

# **ESTUDIO DE BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL RIO YAUCA**

## **I.- INTRODUCCION**

### **1.1.- INTRODUCCIÓN**

La Intendencia de Recursos Hídricos (IRH) del Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) en coordinación con la Administración Técnica del Distrito de Riego Acarí – Yauca – Puquio (ATDR – AYP), programaron realizar el Estudio Integral de los Recursos Hídricos en las Cuencas de los Ríos Acarí y Yauca.

El estudio Integral en mención tiene tres componentes: Hidrología Superficial, Aguas Subterráneas y Calidad de Agua. El componente Hidrología Superficial tiene, además, un estudio complementario de Inventario de Fuentes de Agua Superficial.

El presente estudio corresponde únicamente al componente Hidrología Superficial (Estudio Hidrológico de la Cuenca del Río Yauca), el cual considera como complemento el Inventario de Fuentes de Agua Superficial y el Sistema de Información Geográfica.

El presente estudio permitirá conocer la disponibilidad hídrica, a nivel de la cuenca y subcuencas, la demanda hídrica por sectores de riego y comisión de regantes, el balance hídrico por sector de riego, el balance hídrico del embalse Ancascocha, los caudales de máximas avenidas en puntos importantes de la cuenca y, finalmente, la capacidad de almacenamiento de la cuenca colectora Ancascocha. Dicha información obtenida permitirá realizar una

adecuada y eficiente gestión del recurso hídrico de la cuenca por parte de la Autoridad de agua.

El estudio hidrológico, además, contendrá una sistematización de la información procesada y obtenida en un Sistema de Información Geográfica (SIG), mediante los planos temáticos indicados en los términos de referencia del estudio.

La hidrología es una de las ciencias de la tierra. Estudia el agua de la tierra, su ocurrencia, circulación y distribución, sus propiedades físicas y químicas, y su relación con las clases de vida. Hidrología abarca la hidrología de agua superficial e hidrología de agua subterránea, este último, sin embargo, es considerada estar sujeto en sí mismo. Otras ciencias de la tierra relacionadas incluyen la climatología, meteorología, geología, geomorfología, sedimentología, geografía, y oceanografía.

Ingeniería hidrológica es una ciencia aplicada, éste utiliza los principios hidrológicos en la solución de los problemas ingenieriles originadas por la explotación humana de los recursos hídricos de la tierra. En un sentido más amplio, la ingeniería hidrológica busca establecer relaciones que definen la variabilidad espacial, temporal, estacional, anual, regional, o geográfica del agua, con el objetivo de determinar el riesgo social implicado en el dimensionamiento de sistemas y obras hidráulicas.

La ingeniería hidrológica toma una vista cuantitativa del ciclo hidrológico. Generalmente, las ecuaciones son usadas para describir la interacción entre las diferentes fases del ciclo hidrológico. La siguiente ecuación básica relaciona la precipitación y la escorrentía superficial:

$$QPL$$

(1.1)

en el que  $Q$  = escorrentía superficial,  $P$  = precipitación; y  $L$  = pérdidas, o abstracciones hidrológicas. Este último término incluye la interceptación, infiltración, almacenamiento superficial, evaporación, y evapotranspiración.

Generalmente, la cuenca tiene una capacidad abstractiva que actúa para reducir la lluvia total en lluvia efectiva. La capacidad abstractiva es una característica de la cuenca, que varía con el nivel de humedad almacenada. La diferencia entre lluvia total y lluvia efectiva son las pérdidas o abstracciones hidrológicas. La diferencia entre lluvia total y abstracciones hidrológicas es llamada escorrentía. Además, los conceptos de lluvia efectiva y escorrentía son equivalentes.

## **1.2.- ANTECEDENTES**

En la cuenca hidrográfica del río Yauca, específicamente en los sectores de riego de Coracora, Chaviña, Chumpi, Jaqui, Mochica y Yauca del Distrito de Riego Acarí-Yauca-Puquio, se tiene un descontento social originado por la disconformidad en la distribución del agua, ya que el agua regulada en el embalse de Ancascocha satisface las necesidades de agua únicamente de los sectores de riego Chaviña, Yauca, Mochica, Jaqui y Lampalla y no la del sector de riego Coracora y Chumpi, por lo que, estos últimos, reclaman el derecho de uso de agua del dique Ancascocha. Este problema se acrecienta en los meses de estiaje.

## **1.3.- OBJETIVOS.**

### **1.3.1 Objetivos Generales**

- Realizar el Estudio Hidrológico Superficial de la cuenca del río Yauca.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la disponibilidad hídrica de la cuenca y de las subcuencas o tributarios importantes.
- Determinar la demanda hídrica de las diferentes comisiones de regantes que se encuentran dentro de la cuenca.
- Realizar el balance hídrico para cada sector de riego dentro de la cuenca del río Yauca.
- Realizar el balance hídrico del embalse Ancascocha.
- Determinar la capacidad de almacenamiento de la cuenca colectora Ancascocha.
- Estimar los caudales máximos en los puntos de interés del río Yauca.

## II.- MODELAMIENTO DE LA CUENCA

### 2.1.- INTRODUCCIÓN

Ciertas aplicaciones de la Ingeniería Hidrológica pueden requerir análisis complejos que involucra la variación temporal y/o espacial de la precipitación, abstracciones hidrológicas, y escorrentía. Típicamente, tales análisis implican un gran número de cálculos y son por lo tanto satisfechos con la ayuda de una computadora digital. El uso de las computadoras en todos los aspectos de la ingeniería hidrológica ha incrementado el énfasis en el modelamiento de cuencas.

Un modelo de cuenca es un conjunto de abstracciones matemáticas que describen las fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular la conversión de la precipitación en escorrentía. En principio, la técnica de modelamiento de cuenca es aplicable a cuencas de cualquier tamaño, pequeñas (unas hectáreas), medianas (decenas de kilómetros cuadrados) o grandes (miles de kilómetros cuadrados). En la práctica, sin embargo, aplicaciones de

modelamiento de cuenca son generalmente confinados al análisis de cuencas para el que la descripción de la variación temporal y/o espacial de la precipitación sea garantizada. Usualmente este es el caso de cuencas medianas y grandes.

Una aplicación típica de modelamiento de cuenca consiste de lo siguiente: (1) selección del tipo de modelo, (2) formulación y construcción del modelo, (3) comprobación del modelo, y (4) aplicación del modelo. Un modelo de cuenca incluye todas las fases relevantes del ciclo hidrológico y, como tal, están compuestos de uno o más técnicas para cada fase.

## **2.2.- CLASIFICACION DE MODELOS DE CUENCA**

Hay muchas aproximaciones a la Ingeniería Hidrológica, ellos pueden ser considerados como modelos que buscan representar el comportamiento de un prototipo (es decir el mundo real). Generalmente, los modelos pueden ser clasificados como (a) material, o (b) formal. Un modelo material es una representación física de un prototipo, más simple en estructura y con propiedades similares a aquella del prototipo. Un modelo formal es una abstracción matemática de una situación idealizada que preserva las propiedades estructurales importantes del prototipo.

Los modelos materiales pueden ser icónicos o análogos. Los modelos icónicos son representaciones simplificadas del sistema hidrológico del mundo real, tal como lisímetros, simuladores de lluvia, y cuencas experimentales. Los modelos análogos son aquellos que basan sus mediciones en sustancias diferentes de aquellas del prototipo, tal como el flujo de corriente eléctrica para representar el flujo de agua.

En Ingeniería Hidrológica, todos los modelos formales son matemáticos en naturaleza, por lo tanto el uso del termino *modelo*

*matemático* se refiere a todos los modelos formales, este último término es el más ampliamente utilizado en Ingeniería Hidrológica.

Los modelos matemáticos pueden ser (1) teóricos, (2) conceptuales, o (3) empíricos. Un modelo teórico esta basado en un conjunto de leyes generales; contrariamente, un modelo empírico es basado en inferencias derivadas del análisis de datos. Un modelo conceptual esta de algún modo entre modelos teóricos y empíricos.

En Ingeniería Hidrológica, cuatro modelos matemáticos son de uso común: (1) determinístico, (2) probabilístico, (3) conceptual, y (4) paramétrico. Un modelo determinístico es formulado usando las leyes de los procesos físicos o químicos, como el descrito por ecuaciones diferenciales. Un modelo probabilístico, sea estadístico o estocástico es gobernado por las leyes del cambio o probabilidad. Los modelos estadísticos tratan con muestras observadas, mientras que los modelos estocásticos se centran en las propiedades aleatorias de ciertas series hidrológicas de tiempo, por ejemplo, caudales diarios. Un modelo conceptual es una representación simplificada de los procesos físicos, obtenidas agregando sus variaciones espaciales y/o temporales, y descrito en términos de sus ecuaciones diferenciales ordinarias o ecuaciones algebraicas. Un modelo paramétrico (es decir, empírico, o de caja negra) representa los procesos hidrológicos por medio de ecuaciones algebraicas que contienen parámetros a ser determinados por medios empíricos.

### **2.3.- COMPONENTES Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO:**

Las componentes básicas del modelo de cuenca son: (1) precipitación, (2) abstracciones hidrológicas, y (3) escorrentía. Usualmente, la precipitación es la entrada del modelo, las abstracciones hidrológicas son determinadas de las propiedades de la cuenca, y la escorrentía es la salida del modelo.

### III.- INFORMACIÓN BÁSICA

#### 3.1.- DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA

##### 3.1.1 Ubicación

La cuenca Yauca, se encuentra ubicado geográficamente entre los meridianos 73°40'33" y 74°33'52" de longitud oeste y los paralelos 14°41'20" y 15°42'36" de latitud sur; políticamente comprende las Provincias de Lucanas y Parinacochas del Departamento de Ayacucho y la Provincia de Caravelí del Departamento de Arequipa. (Ver Fig. 3.1 y Plano N°01 del anexo VIII).

##### a). Ubicación Geográfica

UBICACIÓN GEOGRAFICA				
SISTEMAS	DATUM	COMPONENTES	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
COORDENADAS GEOGRAFICAS	HORIZONTAL WGS 1984	LONGITUD OESTE	74°33'52"	73°40'33"
		LATITUD SUR	15°42'36"	14°41'20"
COORDENADAS UTM Zona 18	HORIZONTAL WGS 1984	METROS ESTE	546,665	642,595
		METROS NORTE	8'263,132	8'376,058
ALTITUD	VERTICAL NIVEL MEDIO DEL MAR	m.s.n.m.	0	5,185 C° Ccellohorcco

##### b). Ubicación Política

UBICACIÓN POLITICA			
CUENCA	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO
YAUCA	AREQUIPA	CARAVELI	JAQUI
			YAUCA
	AYACUCHO	LUCANAS	CHAVIÑA
			SAN PEDRO
			SANCOS
		PARINACOCHAS	CORACORA
			CHUMPI
			PULLO

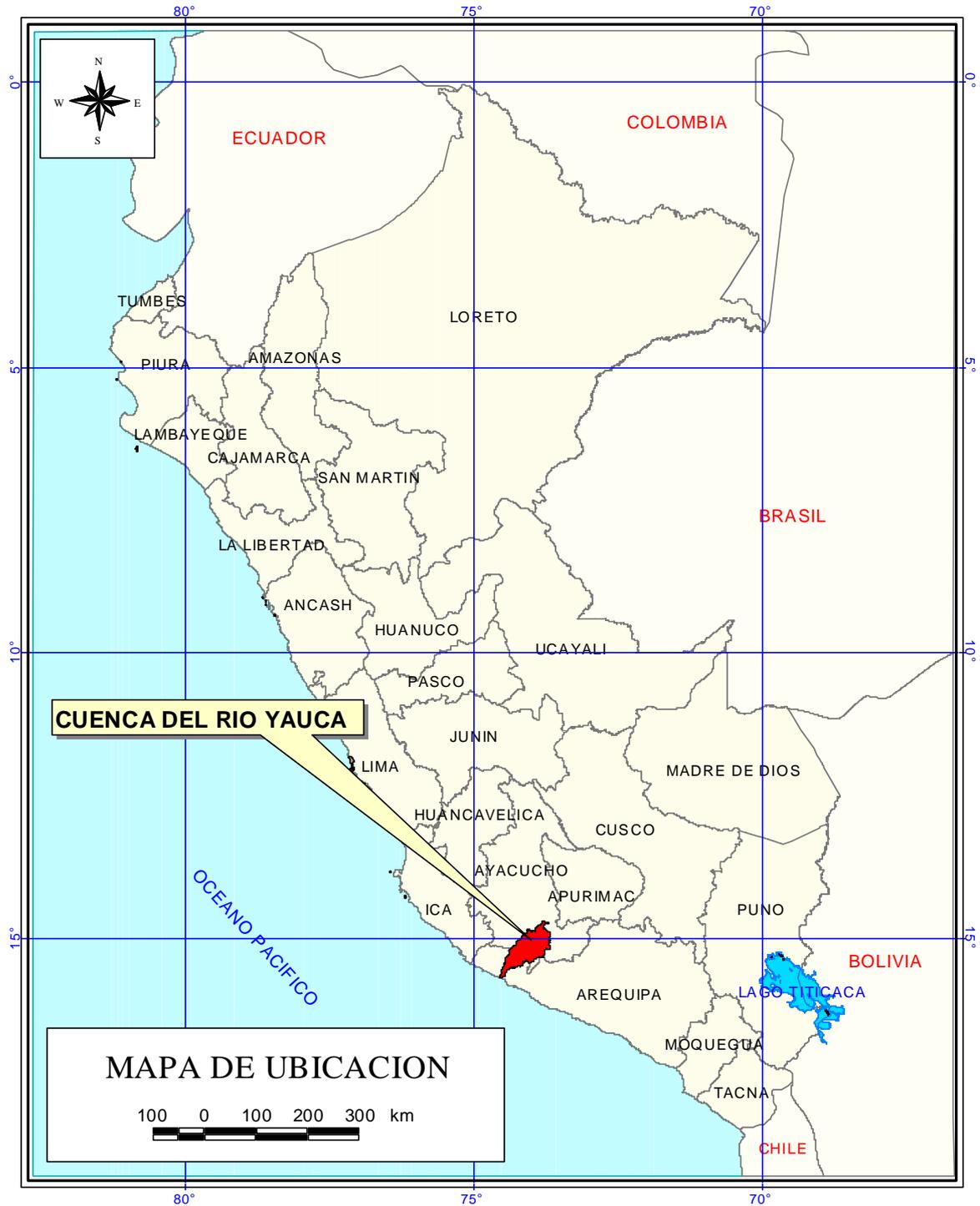


Fig. 3.1 Ubicación geográfica y política de la cuenca Yauca

### **3.1.2 División Hidrográfica**

La división topográfica de la cuenca es delimitada por la unión de puntos altos que separan las cuencas de drenaje en salidas diferentes. Puesto que, no se identificó trasvase y/o flujo subsuperficial (interflujo y flujo subterráneo) hacia la cuenca Yauca, se considera que la división de cuenca hidrológica coincide con la división topográfica de la cuenca.

La cuenca Yauca pertenece a la vertiente del Pacífico y tiene una dirección Sur-Oeste, limitando por el Oeste con la cuenca del río Acarí, por el Norte con la cuenca del río Pampas, por el Este con la cuenca del río Ocoña, por el Sur con las cuencas de los ríos Chaparra y Chala y, por el Sur-Oeste con el Océano Pacífico.

### **3.2.- RECOPIACION DE INFORMACIÓN BASICA**

la información recopilada existente es la siguiente:

- Expedientes técnicos, publicaciones y estudios anteriores, realizadas por las diferentes Instituciones relacionadas con el uso de los Recursos Hídricos.
  1. “Inventario, Evaluación y Uso Racional de los Recursos Naturales de la Costa, Cuencas de los Ríos Acarí, Yauca, Chala y Cháparra”, publicado por la ONERN.
  2. Estudio Batimétrico Topográfico del Embalse Ancascocha y Balance Hídrico de la Cuenca del río Yauca”. Realizado por la Municipalidad Distrital de Parinacochas.
  3. “Plan de Acondicionamiento Territorial de la Provincia de Parinacochas”.
  4. “Inventario de Infraestructura de Riego en el ámbito del Distrito de Riego Acarí – Yauca – Puquio”.

- Planos catastrales a escala 1/10,000.
- Cartas Nacionales, de las zonas : Chaviña, Coracora, Jaquí y Yauca.

### **3.2.1.- Información Geológica y de Suelos**

A lo largo del valle Yauca se asientan terrenos agrícolas cuyos suelos son de muy buena calidad, se caracterizan por ser franco arcillosas a francos, PH neutro, de buena capacidad de intercambio cationico (CIC) y presencia de piedras y guijarros en algunos lugares a largo del lecho del río. En los [Planos N°09 al N°12 del anexo VIII](#), se puede observar la variabilidad de los suelos de la cuenca Yauca.

Con la intención de proporcionar una rápida y breve idea del paisaje edáfico dominante en el valle Yauca, se ha diferenciado cuatro paisajes fisiográficos.

#### **a) Llanura aluvial inundable**

Dentro de este paisaje se encuentran los suelos ubicados en la llanura aluvial inundable (piso del valle), en el cauce actual de río, en el lecho de inundación periódica y en aquellas áreas de antiguos cauces que han sido ganadas progresivamente para la agricultura.

La presencia de cantos rodados y arena es común en las zonas de inundación, cauce de río y riberas. Los problemas de drenaje en estos suelos son serios, no así en cuanto a la salinidad, igualmente están sujetos a erosión lateral durante la época de avenidas.

**b) Llanura aluvial no inundable**

Son suelos por lo general profundos y de buenas características texturales que varían desde el franco hasta el franco grueso, en estos suelos se detectan problemas de salinidad.

**c) Abanicos aluviales**

Este paisaje comprende los suelos que se encuentran dentro del abanico aluvial reciente de las quebradas laterales del cauce principal y que en conjunto han formado una llanura, contribuyendo de este modo a ampliar al área agrícola. Son principalmente de características físicas cambiantes. Se tiene así, desde suelos profundos y de textura moderadamente gruesas hasta superficiales y de textura gruesa o moderadamente gruesas.

**d) Valle encajonado**

Se trata de suelos que se encuentran en terrazas de diferentes niveles, estando algunas interrumpidas por los conos de deyección de las quebradas que confluyen al valle. Algunos de los suelos presentan problemas de salinidad, siendo sus características principales, la textura gruesa, presencia de grava redondeada y pedregosidad angular y sub angular.

