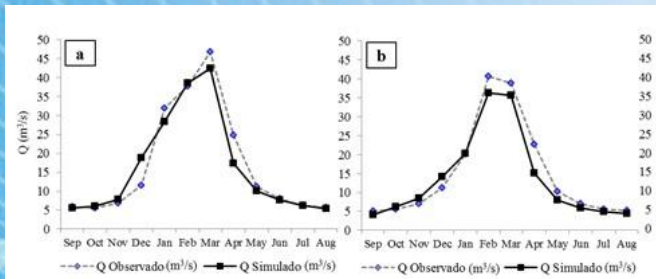




PERÚ

Ministerio del Ambiente

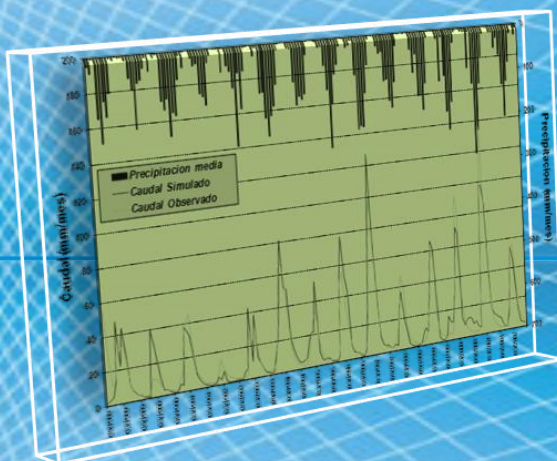
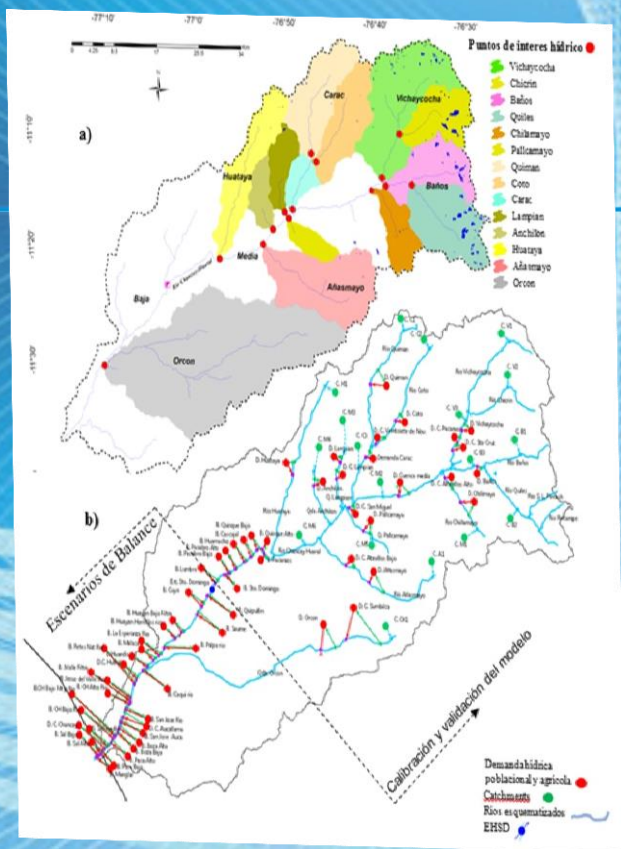
Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI



Río Chancay Huaral

# IMPACTO DEL CAMBIO SOCIO-ECONÓMICO Y CLIMÁTICO EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

## Cuenca del río Chancay-Huaral





PERSONAL DIRECTIVO

**Ing. Amelia Díaz Pabló**  
*Presidente Ejecutivo del SENAMHI*

**Ing. Esequiel Villegas Paredes**  
*Director Científico del SENAMHI*

**Ing. Oscar G. Felipe Ovando**  
*Director de Hidrología y Recursos Hídricos del SENAMHI*

**PhD. Waldo Lavado Casimiro**  
*Director de Hidrología Aplicada del SENAMHI*

REVISOR DEL ESTUDIO

**PhD. Waldo Lavado Casimiro**  
*Director de Hidrología Aplicada del SENAMHI*

RESPONSABLE DEL ESTUDIO

**Darwin Santos Villar**  
*Especialista en Hidrología del SENAMHI*

Lima-Perú  
Noviembre 2015

---

## ÍNDICE

### Resumen

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
1.1. Antecedentes .....	8
1.2. Justificación .....	9
1.3. OBJETIVOS .....	9
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	9
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	9
<b>II. ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>10</b>
2.1 UBICACIÓN .....	10
2.1.1 Ubicación Geográfico .....	10
2.1.2 Ubicación Hidrográfica .....	10
2.1.3 Ubicación Política .....	11
2.2 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS .....	12
2.2.1 Población .....	12
2.2.2 Actividades Económicas .....	13
2.3 CLIMA Y ECOLOGÍA .....	13
2.4 COBERTURA VEGETAL .....	14
2.5 SUELOS .....	14
2.6 GEOLOGÍA .....	15
2.7 RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES .....	16
2.8 DEMANDA DE AGUA .....	17
<b>III. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA</b> .....	<b>20</b>
3.1 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL .....	21
3.2 HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL .....	22
3.3 VELOCIDAD DE VIENTO MEDIA MENSUAL .....	22
3.4 PRECIPITACIÓN .....	23
3.5 ANÁLISIS DE LAS DESCARGAS MEDIA MENSUAL .....	25
<b>IV. METODOLOGÍA</b> .....	<b>26</b>
4.1. ETAPA I: Modelamiento hidrológico - WEAP .....	26
4.1.1. Esquematización del modelo WEAP .....	27
4.1.2. Calibración y validación del modelo WEAP .....	29
4.1.3. Análisis de sensibilidad del modelo WEAP .....	29
4.2. ETAPA II: Escenarios climáticos globales .....	30
4.3. ETAPA III: Escenarios hídricos .....	31
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	<b>32</b>

<b>VI. CONCLUSIONES .....</b>	<b>47</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>
<b>VIII. ANEXOS.....</b>	<b>51</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación y demarcación hidrográfica de la cuenca Chancay-Huaral. ....	12
Figura 2. Censos de población en la cuenca Chancay – Huaral (Urbana y rural).....	13
Figura 3. Cobertura vegetal de la cuenca Chancay-Huaral. ....	14
Figura 4. Sistema hidráulico de la cuenca Chancay-Huaral. ....	18
Figura 5. Demanda hídrica del valle Chancay-Huaral. ....	19
Figura 6. Red de estaciones Hidrometeorológicas utilizadas en la cuenca Chancay-Huaral. ....	20
Figura 7. Espacialización, relación altitud vs temperatura media multianual y régimen térmico de la cuenca Chancay-Huaral. ....	21
Figura 8. Humedad relativa media mensual de las estaciones climatológicas utilizadas. ....	22
Figura 9. Velocidad del viento media mensual de las estaciones climatológicas utilizadas.....	22
Figura 10. Régimen medio y gradiente altitudinal de la precipitación multianual sobre la cuenca del río Chancay–Huaral. ....	24
Figura 11. Distribución espacial de la precipitación pluviométrica media multianual sobre la cuenca del río Chancay–Huaral. ....	25
Figura 12. Comparación de los hidrogramas de los ríos Huaura, Chancay-Huaral y Chillón.....	26
Figura 13. Esquema del método humedad del suelo de dos reservorios (izquierda), mostrando las variables de entrada y salida en el proceso hidrológico. “Catchment” elemento aportante cuyo grado de caracterización puede ser detallado o grueso dependiendo del objetivo y la información con que se cuenta.....	27
Figura 14. a) Representa la delimitación de la cuenca en puntos de interés hídricos. b) Esquemmatización de la cuenca Chancay-Huaral en el modelo WEAP.....	29
Figura 15. Series de tiempo de Caudal (Q) observado y simulado mensual para el periodo de calibración y validación en la cuenca Chancay-Huaral. ....	33
Figura 16. Comparación de régimen de Caudal (Q) observado y simulado: (a) Calibración, (b) validación I y (c) validación II. ....	33
Figura 17. Diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para los periodos húmedos y secos de la calibración y validación del modelo. ....	34
Figura 18. Régimen de precipitación total mensual (barras en azul) y Caudal medio mensual (Q, lineal) generados en catorce tributarios de interés hidrológicos. AH, representa el área húmeda o aportante de cada tributario. ....	35
Figura 19. Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo para Nash. ....	36
Figura 20. Régimen del ciclo anual de la precipitación mensual de 31 modelos climáticos globales.....	37
Figura 21. Análisis comparativo entre la precipitación de referencia y la generada para el escenario RCP4.5 para la cuenca Chancay-Huaral. ....	39
Figura 22. Análisis comparativo entre la precipitación de referencia y la generada para el escenario RPC8.5 - cuenca del río Chancay-Huaral. ....	41
Figura 23. Análisis comparativo entre la temperatura de referencia y la generada para el escenario RCP4.5 - cuenca del río Chancay-Huaral. ....	42

Figura 24. Análisis comparativo entre la temperatura de referencia y la generada para el escenario RCP8.5 - cuenca del río Chancay-Huaral. ....	43
Figura 25. Comparación del caudal de referencia y los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para la cuenca del río Chancay-Huaral. ....	44
Figura 26. Demanda estacional no cubierta (rojo) para el periodo 2050. La ordenada del lado izquierdo representa la demanda no cubierta en (hm <sup>3</sup> ) y del lado derecho en (m <sup>3</sup> /s) indica la descarga teórica del sistema de lagunas necesaria para equilibrar el balance. ....	46
Figura 27. Grupo I de análisis por el índice del vector regional. ....	52
Figura 28. Grupo II de análisis por el índice del vector regional. ....	53
Figura 29. Acumulados de índices de precipitación. Grupo I.....	53
Figura 30. Acumulados de índices de precipitación. Grupo II.....	54
Figura 31. Grupo de análisis de caudales por el índice del vector regional. ....	55
Figura 32. Acumulados de índices de caudales. ....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación climático – ecológico. ....	13
Tabla 2. Grupos de suelos. ....	14
Tabla 3. Grupos de capacidad de uso. ....	15
Tabla 4. Descripción de las estaciones hidrometeorológicas. ....	20
Tabla 5. Criticas de datos. ....	23
Tabla 6. Criticas de datos. ....	25
Tabla 7. Criterios para evaluar la calibración y validación del modelo. ....	29
Tabla 8. Lista de los diferentes modelos climáticos globales. ....	30
Tabla 9. Parámetros principales de la calibración de la Cuenca Chancay-Huaral. ....	32
Tabla 10. Parámetros principales de la calibración de la Cuenca Chancay-Huaral. ....	38
Tabla 11. Comparación entre la precipitación de referencia y el escenario RCP4.5 a nivel anual para la cuenca del río Chancay-Huaral. ....	39
Tabla 12. Comparación de la precipitación referencia y el generado para el escenario RCP4.5, a nivel estacional para la cuenca del río Chancay-Huaral. ....	40
Tabla 13. Comparación de la precipitación del periodo de referencia y el escenario RCP8.5 a nivel anual para la cuenca del río Chancay-Huaral. ....	40
Tabla 14. Comparación de la precipitación referencia y el generado para el escenario RCP8.5, a nivel estacional para la cuenca del río Chancay-Huaral. ....	41
Tabla 15. Análisis comparativo entre la Temperatura de referencia y el generado para el escenario RCP4.5 - Cuenca del río Chancay-Huaral. ....	41
Tabla 16. Comparación de la temperatura referencia y el generado para el escenario RCP4.5, a nivel estacional para la cuenca del río Chancay-Huaral. ....	42
Tabla 17. Análisis comparativo entre la Temperatura de referencia y el generado para el escenario RCP8.5 - Cuenca Chancay-Huaral. ....	42
Tabla 18. Comparación de la temperatura referencia y el generado para el escenario RCP8.5, a nivel estacional para la cuenca del río Chancay-Huaral. ....	43
Tabla 19. Comparación del caudal (m <sup>3</sup> /s) entre el periodo de referencia y el escenario RCP4.5, para la cuenca del río Chancay-Huaral. ....	44
Tabla 20. Comparación del caudal (m <sup>3</sup> /s) entre el periodo de referencia y el escenario RCP8.5, para la cuenca del río Chancay-Huaral. ....	44
Tabla 21. Comparación de caudal estacional periodo de referencia y el escenario RCP4.5. ....	45
Tabla 22. Comparación de caudal estacional periodo de referencia y el escenario RCP4.8. ....	45
Tabla 23. Escenarios de balance hídrico para el horizonte 2050. ....	45

## RESUMEN

El presente estudio corresponde al análisis del Impacto del Cambio Socio-económico y Climático en la Gestión de los Recursos Hídricos, aplicado a la cuenca del río Chancay-Huaral. Durante la elaboración del presente estudio comprendió las siguientes etapas: diagnóstico del área de estudio como aspectos socioeconómicos, suelos, geología, recursos superficiales etc., tratamiento y análisis de la información hidroclimáticas, modelamiento hidrológico que comprende la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo WEAP, selección y validación de los modelos climáticos globales descargados del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados - fase cinco (CMIP5, iniciales en Inglés) bajo dos vías de concentraciones representativas, el RCP4.5 y el RCP8.5, y finalmente la generación de escenarios hídricos proyectados para el horizonte (2021-2050).



## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

En varios países del mundo, con el transcurrir de los años cada vez más cuencas hidrográficas están enfrentando desafíos en lo que respecta a la Gestión de los Recursos Hídricos (GRH). La escasez y el deterioro del agua son los principales problemas que requieren una mayor atención y acción, debido en parte al crecimiento poblacional e incremento de la actividad económica que llevan a conflictos y competencias en busca de una mejor calidad de vida (GWP, 2000). De esta manera, satisfacer las diversas demandas usualmente conlleva a intervenciones en los sistemas hídricos como embalses, desviaciones, trasvases etc., que modifican los patrones espaciales y temporales de disponibilidad de agua en los ríos, lagos, riveras, etc., y alteran el ecosistema y los servicios que estos proveen (Angarita, 2013).

Pero, la GRH es aún más compleja bajo la incertidumbre climática que puede extenderse en periodos largos de sequías o inundaciones que comprometen la economía de la región o país.

Los resultados de los MCG reportados por el IPCC indican un cambio en la variables climáticas, principalmente en la precipitación y temperatura, los cuales producirán cambios en la disponibilidad hídrica a nivel de cuenca. Por lo tanto es necesario analizar las afectaciones de los cambios en los regímenes de precipitación y temperatura como parte del proceso en la generación escurrimiento.

Esto ha generado un incremento en la cantidad de estudios que evalúan a nivel regional o local, el potencial impacto del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos. Teniendo como herramienta de evaluación los modelos hidrológicos y como escenarios el uso de modelos climáticos y el empleo de técnicas de regionalización.

El Perú no es ajeno a esta realidad, actualmente la gestión de los recursos hídricos (GRH) es afectado principalmente por el crecimiento inmensurable de su población y sector agrícola sumándose el cambio climático.

Bajo este contexto, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), como ente rector en las actividades hidrológicas y meteorológicas del país administra una red de observación hidrometeorológicas que permite el desarrollo de estudios e investigación, que se vienen elaborando a través de la Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos, principalmente, relacionados a la disponibilidad del recurso agua. En el marco del plan operativo 2015 se ha elaborado el estudio Impacto del Cambio Socio-económico y Climático en la Gestión de Recursos Hídricos (Cuenca del río Chancay-Huaral) mediante el uso del modelo WEAP "Water Evaluation And Planning".

## 1.2. Justificación

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Chancay-Huaral, una de las más importantes de la región de Lima, ya que participa con el 17% del Producto Bruto Interno (PBI) regional en el sector agropecuario (PMGRH-I, 2012). Con una agricultura orientada al mercado, donde existen cultivos transitorios y permanentes que tienen como mercado principal a la ciudad de Lima. El 98% de la oferta hídrica de la cuenca es destinado a la agricultura y el resto distribuido entre los demás sectores de desarrollo (CEPES, 1982). Bajo este contexto y según los resultados del IPCC (2013) el impacto del cambio climático está aumentando, alterando los patrones de precipitación sobretodo en América del Sur y Central, es necesario analizar a futuro los efectos del crecimiento socio-económico en la cuenca Chancay-Huaral ante una variabilidad climática.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo General

Analizar las implicancias del Cambio Socioeconómico y Climático en la Gestión de los Recursos Hídricos de la cuenca Chancay-Huaral mediante el uso del modelo WEAP.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar la información hidroclimatológica de la cuenca Chancay-Huaral.
- Calibrar y validar el modelo de gestión WEAP.
- Analizar la sensibilidad de los diferentes parámetros del modelo.
- Generar información en puntos de interés hídricos.
- Seleccionar y validar los modelos climáticos globales.
- Analizar los cambios en los regímenes hidroclimáticas - horizonte 2021-2050.
- Analizar el balance hídrico para el periodo 2021-2050.

## II. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la cuenca del río Chancay-Huaral, ubicada en la parte central de la vertiente del Pacífico. La oferta hídrica de la cuenca Chancay-Huaral es de uso multisectorial (poblacional, agrícola, central hidroeléctrico, minero etc.). Siendo la agricultura el sector económico de mayor uso de agua y el más importante al tener como primer mercado de sus productos a la ciudad de Lima, la cual sustenta la tercera parte de la población del país (WWF Perú, 2014).

La cuenca del río Chancay-Huaral cuenta con un sistema de lagunas reguladas. Localizadas en la parte superior de las unidades hidrográficas de Vichaycocha y Baños. Parte del recurso hídrico almacenado proviene del aporte de trasvase del Mantaro.

Estas lagunas que corresponde a infraestructuras mayores, son administrados por la Junta de Usuarios, que permiten incrementar el volumen natural del río entre 3 a 9 hm<sup>3</sup>/mensual, en función a las necesidades de demanda (uso de riego, poblacional y centrales hidroeléctricas).

### 2.1 Ubicación

#### 2.1.1 Ubicación Geográfico

La cuenca del río Chancay-Huaral (Figura 1), está ubicado en la costa central del Perú comprendida entre los paralelos 11°00'00" y 11°39'00" de latitud sur y los meridianos 76°26'00" y 77°15'00" de longitud oeste.

#### 2.1.2 Ubicación Hidrográfica

La cuenca del río Chancay-Huaral limita con las siguientes cuencas:

- Norte: Cuenca Huaura y Mantaro
- Sur: Cuenca Chillón
- Este: Cuenca Mantaro y Chillón
- Oeste: El Océano Pacífico

La cuenca del río Chancay-Huaral comprende una extensión de 3 046 Km<sup>2</sup> de las cuales la cuenca colectora húmeda o "cuenca imbrífera" es de 1 520 Km<sup>2</sup>, es decir aquella área localizada por encima de los 2500 msnm (PMGRH, 2011) y que aporta al escurrimiento superficial que tiene sus nacientes en la parte alta de la cuenca, extendiéndose hasta el océano Pacífico.

