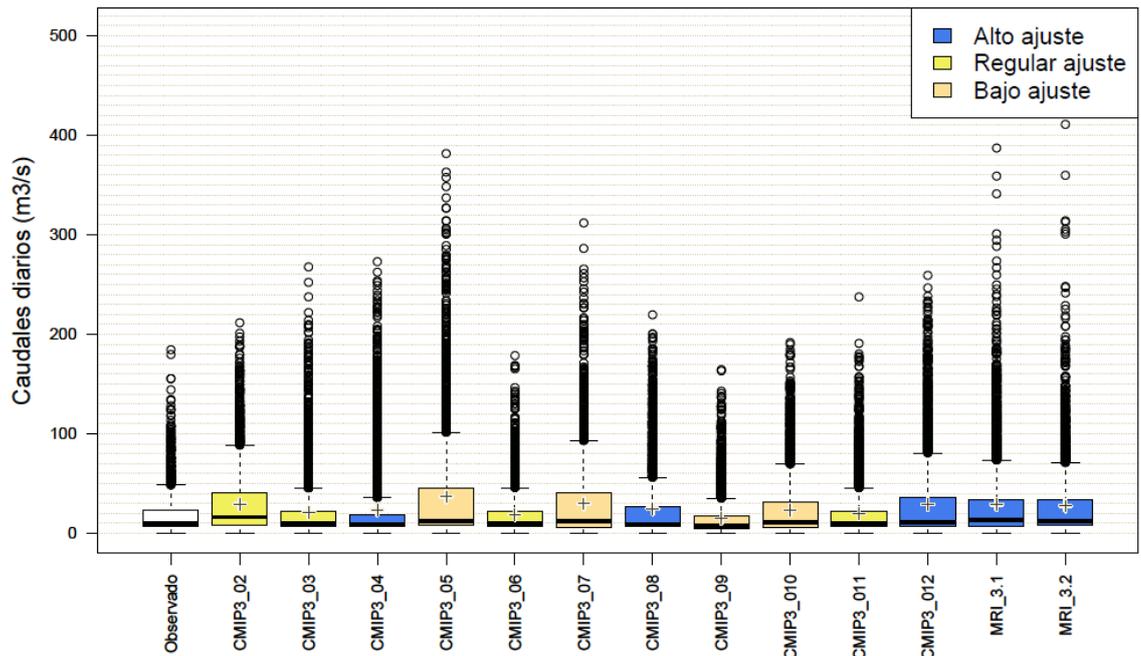
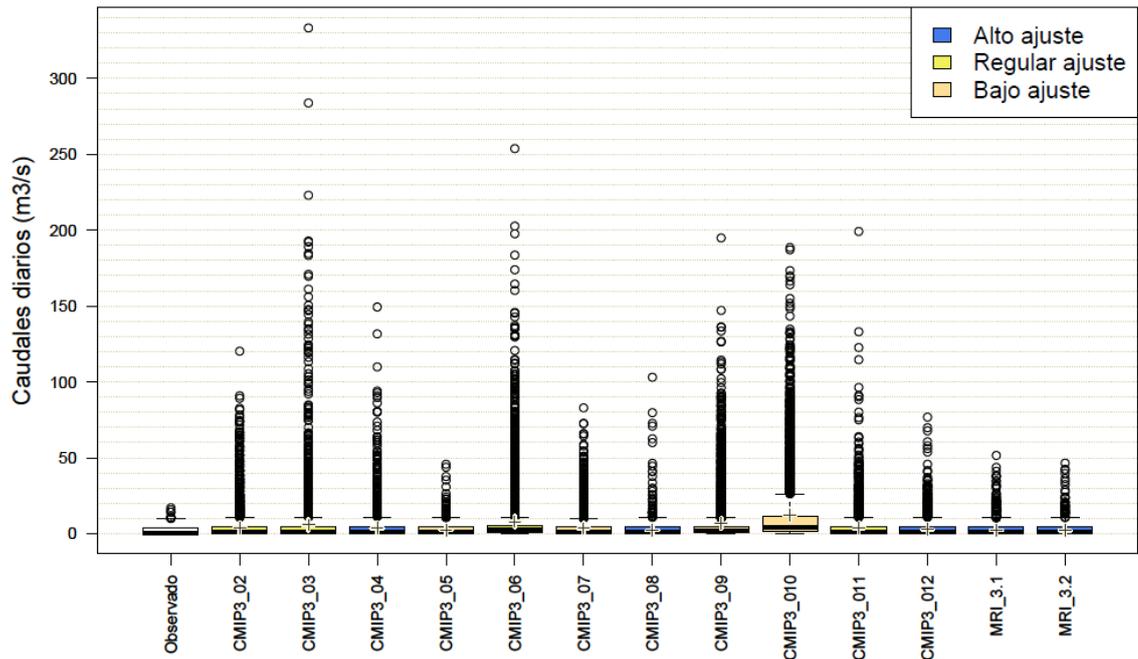
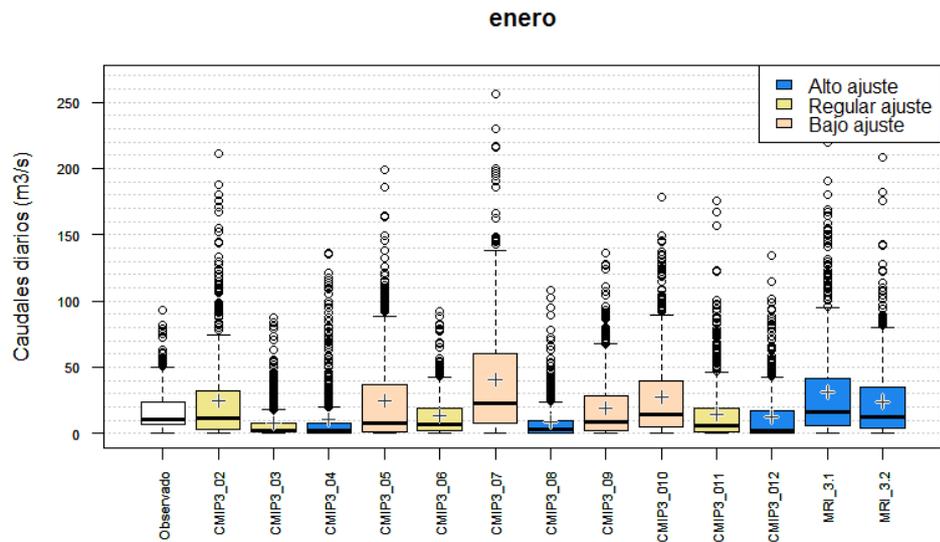


