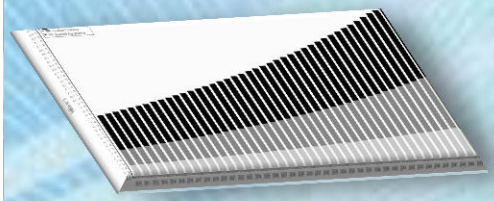
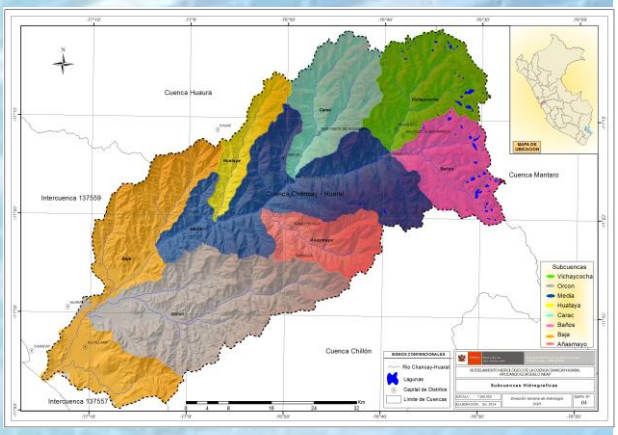
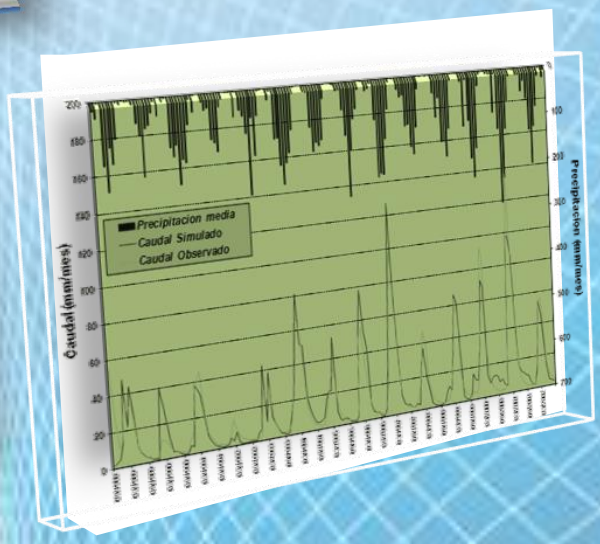
PERÚ | Ministerio del Ambiente | Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI

MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA CHANCAY – HUARAL: APLICANDO EL MODELO WEAP







DICIEMBRE - 2014

DIRECTORIO

Presidenta Ejecutiva del SENAMHI
Ing. Amelia Díaz Pabló

Director Científico
Ing. Esequiel Villegas Paredes

Director General de Hidrología y Recursos Hídricos
Ing. Oscar G. Felipe Obando

RESPONSABLES DE LA ELABORACIÓN

Director de Hidrología Aplicada
Dr. Waldo Sven Lavado Casimiro

Especialista en Hidrología
Ing. Darwin Santos Villar

REVISIÓN Y EDICIÓN

Ing. Oscar G. Felipe Obando
Bach. Miriam R. Casaverde Riveros

DICIEMBRE – 2014
LIMA - PERÚ

INDICE

I. INTRODUCCIÓN 1
II. JUSTIFICACIÓN 1
III. OBJETIVOS 1
3.1 OBJETIVO GENERAL 1
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 2
IV. MARCO TEÓRICO 2
4.1 MODELO HIDROLÓGICO 2
4.1.1 CONCEPTO 2
4.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS 2
4.2 MODELO WEAP (WATER EVALUATION AND PLANING) 5
4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO WEAP 5
4.2.2 MÉTODOS DE SIMULACIÓN 6
4.2.3 MÉTODO DE LA HUMEDAD DEL SUELO 7
4.2.4 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DEL MODELO WEAP 9
4.3 MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE 10
4.3.1 COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2) 11
4.3.2 EFICIENCIA DE NASH - SUTCLIFFE (E) 11
4.3.3 PORCENTAJE DE DESVIACIÓN RESPECTO DE CAUDALES OBSERVADOS (PBIAS) 11
4.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 12
V. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 12
5.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA 12
5.2 DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA 12
5.3 DEMARCACIÓN POLÍTICA Y ADMINISTRATIVA 13
5.4 DESCRIPCIÓN SOCIOECONOMICA 14
5.4.1 DEMOGRÁFICA 14
5.4.2 ECONÓMICA 15
5.5 CLIMA Y ECOLOGÍA 17
5.6 COBERTURA VEGETAL 19
5.7 HIDROGRAFÍA 20
5.8 CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS 21
5.9 RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL 23
VI. DEMANDA DE AGUA PARA USO AGRÍCOLA 25
6.1 CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL 25
6.2 COEFICIENTES DE RIEGO (Kc) DE LOS CULTIVOS 26
6.3 EFICIENCIA DE RIEGO 27

6.4 CÉDULA DE CULTIVO 27
6.5 DEMANDA NETA 29
6.6 DEMANDA TOTAL DEL VALLE 29
6.7 BLOQUES DE RIEGO 31
VII. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA COMO INGRESO AL MODELO HIDROLÓGICO 32
7.1 ANÁLISIS CLIMÁTICO 32
7.2 HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL 34
7.3 VELOCIDAD DE VIENTO MEDIA MENSUAL 36
7.4 PRECIPITACIÓN 36
7.4.1 GRADIENTE PRECIPITACIÓN - ALTITUD 39
7.5 ANÁLISIS DE LAS DESCARGAS MEDIA MENSUAL 42
VIII. DESARROLLO METODOLÓGICO 44
IX. DESARROLLO Y RESULTADOS 45
9.1 ETAPA I 45
9.2 ETAPA II 47
9.3 ETAPA III 47
9.4 ETAPA IV 48
9.5 ETAPA V 52
X. CONCLUSIONES 52
XI. RECOMENDACIONES 53
XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 54
XIII. ANEXOS 56

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1. Clasificación de modelos utilizados en hidrología. 3
Figura N° 2. Clasificación según el grado de discretización de una cuenca. 4
Figura N° 3. Esquema del método de humedad del suelo. 7
Figura N° 4. Efectos de las medidas de ajuste sobre la calibración de un modelo. 10
Figura N° 5. Ubicación y demarcación hidrográfica de Chancay-Huaral. 13
Figura N° 6. Límite distrital de la provincia de Huaral. 13
Figura N° 7. Censos de población en la cuenca Chancay – Huaral (Urbana y rural). 14
Figura N° 8. Escenarios de población de la cuenca Chancay – Huaral al 2025 y 2050. 15
Figura N° 9. Cobertura vegetal de la cuenca Chancay-Huaral. 20
Figura N° 10. Subcuencas hidrográficas de la cuenca Chancay-Huaral. 22
Figura N° 11. Sistema hidráulico de la cuenca Chancay-Huaral. 24
Figura N° 12. Demanda Agricola del valle bajo y alto de la cuenca Chancay-Huaral 31
Figura N° 13. Temperatura media mensual de las estaciones climatológicas utilizadas. 32
Figura N° 14. Red de estaciones Hidrometeorológicas utilizadas en la cuenca Chancay-Huaral. 33
Figura N° 15. Gradiente altitudinal de la temperatura. 34
Figura N° 16. Humedad relativa media mensual de las estaciones climatológicas utilizadas. .. 34
Figura N° 17. Distribución espacial de la temperatura media multianual de la cuenca Chancay - Huaral. 35
Figura N° 18. Velocidad del viento media mensual de las estaciones climatológicas utilizadas. 36
Figura N° 19. Grupo I de análisis por el índice del vector regional. 37
Figura N° 20. Grupo II de análisis por el índice del vector regional. 37
Figura N° 21. Acumulados de índices de precipitación. Grupo I. 38
Figura N° 22. Acumulados de índices de precipitación. Grupo II. 38
Figura N° 23. Gradiente altitudinal de la precipitación multianual. 40
Figura N° 24. Distribución espacial de la precipitación pluviométrica sobre la cuenca Chancay – Huaral. 41
Figura N° 25. Comparación de los hidrogramas de los ríos Huaura, Chancay-Huaral y Chillón. 42
Figura N° 26. Grupo de análisis de caudales por el índice del vector regional. 43
Figura N° 27. Acumulados de índices de caudales. 43
Figura N° 28. Flujograma metodológico del modelo WEAP. 44
Figura N° 29. Delimitación de la cuenca en subcuencas/microcuencas. 46
Figura N° 30. Delimitación de la zona húmeda. 46
Figura N° 31. Esquematización en el modelo WEAP. 47
Figura N° 32. Ingreso de la información en el modelo. 48
Figura N° 33. Caudal (Q) observado (sombreado) y simulado (punteada) medio mensual para el periodo de calibración y validación en la cuenca Chancay-Huaral. 50
Figura N° 34. Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo para Nash. 51
Figura N° 35. Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo para R^2. 51
Figura N° 36. Caudales (Q) medios mensuales generados en tributarios de interés hidrológicos. 52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del uso del suelo. 9
Tabla 2. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe. 11
Tabla 3. Cultivos Permanentes Frutales (8355 Has). 15
Tabla 4. Cultivos y demanda de agua de riego estimada, valle Chancay-Huaral. 16
Tabla 5. Características de la cobertura vegetal de la cuenca Chancay – Huaral. 19
Tabla 6. Parámetros geomorfológicos de la cuenca Chancay – Huaral. 22
Tabla 7. Coeficientes de distribución de agua provenientes del río Chancay-Huaral. 23
Tabla 8. Evapotranspiración de referencia Eto según Penman – Monteith. 25
Tabla 9. Coeficiente de cultivos KC en el valle Chancay-Huaral. 26
Tabla 10. Eficiencia de riego del sistema de riego Chancay-Huaral. 27
Tabla 11. Cedula de cultivo del valle Chancay-Huaral. 28
Tabla 12. Demanda hídrica del valle Chancay-Huaral por Comisión de Regantes y Bloque. 30
Tabla 13. Criticas de datos. 39
Tabla 14. Criticas de datos. 43
Tabla 15. Parámetros principales de la calibración de la Cuenca Chancay-Huaral. 49
Tabla 16. Estadística de la calibración y validación del modelo hidrológico. 50
Tabla 17. Requerimiento de datos para una aplicación WEAP. 57

I. INTRODUCCIÓN

En estas dos últimas décadas el Perú ha sufrido grandes cambios, principalmente en el crecimiento inmensurable de su población que ha dado paso principalmente al crecimiento del sector agrícola, ocasionando una presión a las instituciones o empresas en el manejo de los recursos hídricos, situación que se complica más con la incertidumbre climática que puede traer consigo desestabilidad hídrica. De esta manera los estudios hidrológicos bajo el uso de modelos puramente hidrológicos cada vez toman menos uso, debido a los cambios físicos que está presentando las cuencas hidrográficas para su desarrollo. En este caso se busca modelos que no solo simule la parte hidrológica si no que incluya la demanda permitiendo simular y evaluar resultados de escenarios para la toma de decisiones. 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 2014 se ha elaborado el estudio de modelamiento hidrológico de la cuenca Chancay-Huaral mediante el uso del modelo WEAP “Water Evaluation And Planning”.

II. JUSTIFICACIÓN

El análisis y evaluación espacio-temporal de la oferta de agua a nivel de cuenca en un sistema conformado por una variedad de actores, es un aspecto fundamental para la planificación del uso de los recursos hídricos para ello se debe recurrir a metodologías que involucren el uso de herramientas para la gestión que permitan manejar escenarios de estrés hídrico como los que presentan algunos ríos de la costa peruana. Ante esto surge la necesidad de tener un modelo de gestión, calibrado y validado que permita generar respuestas para las tomas de decisiones. En este caso, el área de estudio recae en la cuenca del río Chancay-Huaral, cuenca donde la mayor parte de la fuente hídrica es destinada a la principal actividad de desarrollo, la agricultura. Convirtiéndose así, en uno de los principales abastecedores de vegetales y frutas a la ciudad de Lima.

III. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Modelar la cuenca Chancay - Huaral, mediante el uso del modelo WEAP como base para la planificación hidrológica.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Análizar la información hidroclimatológica.
- Esquematizar la cuenca (oferta y demanda) en el WEAP.
- Calibrar y validar el modelo WEAP.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros que intervienen en el programa.
- Estimar la oferta hídrica en subcuencas de interés hídrico.

IV. MARCO TEÓRICO

4.1 MODELO HIDROLÓGICO

Los modelos hidrológicos son herramientas fundamentales para el hidrólogo, en especial a la hora de proponer o realizar una adecuada gestión de los recursos hídricos. En este ítem se da un alcance de los conceptos y breve descripción de los tipos de modelos utilizados en la hidrología superficial.

4.1.1 CONCEPTO

- Un modelo hidrológico tiene como objetivo la representación de los procesos que conforman el ciclo hidrológico y la interrelación entre las variables que influyen en el mismo (Mediero, 2007).

- Un modelo de sistema hidrológico es una representación simplificada de fenómenos que ocurren durante el ciclo hidrológico, tales como la precipitación, evaporación, escorrentía y otros. Sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y salidas del sistema. Cada uno de los procesos: precipitación, evaporación, escorrentía y otros, pueden ser analizados separadamente y sus resultados ser combinados de acuerdo a la interacción entre los mismos (Alvarado, 2014).

4.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

En la Figura 1 se muestra la clasificación de los modelos hidrológicos. Estas pueden dividirse en dos categorías: modelos físicos y modelos matemáticos. Los primeros incluyen modelos que representan el sistema en una escala reducida, tal como un modelo hidráulico del vertedero de una presa; los modelos matemáticos representan el sistema hidrológico en forma abstracta, mediante un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de entrada y de salida. Los modelos matemáticos inicialmente se pueden dividir en 2 grandes grupos:

a) Modelos determinísticos.

Describen el comportamiento del ciclo hidrológico en forma de expresiones analíticas que relacionan las interacciones físicas entre sus componentes. Dado un conjunto de parámetros y variables de entrada va a producir siempre el mismo conjunto de variables de salida, no contemplándose la existencia del azar ni el principio de incertidumbre.

Son ejemplos de modelos determinísticos: la ecuación de balance hidrológico, la fórmula racional y el hidrograma unitario. Un modelo de este tipo corresponde a un algoritmo de cálculo que da un resultado único. Se pueden clasificar en 3 tipos:

- ***Los modelos empírico o de caja negra:*** los modelos Empíricos o de Caja Negra, están determinados en términos generales, solo por los datos de entrada y salida disponibles y no interesa o no se conoce su funcionamiento interno, un ejemplo clásico lo constituye el análisis de las relaciones lluvia-escurrimiento de una cuenca (Aranda, 1998).

  La falta de conocimiento acerca del sistema se compensa con datos de calidad y en cantidad suficiente de las variables de entrada y salida y a partir de estos datos podemos construir un modelo empírico que nos permita posteriormente, obtener las variables de salida a partir de un nuevo conjunto de valores para las variables de entrada.

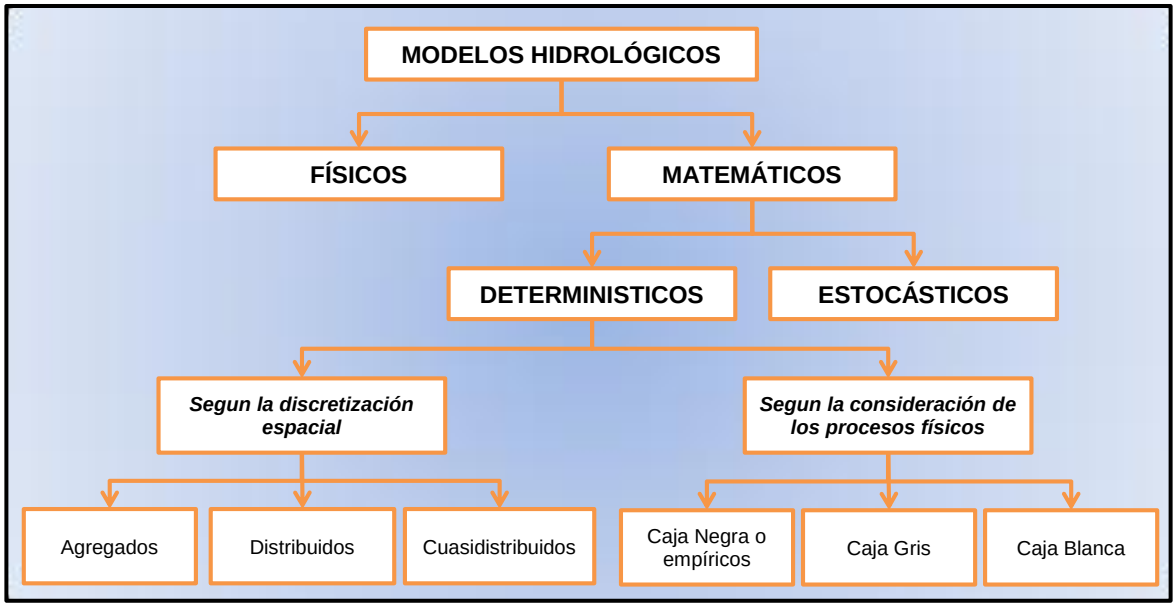


Figura 1. **Clasificación de modelos utilizados en hidrología.**

- ***Los modelos deterministas físicos o de cajas blancas:*** los modelos físicos se basa en las leyes físicas que rigen los procesos, en este caso se denominan, por contraposición modelos de caja blanca. Se trata de modelos en los que las transferencias de materia y energía entre sus componentes se rigen mediante

ecuaciones físicas y que además cumplen las leyes de conservación de la materia y la energía, tanto para el conjunto del modelo como para cada uno de los submodelos.

Para el diseño de un modelo físico, es necesario un alto conocimiento acerca de cómo funciona el sistema a modelizar, de esta manera, el modelo resultante permite transformar unas variables de entradas en variables de salidas.

- ***Los modelos deterministas de caja gris o conceptual:*** son modelos en los que el sistema se descompone en una serie de componentes que se resuelven como modelos empíricos pero cuya integración se basa en principios físicos o al menos en cierto conocimiento a priori de cómo funciona el sistema.

  Además estos 3 tipos de modelos deterministas admiten una segunda clasificación según se atiende a la variabilidad espacial de los parámetros y/o las variables como:

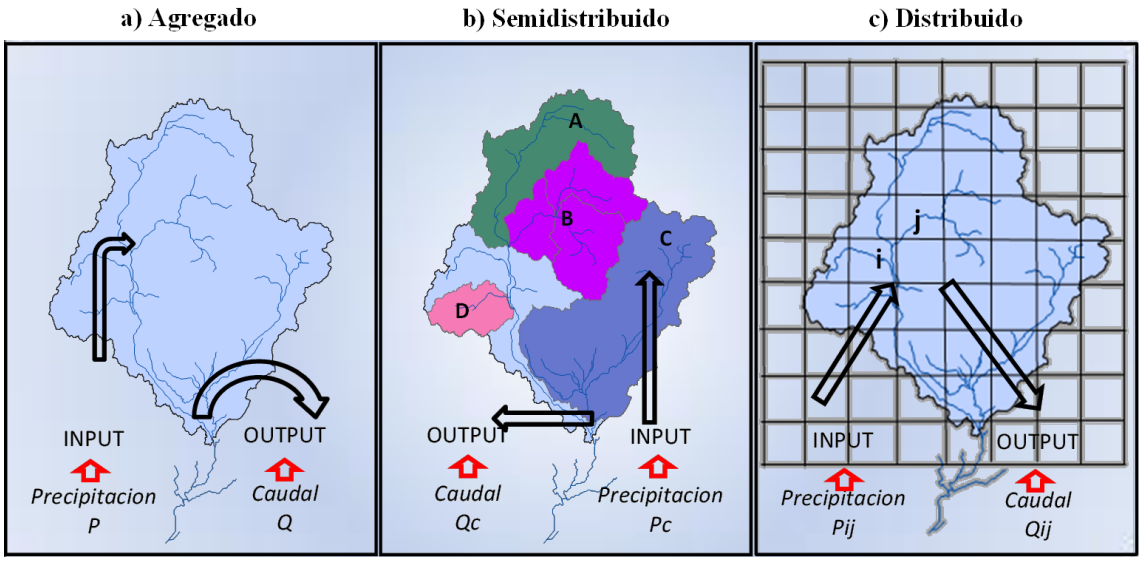


Figura 2. Clasificación según el grado de discretización de una cuenca.

➢ ***Modelos agregados:*** Son modelos que no considera la variabilidad espacial o la cuenca es representada como una sola celda (Figura 2a). Entonces una cuenca al modelarla de forma agregada consideramos por una parte las entradas por precipitación (INPUT), y por otra parte los caudales en un punto del río a la salida de la cuenca (OUTPUT). Siendo los valores de los parámetros (evapotranspiración, infiltración, etc.), valores medios para toda la cuenca considerada.

Una de las ventajas de estos modelos es que no necesitan de la calibración de demasiados parámetros y presentan una expresión matemática más sencilla, pero por el contrario nos dan valores medios.

- ***Modelos distribuidos:*** Estos modelos consideran la variabilidad espacial de variables y parámetros (Figura 2c). En este caso divide la zona a estudiar en celdas con diferentes valores para variables y parámetros. De esta forma, para cada celda tendremos un determinado valor de la precipitación (INPUT), y como respuesta a esta variable y a la interacción con las demás celdas, unos determinados caudales circulantes por cada punto (OUTPUT). Entonces este tipo de modelo recoge mejor la heterogeneidad del medio natural, lo que hace la necesidad de obtener mayor información y calibrar muchos parámetros, procesos de no ser realizados correctamente puede llevar a resultados aparentemente exactos, pero absolutamente alejados de la realidad.

- ***Modelos semidistribuidos:*** estos modelos intentan aprovechar las ventajas de los anteriores, evitando sus inconvenientes (Figura 2b). En el caso de una cuenca hidrográfica, un modelo semidistribuido abordaría el problema considerando diferentes subcuencas. Daria así un alto grado de precisión sin necesitar una entrada de datos grande.

b) Modelos Estocásticos.

Los modelos estocásticos incluyen generadores de procesos aleatorios dentro del modelo que modifican ligeramente algunas de las variables. Con los modelos Estocásticos se generan series futuras de lluvias, de caudales, de niveles de embalse, o eventos extremos.

Los modelos estocásticos tienen su fundamento en el máximo aprovechamiento de la información contenida en las muestras analizadas. Su utilización como modelos predictores input-output en la evaluación de aportaciones es prácticamente nula, pues dada su sencillez (son generalmente lineales) están muy limitados en cuanto a la representación de los procesos hidrológicos (Estrela, 1992).

Los modelos estocásticos más habitualmente utilizados en la evaluación y análisis de los recursos hídricos son:

- Modelos autorregresivos (AR).
- Modelos autorregresivos de media móvil (ARMA).
- Modelos de correlación múltiple.

4.2 MODELO WEAP (WATER EVALUATION AND PLANING)

4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO WEAP

WEAP es una herramienta computacional desarrollado por el Stockholm Environment Institute con sede en Boston y el Tellus Institute, que provee un enfoque integral a la planificación y distribución del recurso hídrico balanceando la oferta de agua que es generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca con la demanda de agua (SEI, 2012).

El modelo WEAP cuenta con varios módulos que le permiten integrar a su estructura con otros modelos, como es el caso del modelo de agua subterránea MODFLOW y el modelo de calidad de agua QUAL2K. Entonces a través del modelo podemos realizar el manejo de agua dulce, asignación de recursos hídricos escasos, la planificación frente a la variabilidad e incertidumbre climática, con el fin de desarrollar e implementar estrategias sostenibles del uso del agua.

WEAP funciona usando el principio básico de balance de masa pudiendo ser aplicable para sistemas de agua potable rural, sistemas agrícolas, cuencas individuales o transfronterizo. El modelo es espacialmente continuo y describe el comportamiento de la cuenca de manera semidistribuida, tomando como unidades de análisis hidrológico el espacio definido denominadas "catchments", que son definidos a través de procedimientos de delimitación de subcuencas y bandas. A través de este proceso se obtiene las áreas y la distribución de cobertura vegetal dentro de cada zona de captación. Los datos climáticos requeridos para realizar la modelación incluyen precipitación, temperatura, humedad, viento, latitud y cantidad inicial de nieve (en caso de que esta variable sea relevante). Adicionalmente, los datos de caudales en estaciones de medición son utilizados para comparar los resultados del modelo y realizar las calibraciones.