En su recorrido, el río Chancay-Huaral recibe los aportes de varios afluentes; por la margen derecha, los ríos Carac y Huataya y las quebradas Lumbray y

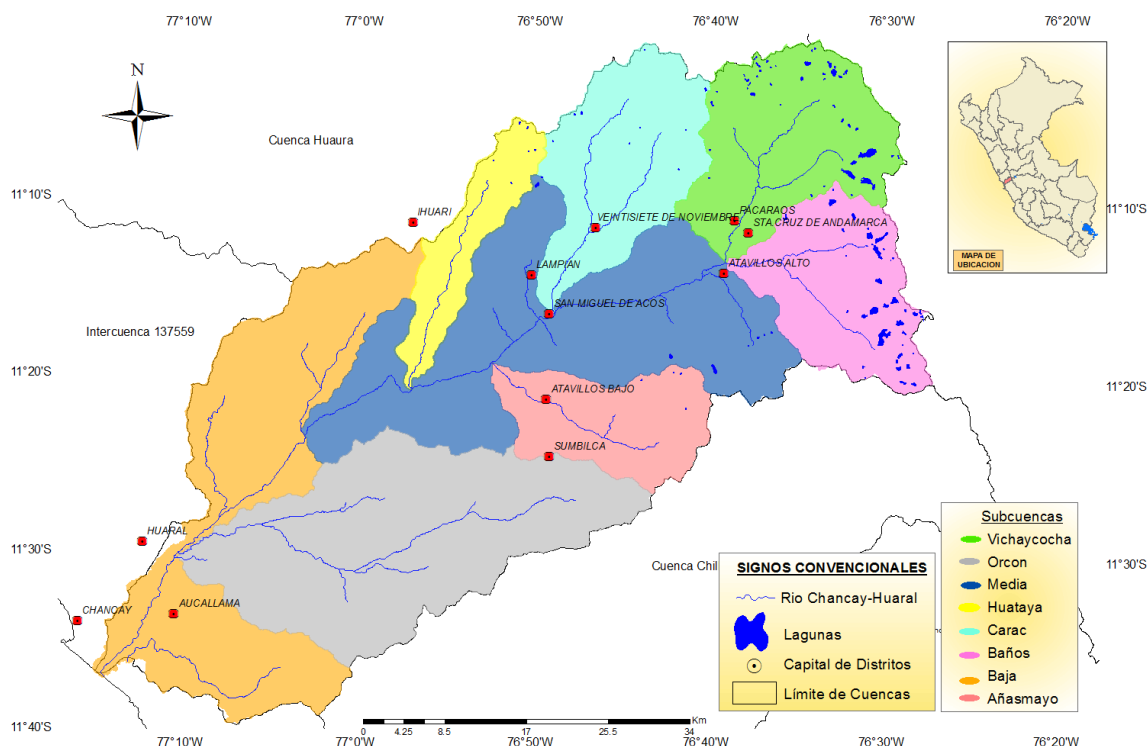
Huerequeque y, por la margen izquierda, el río Añasmayo y la quebrada de Orcón. Estos aportes es controlado y monitoreado en la Estación hidrológica Santo Domingo, con un caudal medio anual de  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ , que corresponde a la serie histórica de 1922 a 1999 PROFODUA (2005).

De régimen irregular, el río Chancay-Huaral se origina como consecuencia de las precipitaciones estacionales que cae sobre las laderas occidentales de la Cordillera de los Andes, las filtraciones del sistema de lagunas y el aporte de los deshielos de los nevados. La información pluviométrica existente en la cuenca ha permitido establecer que las precipitaciones se concentran de Enero a Abril y precipita alrededor del 80% al 90% del total anual y el periodo más seco ocurre de Julio a Octubre (CEPES, 1982).

La cuenca Chancay-Huaral presenta un relieve, de similar características a todos los ríos de la Costa, es decir, el de una hoya hidrográfica escarpada, alargada, de fondo profundo y quebrado y de fuertes pendientes. Asimismo, la cuenca está delimitada por cadenas de cerros que en dirección al Océano Pacífico muestran un descenso sostenido y rápido del nivel de cumbres (CEPES, 1982).

### **2.1.3 Ubicación Política**

Políticamente la cuenca del río Chancay-Huaral está ubicado íntegramente en el departamento de Lima – Perú. Ocupa la mayor parte la provincia de Huaral y en menor proporción la provincia de Canta. Once de los doce distritos de la provincia de Huaral, están ubicados dentro de los límites de la cuenca, y el distrito restante (Ihuari) ubicado en la cuenca Huara. La ubicación y nombres de los 12 distritos se muestran en la Figura 1.



**Figura 1.** Ubicación y demarcación hidrográfica de la cuenca Chancay-Huaral.

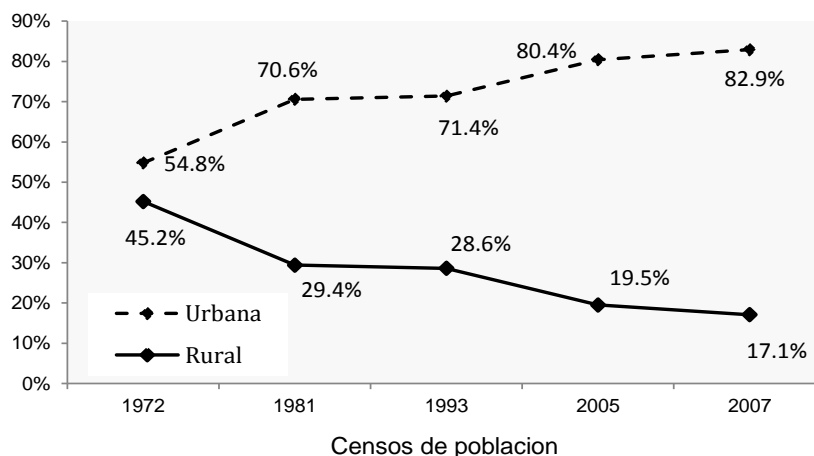
Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 Aspectos Socio-Económicos

### 2.2.1 Población

Según el reporte del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) del año 2007, la población total ubicada en la cuenca Chancay-Huaral es de 164 660 habitantes, que corresponde el 50.70% a la población masculina y el 49.3% a la población femenina.

La Figura 2 presenta los censos para la población urbana y rural. Al censo 2007, la tendencia de la población rural (17.0%) es a disminuir y la urbana (82.90%) a aumentar. La mayor población urbana corresponde principalmente a las ciudades de Huaral, Chancay y Aucallama ubicadas en el valle de la cuenca Chancay-Huaral.



**Figura 2.** Censos de población en la cuenca Chancay – Huaral (Urbana y rural).  
Fuente: Elaboración propia.

## 2.2.2 Actividades Económicas

Las principales actividades económicas desarrolladas en la Cuenca Chancay - Huaral son agrícola, ganadera, pesquera y piscícola, desembarque, comercio y servicios, energético e industrial. La actividad agrícola y agropecuaria, en la provincia de Huaral constituye el principal soporte de la estructura productiva de la provincia, no solamente por los niveles de producción, sino también su cartera de productos existentes orientada a mercados diversos. Destacan los cultivos industriales (algodón, maíz amarillo duro, marigol) seguidos de hortalizas, cereales y tubérculos. Entre los cultivos permanentes destacan los frutales: manzanos, mandarinas, paltos, mangos y naranjos.

La minería constituida por usuarios formales se ubica en la cuenca alta y el valle-bajo, además operan varias minas artesanales de cal y carbón; y en las zonas bajas arcillas, gravas y áridos. Actualmente existe actividad minera en la subcuenca Vichaycocha, que dependen de la Empresa Trevali Perú SAC, en el distrito de Santa Cruz de Andamarca y la minera Colquisiri en la cuenca baja.

## 2.3 Clima y ecología

La clasificación climática de la Cuenca Chancay–Huaral está basada en los conceptos generalizados de los sistemas originales de los Drs. Warren Thornthwaite y Leslie R. Holdridge, el mismo que ha sido utilizado por (ONERN, 1969) en la elaboración de mapas climáticos del Perú. De acuerdo a esta clasificación y considerando el factor altitudinal desde el litoral hasta la divisoria se han identificado cinco tipos climáticos (Tabla 1).

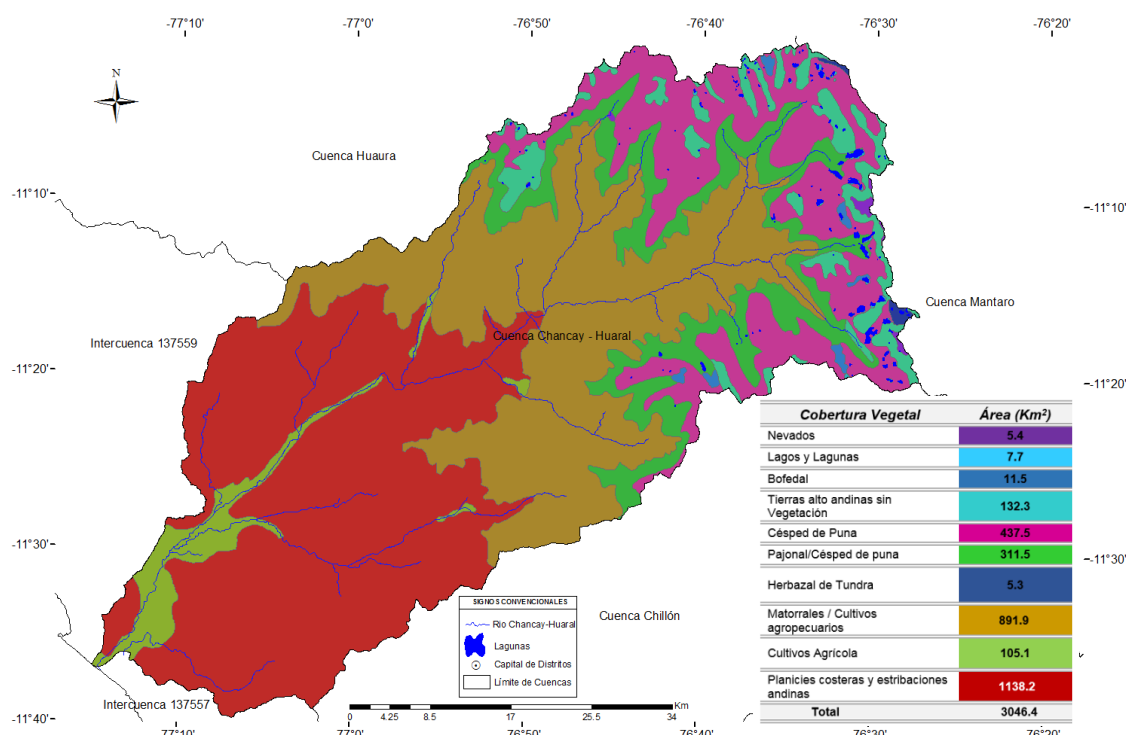
**Tabla 1.** Clasificación climático – ecológico.

Tipo Climático	Formación Ecológica	Subdivisión	Altitud (msnm)
Pluvial y Gélido	Tundra Pluvial – Alpino	-	0 - 2000
Muy Húmedo y Frígido	Páramo Sub – Alpino	Tendencia a Tundra Pluvial Paramo Sub - Alpino	2000 - 3000
Sub – Húmedo y Frío	Estepa Montano	-	3000 - 4000
Semi – Árido y Templado	Maleza Desértica, Montano Bajo	-	4000 - 4800

Per – Árido y Semi Cálido	Desierto Sub - Tropical	Tendencia a Maleza	4800 - divisoria
		Desértica Sub - Tropical	
		Maleza Desértica	
		Sub - Tropical	
		Desierto Sub - Tropical	

## 2.4 Cobertura Vegetal

En la cuenca del río Chancay-Huaral se pueden distinguir varios tipos de cobertura vegetal, cuya clasificación se presenta en la Figura 3. La clasificación se elaboró a partir de la información del estudio del Plan de Gestión de Riesgos y adaptación al Cambio Climático en el sector agrario PLANGRACC-A (2012).



**Figura 3.** Cobertura vegetal de la cuenca Chancay-Huaral.  
Fuente: Elaboración propia.

## 2.5 Suelos

La información de suelos obtenida del estudio realizado por la ONERN en 1969 nos brinda una idea generalizada de los suelos en toda la cuenca. A continuación se muestra los Grandes Grupos de Suelos (Tabla 2) y las clases de capacidad de uso dominantes (Tabla 3) dentro de cada asociación, a fin de señalar el potencial agropecuario general de cada una de ellas.

**Tabla 2.** Grupos de suelos.

Grupo de Suelos	Subdivisión	Capacidad de Uso	Extensión	Descripción
Formación Lítica		VIII	Dominante entre los 500 y los 2500 m.s.n.m., en donde aparecen fuertemente inter-asociados con los Litosoles Desérticos.	Exposiciones de roca viva o afloramiento rocoso y escombros o detritus pocos consolidados
Litosol (Lito suelos)	Litosol Desértico	VIII	Tapiza junto con la formación lítica, la porción inferior del flanco occidental andino desde los 300 – 500 m.s.n.m., comprendiendo los ramales y estribaciones más bajas de la cordillera Occidental, hasta los 2500 – 2800	Perfil (A)C con un horizonte A delgado, pálido (ócrico) y generalmente gravo pedroso, que descansa sobre roca consolidada o detritus rocosos. Bajo condiciones climáticas áridas no tiene

		m.s.n.m.	potencialidad agrícola.
	Litosol Andino	VIII	Se extiende desde los 2500 – 2800 m.s.n.m., con su límite inferior en contacto con los Litosoles Desérticos, hasta los 4500 – 4700 m.s.n.m., en donde se verifica su unión con las formaciones nivales o puramente líticas.
Regosol	Regosol Desértico (Irrigado)	III	Están distribuidos dentro del área agrícola del valle Chancay-Huaral
	Regosol Desértico (Seco)	III y IV	Constituyen los extensos depósitos eólicos en los cuales se incluyen las dunas (arenas secas)
Suelos Aluviales	Aluvial Irrigado	II y III	Se distribuyen, en su mayor extensión, dentro del área agrícola del Valle Chancay-Huaral.
	Aluvial Desértico	VIII	
Suelos Pardos		Buena Productividad una vez subsanada la condición árida mediante la irrigación permanente	Perfil (A)C con un horizonte A débilmente desarrollado, presentando espesores y contenido orgánico variable, y grada a un material mineral de rasgos morfológicos no diferenciados. Morfología estratificada formada por depósitos recientes de origen fluvial o marino. En ciertas áreas se producen Aluviales Salino o Halomórficos debido al mal drenaje en suelos Aluviales irrigados.
Suelos Castaños		Buena Productividad, siendo aptos para propósitos agrícolas intensivos y permanentes. Como permanecen secos durante una parte del año, requieren de riego complementario a fin de mantener producciones continuadas y elevar su eficiencia agrícola.	Perfil ABC con horizonte A pardo rojizo oscuro, granular y dotado de material orgánico, que descansa sobre un horizonte B argilúvico. Aquí se incluye los suelos Castaños Calcícos, caracterizados por presentar el calcáreo en todo el perfil, es decir encima del horizonte eólico.
Paramo Andino (Pramosol)		El potencial agrícola de este suelo es muy limitado, quedando relegado para sustentar una actividad pecuaria extensiva y temporal.	Perfil AC con un horizonte A oscuro y prominente, ácido y con materia orgánica. Es suelo franco arenoso a franco-gravoso ha desarrollado bajo condiciones climáticas frío-húmedas a sub-húmedas.

Fuente: (MINAG, 2002).

**Tabla 3.** Grupos de capacidad de uso.

Grupo	Características Generales
I - IV	Tierras arables y apropiadas para cultivos temporales, permanentes y ganadería. Las limitaciones e intensidades de práctica de manejo aumentan en grado de la clase I a la IV.
V - VI	Tierras arables apropiadas para cultivos permanentes, ganadería y forestales.
VII	Tierras con severas limitaciones apropiadas exclusivamente para pastoreo extensivo y forestal.
VIII	Tierras no apropiadas para fines agropecuarios ni forestales.

Fuente: (MINAG, 2002).

## 2.6 Geología

Desde el punto de vista geológico la cuenca del río Chancay-Huaral puede ser dividida en tres áreas: occidental, central y oriental; la primera y la última se encuentran



constituida principalmente por rocas sedimentarias, mientras que la central está conformada por rocas ígneas.

La presencia de recursos no renovables en el área del valle y en la cuenca alta de la cuenca Chancay-Huaral reviste considerable importancia especialmente en el campo de los minerales metálicos, debido al desarrollo de los centros mineros de Chungar y particularmente de Santander.

Los depósitos metálicos más importantes están ubicados en la cuenca alta en los lugares y zonas próximas a intrusiones ácidas; por lo general, estos depósitos han sido originados por metasomatismo de contacto y se presentan en forma de cuerpos irregulares y filones dentro de los sedimentos cretáceo (calizas) principalmente. La asociación mineralógica representativa de la cuenca alta es plomo, zinc, cobre, plata y fierro (CEPES, 1982)

## 2.7 Recursos Hídricos Superficiales

Según el estudio de PROFODUA (2005), la cuenca en su conjunto dispone de cuatro fuentes de abastecimiento:

- Las fuentes hídricas superficiales reguladas y no reguladas, es registrado en la Estación Hidrológica Santo. Domingo. Las fuentes hídricas reguladas, está conformado por 10 lagunas que corresponden a las unidades hidrográficas de Vichaycocha y Baños. Estas lagunas almacenan anualmente un volumen de 55 hm<sup>3</sup>, siendo la capacidad máxima estimada en 75 hm<sup>3</sup> que incluye los aportes de trasvase del sistema Puajanca (9 hm<sup>3</sup>), ubicado en la cuenca alta del río Mantaro.
- Las fuentes hídricas subterráneas, ubicada en la parte baja de la cuenca, se recargan a través del cauce del río, filtraciones en canales no revestidos y en mayor escala a través del riego mismo de las áreas de cultivo. La explotación para usos sectoriales es de 4 hm<sup>3</sup>/año, destinado al consumo doméstico 64%, riego 26% y pecuario 10%. Según la información actual (ANA, 2011a) se tiene como reservas racionalmente explotables 101,8 hm<sup>3</sup>/año y el uso de 3,209 pozos que representa 15,05 hm<sup>3</sup>/año.
- Las fuentes hídricas de recuperación, de vital importancia para el riego en estiaje está constituida por: aguas de retorno, de afloramientos naturales de agua subterránea-puquiales y agua subterránea recuperada por drenes a tajo abierto existentes a lo largo de la cuenca baja. Esta fuente permiten el riego del 31% (6,627 has) de la totalidad (21,330 has) de tierras irrigadas. Se estima que las aguas de recuperación producen un volumen anual del orden de los 122 hm<sup>3</sup>, que representan un caudal estimado en 3.6 m<sup>3</sup>/s.

Los usuarios agrícolas del valle Chancay-Huaral están organizados en 17 Comisiones de Regantes y estas a su vez se han constituido en la Junta de Usuarios responsables de la administración de la infraestructura mayor de riego (sistema de almacenamiento,

bocatomas y canales principales) y la Comisión de Regantes en la operación y mantenimiento de la infraestructura menor de riego (canales laterales y sublaterales).

De acuerdo a la disponibilidad de agua la modalidad de distribución es variable, en tal caso la Junta de Usuarios distribuye el agua bajo los siguientes criterios:

- i) En épocas de abundancia, la toma es libre, cuando la descarga registrada en la Estación Hidrológica Santo Domingo supera los  $18 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- ii) En épocas de estiaje, cuando el caudal medido se encuentra entre los  $18$  y  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , el agua se distribuye a través de coeficientes de repartos aplicado en cada bocatoma y que es elaborado por la Junta de Usuarios.
- iii) Si el caudal es inferior a  $10$  y mayor a  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  la asignación de agua se realiza por una determinada cantidad de horas (mita).
- iv) Y cuando el déficit de agua es menor a  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , se ejecutan las descargas desde el sistema de lagunas.

En la Figura 4, describe de manera esquemática el sistema hidráulico de la cuenca Chancay-Huaral. Se aprecia los cuatro subsistemas de lagunas, en la cual se detalla las capacidades de almacenamiento de cada laguna, además se muestran los ríos principales y la Estación Hidrológica Santo Domingo.