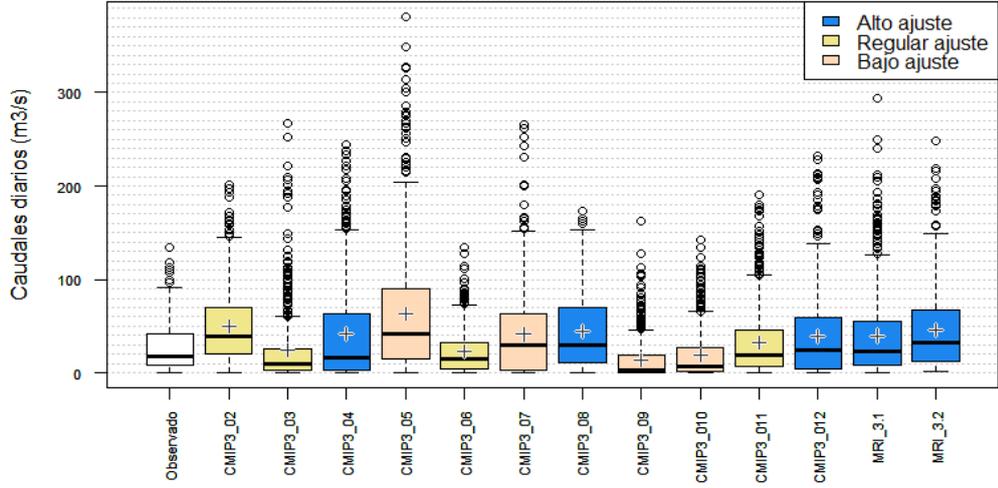
Figura 6b: Diagrama de cajas de caudales diarios de la época seca



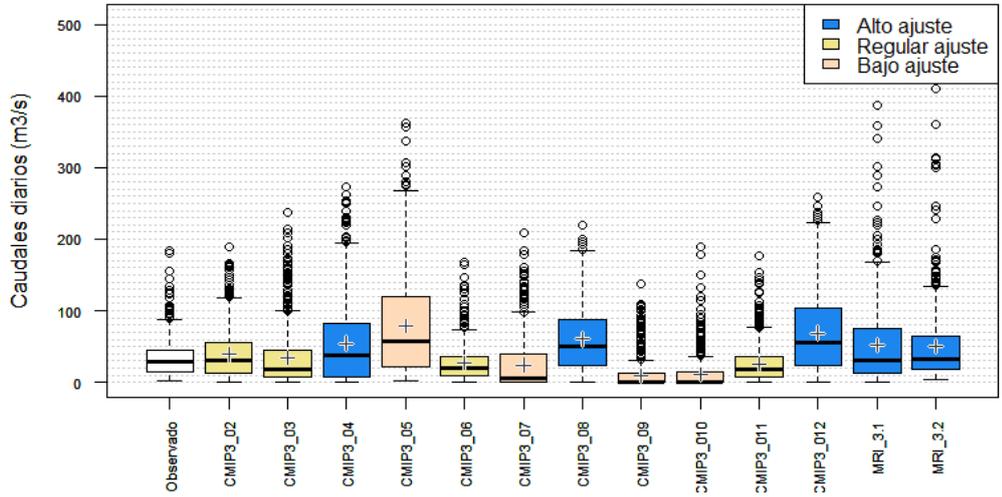
Anexo 7: Diagrama de cajas de los caudales diarios proyectados por cada mes del año