### **3.3.- SISTEMA HIDROGRAFICO Y CUENCA**

#### **3.3.1 Sistema Hidrográfico**

La cuenca del río Yauca presenta la forma general de un cuerpo alargado cuyo patrón de drenaje es de tipo dendrítica;

su ancho mayor es de 62.0 Km., el que va disminuyendo considerablemente a medida que se acerca a su desembocadura, siendo de 5.0 Km. a la altura del Distrito de Yauca. El área total de drenaje hasta su desembocadura es de 4,312.29 Km<sup>2</sup>, contando con una longitud máxima de recorrido, desde sus nacientes, de 186.6 Km. se ha determinado que la superficie de la cuenca colectora húmeda o “cuenca imbrifera” es de 2,387.43 Km<sup>2</sup>., estando fijado su límite por la cota 2,800 m.s.n.m., estimándose en consecuencia, que sólo el 55.4% del área total de la cuenca contribuye sensiblemente al escurrimiento superficial.

El río Yauca nace en la laguna de Pallapalla con el nombre de quebrada Antapallca; posteriormente, adopta sucesivamente los nombres de río Pallccarona, río Sangarara y río Lampalla, conociéndosele con el de río Yauca a partir de su confluencia con la quebrada de Languirre, el cual conserva hasta su desembocadura en el océano pacífico.

### **3.3.2 Subcuencas Tributarias**

Las afluentes principales de la cuenca Yauca son: por la margen derecha, los ríos Paralmayoc (553.04 Km<sup>2</sup>) y Languirre (487.05 Km<sup>2</sup>) y, por la margen izquierda, los ríos Paccha (72.70 Km<sup>2</sup>), Huaccramayo (149.85 Km<sup>2</sup>), Acos (186.95 Km<sup>2</sup>), Tampa (228.51 Km<sup>2</sup>) y Acaville (676.27 Km<sup>2</sup>).

### **3.3.3 Características Fisiográficas de la Cuenca y Subcuencas**

Una cuenca puede variar desde tan pequeño como una hectárea a cientos de miles de kilómetros cuadrados. Cuencas pequeñas son aquellas donde la escorrentía es

controlada por procesos de flujo sobre el terreno (overland flow). Cuencas grandes son aquellas donde la escorrentía es controlada por procesos de almacenamiento en los cauces de ríos. Entre cuencas pequeñas y grandes, hay un amplio rango de tamaños de cuencas con características de escorrentía que está entre aquella de cuencas pequeñas y grandes. Dependiendo de su tamaño relativo, cuencas medianas son referidos como pequeñas o grandes.

Con fines de realizar el estudio hidrológico, la cuenca Yauca se subdividió en 16 subcuencas, de acuerdo a la importancia de sus tributarios y a la variación espacial de la precipitación, en la Fig. 3.3 se muestra las subcuencas, y en el [Plano N°03 del anexo VIII](#), se muestra ésta en mayor detalle.

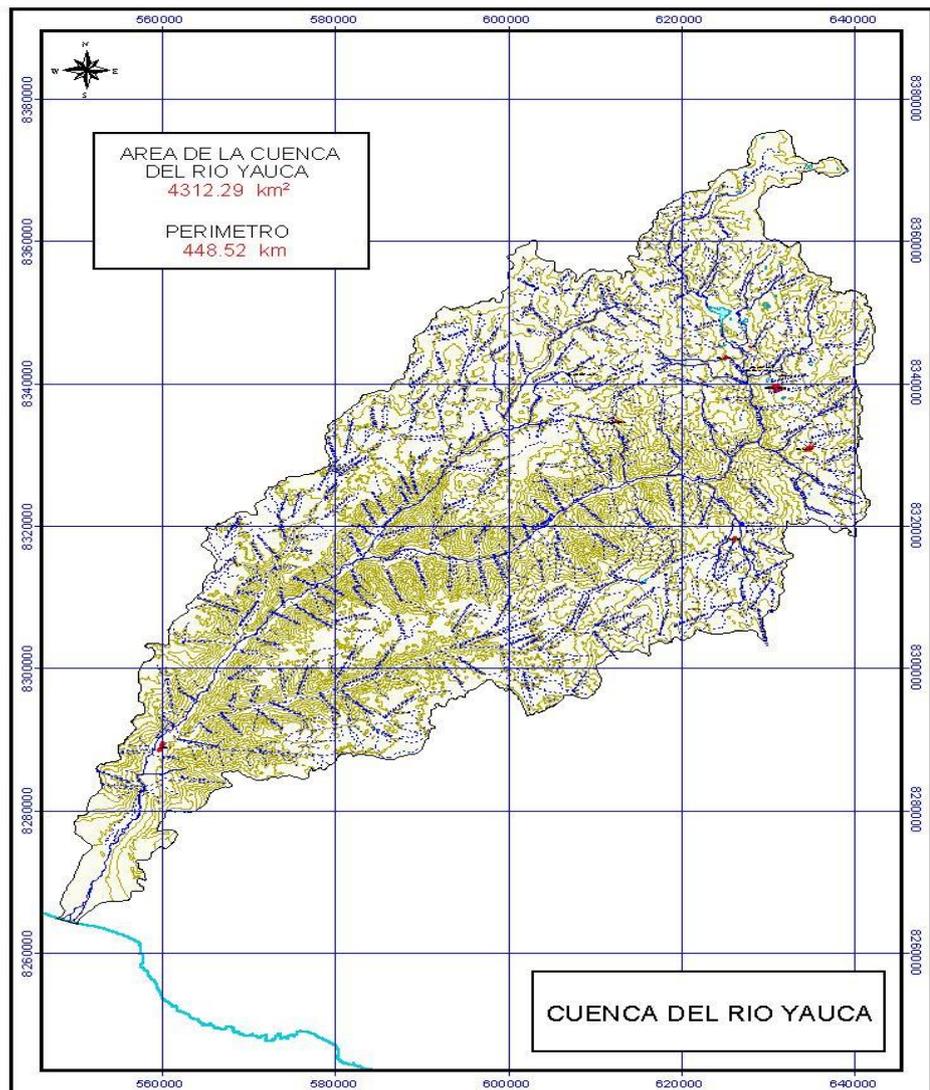
Las características hidrológicas de una cuenca son descritas en términos de las siguientes propiedades: (1) área, (2) forma, (3) relieve, (4) medidas lineales, y (5) patrones de drenaje. En el [Cuadro N°1 del anexo II](#), se presenta las características fisiográficas de la cuenca y subcuencas.

### **(1) Área de Cuenca**

La cuenca Yauca tiene un área de drenaje de 4,312.29 Km<sup>2</sup>. Área de cuenca, o área de drenaje, es quizás la propiedad de la cuenca más importante. Ésta determina el potencial del volumen de escorrentía, proporcionado la tormenta que cubre el área completa. La cuenca es delimitada por la unión de puntos altos que separan las cuencas de drenaje en salidas diferentes. Debido al efecto de flujo subsuperficial (interflujo y flujo subterráneo), la división de cuenca hidrológica no podría estrictamente coincidir con la división topográfica de la

cuenca. La división hidrológica, sin embargo, es menos tratable que la división topográfica; por lo que, este último es preferido para uso práctico.

En general, a mayor área de cuenca, mayor cantidad de escorrentía superficial y, consecuentemente, mayor flujo superficial.



*Fig. 3.2 Cuenca del Río Yauca*

## (2) Forma de la Cuenca

La forma de la cuenca es el contorno descrito por la proyección horizontal de una cuenca. Horton describió el contorno de una cuenca normal como un ovoide en forma de pera, por lo que, podría mencionarse que la cuenca Yauca es una cuenca normal. Cuencas grandes, sin embargo, varían ampliamente en forma.

### Factor de Forma

Una descripción cuantitativa de la forma de una cuenca es proporcionada por la siguiente fórmula:

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (3.1)$$

donde  $K_f$  = factor de forma,  $A$  = área de la cuenca, y  $L$  = longitud de la cuenca, medido a lo largo del curso de agua más largo. El área y la longitud son dadas en unidades consistentes tal como kilómetros cuadrados y kilómetros, respectivamente.

### Coefficiente de Compacidad

Una descripción alternativa de la forma de una cuenca esta basado sobre la razón del perímetro de la cuenca al área. Para este propósito, un circulo equivalente es definido como un circulo de igual área a aquella de la cuenca. El coeficiente de compacidad es la razón del perímetro de cuenca a aquella del circulo equivalente. Esto conduce a

$$K_c = \frac{0.282P}{A^{1/2}} \quad (3.2)$$

donde  $K_c$  = coeficiente de compacidad,  $P$  = perímetro de la cuenca, y  $A$  = área de la cuenca, con  $P$  y  $A$  dados en cualquier grupo consistente de unidades.

La respuesta de la cuenca se refiere al tiempo de concentración de la escorrentía. El rol de la forma de cuenca en la respuesta de la cuenca no ha sido claramente establecido; podría mencionarse que, un factor de forma alto (Ec. 3.1) o un coeficiente de compacidad cercana a 1 (Ec. 3.2) describe una cuenca que tiene una respuesta de cuenca rápida y empinada. Contrariamente, un factor de forma bajo o un coeficiente de compacidad mucho mayor que 1 describe una cuenca con una respuesta de escorrentía retardado. Sin embargo, muchos otros factores, incluyendo al relieve de cuenca, cobertura vegetativa, y densidad de drenaje, son usualmente más importantes que la forma de cuenca, con sus efectos combinados que no son fácilmente percibidos.

En el [Cuadro N°1 del anexo II](#), se presenta los valores calculados del factor de forma y coeficiente de compacidad de la cuenca Yauca y Subcuencas. En el que se observa que la cuenca Yauca, tiene un factor de forma de 0.12 y un coeficiente de compacidad de 1.93, concluyéndose que es una cuenca con una respuesta lenta o retardada a la escorrentía.

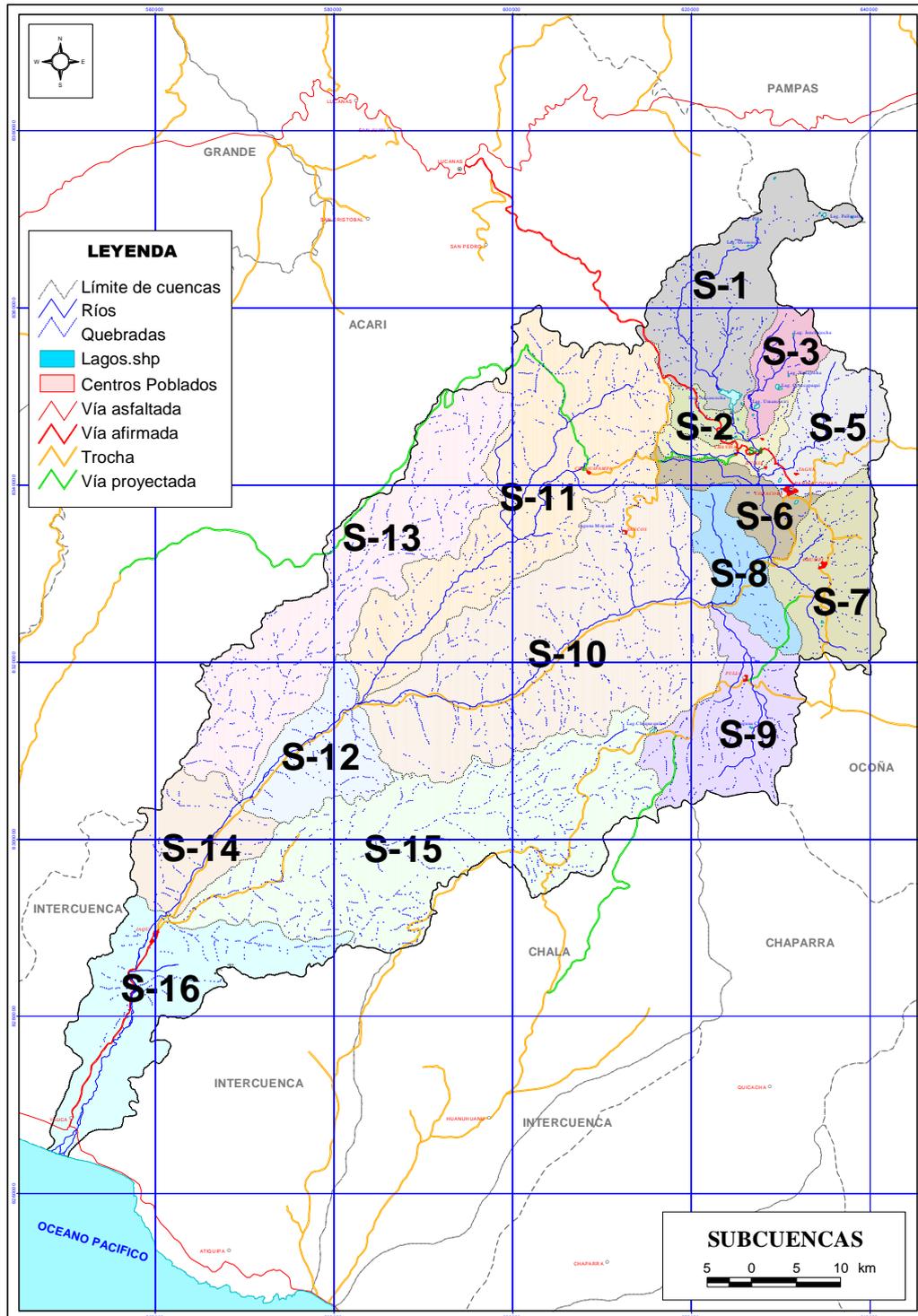


Fig. 3.3 Subcuencas de la cuenca Yauca

### (3) Relieve de la Cuenca

Relieve es la diferencia de elevación entre dos puntos referenciales. El relieve máximo de la cuenca es la diferencia de elevación entre el punto más alto en la divisoria de cuenca y la salida de la cuenca. La razón de relieve es la razón del relieve máximo de la cuenca a la distancia recta horizontal más larga de la cuenca medida en una dirección paralela a aquella del curso de agua principal. La razón de relieve es una medida de la intensidad del proceso erosional activo en la cuenca.

#### Curva Hipsométrica

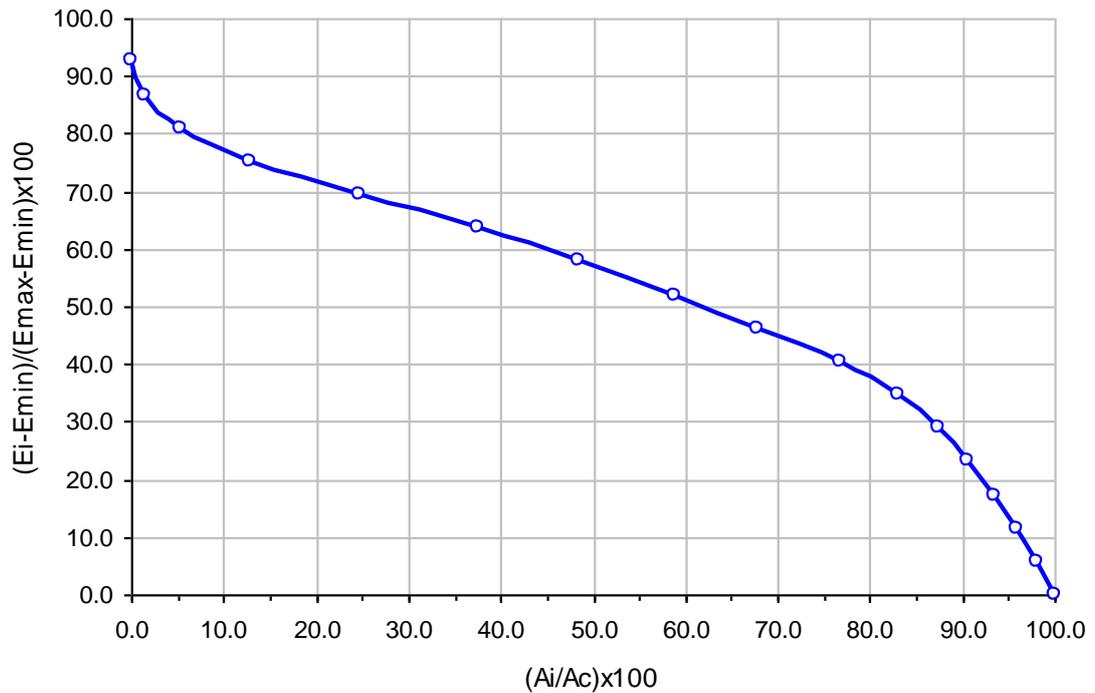
El relieve total de una cuenca es descrito por *análisis hipsométrico*. Esto se refiere a una curva adimensional que muestra la variación con la elevación del subarea de cuenca sobre aquella elevación. La curva hipsométrica de la cuenca Yauca, presentada en la Fig. 3.4, muestra el porcentaje de área en la abscisa y porcentaje de elevación en la ordenada.

La elevación media de la cuenca es obtenida del porcentaje de altura correspondiente al 50 por ciento del área. Para la cuenca Yauca es 3007.3 m.s.n.m.

La curva hipsométrica es usada cuando una variable hidrológica tal como la precipitación, cobertura vegetativa, o nevados muestra una tendencia marcada a variar con la altitud. En tales casos, la curva hipsométrica proporciona los medios cuantitativos para evaluar los efectos de la altitud. En el [Cuadro N°2](#) y en [la Fig. 1 del anexo II](#), se presenta los datos y las

curvas hipsométricas, respectivamente, de las Subcuencas del río Yauca.

*Fig. 3.4 Curva Hipsométrica: Cuenca Yauca*



- $A_i$  = Subarea sobre la elevación  $E_i$
- $A_c$  = Area de la cuenca (4312.29 Km<sup>2</sup>)
- $E_{min}$  = Elevación mínima de la cuenca ( 0 m.s.n.m.)
- $E_{max}$  = Elevación máxima de la cuenca (5158 m.s.n.m.)

Otras medidas de relieve de cuencas están basadas sobre las características de corriente y cauce. En ausencia de controles geológicos (afloramientos rocosos), el perfil longitudinal de un río es usualmente cóncava hacia arriba, es decir, muestra un decremento persistente en la gradiente del cauce en la dirección aguas abajo, en la Fig. 3.5 se muestra el perfil longitudinal del río Yauca.