4.2.2 MÉTODOS DE SIMULACIÓN

El modelo WEAP tiene 4 métodos para simular los procesos internos de una cuenca. Procesos como la evapotranspiración, el escurrimiento superficial, la infiltración y las demandas para riego u otro tipo de demanda que pueda tener la cuenca. Dichos métodos son (SEI, 2011):

a. Método de la FAO para demanda de riego

El método más simple de los cuatro, se basa en el cálculo de las demandas de evapotranspiración de los cultivo para determinar la demanda de riego dentro de la microcuenca (catchment). Este método no simula los procesos de escurrimiento ni de infiltración, ni realiza un seguimiento de la humedad del suelo.

b. Método precipitación – escorrentía de la FAO

Este método también determina las demandas de evapotranspiración para cultivos, y el resto de la precipitación no consumida por la evapotranspiración es simulada o los modela como escurrimiento hacia los ríos o las dirige a las aguas subterráneas mediante un enlace directo.

c. Método "MABIA"

Este método separa las demandas evapotranspirativas de los cultivos y la evaporación directa desde el suelo. Corresponde a una implementación para WEAP del software MABIA desarrollado por el Institut National Agronomique de Tunisie.

d. Método de Humedad del Suelo "soil moisture model"

El modelo de Humedad del Suelo es el más complejo de los cuatros métodos, y es el utilizado para hacer el modelamiento en la cuenca, la cual es detallada en el ítem 4.2.3.

4.2.3 MÉTODO DE LA HUMEDAD DEL SUELO

Este método modela conceptualmente el suelo como dos estanques, que representan la zona de las raíces y la zona profunda del suelo, entre los cuales existe una interacción que simula la percolación desde el estanque de la zona de raíces hacia el estanque profundo. Cada estanque tiene flujos de entrada y salida, los que dependen de las variables forzantes del modelo como también de los parámetros que representan el suelo. En la Figura 3, se presenta un esquema del método y los flujos con los cuales se realizan los balances en cada estanque.

Estos elementos a su vez funcionan de forma independiente, es decir, no existe trasvases desde un elemento a otro y los balances que rigen el método, se hacen para cada elemento por separado. Entonces la forma de conectar los resultados de los balances de cada unidad es mediante un cauce que conduce el agua hasta la salida de la cuenca.

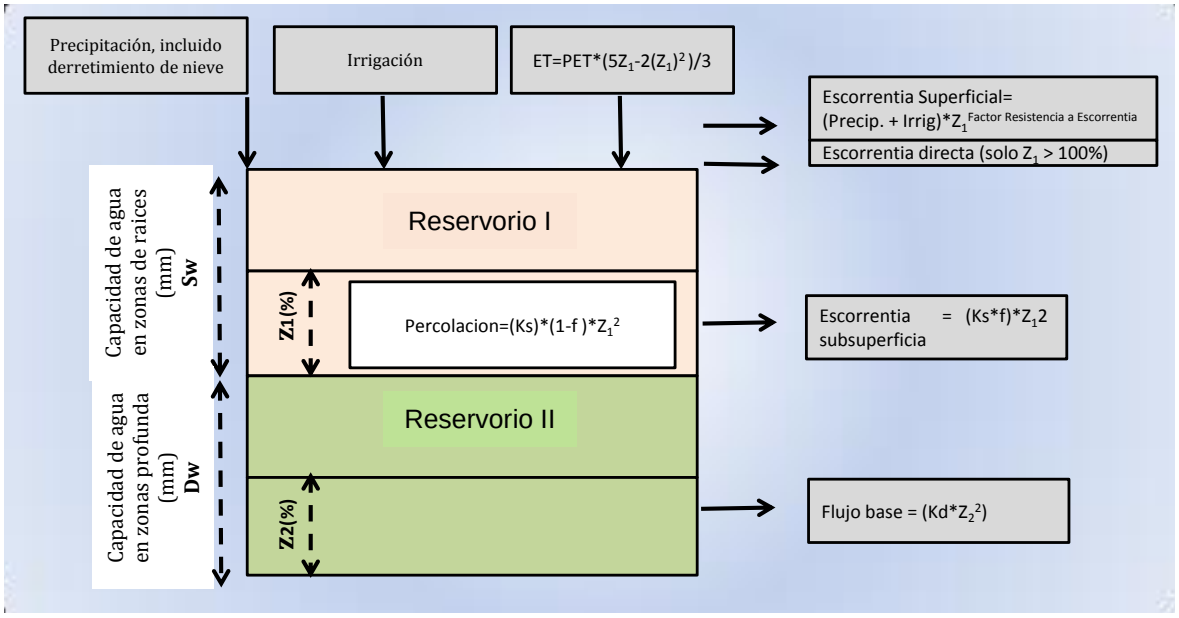


Figura 3. Esquema del método de humedad del suelo.

Las ecuaciones que rigen el método que aplican a los estanques de cada elemento son:

<u>Balde Superior:</u>

$$Sw_j\,(dz_{1,j}/dt) = Pe(t) - PET(t)K_{c,j}(t)((5z_{1,j} - 2z^2_{1,j})/3) - P_e(t)z_{1,j}^{(RRFj/2)} - f_jk_sz^2_{1,j} - (1-+f_j)k_sz^2_{1,j}$$

1er término: Cambio en humedad del suelo
2do factor : Precipitación efectiva (incluye riego y derretimiento de nieve)
3er término: Evapotranspiración
4to factor : Escorrentía superficial
5to término: Flujo intermedio
6to factor : Percolación

Dónde:

Sw_j : Almacenamiento de agua en la zona de raíces del elemento j (mm).
$Z_{1,j}$: Almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento en la zona de raíces [0,1].
Pe : Precipitación efectiva que incluye el derretimiento de nieve del manto nival de la subcuenca.
PE : Evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia (Penman-Montieth).
$k_{c,j}$: Coeficiente de cultivo para el elemento j.
k_{sj} : Conductividad en la zona de raíces para el elemento j.
RRF_j : Resistencia a la escorrentía en el elemento j.
f_j : Coeficiente de partición relacionado al suelo, tipo de cobertura y topografía. Representa la dirección preferida del flujo que fluctúa entre horizontal y vertical [0,1]

Balde Inferior:

$$Dw_j\,(dz_{2,j} / dt) = -K_d Z^2_{1,j} + (1-f_j)k_s Z^2_{2,j}$$

1er término: Flujo Base
2do término: Percolación

Dónde:

Dw_j : Percolación profunda desde los estanques 1 de todos los elemento.

Z_{1j}, Z_2 : Almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento en la zona de raíces y de la zona profunda respectivamente [0,1].

k_{s2} : Conductividad en la zona saturada del estanque profundo.

f_j : Coeficiente de partición relacionado al suelo, tipo de cobertura y topografía. Representa la dirección preferida del flujo que fluctúa entre horizontal y vertical [0,1]

El modelo cuenta con una gran cantidad de parámetros, sin embargo, para el caso de estudio, la calibración se basa en los parámetros más importantes desde el punto de vista conceptual y de importancia para las ecuaciones que rigen el método (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros del uso del suelo.

Coeficiente de cultivo	(Kc)
Capacidad de agua en la zona de raíz	(SW)
Capacidad de agua profunda	(DW)
Conductividad profunda	(Kd)
Factor de resistencia al Escurrimiento	(RRF)
Conductividad en la zona de raíz	(Ks)
Dirección de flujo preferente	(PFD)
Inicial	Z_1
Inicial	Z_2

4.2.4 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DEL MODELO WEAP

Según Vicuña y Escobar (2009) el proceso de aplicación de un modelo WEAP consta de las siguientes etapas:

a) Definición del estudio: En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema**.**

b) Búsqueda de información: En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.

c) Desarrollo del modelo: En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.

d) Calibración: Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.

e) Uso del modelo, generación de escenarios: Una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación.

4.3 MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE

Según Cabrera (2012)**,** la función objetivo es usualmente una medida de bondad de ajuste (error de balance de masas, coeficiente de correlación, eficiencia de Nash-Sutcliffe, etc), pero también puede ser una combinación de estas (dependiendo de la importancia que el investigador asigne a las diferentes medidas de bondad de ajuste) recibiendo entonces el nombre de función "multiobjetivo". Usualmente, una función multiobjetivo (G) asume las siguientes formas:

$$G = \sum_{i=1}^{n} w_i F_I \quad G = \sum_{i=1}^{n} w_i |F_I| \quad G = \sum_{i=1}^{n} w_i {F_I}^2 \qquad (1)$$

Donde *Fi* son las medidas de bondad de ajuste consideradas dentro de la función multiobjetivo, mientras que *wi* son los pesos asignados a cada una de dichas medidas. Usualmente, no se hace distinción y se hace uso del término "función objetivo" para referirse a una función objetivo simple o a una multiobjetivo.

Un ejemplo de uso de la función objetivo es mostrado en la Figura 4. La serie de datos simulada no ajusta perfectamente con la serie observada; para mejorar el ajuste se propone utilizar el criterio de Nash (escalar o logarítmico) y el error de volumen. El efecto que tiene el criterio de Nash sobre la simulación es de "desplazar verticalmente" hacia arriba o hacia abajo toda la serie, mientras que el error de volumen permite desplazar horizontalmente la serie. Para el ejemplo mostrado, la combinación de estos dos criterios dentro de la función objetivo permitirá controlar mejor el proceso de calibración del modelo. El uso de las funciones objetivo brinda un criterio analítico y objetivo para la definir la calidad de ajuste del modelo; sin embargo, este análisis debe ser complementado con un análisis visual.

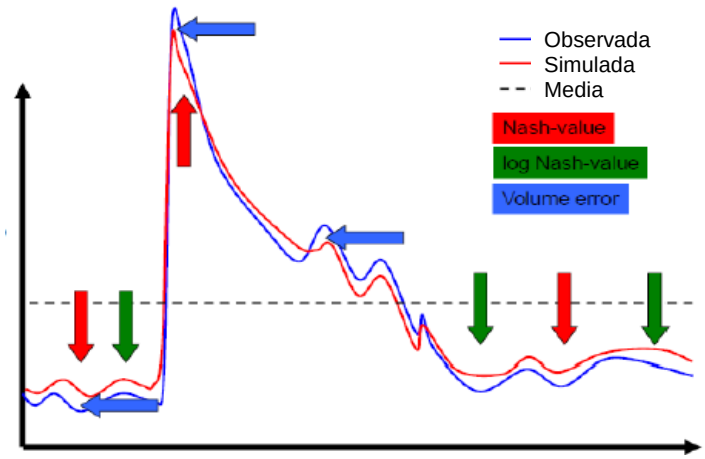


Figura 4. Efectos de las medidas de ajuste sobre la calibración de un modelo**.**

La calibración de modelos usualmente se enfoca en un "criterio de exactitud", el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para evaluar el comportamiento y ajuste del modelo empleado conviene utilizar los siguientes indicadores:

4.3.1 COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)

El coeficiente de determinación R^2 varía entre 0 y 1, es mejor mientras está más cercano a 1. Se usa como una medida de dispersión del modelo. Este coeficiente puede interpretarse como la proporción de varianza representada por los valores calculados con el modelo respecto a los valores observados. Cov (Qo, Qs) es la covarianza entre los valores observados y los calculados, Sd(Qo) es la desviación típica de valores observados y Sd (Qs) es la desviación típica de los valores calculados (Mena, 2010).

$$R^2 = \frac{\mathrm{COV(Qo,Qs)}}{\mathrm{Sd(Qo)xSd(Qs)}} \quad (2)$$

4.3.2 EFICIENCIA DE NASH - SUTCLIFFE (E)

El criterio de Nash-Sutcliffe es un indicador específicamente desarrollado para cuantificar el poder predictivo de un modelo Hidrológico. Se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{sim,i} - Q_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \bar{Q})^2} \quad (3)$$

Y mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, E=1; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces E=0 (Cabrera, 2012)**.** Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe.

E	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

4.3.3 PORCENTAJE DE DESVIACIÓN RESPECTO DE CAUDALES OBSERVADOS (PBIAS)

Este indicador es una medida de la tendencia media de los caudales simulados a ser mayores o menores que los observados. Un valor óptimo del indicador es 0. Un valor positivo indica que el modelo tiende a subestimar los caudales y un valor negativo indica sobreestimación de los caudales simulados. Se definió como criterio del comportamiento del modelo que un valor absoluto del PBIAS menor al 20% se considera como un "*buen*" nivel de ajuste, un valor entre 20 y 40% se considera "*satisfactorio*" y un indicador mayor a 40% se considera "*no satisfactorio*" (Muñoz, 2010).

$$PBIAS = \frac{\sum_{j=1}^{n}(Q_j - S_j)}{\sum_{j=1}^{n} Q_J} \quad (4)$$

De esta manera para evaluar la seguridad predictiva de un modelo pasa por dos etapas diferentes: *calibración y validación*. El primer grupo busca mejorar el ajuste entre los valores observados y los valores modelados de la variable de salida de interés, al variar reiterativamente los parámetros del modelo; proporciona confianza en que el modelo pueda reproducir para el periodo calibrado el registro histórico (Ocampo, 2012), mientras que el segundo grupo es usado en la validación del modelo, como una medida de seguridad de la calibración, permitiendo ser utilizado en la etapa predictiva de la modelación. Normalmente el modelo es menos robusto en la verificación debido a la utilización de un periodo en el que no se realiza optimización de parámetros.

4.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

"El análisis de sensibilidad 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, comprobar la lógica interna de un modelo (entender cómo funciona el modelo o por qué no funciona correctamente y aprender más acerca de su funcionamiento) y detectar si el modelo está sobreparametrizado, es decir si existen parámetros a los que el modelo resulta insensible **(**Mena, 2010).

V. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

5.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca Chancay-Huaral (Figura 5), está ubicado en la costa central del Perú hacia el norte del departamento de Lima, 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. Esta cuenca comprenden una variación altitudinal de 0 - 5259 msnm., y ocupa una superficie de 3 046 km^2.

5.2 DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA

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

- Norte: Cuenca Mantaro y Chancay-Huaral.
- Sur: Cuenca Chillón.
- Este: Cuenca Mantaro y Chillón.
- Oeste: El Océano Pacífico.

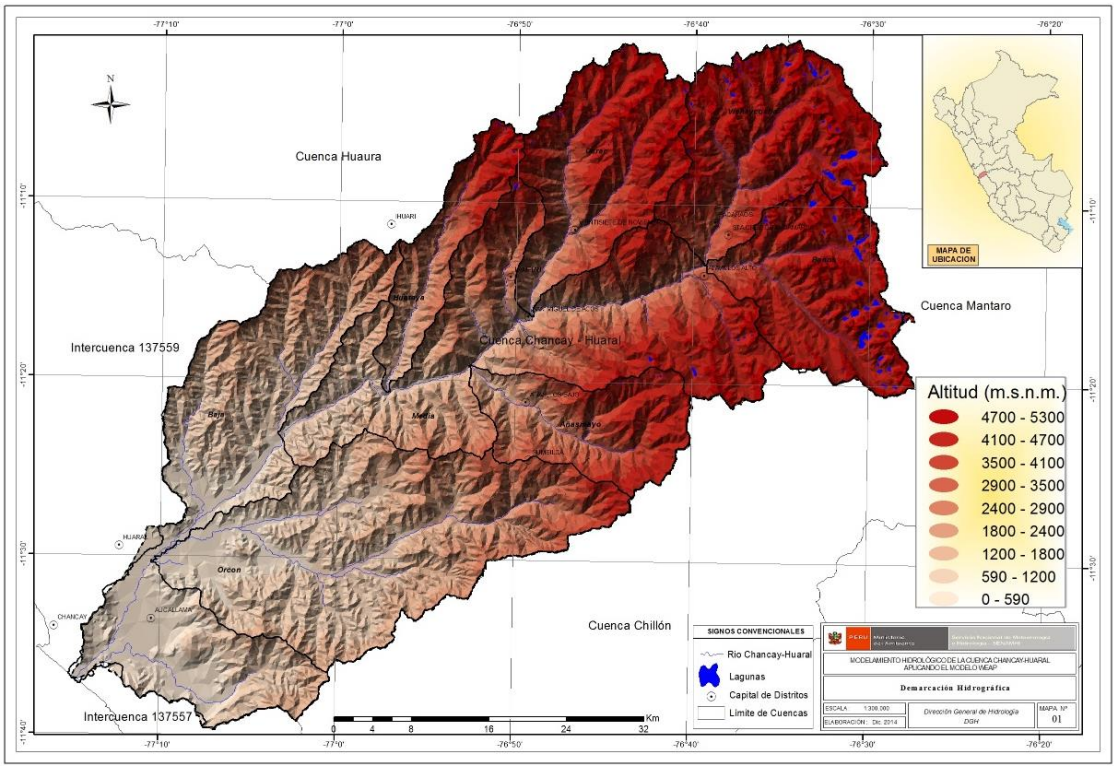


Figura 5. Ubicación y demarcación hidrográfica de Chancay-Huaral.

5.3 DEMARCACIÓN POLÍTICA Y ADMINISTRATIVA

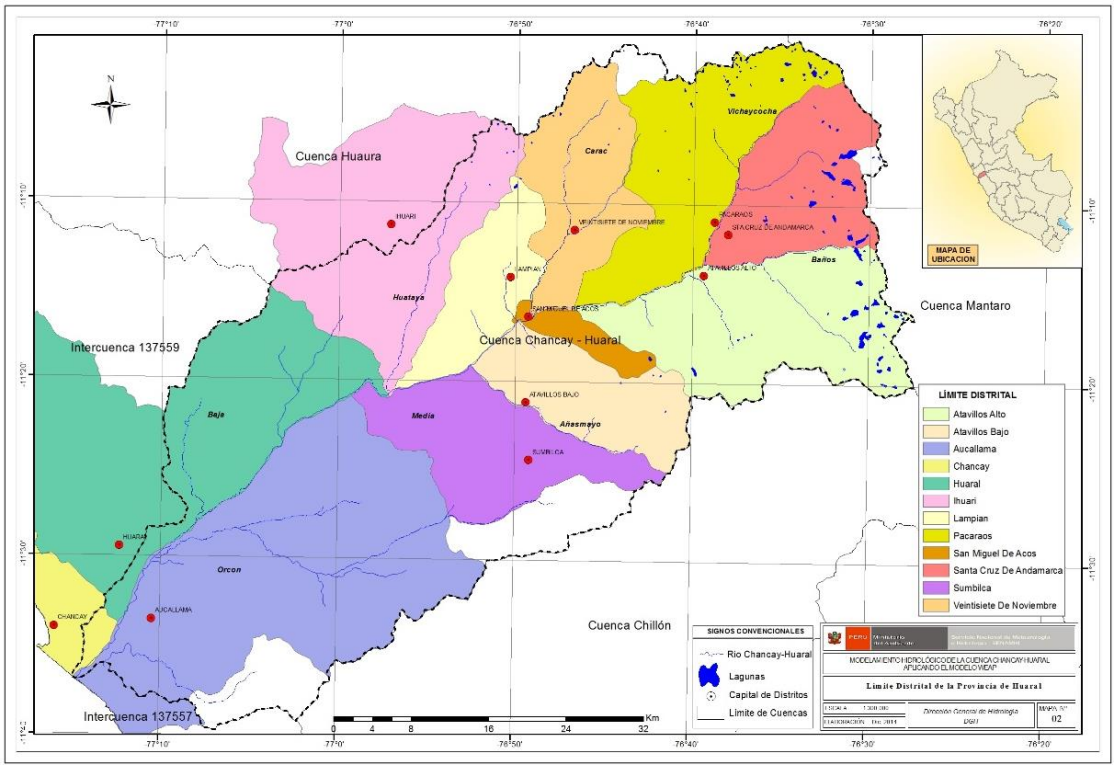


Figura 6. Límite distrital de la provincia de Huaral.

La cuenca del río Chancay-Huaral, políticamente se ubica en el departamento de Lima y abarca casi toda la provincia de Huaral y en menor proporción la provincia de Canta y comprende 12 distritos que se muestran en la Figura 6. La Administración Local de Agua (ALA) Chancay-Huaral, está encargada de administrar las aguas de uso agrario y no agrario en el ámbito de su jurisdicción, dependen jerárquicamente de la Autoridad Administrativa de Agua Fortaleza- Cañete (MINAG, 2011).

5.4 DESCRIPCIÓN SOCIOECONÓMICA

5.4.1 DEMOGRÁFICA

Se ha estimado que la población total de los doce distritos ubicados en el ámbito de la cuenca Chancay-Huaral, y según el reporte del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) del año 2007 es de 164 660 habitantes, que corresponde el 50.70% a la población masculina y el 49.3% a la población femenina. Así mismo en la Figura 7 se presentan los censos para la población urbana y rural, en donde la tendencia de la población rural tiende a disminuir y la urbana a aumentar, siendo el porcentaje del último censo 2007 de 17.0% y 82.90% respectivamente. La población urbana corresponde principalmente a las ciudades de Huaral, Chancay y Aucallama ubicadas en el valle de la cuenca Chancay-Huaral.

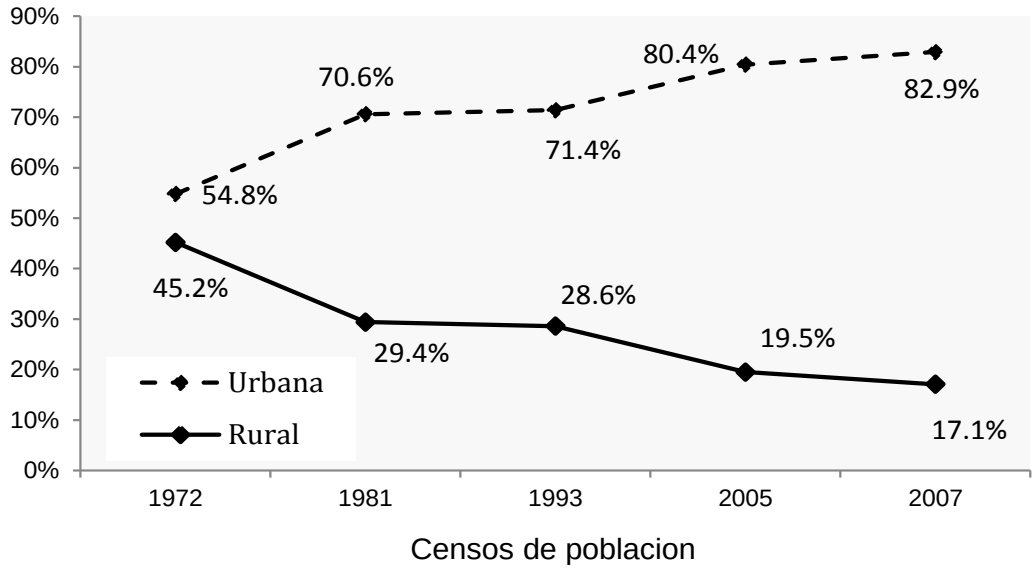


Figura 7. Censos de población en la cuenca Chancay – Huaral (Urbana y rural).

La Figura 8, muestra el crecimiento poblacional para los censos de los años 1981, 1993 y 2007. A partir de los censos se obtuvo las tasas de crecimiento anual del 2.18%, 1.93% y 2.04% que corresponde a los intervalos de los censos (1981-1993; 1993-2007; 1981-2007). Así se pudo elaborar los posibles escenarios de crecimiento poblacional al 2025 y 2050. Para ello se tomó como base la tasa de crecimiento del intervalo (1981-2007). Los escenarios muestran que la población de la cuenca Chancay-Huaral al 2025 llega a incrementarse en un tercio de la población y al 2050 supera fácilmente el doble de la población censada en el año 2007.

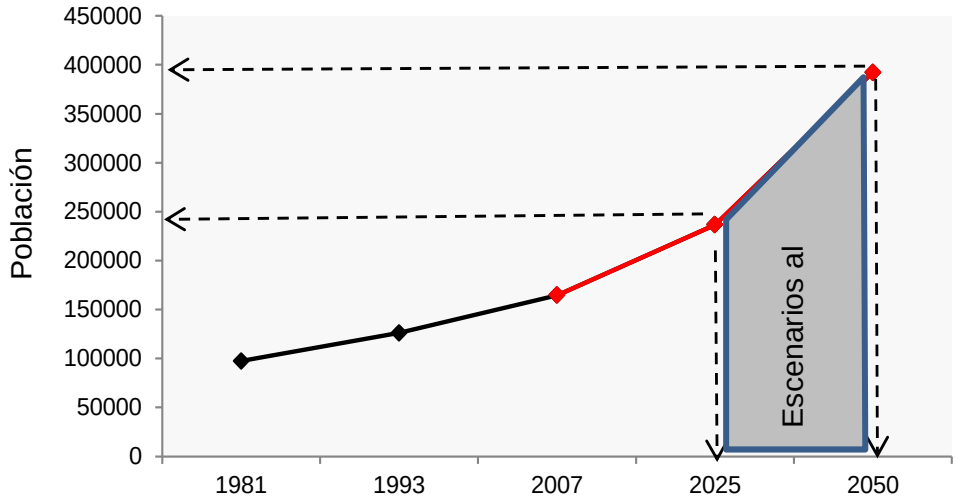


Figura 8. Escenarios de población de la cuenca Chancay – Huaral al 2025 y 2050.