## 2.8 Demanda de Agua

En la zona intermedia y alta de la cuenca comprendida aguas arriba de la Estación Santo Domingo presenta dos tipos de demanda:

- Demanda de Uso No Consuntivo del Agua, que corresponde a la demanda hidroenergética que está conformado por el conjunto de Centrales

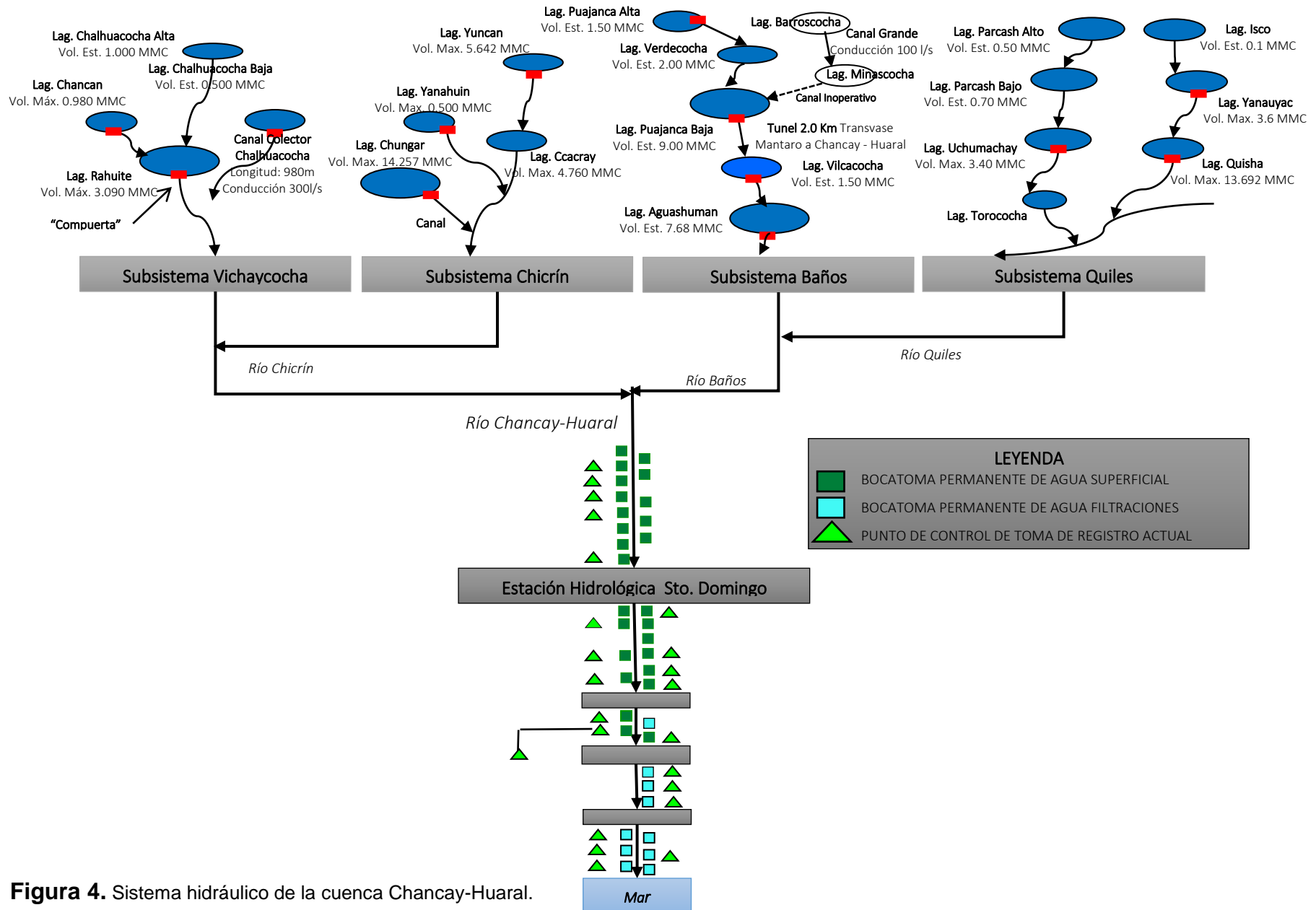


Figura 4. Sistema hidráulico de la cuenca Chancay-Huaral.

Hidroeléctricas en funcionamiento por ejemplo (Vichaycocha, Santa Catalina, Baños, Tingo, etc.). El manejo de este recurso es una de las primeras causas que provoca los cambios en el hidrograma de caudales del río Chancay – Huaral.

- Demanda de Uso Consuntivo del Agua, conformado por la actividad agrícola del tipo no intensiva, ya que la mayor parte de esta actividad se programan sus cultivos en época de lluvias. La actividad ganadera, donde el ganado vacuno consume el agua directamente de las fuentes. Y la población rural satisfacen sus necesidades de las fuentes de aguas presentes en sus cercanías. Esta población rural representa aproximadamente el 10% de la población Total asentada en la Cuenca, siendo la población urbana y rural de la Zona Baja del orden del 90% (MINAG, 2002).

La demanda hídrica total en la cuenca, está constituida principalmente por la demanda hídrica de riego en el valle y la poblacional. Según (PROFODUA, 2005), para una mejor distribución del agua, el área agrícola fue dividida en 46 Bloques de riego (21,332 ha / demanda 310 hm<sup>3</sup>). Sólo 35 Bloques de riego son abastecidos con agua superficial (16,432 ha / demanda 256 hm<sup>3</sup>) y las áreas restantes con otras fuentes. En la parte alta de la cuenca Chancay-Huaral, en donde el área bajo riego es de 3,713 ha, la demanda agrícola en las principales unidades hidrográficas requiere un volumen total de 38.10 hm<sup>3</sup> (ANA, 2011a)

La Figura 5 muestra las 17 comisiones de riego de la cuenca Chancay-Huaral, y los 46 Bloques de Riego en el valle. Los bloques de riego en color gris son las fuentes hídricas no superficiales.

COMISIONES DE REGANTES CULTIVOS	CÓDIGO DE BLOQUE	BLOQUES DE RIEGO	TOTAL (m <sup>3</sup> )	ÁREA BAJO RIEGO (ha)					
SAUME	1	PACARAOS	484,763	25	CUYO	24	LUMBRA CUYO	1,258,347	68
	2	SANTO DOMINGO	1,136,350	59		25		9,383,264	499
	3	QUIPULLIN	1,811,544	91		Subtotal		10,611,591	547
	4	SAUME	1,634,082	106	HUAYAN-HORNILLOS	26	HUAYAN-HORNILLOS-RIO	3,413,460	279
	Subtotal		5,365,739	281		27	HUAYANBAJO-FILTRACION Y RIO GALINDO	1,740,382	185
PALPA	5	PALPA-RIO	28,179,408	1,580		28		702,739	57
	6	ORCON	0	0		Subtotal		5,856,561	521
	Subtotal		26,179,408	1,580	HUANDO	29	MALACA HUANDO	124,558	9
CAQUI	7	CAQUI-RIO	7,268,560	393		30		26,167,843	1,394
	8	SECTOR 6	2,401,169	132		Subtotal		26,292,401	1,403
	9	PISQUILLO	782,998	46	LA ESPERANZA	31	LA ESPERANZA-RIO	47,481,904	3,482
	Subtotal		10,452,757	571		32	FILTRACIONES GRANADOS	200,078	15
SAN JOSE MIRAFLORES	10	MIRAFLORES-FILTRACION	4,313,915	428		Subtotal		47,682,042	3,497
	11	SAN JOSE-RIO	4,691,098	356	JESUS DEL VALLE-ESQUIVEL	33	JESUS DEL VALLE-RIO	22,411,919	1,493
	Subtotal		9,005,013	784		34	JESUS DEL VALLE-FILTRACIONES	8,150,966	518
BOZA AUCALLAMA	12	SAN JOSE AUCALLAMA	8,910,940	402		Subtotal		30,562,915	2,011
	13	BOZA ALTA	12,336,065	704	RETES-NATURALES	35	RETES-NATURALES-RIO	28,078,261	1,543
	14	BOZA BAJA	5,010,378	334		36	RETES-NATURALES-FILTRACION LAS DELICIAS	15,821,843	886
	Subtotal		24,257,383	1,440		37		1,948,738	88
PASAMAYO	15	PASAMAYO ALTO	3,618,006	273		Subtotal		45,548,843	2,517
	16	PASAMAYO BAJO	5,593,171	534	CHANCAY ALTO	38	CHANCAY ALTO-RIO	9,219,918	663
	17	MANGLAR	453,999	35		39	FILTRACION SANTA ROSA	787,203	50
	Subtotal		9,665,176	843		Subtotal		9,987,118	713
SAN MIGUEL	18	QUISQUE ALTO	536,467	27	CHANCAY BAJO	40	CHANCAY BAJO-RIO	15,065,448	1,216
	19	QUISQUE BAJO	630,027	25		41	CHANCAY BAJO-FILTRACION Y RIO	5,325,921	564
	20	CASCAJAL	1,355,418	69		42	CHANCAY BAJO-FILTRACION	2,883,105	207
	21	HUAMACHO	945,533	32		Subtotal		23,074,474	1,987
	22	PASABRONCANO ALTO	548,269	28	CHANCAYLLO	43	CHANCAYLLO	17,588,744	1,663
	Subtotal		3,985,453	197		Subtotal		17,588,744	1,663
					LAS SALINAS	44	SALINAS ALTO	2,151,783	183
						45	SALINAS MEDIO 1 Y 2	457,065	61
						46	SALINAS BAJO	1,518,520	149
						Subtotal		4,127,368	393
					DEMANDA HÍDRICA - AGUA SUPERFICIAL			255,181,481	16,839

Figura 5. Demanda hídrica del valle Chancay-Huaral.

Fuente: (ANA, 2002b).

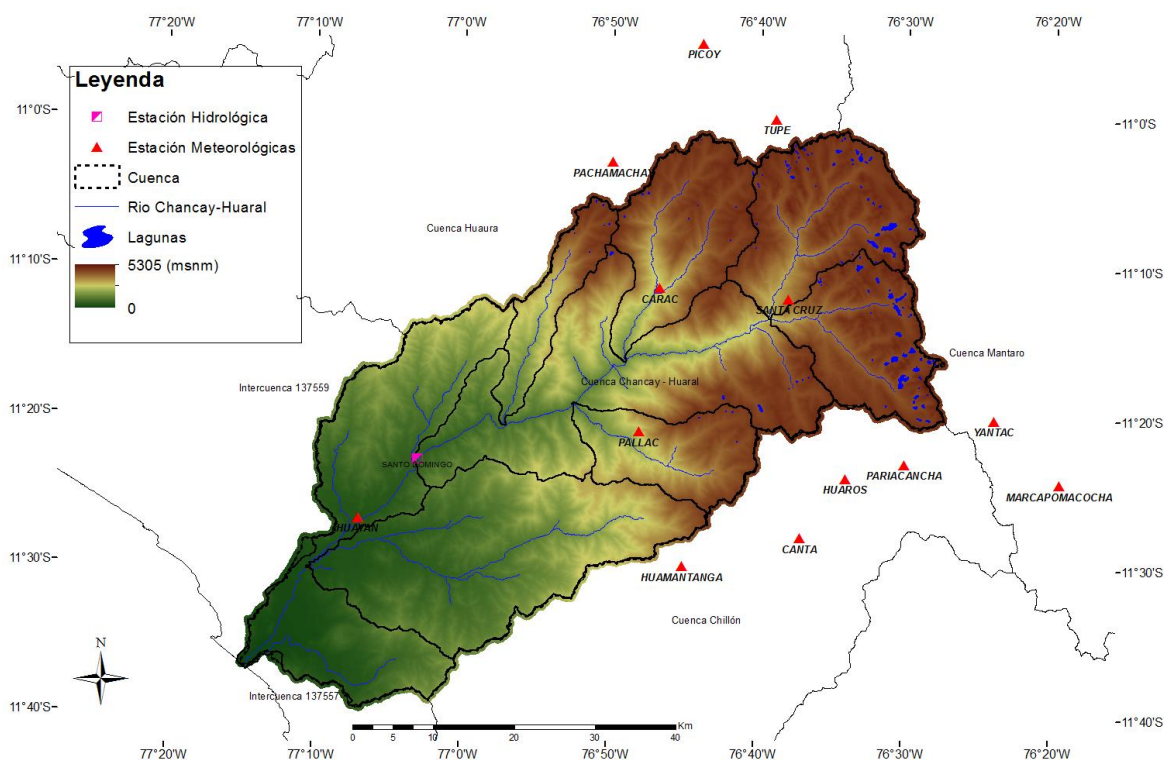
### III. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

Se trabajó con información hidrometeorológicas a escala mensual de la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y complementada con información de la Junta de Usuarios de Chancay-Huaral, Huaura y Chillón, para un periodo o registro de información de 1969 al 2010. La distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas se muestra en la Figura 6. La Tabla 4 muestra una descripción de las variables climática e hidrométrica utilizada en la zona en estudio.

**Tabla 4.** Descripción de las estaciones hidrometeorológicas.

N°	Cuenca	Estación	Variable	Latitud	Longitud	Elevación (m)
1		Pachamachay	Pr, Tm	11°11'00" S	76°47'00" O	4200
2	Huaura	Tupe	Pr	11°00'00" S	76°39'00" O	4450
3		Picoy	Tm, Hr, Vv	10°56'00" S	76°44'00" O	2990
4		Huayán	Pr, Hr, Vv	11°27'01" S	77°07'01" O	350
5	Chancay-	Carac	Pr	11°11'00" S	76°47'00" O	2600
6	Huaral	Pallac	Pr	11°21'01" S	76°48'01" O	2386
7		Santa Cruz	Pr	11°12'01" S	76°38'01" O	3590
8		Santo Domingo	Descarga	11°23'01" S	77°03'01" O	564
9		Huaros	Pr	11°24'00" S	76°34'00" O	3585
10		Pariacancha	Pr	11°23'00" S	76°30'00" O	3800
11	Chillón	Huamantanga	Pr	11°30'00" S	76°45'00" O	3392
12		Canta	Tm, Hr, Vv	11°28'00" S	76°37'00" O	2832
13	Mantaro	Yantac	Pr	11°20'00" S	76°24'00" O	4600
14		Marcapomacocha	Tm	11°20'00" S	76°24'00" O	4479

Pr: precipitación total mensual (mm). Tm: temperatura media mensual (°C). Hr: humedad relativa (%). Vv: velocidad media de viento (m/s).



**Figura 6.** Red de estaciones Hidrometeorológicas utilizadas en la cuenca Chancay-Huaral.

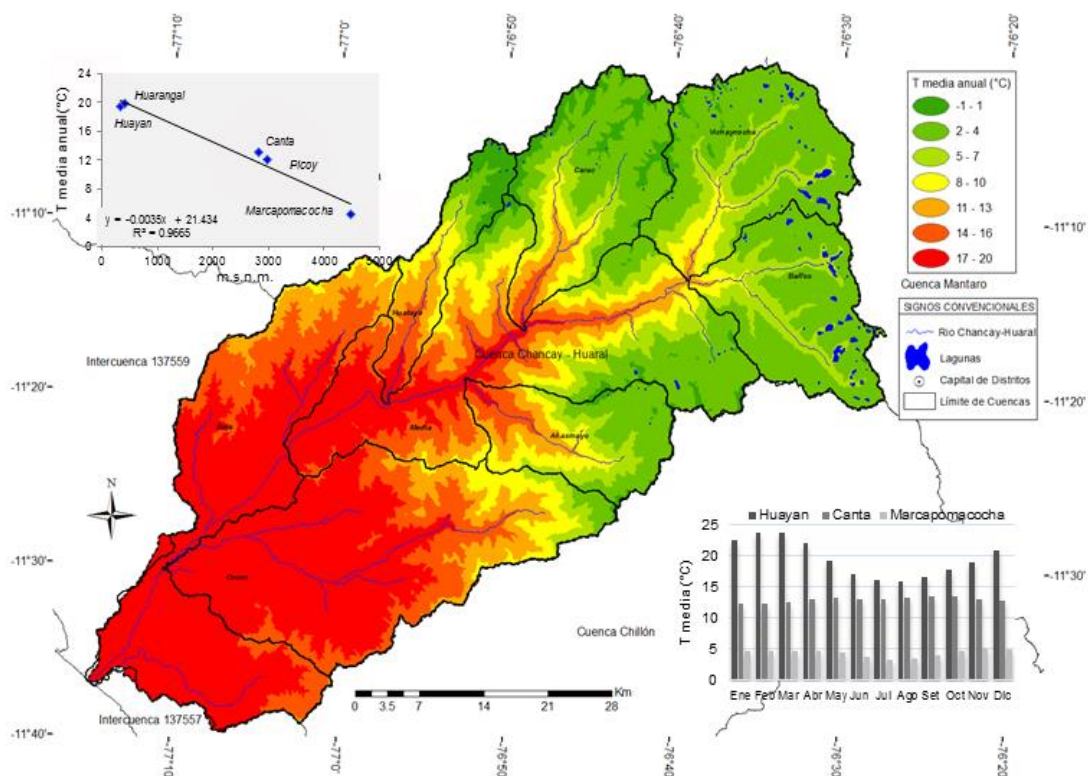
Fuente: Elaboración propia.

Para el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Chancay-Huaral se utilizaron como variables de entradas, la precipitación total mensual, la temperatura media, la humedad relativa y la velocidad del viento. La cuenca hidrográfica presenta una regular cobertura de estaciones pluviométricas, pero una baja densidad de estaciones climáticas, presentando una insuficiente información tanto temporal como espacial. En estos casos la temperatura media, fue complementada con información de las cuencas vecinas. Para el caso de la variable humedad relativa y velocidad de viento como entrada al modelo, se utilizó solo la media mensual.

### 3.1 Temperatura media mensual

La variación de la temperatura media multianual de la cuenca Chancay-Huaral oscila de  $-1^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  (Figura 7). Generada a partir de la estación climatológica Huayán y las estaciones climatológicas vecinas Huarangal, Canta, Picoy y Marcapomacocha, la cual permitió calcular el gradiente térmico (cuadro izquierdo de la cuenca).

Una mayor variabilidad de la temperatura media en la cuenca es registrada en la estación climatológica de Huayán y Huarangal, ubicadas en la parte baja de la cuenca Chancay-Huaral y Huaura, con descensos en el mes de abril e incrementos en el mes de setiembre. Las demás estaciones ubicadas en la parte media y alta de la cuenca, presentan poca variabilidad en sus registros medios (cuadro derecho de la cuenca).

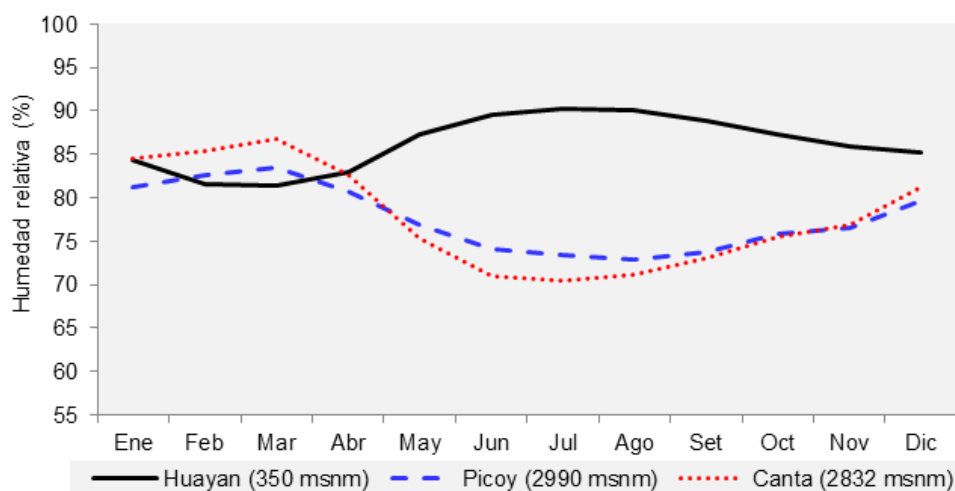


**Figura 7.** Espacialización, relación altitud vs temperatura media multianual y régimen térmico de la cuenca Chancay-Huaral.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Humedad relativa media mensual

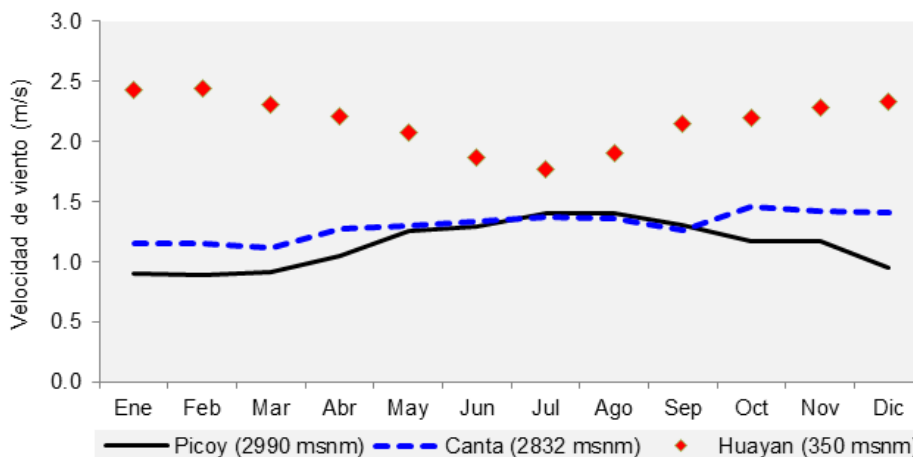
Las estaciones Climatológicas vecinas Picoy y Canta (Figura 8), ubicadas sobre los 2500 msnm., nos da una referencia que existe una mayor humedad relativa en meses húmedos (85%), y en los meses secos la humedad relativa es menor, lo que es característicos de la zona sierra (alrededor del 72%); todo lo contrario ocurre en la estación Climatológica Huayán, que tiene características de costa. Para el caso de la humedad relativa en el modelo hidrológico, se consideró solo el régimen mensual histórico.