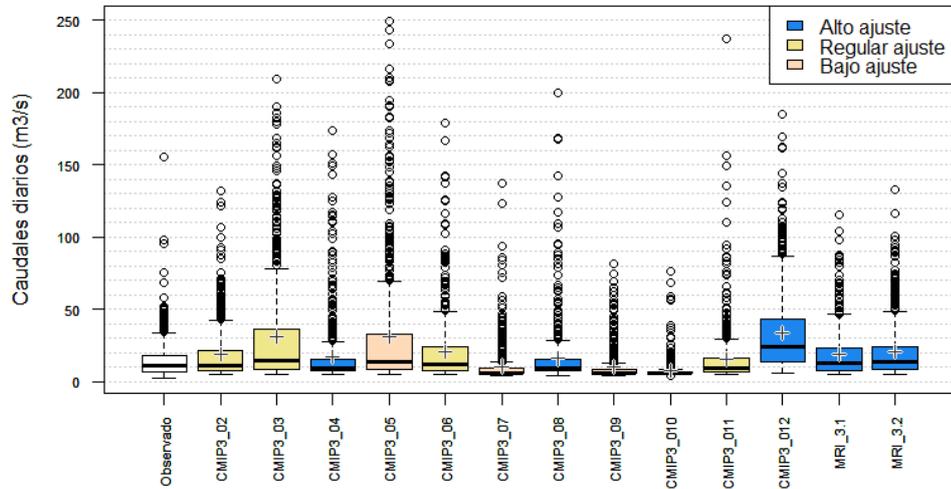
febrero



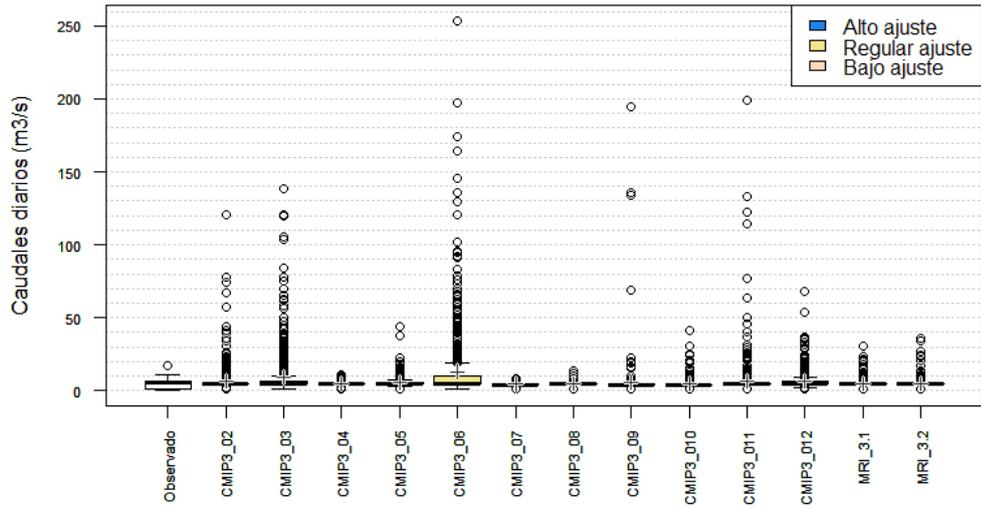
marzo



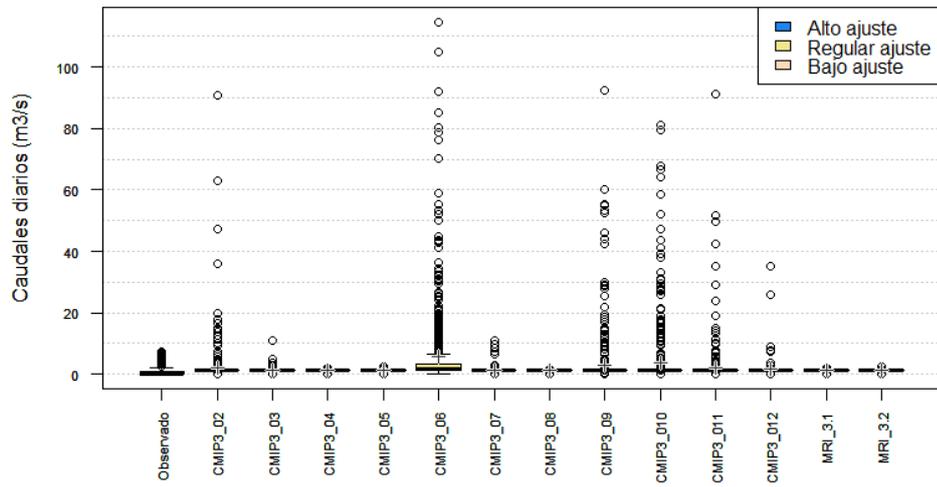
abril



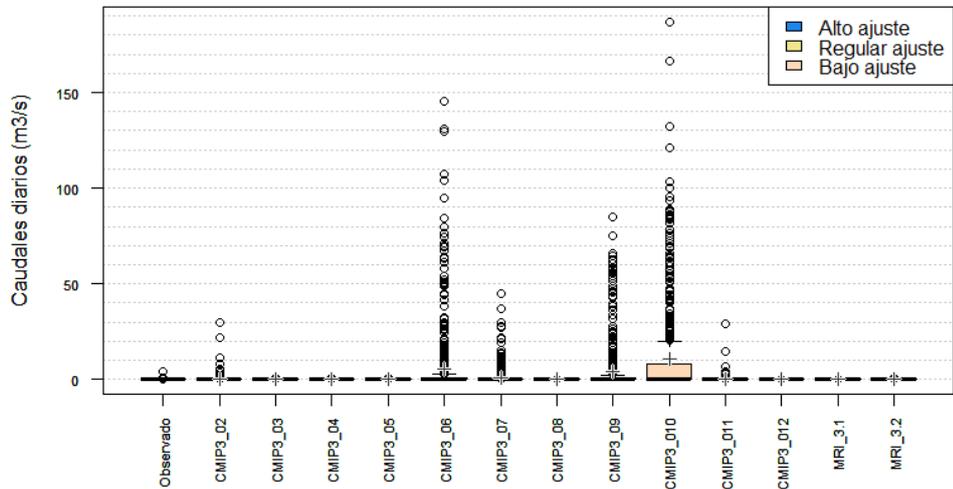
mayo



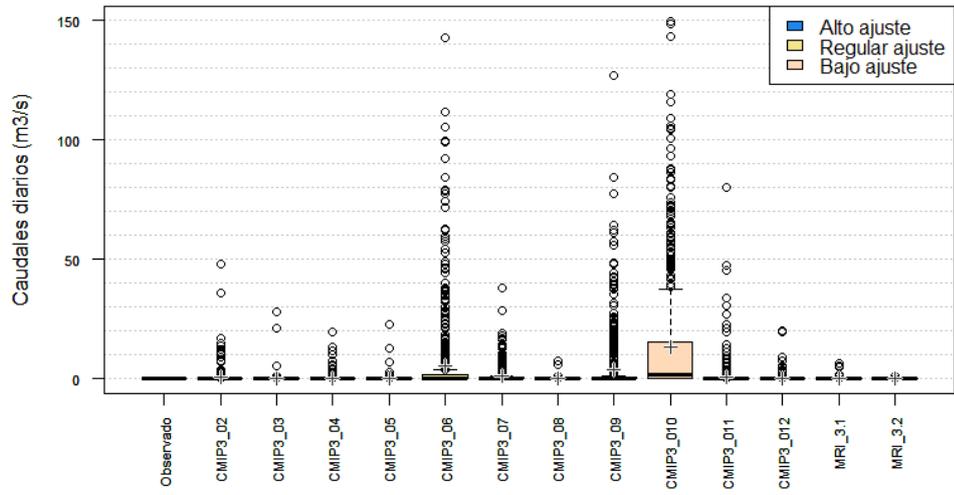
junio



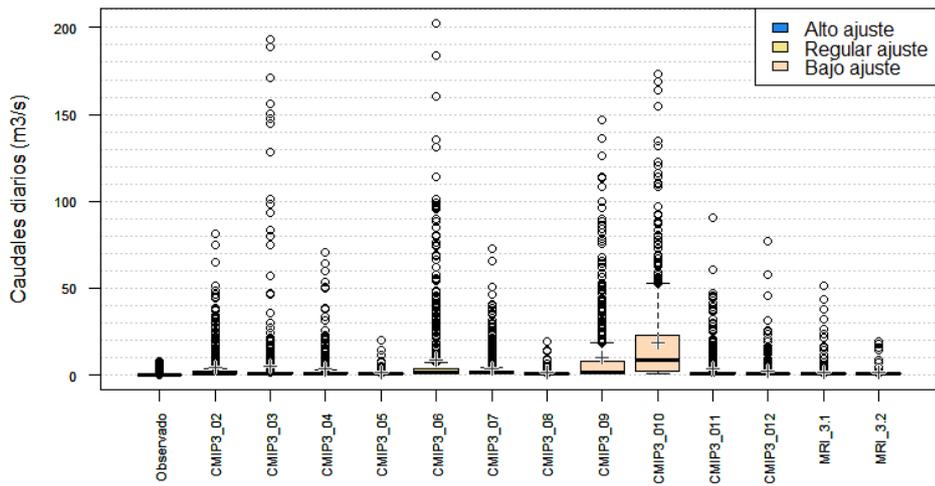
julio



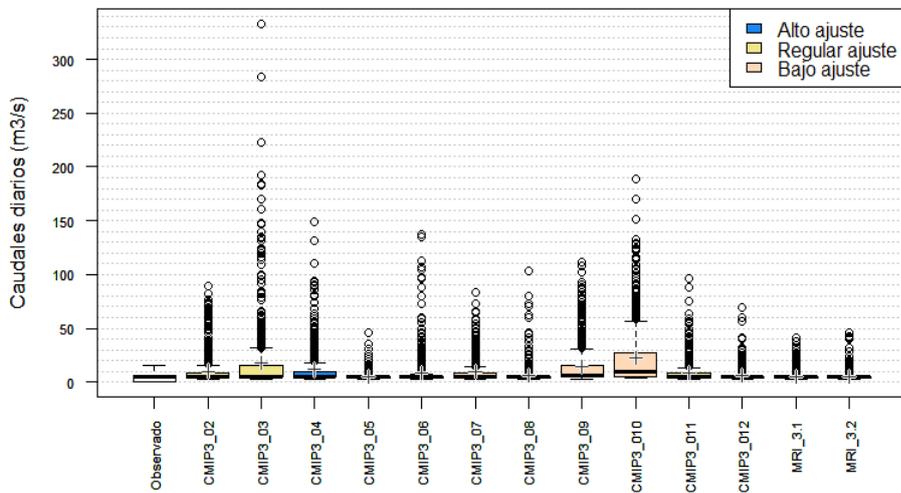
agosto



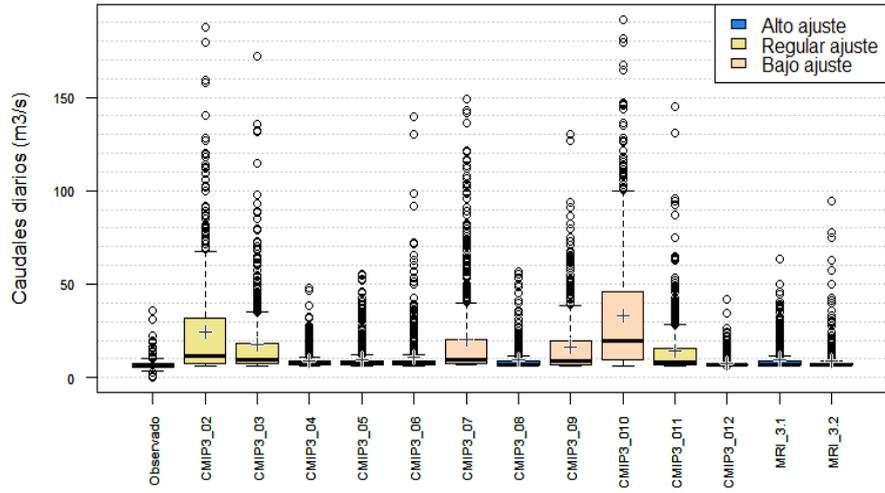
septiembre



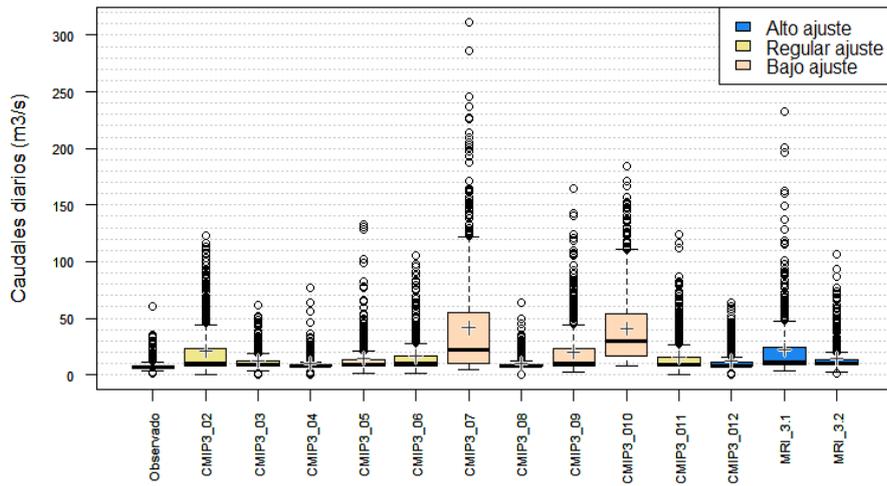
octubre



noviembre



diciembre



## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Año hidrológico:**

Continuo período de 12 meses elegido de tal manera que La precipitación total se dispone en el mismo período.

**Alerta:**

Dispositivo de Vigilancia. Situación en la que el peligro o riesgo es previsible a corto plazo. En estas circunstancias, el dispositivo de accionamiento se mueve de situación guardia para la preparación.

**Ciclo Hidrológico:**

Etapas de sucesión cubiertos por el agua al pasar la atmósfera en tierra y viceversa: la evaporación del suelo, las aguas marinas y continentales; condensación para formar las nubes; precipitación; acumulación en el suelo o en los cuerpos de agua, flujo directo o diferido del mar y volver a la evaporación.

**Curva de cuotas-área-volumen:**

Gráfico que muestra la relación entre el nivel de agua de la cuota un embalse, una zona inundada y su volumen acumulado.

**Curva Descarga:**

Curva representativa de la relación entre el alta y el nivel de agua Corresponsal, en un punto de un curso de agua determinado. Sinónimos - relación Key curva cuota de descarga.

**Curva Duración:** curva representativa de la relación entre un determinado variable (por ejemplo caudal o nivel) y la frecuencia con la que esto se igualó o superó.

**Cuencas:**

Unidad territorial para la implementación de la Política Nacional Recursos hídricos y actividades del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Agua.

**Dato Climatológico:**

Data relevante para el estudio del clima, incluidas las relaciones estadísticas, valores medios, valores normales, frecuencias, variaciones y distribución de los elementos meteorológicos.