5.4.2 ECONÓMICA

La actividad agrícola, es el principal soporte de la estructura productiva de la cuenca Chancay-Huaral, que está orientada al mercado local y principalmente para la ciudad de Lima. Entre los cultivos transitorios que más destacan tenemos: el algodón, el maíz amarillo duro, el marigol, cubriendo cerca del 50% del total del área agrícola. Los cultivos que les siguen en importancia son las hortalizas, los cereales y los tubérculos. Entre los cultivos permanentes destacan los frutales, entre ellos el manzano, la mandarina, el palto, el mango y el naranjo (Tabla 3). En la mayoría de los casos la agricultura en la parte media-alta de la cuenca su mayor problema es la falta de agua que les impide sembrar con mayor frecuencia, teniendo un riego por secano.

Tabla 3. Cultivos Permanentes Frutales (8355 Has).

POSICIÓN	CULTIVO	HECTAREAS	PORCENTAJE
1	Mandarina Satsuma Owari (Tardia)	1943	19.79 %
2	Manzana Israel	1094	11.14 %
3	Melocotón Huayco	657	6.69 %
4	Mandarina Malvasio	651	6.63 %
5	Mango Kafro	612	6.23 %
6	Palto Nalval Azul	488	4.97 %
7	Palto Fuerte Costa	438	4.46 %
8	Uva Borgoña	381	3.88 %
9	Lúcuma de Seda	340	3.46 %
10	Fresa Aroma	259	2.64 %
11	Fresa Sancho	254	2.58 %
12	Palto Hass	214	2.18 %
13	Flor Margarita	157	1.60 %

Continuación..

13	Flor Margarita	157	1.60 %
14	Esparrago UC 157 F1	151	1.54 %
15	Mandarina Murcott	134	1.37 %
16	Mandarina Rio de Oro	128	1.30 %
17	Naranja Washington Navel	123	1.25%
18	Mandarina Kori	121	1.23%
19	Fresa Americana/Holandesa	107	1.09 %
20	Mango Haden	103	1.05 %

Fuente: Diagnostico participativo consolidado cuenca Chancay-Huaral – Tomo II

Tabla 4. Cultivos y demanda de agua de riego estimada, valle Chancay-Huaral.

Cultivos	Meses - Volúmenes (Hm^3)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Algodón	5183	7626	5363	1972	291			530	2758	5663	7630	9471
Maíz	832	1067	1599	2481	4052	2740	1187	298	1251	2416	3060	1887
Sorgo	35	32	29							0.50	16	30
Papa	26	12	120	453	417	262	94	24	60	86	92	73
Camote	403	465	280	415	429	289	132	31	25	25	122	266
Yuca	58	115	134	113	52	7	3	2	23	46	65	90
Pallar	85	144	101	48	65	27	12	45	113	194	146	75
Frijol	162	387	1303	1435	807	220	173	57	99	166	214	102
Maní	34	14	2					3	10	25	46	63
Zapallo	52	186	251	198	65	15	19	7	14	41	54	54
Sandía, Melón	101	86	47	4				23	120	142	221	610
Cítricos	1050	1980	2357	2056	1260	864	846	861	996	1309	1528	1844
Manzano, Durazno, Palto, Olivo, Mango y Foristeria	2350	4005	3927	1282	562	386	377	390	803	1874	3144	4005
Plátano Maracuyá, Flores Vivero	1146	2180	2595	2259	1388	952	931	896	1054	1433	1679	2024
Vid, Fruta de Hoja Caduca	221	393	413	288	137	57	56	101	174	281	358	431
Alfalfa	193	297	354	277	151	91	70	71	96	148	184	251
Demanda Neta Agrícola (MMC)	**11931**	**18989**	**19126**	**13281**	**9676**	**5910**	**3900**	**3339**	**7596**	**13850**	**18559**	**21276**
Demanda Bruta Agrícola (MMC)	**29828**	**47473**	**47185**	**33203**	**24190**	**14775**	**9750**	**8347**	**18900**	**34624**	**46398**	**53190**

Fuente: Diagnóstico participativo consolidado cuenca Chancay-Huaral – Tomo II

La actividad pecuaria dentro de la estructura productiva del distrito de Chancay solo es importante en el aspecto referido a la actividad avícola y a la crianza de porcinos, en tanto que la actividad de crianza de vacunos, ovinos y caprinos constituye actividades complementarias a la actividad agrícola. La tendencia de esta actividad, hacia el año 2006, mantuvo la importancia de la actividad avícola, constituyéndose una de las principales a nivel nacional. La población que se incrementó significativamente fue de aves de 1 310 295 en 1994, a 2 137 000 en el año 2006.

5.5 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 la ONERN en la elaboración de mapas climáticos del Perú descrito en el informe titulado "Información básica de los recursos naturales en el Perú" de ONERN 1966.

De acuerdo a esta clasificación y considerando el factor altitudinal desde el litoral hasta la divisoria se han identificado cinco tipos climáticos predominantes en la cuenca del río Chancay – Huaral que varía de árido y semi-cálido a pluvial y gélido. Cada uno de estos tipos climáticos está asociado a una determinada formación ecológica que nos determinan a su vez las zonas de vida natural con que cuenta la cuenca.

Según EMAPA (2005), la Clasificación climática con su correspondiente formación ecológica es:

a) Clima Per-Árido y Semi-Cálido (0 – 2000) msnm.

El promedio anual de precipitación es de 8mm a 36mm.
La temperatura varía entre 17 y 24 ºC, con un promedio de 19 ºC.
La humedad relativa es de 78%, la estación invernal es fría con un alto porcentaje de humedad atmosférica, especialmente en el valle, la cual varía de 80 a 90%, de verano a invierno. La formación ecológica perteneciente a este sector climático es:

- ***Desierto Sub-Tropical o Desierto Pre-Montaña:***
  Debido a la abundancia de agua, este suelo es óptimo para el desarrollo agrícola. Hay cuatro cultivos importantes; algodón, maíz-chala, cítricos y pomoides. Vegetación cerca de la costa sobre suelos salinazos consiste de especies típicas de los géneros Distichilis y Samicordia (grama salada), sobre las dunas de arena, especies de los géneros Tillandsia y Pitacairnia (achupallas) que son plantas perennes sin raíces.

  En las áreas de mayor elevación (1500 – 2000 msnm.) se aprecia especies típicas de los géneros Céreus (cactáceas) que son plantas perennes y de raíces profundas.

- ***Maleza Desértica Sub-Tropical o Matorral Desértica Pre-Montaña:***
  Área pequeña situado en el valle (1300 – 2000) msnm., zona de condiciones térmicas (18 ºC). Los principales cultivos son los frutales de manzana, peras y duraznos, los cuales se encuentran bajo riego. Presentan especies de vegetación arbustiva perenne de tipo espinoso y herbácea temporal que sirve de sustento a una reducida ganadería lanar y bovina.

b) Clima Semi-Árido y Templado (2000 – 3000) msnm.

La precipitación promedia anual de 300mm.
La humedad relativa de 67%.
El período sin lluvia es de mayo hasta septiembre, con una precipitación muy desuniforme desde octubre a abril. A veces la temperatura desciende por debajo de los 0 °C, dando lugar a la ocurrencia de heladas.

La formación ecológica que se encuentre en este sector climático es:

- ***Maleza Desértica Montano Bajo o Estepa-Espinosa Montano Bajo:***
  Condiciones poco favorables para la agricultura y/o ganadera, la vegetación esta relegada a pequeñas áreas semi-accidentadas de fondo de valle, los principales cultivos son los frutales diversos (especialmente duraznos), maíz, papas, arvejas, lentejas y pastos escasos que son aprovechados por el ganado. La vegetación natural es muy similar al de la zona Per-Árido y Semi-Cálido, pero sumamente disminuidas debido al clima. Se encuentra de los géneros Agabe y Foucroya, el maguey, notorio para su apariencia, del género Spartim, la retama, del género Caesalpinea, el taro, y en el nivel más bajo (2200 msnm. aproximadamente), el molle, del género Schinus, gigantones, candelabros, tunas, sauce, carrizos, luquerilas, alisos, nogales, capulí y gramíneas especialmente el Picuyo.

c) Clima Sub-Húmedo y Frío (3000 – 4000) msnm.

La precipitación promedio anual es de 500 mm./año. La temperatura promedio de 11 ºC. La humedad relativa de 65% a 67%.
Las precipitaciones regulares y temperaturas netamente frías, durante los meses de mayo a septiembre descienden por debajo de 0 ºC, hay intensas heladas.

La formación ecológica en esto sector se caracteriza:

- **Estepa Montana y Bosque Húmedo Montano:**
  Presentan condiciones bastante favorables para la agricultura andina como el trigo, las cebadas, el maíz, la arveja etc. La vegetación natural de especies que se adaptan al suelo que esta sobre pastoreo, como ***la tola***, arbusto semi-leñoso, resinoso, de sistema radicular profundo, muy poco exigente en suelos, y *el* ***chocho silvestre***, planta arbustiva, semi-leñosa, de raíces profundas, adaptable a suelos degradados de laderas.

d) Clima Muy Húmedo y Frígido (4000 – 4800) msnm.

Las lluvias son más intensas, estimándose un promedio de 700 a 800 mm de precipitación al año, con una distribución menos desuniforme que en las áreas más bajas.
Las temperaturas son extremadamente bajas, promoviendo continuas e intensas heladas imposibilitando el desarrollo de cualquier vegetación cultivada, y su promedio anual esta alrededor de los 6.6 °C llegando en las noches a temperaturas de congelación.

La humedad promedio anual es de 68%. La formación ecológica que se encuentra en este sector climático es:

- ***Páramo Sub-Alpino o Páramo muy Humedad Sub-Alpino:***
  Muy apropiado para el desarrollo de praderas naturales alto-andinas, cuenta con especies arbustivas y/o arbóreas en forma diseminada, en esta zona el pastoreo es intensivo y sin control, y los bosques son explotados indiscriminadamente. Esta formación ecológica esta subdividida a su vez en:

  Páramo Sub-Alpino propiamente dicho
  Comprendido entre los 4000 y 4600 msnm.
  Tendencia a Tundra Pluvial Alpino
  Comprendido entre los 4600 y 4800 msnm. El área forrajera es muy similar a la de la formación dominante con la diferencia de que las temperaturas invernales son algo más bajas.

e) Clima Pluvial y Gélido – Tundra Pluvial Alpino (4800 msnm. – divisoria)

Se da en un área muy poco de extensión. El promedio de precipitación anual superior de 900 mm, y una gran proporción en estado sólido como granizo y nieve, con temperaturas de congelación casi permanente entre los -7 y 0 ºC. La formación ecológica en esto sector se caracteriza:

- ***Tundra Pluvial Alpino:***
  Donde se desarrollan especies vegetales hemicriptofíticas almohadillas a arrosetadas y gramíneas de desarrollo muy reducido.

5.6 COBERTURA VEGETAL

En la cuenca del río Chancay-Huaral se pueden distinguir varios tipos de cobertura vegetal, cuya descripción se presenta en la Tabla 5 y Figura 9. La descripción se elaboró a partir de la información del estudio del Plan de Gestión de Riesgos y adaptación al Cambio Climatico en el sector agrario PLANGRACC-A (2012).

Tabla 5. Características de la cobertura vegetal de la cuenca Chancay – Huaral.

Cobertura Vegetal	*Área (Km^2)*	*Área (%)*	*Descripción*

Nevados	5.4	0.2	Ubicadas en la parte alta de la cuenca que alimenta a los ríos y bofedales, estos últimos permanecen inundados permanentemente con ligeras oscilaciones en periodos secos
Lagos y Lagunas	7.7	0.3	
Bofedal	11.5	0.4	
Tierras alto andinas sin Vegetación	132.3	4.3	Pertenece en zonas de clima frío
Césped de Puna	437.5	14.4	Son dos tipos de asociaciones de herbáceas, se extiende aproximadamente a partir de los 4000 msnm, que caracteriza un ambiente frio y húmedo.
Pajonal/Césped de puna	311.5	10.2	
Herbazal de Tundra	5.3	0.2	Se localiza sobre los 4500 y 4900 msnm. El relieve es abrupto, producto del intenso modelaje glaciar, con gran cobertura de rocas.
Matorrales / Cultivos agropecuarios	891.9	29.3	Los matorrales se diferencia según el piso altitudinal que ocupan. Comprende entre los 2 000 y 4 000 msnm.
Cultivos Agrícola	105.1	3.4	Localizada en los valles costeros, cultivos importantes como el maíz amarillo duro, algodón, mandarino, palto etc.
Planicies costeras y estribaciones andinas	1138.2	37.4	Son áreas con ausencia de vegetación, conformadas por las planicies del desierto costero y las primeras estribaciones andinas.
Total	**3046.4**	**100**	

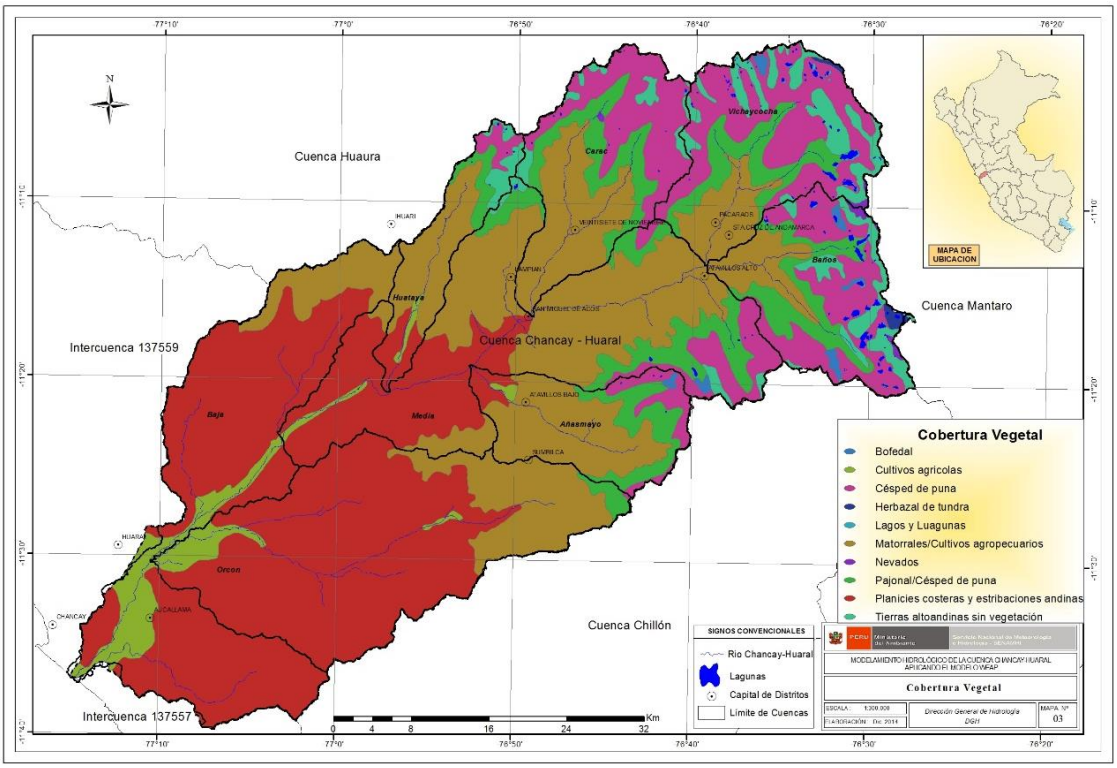


Figura 9. Cobertura vegetal de la cuenca Chancay-Huaral.

5.7 HIDROGRAFÍA

El relieve de la cuenca es el de una hoya hidrográfica de forma alargada, fondo profundo y de pronunciada pendiente, que desciende rápidamente desde alturas

máximas de 5300 msnm., hasta el Océano Pacífico. El 90% de su extensión es una zona montañosa de fisiografía escarpada y el 10% restante corresponde al sector inferior de la cuenca, en donde por efecto de la brusca disminución de la pendiente, se ha formado una pequeña llanura aluvial que constituye el valle (1969, ONERN).

El río Chancay-Huaral tiene su origen en la confluencia del río Vichaycocha y Chicrín, este río recibe a lo largo de su recorrido, los aportes de las unidades hidrográficas tributarias de Baños, Carac, Añasmayo, Huataya y Orcón. El área contribuyente al escurrimiento superficial o cuenca colectora húmeda es de 1 621 km², considerado sobre la cota 2 400 msnm., (MINAG, 2002).

El régimen del río Chancay-Huaral es irregular, como los demás ríos de la costa y de carácter torrentoso, este recurso es generado como consecuencia de los aportes de precipitaciones y de una serie de lagunas. La cuenca presenta 02 periodos estacionales bien definidos, la época de avenidas, que comprende los meses de diciembre a abril y la época de estiaje, que comprende los meses de mayo a noviembre respectivamente, y presenta un caudal media anual de 15.7m^3/s.

Hidrográficamente la cuenca Chancay–Huaral se ha delimitado en 8 unidades hidrográficas principales Figura 10, de las cuales seis son tributarias: Subcuenca Vichaycocha – (3000 – 5000 msnm..); subcuenca Baños – (3000 – 5000 msnm.); subcuenca Carac – (1600 a 4800 msnm.); subcuenca Añasmayo – (1200 a 4800 msnm.); subcuenca Huataya – (900 a 4800 msnm.); subcuenca Orcón y dos son las subcuenca Medio Chancay (hasta la estación de aforo) y subcuenca Baja (estación Santo Domingo hasta la desembocadura).

5.8 CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS

Las características físicas de una cuenca son elementos que tienen una gran importancia en el comportamiento hidrológico, debido a que existe una estrecha correspondencia entre el régimen hidrológico y dichos elementos por lo cual el conocimiento de éstos reviste gran utilidad práctica ya que al establecer relaciones y comparaciones de generalización de ellos con datos hidrológicos conocidos, pueden determinarse indirectamente valores hidrológicos en secciones de interés práctico donde falten datos o donde por razones de índole fisiográfica o económica no sea factible la instalación de estaciones hidrométricas (MINAG, 2010). La Tabla 6 muestra un extracto de los parámetros fisiográficos más importantes de la cuenca Chancay-Huaral descritos en el estudio MINAG (2002).

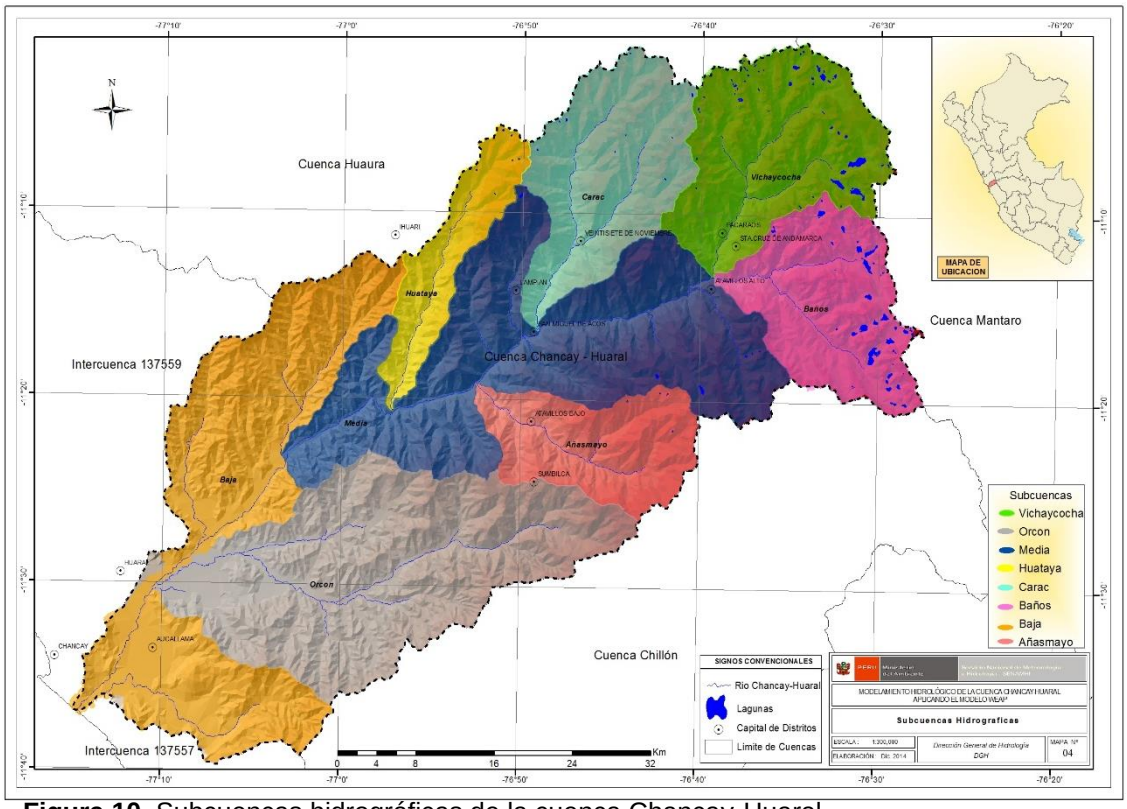


Figura 10. Subcuencas hidrográficas de la cuenca Chancay-Huaral.

Tabla 6. **Parámetros geomorfológicos de la cuenca Chancay – Huaral.**

Fuente: Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos de la cuenca Chancay – Huaral. Diciembre del 2001.

PARAMETROS GEOMORFOLOGICOS	SIMBOLOGIA	UNIDADES	CUENCA CHANCAY-HUARAL	SUBCUENCAS							
				VICHAYCOCHA	BAÑOS	CARAC	AÑASMAYO	HUATAYA	ORCON	MEDIA	BAJA
1.-CODIGO PFASTETTER			137558								
2.-SUPERFICIE O AREA	A	Km^2	3094,,82	321.69	264,97	296,33	202,14	134,10	611,63	631,07	632,89
3.-PERIMETRO	P	Km	327,83	118.56	105.83	111.06	89.90	97.30	177.31	261.90	255.92
4.-LONGITUD CAUCE PRINCIPAL	La	Km	120,07	30,81	24,79	33,83	29,05	32,83	53,52	53,50	35,76
5.- COEFICIENTE DE COMPACIDAD	Kc	-	1,66	1,43	1,41	1,44	1,40	1,84	1,51	2,26	2,21
Definición e interpretación			De oval oblonga a rectangular oblonga	De oval redonda a oval oblonga	De oval redonda a oval oblonga	De oval redonda a oval oblonga	De oval redonda a oval oblonga	Casi rectangular alargada	De oval oblonga a rectangular oblonga	Casi rectangular alargada	Casi rectangular alargada
6.- FACTOR DE FORMA	Kf	-	0,21	0,34	0,43	0,26	0,24	0,12	0,21	0,22	0,49
Definición e interpretación			Rectangular o alargada	Rectangular o alargada	Rectangular o alargada	Rectangular o alargada	Rectangular o alargada	Rectangular o alargada	Rectangular o alargada	Rectangular o alargada	Rectangular o alargada
7.- RECTANGULO EQUIVALENTE	L	Km	142,54								
	l	Km	21,37								
8.- CURVA HIPSOMETRICA	-	-									
ELEVACION MEDIA	Em	msnm	2727								
PENDIENTE MEDIA	Sc	%	47,76								
PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL	Sm	%	3,15								
9.-ORDEN DE CORRIENTES	Oc		6	5	5	5	5	5	5	5	6
10.-DENSIDAD DE DRENAJE	Dd	Km/Km^2	0,59	0,48	0,43	0,53	0,59	0,51	0,75	0,57	0,60
11.-FRECUENCIA DE CORRIENTES	Fc	Km-2	0,28	0,26	0,26	0,25	0,29	0,19	0,39	0,24	0,24

5.9 RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL

Las áreas irrigadas del valle Chancay-Huaral son abastecidas por las aguas provenientes del río del mismo nombre, por las aguas de retorno y de manera complementaria con agua subterránea. Además, la Junta de Usuarios opera un sistema de lagunas reguladas que son utilizadas en tiempos de estiaje, de las cuales la mayoría se ubican en la misma cuenca excepto la del sistema Pajuanca, ubicada en la cuenca del Mantaro y que a través de un sistema de canales y túneles se transvasa para incorporarse a la disponibilidad hídrica del sistema de riego Chancay-Huaral. Los aportes hídricos superficiales que se dispone para atender la demanda hídrica, se miden en la estación hidrológica Sto. Domingo, que tiene un limnígrafo como sistema de medición. Desde la estación aguas abajo, el río es captada por 34 bocatomas que alimentan a los canales principales (CD) y canales laterales (L1 y L2). Las bocatomas tienen medidores que registran el caudal y los canales laterales tienen reglas graduadas o miras. De las 34 bocatomas, catorce son rústicas, dieciséis son semipermanentes y cuatro son permanentes (MINAG, 2011).