**Figura 8.** Humedad relativa media mensual de las estaciones climatológicas utilizadas.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 velocidad de viento media mensual

Las estaciones Climatológicas Picoy y Canta (Figura 9), muestran que la velocidad del viento aumenta de marzo a agosto, y en la estación Huayán los registros indican que la velocidad del viento asciende de julio a febrero. Para el caso de esta variable en el modelo hidrológico, se consideró solo régimen mensual histórico.



**Figura 9.** Velocidad del viento media mensual de las estaciones climatológicas utilizadas.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Precipitación

Para la confiabilidad de la información, se utilizó el método de vector regional de índices pluviométricos MVR, que es parte del programa de paquete HYDRACCESS la cual te permite realizar una crítica de datos, homogenización y completación de la serie (anual y mensual).

Se formaron dos grupos de estaciones pluviométricas, agrupadas mediante el criterio de estaciones vecinas para analizar el periodo 1969-2010.

- Grupo I: Conformado por las estaciones Huaros, Huamantanga, Pariacancha y Yantac.
- Grupo II: Conformada por las estaciones de Picoy, Tupe, Pachamachay, Carac, Pallac, Santa Cruz y Pirca.

El análisis gráfico y estadístico para las estaciones del grupo II, indican que las estaciones Pirca y Picoy presentaron periodos no homogéneos y la doble masa de índices acumulados no presentaba linealidad, excluyéndose las estaciones del grupo.

El nuevo análisis de las estaciones del grupo I y II presentaron similar variabilidad y con índices pluviométricos dentro los límites de confianza teniendo como resultado general para este primer análisis grafico aceptable.

Los resultados de la crítica de datos de ambos grupos I y II se muestran en la tabla 5. Dicha tabla evalúa los resultados con los parámetros más importantes; la desviación estándar de los desvíos (DED) y la correlación (R). En el grupo I, la estación Yantac presento una correlación de 0.6, estación que no fue descartada del grupo, ya que a pesar de presentar índices fuera de los límites de confianza, mantienen la variabilidad del grupo. Para el grupo II, presentó una DED y R en promedio, de 0.17 y 0.83, resultados que testifican la confiabilidad de la información.

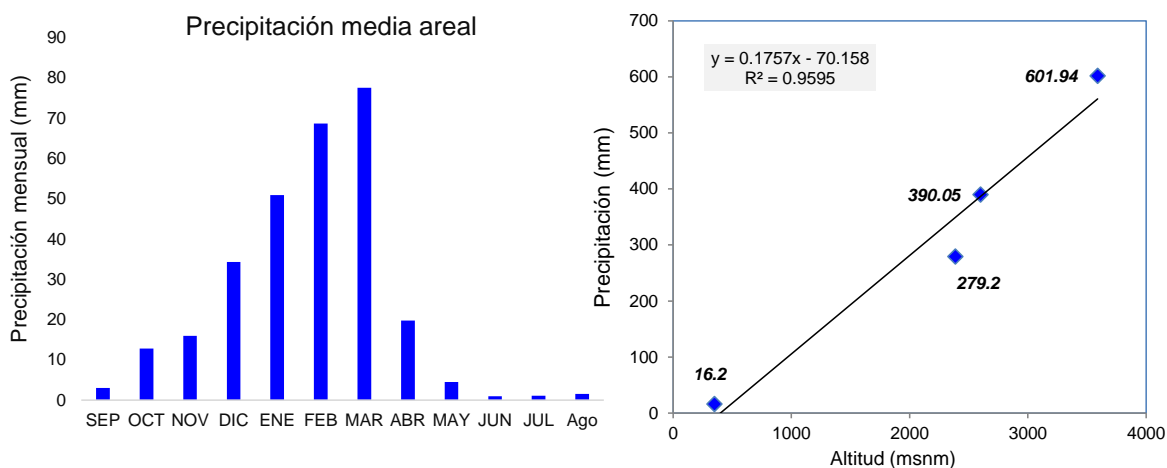
Grupo	Estación	D.E. Desvíos	Correlación/Vector
I	Huaros	0.215	0.901
	Pariacancha	0.143	0.833
	Huamantanga	0.232	0.783
	Yantac	0.261	0.561
II	Sta. Cruz	0.179	0.773
	Carac	0.103	0.918
	Pallac	0.201	0.889
	Tupe	0.156	0.763
	Pachamachay	0.231	0.807

**Tabla 5.** Críticas de datos.  
Fuente: Elaboración propia.

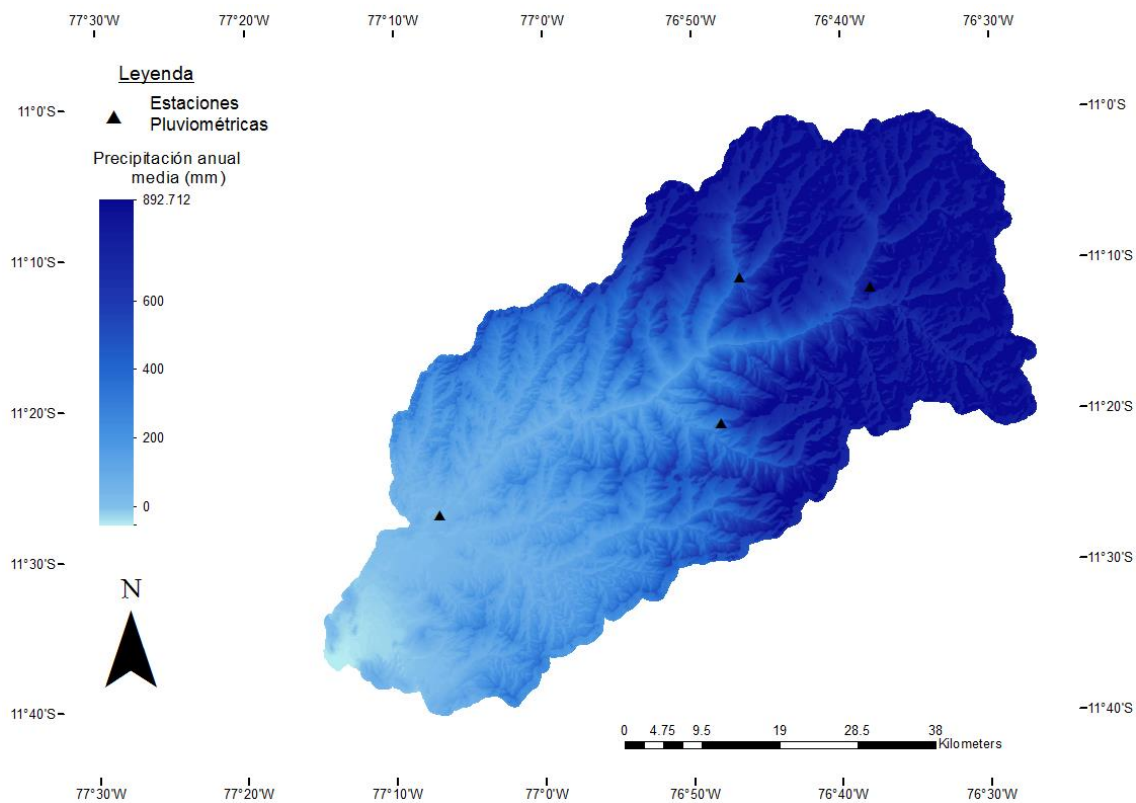


Las gráficas de los resultados del análisis por Hydraccess se muestran en (ANEXO VIII).

La Figura 10 muestra el régimen y análisis de gradiente pluviométrico que ha permitido establecer la variación de la precipitación con la altura como se muestra en la Figura 11. El mayor aporte de precipitación sobre la cuenca se presenta mayormente en el mes de marzo alrededor de los 80mm y aportes casi nulo en los meses de julio y junio.



**Figura 10.** Régimen medio y gradiente altitudinal de la precipitación multianual sobre la cuenca del río Chancay–Huaral.



**Figura 11.** Distribución espacial de la precipitación pluviométrica media multianual sobre la cuenca del río Chancay–Huaral.

### 3.5 Análisis de las descargas media mensual

Los caudales registrados en la estación hidrométrica Santo Domingo no pertenecen a un régimen natural, porque considera las descargas del sistema de lagunas ubicadas en las nacientes de las subcuencas de Vichaycocha y Baños. Bajo este contexto, la restitución de caudales a régimen natural es dificultoso, debido a la escasa información de registros de volúmenes de descargas de estas lagunas. En consecuencia para verificar la confiabilidad de la serie histórica de caudales se utilizó el MVR en base a 3 estaciones hidrométricas; Santo Domingo – cuenca Chancay-Huaral, Obrajillo - cuenca Chillón y Alco Sayán – cuenca Huaura.

El análisis visual muestra una similar variabilidad entre los índices de las estaciones hidrométricas y un comportamiento casi lineal respecto al índice acumulado del vector regional (Anexo VIII), presentando resultados aceptables, que son justificados en la crítica de datos (Tabla 6). Dicha tabla muestran que la estación hidrométrica Sto. Domingo presentó un valor de (0.136) en la desviación standard de los desvíos

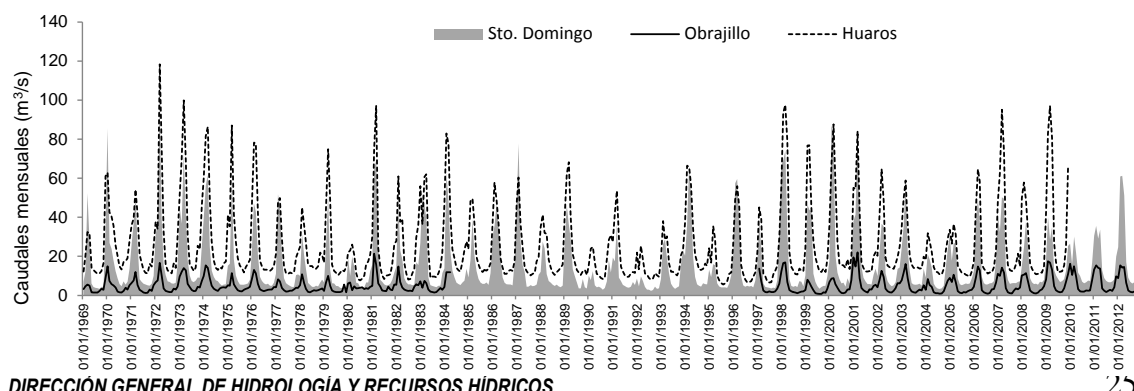
Estación	D.E. Desvíos	Correlación/Vector
Alco-Sayán	0.091	0.901
Obrajillo	0.131	0.848
Santo Domingo	0.136	0.907

(D.E.D) y una correlación de (0.907) con respecto al vector, resultados aceptables siendo estos dos parámetros de análisis lo más importantes.

**Tabla 6.** Críticas de datos.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 12 muestra la comparación de las series de caudales mensuales de las estaciones hidrométricas. Respecto a la ciclicidad de los fenómenos de estiaje y avenidas de caudales medios mensuales ocurridos en la cuenca del río Chancay-Huaral, estos se relacionan en mayor parte a los presentados en la cuenca del río Huaura y Chillón, dando una mayor fiabilidad de la información respectos a los cambios de eventos estacionales.



**Figura 12.** Comparación de los hidrogramas de los ríos Huaura, Chancay-Huara y Chillón.  
Fuente: Elaboración propia.

## IV. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló en 3 etapas:

### 4.1. ETAPA I: Modelamiento hidrológico - WEAP

La primera etapa comprende la selección e implementación de un modelo hidrológico de gestión que esté en función al objetivo del estudio. En tal caso se seleccionó el modelo hidrológico WEAP por las siguientes características: es una herramienta de acceso y uso libre, en la simulación hidrológica el modelo WEAP puede incluir las demandas de agua, al ser un modelo semi-distribuido te permite generar escurrimiento en puntos de interés hídrico y además es una herramienta muy utilizada en lo que respecta a analizar escenarios climáticos.

Para la zona de estudio se planteó la información hidroclimática a paso de tiempo mensual enfocado en las proyecciones de escenarios de balance de agua. El modelo incluye 4 métodos para simular los procesos internos de una cuenca, seleccionándose el de humedad de suelo o "Soil Moisture Model" (Figura 13), este método simula los procesos hidrológicos que ocurre en cada "catchment" (elemento aportante en la cuenca), el cual requiere datos de entrada como precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento de nieve, latitud y cobertura vegetal, de esta manera se estima los componentes de balance hidrológico, como evapotranspiración, infiltración, escurrimiento superficial, sub-superficial y flujo base (Escobar et al., 2013). Las ecuaciones que describen el balance de masas en cada catchment según Yates et al., (2005) son las siguientes:

$$Sw_j (dz_{1,j}/dt) = Pe(t) + I_r(t) - PET(t)k_{c,j}(t)((5Z_{1,j} - 2Z_{1,j}^2)/3) - (Pe(t) + I_r)Z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_s Z_{1,j} - (1-f_j)k_s Z_{1,j}^2$$

$$Dw_j (dz_{2,j}/dt) = -K_c Z_{2,j}^2 + (1-f_j)k_s Z_{1,j}^2$$

Dónde:

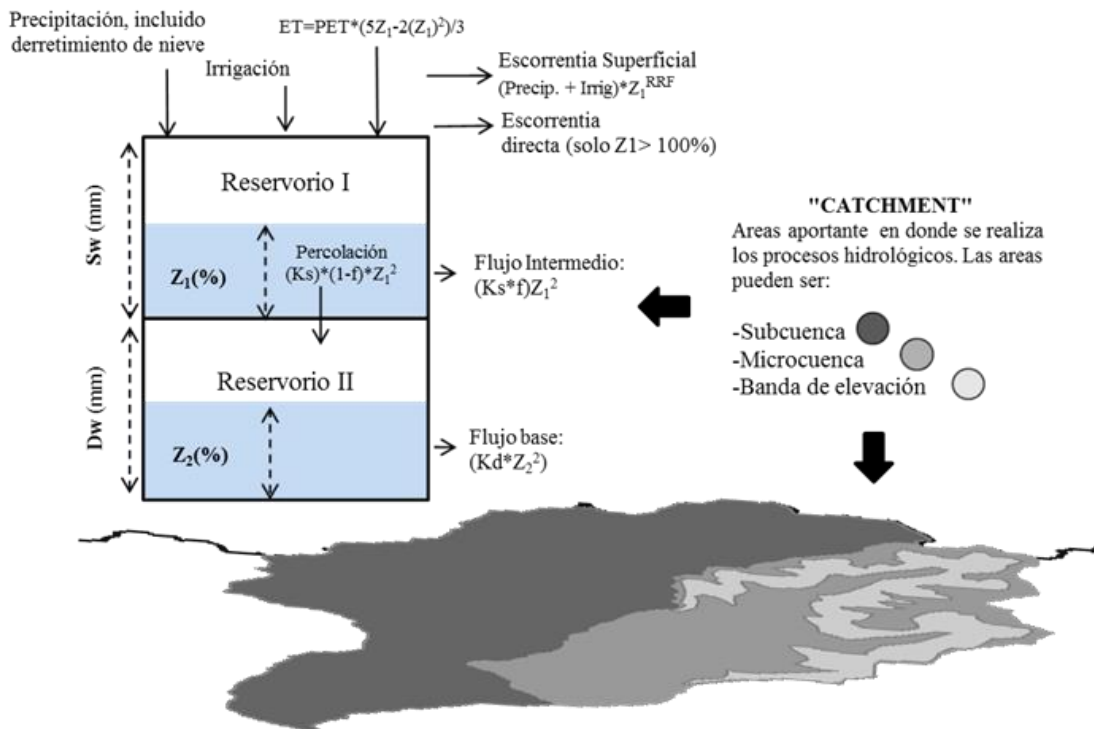
<b>Z<sub>1</sub></b>	Agua almacenada en la zona de raíces, con respecto a su capacidad total de almacenamiento	[%].
<b>Z<sub>2</sub></b>	Agua almacenada en la zona profunda, con respecto a su capacidad total de almacenamiento	[%].
<b>P<sub>e</sub>(t)</b>	Serie de tiempo de precipitación y derretimiento de nieve en la unidad de análisis	[mm/mes o mm/día].
<b>I<sub>r</sub>(t)</b>	Serie de tiempo de irrigación en la unidad de análisis	[mm/mes o mm/día].
<b>PET(t)</b>	Evapotranspiración potencial, calculada mediante la ecuación de Penman Monteith	[mm/mes o mm/día].
<b>S<sub>w</sub></b>	Capacidad total de almacenamiento de agua en la zona de raíces	(mm).
<b>D<sub>w</sub></b>	Capacidad total de almacenamiento de la zona profunda	(mm).
<b>RRF<sub>j</sub></b>	Factor de resistencia a la escurrimiento.	-
<b>K<sub>c</sub></b>	Coefficiente de cultivo.	-
<b>f<sub>j</sub></b>	Dirección del flujo.	-

$K_s$  Conductividad de la zona de raíces

[mm/mes o mm/día].

$K_d$  Conductividad de la zona profunda

[mm/mes o mm/día].



**Figura 13.** Esquema del método humedad del suelo de dos reservorios (izquierda), mostrando las variables de entrada y salida en el proceso hidrológico. "Catchment" elemento aportante cuyo grado de caracterización puede ser detallado o grueso dependiendo del objetivo y la información con que se cuenta.

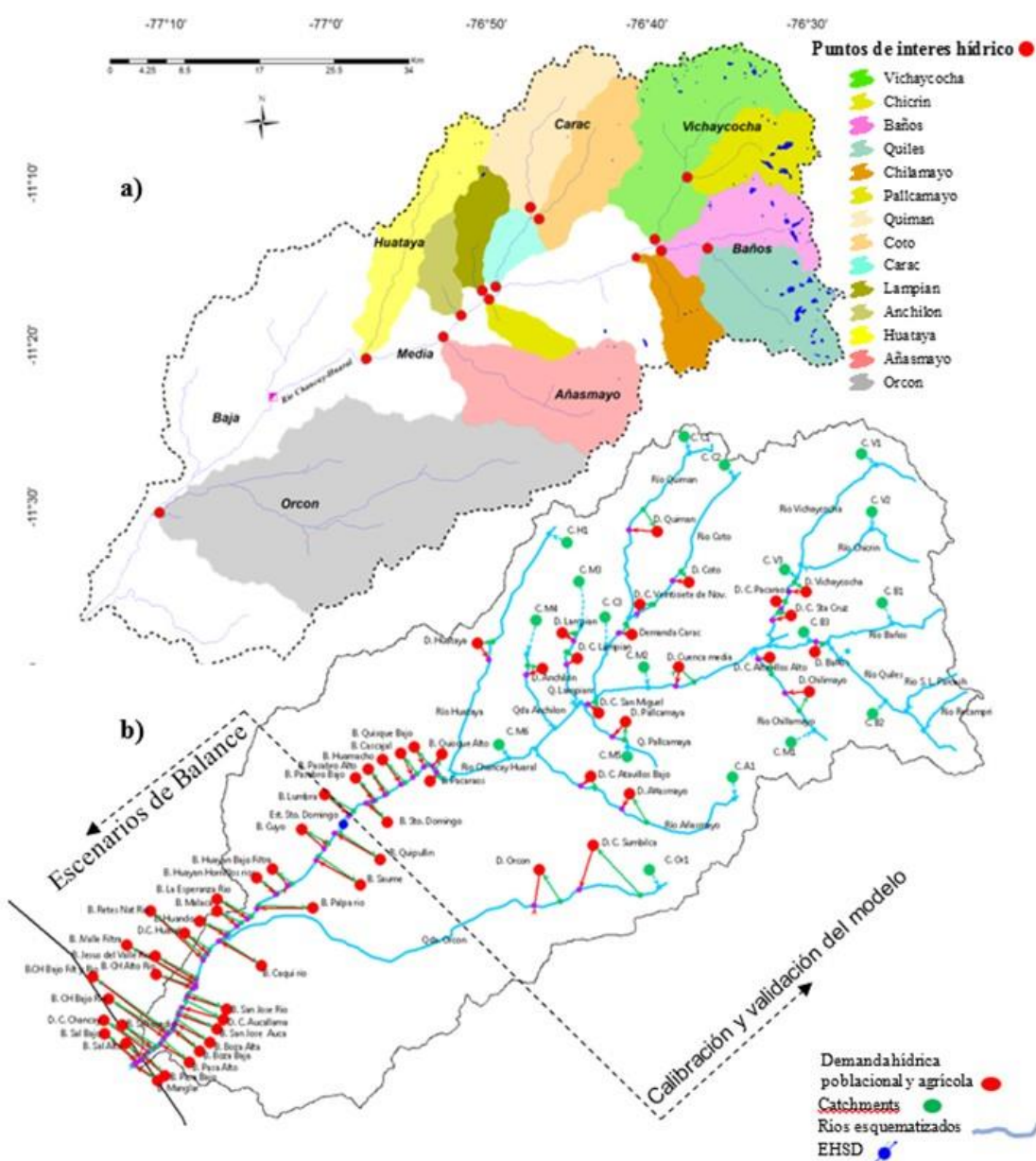
#### 4.1.1. Esquemmatización del modelo WEAP

El modelo WEAP permite representar en forma semi-distribuida los procesos hidrológicos que ocurren en los tributarios del cauce principal y en base a puntos de interés hídrico se identificaron 13 tributarios ubicados aguas arriba de la Estación Hidrológica Santo Domingo - **EHSD** donde se calibró el modelo y un tributario aguas abajo de esta estación (Figura 14a).