**Dato Hidrológico:**

Los datos sobre precipitaciones, niveles y caudales de los ríos, el transporte descarga de sedimentos y el almacenamiento de agua subterránea, la evapotranspiración, Almacenamiento en los valles, los niveles máximos de las inundaciones y vertidos y calidad del agua, así como otros datos meteorológicos relacionados, tales como la temperatura.

**Desastre:**

Adverso resultado, natural o artificial, en un ecosistema (vulnerable), causando humanos, materiales y / o daños al medio ambiente y pérdidas económicas y sociales consiguientes. Los desastres se cuantifican en función de los daños en términos de intensidad, mientras que los eventos adversos son cuantificados en términos de magnitud. La intensidad depende de un desastre la interacción entre la magnitud del evento adverso y el grado de vulnerabilidad del sistema receptor afectado. Por lo general, el principal factor en la intensificación de un desastre es el grado de vulnerabilidad del sistema de recepción.

**Estación convencional:**

La estación de monitoreo de cuya lectura se hace por un observador (lectura y grabación de los datos del nivel de agua).

**Estación Climatológica:**

Estación donde se obtienen los datos climatológicos. Incluyen mediciones de viento, la nubosidad, temperatura, humedad, presión atmosférica, precipitación, radiación solar y evaporación.

**Estación hidrométrica:**

Estación de donde se obtienen los siguientes datos para las aguas de los ríos, lagos o embalses: el nivel de agua, flujo, transporte y deposición de sedimentos, temperatura y otras propiedades físicas y químicas del agua, además de las entidades de cobertura.

Se pueden utilizar indistintamente los términos y estación hidrológica estación hidrometeorológica.

Las estaciones pueden dividirse además en la precipitación (precipitación), evaporimétricas (evaporación), fluviométrico (nivel y caudal de los ríos), limnimétricas (niveles de lagos y embalses), sedimentométricas (sedimentos) y la calidad del agua (temperatura, pH, oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica, etc.).

**Estación telemétrica:**

Estación de monitoreo tiene equipo para la transmisión información grabada de una determinada variable (Is. La transmisión por satélite o célula de precipitación y el nivel de datos).

**Estación automática:**

Estación de monitoreo que proporciona equipos y sensores para registrar una variable en particular (pe pluviómetro digital o nivel de los tipos de agua sensor de "transductor de presión", "radar" o "ecografía").

**Hidrología:**

La **hidrología** es el estudio del movimiento, distribución y calidad del agua en todas las zonas de la Tierra, y se dedica tanto al ciclo hidrológico como a los recursos de agua. Los hidrólogos trabajan en ciencias ambientales o geológicas, geografía física, e ingeniería civil y ambiental.

**Hidrografía:**

La ciencia que se ocupa de la descripción y medición de todos los cuerpos de agua: océanos, mares, ríos, lagos, embalses, etc.

**Hidrograma:**

Representación gráfica de la variación en el caudal o nivel en la corriente con el tiempo. Para los niveles, se utiliza preferentemente el término cotagrama.

**Hidrometeorología:**

Estudio de las fases atmosférica y terrestre del ciclo hidrológico, con énfasis en sus interrelaciones.

**Hidrometría:**

Ciencia Medición y análisis de las características físicas y químicas del agua, incluyendo los métodos, técnicas e instrumentos utilizados en hidrología.

**Histograma:**

Diagrama representativo de la distribución temporal de las intensidades de lluvia. Lo mismo que la precipitación.

**Inundación:**

Desbordando el agua del canal normal de los ríos, mares, lagos y estanques, o la acumulación de agua por drenaje deficiente en áreas normalmente no sumergidas. Dependiendo de la magnitud, las inundaciones se clasifican como excepcional, de gran magnitud, normal o regular y de pequeña magnitud. A la luz de la norma en evolución, que se clasifican como inundaciones o inundaciones graduales, inundaciones o inundaciones repentinas, inundaciones e inundaciones costeras. La mayor parte del tiempo, el aumento en el flujo superficial es causada por una lluvia intensa y concentrada, la intensificación del régimen de lluvias estacionales, la saturación de las aguas subterráneas o de fusión. La inundación puede tener otras causas, como la sedimentación de los lechos de los ríos; compactación y sellado del suelo; erupciones volcánicas en zonas de nieve.

**Lluvia Efectiva:**

Parte de la precipitación que produce la escorrentía.

En la agricultura, la parte de lluvia permanece en el suelo y contribuye al desarrollo de los cultivos.

**La prevención incluye:** Evaluación y Reducción de Desastres a través medidas estructurales y no estructurales. Se basa en el análisis de riesgos y vulnerabilidades y también incluye las leyes y reglamentos, la zonificación, obras de código, las obras públicas y los planes directores municipales.

**La recolección de datos de la plataforma: plataforma de recopilación de datos -** PCD Consiste en un conjunto de equipos instalados en las estaciones de monitoreo capaces de mantener el registro de una variable en particular (por ejemplo, la precipitación y el nivel), almacenarlos (por ejemplo, el almacenamiento en el registrador de datos electrónica o grabadora) y transmitirlos (por ejemplo, transmisión por satélite o celular).

**Precipitación:**

Las precipitaciones se entiende en la hidrología como toda el agua de la medio atmosférico que alcanza la superficie de la tierra. Niebla, lluvia, aguanieve, granizo, rocío, la escarcha y la nieve son diferentes formas de precipitación.

Lo que diferencia a estas formas de precipitación es el estado en el que el agua es. Por su capacidad para producir escorrentía, la lluvia es el tipo más importante de precipitación para la hidrología. Las principales características de la precipitación son su duración total y distribuciones temporales y espaciales.

**Prevención Desastre:**

Conjunto de acciones dirigidas a reducir la ocurrencia e intensidad de los desastres naturales o humanos, a través de la evaluación y reducción de amenazas y / o vulnerabilidades, minimizando las pérdidas socioeconómicas y daños humanos, materiales y medio ambiente. Implica la formulación e implementación de políticas y programas, con el fin de prevenir o minimizar los efectos de los desastres.

**Punto de vista fisiográfico,**

Cuenca corresponde a la precipitación del agua cuenca natural, hace que los flujos convergen en un solo punto de salida.