En la Figura 11, 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 hidrométrica Santo Domingo.

El tipo de irrigación en el valle Chancay-Huaral es por gravedad y la asignación de agua a cada comisión de regantes se efectúa a nivel de bocatomas la cual es manejado por la Junta de Usuarios. La asignación de agua está en función al área a cultivar y no al uso consuntivo del cultivo. Además, las asignaciones varían de acuerdo a la disponibilidad de agua, así, en épocas de abundancia el ($Q>18m^3/s$) se declara el estado de “Toma libre”, en estiaje el ($Q<10m^3/s$) solo la comisión de Chancayllo riega por toma libre y el resto por turnos (mita), y cuando el déficit de agua se acentúan se ejecutan las descargas de las lagunas reguladas.

La Junta de Usuarios del distrito de riego Chancay-Huaral, históricamente ha apelado al criterio de distribución que esta función a la disponibilidad del río Chancay-Huaral, medido en la estación hidrométrica Santo Domingo y mediante coeficientes establecidos, que son directamente proporcional al área de influencia de cada canal de riego. Al promedio del caudal aforado del día anterior, registrado en la estación hidrológica Sto. Domingo se le disminuye en 12%, como pérdida de conducción del cauce del río y 140 l/s destinados a satisfacer la demanda poblacional. De este caudal, el 30 por ciento se le asigna a la Comisión de Regantes La esperanza; la diferencia se distribuye entre nueve canales de derivación de acuerdo a unos coeficientes (Tabla 7).

Tabla 7. Coeficientes de distribución de agua provenientes del río Chancay-Huaral.

CANAL DE DERIVACIÓN										
Quipullin	Cuyo	Saume	Huayan	Palpa	La Esperanza	Caqui	Huando	San Jose	Chancay-Huaral	Uso Poblacional
COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN										
0.0074	0.042	0.0083	0.0314	0.152	0.3	0.058	0.1357	0.074	0.4989	120lps

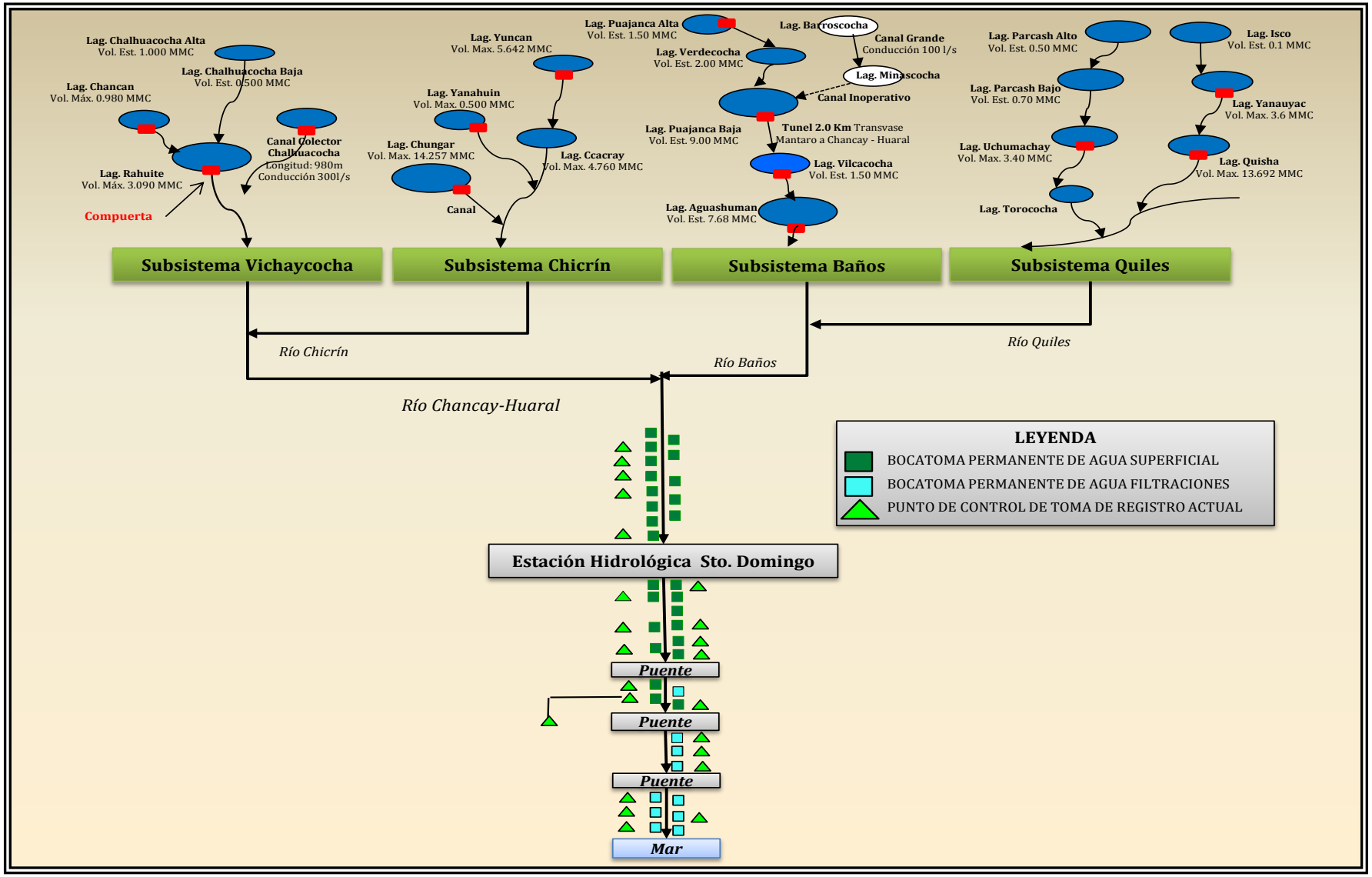


Figura 11. Sistema hidráulico de la cuenca Chancay-Huaral.

VI. DEMANDA DE AGUA PARA USO AGRÍCOLA

La demanda hídrica en el valle Chancay - Huaral es usualmente multisectorial, cuya mayor demanda se presenta en los sectores poblacionales y agrícolas. El uso de agua para fines de riego en el valle Chancay-Huaral es el más importante, por lo que se requiere medir y cuantificar la cantidad de agua tanto en las condiciones existentes de abastecimiento (consumo real) y conocer las obtenidas a partir de las necesidades hídricas de los cultivos (demanda teórica). Con lo cual nos va a permitir determinar los meses de mayor demanda y la capacidad del sistema para poder satisfacerla.

Con la finalidad de conocer las demandas de agua necesarias que serán incluidas en el modelo solo para su calibración y validación, se considera la misma información que fue procesada en la Propuesta de Asignaciones de Agua en Bloques – Volúmenes Anuales y Mensuales para la Formalización de los Derechos de Uso de Agua en el valle Chancay-Huaral realizado en el año 2004 por el PROFODUA (valle bajo) y 2006 (valle alto). La cual se mencionan parte de su desarrollo.

6.1 CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

La evapotranspiración potencial es la transmisión del agua en la atmósfera (que se toma como referencia), producida cuando el suelo está cubierto por un cultivo que abarque totalmente el área, con agua disponible en condiciones óptimas y condiciones meteorológicas existentes.

El calculo de la evapotranspiración potencial lo determinaron mediante el herramienta de riego CROPWAT y los datos meteorológicos de la estación Meteorológica Donoso consignado en el Sistema de Información de Riego (Tabla 8).

Tabla 8. Evapotranspiración de referencia Eto según Penman – Monteith.

País: Perú			Estación meteorológica: DONOSO			
Altitud: 180 metros			Coordenadas: 11,4 S.L 77,20 W.L			
Mes	Tem. Med. °C	Humedad %	Viento Km/día	Insolación horas	Radiación MJ/m^2/día	Eto – PenMon Mm/día
Enero	22,40	78,00	115,00	5,90	12,20	3,76
Febrero	23,30	78,00	115,00	6,50	12,70	3,98
Marzo	22,50	80,00	144,00	6,80	12,30	3,78
Abril	20,70	82,00	115,00	6,90	11,00	3,23
Mayo	19,00	85,00	115,00	5,00	8,30	2,39
Junio	17,40	86,00	115,00	2,60	6,30	1,79
Julio	16,60	87,00	86,00	1,90	6,10	1,67
Agosto	16,40	87,00	86,00	1,90	6,90	1,84
Setiembre	16,90	86,00	115,00	3,00	8,60	2,30
Octubre	17,50	84,00	173,00	4,10	10,10	2,76
Noviembre	18,70	82,00	144,00	4,80	11,00	3,10
Diciembre	20,30	80,00	144,00	5,40	11,60	3,42
Anual	19,30	83,00	122,00	4,60	9,80	1032,00

6.2 COEFICIENTES DE RIEGO (Kc) DE LOS CULTIVOS

La Tabla 9, muestra los coeficientes de cultivo (Kc) de los cultivos representativos del valle, comprendido para una Humedad relativa (>70%) y Velocidad de viento (0 – 5).

Tabla 9. Coeficiente de cultivos KC en el valle Chancay-Huaral.

Nombre cultivo	Tipo de cultivo	Fase de desarrollo		
		Inicial	Media	Final
Aji	Transitorio	0,35	0,10	0,70
Algodón	Transitorio	0,40	1,05	0,65
Alverja Grano Verde	Transitorio	0,40	0,95	0,90
Brocoli	Transitorio	0,65	1,00	0,90
Caihua	Transitorio	0,45	1,00	0,75
Camote	Transitorio	0,40	1,05	0,70
Cebolla	Transitorio	0,40	0,95	0,75
Cebolla China	Transitorio	0,65	1,00	0,80
Citricos	Permanente	0,75	0,65	0,75
Col o Repollo	Transitorio	0,35	0,95	0,80
Coliflor	Transitorio	0,35	0,95	0,80
Durazno	Permanente	0,45	0,90	0,65
Esparrago	Semipermanente	0,45	1,05	0,90
Flores	Semipermanente	0,35	1,00	0,50
Fresa y Frutilla	Semipermanente	0,30	1,05	0,90
Frijol blanco grano verde	Transitorio	0,35	1,05	0,80
Haba grano verde	Transitorio	0,35	1,05	0,80
Lucumo	Permanente	0,60	0,80	0,75
Maiz amarillo duro	Transitorio	0,35	1,05	0,55
Maíz Chala	Transitorio	0,35	1,05	0,55
Maíz choclo	Transitorio	0,65	1,15	0,60
Mandarino	Permanente	0,75	0,65	0,75
Mango	Permanente	0,75	0,80	0,75
Mani para fruta	Transitorio	0,35	1,10	0,55
Manzano	Permanente	0,65	0,65	0,70
Marigold	Transitorio	0,35	1,00	0,80
Naranjo	Permanente	0,75	0,70	0,75
Otras frutas	Permanente	0,75	0,65	0,70
Otras hortalizas	Transitorio	0,55	1,10	0,75
Otros pastos	Semipermanente	0,40	1,00	0,80
Pallar grano verde	Transitorio	0,35	1,05	0,80
Palto	Permanente	0,75	0,65	0,75
Papa	Transitorio	0,40	1,05	0,70
Pasto Natural	Semipermanente	0,30	0,75	0,75
Pasto pangola	Semipermanente	0,50	0,90	0,85
Pepino	Transitorio	0,60	1,00	0,75
Pimiento	Transitorio	0,60	1,05	0,90
Soya	Transitorio	0,50	1,10	0,45
Tomate	Transitorio	0,40	1,05	0,60
Vid	Permanente	0,40	0,85	0,65
Zanahoria	Transitorio	0,65	1,00	0,90
Zapallo	Transitorio	0,30	0,95	0,70

6.3 EFICIENCIA DE RIEGO

En el año 1997, la DGAS – INRENA, a través del proyecto de ordenamiento de los recursos hídricos de la cuenca Chancay – Huaral, determino una serie de eficiencias (conducción, distribución y aplicación) para las 17 comisiones de regantes que componen la Junta de Usuarios Chancay-Huaral. En la Tabla 10 se observan las eficiencias de riego para las diferentes comisiones de regantes.

Tabla 10. Eficiencia de riego del sistema de riego Chancay-Huaral.

Comisión de Regantes	EFICIENCIA (%)			Total
	Conducción	Distribución	Aplicación	
San Miguel	84	*94	40	32
Saume	84	*94	40	32
Cuyo	84	*94	40	32
Huayan-Hornillos	80	94	69	52
Palpa	75	76	67	38
La Esperanza	83	76	82	52
Caqui	71	74	70	37
Huando	78	72	64	36
Chancay Bajo	[1] 78	85	*70	46
Chancay Alto	[1] 78	*75	*70	41
Jesus del Valle	[1] 78	76	70	42
Retes Naturales	[1] 78	68	70	37
San Jose Miraflores	75	81	63	38
Boza Aucallama	74	75	68	38
Pasamayo	84	77	62	40
Las Salinas	76	77	67	39
Chancayllo	79	84	63	42

Fuente: DGAS-INRENA, 1997 "Ordenamiento de Recursos Hídricos de la cuenca Chancay-Huaral"

(*) Estos datos no han sido consignados por la fuente, por lo que fueron asumidos, basados en el criterio de similitud de características de los canales de riego y de las técnicas de riego de Comisiones de Regantes cercanas.

(1) Todas estas Comisiones de Regantes riegan por un mismo canal de derivación.

6.4 CÉDULA DE CULTIVO

La cédula de cultivo ha sido elaborada basándose en el Plan de Cultivo y Riego del Valle Chancay-Huaral 2002-2003, dicha cédula está compuesta por cultivos permanentes, semipermanentes y transitorios.

En la Tabla 11, se puede observarse que el maíz amarillo duro, algodón, mandarino y palto son los cultivos más importantes del valle, pues representan el 69.86% con respecto a los demás cultivos.

Tabla 11. Cedula de cultivo del valle Chancay-Huaral.

Cultivos	Meses												Total	Área bajo riego (ha)	Área de cultivos permanentes (ha)	Áreas de cultivo de rotación (ha)
	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL				
	(ha)															
Maíz amarillo duro	453.99	827.14	1692.82	2987.31	4921.95	6091.59	5915.48	5150.59	3919.14	1984.50	360.88	163.84	6906.46	21332.63	7653.18	13679.45
Algodón	2316.31	4808.63	5600.29	5600.29	5600.29	5600.29	5600.28	5600.29	5600.29	5600.29	3283.98	791.66	5600.29			
Mandarino	3028.57	3028.57	3028.57	3028.57	3028.57	3028.57	3028.57	3028.57	3028.57	3028.57	3028.57	3028.57	3029.57			
Palto	1257.15	1257.15	1257.15	1257.15	1257.15	1257.15	1257.15	1257.15	1257.15	1257.15	1257.15	1257.15	1257.15			
Manzano	1012.69	1012.69	1012.69	1012.69	1012.69	1012.69	1012.69	1012.69	1012.69	1012.69	1012.69	1012.69	1012.69			
Camote	233.78	303.54	357.17	459.34	559.36	801.13	677.92	675.12	549.54	537.32	437.31	195.53	996.66			
Melocotonero	895.77	895.77	895.77	895.77	895.77	895.77	895.77	895.77	895.77	895.77	895.77	895.77	895.77			
Mango	808.76	808.76	808.76	808.76	808.76	808.76	808.76	808.78	808.76	808.76	808.76	808.76	808.76			
Maíz chala	134.66	168.04	194.07	296.50	161.84	214.49	188.45	124.00	352.76	266.73	266.73	228.75	649.25			
Papa	114.96	135.36	135.36	135.36	135.36	28.94	19.10	53.42	174.71	390.75	382.21	385.74	540.20			
Maíz choclo	109.70	109.70	109.70	109.70		4.36	4.36	96.39	142.11	204.08	204.08	121.85	318.14			
Lúcumo	243.89	243.89	243.89	243.89	243.89	243.89	243.89	243.89	243.88	243.89	243.89	243.89	245.07			
Frijol			2.44	5.15	65.97	148.36	207.84	147.02	62.20				212.99			
Zanahoria	15.81	15.81	15.81	15.81	15.81			40.85	153.09	194.42	194.42	194.42	210.23			
Vid	203.94	203.94	203.94	203.94	203.94	203.94	203.94	203.94	203.94	203.94	203.94	203.94	203.94			
Naranjo	186.70	186.70	186.70	186.70	186.70	186.70	186.70	186.70	186.70	186.70	186.70	186.70	186.70			
Flores	116.73	116.73	116.73	116.73		10.64	36.97	36.97	36.97	26.33			153.70			
Tomate	24.90	34.46	46.28	41.26	86.66	104.90	90.64	106.58	103.18	63.54	15.94	15.94	145.74			
Pepinillo	28.49	28.49	57.88	32.30	69.41	40.23	37.22	41.75	41.75	41.75			145.01			
Fresa y frutilla	104.52	104.52	104.52	118.24	13.72	13.72	13.72	12.55	12.55	12.55	12.55		130.79			
Aji	9.67	41.64	58.21	80.33	100.74	100.74	91.06	64.10	49.52	25.41	5.00	5.00	105.74			
Coliflor		7.02	7.02	7.02	14.69	37.61	78.47	78.47	86.00	56.06	15.19	15.19	100.69			
Pallar	3.17	3.17	34.05	34.05	30.89	34.05	3.17	34.05	34.05	30.88	30.89		68.10			
Pimiento	6.36	17.09	17.09	19.53	32.40	35.91	25.18	25.18	32.73	9.87			43.86			
Cebolla china		13.86	13.86	13.86							13.86	13.86	27.72			
Pasto natural	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.956	20.95			
Zapallo	14.53	14.53	14.53										14.53			
Pasto pangola	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07			
Haba	1.28	1.28	1.28	1.28									1.29			
Total	11350.36	14412.50	16238.41	17735.46	19470.56	20928.4	20651.3	19948.69	19002.0	17105.9	12884.51	9793.06	24034.05	21332.63	7653.18	13679.45

6.5 DEMANDA NETA

Mediante la metodología del CROPWAT, se calculo el requerimiento neto de agua para los cultivos. La demanda bruta se obtiene afectando a la demanda neta por la eficiencia total de riego, tomando en cuenta que cada comisión de regantes tiene su propia eficiencia de riego de acuerdo al informe del proyecto de ordenamiento de los recursos hídricos de la cuenca Chancay-Huaral, INRENA-DGAS-1997.

En general, el requerimiento de agua bruto de los cultivos a nivel mensual, tiene la siguiente expresión:

$$RB = RN / Er$$

Dónde:

RB = Requerimiento Bruto (mm/mes)
RN = Requerimiento Neto (mm/mes)
Er = Eficiencia de Riego (fracción)

6.6 DEMANDA TOTAL DEL VALLE

En el Tabla 12, se observa que el volumen promedio necesario para satisfacer la demanda agrícola del valle es de 310.24 Hm^3. La demanda máxima requerida se presenta en el mes de febrero con 47.86 Hm^3 y la demanda minima requerida en el mes de julio es con 7.72 Hm^3. De otro lado, se pued destacar que la comisión de regantes que requiere mayor volumen de agua es el bloque de riego la Esperanza – río con una masa de 47.48 Hm^3 y el de menor volumen es el bloque de riego Malaca con una masa de 0.124 Hm^3 anual.

Tabla 12. Demanda hídrica del valle Chancay-Huaral por Comisión de Regantes y Bloq