La delimitación de la cuenca en tributarios y elementos aportantes (catchment) se realizó mediante la herramienta ArcGIS, obteniendo 17 elementos aportantes, delimitados sobre los 2000 msnm. La información climática (precipitación, lluvia, humedad relativa y viento) en las áreas aportantes, fue generada mediante el método de interpolación Kriging que está incorporado en software Hydraccess (Vauchel, 2005). Para la velocidad del viento, al no disponer de una información amplia y distribuida, se utilizó solo los promedios mensuales. De esta manera cada catchment dispone de datos climáticos interpolados y cobertura vegetal procesado de la información temática elaborada por el Plan Nacional de Gestión de Riesgo y Adaptación a los Efectos Adversos del Cambio Climático en el Sector Agrario - PLANGRACC; y para facilitar la calibración del modelo, se definieron 5 tipos de cobertura vegetal en la cuenca; césped de puna (25%),

tierras alto andinas sin vegetación (4%), bofedal/lagunas (1%), matorrales (29%) y planicies costeras (41%), estimando así las componentes del balance hidrológico y consecuentemente la oferta hídrica.

El área aportante a los reservorios fue excluida de la calibración debido a la falta de información del sistema de lagunas reguladas. La información de demanda agrícola y poblacional enunciada en el capítulo III se incluyó en el modelo. Se consideró el nivel de actividad de demanda de agua mensual, así como el volumen de agua que sale del área de cultivo después de la aplicación del agua de riego (flujo de retorno) considerado el 30% en sistemas de riego y 30% en las ciudades de la zona media alta de la cuenca. Finalmente la esquematización de la cuenca Chancay-Huaral en el modelo WEAP se muestra en la (Figura 14b).



**Figura 14.** a) Representa la delimitación de la cuenca en puntos de interés hídricos. b) Esquematación de la cuenca Chancay-Huaral en el modelo WEAP.

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

La calibración del modelo WEAP, cuyo límite de área en donde se realiza los procesos hidrológicos, comprenden desde su origen hasta la Estación Hidrológico Santo Domingo (Figura 14a). La falta de información del sistema de lagunas reguladas no permite naturalizar el caudal, entonces el criterio utilizado para la calibración del modelo fue utilizar el periodo menos perturbado por acciones antrópicas (reservorios y centrales hidroeléctricas) en la Estación Hidrológica siendo el periodo utilizado de 1969 a 1978.

La validación se analizó bajo dos periodos, uno corto de 1979 a 1988 para evaluar la fiabilidad del modelo y de 1979 a 2012 para comprobar a través de test estadísticos si dicha fiabilidad se mantiene ante los cambios antrópicos actuales. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo WEAP, se aplicaron los siguientes índices: el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970), que es un indicador del rendimiento del modelo, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que es una medida de relación entre los valores observados y simulados, y el porcentaje de error (PBIAS), que es la desviación del caudal simulado respecto al observado expresado en porcentaje, cuyas expresiones y rangos de se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Criterios para evaluar la calibración y validación del modelo.

Criterio	Expresión	Rangos	Referencia
(PBIAS)	$= \left[ \frac{\sum_i^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_i^n (Y_i^{obs})} \right] * 100$	Muy buenos: < 10% Bueno: 10 – 15% Satisfactorio: 15 – 25% No Satisfactorio: > 25%	
(Nash)	$= 1 - \left[ \frac{\sum_i^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_i^n (Y_i^{obs} - Y_{obs-media})^2} \right]$	Muy bueno: 0.75 – 1.00 Bueno: 0.65 – 0.75 Satisfactorio: 0.50 – 0.65 No satisfactorio: < 0.50	Moriassi et al., 2007
$R^2$	$= \left\{ \frac{\sum_i^n (Y_i^{obs} - Y_{obs-media})(Y_i^{sim} - Y_{sim-media})}{\sqrt{\sum_i^n (Y_i^{obs} - Y_{obs-media})^2} \sqrt{\sum_i^n (Y_i^{sim} - Y_{sim-media})^2}} \right\}$	0 a 1	

Nash = eficiencia Nash-Sutcliffe, PBIAS = porcentaje de error y  $R^2$  = coeficiente de determinación.

#### 4.1.3. Análisis de sensibilidad del modelo WEAP

“El análisis de sensibilidad del modelo mide cuanto pueden llegar a afectar a los resultados de un modelo variaciones relativamente pequeñas en los valores de los parámetros”. Este análisis permite definir la importancia de cada parámetro y detectar si el modelo está sobre parametrizado, es decir si existen parámetros a los que el modelo resulta insensible (Mena, 2010).

El análisis de sensibilidad del modelo hidrológico consistió en la modificación de los parámetros, variando en ( $\pm 10$ ) por ciento de su valor, en respuesta a su

eficiencia (Nash), manteniendo el otro parámetro fijo y viceversa. Con la finalidad de ver la respuesta a la variación porcentual ( $\Delta\%$ ) que sufren los caudales medio mensuales simulados, identificando qué parámetros tienen mayor influencia en los resultados del modelo.

## 4.2. ETAPA II: Escenarios climáticos globales

La generación de escenarios climáticos, se realizó utilizando las salidas de los MCG disponibles del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados - fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés). Los MCG simularon escenarios para diferentes tipos de forzamiento de radiación futura de 2.5 a 8.5 Watts/m<sup>2</sup> (RCP2.5, RP4.5, RCP6.0 y RCP8.5).

En esta etapa se analizaron 31 MCG (Tabla 8) para los escenarios de forzamiento radioactivo RCP4.5 y RCP8.5, de la cual se seleccionó el o los modelos a ser utilizados en la modelización de escenarios hídricos en la cuenca Chancay–Huaral.

**Tabla 8.** Lista de los diferentes modelos climáticos globales.

Nº	Símbolo	MCG	Resolución	Institución
1	A	ACCESS1-0	1.875 x 1.25	Common wealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia
2	B	ACCESS1-3	1.875 x 1.25	
3	C	BCC-CSM1-1	2.800 x 1.40	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
4	CH	CCSM4	1.250 x 0.94	National Center for Atmospheric Research NCAR
5	D	CESM1-BGC	1.250 x 0.94	Community Earth System Model Contributors
6	E	CESM1-CAM5	1.250 x 0.94	
7	F	CMCC-CMS	1.875 x 1.85	Centro Euro-Mediterráneo per I Cambiamenti Climatici
8	G	CMCC-CM	0.750 x 0.75	
9	H	CNRM-CM5	1.250 x 0.94	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique
10	I	CSIRO-Mk3-6-0	1.875 x 1.87	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia)
11	J	CanESM2	2.812 x 2.79	CCCMA
12	K	EC-EARTH	2.812 x 1.66	EC-EARTH consortium
13	L	GFDL-CM3	2.500 x 2.00	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
14	LL	GFDL-ESM2G	2.500 x 2.02	
15	M	GFDL-ESM2M	2.500 x 2.02	
16	N	GISS-E2-H	2.500 x 2.00	NASA Goddard Institute for Space Studies
17	Ñ	GISS-E2-R	2.500 x 2.00	
18	O	HadGEM2-AO	1.875 x 1.25	Met Office Hadley Centre
19	P	HadGEM2-CC	1.875 x 1.25	
20	Q	HadGEM2-ES	1.875 x 1.25	
21	R	inmcm4	2.000 x 1.50	Institute for Numerical Mathematics
22	S	IPSL-CM5A-LR	3.750 x 2.00	Institut Pierre-Simon Laplace
23	T	IPSL-CM5A-MR	2.500 x 1.27	
24	W	IPSL-CM5B-LR	3.750 x 1.90	
25	X	MIROC-ESM-CHEM	2.812 x 2.78	Japan Agency for Marine-Earth Science and Institute (The University of Tokyo), and National Technology, Atmosphere and Ocean
26	Y	MIROC-ESM	2.812 x 2.78	
27	Z	MIROC5	1.400 x 1.40	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
28	AA	MPI-ESM-LR	1.875 x 1.87	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
29	CC	MPI-ESM-MR	1.875 x 1.87	

30	DD	MRI-CGCM3	1.125 x 1.12	Meteorological Research Institute
31	FF	NorESM1-M	2.500 x 1.90	Norwegian Climate Centre

La metodología se basó en seleccionar de un conjunto de 31 MCG, los modelos que mejor represente el clima actual (1981-2010) sobre el área de estudio. Para la selección del modelo se analizó la precipitación mensual, por ser una variable muy marcada estacionalmente a comparación de la temperatura. Para la selección del modelo se tomó en cuenta los siguientes pasos:

1. Según (De Castro, 2007), para que un modelo se considere fiable como herramienta de análisis debe al menos poder simular aproximadamente, el ciclo anual promedio del clima. En este caso se comparó la precipitación mensual de los MCG y la precipitación areal observados mediante el coeficiente de correlación (R).
2. La segunda evaluación corresponde al volumen o magnitud de la información de los MCG, ya que dicha información puede sub o sobre estimar al observado en un amplio rango de magnitud. En este caso se seleccionó los modelos que presenten el menor sesgo entre el régimen anual del modelo y observado.
3. El tercer paso consideró solo los modelos que presenten una mayor resolución espacial, esto permite dar una mayor confiabilidad en la información con que se trabaja.
4. En esta primera selección de modelos, el siguiente paso es corregir el error sistemático del modelo de la precipitación y temperatura para el periodo de control (1981-2010). Para ello se utilizó el método “quantile mapping using smoothing” a las variables climáticas cuya descripción y procedimiento se detalla en (Jouni Räisänen & Olle Räty, 2012).
5. Finalmente los escenarios de precipitación y temperatura corregidos para el periodo de control (1981-2010), son ingresados al modelo WEAP. De esta manera se obtienen la serie de caudales de cada modelo, que luego es comparado con la serie de caudales simulada, mediante el indicador de (Nash). Este último paso permite nuevamente seleccionar al MCG para el estudio.

#### 4.3. ETAPA III: Escenarios hídricos

En esta etapa se generaron las proyecciones hídricas (2021 – 2050). Para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Para ello se evaluaron los siguientes ítems:

- Análisis del ciclo anual medio y estacional de las variables de precipitación y temperatura para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.
- Análisis del ciclo anual medio de caudal para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.
- Analizar el balance hídrico al 75% de persistencia (horizonte 2021-2050).



## V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### ETAPA I:

#### Calibración y validación

La eficiencia en la simulación de caudales en el proceso de calibración, está directamente relacionada con los parámetros que intervienen en *Soil Moisture Model* del WEAP y a las características hidrológicas de la cuenca. Así, se realizaron ajustes a los parámetros del modelo WEAP como la Conductividad en la Zona de Raíces (Ks) y el Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRF) en el área de estudio, y tomando en cuenta la hipótesis descrita en Escobar (2013), se consideró para el parámetro Ks menor conductividad en la época seca (150 mm/mes) y mayor conductividad en la época húmeda (600 mm/mes), conociendo que el año hidrológico en Perú inicia en setiembre y la cuenca se encuentra muy seco por lo tanto no se produce escurrimiento directamente si no cuando el suelo se encuentre lo suficientemente saturado y para el parámetro RRF se consideró en estiaje un RRF igual a 5 y en la época húmeda un RRF igual a 1.4. Los restantes parámetros se determinaron manualmente y se muestra en la Tabla 9.

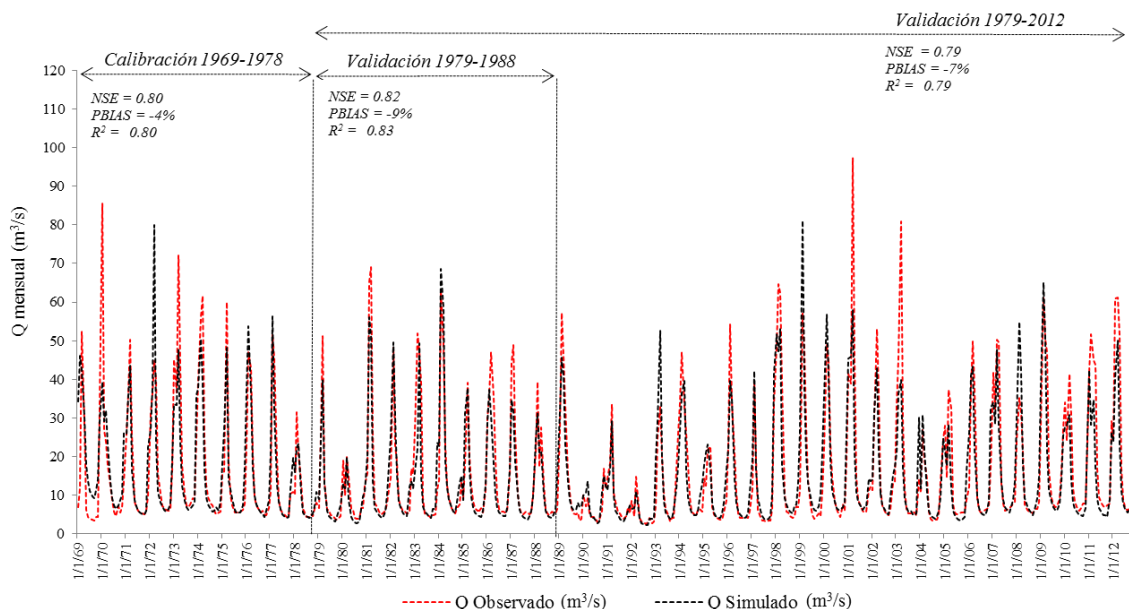
**Tabla 9.** Parámetros principales de la calibración de la Cuenca Chancay-Huaral.

<i>Parámetros principales</i>	<i>Vegetación dispersa</i>	<i>Unidad</i>
Kc	0.7	-
Sw	200	(mm)
Dw	800	(mm)
RRF	5, 1.4	-
Ks	600,150	(mm, mes)
Kd	150	(mm, mes)
f	0.5	-
Z <sub>1</sub>	50	(%)
Z <sub>2</sub>	50	(%)

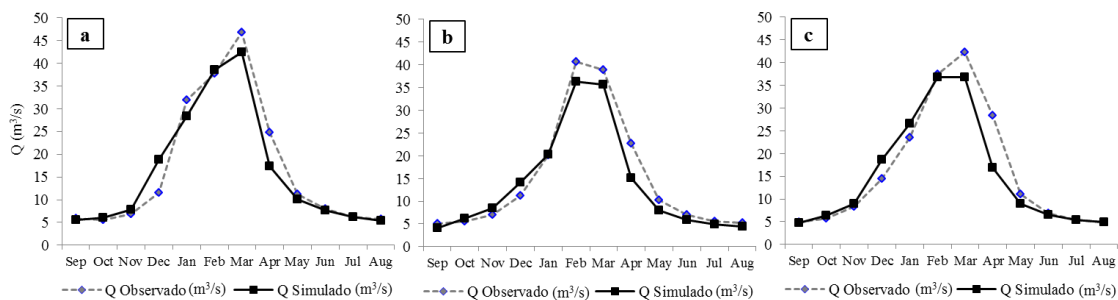
Encontrado el conjunto de parámetros óptimos, gráficamente los resultados muestran una simulación aceptable entre los datos observados y simulados por el modelo y estadísticamente indican un buen ajuste en la eficiencia predictiva del modelo (Figura 15). Para el periodo de calibración considerado diez años, se obtuvo valores de Nash de 0.8 y R<sup>2</sup> de 0.80, indicando la capacidad del modelo de representar adecuadamente las condiciones hidrológicas en la cuenca, dando solidez al criterio utilizado en la calibración para una cuenca no naturalizada.

Para el caso de los dos periodos de validación (1979-1988 y 1979-2012), estos simularon satisfactoriamente los eventos secos y húmedos observados y presentaron estadísticamente resultados cercanos en sus análisis con Nash de 0.82 y 0.79 y, R<sup>2</sup> de 0.83 y 0.79, corroborando que los cambios antrópicos desarrollados en la cuenca para dicho periodo no es significativo. Los resultados de PBIAS del modelo varían de -

9% a -4% la cual indican errores en la simulación hídrica, esto es debido a que el modelo tiende a subestimar al caudal observado como se observa en la Figura 16 donde los caudales medio mensuales simulados subestiman al observado en el periodo húmedo tanto en la calibración como en la validación. Sin embargo, dichos resultados del PBIAS se encuentran dentro del rango óptimo de criterios de evaluación (Tabla 7) lo que sugiere un buen rendimiento del modelo.



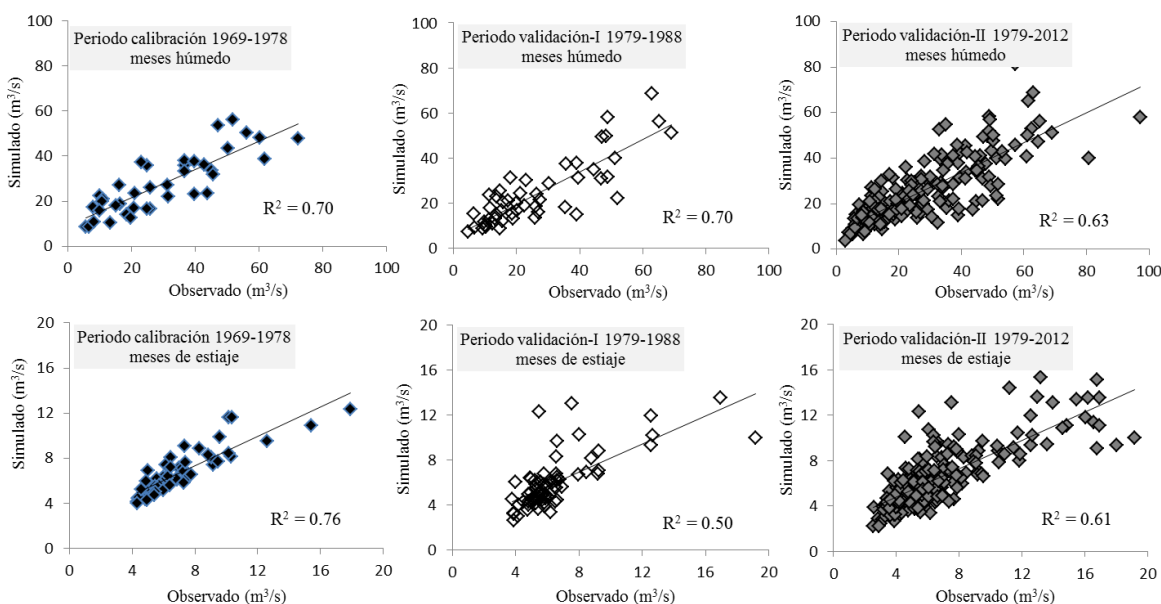
**Figura 15.** Series de tiempo de Caudal (Q) observado y simulado mensual para el periodo de calibración y validación en la cuenca Chancay-Huaral.