La razón para este decremento, aguas abajo, en la gradiente del cauce no es fácilmente aparente; sin embargo, se conoce que la gradiente del cauce está directamente relacionado a la fricción del fondo e inversamente relacionado al tirante del flujo. Típicamente, pequeñas corrientes de montaña tienen valores altos de fricción de fondo (debido a la presencia de guijarros y cantos rodados en el cauce del lecho) y tirantes pequeños. Contrariamente, ríos grandes tienen comparativamente valores bajos de fricción de fondo y tirantes altos.

### **Pendiente**

La gradiente del cauce de un curso de agua principal es una medida conveniente del relieve de cuenca. La gradiente del cauce obtenida de las elevaciones máxima y mínima es referido como la pendiente S1. En el [Cuadro N°1 del anexo II](#), se presenta los valores calculados para la pendiente de la cuenca Yauca y subcuencas.

Una medida algo más representativa de la gradiente del cauce es la pendiente S2, definido como la pendiente constante que corta el perfil longitudinal en dos áreas iguales.

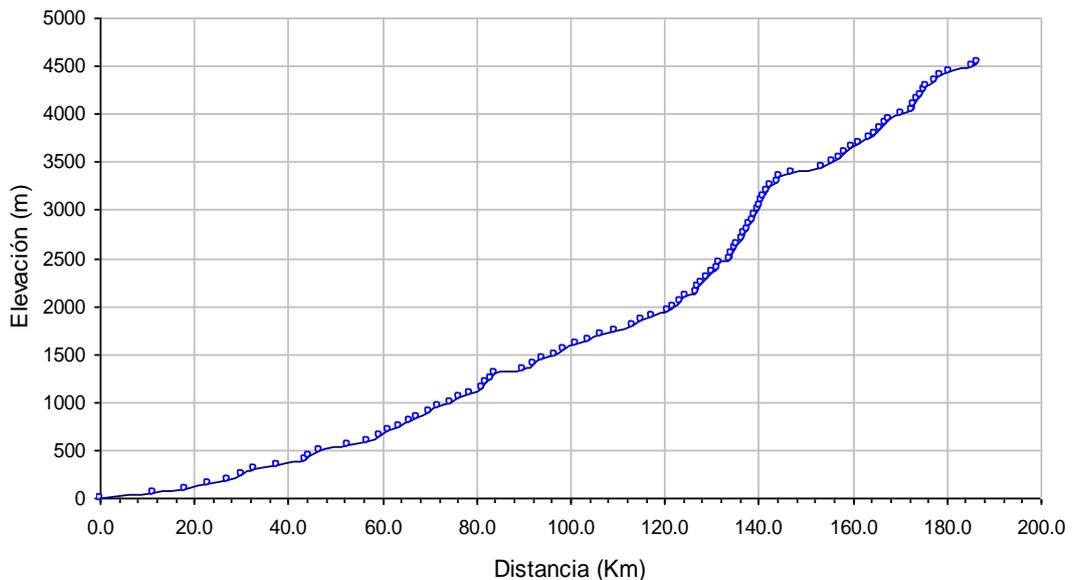
Una medida de la gradiente del cauce que toma en cuenta el tiempo de respuesta de la cuenca es la *pendiente equivalente*, o S3. Para calcular esta pendiente el cauce es dividida en  $n$  subtramos, y una

pendiente es calculado para cada subtramo. Basado en la ecuación de Manning, el tiempo de recorrido del flujo a través de cada subtramo es asumido que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de esta pendiente. Igualmente el tiempo de recorrido a través del cauce total es asumido que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la pendiente equivalente. Esto conduce a la siguiente ecuación:

$$S_3 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n (L_i / S_i^{1/2})} \right]^2 \quad (3.3)$$

en el que  $S_3$  = pendiente equivalente,  $L_i$  = cada longitud  $i$  de  $n$  subtramos, y  $S_i$  = cada pendiente  $i$  de  $n$  subtramos.

*Fig. 3.5 Perfil longitudinal: Cuenca Yauca*



### Rectángulo Equivalente

Es el rectángulo que tiene la misma área y el mismo perímetro que la cuenca. En estas condiciones tendrá el mismo coeficiente de compacidad  $K_c$  de Gravelius, así como también iguales parámetros de distribución de alturas, igual curva hipsométrica, etc.

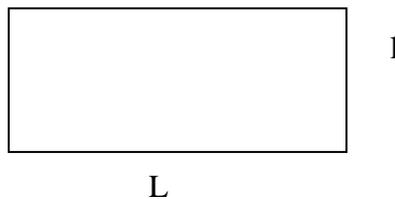
Se deberá tener, considerando  $L$  y  $l$  las dimensiones del rectángulo equivalente:

$$\begin{aligned}A &= L.l \\P &= 2(L+l) = 2K_c \sqrt{\pi A} \\L^2 - L.K_c \sqrt{\pi A} + A &= 0\end{aligned}$$

De donde se obtiene:

$$L = K_c \cdot \sqrt{\pi \cdot A} / 2 \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 - 4 / \pi \cdot K_c^2} \right] \quad (3.4)$$

$$l = K_c \cdot \sqrt{\pi \cdot A} / 2 \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - 4 / \pi \cdot K_c^2} \right] \quad (3.5)$$



#### (4) Mediciones Lineales

Las mediciones lineales son utilizadas para describir la característica unidimensional de una cuenca. En el [Cuadro N°1 del anexo II](#), se presenta estas características lineales de la cuenca Yauca y subcuencas.

## Longitud de Cuenca

La longitud de cuenca (o longitud hidráulica) es la longitud medida a lo largo del curso de agua principal. El curso de agua principal (o corriente principal) es el curso de agua central y más largo de la cuenca y la única que conduce escorrentía hacia la salida.

La longitud al centroide de la cuenca es la longitud medida a lo largo del curso de agua principal, desde la salida de la cuenca hasta un punto localizado cercano al centroide.

## Orden de Ríos

El concepto de orden de corriente es esencial para la descripción jerárquica de corrientes dentro de una cuenca. El flujo sobre terreno podría ser considerado como una corriente hipotética de orden cero. Una corriente de primer orden es aquella que recibe flujo de corrientes de orden cero, es decir, flujo sobre terreno. Dos corrientes de primer orden se combinan para formar una corriente de segundo orden. En general dos corrientes de orden  $m$  se combinan para formar una corriente de orden  $m+1$  (ver la Fig. 3.6). El orden de río de la cuenca es el orden de la corriente principal.

El orden de corriente de una cuenca esta directamente relacionado a su tamaño. Cuencas grandes tienen ordenes de corriente de 10 o más. La evaluación de orden de corriente es ampliamente sensible a la escala del plano. Además, considerable cuidado es requerido

cuando se utiliza análisis de orden de corriente en estudios comparativos de comportamiento de cuenca.

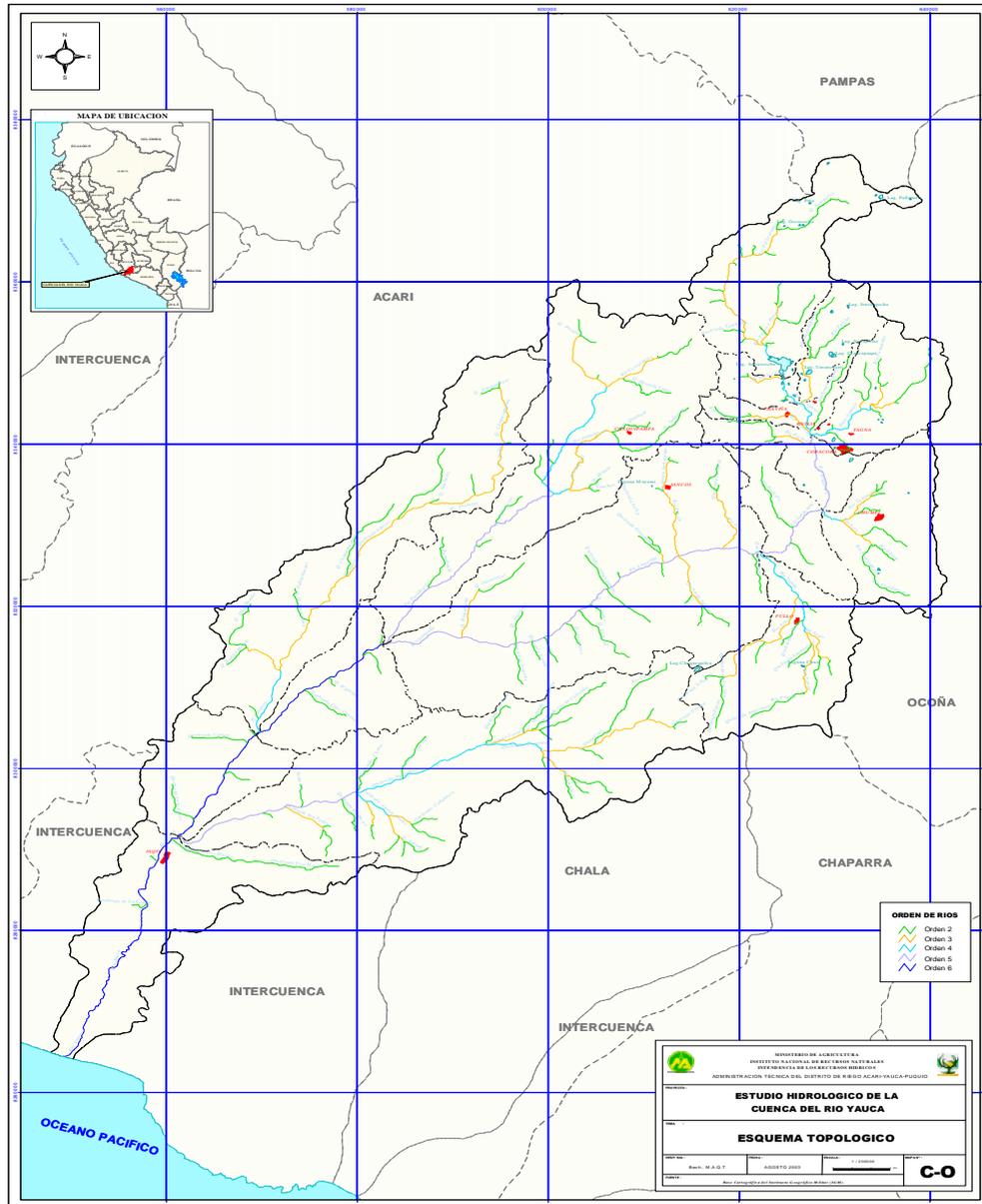


Fig. 3.6 Orden de río de la cuenca Yauca

### (5) Densidad de Drenaje

Las longitudes de todas las corrientes pueden ser sumadas para determinar la longitud total de la corriente. La densidad de drenaje de la cuenca es la razón de la longitud total de corriente al área de cuenca. Una densidad de drenaje alta refleja una respuesta de escorrentía rápida y empinada, mientras que una densidad de drenaje baja es característica de una respuesta de escorrentía tardía.

En el [Cuadro N°1 del anexo II](#), se presenta los valores del índice de drenaje de la cuenca Yauca y subcuencas, en el que se observa que tanto la cuenca Yauca así como las subcuencas tienen un índice de drenaje bajo, por lo que la respuesta de la escorrentía es tardía.

## IV.- ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS

### 4.1 PRECIPITACIÓN PLUVIAL

De acuerdo a la información disponible, la precipitación pluvial en la región varía desde escasos milímetros en la Costa árida y desértica hasta un promedio de 680 milímetros en el sector de puna con una altitud aproximada de 4,800 m.s.n.m. En el [anexo I](#), se presenta el resumen de datos pluviométricos al nivel de promedios mensuales y anuales adquiridas del SENAMHI.

De acuerdo a la distribución pluvial descrita, el área estudiada puede dividirse, desde el punto de vista meteorológico, en dos sectores: uno, que sería el sector denominado “cuenca seca”, comprendido entre el litoral marino y la costa que varía entre 2,800 m.s.n.m. por el noroeste y 3,000 m.s.n.m. por el sureste, siendo sus precipitaciones del orden de 0 mm. en la faja litoral y de 250 mm. en el nivel

altitudinal superior, por lo que esta área no cuenta con escorrentía superficial y su aporte efectivo hacia el caudal de los ríos es prácticamente nulo. El otro sector, denominado “cuenca Húmeda”, comprendido entre el límite superior de la “cuenca seca” y la divisoria de aguas, variando sus parámetros pluviales entre 250 mm. en el nivel altitudinal inferior y alrededor de 700 mm. en el nivel altitudinal superior, constituyéndose de esta manera en el área de verdadero aporte de escorrentía superficial y subterránea.

Las estaciones ubicadas en los sectores andinos presentan un régimen pluvial netamente de verano, ya que las lluvias tienen sus inicios en los meses primaverales y van cobrando mayor intensidad (mes de Febrero), para luego decrecer casi bruscamente durante el mes de Abril, en que se inicia un periodo de estiaje que se caracteriza por la ocurrencia de precipitaciones muy escasas o por la ausencia definitiva de estas en algunos meses, especialmente durante los meses más fríos de Junio y Agosto.

En lo que respecta a los valores máximos y mínimos extremos mensuales, es interesante resaltar la existencia de notables oscilaciones, que en algunas estaciones alcanzan a los 300 mm. promedio (caso de Coracora y Chaviña). Se podría considerar que estas oscilaciones excesivas son producto de la alternancia de años muy abundantes en lluvias con años de escasez extrema y, en cierta forma, esto es indicativo de que en el área es de esperarse una variación anual muy marcada que no esta sujeta a periodicidades, resultando ello muy perjudicial para las actividades agropecuarias de estas cuencas.

## **4.2 TEMPERATURA**

La temperatura es el elemento mas ligado en sus variaciones al factor altitudinal. En la cuenca, se ha podido apreciar que varia

desde el tipo semi-calido (19° C aproximadamente) en el área de Costa hasta el tipo frígido (5° C aproximadamente) en el sector de puna, quedando comprendida entre estos extremos una serie de variaciones térmicas que se caracterizan a cada uno de los pisos altitudinales apreciados en las cuencas.

De la red meteorológica existente, solo 4 estaciones cuentan con datos de temperatura estadística confiables; de ellas, 3 que se encuentran en Coracora, Chaviña y Sancos, se ubican en la Sierra; y una se encuentra en Yauca ubicada en la Costa. En el Anexo I se presentan los datos y gráficos de estas estaciones., en el que se aprecia el régimen de las temperaturas medias mensuales, así como también el régimen de sus valores mensuales máximas y mínimos extremos.

En lo que respecta a los valores mensuales máximos y mínimos extremos, puede decirse, que la oscilación entre estos dos valores extremos es relativamente baja al nivel de la faja litoral tornándose mayor para los datos registrados en las estaciones ubicadas hacia el interior o tierra adentro del litoral; esto sería indicativo de que las temperaturas a nivel del litoral son más estables en su régimen que las temperaturas registradas en el interior de las cuencas, lo cual probablemente se debe a la influencia del mar que actuaría como un termo-regulador.

Para las estaciones de sierra (Sancos, Chaviña y Coracora), el régimen de temperaturas mensuales se presenta en general menos oscilante que las estaciones de la faja de Costa. Se puede decir que siempre existe la tendencia a presentar las temperaturas mas altas durante los meses de primavera y verano, descendiendo estos valores durante los meses mas fríos de la estación invernal, pero la oscilación entre los meses cálidos y los meses mas fríos es relativamente muy reducida con respecto a lo que ocurre para dichos

meses en la estacione ubicada en el sector de Costa. Esto se debería principalmente a factores de orden atmosférico, dentro de los cuales durante los meses invernales es prácticamente ausente permitiendo la incidencia directa de la insolación solar, que durante las horas del día llega a calentar notablemente la superficie terrestre registrando temperaturas muy elevadas; por otra parte, durante la noche, las temperaturas no llegan a descender a niveles inferiores extremos dando como resultado promedios diarios que se pueden considerar altos; estos, a su vez, generalmente los promedios mensuales que son muy poco diferenciables de los promedios registrados durante los meses más cálidos en los cuales si hay presencia de estratos nubosos profundos que interfieren la incidencia de la insolación solar, evitando el sobre-calentamiento de la superficie terrestre. Es, por las razones expuestas, que los valores máximo y mínimo extremos para estas estaciones de Sierra se presentan ligeramente más oscilantes durante el invierno que durante la primavera y verano, obteniéndose como consecuencia de estas variaciones un régimen mensual promedio muy poco oscilante, tal como puede apreciar en los [Gráficos del anexo I](#). Respecto a las temperaturas mínimas extremas, es interesante resaltar, que no obstante encontrarse las estaciones indicadas a altitudes comprendidas entre 2,800 y 3,200 m.s.n.m., estas no alcanzan niveles extremos de congelación, sino que se sitúan, en el peor de los casos, a 4° C sobre 0 (Coracora) durante el mes de Julio, que se registra como uno de los mas fríos; esto indicaría que, en este sector del área andina de las cuencas, la ocurrencia de las heladas perjudiciales a la agricultura es probablemente eventual aunque sin descartar que su intensidad debe ser fuerte.

Para el sector andino de puna, en realidad no se cuenta con ninguna estación en esta área, se estima que la temperatura en estas áreas debe variar, en promedio, entre 10 °C a nivel de los 3,300 m.s.n.m. y 3°C por encima de los 4,500 m.s.n.m. indudablemente, la latitud

interviene como un factor decisivo en la ocurrencia de temperaturas bajas o heladas, las que, gradualmente, conforme se asciende hacia el área de paredes naturales, van limitando la actividad agrícola de la zona.

### **4.3 PRESIÓN ATMOSFÉRICA**

La presión atmosférica en la cuenca Yauca tiene un promedio anual de 1012.7 mb. y el régimen mensual varia en forma regular presentando la mínima en Febrero con 1010.3 mb., el cual se incrementa progresivamente hasta Agosto alcanzando 1014.5 mb.; de este mes hacia delante, decrece por un periodo de 5 meses (Septiembre – Enero). La oscilación media anual es de 4.2 mb. y dada la regularidad de esta variación gradual, se puede establecer que hay estabilidad climática dentro de esta área.

### **4.4 HUMEDAD RELATIVA**

Para el estudio de este elemento meteorológico, se ha contado con información proveniente de 4 estaciones de las cuales 1 se encuentra ubicada en la Costa (Yauca) y las 3 restantes (Sancos, Coracora y Chaviña) en el sector andino de la cuenca. Los promedios anuales de humedad relativa calculados para cada una de las estaciones con datos estadísticamente confiables oscila entre 75% H.R. para Yauca en la costa, mientras que en sector de sierra dichos promedios varían entre 44% H.R. para Coracora y 62% H.R. para Sancos.