**Sequía:**

Situación momentánea de baja disponibilidad de agua. Si la situación empeora y puede causar la interrupción de los servicios esenciales o la escasez, o sigue siendo deficiente durante un período prolongado de tiempo, se puede establecer que una situación de escasez de agua.

**Temporada:**

División del año, de acuerdo con algún fenómeno que se repite periódicamente, por lo general astronómicos (equinoccios y solsticios) o el clima. En las latitudes medias y subtropicales, se identifican cuatro estaciones: verano, otoño, invierno y primavera, distribuidos de modo que, si bien es verano en el hemisferio sur, es invierno en el hemisferio norte. En el hemisferio sur, el verano es de diciembre a febrero; Otoño, de marzo a mayo; invierno, de junio a agosto, y en la primavera de septiembre a diciembre. En las regiones tropicales, estos cuatro estaciones no están tan bien definidos, debido a la distribución uniforme de la temperatura del aire de la superficie. Por lo tanto, identificarse sólo dos estaciones: lluviosa y seca. En las regiones subtropicales continentales, la división de temporada se hace en estaciones caliente o frío, la lluvia o la sequía o ambos criterios.

**Unidad**

Análisis de las actividades de prevención de desastres relacionados con los cuerpos de agua.

## INDICE DE FIGURAS

Fig.1.-Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio.....	9
Fig.2.-Mapa de vegetación y uso de suelo.....	11
Fig.3.-Mapa de tipo de suelos.....	12
Fig.4.-Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas.....	14
Fig.5.-Representacion del reservorio en el modelo SWAT.....	19
Fig.6.-Cambio de escala por el método CDF.....	24
Fig.7.-Incremento de la temperatura superficial global respecto a 1980-1999.....	28
Fig.8.-Mapa de Cobertura del estudio de la cuenca del rio Pisco.....	29
Fig.9.-Proyecciones de escorrentía mundial a fines del siglo XXI.....	31
Fig.10.-Representacion en diagrama de bloques del sistema hidrológico global	41
Fig.11.-Representacion esquematica del ciclo hidrológico en SWAT.....	46
Fig.12.-Cambios Observados en temperaturas, nivel de mar y cobertura de Nieve en el hemisferio norte.....	50
Fig.13.-Resultados del análisis de sensibilidad de los productos del modelo	60
Fig.14.-Serie de Caudales mensuales observados y simulados (A).....	62
Fig.15.-Serie de Caudales mensuales observados y simulados (B).....	62
Fig.16.-Coeficiente de Person de caudales diarios observados y simulados....	63
Fig.17.-Coeficiente de Person de caudales mensuales observados y simulados.	63
Fig.18.-Diagrama de cajas de precipitación observada y simulada (1980 -1999)	68
Fig.19.-Precipitación mensual observada y proyectada promedio(2080-2099)	70
Fig.20.-Funcion de distribución acumulada de caudales diarios proyectados.....	71
Fig.21.-Diagrama de cajas con caudales diarios Proyectados.....	72
Fig.22.-Diagrama de cajas con caudales mensuales Proyectados.....	73
Fig.23.-Caudales promedios proyectados a fines el siglo XXI (2080-2099).....	74
Fig.24.-Variación relativa a los caudales medios mensuales observados.....	74
Fig.25.-Persistencia de disponibilidad hídrica al 50%,75%,90% y 95%.....	75
Fig.26.-Variación de la oferta anual del agua a fines del siglo XXI (2080-2099)	77

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.-Cobertura vegetal del estudio.....	10
Cuadro 2.-Valor asignado a la cobertura del suelo.....	11
Cuadro 3.-Valor asignado a las coberturas del suelo.....	12
Cuadro 4.VARIABLES hidrometeoro lógicas utilizadas en el suelo.....	14
Cuadro 5.-Parametros utilizados en el análisis de sensibilidad.....	20
Cuadro 6.-Fuentes de información geográfica suministrada al modelo.....	26
Cuadro 7.-Estaciones meteorológicas e hidrológicas disponibles en el estudio	26
Cuadro 8.-Descripcion de los MCG, utilizados.....	27
Cuadro 9.-Cambio de la temperatura global (°C) con respecto al año 1990.....	27
Cuadro 10.-Parametros más influyentes obtenidos en el modelo SWAT.....	48
Cuadro 11.-Resultado del análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo.....	61
Cuadro 12.-Valores de los índices estadísticos de calibración a nivel diario.....	64
Cuadro 13.- Valores de los índices estadísticos de calibración a nivel mensual.....	64
Cuadro 14.- Valores de los parámetros del modelo calibrado.....	64
Cuadro 15.-Factores de ajustes de la precipitación media mensual (1980- 1999).....	67
Cuadro 16.-Clasificación de los MCG de acuerdo al ajuste del área de estudio....	69
Cuadro 17.-Variación de precipitación anual por cada estación meteorológica.....	71

## DIPOSITIVASDE SUSTENTACION



UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

“IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMATICO EN LOS RECURSOS  
HIDRICOS EN LA CUENCA DEL RIO PISCO – Año 2016”

PRESENTADO POR EL BACHILLER  
JOSÉ GERMÁN DULANTO BENAVIDES

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL

### PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

El Perú es un país altamente vulnerable a los efectos adversos del cambio climático, pues presenta siete de las nueve características de vulnerabilidad reconocidas por la Convención Marco. Por ello, la adaptación al cambio climático es un asunto de inminente prioridad para el país en su camino al desarrollo.

Adaptarse implica modificar el comportamiento, los medios de vida, la infraestructura, las leyes, políticas e instituciones en respuesta a los eventos climáticos experimentados o esperados.

Las pérdidas estimadas como consecuencia de los impactos causados por el cambio climático superan largamente a las inversiones requeridas para prevenirlos y reducir sus riesgos.

Las proyecciones del cambio climático en el Perú muestran que hacia el 2030 habría un aumento de 1°C en la temperatura y 10% de mayor variabilidad en las precipitaciones.

### Delimitación de la Investigación

#### Delimitación Social:

El cambio climático, por encima de otras consideraciones, es un hecho social, puesto que tiene sus causas en gran medida en las actividades humanas, y porque además son las sociedades globales y específicas, así como las personas que componen esas sociedades, quienes finalmente van a sufrir sus consecuencias directa o indirectamente a través del cambio del medio biogeofísico. Es un hecho social también por razón de que su solución (o resolución) no puede hacerse por la naturaleza, por el medioambiente, sino por la sociedad. El análisis del impacto social del cambio climático es así un área relevante no sólo como ejercicio académico, sino también como información imprescindible para su gestión.