**Figura 16.** Comparación de régimen de Caudal (Q) observado y simulado: (a) Calibración, (b) validación I y (c) validación II.

Por otro lado, la Figura 17 muestra el diagrama de dispersión de los caudales observados y simulados para los meses húmedos (Diciembre a Abril) y secos (Mayo a Noviembre) en el periodo de calibración y validación I y II del modelo. En la calibración el modelo representa la variabilidad de los caudales observados en forma aceptables tanto en periodos húmedos como en secos con  $R^2$  de 0.70 y 0.76 respectivamente. En tanto en los meses secos para la validación I y II la representación del modelo disminuye presentando un  $R^2$  de 0.50 y 0.61 respectivamente, debido en parte a las descargas del sistema de lagunas reguladas que se dan en este periodo y que la reducción de la calidad de las predicciones en la validación es muy normal en el ámbito de la modelización hidrológica. Asimismo en la validación I y II para los meses

húmedos presentaron valores aceptables con  $R^2$  de 0.70 y 0.64 respectivamente. En general, los resultados gráficos y estadísticos son aceptables y se considera el modelo validado para generar escenarios de análisis hídricos en la cuenca Chancay-Huaral.



**Figura 17.** Diagrama de dispersión de caudales observados y simulados para los periodos húmedos y secos de la calibración y validación del modelo.

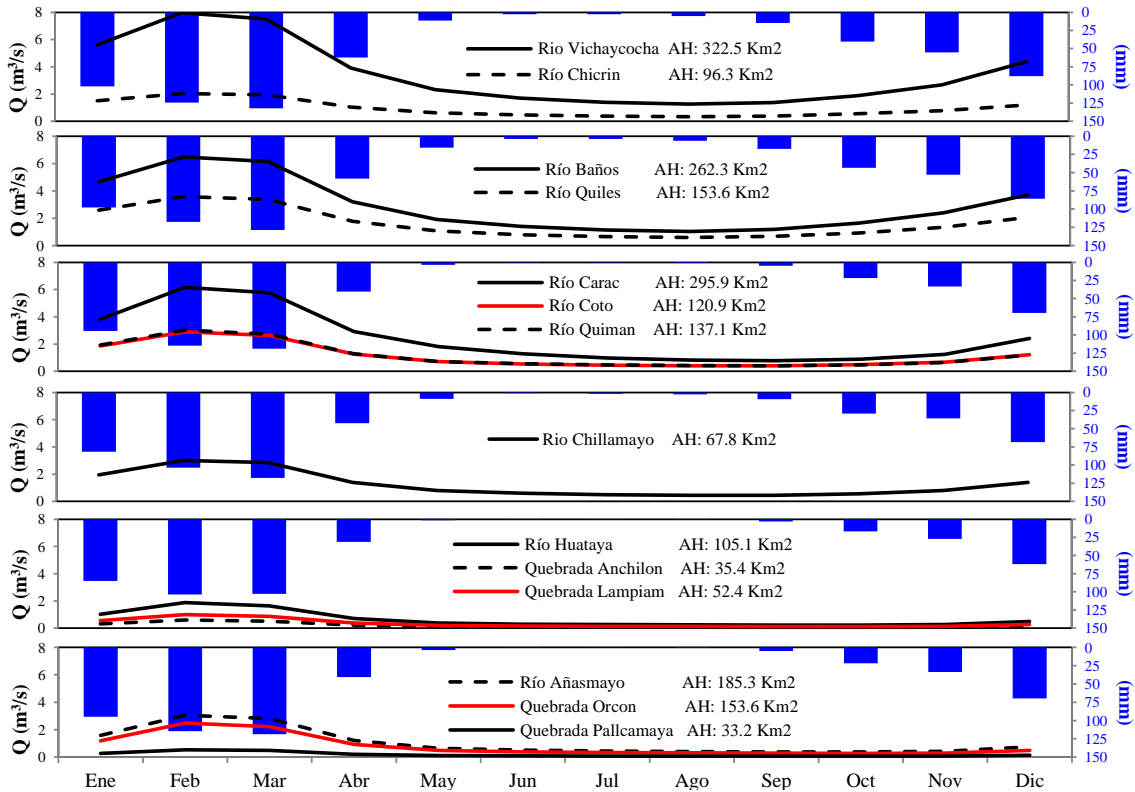
### **Generación de escorrentía en puntos de interés hídrico**

Posteriormente, teniendo el modelo WEAP calibrado y validado, se pueden generar escorrentía en los puntos de interés hídrico definidos (Figura 14a), la Figura 18 muestra los regímenes mensuales de precipitación y caudal de la cuenca CH, siendo los mayores aportantes en el periodo húmedo (diciembre a abril) las unidades hidrográficas de Vichaycocha, Baños y Carac con valores que oscilan de 3 a 8 m<sup>3</sup>/s. En menor aporte, las unidades hidrográficas Chicrín (tributario de Vichaycocha), Quiles (tributario de Baños), Coto y Quiman (forman el río Carac), Chillamayo, Huataya, Añasmayo y Orcón con valores que comprenden de 0.5 a 3.6 m<sup>3</sup>/s y finalmente los tributarios Anchilón, Lampián y Pallcamaya de 0.1 a 1.0 m<sup>3</sup>/s. En el periodo de estiaje entre los meses de julio a setiembre en donde se presentan los mínimos aportes de caudales el modelo hidrológico simula rangos que varían de 0.1 a 2.0 m<sup>3</sup>/s. El régimen pluviométrico estacional generado espacialmente sobre las unidades hidrográficas de la cuenca CH es aproximadamente homogéneo (Figura 18), debido a la baja densidad de estaciones pluviométricas al interior de la cuenca, por lo que básicamente el volumen de escorrentía aportante de cada tributario está directamente relacionado al tamaño de su área.

### **Análisis de sensibilidad**

Este proceso se realiza para cada parámetro, aumentando y disminuyendo su valor en un 10, 25 y 50%. En el caso del Nash (Figura 19) se ve que al disminuir los parámetros Ks, Sw y RRF en un 10, 25 y 50%, el modelo empeora, y con los

parámetros  $D_w$  y  $K_d$  el modelo mejora un poco, en 2.5% la eficiencia, siendo los parámetros más críticos a los cambios en estos casos “ $RRF$ ”, “ $S_w$  y  $D_w$ ”. Al aumentar los parámetros el modelo solo presenta una disminución en su eficiencia. Esto da cuenta que el indicador Nash es poco sensible a la variación de los parámetros del modelo y los que mayor sensibilidad poseen son “ $RRF$ ” y el “ $D_w$ ”.



**Figura 18.** Régimen de precipitación total mensual (barras en azul) y Caudal medio mensual ( $Q$ , lineal) generados en catorce tributarios de interés hidrológicos. AH, representa el área húmeda o aportante de cada tributario.

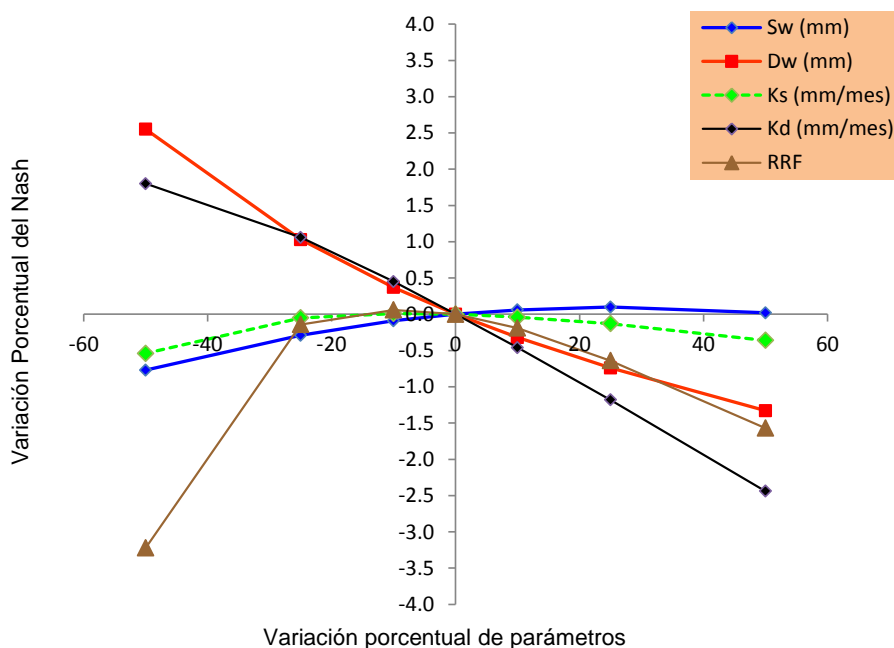
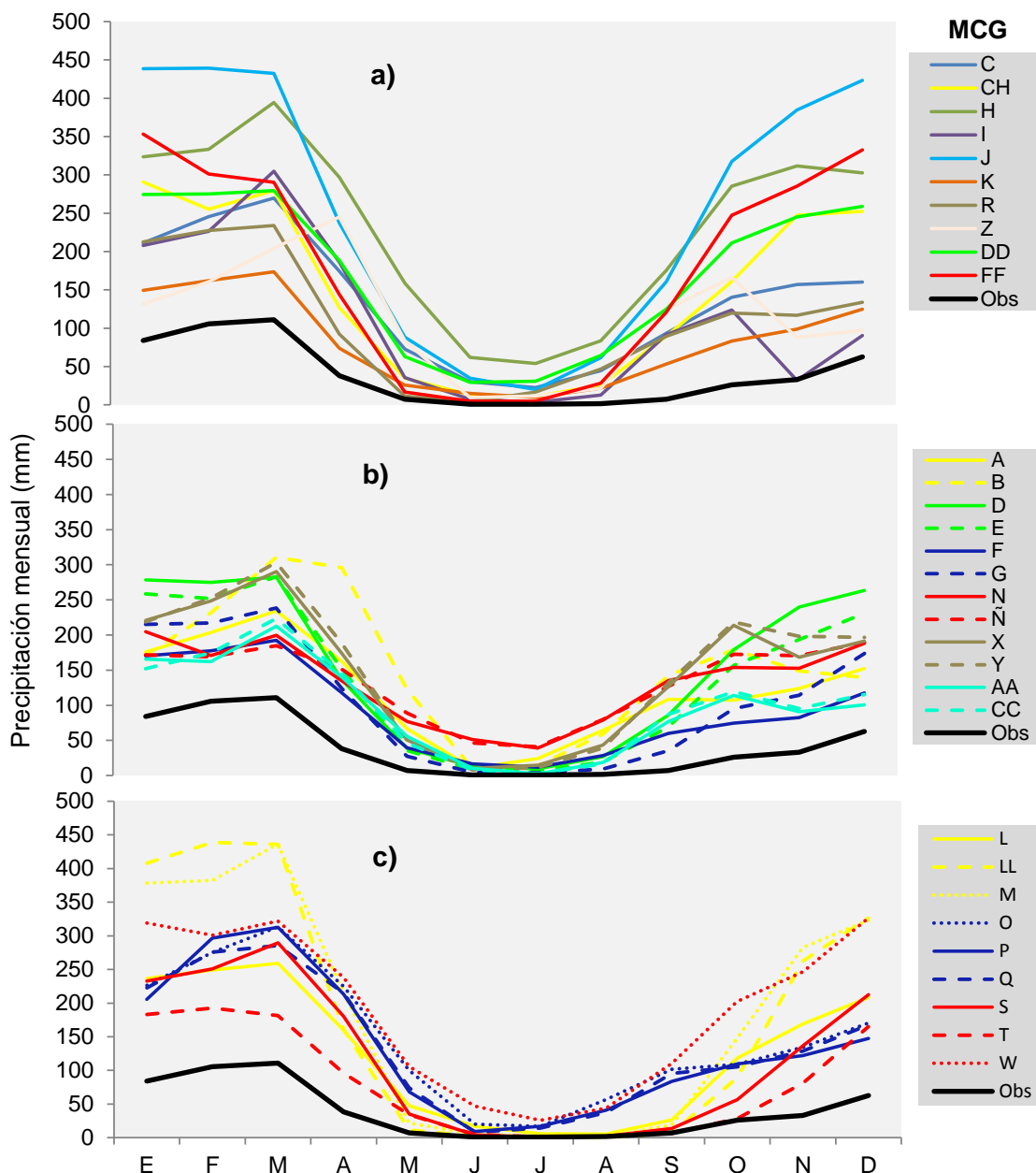


Figura 19. Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo para Nash.

## ETAPA II:

### Selección y validación del modelo

La Figura 20 muestra el régimen del ciclo anual de la precipitación total mensual para los 31 MCG, distribuidos en 3 gráficas. Se observa que los MCG sobreestiman en gran magnitud al régimen observado (color negro) (Figura 20a, 20b y 20c). En la Figura 19b y 19c los modelos que pertenecen a una misma institución esta simbolizada con el mismo color, observándose que en la mayoría de estos grupos presentan similar magnitud en su régimen. Análisis que puede ser utilizado para la selección del MCG.



**Figura 20.** Régimen del ciclo anual de la precipitación mensual de 31 modelos climáticos globales.

La Tabla 10, muestra los resultados de los pasos para la selección del MCG. La primera columna corresponde a valores de coeficiente de correlación (R), en esta fase se descartó los modelos que no simulan el régimen o que presentan menor coeficiente, sombreados en color gris. La segunda columna corresponde a los valores del sesgo anual, descartando a los modelos que presenta mayor sesgo (color gris). La tercera columna descartó los modelos que presentaran una baja resolución espacial (color gris  $> 2^\circ$ ), quedando finalmente 7 MCG cuyas variables (precipitación y temperatura) son corregidas. La última columna corresponde a valores de Nash, entre los caudales generados por las variables climáticas corregidas de los MCG y el caudal simulado. En esta columna los modelos “CMCC-CM” y “MPI-ESM-LR presentaron Nash de 47% y 49% respectivamente. En este caso se optó por el modelo “**CMCC-CM**” por su alta correlación y mayor resolución espacial.

Tabla 10. Parámetros principales de la calibración de la Cuenca Chancay-Huaral.

Nº	MCG	Resolución	R	Sesgo anual	> Resolución	Nash (%)
1	A	1.875 x 1.25	0.71	975.7		35
2	B	1.875 x 1.25	0.47	1380.4		
3	C	2.800 x 1.40	0.68	1142.7		
4	CH	1.250 x 0.94	0.70	1313.1		
5	D	1.250 x 0.94	0.72	1341.9		
6	E	1.250 x 0.94	0.78	1198.9		
7	F	1.875 x 1.85	0.72	607.9		39
8	G	0.750 x 0.75	0.77	791.7		47
9	H	1.250 x 0.94	0.68	2317.9		
10	I	1.875 x 1.87	0.66	799.8		8
11	J	2,812 x 2.79	0.70	2603.1		
12	K	2.812 x 1.66	0.79	514.7		
13	L	2.500 x 2.00	0.78	1008.8		
14	LL	2.500 x 2.02	0.79	1675.6		
15	M	2.500 x 2.02	0.77	1723.4		
16	N	2.500 x 2.00	0.57	1231.7		
17	Ñ	2.500 x 2.00	0.55	1145.8		
18	O	1.875 x 1.25	0.70	1284.9		
19	P	1.875 x 1.25	0.74	1139.9		
20	Q	1.875 x 1.25	0.72	1160.8		
21	R	2.000 x 1.50	0.76	835.2		32
22	S	3.750 x 2.00	0.80	959.7		
23	T	2.500 x 1.27	0.76	493.9		
24	W	3.750 x 1.90	0.67	1802.0		
25	X	2.812 x 2.78	0.70	1272.7		
26	Y	2.812 x 2.78	0.71	1335.0		
27	Z	1.400 x 1.40	0.39	872.4		
28	AA	1.875 x 1.87	0.69	660.9		49
29	CC	1.875 x 1.87	0.67	701.4		41
30	DD	1.125 x 1.12	0.71	1570.0		
31	FF	2.500 x 1.90	0.69	1639.0		

### ETAPA III:

#### a) Escenarios de las variables climáticas para el modelo CMCC-CM

- Precipitación - Escenario RCP4.5

En la Tabla 11, muestra los resultados del análisis comparativo de la precipitación para el periodo de referencia y del escenario RCP4.5, donde se observa que para el horizonte 2021-2050 la precipitación tendrá un incremento de 13.7% a nivel anual. Junio presentó el incremento más significativo (86,9%), mientras que Abril y Agosto una disminución que va entre el -5,7% a -4,0%. Estos resultados son insignificante,

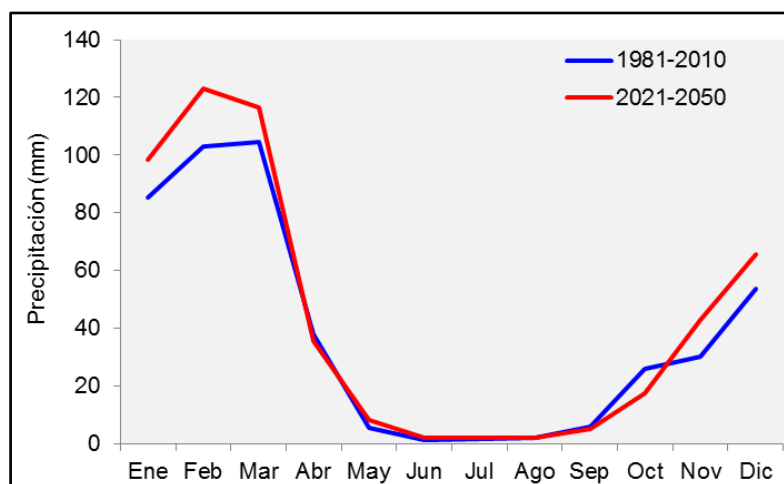
considerando los volúmenes o magnitud en los que estos se encuentran (menos de 35,5 mm).

**Tabla 11.** Comparación entre la precipitación de referencia y el escenario RCP4.5 a nivel anual para la cuenca del río Chancay-Huaral.

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2010 (mm)	85.4	102.9	104.7	37.7	5.3	1.1	1.7	1.9	5.8	25.7	30.0	53.6	455.8
2021-2050 (mm)	98.4	123.0	116.6	35.5	7.9	2.0	2.0	1.8	5.1	17.5	42.8	65.8	518.4
Variación (%)	15.2	19.6	11.3	-5.7	48.7	86.9	18.4	-4.0	-12.6	-31.9	42.6	22.6	13.7

Fuente: Elaboración propia

La Figura 21 muestra el análisis comparativo de los valores de precipitación entre el periodo de referencia y el periodo del escenario RCP8.5, visualmente se tiene un aumento en las láminas de precipitación de Octubre a Marzo.



**Figura 21.** Análisis comparativo entre la precipitación de referencia y la generada para el escenario RCP4.5 para la cuenca Chancay-Huaral.  
Fuente: Elaboración propia

La Tabla 12 muestra el análisis a nivel estacional de la precipitación, para lo cual se dividió la serie anual en dos periodos: húmedos de Diciembre a Abril y seco de Mayo a Noviembre que está en función al aporte pluviométrico que registra la cuenca del río Chancay-Huaral.

El análisis en ambos periodos consideró las series de precipitación para el periodo referencial y del escenario RCP4.5. En la tabla 12 para el horizonte 2021-2050; tanto el periodo húmedo y seco presentó un incremento del 14% y 10% respectivamente. El incremento de la precipitación durante Noviembre es lo que favoreció el aumento de la laminada del periodo seco.



**Tabla 12.** Comparación de la precipitación referencia y el generado para el escenario RCP4.5, a nivel estacional para la cuenca del río Chancay-Huaral.

Periodo	Húmedo	Seco	Anual
1981-2010 (mm)	384.3	71.5	455.8
2021-2050 (mm)	439.3	79.1	518.4
Variación (%)	14.3	10.6	13.7

Fuente: Elaboración propia

- **Precipitación - Escenario RCP8.5**

En la Tabla 13, se muestra los resultados de precipitación para el escenario RCP8.5, donde se observa que para el horizonte 2021-2050 la precipitación tendrá un incremento de 12.9% a nivel anual. Julio presentó el incremento más significativo (122,6%), mientras que Agosto presento una disminución de -10,0%.