En los [Gráficos 1 al 8 del Anexo I](#), se ofrece el régimen mensual de los datos de humedad relativa registrados en las estaciones referidas, en donde puede apreciarse que este elemento meteorológico tiene muy poca variabilidad en el sector de Costa,

alcanzando porcentajes que varían entre 10% y 4% para los meses más húmedos y más secos. Asimismo, cabe resaltar que el régimen acusa variaciones inversas en su marcha para las estaciones próximas al litoral de Costa (Yauca).

Este tipo de régimen de humedad relativa se puede explicar como consecuencia de las persistentes nieblas advectivas que ingresan a la faja de Costa durante los meses más fríos, incidiendo con mayor intensidad en la zona del litoral.

En el área de Sierra, el régimen de la humedad relativa se presenta invertido con respecto a la marcha de la humedad entre Noviembre y Abril, mientras que los más bajos ocurren entre Mayo y Octubre. La oscilación alcanza una mayor variación, la cual parece incrementarse en relación directa con la altitud; en el presente caso, varía entre 51% en las estaciones de Coracora y Chaviña. Con respecto a los valores máximos y mínimos extremos, se observa que esta área conforma una oscilación mucho más fuerte que la calculada para los valores registrados en el sector de Costa. Esta oscilación alcanza un valor de 86% en la estación de Chaviña, ubicándose entre 95% de H.R. máxima y 9% de H.R. mínima, la misma que se mantiene casi igual para las de más estaciones que registran H.R. en la Sierra (Sancos y Coracora).

#### **4.5 EVAPORACIÓN**

Se tienen datos de 4 estaciones meteorológicas, de las cuales solamente 2 ofrecen confianza estadística y 2 se han tomado como referencia.

De las 2 que ofrecen confianza, 1 se halla en la Costa (Yauca) y una en la sierra (Coracora). La estación como referencia es la de Sancos y Chaviña, ubicadas en la Sierra.

Se observa que la evaporación es menor en la Costa que en la Sierra y al mismo tiempo presenta un régimen de distribución anual inverso, es decir, que mientras en la Costa hay menor evaporación durante el invierno que en el verano, en la sierra la mayor evaporación se registra durante el invierno. Así, se ve que en la Costa se promedia una evaporación anual de alrededor de 1,100 mm., siendo mayor desde Noviembre a Mayo, en que el promedio mensual se ubica alrededor de 99 mm. y menor desde Junio a Octubre cuando el promedio mensual solo llega a 84 mm.

En el sector de Sierra, se registra un promedio anual de aproximadamente 1,800 mm. de evaporación (para este cálculo se ha tomado en cuenta las estaciones referenciales además de la estación de Coracora), siendo mayor desde Mayo a Octubre, en que el promedio mensual esta alrededor de 167 mm., y menor desde Noviembre a Abril, cuando el promedio mensual solo alcanza 102 mm. en cuanto a los promedios mensuales extremos, el PMME se registro en agosto de 1966 y fue de 198.7 mm. y el pmme. Se registro en Febrero de 1967 y fue de 24 mm.; ambos datos corresponden a la estación de Coracora que es la única analizada en este sector.

#### **4.6 VIENTOS**

La estación de Juan Bautista (Marcona), ubicada a 31 metros sobre el nivel del mar, es la única que registra información sobre la ocurrencia de vientos superficiales. Los datos registrados corresponden a un periodo de 13 años (1958 – 1970) y muestran una persistencia notable de vientos dominantes S y SE con velocidades promedios mensuales máximas de 13.3 Km/h.

De acuerdo a estas cifras y según la escala de clasificación de Beaufort, estos vientos caen dentro de la denominación de "Brisa

muy Débil” a “Brisa Débil”. En consecuencia, generalizando estas características para el área de Costa del presente estudio, se puede asegurar que el viento no constituye problema alguno para la conducción de proyectos agrícolas a pecuarios.

## **V.- ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA**

### **5.1 PRECIPITACIÓN**

La atmósfera de la tierra contiene vapor de agua. La cantidad de vapor de agua puede ser convenientemente expresada en términos de una altura de agua precipitable. Esta es la altura de agua que sería comprendido si todo el vapor de agua en la columna de aire sobre un área dada fuera a condensar y precipitar sobre aquella área.

La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres tipos principales para la elevación de masas de aire son la *elevación frontal*, donde el aire caliente es elevado sobre aire frío por un pasaje frontal; la *elevación convectiva*, donde el aire se arrastra hacia arriba por una acción convectiva, como ocurre en el centro de una tormenta eléctrica; y la *elevación orográfica*, mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa. En el área de estudio la precipitación es principalmente de tipo orográfico, por la presencia de la cordillera de los andes, sin embargo, en la naturaleza, los efectos de estos varios tipos de enfriamiento a menudo están interrelacionados, y la precipitación resultante no puede identificarse como de un solo tipo.

La precipitación, incluye todas las formas que el agua cae a la superficie terrestre, ya sea en forma líquida o sólida. La precipitación ocurre principalmente en la forma de llovizna, lluvia, nieve, o granizo. En la cuenca de estudio (cuenca Yauca) se pudo identificar que la precipitación es principalmente en forma de lluvia, ocasionalmente, en la parte alta de la cuenca, es en forma de granizo, por lo que, en el presente estudio la lluvia es referida como la precipitación.

## 5.2 REGISTRO HISTORICO

Para el estudio hidrológico de la cuenca Yauca, se utilizó 07 estaciones pluviométricas, de las cuales 04 se encuentran dentro de la cuenca Yauca y 03 en cuencas vecinas (02 en la cuenca del río Acarí y 01 en la cuenca del río Ocoña). El [Cuadro N°1 del anexo III](#), muestra la relación de estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio de cuenca, y en el [Plano N°06 del anexo VIII](#), se presenta la ubicación de las estaciones pluviométricas.

Las 7 estaciones pluviométricas utilizadas en la cuenca de estudio, lamentablemente, se encuentran actualmente paralizadas, contándose con información, en el mejor de los casos, hasta el año 1984; por lo que, se utilizó 3 estaciones pluviométricas adicionales, ubicadas en cuencas vecinas al de Yauca (02 en la cuenca Acarí, Lucanas y Puquio, y 01 en la cuenca Ocoña, Chinchayllapa) que en la actualidad se encuentran en funcionamiento, para la completación y extensión de datos faltantes.

## 5.3 ANALISIS DE CONSISTENCIA

La no-homogeneidad e inconsistencia en secuencias hidrológicas representa uno de los aspectos más importantes del estudio en la

hidrología, puesto que si éstos no son identificados y eliminados, un error significativo puede introducirse en todos los análisis futuros obteniendo resultados altamente sesgados.

Inconsistencia es sinónimo de error sistemático y se presenta como saltos y tendencias, y no-homogeneidad es definido como los cambios de los datos vírgenes con el tiempo.

En general, los datos medidos incluyen dos tipos de errores: (a) Errores aleatorios o accidentales y (b) Errores sistemáticos; los errores aleatorios se presentan a causa de la inexactitud en las mediciones y observaciones. Las causas que dan lugar a este tipo de errores pueden ser diversas, teniendo entre las más comunes: lecturas poco conscientes, aparato ligeramente estropeado y mal colocado, errores de transcripción de cálculo, copia, impresión e interpretación. Los errores sistemáticos son los de mayor importancia, ya que los datos pueden ser incrementados ó reducidos sistemáticamente; los errores sistemáticos pueden ser a la vez naturales, artificiales u ocasionados por la intervención de la mano del hombre, los mismos que ocurren como saltos y como tendencias.

Desde un punto de vista práctico son de mayor interés los errores sistemáticos ocasionados por la intervención de la mano del hombre y en ellos se concentra el análisis de consistencia

Antes de evaluar la consistencia de la información pluviométrica, se realizó la completación de los datos mensuales faltantes, utilizando para ello, la información de los años con registros completos (es decir, aquellas que tengan durante los doce meses) aún éstas no sean consecutivas, obteniéndose de esta manera la precipitación promedio multi-anual a nivel mensual y anual, luego se procedió a

hallar el factor adimensional ( $k$ ) para cada mes del año, con la siguiente ecuación:

$$K_i = \frac{\overline{x_i}}{X} \quad (5.1)$$

donde:

$\overline{x_i}$  = Precipitación promedio multi-anual del mes  $i$

$X$  = Precipitación promedio multi-anual a nivel anual.

Con este factor  $k$  se procedió a hallar la precipitación de los meses faltantes. En los [Cuadros del anexo III](#), se presenta la información debidamente completada de las 7 estaciones.

Puesto que se dispone de series múltiples de la información pluviométrica en la cuenca de estudio, se procedió a realizar el análisis de doble masa para la identificación de saltos.

### 5.3.1 Análisis Gráfico

Las estaciones pluviométricas de mayor importancia en la cuenca de estudio son, Chaviña, Coracora, Carhuanillas y Cecchapampa, puesto que se encuentran ubicadas en la parte alta de la cuenca ([ver el Plano N°06 del anexo VIII](#)), zona de mayor precipitación, por lo que se analizará en estas estaciones la variación temporal de la precipitación; nótese que no se consideró la estación Urayhuma, puesto que se encuentra muy alejado de la cuenca y tiene diferente variación temporal principalmente en los meses de estiaje.

En las [Figs. N° 1 y 2 del Anexo III](#), puede notarse que las 04 estaciones tienen similar variación temporal de la precipitación mensual, además, años húmedos y años secos también coincidentes, salvo algunos puntos que presumiblemente podría tratarse de un salto.

### 5.3.2 Análisis Doble Masa

El análisis de doble masa, es una herramienta muy conocida y utilizada en la detección de inconsistencias en los datos hidrológicos múltiples (cuando se disponen de dos o más series de datos) en lo que respecta a errores que pueden haberse producido durante la obtención de los mismos, pero no para realizar una corrección a partir de la curva de doble masa.

Los posibles errores se pueden detectar por el quiebre o quiebres que presenta la recta de doble masa; considerándose un registro de datos con menos errores sistemáticos, en la medida que presenta un menor número de puntos de quiebre.

Un quiebre de la recta de doble masa o un cambio de pendiente, puede o no ser significativo, ya que si dicho cambio está dentro de los límites de confianza de la variación de la recta para un nivel de probabilidades dado, entonces el salto no es significativo, el mismo que se comprobará mediante un análisis estadístico.

Para el análisis de doble masa de las 04 estaciones, indicadas anteriormente, se tiene 11 años comunes, del 1970 al 1980 ([ver el Cuadro N°2 y 3 del anexo III](#)), planteándose en el eje de las abscisas el promedio anual acumulado de la información de las 04 estaciones y, en el eje de las ordenadas la información anual acumulada de cada una de las estaciones de análisis ([ver Fig. 3 del anexo III](#)). Observando este gráfico, se seleccionó la estación Chaviña como estación base, puesto que presenta mayor regularidad,

vale decir tiene menor número de puntos de quiebre, por tanto se considera como la más confiable.

Luego, la estación seleccionada como la más confiable se ploteó en el eje de las abscisas y, en las ordenadas cada una de las demás estaciones, obteniéndose así tantas rectas como números de series se tengan menos uno (ver la Fig. 4 del anexo III). En estos gráficos se definen el o los quiebres que pueden ser significativos para su posterior análisis estadístico.

Una vez identificado el o los periodos con información dudosa, se procede a evaluar y cuantificar el salto, tratándolos a cada uno de los registros como series simples independientes y de tiempo de cambio conocido.

### 5.3.3 Análisis Estadístico de Saltos y Tendencias

En el Cuadro N°4 del anexo III, se presenta el análisis y tratamiento estadístico completo de las 10 estaciones utilizadas en el estudio de la cuenca Yauca, incluido el análisis de saltos y tendencias, así como las respectivas correcciones.

La estación Yauca, puesto que se encuentra en la costa (48 m.s.n.m.) no registra precipitación alguna durante los diferentes meses del año, por lo que cualquier tipo de análisis resulta innecesario.

La estación Coracora, en el análisis de salto, considerando como primer periodo de 1966 a 1975 y segundo periodo de 1977 a 1984, presenta inconsistencia en la desviación

standart, por lo que el primer periodo fue corregido asumiendo la información más reciente como la más confiable. La serie corregida por salto no presenta tendencia.

En el análisis de salto de la serie histórica en la estación Chaviña, considerando como primer periodo de 1964 a 1977 y segundo periodo de 1978 a 1981, se verifica que tiene inconsistencia en la desviación standart, sin embargo analizando el histograma comparativo de la [Fig. 1 del anexo III](#), se observa que el segundo periodo coincide con los años secos, por lo que es lógico que presente dicha inconsistencia, por tanto esta serie no fue corregida por salto. La serie histórica no presenta tendencia.

La estación Carhuanillas, en el análisis de salto, considerando como primer periodo de 1967 a 1974 y segundo periodo de 1975 a 1977, presenta inconsistencia en la desviación standart, ello coincide con la evaluación del histograma de la [Fig. 1 del anexo III](#), por lo que el segundo periodo fue corregido asumiendo, de acuerdo al histograma, que el primer periodo coincide con los años húmedos así como el segundo periodo. La serie corregida por salto no presenta tendencia.

En el análisis de salto de la serie histórica en la estación Huarato, considerando como primer periodo de 1965 a 1973 y segundo periodo de 1980 a 1984, se verifica que tiene inconsistencia en la desviación standart, sin embargo no es corregido, puesto que el posible salto del segundo periodo podría ser explicado por la influencia del fenómeno de El Niño, ya que la estación se encuentra a una cota de 400 m.s.n.m. La serie histórica no presenta tendencia.

La estación Cecchapampa, en el análisis de salto, considerando como primer periodo de 1968 a 1977 y segundo

periodo de 1978 a 1982, presenta inconsistencia en la desviación standart, sin embargo analizando el histograma comparativo de la [Fig. 1 del anexo III](#), se observa que el segundo periodo coincide con los años secos, por lo que es lógico que presente dicha inconsistencia, por tanto esta serie no fue corregida por salto. La serie histórica no presenta tendencia.

En el análisis de salto de la estación Urayhuma, considerando como primer periodo de 1965 a 1972 y segundo periodo de 1973 a 1975, se verifica que tiene inconsistencia tanto en la media como en la desviación standart, por lo que el segundo periodo fue corregido asumiendo que el primer periodo coincide con los años húmedos así como el segundo periodo. La serie corregida por salto no presenta tendencia.

#### **5.4 COMPLETACION Y EXTENSIÓN DE LA INFORMACIÓN PLUVIOMETRICA**

Como se indicó anteriormente, las 07 estaciones utilizadas en el estudio hidrológico de la cuenca Yauca, se encuentran paralizadas en el mejor de los casos desde el año 1984, por lo que se utilizó la información histórica de tres estaciones ubicadas en cuencas vecinas al de Yauca, que actualmente se encuentran en funcionamiento, (Lucanas y Puquio en la cuenca Acarí y Chinchayllapa en la cuenca Ocoña), para la completación y extensión de la serie histórica.

Para realizar la completación y extensión de datos, se utilizó los modelos de regresión lineal simple y múltiple mediante una correlación espacial y, para ello se hizo uso del programa: completación y extensión de datos para series hidrológicas

estacionales basado en la regresión lineal, MISSEL7, elaborado por el Dr. José Salas- hydrology and water resources program, Colorado state university.

Inicialmente, se procedió a la completación de los datos faltantes de las tres estaciones consideradas como completas, Lucanas, Puquio y Chinchayllapa; Lucanas, utilizando el factor mensual adimensional (k); Puquio, por regresión lineal simple con Lucanas y; Chinchayllapa, por regresión lineal múltiple con Lucanas y Puquio.

Los datos faltantes del año 1976 de la estación Coracora, fueron completados por regresión lineal múltiple con las estaciones de Chaviña y Carhuanillas, puesto que éstas se encuentran ubicadas en las proximidades de la estación Coracora; luego, la extensión de las demás estaciones pluviométricas fue realizada por regresión lineal múltiple con las estaciones de Lucanas, Puquio y Chinchayllapa, salvo la estación Huarato, que por encontrarse en la costa no correlaciona con estas estaciones y, por lo tanto se desarrolló los cálculos considerando únicamente los datos registrados. En el [Cuadro N°4 del anexo III](#), se presenta los datos completados y extendidos de las 07 estaciones de análisis.

## **5.5 ANALISIS PLUVIOMETRICO DE LA CUENCA**

### **5.5.1 Precipitación areal media de la cuenca**

Determinar la precipitación areal promedio de una cuenca, a partir de los registros históricos, es de suma importancia para cuantificar la disponibilidad hídrica de la cuenca. En el presente estudio se determinó la precipitación areal promedio de la cuenca y subcuencas, tanto anual como mensual, mediante dos métodos: El método de Thiessen y el método de las isoyetas.

### **Método de Thiessen:**

El método de Thiessen establece que en cualquier punto de la cuenca la lluvia es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano; por lo que la precipitación registrada en un pluviómetro dado se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección. Los pesos relativos de cada pluviómetro se determinan de las correspondientes áreas de aplicación en una red de polígonos de Thiessen, cuyas fronteras están formadas por los bisectores perpendiculares a las líneas que unen pluviómetros adyacentes; luego la precipitación promedio para la cuenca sobre el área es

$$P_{\text{prom.}} = (1/A)\sum A_j P_j \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (5.2)$$

donde J es el número de pluviómetros que se utilizan en el análisis,  $A_j$  es el área de la cuenca que se asigna a cada uno de ellos y  $P_j$  es la lluvia registrada en el pluviómetro j-ésimo.

El método de Thiessen generalmente es más exacto que el método de la media aritmética, pero no tiene en cuenta en forma directa las influencias de la orografía en la lluvia. En la [Fig. 5 del anexo III](#), se muestra los polígonos de Thiessen para el cálculo de la precipitación promedio y en los [Cuadros N°5 y 6 del anexo III](#), se muestran los cálculos de la precipitación areal promedio de la cuenca y subcuencas.

### **Método de la Isoyetas:**

La influencia orográfica es superado de algún modo mediante la construcción de isoyetas, utilizando profundidades que se observan en los pluviómetros e interpolando entre

pluviómetros adyacentes. Una vez construido el mapa de isoyetas, se mide el área  $A_j$  entre cada par de isoyetas en la cuenca y se multiplica por el promedio  $P_j$  de las profundidades de lluvia de las dos isoyetas adyacentes para calcular la precipitación promedio sobre el área mediante la Ec. (5.2). En las [Figs. 6 al 18 del anexo III](#), se muestra las isoyetas a nivel anual y mensual utilizadas en el cálculo de la precipitación areal promedio de la cuenca y subcuencas, y en el [Cuadro N°7 del anexo III](#), se muestra los cálculos de la precipitación areal promedio.