COMISIONES DE REGANTES / CULTIVOS	CÓDIGO DE BLOQUE	BLOQUES DE RIEGO	MESES												TOTAL	ÁREA BAJO RIEGO (ha)
			AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL		
			(m³)													
SAUME	1	PACARAOS	26,852	35,898	46,163	51,148	48,274	50,660	52,851	49,864	42,180	32,111	24,703	24,062	484,763	25
	2	SANTO DOMINGO	56,378	70,180	88,033	101,718	116,006	127,140	130,914	128,610	115,633	87,388	58,742	54,608	1,135,350	59
	3	QUIPULLIN	85,508	106,164	128,136	148,995	176,742	207,994	231,133	214,708	184,212	139,444	98,989	89,519	1,811,544	91
	4	SAUME	95,448	125,234	161,030	190,919	207,837	230,536	242,287	226,750	159,602	116,941	89,956	87,542	1,934,082	106
	Subtotal		264,186	337,475	423,361	492,780	548,859	616,330	657,184	619,932	501,626	375,884	272,390	255,731	5,365,739	281
PALPA	5	PALPA-RIO	652,219	1,107,063	1,545,919	1,985,307	2,455,824	3,209,623	4,061,818	4,093,672	3,148,617	2,069,245	1,062,658	787,441	26,179,408	1,560
	6	ORCON													0	
	Subtotal		652,219	1,107,063	1,545,919	1,985,307	2,455,824	3,209,623	4,061,818	4,093,672	3,148,617	2,069,245	1,062,658	787,441	26,179,408	1,560
CAQUI	7	CAQUI-RIO	340,098	457,109	553,478	638,083	738,903	854,555	934,126	900,395	728,738	492,788	327,186	303,042	7,268,590	393
	8	SECTOR 6	82,687	125,033	180,684	230,559	283,371	309,031	296,247	280,144	243,094	181,274	110,555	78,489	2,401,169	132
	9	PISQUILLO	28,111	50,391	78,865	91,525	72,533	83,360	94,525	96,729	82,811	56,670	30,669	16,810	782,998	46
	Subtotal		450,896	632,532	813,027	960,167	1,094,896	1,246,946	1,324,898	1,277,268	1,054,641	730,733	468,411	398,342	10,452,757	571
SAN JOSE MIRAFLORES	10	MIRAFLORES-FILTRACION	52,971	175,491	345,574	444,729	461,121	597,211	639,411	631,593	502,888	311,890	124,484	26,552	4,313,915	428
	11	SAN JOSE-RIO	56,875	123,170	260,149	465,970	692,121	890,413	865,613	638,371	439,238	197,357	50,324	11,496	4,691,098	356
	Subtotal		109,846	298,661	605,723	910,699	1,153,241	1,487,624	1,505,025	1,269,964	942,126	509,246	174,808	38,048	9,005,013	784
BOZA AUCALLAMA	12	SAN JOSE AUCALLAMA	149,626	297,070	472,484	711,488	955,720	1,087,973	1,094,961	987,303	721,087	303,790	77,525	51,914	6,910,940	402
	13	BOZA ALTA	308,538	587,438	1,004,253	1,365,445	1,645,469	1,884,175	1,980,144	1,781,916	1,217,314	402,905	103,981	54,487	12,336,065	704
	14	BOZA BAJA	80,525	167,933	338,107	482,939	739,537	957,730	930,869	710,591	399,785	133,215	48,091	21,056	5,010,378	334
	Subtotal		538,689	1,052,440	1,814,844	2,559,872	3,340,726	3,929,879	4,005,974	3,479,810	2,338,186	839,910	229,597	127,457	24,257,383	1,440
PASAMAYO	15	PASAMAYO ALTO	35,507	125,709	236,400	326,024	599,137	477,821	605,395	634,457	402,690	120,331	30,642	23,894	3,618,006	273
	16	PASAMAYO BAJO	37,920	175,577	362,804	536,276	647,560	671,424	960,741	1,133,405	717,643	246,911	82,057	20,853	5,593,171	534
	17	MANGLAR	14,550	38,576	67,986	83,333	52,130	14,415	21,281	45,586	53,819	34,891	20,977	6,456	453,999	35
	Subtotal		87,977	339,862	667,190	945,633	1,298,826	1,163,660	1,587,418	1,813,447	1,174,151	402,132	133,677	51,203	9,665,176	843
SAN MIGUEL	18	QUISQUE ALTO	27,440	37,910	50,042	55,322	48,644	49,972	52,416	55,939	51,102	42,445	33,102	31,132	535,467	27
	19	QUISQUE BAJO	28,620	35,616	43,089	48,018	52,947	58,512	61,374	58,194	49,290	37,524	28,859	27,984	530,027	25
	20	CASCAJAL	68,327	100,406	138,660	153,586	116,146	110,185	138,666	153,511	150,450	112,143	61,247	52,087	1,355,416	69
	21	HUAMACHO	31,836	46,018	62,779	69,204	55,292	54,666	68,081	74,680	72,239	54,146	30,447	26,145	645,533	32
	22	PASABRONCANO ALTO	27,901	35,169	42,961	47,733	55,827	64,619	72,189	66,490	48,672	34,013	26,572	26,124	548,269	28
	23	PASABRONCANO BAJO	20,243	25,063	30,167	33,766	37,294	39,712	43,053	40,891	34,724	26,357	20,206	19,264	370,741	17
	Subtotal		204,367	280,183	367,698	407,629	366,152	377,666	435,780	449,706	406,477	306,628	200,432	182,736	3,985,453	197
CUYO	24	LUMBRA	70,210	87,514	105,814	117,862	129,730	140,783	144,044	133,445	112,336	85,521	65,862	65,228	1,258,347	58
	25	CUYO	364,690	558,946	803,200	930,980	855,882	1,017,801	1,273,197	1,287,809	981,420	604,851	365,315	309,152	9,353,244	489
	Subtotal		434,900	646,459	909,014	1,048,843	985,612	1,158,584	1,417,241	1,421,254	1,093,757	690,371	431,176	374,380	10,611,591	547
HUAYAN-HORNILLOS	26	HUAYAN-HORNILLOS-RIO	158,586	199,804	243,442	270,413	293,608	375,069	437,107	455,839	394,194	266,799	172,193	146,405	3,413,460	279
	27	HUAYANBAJO-FILTRACION Y RIO	46,507	76,402	114,658	164,995	226,117	243,415	286,459	252,406	144,866	79,409	55,448	49,700	1,740,382	185
	28	GALINDO	31,107	43,136	57,052	64,064	59,813	65,293	72,119	81,082	73,958	62,365	48,657	44,094	702,739	57
	Subtotal		236,201	319,342	415,152	499,472	579,538	683,777	795,684	789,327	613,018	408,574	276,297	240,199	5,856,581	521
HUANDO	29	MALACA	3,517	4,317	5,150	11,242	18,517	26,092	27,208	11,358	5,992	4,525	3,450	3,192	124,558	9
	30	HUANDO	1,303,951	1,674,130	2,129,851	2,492,328	2,767,418	3,118,075	3,237,913	2,999,015	2,475,650	1,657,006	1,204,067	1,108,437	26,167,843	1,394
	Subtotal		1,307,468	1,678,447	2,135,001	2,503,570	2,785,935	3,144,167	3,265,122	3,010,373	2,481,641	1,661,531	1,207,517	1,111,629	26,292,401	1,403
LA ESPERANZA	31	LA ESPERANZA-RIO	2,583,429	3,228,926	3,934,844	4,450,876	4,946,433	5,487,223	5,743,105	5,291,627	3,572,757	3,364,899	2,531,545	2,346,301	47,481,964	3,482
	32	FILTRACIONES GRANADOS	12,793	15,976	19,247	20,665	17,771	19,681	20,607	19,565	16,642	13,748	11,635	11,751	200,078	15
	Subtotal		2,596,221	3,244,902	3,954,091	4,471,541	4,964,203	5,506,904	5,763,711	5,311,192	3,589,399	3,378,647	2,543,180	2,358,051	47,682,042	3,497
JESUS DEL VALLE-ESQUIVEL	33	JESUS DEL VALLE-RIO	224,816	691,212	1,387,355	2,185,473	3,113,076	3,798,973	3,811,042	3,305,922	2,318,737	1,123,926	349,072	102,316	22,411,919	1,493
	34	JESUS DEL VALLE-FILTRACIONES	108,046	241,692	485,376	736,820	1,014,256	1,213,704	1,203,790	1,182,338	991,425	563,879	284,508	125,162	8,150,995	518
	Subtotal		332,862	932,904	1,872,731	2,922,293	4,127,332	5,012,677	5,014,832	4,488,259	3,310,162	1,687,805	633,580	227,478	30,562,915	2,011
RETES-NATURALES	35	RETES-NATURALES-RIO	552,123	1,179,058	1,824,144	2,235,789	3,065,544	4,079,650	4,645,043	4,318,130	3,230,411	1,808,581	752,421	387,367	28,078,261	1,543
	36	RETES-NATURALES-FILTRACION	248,215	505,602	887,473	1,323,308	1,809,345	2,346,945	2,540,412	2,424,434	1,982,441	1,074,852	466,131	212,686	15,821,843	886
	37	LAS DELICIAS	5,694	72,170	106,139	155,251	194,115	249,125	262,614	249,335	208,447	129,199	16,650	0	1,648,738	88
	Subtotal		806,031	1,756,830	2,817,756	3,714,347	5,069,004	6,675,720	7,448,068	6,991,900	5,421,298	3,012,633	1,235,202	600,052	45,548,843	2,517
CHANCAY ALTO	38	CHANCAY ALTO-RIO	56,270	226,571	444,478	765,649	1,210,903	1,649,864	1,686,409	1,395,029	988,866	532,739	177,990	85,148	9,219,918	663
	39	FILTRACION SANTA ROSA	4,203	27,420	44,059	68,244	94,322	126,280	134,150	108,787	86,490	55,980	14,160	3,106	767,200	50
	Subtotal		60,473	253,990	488,537	833,894	1,305,225	1,776,145	1,820,558	1,503,816	1,075,356	588,719	192,150	88,254	9,987,118	713
CHANCAY BAJO	40	CHANCAY BAJO-RIO	295,678	521,493	836,958	1,261,791	1,723,750	2,360,077	2,582,799	2,453,994	1,790,785	790,604	320,411	127,110	15,065,448	1,216
	41	CHANCAY BAJO-FILTRACION Y RIO	10,837	29,178	95,505	251,131	580,385	1,017,961	1,216,111	1,032,768	497,808	234,272	193,694	166,270	5,325,921	564
	42	CHANCAY BAJO-FILTRACION	37,788	76,676	139,854	237,023	360,560	469,508	490,393	433,393	289,613	106,548	33,007	8,743	2,683,105	207
	Subtotal		344,302	627,347	1,072,318	1,749,944	2,664,694	3,847,546	4,289,303	3,920,155	2,578,206	1,131,424	547,111	302,123	23,074,474	1,987
CHANCAYLLO	43	CHANCAYLLO	134,286	260,592	591,219	1,156,273	1,896,567	3,240,840	3,766,913	2,961,641	1,694,137	802,875	557,524	523,877	17,586,744	1,663
	Subtotal		134,286	260,592	591,219	1,156,273	1,896,567	3,240,840	3,766,913	2,961,641	1,694,137	802,875	557,524	523,877	17,586,744	1,663
LAS SALINAS	44	SALINAS ALTO	9,472	38,673	73,665	120,095	205,120	319,983	419,438	470,555	305,586	101,855	59,554	27,806	2,151,783	183
	45	SALINAS MEDIO 1 Y 2	31,397	43,091	56,689	65,323	71,284	32,602	34,999	33,174	28,822	21,725	15,906	22,054	457,065	61
	46	SALINAS BAJO	33,670	77,907	119,767	101,615	53,320	140,507	245,153	305,348	260,833	122,330	54,494	3,574	1,518,520	149
	Subtotal		74,539	159,672	250,121	287,033	329,724	493,072	699,590	809,077	595,241	245,911	129,954	53,434	4,127,368	393
DEMANDA HÍDRICA - AGUA SUPERFICIAL			7,889,564	12,334,524	17,808,160	22,920,837	28,702,589	34,850,181	38,337,941	35,741,752	25,846,094	15,482,986	8,597,685	6,669,167	255,181,481	16,839
DEMANDA HÍDRICA - AGUA SUBTERRÁNEA			745,900	1,594,179	2,935,542	4,528,460	6,263,773	8,720,977	9,521,179	8,469,041	6,171,945	3,359,281	1,697,980	1,051,269	55,059,524	4,090

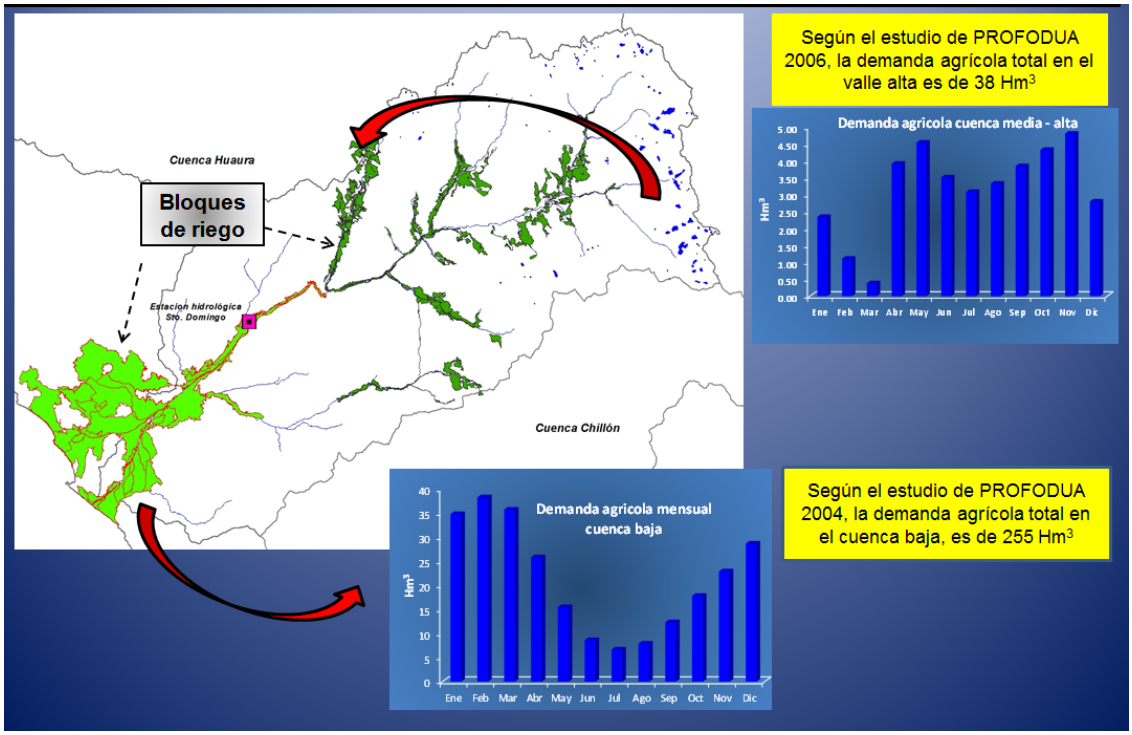
FUENTE: ESTUDIO DE ASIGNACION DE AGUA – INRENA - PROFODUA

6.7 BLOQUES DE RIEGO

Esta conformada por el conjunto de predios de uso agrario, o unidades agrícolas productivas, que tienen en común el origen del recurso hídrico y una estructura hidráulica de captación, distribución y/o regulación. Para el desarrollo se consideró 2 criterios generales; (1) que los bloques de riego constituirán unidades de asignación dentro de los ámbitos de una comisión de regantes, que los bloques de riego deben tener o podrían tener una estructura de medición mediante la cual se mediría la dotación asignada.

Bajo estos criterios generales se plantearon 2 criterios específicos que se tomaron en cuenta para la conformación de los bloques de riego: por la fuente de abastecimiento hídrica (aguas provenientes del río Chancay-Huaral, de retorno-filtraciones y de manera complementaria agua subterránea) y por el área de influencia de las estructuras de captación.

Con base a los criterios expuestos, en el valle se han identificado 46 bloques de riego, la cual tambien se describe en el Tabla 13. La Figura 12 describe las demandas hídrica agrícola total para el valle alto y valle bajo de la cuenca, la demanda estimada solo considera la fuente de agua superficial.



Demanda Agricola del valle bajo y alto de la cuenca Chancay-Huaral

Para la calibración del modelo se considero las demanda agrícola del valle alto y parte de valle bajo que corresponde a los usos de agua agrícola que se encuentra por encima de la estación hidrológica de medición.

VII. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA COMO INGRESO AL MODELO HIDROLÓGICO

Se trabajó con información hidrometeorológicas 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 2012. La distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas se muestra en la Figura 14.

7.1 ANÁLISIS CLIMÁTICO

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. El análisis de la información climática utilizada se describe a continuación.

7.2 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

En la Figura 13, se observa la temperatura media mensual que registran las estaciones climatológicas de Huayan, Huarangal, Canta, Picoy y Marcapomacocha. Una mayor variabilidad de la temperatura media se presentan en la estaciones de Huayan (Cuenca Chancay-Huaral) y Huarangal (Cuenca Huaura), ubicadas en la parte baja, 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.

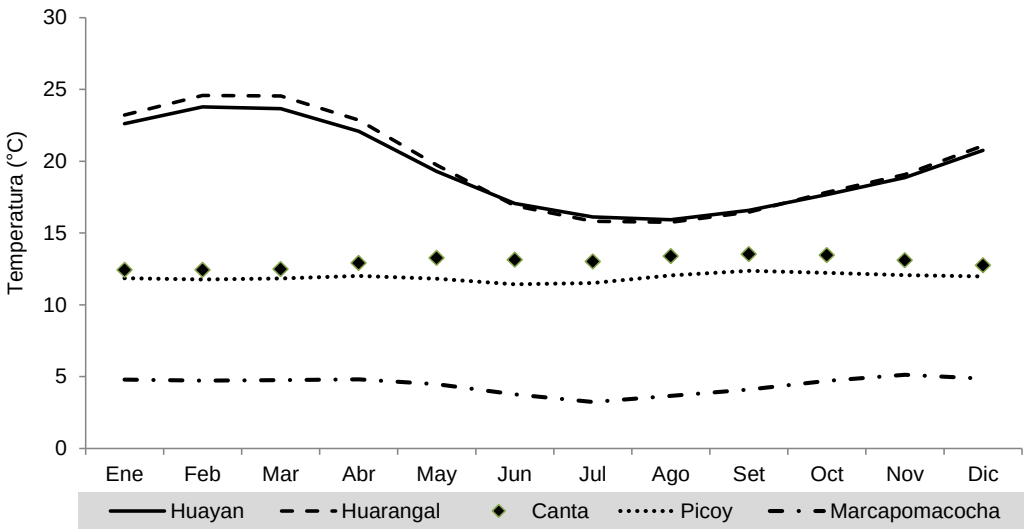


Figura 12. Temperatura media mensual de las estaciones climatológicas utilizadas.

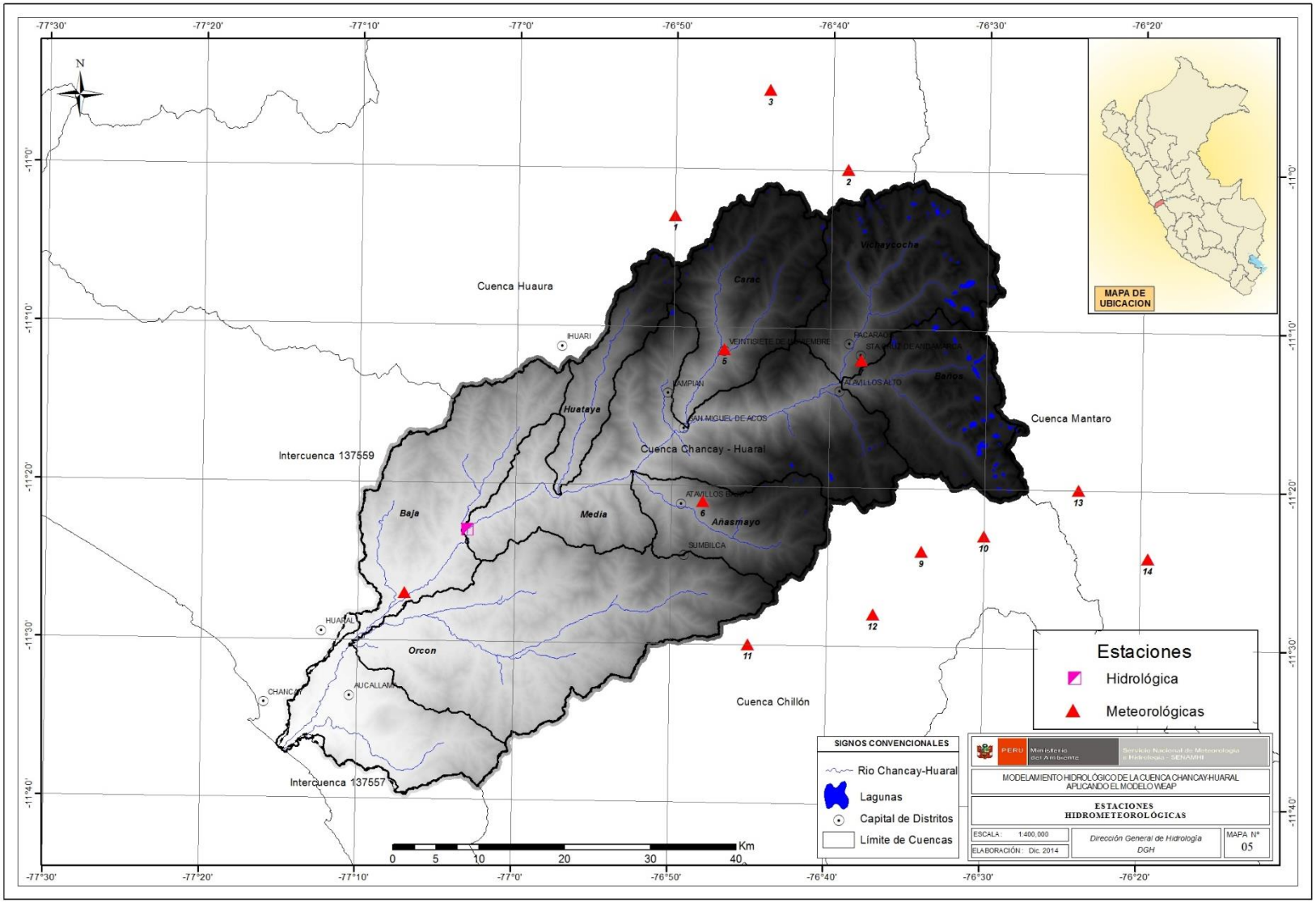


Figura 13. Red de estaciones Hidrometeorológicas utilizadas en la cuenca Chancay-Huaral.

7.2.1 GRADIENTE TEMPERATURA – ALTURA

En la Figura 15, se muestra la relación entre la temperatura media multianual de las estaciones utilizadas y su altura. Siendo la temperatura el parámetro climático más sensible, en la Figura 17, se muestra la variación de la temperatura media multianual, a nivel de cuenca y subcuenca.

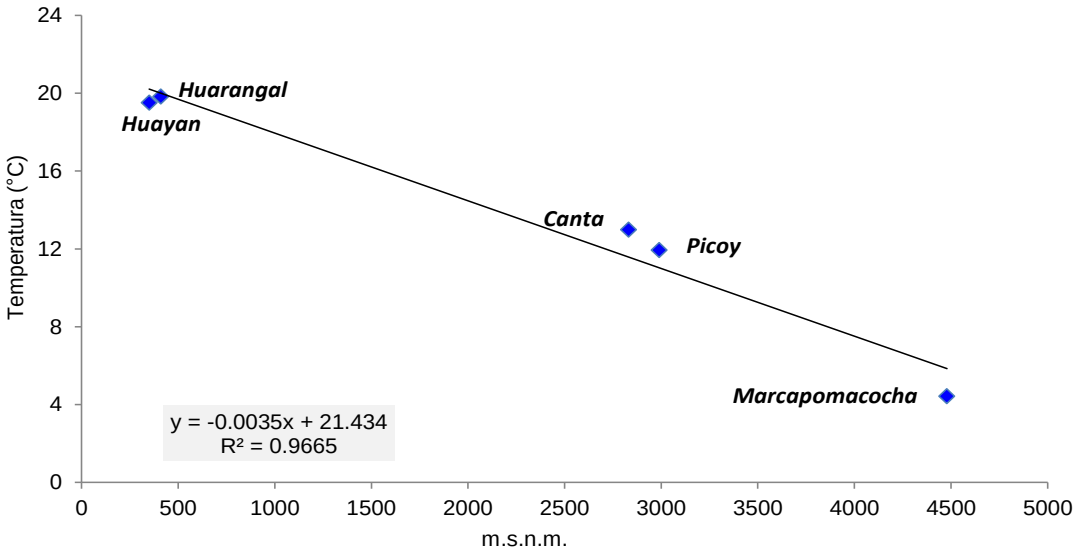


Figura 14. Gradiente altitudinal de la temperatura.

7.2 HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL

En el caso de las estaciones vecinas Picoy y Canta (Figura 16), ubicadas sobre los 2500 msnm., nos da una referencia que existe una mayor humedad relativa en los meses húmedos (85%), y en los meses secos lo contrario, lo que es característicos de la zona sierra (alrededor del 72%); todo lo contrario ocurre en la estación Huayan, ya que tiene características de costa. Para el caso de la humedad relativa en el modelo, se consideró solo el promedio mensual histórico de las estaciones mencionadas.

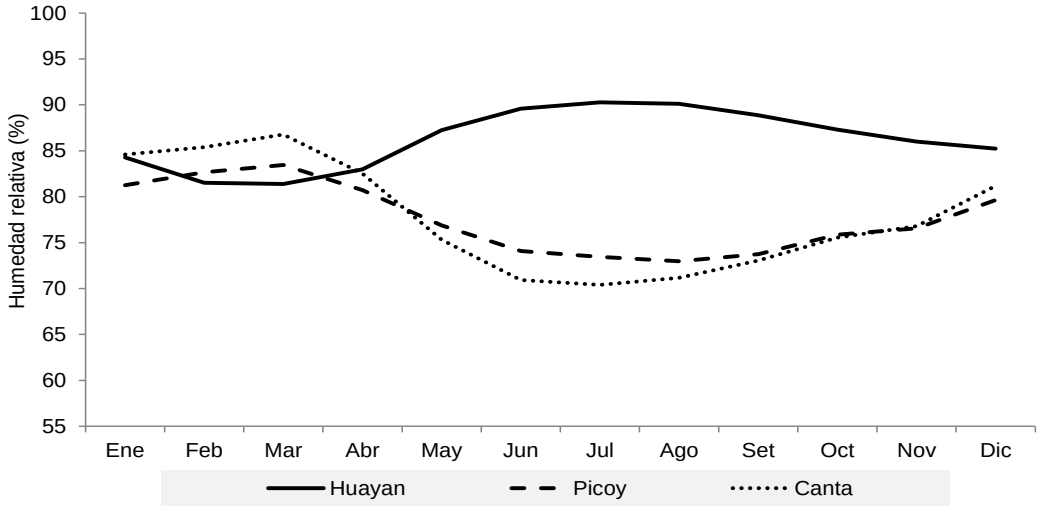


Figura 15. Humedad relativa media mensual de las estaciones climatológicas utilizadas.

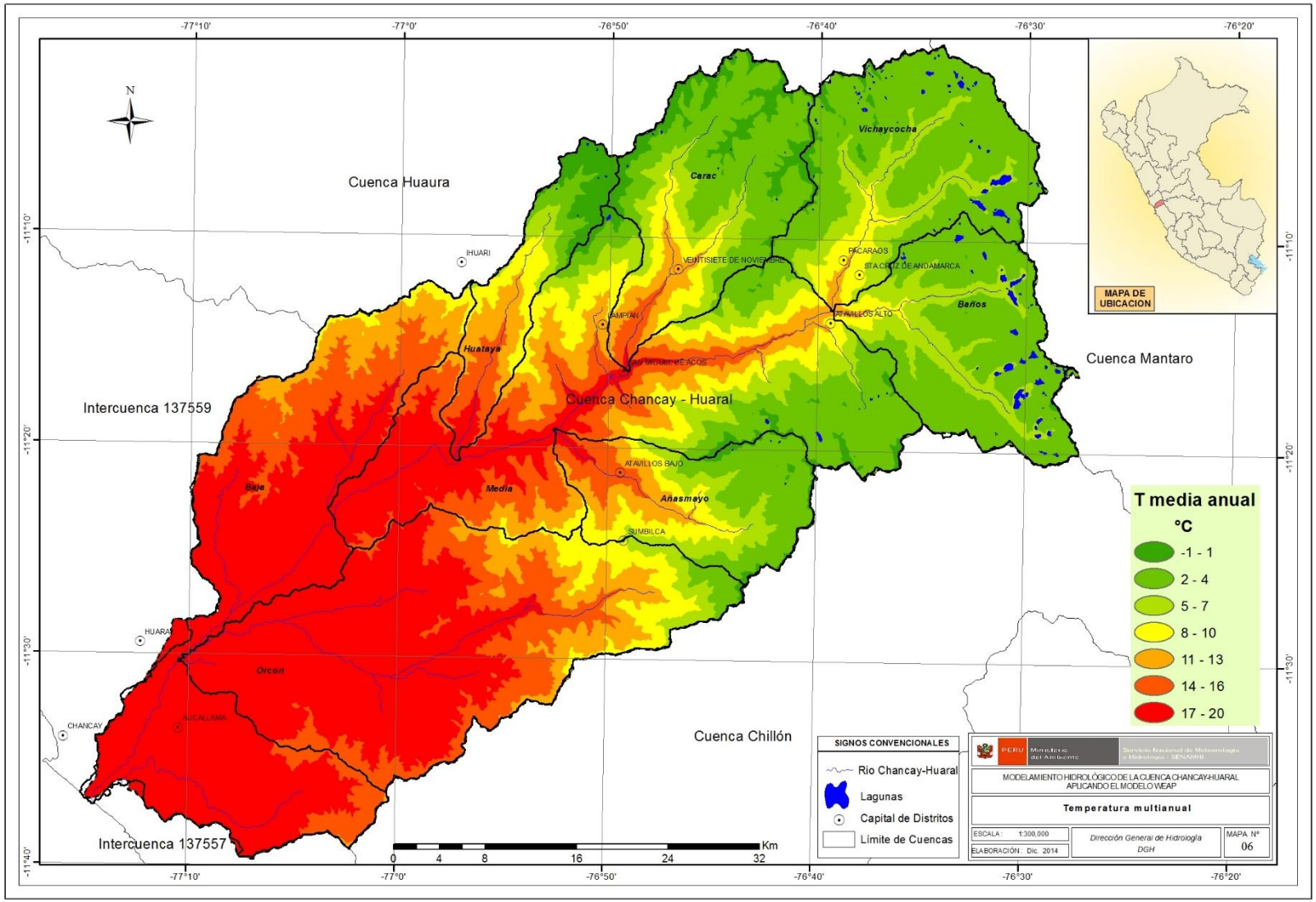


Figura 16. Distribución espacial de la temperatura media multianual de la cuenca Chancay - Huaral.