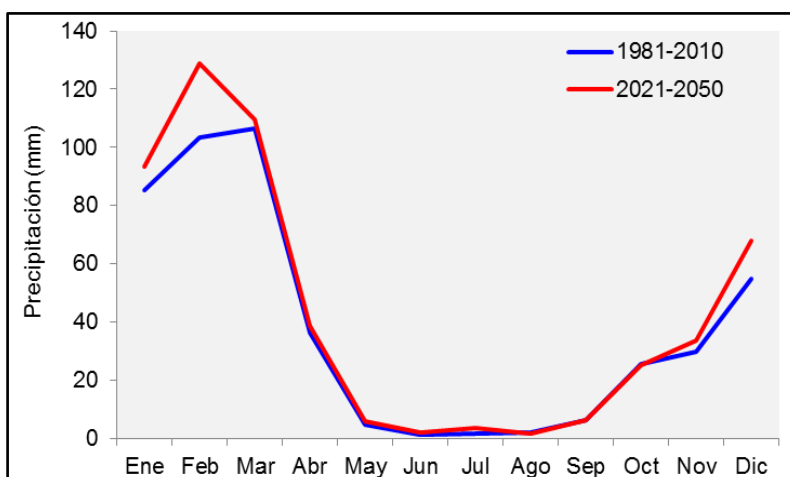
**Tabla 13.** Comparación de la precipitación del periodo de referencia y el escenario RCP8.5 a nivel anual para la cuenca del río Chancay-Huaral.

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2010 (mm)	85.3	103.4	106.5	36.5	4.7	1.2	1.6	1.8	6.0	25.3	29.7	54.8	456.9
2021-2050 (mm)	93.4	128.7	109.8	38.6	5.6	2.0	3.6	1.6	6.0	25.2	33.6	67.7	515.9
Variación (%)	9.5	24.5	3.0	5.8	19.4	69.9	122.6	-10.4	-0.1	-0.5	13.0	23.5	12.9

Fuente: Elaboración propia

La Figura 22 muestra el análisis comparativo de los valores de precipitación entre el periodo de referencia y el periodo del escenario RCP8.5, visualmente se tiene un aumento en las láminas en el periodo húmedo de Enero a Marzo.

La Tabla 14 muestra el análisis de la precipitación a nivel estacional. El análisis en ambos periodos consideró las series de precipitación para el periodo de referencial y del escenario RCP8.5. En la Tabla 14 para el horizonte 2021-2050; se aprecia, que el periodo húmedo, para el 2021-50; tiene un incremento de 13,4%, mientras que el periodo seco, registra un incremento del orden de 10,4%, ocasionado principalmente por el incremento de la precipitación durante Julio.



**Figura 22.** Análisis comparativo entre la precipitación de referencia y la generada para el escenario RCP8.5 - cuenca del río Chancay-Huaral.  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 14.** Comparación de la precipitación referencia y el generada para el escenario RCP8.5, a nivel estacional para la cuenca del río Chancay-Huaral.

Periodo	Húmedo	Seco	Anual
1981-2010 (mm)	386.5	70.4	456.9
2021-2050 (mm)	438.2	77.7	515.9
Variación (%)	13.4	10.4	12.9

Fuente: Elaboración propia

- **Temperatura - Escenario RCP4.5**

En la Tabla 15 se observa el análisis comparativo entre la temperatura para el período de referencia y del escenario RCP4.5. En dicha tabla, se aprecia un incremento uniforme de la temperatura en todos los meses, con un incremento anual del 17.8%. El mayor incremento porcentual de la temperatura se da en Julio, y el menor en Enero.

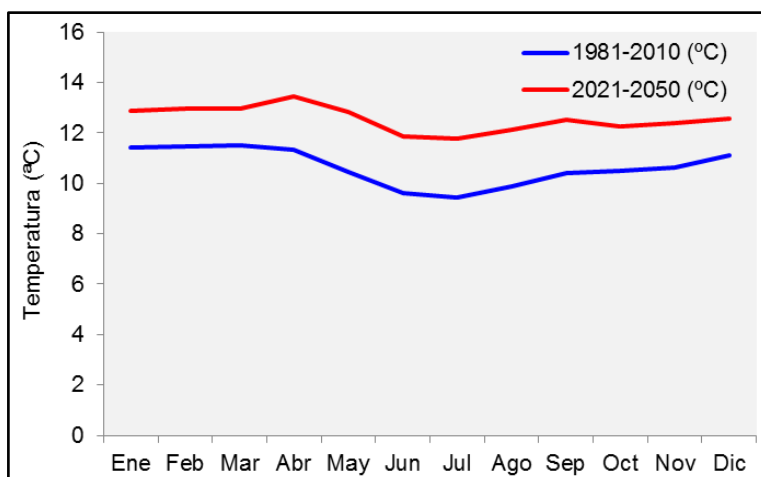
La Figura 23 muestra el análisis comparativo de los valores de temperatura entre el periodo de referencia y el periodo del escenario RCP4.5, visualmente se aprecia un incremento uniforme de la temperatura en todo el año. Los mayores incrementos se presentan en el período de estiaje, específicamente en los meses de Abril a Setiembre.

**Tabla 15.** Análisis comparativo entre la Temperatura de referencia y el generada para el escenario RCP4.5 - Cuenca del río Chancay-Huaral.

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2010 (°C)	11.4	11.5	11.5	11.3	10.5	9.6	9.4	9.9	10.4	10.5	10.6	11.1	10.6
2021-2050 (°C)	12.9	12.9	13.0	13.4	12.8	11.9	11.8	12.1	12.5	12.3	12.4	12.5	12.5
Variación (%)	12.6	13.0	12.9	18.7	22.6	23.1	24.7	22.7	20.7	16.6	16.6	12.8	17.8

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 16 muestra el análisis de la temperatura a nivel estacional, para lo cual se dividió la serie anual en dos periodos: húmedos de Diciembre a Abril y seco de Mayo a Noviembre que está en función al aporte pluviométrico que registra la cuenca del río Chancay-Huaral. El análisis en ambos periodos consideró las series de temperatura para el periodo de referencia y del escenario RCP4.5. En la Tabla 16 para el horizonte 2021-2050; se aprecia, que el periodo húmedo, para el 2021-50; tiene un incremento porcentual de 14,0%, mientras que el periodo seco, registra un incremento porcentual del orden de 20,9%, ocasionado principalmente por el incremento de la temperatura de mayo a setiembre.



**Figura 23.** Análisis comparativo entre la temperatura de referencia y la generada para el escenario RCP4.5 - cuenca del río Chancay-Huaral.  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 16.** Comparación de la temperatura referencia y el generado para el escenario RCP4.5, a nivel estacional para la cuenca del río Chancay-Huaral.

Periodo	Húmedo	Seco	Anual
1981-2010 (°C)	11.4	10.1	10.6
2021-2050 (°C)	13.0	12.3	12.5
Variación (%)	14.0	20.9	17.8

Fuente: Elaboración propia

- **Temperatura - Escenario RCP8.5**

En la Tabla 17 se observa el análisis comparativo entre las temperaturas para el período de referencia y del escenario RCP8.5. En dicha tabla, se aprecia un incremento uniforme de la temperatura en todos los meses, con un incremento porcentual anual del 19.0%. El mayor incremento porcentual de la temperatura se da en Julio, y el menor en Febrero.

**Tabla 17.** Análisis comparativo entre la Temperatura de referencia y el generado para el escenario RCP8.5 - Cuenca Chancay-Huaral.

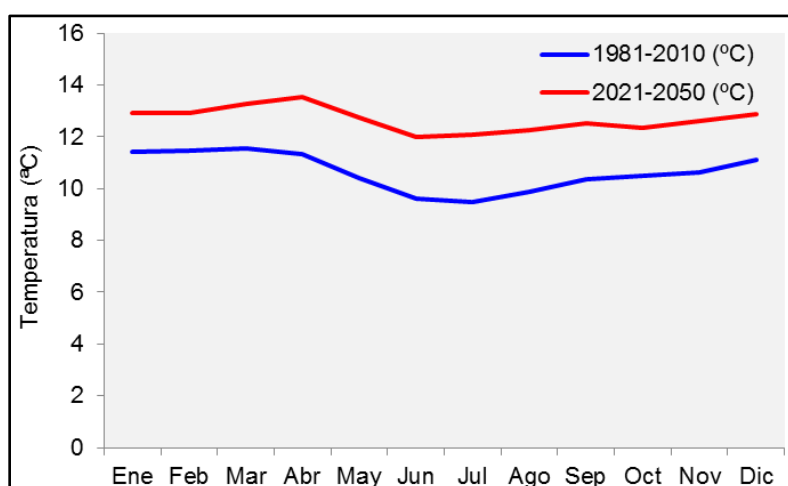
Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2010	11.4	11.5	11.6	11.3	10.4	9.6	9.5	9.9	10.3	10.5	10.6	11.1	10.6

(°C)													
2021-2050 (°C)	12.9	12.9	13.3	13.5	12.7	12.0	12.1	12.3	12.5	12.3	12.6	12.9	12.7
Variación (%)	13.3	12.4	14.9	19.4	22.3	25.0	27.1	24.2	21.0	17.5	18.6	15.7	19.0

Fuente: Elaboración propia

La Figura 24 muestra el análisis comparativo de los valores de temperatura entre el periodo de referencia y el periodo del escenario RCP8.5, visualmente se aprecia un incremento uniforme de la temperatura en todo el año. Los mayores incrementos se presentan en el período de estiaje, específicamente en los meses de Abril a Setiembre.

La Tabla 18 muestra el análisis de la temperatura a nivel estacional, para lo cual se dividió la serie anual en dos períodos: húmedos de Diciembre a Abril y seco de Mayo a Noviembre que está en función al aporte pluviométrico que registra la cuenca del río Chancay-Huaral. El análisis en ambos periodos consideró las series de temperatura para el periodo de referencia y del escenario RCP8.5. En la Tabla 18 para el horizonte 2021-2050; se aprecia, que el periodo húmedo, tiene un incremento porcentual de 15,1%, mientras que el periodo seco, registra un incremento porcentual del orden de 22,1%, ocasionado principalmente por el incremento de la temperatura de mayo a setiembre.



**Figura 24.** Análisis comparativo entre la temperatura de referencia y la generada para el escenario RCP8.5 - cuenca del río Chancay-Huaral.  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 18.** Comparación de la temperatura referencia y el generado para el escenario RCP8.5, a nivel estacional para la cuenca del río Chancay-Huaral.

Periodo	Húmedo	Seco	Anual
1981-2010 (°C)	11.4	10.1	10.6
2021-2050 (°C)	13.1	12.4	12.7
Variación (%)	15.1	22.1	19.0

Fuente: Elaboración propia

**b) Escenarios de caudal para el modelo CMCC-CM**

La Tabla 19 y 20 muestra los resultados del análisis comparativo de caudal ( $m^3/s$ ) entre el periodo de referencia y el escenario RCP4.5 y RCP8.5 donde se observa que para el horizonte 2021-2050, ambos escenarios de caudal presentan similar incremento (13%) a nivel anual.

A nivel mensual varia el comportamiento en ambos escenarios. Para el RCP4.5 en enero presenta un superávit de 19% y en octubre una disminución del 12%. En cambio para el RCP8.5, febrero es el que presenta un superávit de (23%).

Visualmente los resultados de la Tabla 19 y 20 se muestran en la Figura 25, donde ambos escenarios muestran casi similar régimen y que las condiciones de escorrentía para el horizonte 2021-2050 es de tendencia ascendente.

**Tabla 19.** Comparación del caudal ( $m^3/s$ ) entre el periodo de referencia y el escenario RCP4.5, para la cuenca del río Chancay-Huaral.

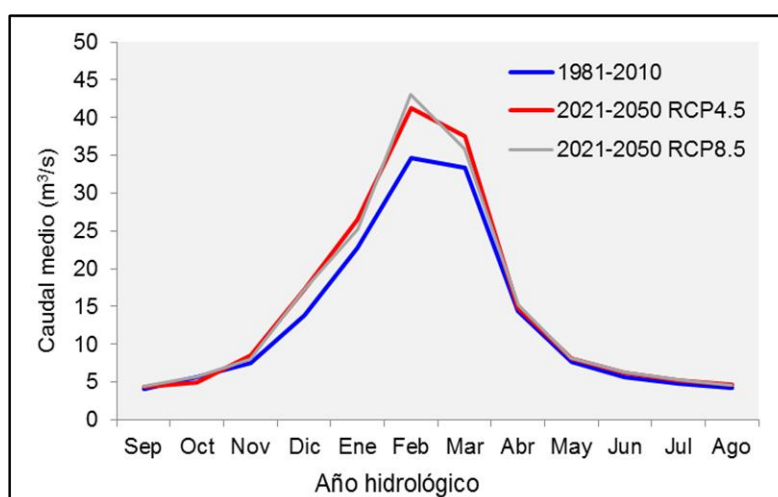
Periodo (°C)	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
1981-2010	4.1	5.6	7.6	13.9	22.8	34.7	33.3	14.5	7.6	5.7	4.8	4.2	13.2
2021-2050	4.3	5.0	8.5	17.2	26.5	41.3	37.5	14.9	8.1	6.3	5.2	4.6	15.0
Variación (%)	6.4	-12.1	12.1	24.1	16.4	19.1	12.4	2.8	6.7	10.0	9.1	8.5	13.0

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 20.** Comparación del caudal ( $m^3/s$ ) entre el periodo de referencia y el escenario RCP8.5, para la cuenca del río Chancay-Huaral.

Periodo (°C)	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
1981-2010	4.1	5.6	7.5	14.0	22.7	35.0	33.8	14.3	7.5	5.7	4.8	4.2	13.3
2021-2050	4.4	5.7	8.0	17.2	25.2	43.0	35.8	15.2	8.1	6.2	5.3	4.6	14.9
Variación (%)	8.4	3.2	7.0	23.0	10.9	23.0	6.0	6.0	8.9	10.4	10.3	9.6	12.5

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 25.** Comparación del caudal de referencia y los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para la cuenca del río Chancay-Huaral.

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a los periodos estacionales durante el año, ambos escenarios presentan similar comportamiento de variación de incremento (Tabla 21 y 22), en promedio presentan un incremento del 14.5% en el periodo húmedo y 7% en el periodo seco.

**Tabla 21.** Comparación de caudal estacional periodo de referencia y el escenario RCP4.5.

Periodo	Húmedo	Seco	Anual
1981-2010 (m3/s)	23.8	5.7	13.2
2021-2050 (m3/s)	27.5	6.0	15.0
Variación (%)	15.3	6.0	13.0

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 22.** Comparación de caudal estacional periodo de referencia y el escenario RCP4.8.

Periodo	Húmedo	Seco	Anual
1981-2010 (m3/s)	24.0	5.6	13.3
2021-2050 (m3/s)	27.3	6.1	14.9
Variación (%)	13.9	8.1	12.5

Fuente: Elaboración propia

### c) Escenarios de Balance Hídrico

Para el desarrollo del balance hídrico proyectado al año 2050 en la cuenca Chancay-Huaral se tomó en cuenta los siguientes supuestos;

- En los últimos 40 años el sector agrícola no ha presentado cambios significativos mayores al 2.3% de su área de riego PMGRH-II (2012) en base a esto se consideró una agricultura estática en el tiempo. En este caso la demanda agrícola global asumida para dicho horizonte es de 197 hm<sup>3</sup> que corresponde a la campaña agrícola 2009/2010 (PMGRH, 2011).
- Respecto a la demanda poblacional, para dicho horizonte fue calculada con el modelo WEAP.
- Para el balance hídrico, la demanda se evaluó para una disponibilidad hídrica al 75% de persistencia del periodo 2021-2050. En este caso por presentar similar respuesta de esorrentía anual se analizó con el escenario RCP8.5.

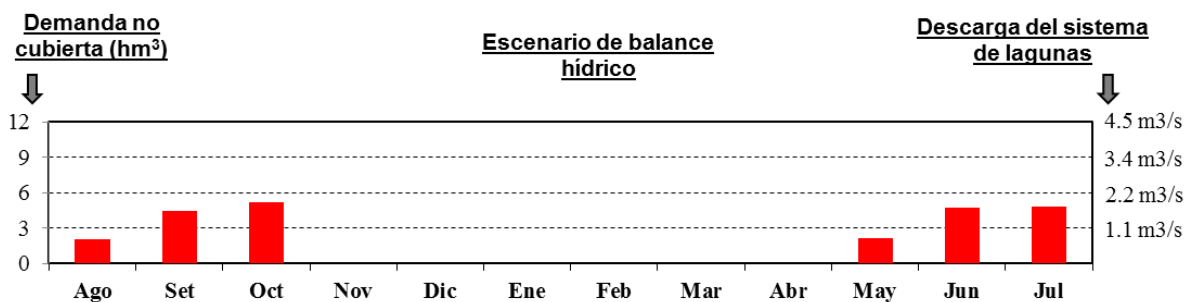
La Tabla 23 muestra el balance hídrico proyectado al 2050. De Mayo a Octubre la cuenca Chancay-Huaral presentara un déficit con rangos de 2.1 a 4.9 hm<sup>3</sup>. Déficit que será solventado con las descarga del sistema de lagunas que comprenden entre 0.8 a 2 m<sup>3</sup>/s (Figura 25).

**Tabla 23.** Escenarios de balance hídrico para el horizonte 2050.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Demanda Agrícola - 2050	17.3	16.8	19.3	19.2	18.8	17.8	16.1	11.8	13.1	15.1	15.4	16.3

<i>Demanda Poblacional - 2050</i>	1.3	1.2	1.3	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2	1.3
<i>75% Persistencia (2021-2050)</i>	55.1	72.6	72.5	32.9	17.9	14.4	12.5	11.0	9.9	11.1	16.8	34.4
<i>Déficit / Superávit (hm<sup>3</sup>)</i>	36.5	54.6	51.9	12.4	-2.2	-4.7	-4.9	-2.1	-4.4	-5.2	0.2	16.9

Fuente: Elaboración propia



**Figura 26.** Demanda estacional no cubierta (rojo) para el periodo 2050. La ordenada del lado izquierdo representa la demanda no cubierta en (hm<sup>3</sup>) y del lado derecho en (m<sup>3</sup>/s) indica la descarga teórica del sistema de lagunas necesaria para equilibrar el balance.

Fuente: Elaboración propia

## VI. CONCLUSIONES

- La climatología de la cuenca se evaluó utilizando las estaciones climáticas vecinas. Y mediante el método del índice del vector regional, con la finalidad de obtener una mejor calidad en la información, se excluyeron las estaciones pluviométricas de Pirca y Picoy.
- La caracterización pluviométrica en la cuenca Chancay-Huaral, se realizó en función de las estaciones pluviométricas: Huayán, Pallac, Carac, y Santa Cruz, incluyendo las estaciones ubicadas en cuencas vecinas: Huamantanga, Huaros, Pariacancha, Pachamachay, Tupe y Yantac, con esta información se elaboró la distribución espacial de la lluvia sobre la cuenca, para el periodo 1969-2012.
- En este estudio se utilizó un modelo hidrológico que permita el entendimiento del ciclo hidrológico tanto su oferta como su demanda con fines de uso para la GRH. El diseño del modelo hidrológico WEAP tiene una performance altamente satisfactorio ya que reproduce bien la respuesta hidrológica de la cuenca a nivel mensual, lo que permite representar la dinámica de flujo en la cuenca para analizar escenarios de balances hídricos. El coeficiente de Nash e indicadores estadísticos indican un alto grado de correspondencia entre los caudales simulados y los observados.
- Se estimaron las descargas en los siguientes afluentes: río Vichaycocha, río Chicrín, río Baños, río Quiles, río Chillamayo, quebrada Pallcamayo, río Quiman, río Coto, río Carac, quebrada Lampián, quebrada Anchilon, río Huataya, Añasmayo, quebrada Orcón, con el modelo hidrológico WEAP calibrado y validado por el método de *Soil Moisture Model*.
- La modelización hidrológica en la cuenca CH es compleja debido a la escasez de datos extensos y confiables que permitan interconectar bajo un esquema: los reservorios, infraestructuras de control, agua subterránea, fuentes de recuperación, etc. En este contexto, se tomaron ciertos criterios que permitió la calibración y el desarrollo de balance hídrico, por lo tanto, los resultados presentados deben ser usados como referencia y no como valores exactos. Conjuntamente, los resultados de este estudio proporcionan ideas iniciales en la gestión de los recursos hídricos en la cuenca CH y se espera nuevas investigaciones con la nueva implementación de estaciones hidrometeorológicas implementadas a través del PMGRH, mejorando la calidad de información hídrica en los puntos de interés hídricos y a su vez para la toma de decisiones.