Cuadro 5.1: Precipitación areal promedio

Cuenca y Subcuenca	Tributarios principales	PP Areal Prom.	
		Thiessen (mm)	Isoyetas (mm)
Yauca		387.57	442.76
SC-1	Ancascocha	669.04	673.27
SC-3	Paccha	599.62	585.17
SC-5	Huaccramayo	394.78	411.36
SC-7	Acos	470.47	443.02
SC-9	Tampa	507.32	482.48
SC-11	Paralmayocc	604.06	589.93
SC-13	Languirre	351.97	430.64
SC-15	Acaville	222.36	175.00

## VI.- ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

### 6.1 REGISTRO HISTORICO

La cuenca del río Yauca, en su parte alta, dispone de una obra de regulación, el represamiento de la laguna de Ancascocha, construido con el objeto de incrementar las disponibilidades del periodo de estiaje y mejorar la eficiencia de utilización del recurso

hídrico en la agricultura. Esta obra ha producido sólo una pequeña variación en el régimen de escurrimiento natural del río; sin embargo, representa un alivio al problema de escasez de agua que aqueja al valle durante los meses de estiaje.

La cuenca del río Yauca no cuenta con una sección de control convenientemente acondicionada para medir el caudal que discurre por su cauce; la estimación del mismo se efectúa en la estación Puente Jaqui, en el lugar denominado Uchuani, aclarándose que en dicha estación no se cuenta con el equipo más elemental de medición, realizándose ésta en forma rustica y/o simplemente por observación visual.

La estación de aforos Puente Jaquí se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas 74°27' de longitud Oeste y 15°29' de latitud Sur y a una elevación sobre el nivel del mar de 220 m. Ésta estación de aforos controla una cuenca receptora de 4,079.0 km<sup>2</sup>., extensión que incluye la totalidad de la cuenca húmeda, delimitada inferiormente por la cota de los 2,800 m.s.n.m., y cuya área es de 2,408.0 km<sup>2</sup>. La extensión total de la cuenca del río Yauca, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, es de 4,312.29 km<sup>2</sup>.

La labor de estimar el caudal que aporta el río, es efectuada por la Administración Técnica del Distrito de Riego Acarí-Yauca-Puquio, como se indicó anteriormente, sin contar con una sección bien definida ni con el equipo elemental de medición. La información hidrométrica es mostrada en el [Cuadro N°1 del anexo IV](#), contándose con un registro continuo de caudales medios mensuales comprendido entre los años 1960 y 2002. Debe señalarse que, aguas arriba de la hipotética estación de aforos, existe cierto número de tomas pequeñas, cuya capacidad individual de captación varía entre 20 y 50 lt/s.

## **6.2 ANALISIS DE CONSISTENCIA**

El análisis de consistencia de la información hidrométrica es idéntico al de la información pluviométrica. Con el apoyo del programa de cómputo SIH (Sistema de Información Hidrológica), se procedió a realizar el análisis gráfico y estadístico de la información hidrométrica registrada en la estación Puente Jaquí, ver el [Cuadro N°2 y Gráficos del anexo IV](#), en el que se puede notar que la información hidrométrica está libre de saltos y tendencias.

## **6.3 COMPLETACION DE LA INFORMACIÓN HIDROMETRICA**

Como se indicó anteriormente, en la estación de aforos Puente Jaquí, se cuenta con un registro histórico de caudales medios mensuales durante el periodo 1960 a 2002, en el que se observa la falta de datos en algunos pocos meses en diferentes años., por lo que, se realizó la completación de estos datos faltantes considerando únicamente el promedio mensual a nivel multianual. En el [Cuadro N°3 del anexo IV](#), se muestra la información hidrométrica debidamente completada.

## **6.4 RESTITUCION DE CAUDALES A REGIMEN NATURAL**

Las descargas del río Yauca, provenientes tanto de su escurrimiento natural como del regulado en la laguna Ancascocha, desde el año 1949 año en que entra en funcionamiento la represa Ancascocha, son controladas en la estación de aforos Puente Jaquí.

La represa Ancascocha tiene una altura máxima de aproximadamente 15.5 m., cuenta con una cuenca colectora de 268.08 km<sup>2</sup>., se halla situada a una altura de 3,450 m.s.n.m. y a 5 Km. en línea recta de la localidad de Chaviña, en la provincia de

Lucanas, departamento de Ayacucho ([ver el Plano N°02 del anexo VIII](#)).

No se ha podido obtener cifras del volumen embalsado anualmente, debido a que el reservorio no dispone de una estructura de medición; sin embargo, de acuerdo al levantamiento topográfico y batimétrico de la laguna Ancascocha, realizado por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos UGRH – HUARAZ, en Diciembre del 2003, se estima que almacena un volumen útil de 19.04 MMC; por lo que, considerando la gran extensión de la cuenca colectora y su rendimiento, se puede afirmar que el actual embalse alcanza con facilidad su volumen máximo.

En cuanto a su funcionamiento, las aguas son descargadas durante los meses de Agosto a Diciembre de todos los años, abriéndose las compuertas durante 8 a 10 días de cada mes, según programas de utilización establecidos por la Administración Técnica del Distrito de Riego Acarí-Yauca-Puquio.

Puesto que, aguas arriba de la estación de aforos Puente Jaquí se encuentran ubicadas una gran cantidad de tomas laterales, se considera que el caudal regulado que baja del embalse Ancascocha no es registrado en la estación de control, ya que son captadas por estas tomas laterales, salvo cuando toca el turno para las tomas ubicadas aguas abajo de este punto de control, del cual por falta de información adecuada no a sido posible independizar la descarga natural de la cuenca; por lo que, no se corregirán los datos obtenidos en los meses de estiaje en la estación Puente Jaquí.

Asumiendo que el embalse Ancascocha es llenado durante los meses de Enero a Abril y, tomando en cuenta que el volumen útil almacenado es de 19.04 MMC, se procederá a incrementar un caudal promedio de 2.03 m<sup>3</sup>/s durante estos meses a los datos

registrados en la estación de control Puente Jaquí. En el [Cuadro N°4 del anexo IV](#), se presenta el registro histórico restituído a régimen natural, y el Fig. N°02 del anexo V se presenta una comparación del caudal medido y generado en la estación Puente Jaquí, observándose una buena aproximación.

## **VII.- DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA**

La estimación de la disponibilidad de agua en una cuenca, puede ser realizado por medio de modelos matemáticos. El uso de los modelos matemáticos en hidrología es muy amplio, tanto así que, prácticamente en cada especialidad hidrológica, se han desarrollado modelos matemáticos para la solución de problemas generales y específicos. En los últimos años las técnicas de simulación hidrológica han tenido una amplia difusión, algunos modelos son de aplicación específica, mientras que otros son de aplicación más general. Existiendo asimismo una amplia variedad de formulaciones matemáticas adoptadas por diferentes modelos para describir los diversos componentes de los procesos de precipitación-escorrentía, pudiendo diferir éstas, no sólo en términos conceptuales sino también en nivel de complejidad. Planificadores o diseñadores, quienes requieren información hidrológica, y que raramente podrán tener tiempo y dinero para desarrollar un propio modelo, tendrán que elegir entre una amplia variedad de modelos disponibles.

Dado que no existe un modelo universal, apropiado para la solución de todos los problemas hidrológicos, la opción de realizar uno que satisfaga los problemas de la hidrología aplicada en cualquier caso, se hace muy difícil.

La elección de un modelo, el que se considere el más apropiado, depende ampliamente del objetivo del estudio. Por otro lado, el mejor modelo depende del criterio usado para elegirlo, dependiendo de la escala en tiempo: descargas pico, volúmenes o hidrogramas completos horarios, diarios, mensuales o anuales. Aún no han sido desarrollados métodos

totalmente objetivos para la selección del "mejor" modelo, siendo así que la elección de un modelo permanece como una parte del arte de la modelación hidrológica.

En el [Cuadro N°1 del anexo V](#), se presenta el análisis regional de la precipitación en la cuenca Yauca, con fines de hacer correcciones a las respectivas estaciones involucradas en cada subcuenca de análisis, y en los [Cuadros N°2 al N°10 del anexo V](#), se presenta los cálculos de la disponibilidad de agua de la cuenca Yauca, y subcuencas Ancascocha, Paccha, Huaccramayo, Acos, Tampa, Paralmayocc, Languirre y Acaville, respectivamente, y en el [Cuadro N°11 del anexo V](#), se muestra un resumen de los caudales generados. Desarrollado con el modelo determinístico-estocástico de Lutz Scholz, explicado en el siguiente acápite.

#### **7.1 MODELO DETERMINISTICO-ESTOCASTICO DE LUTZ SCHOLZ**

Este modelo hidrológico es combinado por que cuenta con una estructura determinística para el cálculo de los caudales mensuales para el año promedio (Balance Hídrico - Modelo determinístico); y una estructura estocástica para la generación de series extendidas de caudal (Proceso markoviano - Modelo Estocástico). Fue desarrollado por el experto en hidrología, Lutz Scholz para cuencas de la sierra peruana, entre los años 1979-1980, en el marco de Cooperación Técnica de la República de Alemania a través del Plan Meris II.

Determinado el hecho de la ausencia de registros de caudal en la sierra peruana, el modelo se desarrolló tomando en consideración parámetros físicos y meteorológicos de las cuencas, que puedan ser obtenidos a través de mediciones cartográficas y de campo. Los parámetros más importantes del modelo son los coeficientes para la determinación de la Precipitación Efectiva, déficit de escurrimiento,

retención y agotamiento de las cuencas. Los procedimientos que se han seguido en la implementación del modelo son:

1. Cálculo de los parámetros necesarios para la descripción de los fenómenos de escorrentía promedio.
2. Establecimiento de un conjunto de modelos parciales de los parámetros para el cálculo de caudales en cuencas sin información hidrométrica. En base a lo anterior se realiza el cálculo de los caudales necesarios.
3. Calibración del modelo y generación de caudales extendidos por un proceso markoviano combinado de precipitación efectiva del mes con el caudal del mes anterior.

Este modelo fue implementado con fines de pronosticar caudales a escala mensual, teniendo una utilización inicial en estudios de proyectos de riego y posteriormente extendiéndose el uso del mismo, a estudios hidrológicos con prácticamente cualquier finalidad (abastecimiento de agua, hidroelectricidad etc). Los resultados de la aplicación del modelo a las cuencas de la sierra peruana, han producido una correspondencia satisfactoria respecto a los valores medidos.

### 7.1.1 ECUACION DEL BALANCE HIDRICO

La ecuación fundamental que describe el balance hídrico mensual en mm/mes es la siguiente: [Fischer]

$$CM_i = P_i - D_i + G_i - A_i \quad (7.1)$$

donde:

$$\begin{aligned} CM_i &= \text{Caudal mensual (mm/mes)} \\ P_i &= \text{Precipitación mensual sobre la cuenca} \\ &\quad \text{(mm/mes)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_i &= \text{Déficit de escurrimiento (mm/mes)} \\ G_i &= \text{Gasto de la retención de la cuenca} \\ &\quad \text{(mm/mes)} \\ A_i &= \text{Abastecimiento de la retención (mm/mes)} \end{aligned}$$

Asumiendo que para períodos largos (en este caso 1 año) el Gasto y Abastecimiento de la retención tienen el mismo valor, es decir  $G_i = A_i$ , y que para el año promedio, una parte de la precipitación retorna a la atmósfera por evaporación; luego reemplazando  $(P - D)$  por  $(C * P)$ , y tomando en cuenta la transformación de unidades (mm/mes a m<sup>3</sup>/seg) la ecuación (7.1) se convierte en:

$$Q = c' * C * P * AR \quad (7.2)$$

Que es la expresión básica del método racional.

donde:

$$\begin{aligned} Q &= \text{Caudal (m}^3 / \text{s)} \\ c' &= \text{Coeficiente de conversión del tiempo (mes/seg)} \\ C &= \text{Coeficiente de escurrimiento} \\ P &= \text{Precipitación total mensual (mm/mes)} \\ AR &= \text{Área de la cuenca (m}^2\text{)}. \end{aligned}$$

### 7.1.2 COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO

Se ha considerado el uso de la fórmula propuesta por L. Turc:

$$C = \frac{P - D}{P} \quad (7.3)$$

donde:

$$\begin{aligned} C &= \text{Coeficiente de escurrimiento (mm/año)} \\ P &= \text{Precipitación Total anual (mm/año)} \\ D &= \text{Déficit de escurrimiento (mm/año)} \end{aligned}$$

Para la determinación de D se utiliza la expresión:

$$D = P \frac{1}{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}} \quad (7.4)$$

donde:

L = Coeficiente de Temperatura

T = Temperatura media anual (°C)

$$L = 300 + 25(T) + 0.05(T)^3 \quad (7.5)$$

Dado que no se ha podido obtener una ecuación general del coeficiente de escorrentía para toda la sierra, se ha desarrollado la fórmula siguiente, que es válida para la región sur:

$$\bar{C} = 3.16E12(P^{-0.571})(EP^{-3.686})r = 0.96 \quad (7.6)$$

$$\bar{D} = -1380 + 0.872(P) + 1.032(EP); r = 0.96 \quad (7.7)$$

donde:

C = Coeficiente de escurrimiento

D = Déficit de escurrimiento (mm/año)

P = Precipitación total anual (mm/año)

EP= Evapotranspiración anual según Hargreaves  
(mm/año)

r = Coeficiente de correlación

La evapotranspiración potencial, se ha determinado por la fórmula de Hargreaves:

$$EP = 0.0075(RSM)(TF)(FA) \quad (7.8)$$

$$RSM = 0.075(RA) \sqrt{\left(\frac{n}{N}\right)}$$

$$FA = 1 + 0.06(AL)$$

donde:

$RSM$  = Radiación solar media

$TF$  = Componente de temperatura

$FA$  = Coeficiente de corrección por elevación

$TF$  = Temperatura media anual (°F)

$RA$  = Radiación extraterrestre (mm H<sub>2</sub>O / año)

$\left(\frac{n}{N}\right)$  = Relación entre insolación actual y posible (%),

50 % (estimación en base a los registros)

$AL$  = Elevación media de la cuenca (Km)

Para determinar la temperatura anual se toma en cuenta el valor de los registros de las estaciones y el gradiente de temperatura de -5.3 °C / 1000 m, determinado para la sierra.

### 7.1.3 PRECIPITACION EFECTIVA

Para el cálculo de la Precipitación Efectiva, se supone que los caudales promedios observados en la cuenca pertenecen a un estado de equilibrio entre gasto y abastecimiento de la retención. La precipitación efectiva se calculó para el coeficiente de escurrimiento promedio, de tal forma que la relación entre precipitación efectiva y precipitación total resulta igual al coeficiente de escorrentía.

A fin de facilitar el cálculo de la precipitación efectiva se ha determinado el polinomio de quinto grado:

$$PE = a_0 + a_1P + a_2P^2 + a_3P^3 + a_4P^4 + a_5P^5 \quad (7.9)$$

donde:

$PE$  = Precipitación efectiva (mm/mes)

$P$  = Precipitación total mensual (mm/mes)

$a_i$  = Coeficiente del polinomio

El cuadro 7.1 muestra los valores límite de la precipitación efectiva y el cuadro 7.2 muestra los tres juegos de coeficientes para,  $a_i$ , que permiten alcanzar por interpolación valores de C, comprendidos entre 0.15 y 0.45.

Cuadro 7.1: Límite superior para la Precipitación Efectiva

Curva I :  $PE = P - 120.6$  para  $P > 177.8mm/mes$

Curva II :  $PE = P - 86.4$  para  $P > 152.4mm/mes$

Curva III :  $PE = P - 59.7$  para  $P > 127.0mm/mes$

Cuadro 7.2: Coeficientes para el Cálculo de la Precipitación Efectiva

	<b>COEFICIENTES PARA EL CALCULO SEGÚN</b>		
	<b>CURVA I</b>	<b>CURVA II</b>	<b>CURVA III</b>
$a_0$	(-0.018)	(-0.021)	(-0.028)
$a_1$	-0.01850	+0.1358	+0.2756
$a_2$	+0.001105	-0.002296	-0.004103
$a_3$	-1204 E - 8	+4349 E - 8	+5534 E - 8
$a_4$	+144 E - 9	- 89.0 E - 9	+ 124 E - 9
$a_5$	-285 E - 12	-879 E - 13	- 142 E - 11

De esta forma es posible llegar a la relación entre la precipitación efectiva y precipitación total:

$$C = \frac{Q}{P} = \sum_{i=1}^{12} \frac{PE_i}{P} \quad (7.10)$$

donde:

C = Coeficiente de escurrimiento

Q = Caudal anual

P = Precipitación Total anual

$\sum_{i=1}^{12} PE_i$  = Suma de la precipitación efectiva mensual

#### 7.1.4 RETENCION DE LA CUENCA

Bajo la suposición de que para un año promedio exista un equilibrio entre el gasto y el abastecimiento de la reserva de la cuenca y además que el caudal total sea igual a la precipitación efectiva anual, la contribución de la reserva hídrica al caudal se puede calcular según las fórmulas:

$$R_i = CM_i - P_i \quad (7.11)$$

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i \quad (7.12)$$

donde:

$CM_i$  = Caudal mensual (mm/mes)

$PE_i$  = Precipitación Efectiva Mensual (mm/mes)

$R_i$  = Retención de la cuenca (mm/mes)

$G_i$  = Gasto de la retención (mm/mes)

$A_i$  = Abastecimiento de la retención (mm/mes)

$R_i = G_i$  para valores mayores que cero (mm/mes)

$R_i = A_i$  para valores menores que cero (mm/mes)

Sumando los valores de G o A respectivamente, se halla la retención total de la cuenca para el año promedio, que para el caso de las cuencas de la sierra varía de 43 a 188 (mm/año).

#### 7.1.5 RELACION ENTRE DESCARGAS Y RETENCION

Durante la estación seca, el gasto de la retención alimenta los ríos, constituyendo el caudal o descarga básica. La reserva o

retención de la cuenca se agota al final de la estación seca; durante esta estación la descarga se puede calcular en base a la ecuación:

$$Q_t = Q_0 e^{-a(t)} \quad (7.13)$$

donde:

- $Q_t$  = descarga en el tiempo t
- $Q_0$  = descarga inicial
- $a$  = Coeficiente de agotamiento
- $t$  = tiempo

Al principio de la estación lluviosa, el proceso de agotamiento de la reserva termina, comenzando a su vez el abastecimiento de los almacenes hídricos. Este proceso está descrito por un déficit entre la precipitación efectiva y el caudal real. En base a los hidrogramas se ha determinado que el abastecimiento es más fuerte al principio de la estación lluviosa continuando de forma progresiva pero menos pronunciada, hasta el final de dicha estación.