#### Delimitación Temporal

Esta investigación es de actualidad, por cuanto el tema de cambio climático en los recursos hídricos es vigente y más aún en el ámbito de educar a los ciudadanos que viven en esta cuenca de estudio.

### COBERTURA DEL ESTUDIO

#### Universo

Cuenca del río Pisco.

#### Muestra

Información hidrometeorológica de las estaciones que se encuentran instaladas en la Cuenca del río Pisco

### PROBLEMA Y OBJETIVO GENERAL

#### Problema General

¿Cómo afecta la variabilidad en el Impacto del Cambio Climático en la disponibilidad de los Recursos Hídricos de la cuenca del río Pisco?

#### Objetivo General

Evaluar el Impacto del Cambio Climático en la eficiente disponibilidad de los Recursos Hídricos en la cuenca del río Pisco.

### Objetivos Específicos

Aplicar el modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Pisco.  
Realizar el análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT.

Proyectar el clima para el siglo XXI en base de los modelos CMIP3, MRI 3.1 y MRI 3.2.

Evaluar escenarios con el modelo SWAT calibrado, en base a la información obtenida de Modelos CMIP3, MRI 3.1 y MRI 3.2

### Hipótesis Principal:

El impacto del Cambio Climático influye eficientemente en la disponibilidad de los Recursos Hídricos en la cuenca del río Pisco.

### Hipótesis Secundarias:

El cambio climático afectará a todos los estratos de la sociedad y del medio ambiente, con fuertes repercusiones en el agua y la agricultura, tanto en el presente como en el futuro.

Los registros de observaciones y las proyecciones climáticas evidenciarán que los recursos de agua dulce son vulnerables y pueden resultar gravemente afectados por el cambio climático.

Los impactos por el Cambio Climático con qué frecuencia se incrementarían los eventos climatológicos extremos.

La gestión integrada del recurso hídrico es clave para dar respuestas al cambio climático

### Variables e Indicadores

**Variable Independiente** : Impacto del Cambio Climático

Indicadores : Disponibilidad hídrica

Índices : m<sup>3</sup>/seg.

**Variable Dependiente:** Recursos Hídricos

Indicadores : Cantidad

Índices : Hm<sup>3</sup> / cuenca.

### Justificación e Importancia de la Investigación.

#### Justificación

En el estudio se evaluarán las condiciones meteorológicas e hidrológicas de la cuenca del río Pisco, con el fin de conocer su comportamiento y caracterizar cada una de las variables del ciclo hidrológico. Una vez realizado este proceso, se determinará los posibles impactos que ocasionará el cambio climático en la oferta hídrica superficial de esta cuenca, tomando como variable de entrada los escenarios regionalizados de precipitación y temperatura del periodo.

#### Importancia.

La culminación de esta investigación es de mucha importancia ya que nos permitirá establecer un marco de referencia sobre los posibles cambios del clima y su efecto en la disponibilidad del agua, y permitirán proponer medidas de adaptación o mitigación de estos efectos.

Además se generara información relevante para futuras investigaciones referentes a generación de caudales, simulaciones de cuenca y escenarios de proyección en el ámbito de estudio

### Tipo y Nivel de la Investigación

#### Tipo de investigación.

Es aplicada, orientada a realizar las la proyección de escenarios futuros para poder conocer la disponibilidad del recurso hídrico en el futuro.

#### Nivel de investigación.

Será de nivel exploratoria y explicativa buscando definir claramente el estado actual y futuro de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Pisco.

#### Diseño de la investigación.

Para el diseño de la investigación emplearemos el de una investigación con Diseños Experimentales el control y la validez, con el que se logrará el control y la validez externa:

### Estudio de factibilidad

#### Factibilidad técnica.

Las herramientas principales técnicas que estamos utilizando en este estudio son los modelos:

Los modelos climáticos constituyen la herramienta más confiable disponible en la actualidad para la generación de información acerca de las perspectivas climáticas futuras en la escala de decenios a un siglo en respuesta a acciones antrópicas o cambios naturales en los forzamientos externos del sistema climático.

#### Factibilidad operativa.

Dentro de la parte operativa es la aplicación del modelo SWAT en la cuenca del río Pisco, cumpliéndose con los procesos que van a permitir determinar la evaluación de la sensibilidad, calibración y validación del modelo en mención.

#### Factibilidad económica.

Este modelo como es modelo gratuito que se baja de la Web, su gasto no representa un desembolso económico en la adquisición de ese modelo, más bien la importancia que si se reconsidera es tal como se ha definido en el plan de tesis el mayor gasto es en la operación de campo debido a las actividades hidrometeorológicas y el recojo de información y la evaluación de escenarios con este modelo calibrado, en base de la información obtenida en los modelos CMIP3, MRI3.1 y MRI3.2.

### Propuesta de proyecto.

Para el diseño de la investigación se realizó los Diseños Experimentales el control y la validez, con el que se lograra el control y la validez externa:

Se indicó las coordenadas de cada estación meteorológica utilizada en el modelo para sustraer la información actual correspondiente a cada Modelos de la Circulación General (MCG), luego se realizará el cambio de escala estadístico para obtener una información más precisa a los puntos de ubicación de las estaciones, control de la calidad de la información hidrometeorológica.

### **Análisis de resultados de Sensibilidad, Calibración y Validación del Modelo Hidrológico.**

#### **Análisis de Sensibilidad**

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

#### **Calibración y validación del modelo hidrológico**

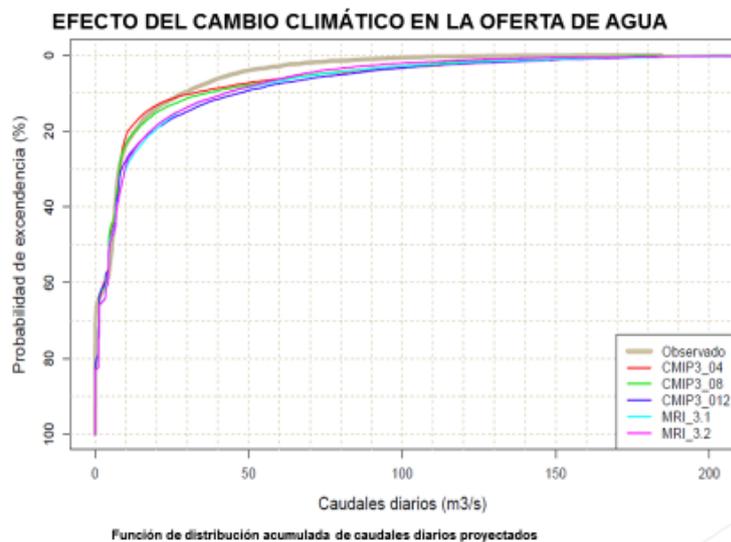
La serie de caudales generados por el modelo calibrado fue comparada con la serie de datos observados de la estación hidrológica "Letrayoc" para el periodo (2000-2010), por medio de métodos gráficos y estadísticos.