7.3 VELOCIDAD DE VIENTO MEDIA MENSUAL

En las estaciones vecinas Picoy y Canta (Figura 18), se observa que la velocidad del viento aumenta de marzo a agosto, y en la estación Huayan los registros indican que la velocidad del viento asciende de julio a febrero. Para el caso de esta variable en el modelo, también se consideró la media mensual histórica de las estaciones mencionadas.

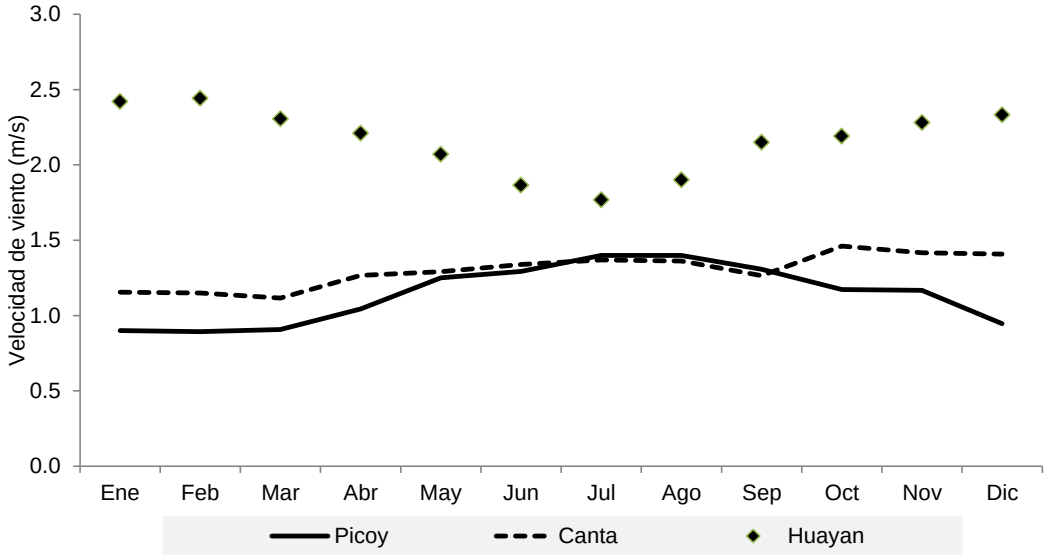


Figura 17. Velocidad del viento media mensual de las estaciones climatológicas utilizadas.

7.4 PRECIPITACIÓN

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

En la parte baja de la cuenca Chancay–Huaral se ubican las estaciones climatológicas Donoso y Huayan, en la cual se excluyó la estación Donoso al no contar con series continuas de información, utilizando sólo los registros de la estación Huayan. Un primer análisis gráfico y estadístico mediante el uso del índice del vector regional indican que las estaciones Pirca y Picoy presentaron periodos con índices fuera de los límites de confianza, y en su doble masa de acumulados de índices, no presentaba linealidad, la cual se excluyó del grupo, con la finalidad de obtener una mejor representación de la información con las estaciones restantes. De esta manera quedan definidas las estaciones pluviométricas más confiables cuyos resultados se muestran a continuación.

Se formaron dos grupos de estaciones pluviométricas agrupadas mediante el criterio de estaciones vecinas.

- Grupo de Análisis I: Conformado por las estaciones Huaros, Huamantanga, Pariacancha y Yantac para una serie de 1969 – 2012.

- Grupo de Análisis II: Conformada por las estaciones de Picoy, Tupe, Pachamachay, Carac, Pallac, Santa Cruz y Pirca para una serie de 1969 – 2012.

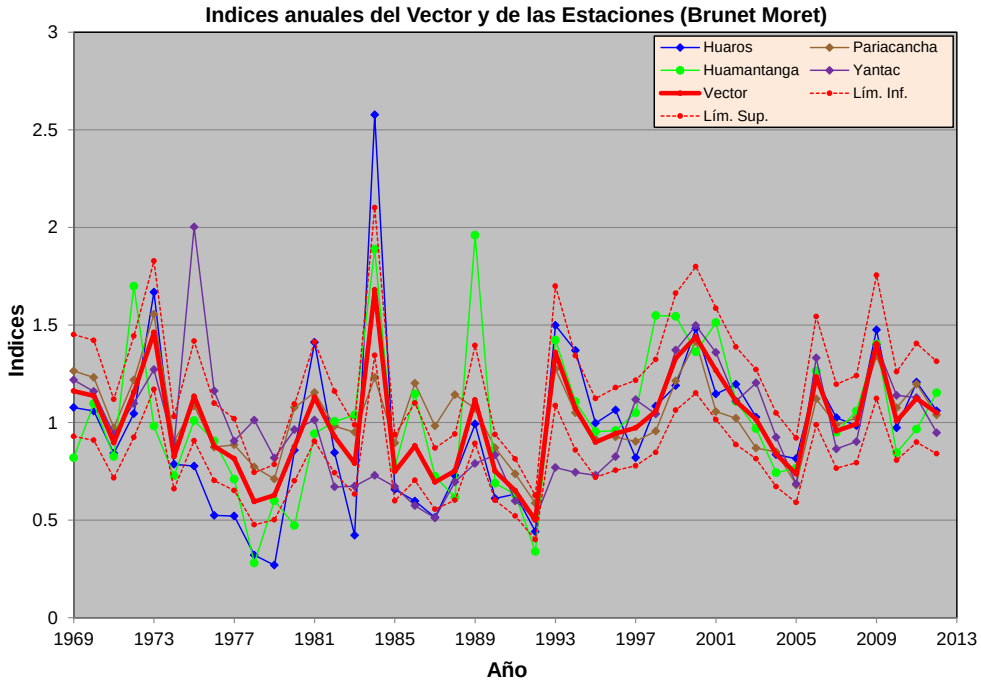


Figura 18. Grupo I de análisis por el índice del vector regional.

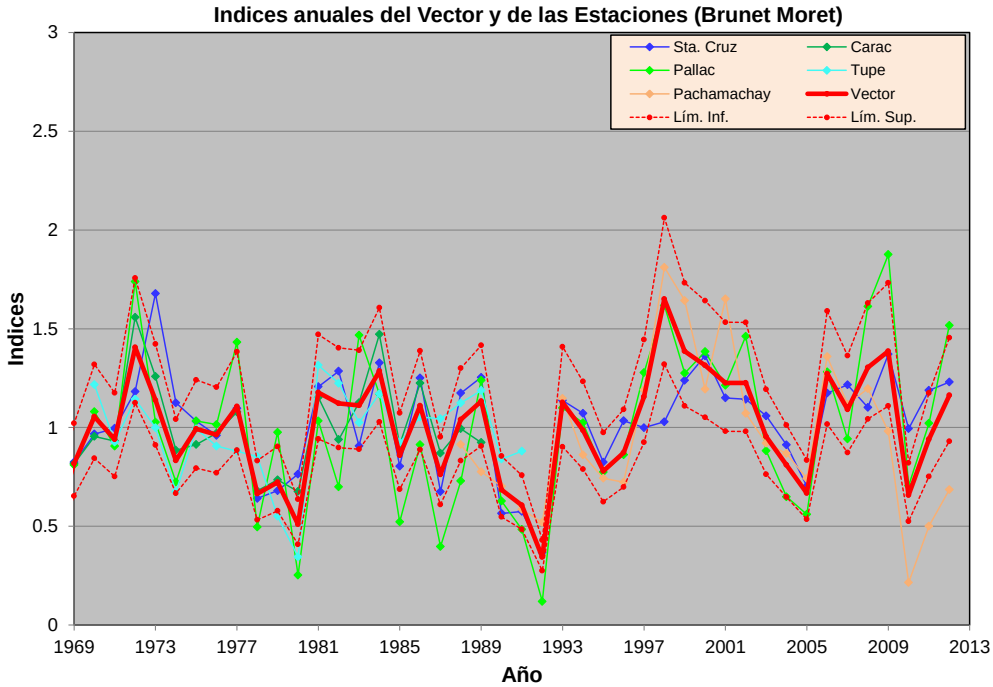


Figura 19. Grupo II de análisis por el índice del vector regional.

La Figura 19 y 20, muestra el análisis gráfico del índice del vector regional de precipitación anual para los grupos I y II. Los resultados muestran que las estaciones pluviométricas de cada grupo presentan similar variabilidad y los valores de los índices pluviométricos calculados se encuentran mayormente dentro los límites de confianza teniendo como resultado general para este primer análisis aceptable.

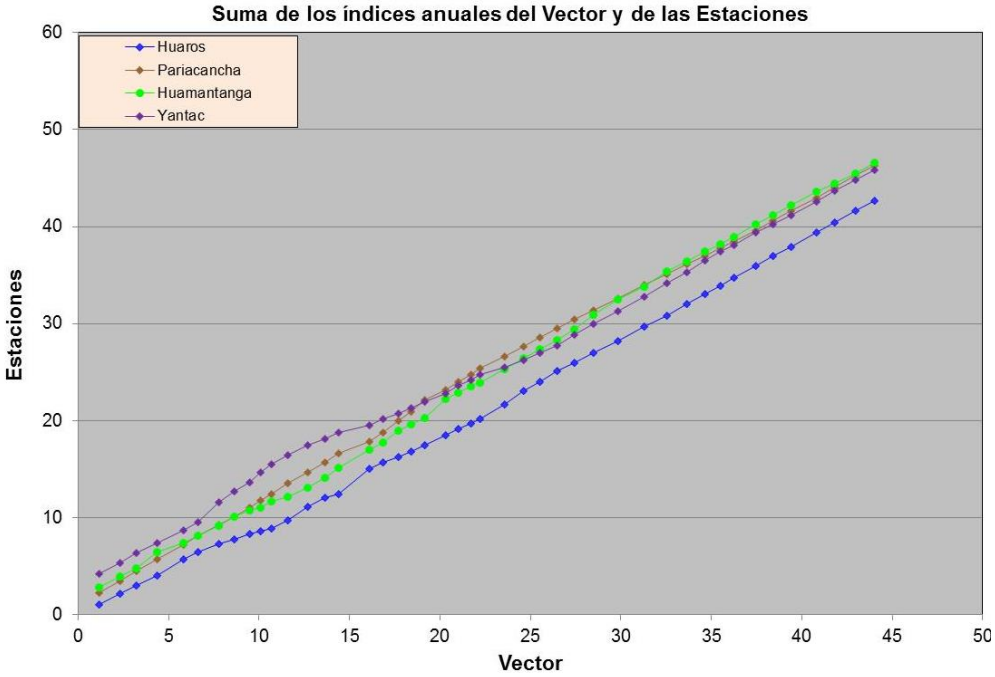


Figura 20. Acumulados de índices de precipitación. Grupo I.

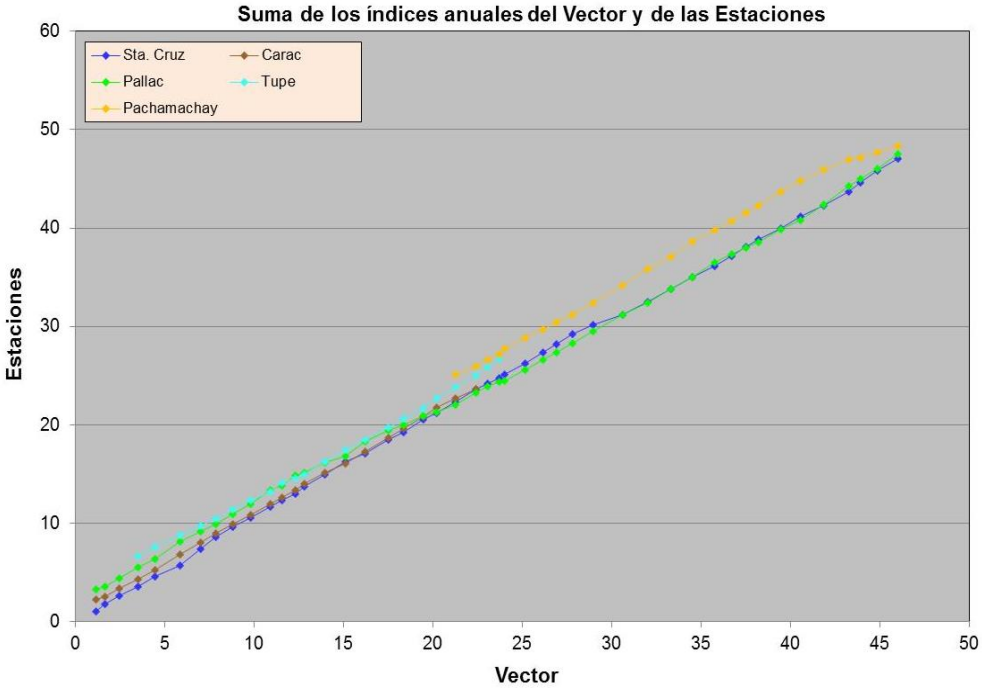


Figura 21. Acumulados de índices de precipitación. Grupo II.

Los resultados obtenidos en el análisis gráfico, son testificados por análisis de doble masa de índices acumulados (Figura 21 y 22), ambos grupos tienden a ser lineal sus índices acumulados dando una conformidad en la calidad de la información.

Con respecto a la crítica de datos, los resultados de los parámetros más importantes la desviación estándar de los desvíos (DED) y la correlación (R) se presentan en la Tabla 13. 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, presentando una DED y R en promedio de 0.17 y 0.83 y testifican la confiabilidad de la información.

Tabla 13. Criticas de datos.

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

7.4.1 GRADIENTE PRECIPITACIÓN - ALTITUD

El análisis de gradiente pluviométrico, ha permitido establecer la variación de la precipitación con la altura, para ello se relacionó las estaciones ubicadas dentro de la cuenca a través de la función precipitación vs. altitud, a nivel multianual.

En la Figura 23 se observa una relación lineal y potencial para las estaciones pluviométricas pertenecientes a la cuenca y otra con todas las estaciones utilizadas en el estudio. Ajustándose mejor a una potencial en ambos casos. Tomando en cuenta todas las estaciones y la relación potencial se diría que el aporte pluviométrico anual sobre los 4000 (msnm) es mayor a 700 mm.

Así, para tener una idea espacial de las lluvias, estas se interpolaron a nivel multianual y se dividieron en las cuatro estaciones del año:

Hemisferio sur

Estaciones meteorológicas:
Primavera: 1 septiembre hasta 30 noviembre (SON)
Verano: 1 diciembre hasta 28 febrero (DEF)
Otoño: 1 marzo hasta 31 mayo (MAM)
Invierno: 1 junio hasta 31 agosto (JJA)

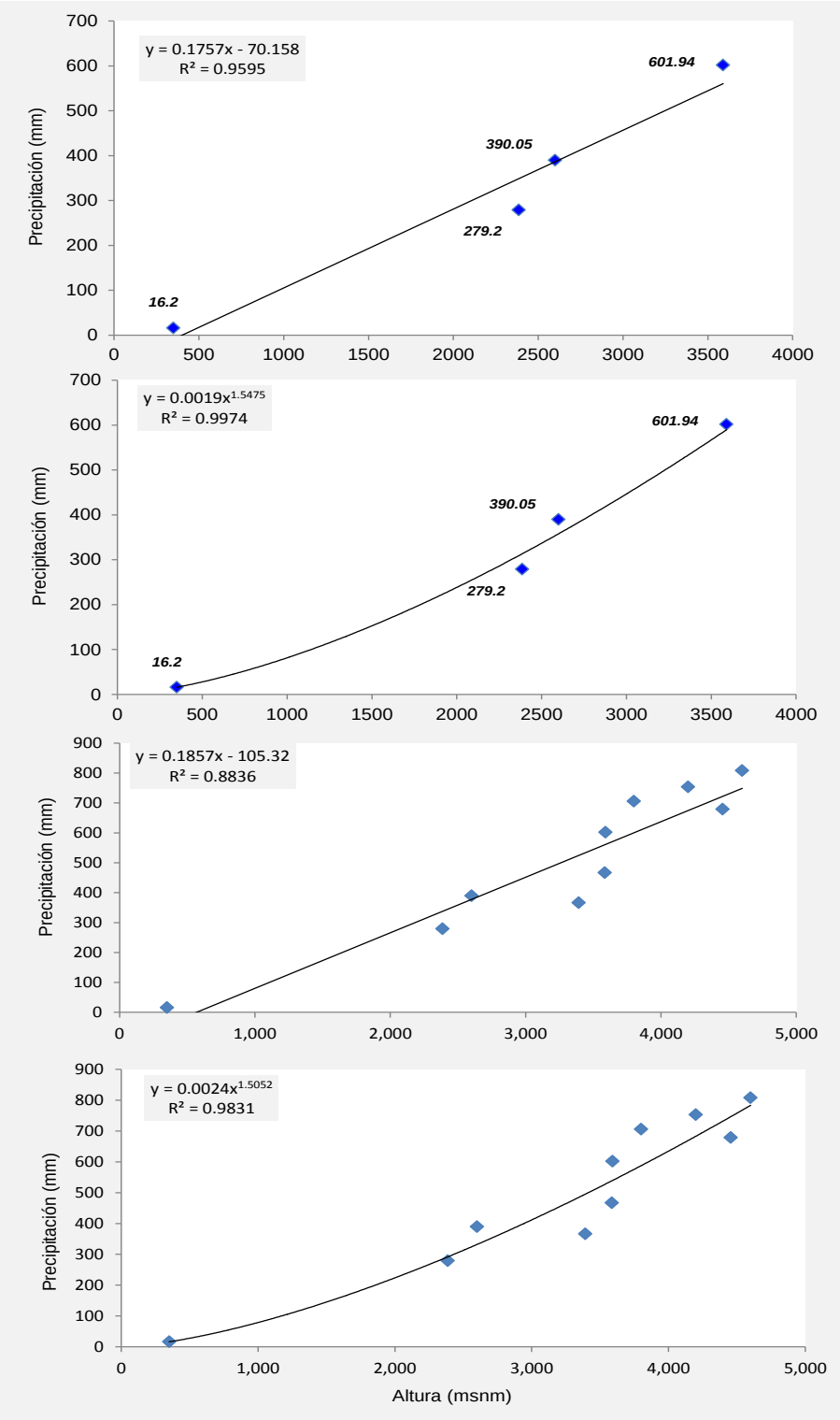


Figura 22. Gradiente altitudinal de la precipitación multianual.

En la Figura 24, se observa la variación espacial de las precipitación promedio para, SON, DEF, MAM, JJA y la precipitación multianual de la serie (1969-2012), que permite observar que las lluvias están concentradas en las partes altas y son más intensas en DEF y MAM.

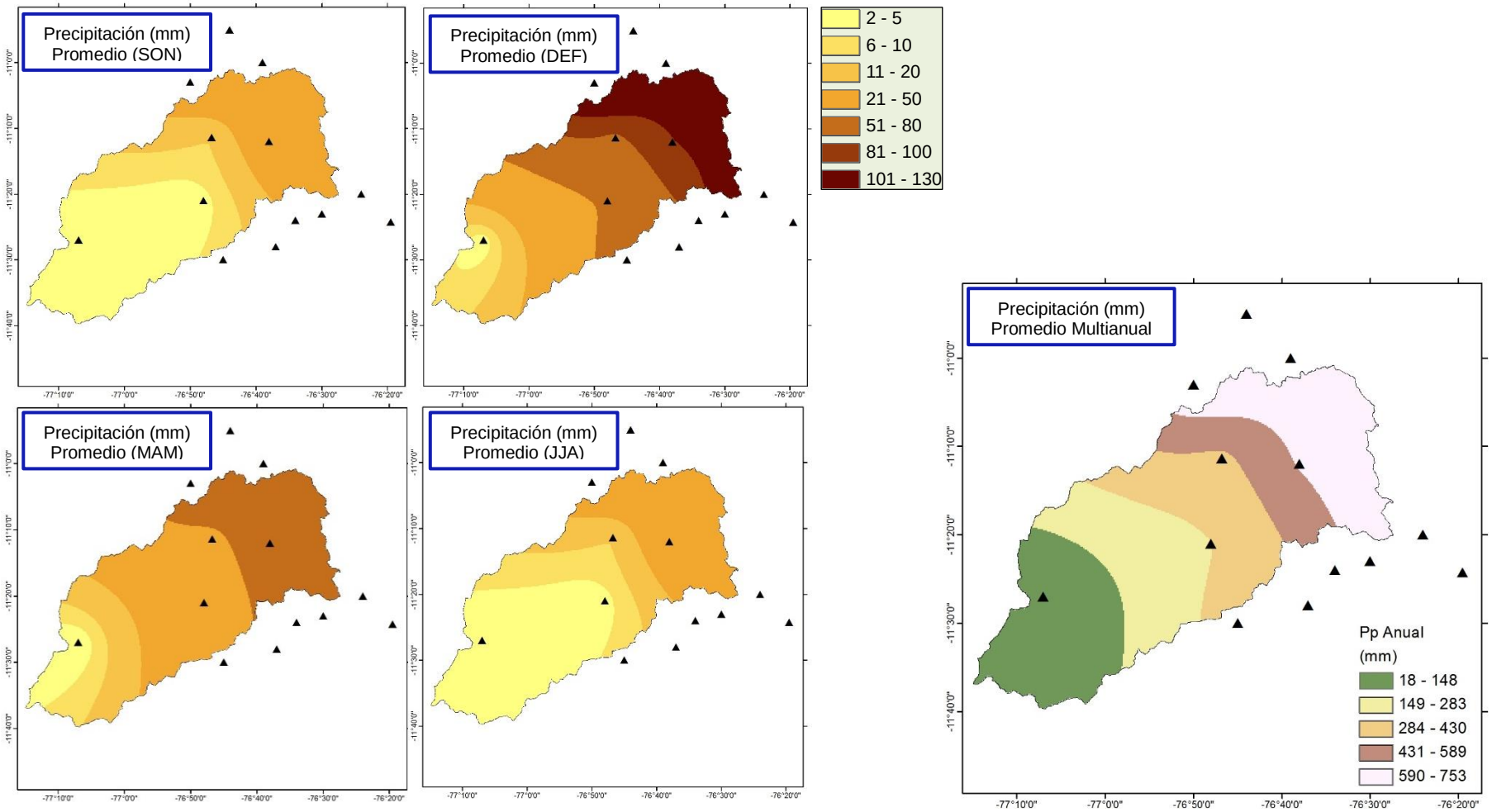


Figura 23. Distribución espacial de la precipitación pluviométrica sobre la cuenca Chancay – Huaral.

7.5 ANÁLISIS DE LAS DESCARGAS MEDIA MENSUAL

Los caudales registrados en la estación hidrométrica de Santo Domingo no obedecen a un régimen natural, ya que considera las descargas de las Lagunas ubicadas en las nacientes de las subcuencas de Vichaycocha y Baños. Estos volúmenes, usualmente utilizados en periodos de estiajes, datan desde antes del año de 1969, año en que la ONERN lo menciona en el estudio "Inventario, evaluación y uso racional de los recursos naturales de la costa valle Chancay – Huaral".

La restitución de caudales a régimen natural, es dificultoso, debido a una escaza disponibilidad continúa y confiable de registros de volúmenes de descargas de estas lagunas, en consecuencia se decidió trabajar con los registros históricos para su análisis de confiabilidad. Para ello el análisis de las descargas medias mensuales del río Chancay-Huaral ha sido evaluado utilizando la información de caudales de los ríos Huaura y Chillón de características hidrológicas similares.