#### **7.1.6 COEFICIENTE DE AGOTAMIENTO**

Mediante la fórmula (7.13) se puede calcular el coeficiente de agotamiento "a", en base a datos hidrométricos. Este coeficiente no es constante durante toda la estación seca, ya que va disminuyendo gradualmente.

Con fines prácticos se puede despreciar la variación del coeficiente "a" durante la estación seca empleando un valor promedio.

El coeficiente de agotamiento de la cuenca tiene una dependencia logarítmica del área de la cuenca.

$$a = f(\text{LnAR}) \quad (7.14)$$

El análisis de las observaciones disponibles muestran, además, cierta influencia del clima, de la geología y de la cobertura vegetal. Se ha desarrollado una ecuación empírica para la sierra peruana:

$$a = 3.1249E67(\text{AR})^{-0.1144}(\text{EP})^{-19.336}(\text{T})^{-3.369}(\text{R})^{-1.429} \quad (7.15)$$
$$r = 0.86$$

En principio, es posible determinar el coeficiente de agotamiento real mediante aforos sucesivos en el río durante la estación seca; sin embargo cuando no sea posible ello, se puede recurrir a las ecuaciones desarrolladas para la determinación del coeficiente "a" para cuatro clases de cuencas:

- Cuencas con agotamiento muy rápido, debido a temperaturas elevadas ( $>10^{\circ}\text{C}$ ) y retención que va de reducida (50mm/año) a mediana (80 mm/año):

$$a = -0.00252(\text{LnAR}) + 0.034 \quad (7.16)$$

- Cuencas con agotamiento rápido, cuya retención varía entre 50 y 80 mm/año y vegetación poco desarrollada (puna):

$$a = -0.00252(\text{LnAR}) + 0.030 \quad (7.17)$$

- Cuencas con agotamiento mediano, cuya retención es alrededor de 80 mm/año y vegetación mezclada (pastos, bosques y terrenos cultivados):

$$a = -0.00252(\text{LnAR}) + 0.026 \quad (7.18)$$

- Cuencas con agotamiento reducido por alta retención (>100mm/año) y vegetación mezclada:

$$a = -0.00252(\ln AR) + 0.023 \quad (7.19)$$

donde:

- $a$  = coeficiente de agotamiento por día
- $AR$  = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)
- $EP$  = evapotranspiración potencial anual (mm/año)
- $T$  = duración de la temporada seca (días)
- $R$  = retención total de la cuenca (mm/año)

### 7.1.7 ALMACENAMIENTO HIDRICO

Tres tipos de almacenes hídricos naturales que inciden en la retención de la cuenca son considerados:

- Acuíferos
- Lagunas y pantanos
- Nevados

La determinación de la lámina "L" que almacena cada tipo de estos almacenes está dado por:

- **Acuíferos**

$$L_A = -750(I) + 315(\text{mm/año}) \quad (7.20)$$

Siendo:

- $L_A$  = lámina específica de acuíferos
- $I$  = pendiente de desagüe :  $I \leq 15\%$

- **Lagunas y Pantanos**

$$L_L = 500(\text{mm/año}) \quad (7.21)$$

Siendo:

- $L_L$  = Lámina específica de lagunas y pantanos

- **Nevados**

$$L_N = 500(\text{mm/año}) \quad (7.22)$$

Siendo:

$$L_N = \text{lámina específica de nevados}$$

Las respectivas extensiones o áreas son determinadas de los mapas o aerofotografías. Los almacenamientos de corto plazo no son considerados para este caso, estando los mismos incluidos en las ecuaciones de la precipitación efectiva.

#### 7.1.8 ABASTECIMIENTO DE LA RETENCION

El abastecimiento durante la estación lluviosa es uniforme para cuencas ubicadas en la misma región climática. En la región del Cuzco el abastecimiento comienza en el mes de noviembre con 5%, alcanzando hasta enero el valor del 80 % del volumen final. Las precipitaciones altas del mes de febrero completan el 20 % restante, y las precipitaciones efectivas del mes de marzo escurren directamente sin contribuir a la retención. Los coeficientes mensuales expresados en porcentaje del almacenamiento total anual se muestran en el Cuadro 7.3

*Cuadro 7.3: Almacenamiento hídrico durante la época de lluvias - (valores -ai %)*

Región	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Total
Cuzco	0	5	35	40	20	0	100
Huancavelica	10	0	35	30	20	5	100
Junín	10	0	25	30	30	5	100
Cajamarca	25	-5	0	20	25	35	100

La lámina de agua  $A_i$  que entra en la reserva de la cuenca se muestra en forma de déficit mensual de la Precipitación Efectiva  $PE_i$ . Se calcula mediante la ecuación:

$$A_i = a_i \left( \frac{R}{100} \right) \quad (7.23)$$

Siendo:

$A_i$  = abastecimiento mensual déficit de la precipitación efectiva (mm/mes)

$a_i$  = coeficiente de abastecimiento (%)

$R$  = retención de la cuenca (mm/año)

### 7.1.9 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MENSUAL PARA EL AÑO PROMEDIO

Está basado en la ecuación fundamental que describe el balance hídrico mensual a partir de los componentes descritos anteriormente:

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i \quad (7.24)$$

donde:

$CM_i$  = Caudal del mes  $i$  (mm/mes)

$PE_i$  = Precipitación efectiva del mes  $i$  (mm/mes)

$G_i$  = Gasto de la retención del mes  $i$  (mm/mes)

$A_i$  = abastecimiento del mes  $i$  (mm/mes)

### 7.2 GENERACIÓN DE CAUDALES MENSUALES PARA PERIODOS EXTENDIDOS

A fin de generar una serie sintética de caudales para períodos extendidos, se ha implementado un modelo estocástico que consiste en una combinación de un proceso markoviano de primer orden, según la ecuación (7.25) con una variable de impulso, que en este caso es la precipitación efectiva en la ecuación (7.26):

$$Q_t = f(Q_{t-1}) \quad (7.25)$$

$$Q = g(PE_t) \quad (7.26)$$

Con la finalidad de aumentar el rango de valores generados y obtener una óptima aproximación a la realidad, se utiliza además una variable aleatoria.

$$Z = z(S)\sqrt{(1-r^2)} \quad (7.27)$$

La ecuación integral para la generación de caudales mensuales es:

$$Q_t = B1 + B2(Q_{t-1}) + B3(PE_t) + z(S)\sqrt{1-r^2} \quad (7.28)$$

donde:

- $Q_t$  = Caudal del mes t
- $Q_{t-1}$  = Caudal del mes anterior
- $PE_t$  = Precipitación efectiva del mes
- B1 = Factor constante o caudal básico.

Se calcula los parámetros B1, B2, B3, r y S sobre la base de los resultados del modelo para el año promedio por un cálculo de regresión lineal con  $Q_t$  como valor dependiente y  $Q_{t-1}$  y  $PE_t$ , como valores independientes. Para el cálculo se recomienda el uso de software comercial (hojas electrónicas) o de uso específico (programas elaborados tales como el SIH).

El proceso de generación requiere de un valor inicial, el cual puede ser obtenido en una de las siguientes formas:

- Empezar el cálculo en el mes para el cual se dispone de un aforo
- Tomar como valor inicial el caudal promedio de cualquier mes,
- Empezar con un caudal cero, calcular un año y tomar el último valor como valor  $Q_0$  sin considerar estos valores en el cálculo de los parámetros estadísticos del período generado.

### 7.3 TEST ESTADISTICOS

Para determinar la calidad de la coincidencia de los caudales generados con los observados, se desarrolla la comparación de los promedios y desviaciones tipo, de los valores históricos y los generados.

Para probar si los promedios salen de la misma población, se utiliza el test de Student (Prueba "t"). Esta prueba debe ser desarrollada para cada mes.

Se compara el valor de t con el valor límite  $t_{p,n}$  que indica el límite superior que, con una probabilidad de error del P%, permite decir que ambos promedios pertenecen a la misma población.

La comparación estadística de promedios se realiza mediante el test de Fischer (Prueba "F"). que se compara con el valor límite  $F_{p/2}(\%)$ ,  $(n_1, n_2)$

### 7.4 RESTRICCIONES DEL MODELO

El modelo presenta ciertas restricciones de uso o aplicación tales como:

- El uso de los modelos parciales, únicamente dentro del rango de calibración establecido.
- Su uso es únicamente para el cálculo de caudales mensuales promedio.
- Los registros generados en el período de secas presentan una mayor confiabilidad que los valores generados para la época lluviosa.
- La aplicación del modelo se restringe a las cuencas en las que se ha calibrado sus parámetros (sierra peruana: Cusco, Huancavelica, Junin, Cajamarca)

Es importante tener en cuenta las mencionadas restricciones a fin de garantizar una buena performance del modelo.

## **VIII. CALCULO DE LA DEMANDA DE AGUA**

### **8.1 CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION DE LOS CULTIVOS**

Se suele estimar que el clima es uno de los factores más importantes que determina el volumen de las pérdidas de agua por evapotranspiración de los cultivos. Prescindiendo de los factores climáticos, la evapotranspiración correspondiente a un cultivo dado, queda también determinada por el propio cultivo, al igual que sus características de crecimiento. El medio local, las condiciones de los suelos y su humedad, los fertilizantes, las infestaciones, enfermedades e insectos, las prácticas agrícolas y de regadío y otros factores pueden influir también en las tasas de crecimiento y en la evapotranspiración consiguiente.

Se ha desarrollado diversos métodos para predecir la evapotranspiración en una determinada zona, éstos se basan tanto en principios físicos rigurosos como en la medida directa de la evaporación y en fórmulas empíricas establecidas en base a datos meteorológicos; ésta última son de uso más práctico ya que es fácil disponer en cada cuenca de la información necesaria, sin embargo, tienen el inconveniente de haber sido desarrolladas en condiciones climáticas normalmente diferentes a las del país, lo cual puede inducir cierto margen de error que, en el caso del nivel de este estudio, podría considerarse aceptable.

Una disyuntiva que se le plantea al técnico es la elección de la fórmula más apropiada para la determinación de la evapotranspiración potencial de una zona. Estudios comparativos realizados han permitido concluir que las fórmulas que toman en cuenta los factores climáticos más importantes (temperatura, humedad, viento, luz solar y elevación entre otros) son las

más convenientes y las que ofrecen un mayor grado de correlación. En muchos casos la elección de la fórmula está limitado a la disponibilidad de la información climatológica, como es el caso de la cuenca Yauca, puesto que las estaciones climatológicas disponibles en la cuenca no disponen de algunos parámetros tales como velocidad del viento y horas de sol, por lo que, se ha seleccionado el método propuesto por George Hargreaves, ya que se dispone de registros de temperatura y humedad relativa.

## 8.2 CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL – METODO DE HARGREAVES

Como se indicó anteriormente, se seleccionó este método por disponibilidad de información climatológica en la cuenca y, además considerando las investigaciones realizadas en Cajamarca en el año 1981, se encontró un buen grado de correlación con el método lisimétrico.

El método de Hargreaves presenta la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{ETP} &= \text{MF} \cdot \text{TMF} \cdot \text{CH} \cdot \text{CE} && (8.1) \\ \text{CH} &= 0.166(100-\text{HR})^{0.5} \text{ para } \text{HR} > 65\% \text{ y } \text{CH} = 1 \text{ para } \text{HR} < 65\% \\ \text{CE} &= 1 + (E/50000) \end{aligned}$$

Donde:

- ETP = Evapotranspiración potencial en mm/mes.
- MF = Factor de energía solar en mm/mes.
- TMF = Temperatura media mensual en grados Fahrenheit.
- CH = Corrección por humedad relativa (HR), si HR > 65%.
- CE = Factor de corrección por altitud.
- E = Altitud sobre el nivel del mar.

En el [Cuadro N°14 del anexo V](#), se presenta los cálculos de la evapotranspiración potencial por el método de Hargreaves utilizando la información meteorológica de las Estaciones Coracora, Chaviña, Sancos y Yauca.

### **8.3 COEFICIENTES DE USO CONSUNTIVO**

Los coeficientes de uso consuntivo ( $K_c$ ), se han determinado siguiendo la metodología recomendada en las publicaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO): Las necesidades de agua de los cultivos-Manual 24. En el [Cuadro N°17 del anexo V](#), se presenta los valores de los coeficientes de cultivo para los cultivos predominantes en las diferentes comisiones de regantes de la cuenca Yauca.

### **8.4 EFICIENCIA DE RIEGO**

Considerando, fundamentalmente, las pérdidas por filtración que ocurren en el sistema de conducción en el área de estudio y de la evaluación de las técnicas de riego comúnmente empleadas, se determina los valores de las eficiencias por conducción y por aplicación del agua, cuyo producto constituye la eficiencia de riego.

De acuerdo a la evaluación de campo realizado en el área de estudio, se ha determinado que la eficiencia de conducción de la infraestructura de riego de la cuenca Yauca es del orden del 70%. Además, la evaluación de los métodos de riego usuales (surcos) y los controles de campo realizados conducen a señalar una eficiencia por aplicación del agua no mayor de 40%. Por lo tanto, estos factores están fijando una eficiencia de riego promedio de 28%, a nivel de la cuenca.

### **8.5 DEMANDA DE AGUA AGRICOLA**

Conocida el área agrícola de cada comisión de regantes, facilitada por la Administración Técnica del Distrito de Riego Acarí-Yauca-Puquio, así como el calendario de los cultivos, determinada en función de la información

obtenida en campo, mostradas en los Cuadros N°12 y N°13 del anexo V, respectivamente, se procedió con la aplicación de la fórmula de Hargreaves, ésta corregida con el factor de cultivo y la eficiencia de riego, dio como resultado los volúmenes de agua que representan las demandas de agua para cada cultivo por mes y por año, en cabecera del área agrícola de cada comisión de regantes, que se muestran en el Cuadro N°17 del anexo V, y en el Cuadro N°18 del anexo V, se muestra las demandas agrícolas totales en los sectores de riego Coracora y Yauca, respectivamente.

En la determinación de la demanda hídrica actual o neta de los cultivos (DA), se tomó en cuenta la precipitación registrada en las Estaciones Meteorológicas de Coracora, Chaviña y Yauca a una persistencia del 75%, cuyos cálculos es mostrado en el Cuadro N°15 del anexo V; además se ha calculado la precipitación efectiva (PE) utilizando el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USSCS), mostrado en el Cuadro N°16 del anexo V, cuya fórmula es el siguiente:

$$\begin{aligned} PE &= (125-0.2*PP)*PP/125 && (PP < 250 \text{ mm/mes}) && (8.2) \\ PE &= 0.1*PP-125 && (PP > 250 \text{ mm/mes}) \end{aligned}$$

Donde: PE = precipitación efectiva en mm/mes y PP = precipitación total del mes en mm.

## 8.6 DEMANDA DE AGUA POBLACIONAL

En el ámbito de la cuenca Yauca, la demanda poblacional de agua para uso consuntivo es generada principalmente por la necesidad de satisfacer los requerimientos de consumo y aseo de las personas (agua potable y alcantarillado), ya que no es apreciable los requerimientos de agua de uso industrial e hidroenergético. Dicha demanda de agua poblacional en la cuenca Yauca, es suministrada de la siguiente manera: en la parte alta de

la cuenca, sector de riego Coracora, la fuente de suministro son los manantiales y, en la parte baja de la cuenca, sector de riego Yauca, la fuente de suministro es, en su totalidad, captada del río Yauca.

El Instituto Nacional de Estadística e Informática, en su Banco de información distrital ([www.inei.gob.pe](http://www.inei.gob.pe)), muestra que la población total que habrían tenido los Distritos que se ubican dentro de la cuenca Yauca en el año 2,002 esta de acuerdo al [Cuadro N°19 del anexo V](#). Considerando una distribución de agua de 100 lt/hab/día, por tratarse de una zona rural, se determina la demanda poblacional, el cual es mostrado en el mismo cuadro.

#### **8.7 DEMANDA DE AGUA TOTAL**

La demanda de agua total viene a ser la sumatoria de las demandas, agrícola y poblacional, estos cálculos son mostrados en el [Cuadro N°20 del anexo V](#).

Cabe mencionar que el distrito de Coracora, utiliza para satisfacer los requerimientos de agua para uso poblacional, las fuentes de agua (manantiales) de dos comisiones de regantes, Ancco Chinchayccocho y Ccollana, en un 60 y 40%, respectivamente.

### **IX. BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA**

El recurso hídrico cuantitativamente conocido en la cuenca del río Yauca, proviene principalmente del flujo superficial y de los afloramientos subterráneos (Manantiales), de ellas, el flujo superficial es el de mayor importancia, siendo su disponibilidad registrada en la estación de aforos Puente Jaquí. El volumen hídrico de los manantiales fueron cuantificados en el estudio de "Inventario de Fuentes de Agua Superficial en la Cuenca

Yauca”, que se ha desarrollando simultáneamente con el Estudio Hidrológico.

Considerando que las comisiones de regantes del sector de riego Coracora, salvo la de Chaviña y Aycará, utilizan principalmente la fuente de agua de manantiales y, en algunos casos el flujo superficial permanente de los tributarios secundarios del río Yauca, para satisfacer sus demandas; y las comisiones de regantes del sector de riego Yauca, incluyendo las comisiones de regantes de Chaviña y Aycará del sector de riego Coracora, utilizan principalmente el flujo superficial del río Yauca, con la salvedad que las comisiones de regantes de Chaviña y Aycará, además, disponen de manantiales y captaciones de flujo permanente de los tributarios secundarios, se analizará el balance hídrico por separado.

## 9.1 BALANCE HÍDRICO DEL SECTOR DE RIEGO CORACORA

Tal como se ha señalado anteriormente, las comisiones de regantes del sector de riego Coracora, utilizan principalmente los afloramientos subterráneos para satisfacer sus demandas, por lo que antes de realizar el balance de agua es necesario cuantificar esta disponibilidad permanente. En el [Cuadro N°21 del anexo V](#), se presenta las disponibilidades mínimas de agua permanente, registradas en meses de estiaje, (trabajos de inventario de fuentes de agua – Julio-03) para las diferentes comisiones de regantes.