#### **Variación relativa a los caudales medios mensuales observados**

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

La variación promedio indicó que en todos los meses del periodo húmeda (Octubre – Abril) se proyecta un incremento de la oferta de agua desde +8.10% a +77.12%, indicando los meses de Marzo y Diciembre con los mayores incrementos de +57.60% y +77.12% respectivamente. Sin embargo, se proyecta también una disminución de la escorrentía en los meses de julio y agosto con descensos de hasta -82.56% y -24.14% respectivamente.

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



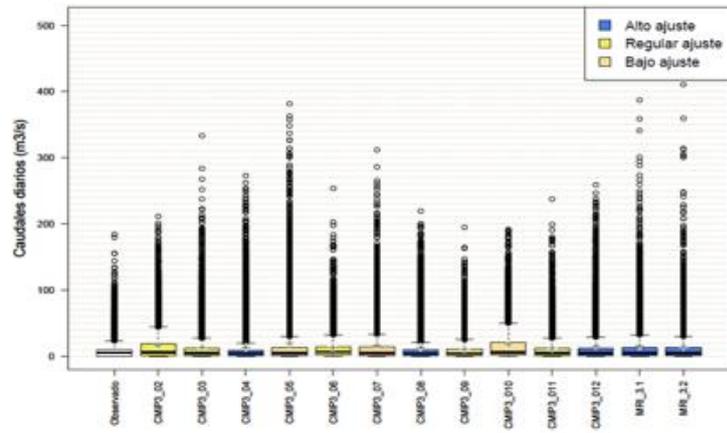


Diagrama de cajas los caudales diarios proyectados

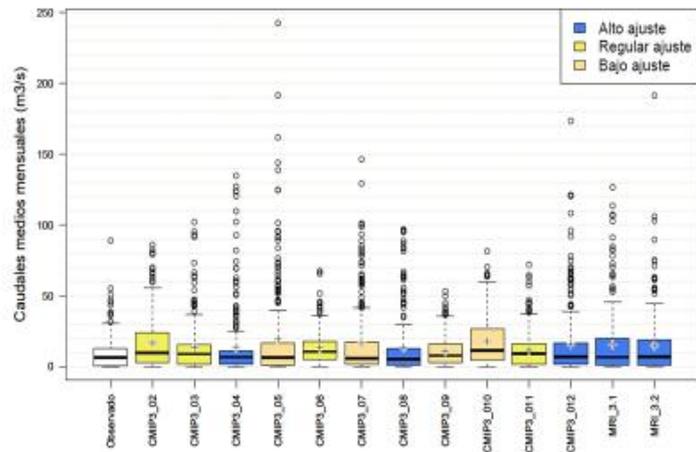
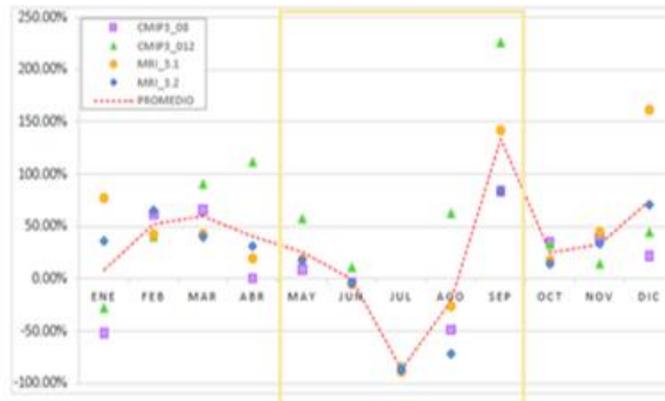


Diagrama de cajas de los caudales mensuales proyectados



Variación relativa a los caudales medios mensuales observados

## CONCLUSIONES

Tanto en la calibración y validación del modelo hidrológico se obtuvieron valores de R2, NS, PBIAS y RSR que deducen el rendimiento satisfactorio del modelo hidrológico SWAT, considerándose el modelo elaborado con capacidad suficiente de simular la cuenca en estudio.

Se realizó el cambio de escala ("downscaling") y proyección de la precipitación hacia fines del siglo XXI de manera satisfactoria; logrando simular la distribución y estacionalidad de la precipitación para el periodo observado (1980-1999).

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

### RECOMENDACIONES

- Continuar la investigación, incluyendo el análisis de más escenarios de emisión para obtener un panorama más amplio del efecto cambio climático en la hidrología de la cuenca del río pisco; considerando que los resultados de esta investigación proyectan mayor disponibilidad de agua y eventos diarios de escorrentía de altas magnitudes.
- Cumplimiento del Plan de afianzamiento hídrico del valle de Pisco, para lograr aprovechar la mayor disponibilidad de agua que se proyecta en esta investigación.
- Ampliar la capacidad de Almacenamiento de las 05 lagunas que se encuentra en la parte alta de la cuenca para tener un mayor aprovechamiento del recurso hídrico en la época de estiaje.

- Debido a la baja disponibilidad de información hidrológica diaria, se utilizó una estación hidrológica para realizar la calibración del modelo hidrológico. Se recomienda emplear más estaciones hidrológicas en la calibración del modelo para poder obtener una representación más exacta de la cuenca, considerar una en la parte alta y baja.
- Proseguir realizando más estudios de cambio climático y gestión de riesgo y desastres en nuestro país, de manera que se logre establecer un marco de referencia sobre los posibles cambios del clima y su efecto en la disponibilidad del agua, permitiendo proponer medidas de adaptación o mitigación ante estos efectos y riesgos que se puedan tener debido a su manifestación sísmica de dicha cuenca.

**GRACIAS**