El vector regional a la vez fue apoyado por un análisis grafico de serie mensual, la importancia de este análisis radica en que se aprovecha toda la información recolectada de caudales medios, mas no en un análisis anual ya que se tiene que tener los 12 meses completos. Respecto a la ciclicidad de los fenómenos de estiaje y avenidas de caudales medios mensuales ocurridos en la cuenca del rio Chancay-Huaral, estos se relacionan en mayor parte a los presentados en la cuenca del rio Huaura y Chillón, como se observa en la Figura 25, teniendo para este primer análisis visual una buena calidad de la información.

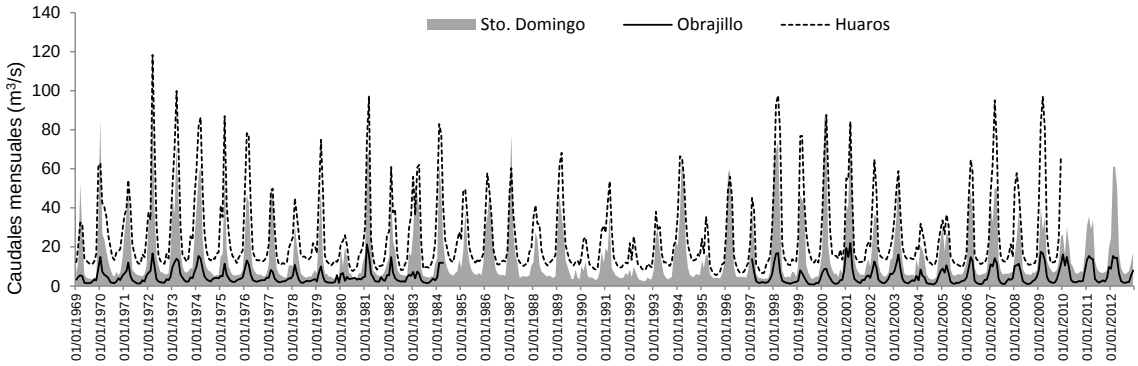


Figura 24. Comparación de los hidrogramas de los ríos Huaura, Chancay-Huaral y Chillón.

Los resultados, mediante el uso del método del vector regional generados en base a 3 estaciones hidrométricas perteneciente a la región hidrográfica del Pacifico, Figura 26, muestran similar variabilidad. El vector fue formado con 3 datos mínimos por año y debido a esta restricción se ajustó al periodo eliminándose 16 años; 1984 al 1996 y 2010 al 2012.

Y respecto al índice anuales acumulados de las estaciones hidrométricas, se observa que la estaciones hidrológicas para el periodo de análisis presentan un comportamiento casi lineal con respecto al vector regional (color amarillo), la cual da una solides de la información tratada Figura 27.

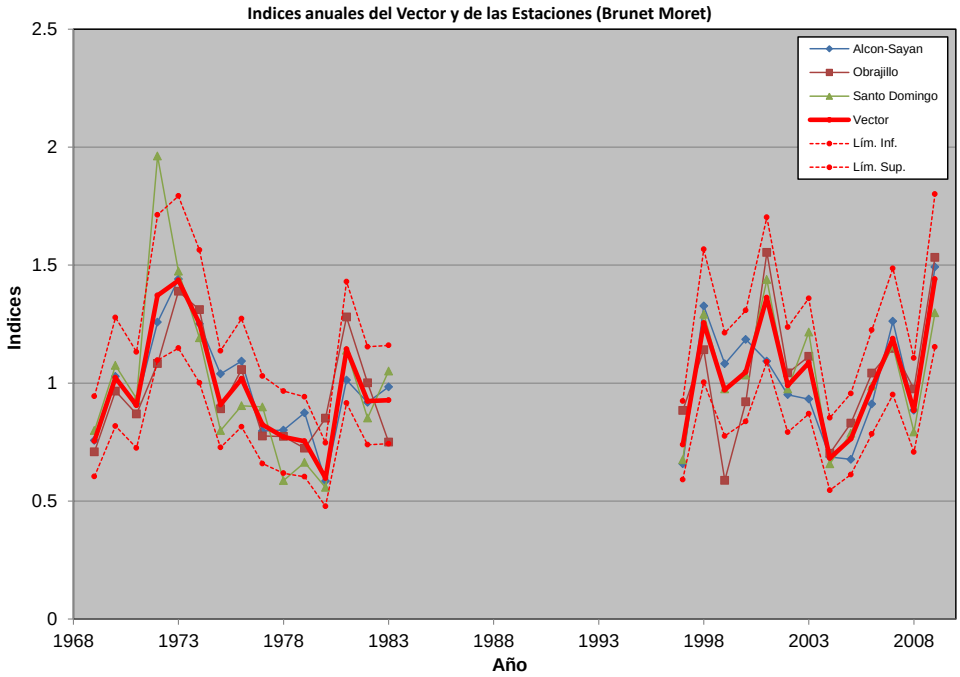


Figura 25. Grupo de análisis de caudales por el índice del vector regional.

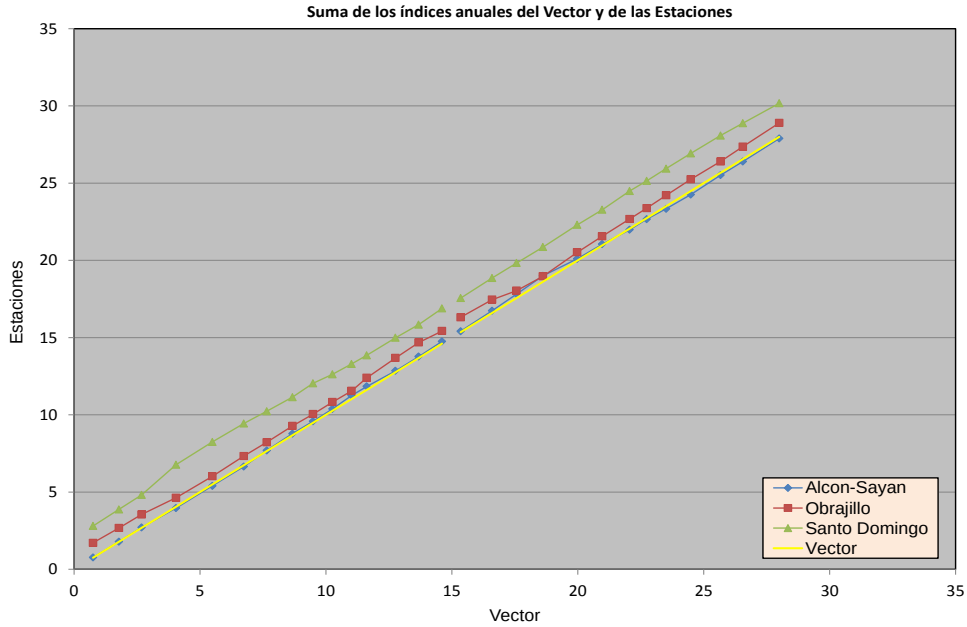


Figura 26. Acumulados de índices de caudales.

En relación a la crítica de datos hidrológicos, mediante el uso de diferentes parámetros para su análisis Tabla 14, los resultados muestran que la estación hidrométrica Sto. Domingo presentó un valor de (0.136) en la desviación standard de los desvíos (D.E.D) y una correlación de (0.907) con respecto al vector, resultados aceptables siendo estos dos parámetros de análisis lo mas importantes.

Tabla 14. Criticas de datos.

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

VIII. DESARROLLO METODOLÓGICO

El proceso metodológico para la aplicación del modelo WEAP en la cuenca Chancay - Huaral se muestra en la Figura 28.

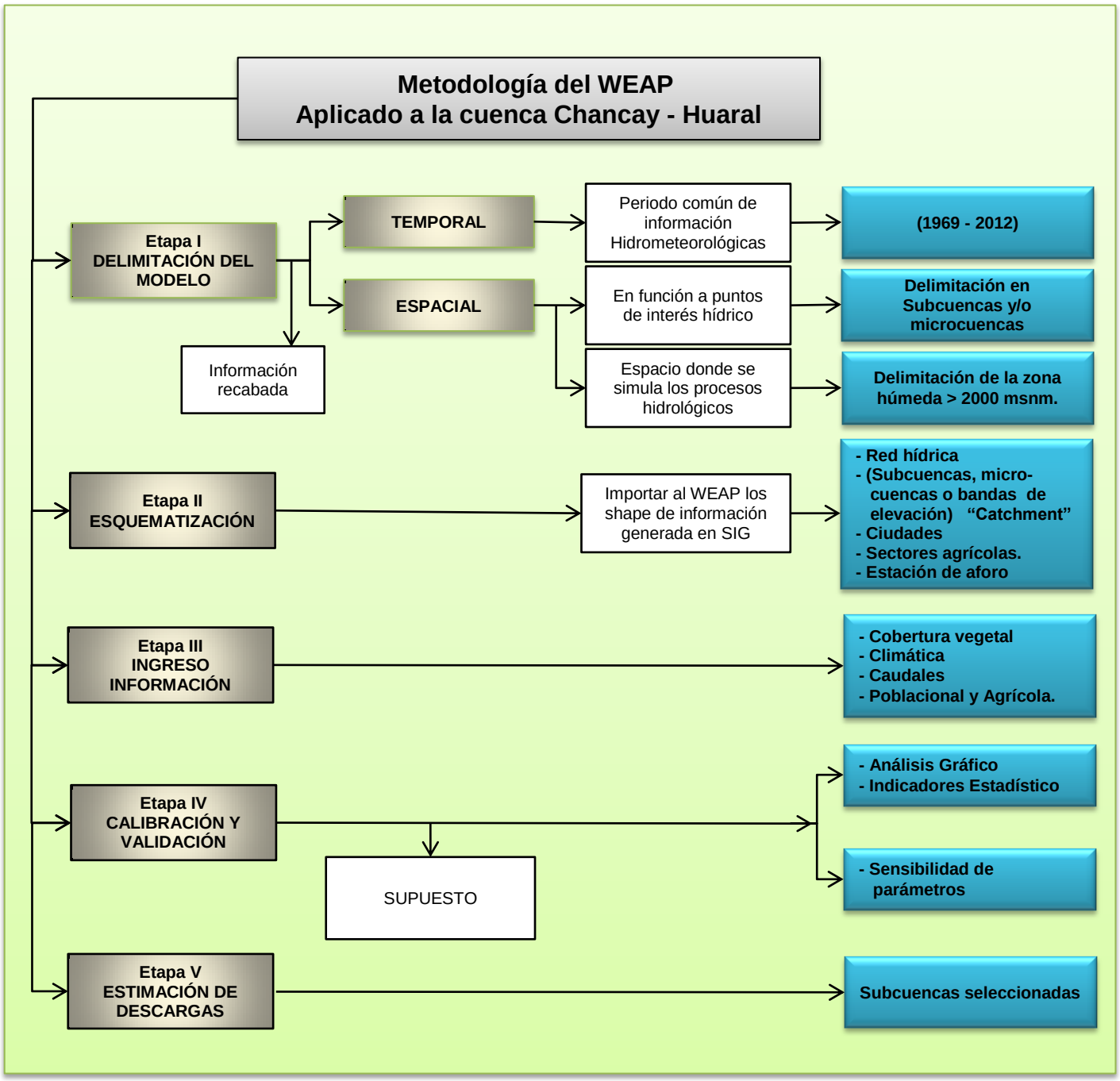


Figura 27. Flujograma metodológico del modelo WEAP.

IX. DESARROLLO Y RESULTADOS

9.1 ETAPA I

En esta primera etapa, se recolecto información y estudios existentes dentro de la cuenca del río Chancay–Huaral, que permitió desarrollar el objetivo del estudio. Dichos estudios son mencionados y utilizados como revisión bibliográfica en el desarrollo de los ítems anteriores (ONERN 2009; PROFODUA 2005; MINAG 2002; etc.) que permitió describir la cuenca. Así, como la información hidrometeorológicas utilizada del banco de datos del SENAMHI. En base a esta información, la primera fase correspondió a la delimitación temporal y espacial del modelo.

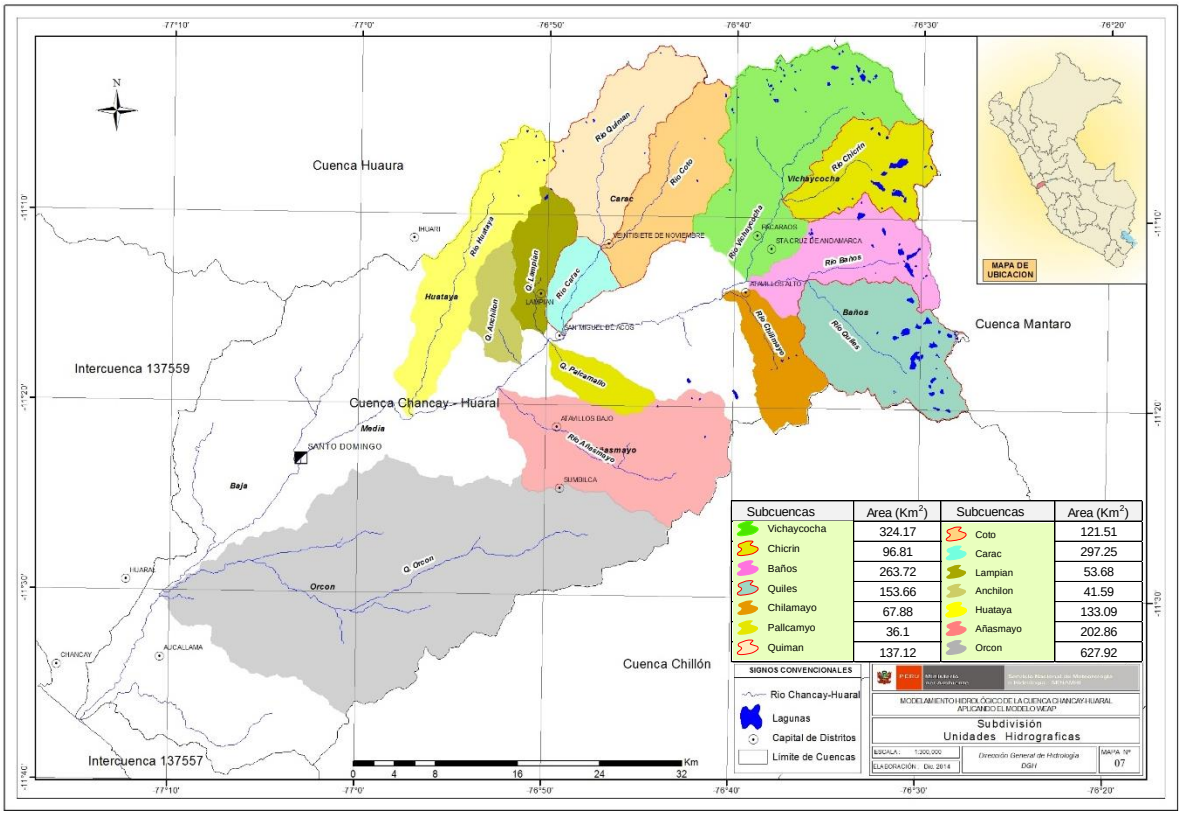
- ***Delimitación temporal:*** comprende la selección de un periodo en común de información hidroclimáticas para el análisis, en este caso el periodo empleado es del año 1969 al 2012, definiendo el periodo de calibración y validación del modelo.

  En función a la evaluación del recurso hídrico, se trabajó a paso de tiempo mensual en el modelo WEAP.

- ***Delimitación espacial/esquema***: el modelo hidrológico WEAP, es un modelo semidistribuido, de tal manera que esquematiza la cuenca en subcuencas, lo que permite aplicar fácilmente los procesos y análisis hidrológicos. Esta delimitación se realiza mayormente en áreas que presentan puntos de aforo, proyectos de irrigación, ciudades y ríos importantes, etc., lo que considera el modelador como zonas de interés hídricos a estimar. En el modelo WEAP, las subcuencas, microcuencas o bandas altitudinales, elementos en donde se simulan los procesos hidrológicos, son comúnmente denominados catchment. Si la cuenca presenta una pronunciada pendiente entonces las subcuencas pueden ser divididas en bandas altitudinales, de esta forma capta mejor la variabilidad altitudinal de las precipitaciones.

  En el presente estudio la cuenca Chancay-Huaral fue dividida en 14 zonas de interés hídricos (Figura 29) y 17 catchment (Figura 31). La delimitación se realizó en base a la información del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y procesados mediante la herramienta ARCGIS utilizándose la extensión de ArcHydro.

  En la Figura 30, se muestra la delimitación del área húmeda para el desarrollo del proceso de simulación. Para ello se tuvo en cuenta la gradiente de precipitación anual - altura (ecuación lineal) y la generación de escorrentía sobre los 200 mm, en base a ello la delimitación del área húmeda se realizó sobre los 2000 msnm.



Subcuencas	Area (Km^2)	Subcuencas	Area (Km^2)
Vichaycocha	324.17	Coto	121.51
Chicrin	96.81	Carac	297.25
Baños	263.72	Lampian	53.68
Quiles	153.66	Anchilon	41.59
Chilamayo	67.88	Huataya	133.09
Pallcamyo	36.1	Añasmayo	202.86
Quiman	137.12	Orcon	627.92

Figura 28. Delimitación de la cuenca en subcuencas/microcuencas.

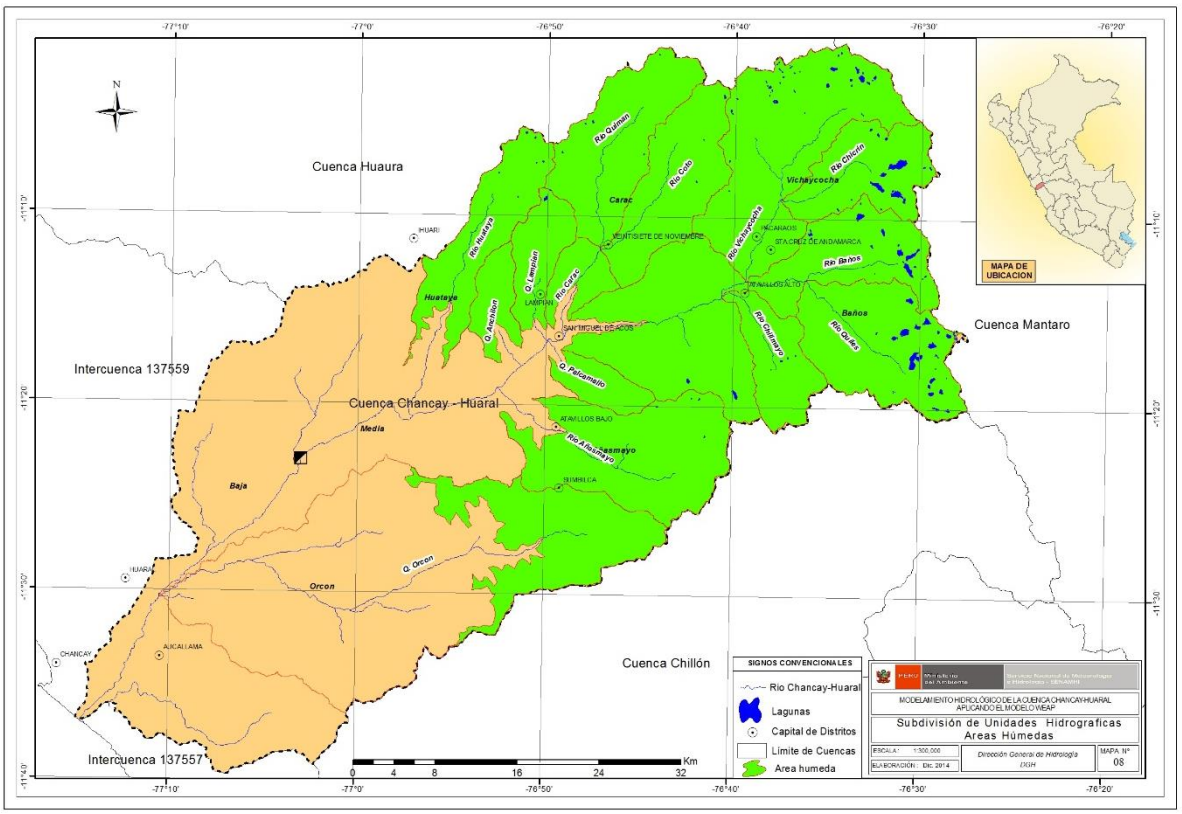


Figura 29. Delimitación de la zona húmeda.

9.2 ETAPA II

La etapa II corresponde a la esquematización de la cuenca en el modelo WEAP, primero se esquematizó la red hídrica de la cuenca, luego los elementos o catchment en donde se simulan los procesos hidrológicos, luego los sectores agrícolas y ciudades para calcular la demanda hídrica agrícola y poblacional, y adicionalmente la estación de aforo en donde se realizó la calibración y validación del modelo (Figura 31).

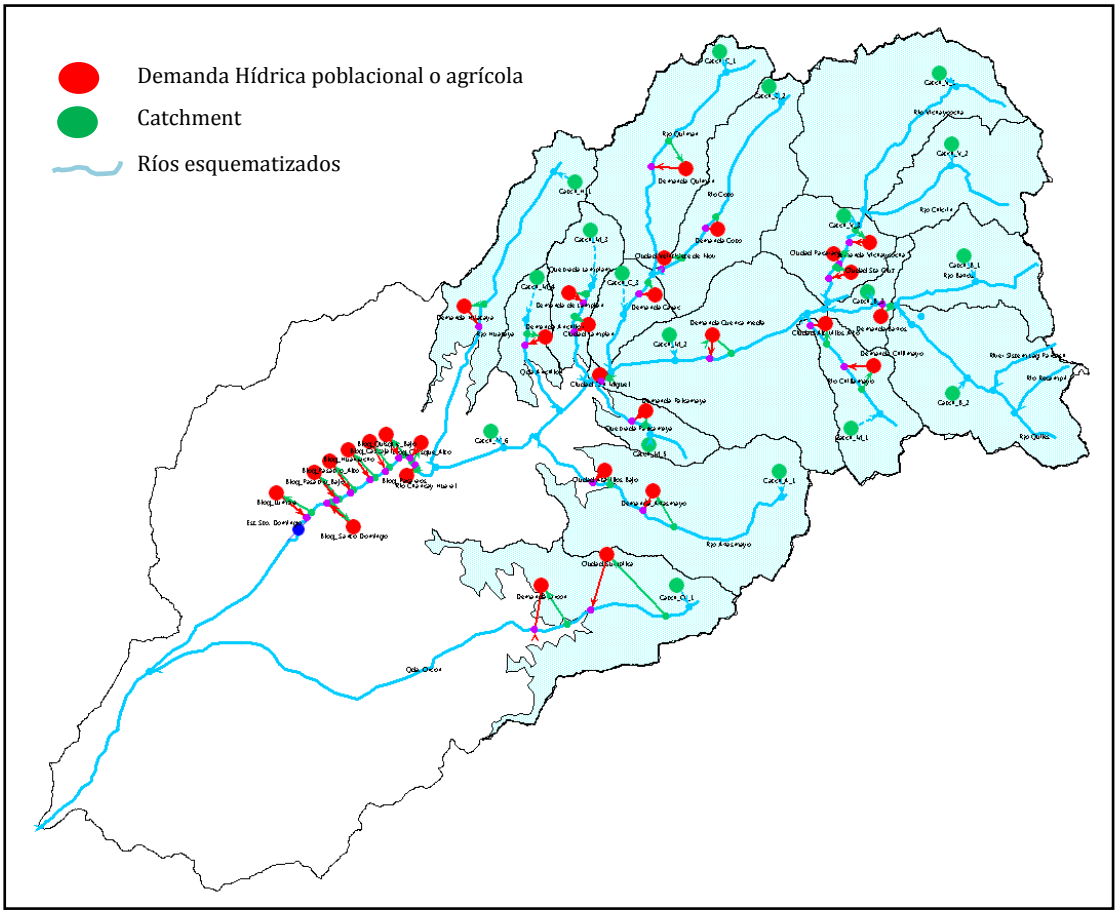


Figura 30. Esquematización en el modelo WEAP.

9.3 ETAPA III

Esta etapa, corresponde al ingreso de la información requerida en el modelo. Se ingresó información poblacional y agrícola (demandas hídricas). Para la simulación hidrológica en cada catchment se añadió la cobertura vegetal en porcentaje y la información climatológica (precipitación, temperatura, humedad relativa, viento y la latitud) que fue generada en cada catchment mediante el método de interpolación krigging, además de los datos de descargas para la estación de aforo Sto. Domingo utilizado en la calibración del modelo. La Figura 32, da una idea del ingreso de la información mencionada en el modelo.