- La precipitación, para el período 2021 – 2050 del escenario RCP4.5, registrara un incremento de 13.7% a nivel anual; mientras que a nivel mensual, Febrero y Junio experimentar un incremento de 19.6% y 86,9% respectivamente y disminuirá de -5.7% y -4.0% en Abril y Agosto.
- La precipitación, para el período 2021 – 2050 del el escenario RCP8.5, registrara un incremento de 12.9% a nivel anual; mientras que a nivel mensual, Febrero y Junio experimentar un incremento de 24.5% y 122,6% respectivamente y disminuirá de -10.4% y -0.5% en Agosto y Octubre.
- A nivel estacional, la precipitación para el escenario RCP4.5 se ha determinados que el periodo húmedo, para el 2021-2050; tiene un incremento de 14.3%, mientras que el periodo seco, registra un incremento del orden de 10,6%.
- A nivel estacional, la precipitación para el escenario RCP8.5 se ha determinados que el periodo húmedo, para el 2021-2050; tiene un incremento de 13.4%, mientras que el periodo seco, registra un incremento del orden de 10,4%.
- La temperatura, para el periodo 2021 – 2050 del escenario RCP4.5 y RCP8.5 registrara un incremento del 17.8% 19.0% a nivel anual respectivamente.
- A nivel estacional, la temperatura para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 proyectados al 2021 – 2050 registrara para el periodo húmedo, un incremento de 14% y 15.1%, y para el periodo seco un incremento de 20.9% y 22.1% respectivamente.
- Los caudales de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, para el horizonte 2021 - 2050 a nivel mensual varían, pero a nivel anual presentan casi el mismo incremento porcentual de 13%. En ambos escenarios Diciembre presenta el mayor cambio porcentual de 24% y 23% y menor Octubre con -12% y 3.2% respectivamente.
- A nivel estacional los caudales proyectados al 2021 - 2050 se ha determinado que para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 presentaran en el periodo húmedo incrementos de 15.3% y 13.9% y para el periodo seco de 6% y 8.1% respectivamente.
- El balance hídrico proyectado al 2050 bajo el escenario 2050 en cuenca Chancay-Huaral, presentara un déficit hídrico en los meses de Mayo a Setiembre, con demandas no cubiertas especialmente en la agricultura de 2.1 a 4.9 hm<sup>3</sup>. Déficit que será solventado con descargas de 0.8 a 2 m<sup>3</sup>/s del sistema de lagunas.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA, 2011a. Autoridad Nacional del Agua. Evaluación de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Chancay-Huaral.
- Angarita, H., Delgado, Juliana., Escobar-Arias, M, I., Walschburger, Thomas. 2013. Disponible en: <<http://www.mundotnc.org/>>
- CEPES, 1982. Centro Peruano de Estudios Sociales. Cuenca del Río Chancay-Huaral. Disponible de: <http://www.cepes.org.pe/portal/>
- Escobar, M., Lima, N., Purkey, D., Yates, D. & Forni, L. (2013). Modelación Hidrológica y Escenarios de Cambio Climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades la Paz y el Alto, Bolivia. Aqua-LAC – Vol. 5 – N°2. pp. 23-34.
- IPCC, 2013. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Quinto informe de evaluación del Grupo de Trabajo II.
- GWP, 2000. Global Water Partnership. Manejo integrado de los recursos hídricos. Estocolmo – Suecia.
- Mena, C. 2010. Evolución de la dinámica de los escurrimientos en zonas de alta montaña: Caso del volcán Antisana. Ecuador. Escuela Politécnica Nacional - Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Disponible en <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2503/1/CD-3253.pdf>
- MINAG. (2002). “Evaluación y Ordenamiento de los Recursos Hídricos de la Cuenca Chancay-Huaral”, Hidrología Superficial de la Cuenca del Río Chancay-Huaral. MINAG, JUDRCH. Huaral, Perú.
- MINAG. (2010). “Estudio de Máximas Avenidas en las Cuencas de la Zona Centro de la Vertiente del Pacífico”. MINAG, ANA, Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos. Lima-Perú.
- MINAG. (2011). “Evaluación de Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del río Chancay-Huaral”, Hidrología Superficial de la Cuenca del Río Chancay-Huaral. MINAG, ANA, ALA Chancay-Huaral, Lima-Perú.

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*, 50(3): 885-900.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10(3): 282-290.
- ONERN (1969). "Inventario, Evaluación y Uso Racional de los Recursos Naturales de la Costa del Valle Chancay-Huaral". ONERN. Lima, Perú.
- PMGRH, 2011. Proyecto de modernización de la gestión de los recursos hídricos. Diagnóstico de la red de estaciones hidrometeorológicas instaladas en la cuenca del río Chancay-Huaral. Disponible de: <http://www.ana.gob.pe>
- PROFODUA, 2005. Propuesta de asignaciones de agua en bloque (volúmenes anuales y mensuales) para la formalización de los derechos de uso de agua Chancay - Huaral del programa de formalización de derechos de uso de agua.
- PMGRH-I, 2012. Tomo I. Proyecto de modernización de la gestión de los recursos hídricos – Diagnostico participativo consolidado cuenca Chancay-Huaral. Aspectos generales, marco normativo e institucional y descripción de la cuenca. Disponible de: <http://www.ana.gob.pe>
- SEI, Stockholm Environment Institute. (2012). *Water Evaluation And Planning*. Recuperado el 27 de Abril de 2012, de WEAP21: <http://www.weap21.org/>
- WWF Perú, 2014. Un frágil ciclo - Agua, Energía y Población en Lima, Lima, Perú.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D. & Huber-Lee, A. 2005. WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference- Driven Water Planning Model. *Water International*, 30(4):487–500

## **VIII. ANEXOS**

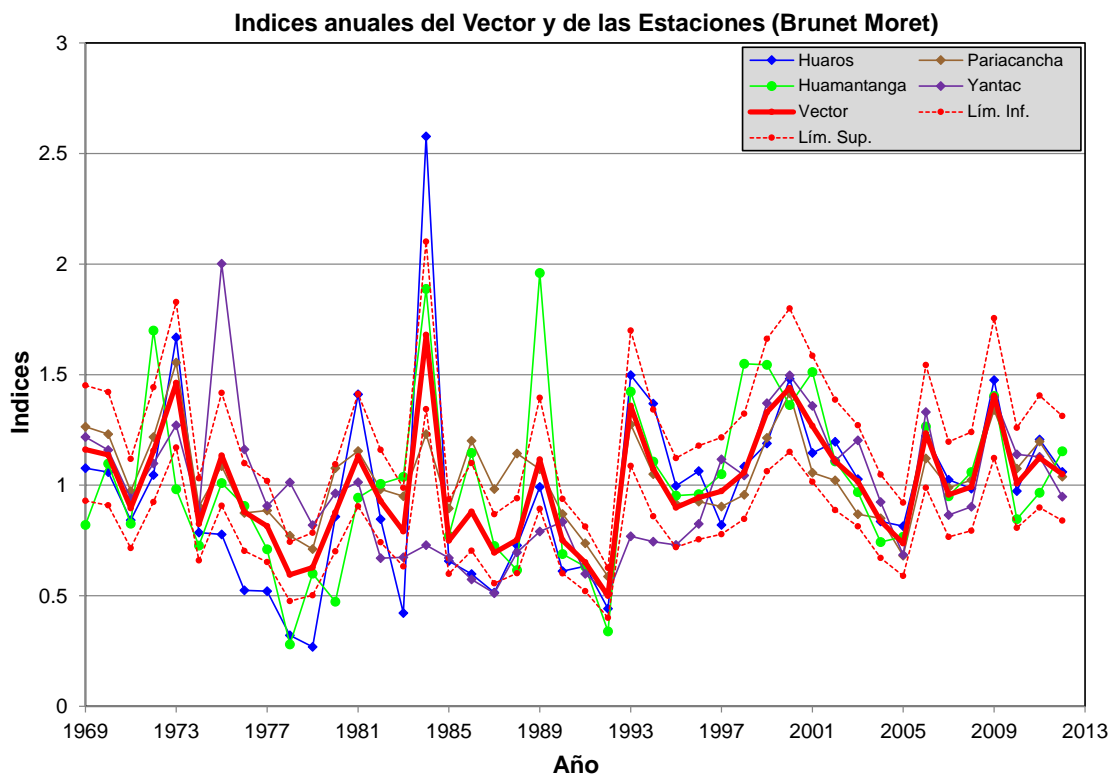


Figura 27. Grupo I de análisis por el índice del vector regional.

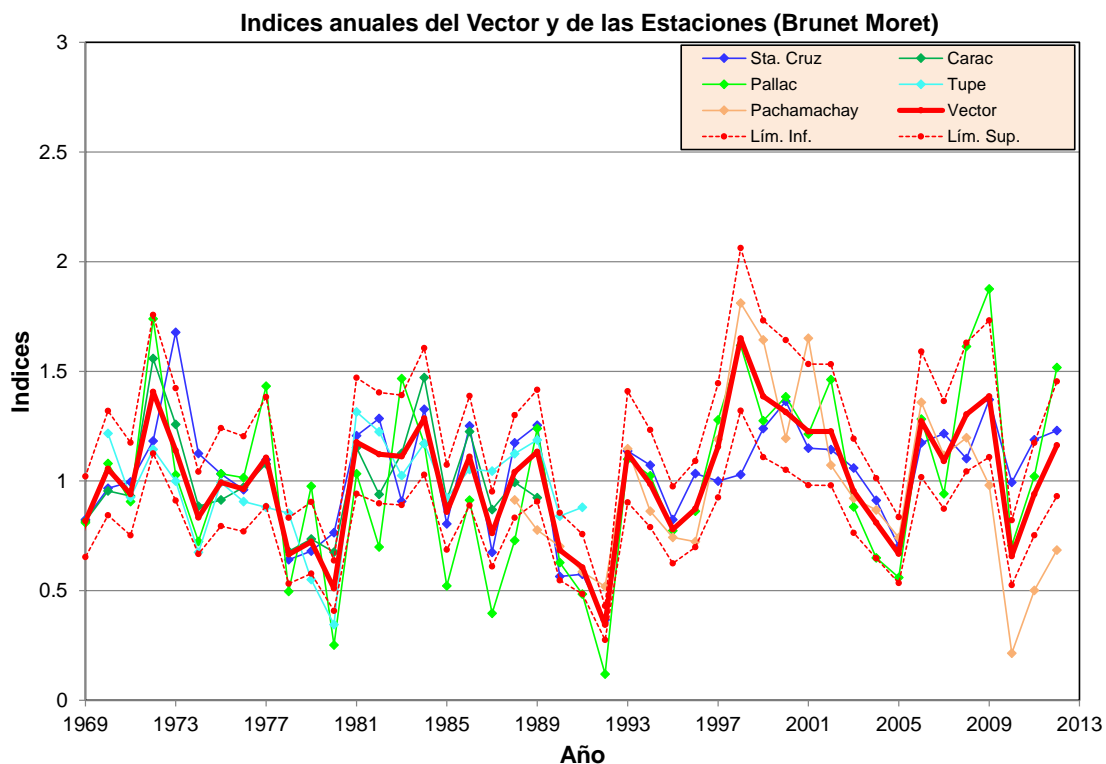


Figura 28. Grupo II de análisis por el índice del vector regional.

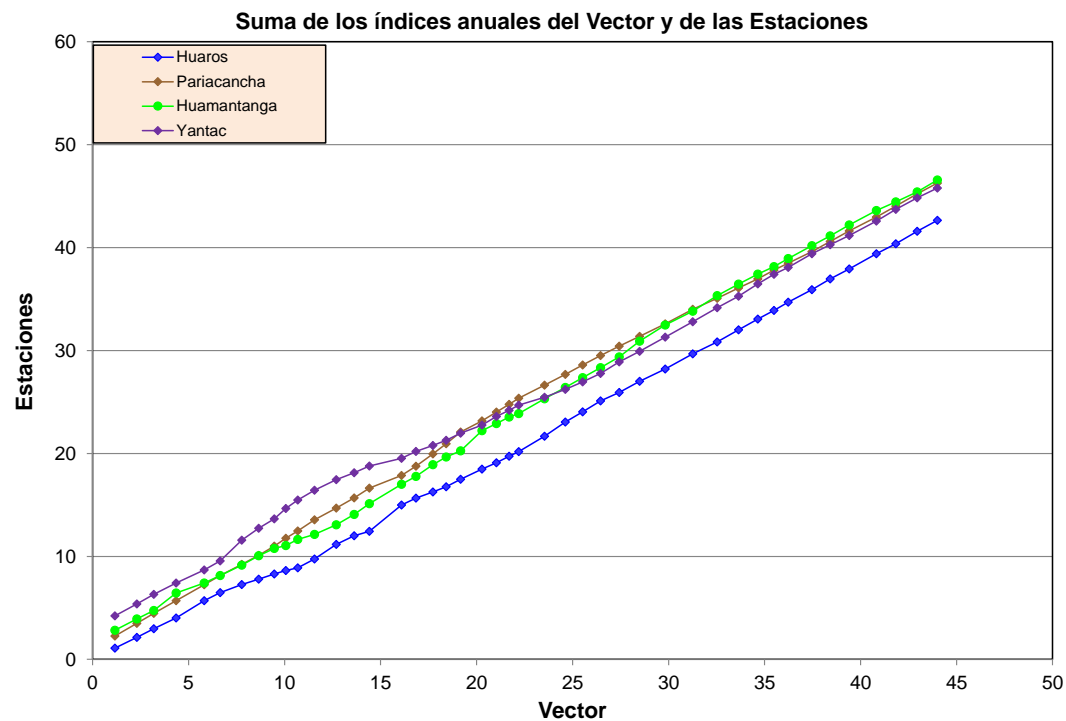


Figura 29. Acumulados de índices de precipitación. Grupo I.

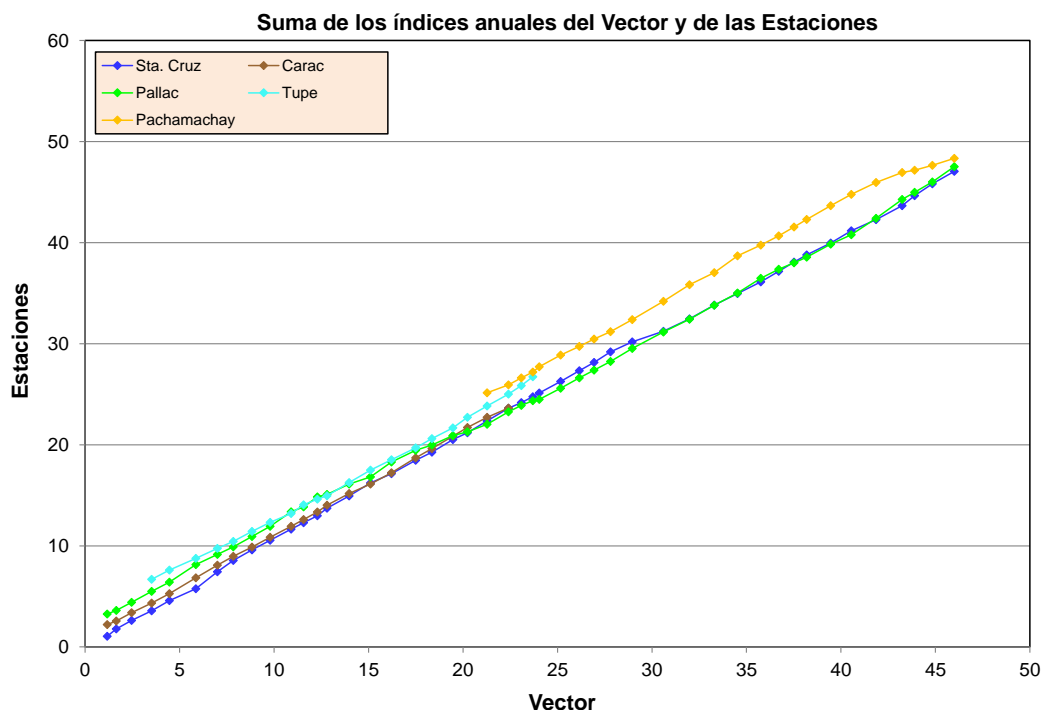
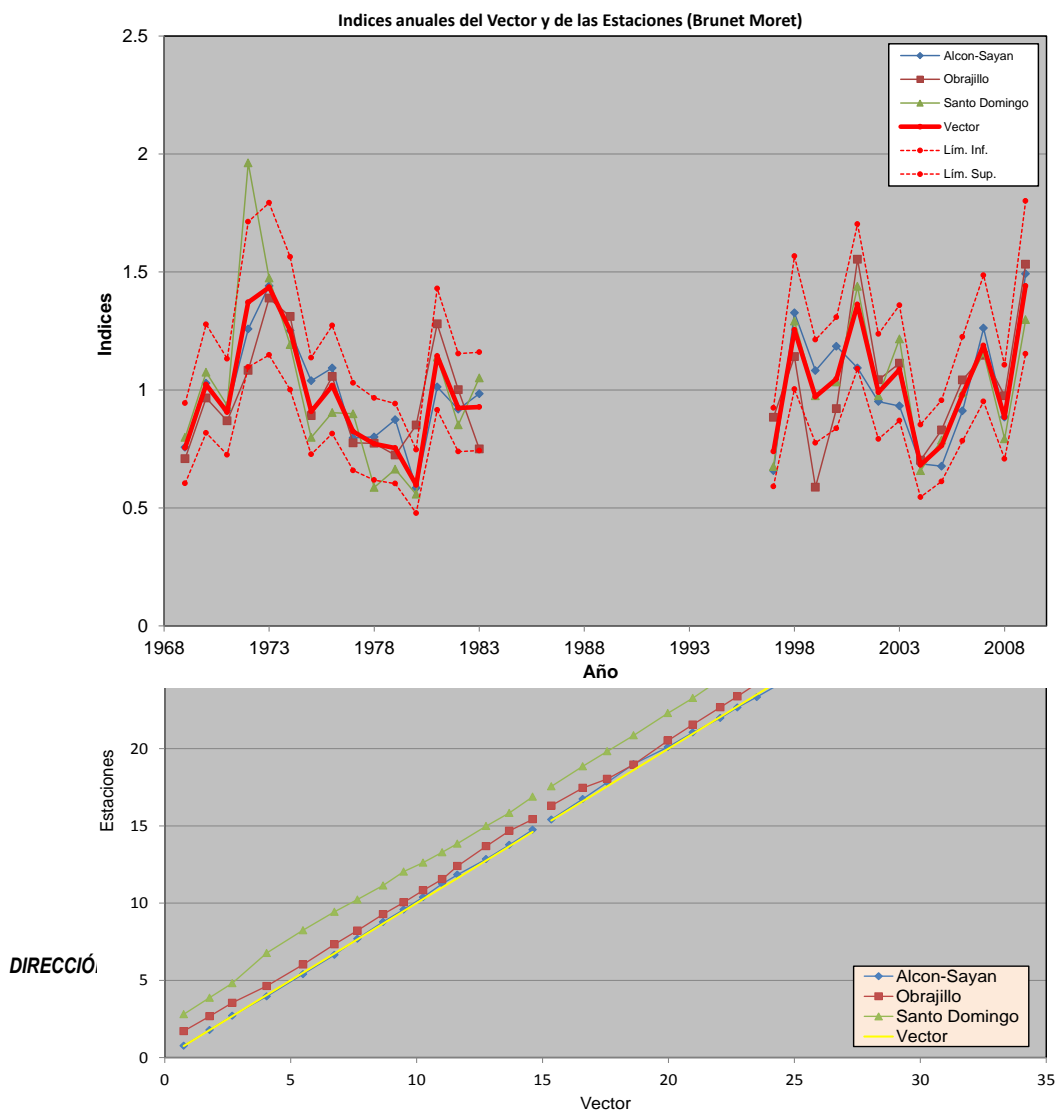


Figura 30. Acumulados de índices de precipitación. Grupo II.



**Figura 31.** Grupo de análisis de caudales por el índice del vector regional.

**Figura 32.** Acumulados de índices de caudales.