En el [Cuadro N°22 del anexo V](#), se presenta los resultados del balance hídrico para el sector de riego Coracora, en el que se puede observar que la totalidad de las comisiones de regantes tienen déficit de agua a nivel anual, sin embargo, cabe mencionar que el análisis fue realizado considerando la disponibilidad de agua en condiciones mínimas, es decir con el valor aforado en meses de sequía, sin considerar su variación temporal por falta de información, por lo que, es de esperarse que en

meses de lluvia las demandas son equilibradas con la oferta de agua o en todo caso los valores de déficit de agua calculados son considerablemente disminuidos.

## 9.2 BALANCE HÍDRICO DEL EMBALSE ANCASCOCHA

Como se ha mencionado anteriormente, el sector de riego Yauca y las comisiones de regantes de Chaviña y Aycará, del sector de riego Coracora, utilizan el flujo superficial, tanto de régimen natural así como el caudal regulado en el embalse Ancascocha; por lo que, el balance hídrico de estas comisiones de regantes será realizado considerando el volumen útil del embalse.

El análisis del balance hidrológico se realizó siguiendo la técnica de simulación, es decir, utilizando el periodo de 38 años de registros mensuales de descargas del río, en la Estación Puente Jaquí, y las descargas generadas a la entrada del embalse Ancascocha, mediante el modelo estocástico-determinístico de Lutz Scholz. Luego, empezando con el embalse lleno, el balance de agua en éste se calcula hacia delante en el tiempo como

$$S_t = S_{t-1} + I_t - V_{sal} - A_t E_t - Q_t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (9.1)$$

donde  $S_{t-1}$  y  $S_t$  son los almacenamientos al principio y al final del mes  $t$ ,  $I_t$  es el volumen de descarga que ingresa al embalse,  $V_{sal}$  es el volumen regulado que atiende el embalse de acuerdo a necesidades y/o disponibilidad,  $A_t$  es el área superficial,  $E_t$  es la evaporación neta (evaporación menos precipitación en la superficie del embalse) en este caso se utilizó la información disponible y procesada de la Estación Pluviométrica Chaviña, y  $Q_t$  el volumen de descarga a través del vertedero en el mes  $t$ . El área superficial  $A_t$  se calcula al utilizar la curva de almacenamiento-área, en el [Cuadro N°23 del anexo V](#), se presenta la tabla

área-volumen del embalse Ancascocha. Las unidades de (9.1) son m<sup>3</sup> o MMC.

El rango permisible de operación de almacenamiento está localizado entre  $S_{\min}$  y  $S_{\max}$ , volumen mínimo de operación y volumen máximo de almacenamiento en el embalse, respectivamente. Normalmente, la descarga a través del vertedero es  $Q_t = 0$ , pero cuando las descargas de entrada en el embalse son altas puede ocurrir que  $S_t$ , tal como se calcula de la ecuación (9.1), resulte mayor que  $S_{\max}$ ; en este caso,  $Q_t = S_t - S_{\max}$  y se utiliza un nuevo valor de  $S_t = S_{\max}$  en el siguiente paso computacional.

El análisis del balance de agua se ha realizado bajo las siguientes suposiciones y/o restricciones.

- De acuerdo al levantamiento topográfico y batimétrico de la laguna Ancascocha, realizado por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos UGRH – HUARAZ en Diciembre del 2003, el embalse tiene un volumen máximo de almacenamiento de  $S_{\max} = 39.96$  mmc. y un volumen útil de 19.04 mmc. por lo tanto tiene un volumen mínimo de operación de  $S_{\min} = 20.92$  mmc.
- La simulación de operación del embalse se inicia considerando embalse lleno.
- Se considera en primer lugar el abastecimiento de las demandas de agua en Chaviña y Aycará, luego el abastecimiento de los déficit en el sector de riego Yauca.
- La demanda total mensual ( $V_{\text{dem}}$ ) es igual a la demanda mensual de Chaviña y Aycará ( $V_{d1}$ ), cuando  $V_{\text{jaq}} > V_{d2}$ , siendo  $V_{\text{jaq}}$  el volumen registrado en la Estación Puente Jaquí y  $V_{d2}$  la demanda mensual del sector de riego Yauca; y  $V_{\text{dem}} = V_{d1} + V_{d2} - V_{\text{jaq}}$ , en caso contrario.
- El  $V_{\text{sal}}$  es igual a  $V_{\text{dem}}$  cuando  $S_{t-1} - S_{\min} > V_{\text{dem}}$ ; y  $V_{\text{sal}} = S_{t-1} - S_{\min}$  en caso contrario.

- Déficit de Chaviña ( $D_{chav}$ ) es igual a la diferencia entre  $V_{d1}$  y  $V_{sal}$ , si éste es positivo.
- Déficit de Yauca es igual a  $D_{yau} = V_{d2} - V_{jaq} - (V_{sal} - V_{d1})$ .

En el [Cuadro N°24 del anexo V](#), se presenta la demanda de agua, considerando las disponibilidades de flujo subterráneo, tanto del sector de riego Yauca así como de las comisiones de regantes Chaviña y Aycará, ya que ellas son las que utilizan el volumen regulado en el embalse Ancascocha; y en el [Cuadro N°25 del anexo V](#), se presenta el balance de agua del embalse Ancascocha.

De acuerdo al análisis del balance hídrico del embalse Ancascocha, realizado para un periodo de 38 años, se verifica que, tanto la comisión de regantes Chaviña-Aycará y el sector de riego Yauca, tienen déficit de agua durante los meses de Octubre-Diciembre y Septiembre-Diciembre, respectivamente, prácticamente durante los 38 años de análisis, salvo algunos pocos años que manifiestan déficit desde Agosto hasta inclusive Enero.

Es importante manifestar que la comisión de regantes de Chaviña no permitió realizar el Inventario de sus fuentes de agua, considerándose presumiblemente, que disponen de una cierta cantidad de afloramientos de agua (manantiales), que no se tomaron en cuenta en el balance hídrico.

Cabe mencionar que la demanda de la comisión de regantes de Lampalla, son satisfechas con el flujo permanente que cuenta el río Lampalla, cuyas aguas provienen de las subcuencas no reguladas, tales como Paccha, Huaccramayo, Acos y Tampa; por lo que no fue considerado en el análisis de balance hídrico del embalse Ancascocha.

## **X. ANÁLISIS DE MÁXIMAS AVENIDAS**

### **10.1 MÉTODOS ESTADÍSTICOS EN LA DETERMINACIÓN DE LA PRECIPITACION MAXIMA**

Un sistema hidrológico es afectado eventualmente por eventos extremos, tales como tormentas severas, crecientes, etc. La magnitud de este evento extremo está relacionado con su frecuencia de ocurrencia mediante una distribución de probabilidades.

Los métodos estadísticos se apoyan en la existencia de series de datos de caudales en el lugar de interés, las cuales son sometidas a un análisis de frecuencias. Esto implica efectuar el ajuste de varias distribuciones teóricas a una determinada muestra, para comparar y concluir cual de ellas se aproxima mejor a la distribución empírica.

Las distribuciones teóricas más utilizadas para el análisis de máximas avenidas son: Gumbel I, Log Normal y Log Pearson III.

#### **A.- DISTRIBUCIÓN GUMBEL I**

La función de distribución doble exponencial de los valores máximos, llamada comúnmente la distribución Gumbel tipo I, en su forma acumulativa es definido como:

$$F(x) = \exp[-\exp(-\alpha(x-\beta))] \quad \dots(10.1)$$

en que  $F(x)$  es la distribución de probabilidad de los valores máximos  $x$ , y  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de escala y de localización respectivamente.

Aplicando el método de los momentos en la estimación de los parámetros, se obtiene

$$\beta = \mu - 0.450\sigma; \quad \alpha = \frac{1.281}{\sigma} \quad \dots(10.2)$$

donde  $\mu$  es la media y  $\sigma$  es la desviación estándar de la muestra.

#### B.- DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL 2P

Cuando los logaritmos,  $\ln(x)$ , de una variable  $x$  están normalmente distribuidos, entonces se dice que la distribución de  $x$  sigue la distribución de probabilidad log-normal, en que la función de probabilidad log-normal  $f(x)$  viene representado como:

$$f(x) = \frac{1}{x\alpha\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \beta}{\alpha}\right)^2\right], \quad \text{para } x \geq 0 \quad \dots(10.3)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de escala y de localización respectivamente.

Aplicando el método de los momentos en la estimación de los parámetros, se obtiene

$$\beta = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\mu^4}{\mu^2 + \sigma^2}\right) \quad \dots(10.4)$$

$$\alpha = \sqrt{\ln\left(\frac{\mu^2 + \sigma^2}{\mu^2}\right)}$$

donde  $\mu$  es la media y  $\sigma$  es la desviación estándar de la muestra.

#### C.- DISTRIBUCIÓN LOG-PEARSON 3P

La distribución Log Pearson tipo 3 (LP3) es un modelo muy importante dentro de la Hidrología Estadística, sobre todo, luego de las recomendaciones del Consejo de Recursos Hidráulicos de los Estados Unidos (Water Resources Council – WRC), para ajustar la distribución Pearson tipo 3 (P3) a los logaritmos de las máximas avenidas. Pues, la distribución LP3, es una familia flexible de tres

parámetros capaz de tomar muchas formas diferentes, por consiguiente es ampliamente utilizado en el modelamiento de series anuales de máximas avenidas de los datos no transformados.

Si el logaritmo de una variable  $x$ ,  $y = \ln x$ ; tiene la distribución Pearson  $P3(\alpha, \beta, \gamma)$ , entonces  $X$  tiene la distribución  $LP3(\alpha, \beta, \gamma)$  con la siguiente función densidad

$$f(x) = \frac{1}{x|\alpha|\Gamma(\beta)} \left( \frac{\ln x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[ - \left( \frac{\ln x - \gamma}{\alpha} \right) \right] \quad \dots(10.5)$$

donde las constantes  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$  son parámetros de escala, forma, y posición en el espacio log, respectivamente, y  $\Gamma(\cdot)$  denota la función gamma. Para  $\alpha > 0$ ;  $x$  y  $y$  tienen la asimetría positiva y  $x \geq \exp(\gamma)$ . Para  $\alpha < 0$ ,  $y$  tiene la asimetría negativa pero  $x$  puede tener asimetría positiva o negativa y  $x \leq \exp(\gamma)$ .

Aplicando el método de los momentos en la estimación de los parámetros, se obtiene

$$\mu_Y = \gamma + \beta\alpha$$

$$\sigma_Y^2 = \beta\alpha^2$$

$$\gamma_Y = \frac{2\alpha}{|\alpha|\beta^{1/2}} \quad \dots(10.6)$$

donde  $\mu_Y$ ,  $\sigma_Y$ , y  $\gamma_Y$  es la media, variancia, y coeficiente de asimetría de  $y = \ln x$  respectivamente.

Con los datos de precipitación máxima en 24 hrs., registrado por el SENAMHI en las Estaciones Pluviométricas ubicadas en la cuenca húmeda, Urayhuma, Cecchapampa, Chaviña, Coracora y Carhuanillas mostrado en el [anexo I](#), se procedió a realizar el análisis de frecuencia de eventos máximos,

considerando que no se cuenta con una serie histórica suficientemente larga para el tratamiento estadístico se determinó la serie parcial de cada estación, bondad de ajuste de la distribución teórica Gumbel I a la distribución empírica de Wuibull, y finalmente se estimó la precipitación máxima en 24 hrs., para diferentes periodos de retorno. En los Cuadros N°1 al N°15 del anexo VI, se muestran estos cálculos.

## 10.2 SELECCIÓN DEL PERIODO DE RETORNO

En términos más generales, el análisis de frecuencia da respuesta a la siguiente interrogante: Dado  $N$  años de registro de datos para un cauce  $S$  y  $n$  años de vida útil de una cierta estructura, cual es la probabilidad  $p$  de que la descarga  $Q_T$  sea excedido por lo menos una vez durante la vida de diseño  $n$ ? Por tanto es de gran importancia determinar el periodo de retorno  $T$ .

Un evento extremo ocurre si una variable aleatoria  $X$  es mayor o igual que un cierto nivel  $X_T$ . El intervalo de recurrencia  $t$  es el tiempo entre ocurrencias  $X \geq X_T$ . El periodo de retorno  $T$  de un evento  $X \geq X_T$  es el valor esperado de  $t$ ,  $E(t)$ .

La probabilidad de que una observación  $X$  exceda el valor  $X_T$ , se relaciona con el periodo de retorno por la expresión

$$P(X \geq X_T) = 1 - F(x) = \frac{1}{T} \quad \dots(10.7)$$

Existe tres formas de uso común, para la selección de la magnitud del evento hidrológico que debe ser considerado en el diseño de una estructura.

### A.- APROXIMACIÓN EMPÍRICA

La aproximación empírica, usualmente esta relacionado a la experiencia acumulada a lo largo del tiempo en la construcción de obras hidráulicas en el mundo, produciendo tablas, mostradas en

diferentes publicaciones, que dan un periodo de retorno,  $T$  en años, de acuerdo al tipo de estructura, sin embargo, estas tablas difieren considerablemente unas de otras y además el criterio de diseño mediante una regla empírica implica un factor de seguridad, o riesgo de falla, totalmente arbitrario.

Una aproximación empírica, usualmente selecciona el evento más extremo de las observaciones pasadas como el valor de diseño. La probabilidad de que un evento más extremo de los pasados  $N$  años sea igualado o excedido una vez durante los próximos  $n$  años puede estimarse como:  $P(N, n) = \frac{n}{N + n}$ .

#### **B. ANÁLISIS DE RIESGO.**

Una estructura puede fallar si la magnitud del evento correspondiente al periodo de retorno de diseño  $T$  es excedido durante la vida útil de la estructura. Este riesgo hidrológico de falla puede calcularse utilizando la ecuación:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad \dots(10.8)$$

Donde,  $R$  es la probabilidad de que un evento ocurra por lo menos una vez en  $n$  años y  $n$  es la vida útil de la estructura.

#### **C. ANÁLISIS HIDROECONÓMICO**

El periodo de retorno, OPTIMO, puede determinarse por un análisis hidroeconómico, si se conocen tanto la naturaleza probabilística de un evento hidrológico como el daño que resultaría si este ocurre sobre un rango posible de eventos.

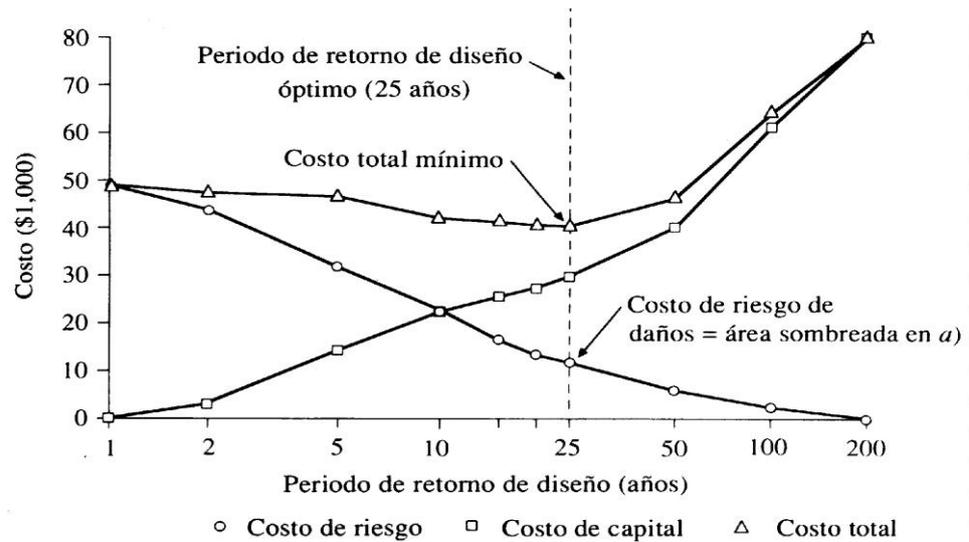


Fig. 10.1 Análisis Hidroeconómico

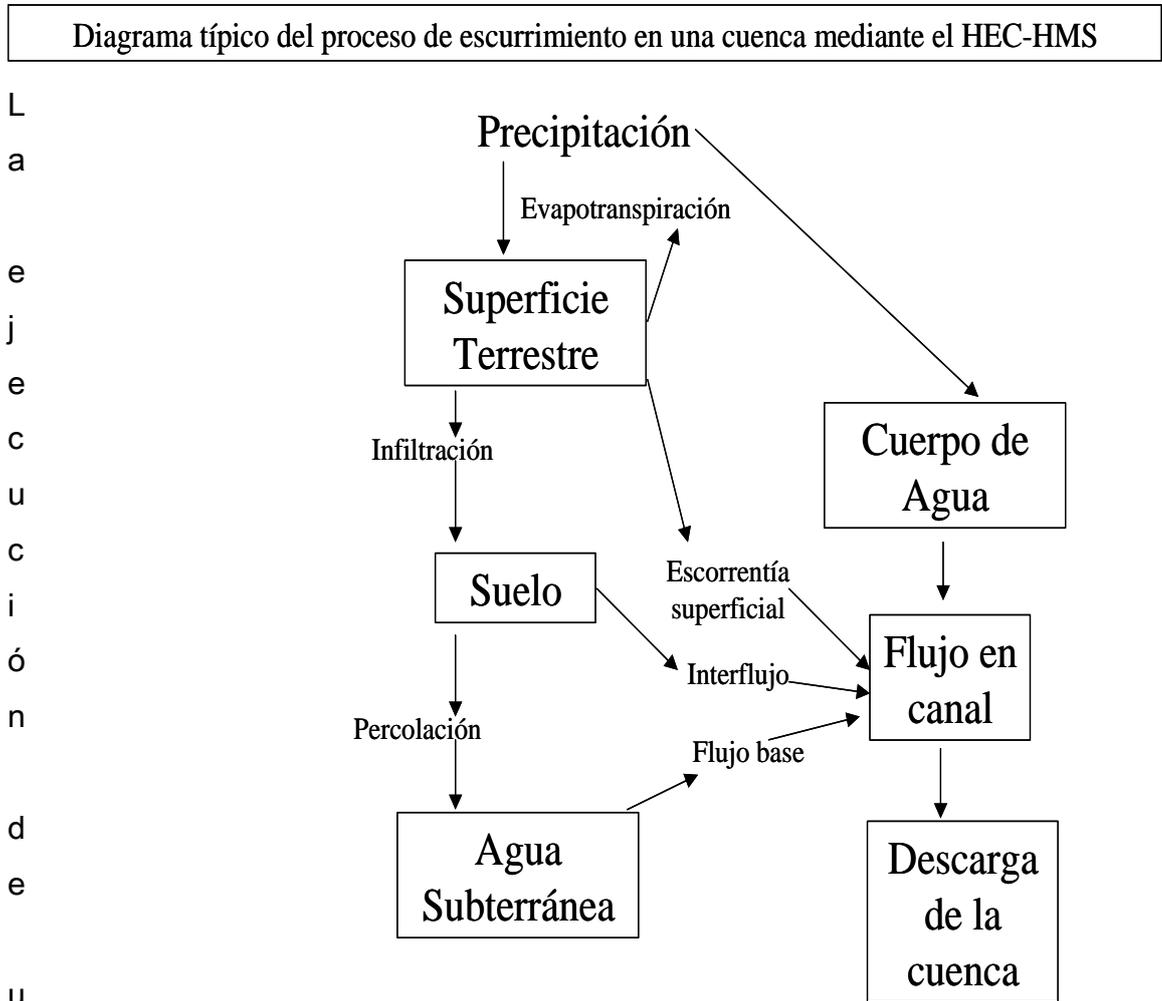
### 10.3 TRANSFORMACION PRECIPITACION - ESCORRENTIA

Puesto que en la cuenca del río Yauca no se cuenta con registros de caudales máximos instantáneos, se procedió a analizar la precipitación máxima en 24 hrs., para luego realizar la transformación precipitación-escorrentía con ayuda del programa HEC-HMS, y de esta manera generar caudales de avenidas para diferentes periodos de retorno en puntos de interés de la cuenca.