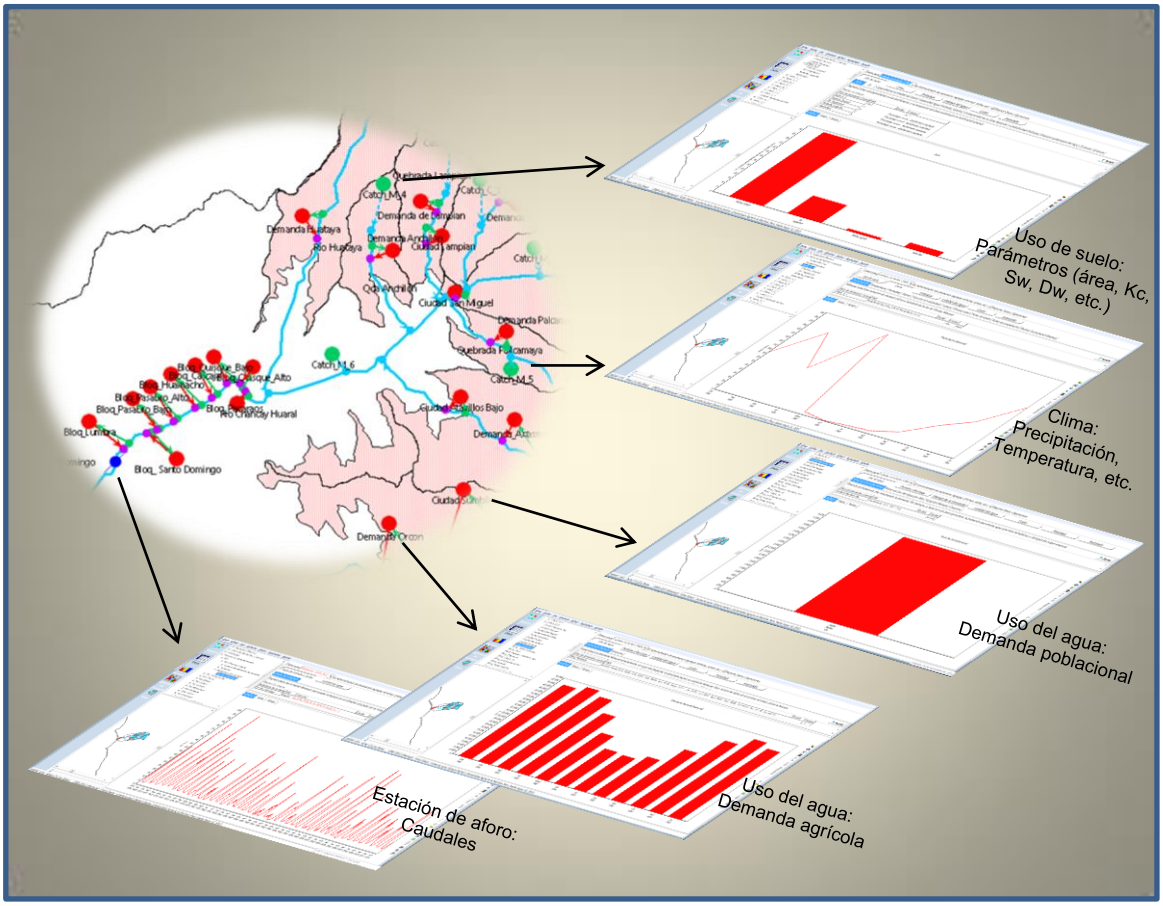


Figura 31. Ingreso de la información en el modelo.

9.4 ETAPA IV

Esta etapa comprende la calibración y validación del modelo WEAP y para su desarrollo se tomó el siguiente supuesto:

Para la modelización de los reservorios se dispone de una baja cantidad y calidad de información de descargas, así como el ingreso de otras variables adicionales, como el aporte de escurrimiento a las lagunas, perdida por infiltración y evapotranspiración del flujo en su recorrido, en tal sentido modelizar las lagunas en dicha situación involucraría generar información no validada aumentando la incertidumbre. El punto es que las descargas se adicionan a la escorrentía superficial natural de la cuenca que es registrada en la estación de aforo.

En relación a lo mencionado, el supuesto es seleccionar para la calibración el periodo menos perturbado por acciones antrópicas (reservorios y centrales hidroeléctricas), siendo el periodo de 1969 a 1978. Para la validación del modelo se consideró un periodo corto de 1979 a 1988, que permite verificar la fiabilidad del modelo y del periodo 1979 al 2012 para comprobar solo si presentan cambios significativos entre el hidrograma observado y simulado. Se tomó en cuenta además en la simulación, que el área aportante de los reservorios fue excluida para la calibración del modelo.

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 estas, a las características hidrológicas particulares de la cuenca lo cual es recomendable primero tener un entendimiento de su uso, de esta manera se realizaron ajustes a los parámetros de Conductividad en la Zona de Raíces (Ks) y 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) y para el parámetro RRF se consideró en estiaje (RRF=5) y en la época húmeda (RRF=1.4), los demás parámetros se determinaron manualmente, considerándose una labor más laborioso pero confiable, la cual permite evaluar la herramienta de estimación paramétrica automática (PEST) incluida dentro del modelo WEAP.

En la Tabla 15, se presentan los valores de los parámetros para el modelo calibrado, que corresponde al mejor resultado obtenido para los indicadores de eficiencia del modelo.

Tabla 15. Parámetros principales de la calibración de la Cuenca Chancay-Huaral.

Parámetros Principales	Vegetación Dispersa	Unidad
Kc	0.9	-
Sw	100	(mm)
Dw	800	(mm)
RRF	5, 1.4	
Ks	600,150	(mm, mes)
Kd	150	(mm, mes)
F	0.5	
Z_1	50	(%)
Z_2	50	(%)

Los resultados de la Figura 33, muestran una simulación aceptable entre los datos observados y simulados del modelo, y estadísticamente indican un buen ajuste en la eficiencia predictiva del modelo (Tabla 16).

Para el periodo de calibración se obtuvo valores de Nash (77%) y R^2 (78%), indicando la capacidad del modelo de representar adecuadamente las condiciones hidrológicas en la cuenca. Los dos períodos de validación simularon correctamente los eventos secos y húmedos observados, presentando resultados similares en sus análisis, Nash (83% - 80%) y R^2 (83 - 80) respectivamente. Los resultados PBIAS del modelo varían de -7.2% a -1.2% la cual indican errores en la simulación hídrica, pero que se encuentran dentro del rango (Muñoz, 2010), lo que sugiere un buen rendimiento del modelo. En general, el resultado gráfico y estadísticos son aceptables y se considera el modelo validado para generar situaciones de análisis hídricos en la cuenca Chancay-Huaral.

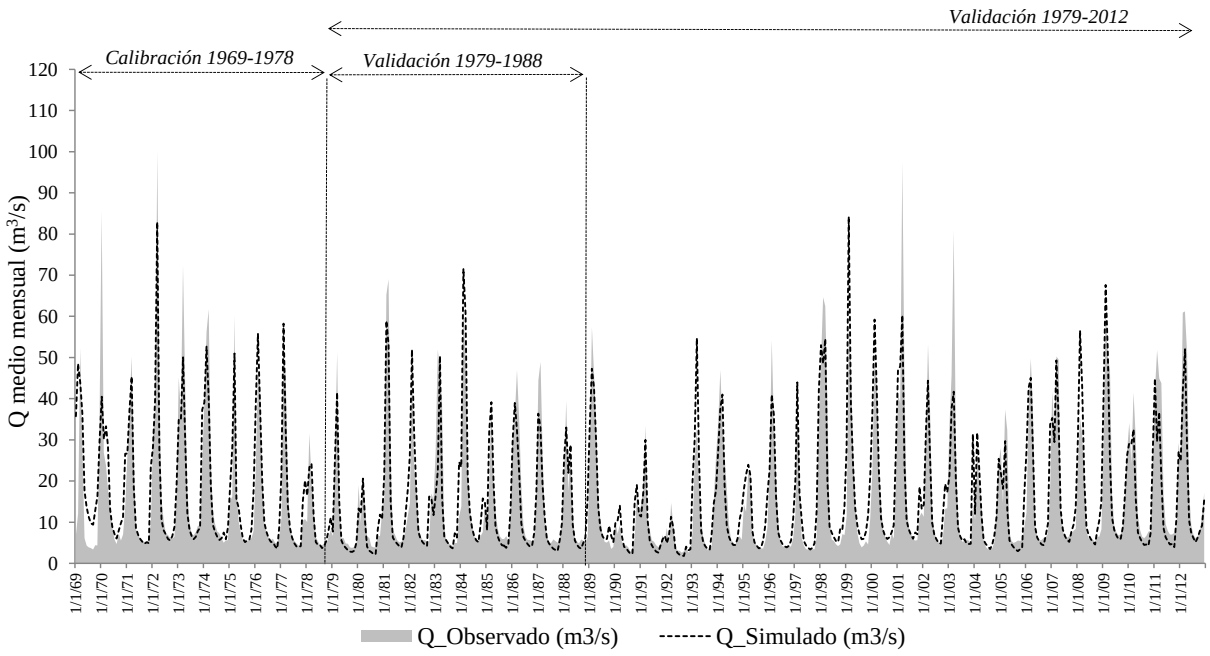


Figura 32. Caudal (Q) observado (sombreado) y simulado (punteada) medio mensual para el periodo de calibración y validación en la cuenca Chancay-Huaral.

Tabla 16. Estadística de la calibración y validación del modelo hidrológico.

Periodo		Método de Bondad de Ajuste - Nash (%)	Indicadores de la evaluación del modelo	
			R^2 (%)	PBIAS (%)
CALIBRACIÓN	1969-1978	76.7	77.5	-1.2
VALIDACIÓN	1979-1989	82.9	83.3	-5.8
VALIDACIÓN	1979-2012	79.7	80.2	-7.2

Se realizó el análisis de sensibilidad, para determinar de qué forma se ven afectadas la eficiencia del modelo al aplicar variaciones porcentuales a los parámetros que definen la configuración de éste. Se modificó solo un parámetro a la vez, dejando los demás fijos, para observar si el modelo mejora o empeora en cuanto a los indicadores de eficiencia (Nash-R^2). Este proceso se realiza para cada parámetro, aumentando y disminuyendo su valor en un 10, 25 y 50%.

En el caso del Nash (Figura 34) se ve que al disminuir los parámetros Ks, Sw y RRF en un 10, 25 y 50%, el modelo empeora, y con los parámetros Dw y Kd el modelo mejora un poco, en 2.5% la eficiencia, siendo los parámetros más críticos a los cambios en estos casos "*RRF*", "*Sw y Dw*". 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 "*Dw*".

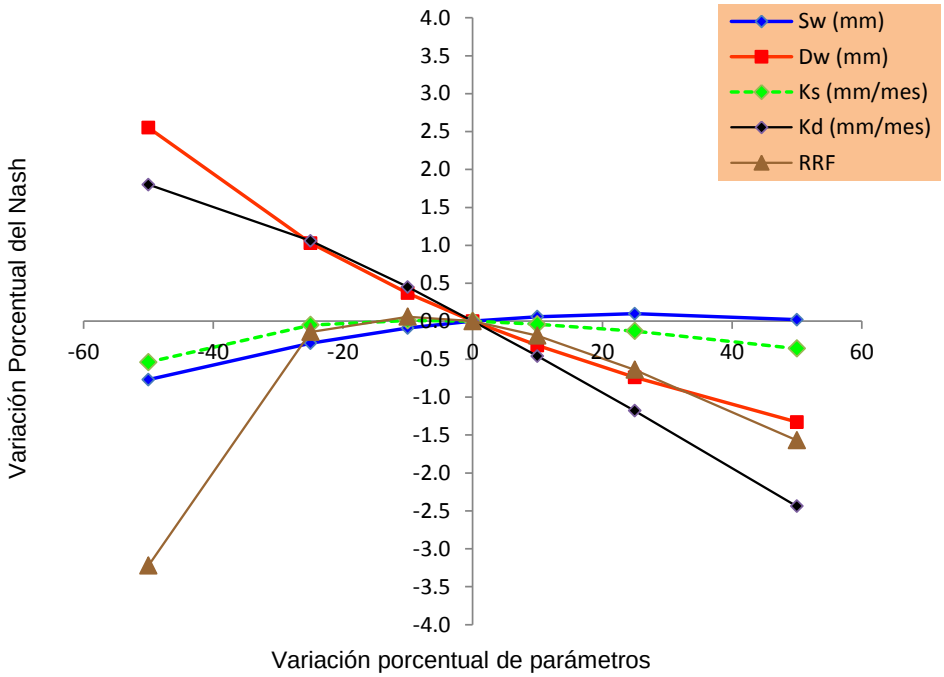


Figura 33. Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo para Nash.

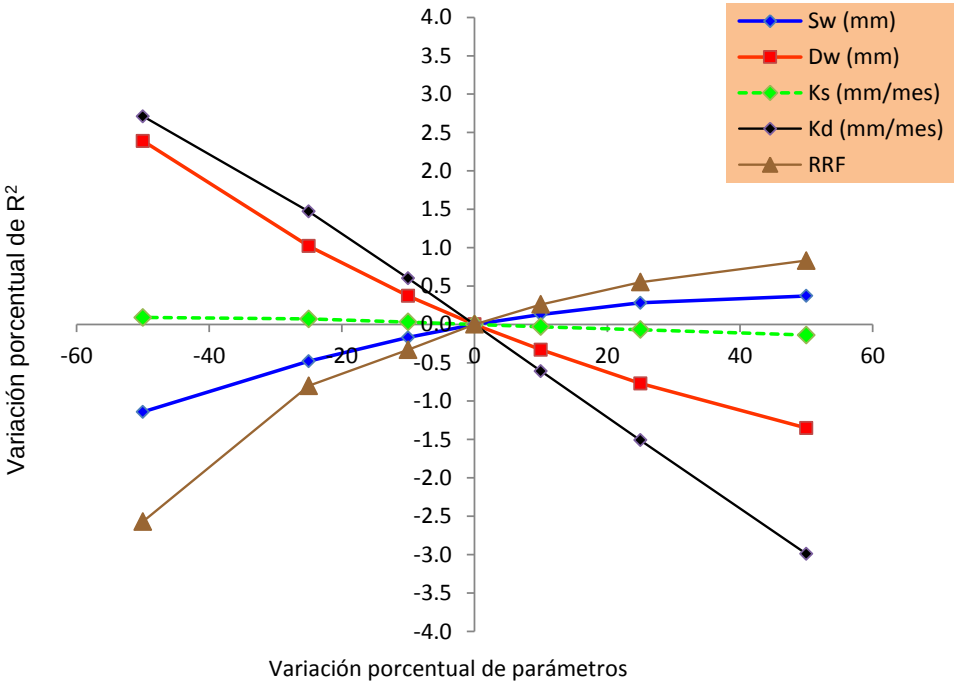


Figura 34. Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo para R^2.

Para el caso del R^2 (Figura 35) presenta similar resultado al Nash, solo diferenciándose en la variación positiva del parámetro (RRF y Sw) el modelo mejora pero no significantemente (menos del 1%). Se puede decir que los indicadores de eficiencia del modelo presentan una baja sensibilidad a los parámetros, obteniendo en general, una mejora en el modelo menor al 2.5%.

9.5 ETAPA V

Teniendo el modelo calibrado y validado, en la Figura 36, se observa parte del régimen mensual generado en los puntos de interés hídrico, siendo los mayores aportantes para el periodo húmedo (Diciembre – abril) las subcuencas Vichaycocha, Baños y Carac, con regímenes que varían de 4 – 10 m^3/s y en los meses de julio a Octubre se presentan los mínimos aportes de caudales.

La subcuenca Carac presentó valores menores a los 2 m^3/s, valores cercanos a los estimados en situ de 1.6 m^3/s (MINAG, 2002).

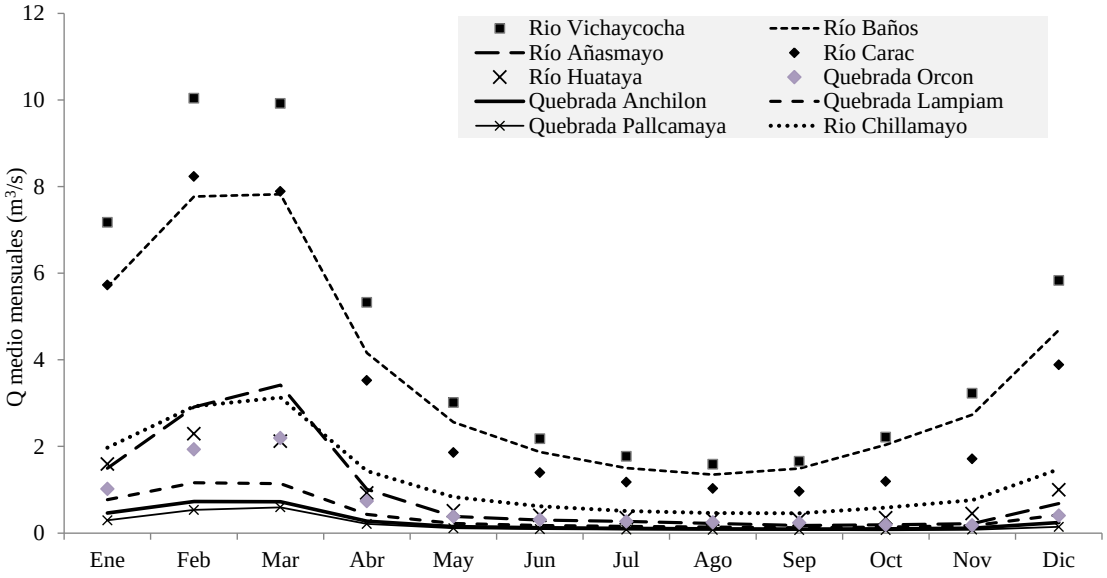


Figura 35. Caudales (Q) medios mensuales generados en tributarios de interés hidrológicos.

X. CONCLUSIONES

- El SENAMHI no cuenta con una red amplia de estaciones climatológicas propias de la cuenca, presentándose solo en la parte baja. Debido a esto, la climatología de la cuenca se evaluó utilizando información climática de estaciones vecinas.

- Se evaluó la consistencia de la información pluviométrica mediante el método del índice del vector regional, con la finalidad de obtener una mejor calidad en la información se excluyeron la estaciones Pirca y Picoy.

- La caracterización pluviométrica en la cuenca Chancay-Huaral, se realizó en función de las estaciones pluviométricas: Huayan, 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.

- El diseño del modelo WEAP simula en forma satisfactoria el comportamiento de los caudales comprendidos entre los años 1969 y 2012, teniendo un coeficiente de Nash de 76.7% para la calibración (1969-1978) y 82.9% para la validación (1979-1988). Para el periodo evaluado de (1979-2012) presenta un Nash de 79.7% lo cual indica que los cambios del hidrograma en el periodo de estiaje por las descargas de los reservorios, no son significativos.

- 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 Lampian, quebrada Anchilon, río Huataya, Añasmayo, quebrada Orcon, con el modelo hidrológico WEAP calibrado y validado por el método de *Soil Moisture Model.*

- La modelización hidrológica en la cuenca Chancay-Huaral es compleja debido a la escasez de datos extensos y confiables que permitan interconectar bajo un esquema los reservorios, infraestructuras de control. Bajo este esquema para la modelización se consideró algunos supuestos en el desarrollo del trabajo, en consideración a esto, los resultados presentados deben ser usados como referencia y no como valores exactos.

XI. RECOMENDACIONES

- La estimación de descargas en puntos de interés hídricos importantes, se ve mejorado con la implementación de estaciones hidrológicos, generando un periodo de información y una nueva estimación de sus parámetros a través de su calibración. De esta forma se recomienda la implementación de una red hidrométrica en la cuenca Chancay-Huaral.

- Complementando la primera recomendación, es necesario realizar un levantamiento de la información (altura, área, volumen, etc.) de las lagunas embalsadas, que permitan determinar la capacidad real de almacenamiento para un mejor uso y aprovechamiento del recurso hídrico.

XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, E. 2004. Modelación del proceso lluvia escorrentía usando sistemas de información geográfica. Perú. Facultad de Ingeniería. Universidad de Piura.

- Aranda, C. 1998. Procesos del Ciclo Hidrológico. México. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- Cabrera. 2012. Calibración de Modelos Hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf.

- EMAPA (2005). Evaluación de Impacto Ambiental Del Proyecto: "Nueva Unidad de Sedimentación Auepepampa"

- 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.

- Estrela, T. (1992). Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. Centros de Estudios Hidrográficos. España.

- Mediero, L. 2007. Pronóstico probabilístico de caudales de avenida mediante redes bayesianas aplicadas sobre un modelo hidrológico distribuido. España. Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética. Universidad Politécnica de Madrid.

- 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 Pacifico". 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.

- Muñoz, O. 2010. Procesos y Parámetros Hidrológicos para la Representación Conceptual de una Cuenca. Disponible

http://es.scribd.com/doc/98873934/Procesos-Hidrologicos-y-La-Representacion-Conceptual-de-Estos

- Ocampo, O. 2012. Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático. Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería; Departamento de Ingeniería Química.

- ONERN (1969). "Inventario, Evaluación y Uso Racional de los Recursos Naturales de la Costa del Valle Chancay-Huaral". ONERN. Lima, Perú.

- 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.

- Vicuña, S; Escobar, M. (2009). Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP. Guía metodológica. Universidad de Concepción-Chile, SEI-US.

- SEI, Stockholm Environment Institute. (2011). *User Guide WEAP.*

- SEI, Stockholm Environment Institute. (2012). *Water Evaluation And Planning.* Recuperado el 27 de Abril de 2012, de WEAP21: http://www.weap21.org/

XIII. ANEXOS

Tabla 17. Requerimiento de datos para una aplicación WEAP.

Datos Requeridos para alimentar el modelo y el proceso de calibración	Prioridad	Formato Preferido	Notas
Datos de Entrada - Demandas			
• Uso de suelo			Estos datos son necesarios para caracterizar la cuenca.
• DEM (Modelo de Elevación Digital)	1	GIS	
• Cobertura de vegetación	1	GIS	
• Tipo de suelo	2	GIS	
• Geología	2	GIS	
• Áreas de agricultura irrigada	1	GIS, Excel, texto o csv	
• Tecnología de irrigación	2	GIS, Excel, texto o csv	
• Clima			Estos datos son necesarios para alimentar el modelo con condiciones climáticas. Precipitación y Temperatura deben ser promedios de cada paso de tiempo dentro el periodo de modelación, mientras que humedad relativa y viento pueden ser un promedio aproximado
• Precipitación (series de datos históricos, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
• Temperatura (serie de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
• Humedad Relativa (promedio mensual del periodo de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
• Viento (promedio mensual del periodo de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
• Cobertura de nubes	2	Excel, texto, o csv	
• Latitud	1	Excel, texto, o csv	
• Sitios de Demanda (ciudades industrias, zonas agrícolas)			Aunque las demandas agrícolas se pueden estimar dentro del modelo hidrológico, también se pueden agrupar en un sitio de demanda
• Numero de usuarios	1	No hay formato preferido	
• Consumo per capita	1	No hay formato preferido	
• Variación mensual	1	No hay formato preferido	
• Porcentaje de retorno	1	No hay formato preferido	
Datos de Entrada – Suministro y recursos			
-Reservorios/represas	1	No hay formato preferido. Los datos pueden venir en diversos formatos o hacer parte de un texto. La curva de volumen/elevación puede venir en Excel.	Si existen reservorios, es importante tener información sobre su localización y su característica física y de operación.
Datos físicos			
• Capacidad de almacenamiento			
• Volumen inicial			
• Curva de volumen/elevación			
• Evaporación			
• Perdidas de agua subterránea			
Datos de operación			
• Máximo nivel de conservación			
• Máximo nivel de seguridad			
• Máximo nivel inactivo			
Datos requeridos para alimentar el modelo y durante el proceso de calibración.			
-Capacidad hidroeléctrica	1	No hay formato preferido	El modelo requiere datos para poder calcular producción hidroeléctrica.
• Mínimo caudal de turbina			
• Máximo caudal de turbina.			
• Cabeza hidráulica			
• Factor de planta.			
• Eficiencia			
-Requerimiento de caudales mínimos	2	No hay formato preferido	
-Canales para extracción de agua (i.e. canales de irrigación)	1	No hay formato preferido	Es importante saber la localización de los canales
-Agua subterránea	2		
Datos para Calibración del Modelo			
-Ríos			
Serie de tiempo de caudales	1	Excel, texto o csv	Estos datos son importantes para chequear el comportamiento del modelo, y realizar la calibración.
-Nieve			
Serie de tiempo de profundidad de nieve o de equivalente de agua	2	Excel, texto o csv	
Estimados de volumen de nieve	2	Excel, texto o csv	
-Glaciares			
• Area de cobertura de glaciares	2	GIS o Excel	
• Esorrentia de agua desde glaciares		Excel, texto o csv	