Los elementos hidrológicos se ubican en una red de cauces y los cálculos son procesados en secuencia de aguas arriba hacia aguas abajo. Los cálculos pueden ser realizados en el sistema internacional de unidades 'SI', sin embargo, el usuario puede ingresar y ver la salida en unidades americanas 'US' y puede fácilmente convertir las entradas y los resultados de un sistema a otro.

La representación típica del HEC-HMS para calcular el escurrimiento de la cuenca es la siguiente:

Fig. 10.2



na simulación, llamada comúnmente "corrida", requiere la especificación de tres conjuntos de datos. El primero denominado Modelo de Cuenca, que contiene parámetros y la conectividad de datos para los elementos hidrológicos. Los tipos de elementos son: Sub-cuencas, tránsito a lo largo de cauces, convergencias, reservorios, fuentes, ramas y sumideros. El segundo conjunto de datos denominado Modelo Meteorológico, consiste en ingresar datos meteorológicos e información requerida para dicho proceso; el modelo puede representar condiciones históricas o hipotéticas. Finalmente, el tercer conjunto de datos denominado Especificaciones de control, señala el tiempo relacionado con la información de salida para una simulación.

### 10.3.1 Modelo de Cuenca

En base al análisis de la cuenca y a la visita de campo, la cuenca Yauca fue dividida en subcuencas para el análisis de disponibilidad de agua y máximas avenidas, el cual es mostrado en el [Plano N°03 del anexo VIII](#), de acuerdo a ello se seleccionó las subcuencas potencialmente productoras de flujo superficial en época de lluvia, estas subcuencas son mostradas en el [Cuadro N°16 del anexo VI](#); con éstas subcuencas se desarrolló el modelamiento de la cuenca Yauca en el programa HEC-HMS, cuyo esquema es mostrado en la Fig. 10.3. Inicialmente se diseñó el esquema hidrográfico a simular y luego se procedió a interconectar cada uno de los elementos del modelamiento, esto es, subcuencas, cauces de ríos y uniones.

Los parámetros físicos necesarios de cada subcuenca para calcular el volumen de flujo superficial y el hidrograma de avenidas, mediante el modelo de pérdida de agua Curva Número (SCS Curve Number) y el modelo de transformación de Clark, son mostrados en el [Cuadro N°17 del anexo VI](#); en el cual se consideró el coeficiente de almacenamiento igual a 1.5 veces el tiempo de concentración, considerando que el almacenamiento temporal del exceso de precipitación en la cuenca de estudio es significativo por la presencia de bofedales y zonas altiplánicas. En el [Cuadro N°18 del anexo VI](#), se muestran los cálculos del tiempo de concentración.

Los parámetros físicos necesarios de cada tramo de cauce de río para realizar el proceso del tránsito de avenida del flujo superficial, mediante el modelo de la Onda Cinemática (Kinematic wave), son mostrados en el [Cuadro N°19 del anexo VI](#).

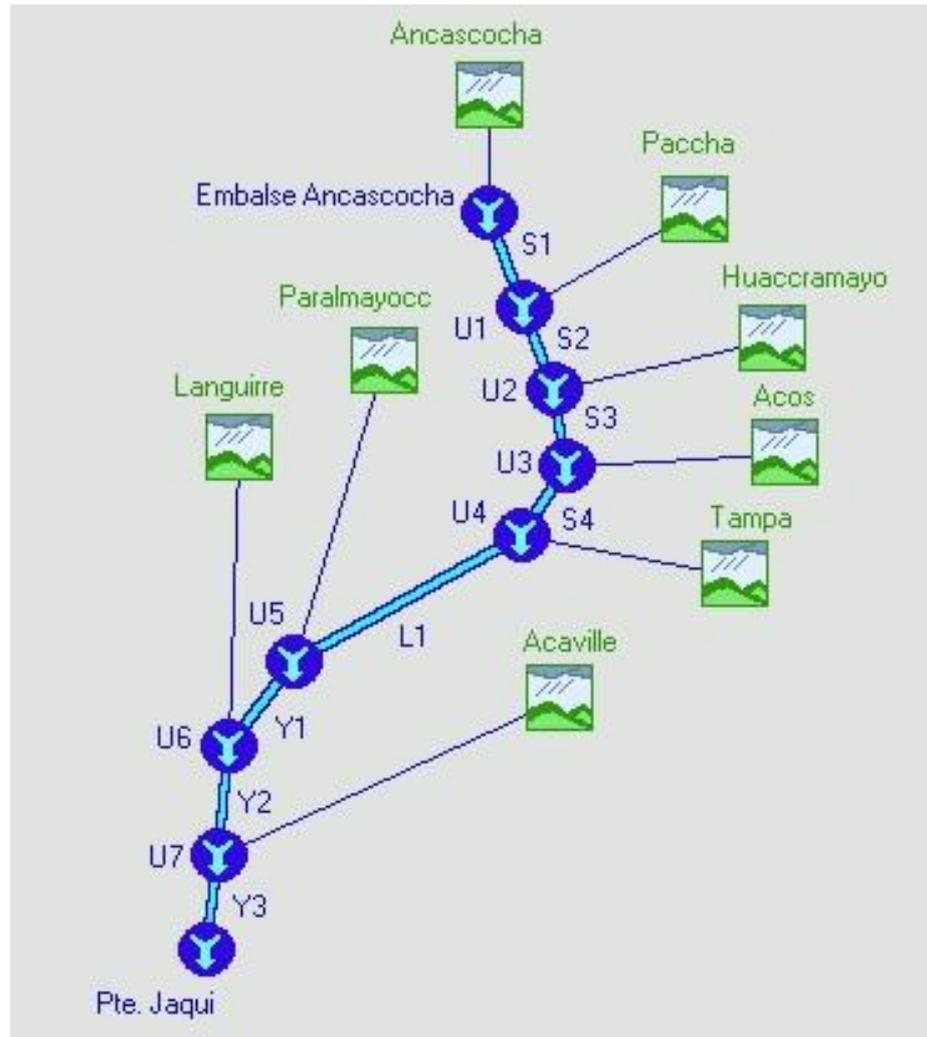


Fig. 10.3 Modelamiento de la cuenca Yauca

En el modelamiento de la cuenca se utilizó algunos parámetro, cuya descripción de los más importantes se presenta a continuación:

- **Curva Numero CN:** Es un número adimensional tal que  $0 \leq CN \leq 100$ . para superficies impermeables y superficies de agua  $CN=100$ ; para superficies naturales  $CN < 100$ .
- **Perdida Inicial:** Cantidad de precipitación para el cual no ocurre escorrentía.
- **Tiempo de Concentración:** Tiempo para el cual toda la lluvia de intensidad constante que cae sobre la cuenca comienza a contribuir en la escorrentía de salida, es decir, es el tiempo de flujo desde el punto más alejado hasta la salida de la cuenca.

### 10.3.2 Modelo Meteorológico

Con el análisis de frecuencia de máximas avenidas, realizado anteriormente, se determinó la precipitación máxima en 24 hrs; para las cinco Estaciones de análisis (Urayhuma, Cecchapampa, Chaviña, Coracora y Carhuanillas) y para diferentes periodos de retorno (2, 10, 50 y 500 años), con ésta información se construyó las isoyetas para cada periodo de retorno mostrado en las [Figs. N°06 al 09 del anexo VI](#), y finalmente se determinó la precipitación máxima en 24 hrs; para diferentes periodos de retorno y para cada subcuenca productora de flujo superficial en época de lluvia, los cálculos son mostrados en los [Cuadros N° 20 al 24 del anexo VI](#). Se consideró que la precipitación máxima ocurre en épocas de lluvias y que cae sobre la cuenca húmeda, es decir en el área superficial sobre la cota 2800 m.s.n.m.

El modelo meteorológico consiste en definir la tormenta de diseño que será utilizada en la simulación de la transformación Precipitación-Escorrentía para cada subcuenca. Para determinar la tormenta de diseño, se utilizó el hietograma Tipo I, presentado por el SCS del Departamento de Agricultura de los US, para cuencas que corresponden a climas marítimos del Pacífico con inviernos húmedos y veranos secos. Las tormentas de diseño para cada periodo de retorno y para subcuenca son presentados en los [Cuadros N°25 al 28 del anexo VI](#). Para el modelo meteorológico de la cuenca, se utilizó el método de Thiesen (User Gage Weighting), considerando que el 100% de la tormenta, hallada anteriormente para cada subcuenca, cae sobre el área total de tal subcuenca, en la [Fig. 14 del anexo VI](#), se muestra un ejemplo de ingreso de datos para el modelo meteorológico.

Los resultados de la ejecución del programa, para los periodos de retorno de 2, 10, 50 y 500 años es presentado en el [Cuadro N°29 del anexo VI](#), y en la [Fig. 15 del anexo VI](#), se presenta un ejemplo de salida reportado por el programa HEC-HMS.

El siguiente cuadro muestra un resumen de los resultados de la ejecución del programa HEC-HMS para periodos de retorno de 2, 10, 50 y 500 años para las diferentes subcuencas de análisis y para la estación de control Puente Jaquí.

Cuadro 10.1 Caudal de máximas avenidas para la cuenca Yauca

Caudal pico (m3/s)				
Elemento hidrológico	Tiempo de Retorno (años)			
	2	10	50	500
Ancascocha	52.93	72.91	96.46	120.83
Paccha	13.54	19.44	25.99	32.73
Huaccramayo	17.92	28.03	39.97	57.05
Acos	34.28	102.67	176.70	287.96
Tampa	66.03	201.83	335.61	525.95
Paralmayocc	34.41	79.89	131.94	218.29
Languirre	6.61	23.36	44.11	80.25
Acaville	16.26	104.88	218.44	393.80
Pte Jaquí	222.34	595.92	1035.50	1687.00

## **XI. ANÁLISIS DE CAPACIDAD y OPERACIÓN DEL EMBALSE ANCASCOCHA**

### **11.1 ANALISIS DE CAPACIDAD DEL EMBALSE ANCASCOCHA**

La capacidad de almacenamiento del embalse Ancascocha se estimó a partir de los caudales mensuales generados, mediante el modelo determinístico-estocástico de Lutz Scholz, para la cuenca Ancascocha (ver el Capítulo VII).

Utilizando ésta información como serie histórica, se empleó el modelo Estocástico Autorregresivo Markov I, para generar 25 series sintéticas de

una longitud de 30 años y, para cada una de ellas se determinó la capacidad de almacenamiento de la cuenca colectora Ancascocha; para la generación de estas series sintéticas se utilizó el programa de computo, SAMS-98 (Stochastic Analysis, Modeling, and Simulation).

Una vez determinado la capacidad de almacenamiento tanto de la serie histórica, así como para las 25 series generadas, se estima la capacidad de almacenamiento del embalse Ancascocha para una probabilidad de ser llenado del 75% en la curva Wuibull. Estos cálculos son presentados en los [Cuadros del Anexo VII](#). Obteniéndose una capacidad de almacenamiento del embalse Ancascocha de 84.0 MMC, como se puede corroborar en la [Fig. 1 del anexo VII](#).

## **11.2 OPERACIÓN DEL EMBALSE ANCASCOCHA**

La represa Ancascocha tiene una altura máxima de aproximadamente 15.5 m., cuenta con una cuenca colectora de 268.08 km<sup>2</sup>., se halla situada a una altura de 3,450 m.s.n.m. y a 5 Km. en línea recta de la localidad de Chaviña, en la provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho ([ver el Plano N°02 del anexo VIII](#)).

No se ha podido obtener cifras del volumen embalsado anualmente, debido a que el reservorio no dispone de una estructura de medición; sin embargo, de acuerdo al levantamiento topográfico y batimétrico de la laguna Ancascocha, realizado por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos UGRH – HUARAZ, en Diciembre del 2003, se estima que almacena un volumen útil de 19.04 MMC; por lo que, considerando la gran extensión de la cuenca colectora y su rendimiento, se puede afirmar que el actual embalse alcanza con facilidad su volumen máximo.

En cuanto a su funcionamiento, se puede manifestar que el embalse Ancascocha satisface los requerimientos hídricos de las comisiones de

regantes de Chaviña y Aycará del sector de riego Coracora y de las comisiones de regantes del sector de riego Yauca, salvo la de la comisión de regantes de Lampalla, el cual satisface sus requerimientos de agua con el flujo base del río Yauca. las aguas son almacenadas en los meses de lluvia y son descargadas durante los meses de Agosto a Diciembre de todos los años, abriéndose las compuertas durante 8 a 10 días de cada mes, según programas de utilización establecidos por la Administración Técnica del Distrito de Riego Acarí-Yauca-Puquio.

## **XII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **12.1 CONCLUSIONES**

Los resultados del presente estudio muestran lo siguiente:

- La Administración Técnica del Distrito de Riego no dispone de un padrón de usuarios a nivel de la cuenca, es decir, no cuenta con información real del área bajo riego de las comisiones de regantes, principalmente del sector de riego Coracora, por lo que, se trabajó con información obtenida en visita de campo, sin embargo, puesto que el estudio no contempla partidas específicas para dicho trabajo, se determinó áreas agrícolas a un nivel de detalle muy preliminar, lo que introduce cierta incertidumbre en los cálculos de la demanda de agua agrícola.
- La demanda agrícola del sector de riego Coracora y Yauca es de 155.90 MMC/año y 103.51 MMC/año, respectivamente; y la demanda poblacional es de 0.92 MMC/año y 0.18 MMC/año, respectivamente, el cual es mostrado en los [Cuadros N°18 y 19 del anexo V](#).
- Las comisiones de regantes del sector de riego Coracora, satisfacen sus requerimientos de agua, demanda agrícola y poblacional, principalmente con afloramientos de agua (manantiales), puesto que estos manantiales disponen de caudales muy pequeños ([ver Cuadro](#)

N°21 del anexo V, y el Estudio de Inventario de Fuentes de Aguas Superficiales), se determinó que estas comisiones de regantes siempre están en déficit de agua a nivel anual, sin embargo, se puede observar que algunos meses de épocas de avenidas, principalmente Marzo, la demanda es equilibrada con la oferta de agua. (ver Cuadro N°20 del anexo V).

- Los cálculos del balance hídrico del embalse Ancascocha, se realizó con la información obtenida del estudio de levantamiento topográfico y batimétrico de la laguna Ancascocha, realizado por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos UGRH – HUARAZ, en Diciembre del 2003. Volumen máximo = 39.96 MMC, Volumen útil = 19.04 MMC y Volumen muerto = 20.04 MMC.
- De acuerdo al análisis del balance hídrico del embalse Ancascocha, realizado para un periodo de 38 años, se verifica que, tanto las comisiones de regantes Chaviña y Aycará del sector de riego Coracora y las comisiones de regantes del sector de riego Yauca, tienen déficit de agua durante los meses de Octubre-Diciembre y Septiembre-Diciembre, respectivamente, prácticamente durante los 38 años de análisis, salvo algunos pocos años que manifiestan déficit desde Agosto hasta, inclusive, Enero; el cual se puede observar en el Cuadro N°25 del anexo V. sin embargo, cabe señalar que la comisión de regantes de Chaviña no permitió realizar el Inventario de sus fuentes de agua, considerándose presumiblemente, que disponen de una cierta cantidad de afloramientos de agua (manantiales), que no se tomaron en cuenta en el balance hídrico.
- La oferta de agua de la cuenca colectora Ancascocha es de 3.40 m<sup>3</sup>/s, como promedio anual, y tiene un caudal específico de 12.68 lt/s/km<sup>2</sup>; tal como se puede observar en el Cuadro N°03 del anexo V.
- La oferta de agua de la cuenca Yauca, a la altura de la estación Puente Jaquí, es de 8.83 m<sup>3</sup>/s, como promedio anual, y tiene un

caudal específico de 2.05 lt/s/km<sup>2</sup>; tal como como se puede observar en el [Cuadro N°02 del anexo V](#).

## 12.2 RECOMENDACIONES

- Puesto que la medición del flujo del río Yauca, es realizado en la estación de control Puente Jaqui, en el que no se cuenta con el más mínimo equipo de medición; se recomienda realizar las gestiones necesarias que permita la instalación de una estación de aforos en el lugar denominado Puente Jaqui.
- Se verificó que todas las estaciones pluviométricas ubicadas dentro de la cuenca del río Yauca, se encuentran paralizadas, en el mejor de los casos desde el año 1984, y siendo indispensable la información pluviométrica para la cuantificación del flujo, se recomienda realizar las gestiones necesarias con el SENAMHI, para poner en funcionamiento las estaciones paralizadas, así como incorporar algunas estaciones pluviométricas, principalmente en la cuenca colectora del embalse Ancascocha y en la cuenca del río Huaccramayo.
- El embalse Ancascocha actualmente trabaja a su máxima capacidad, de acuerdo al Estudio Batimétrico anteriormente mencionado, almacena un volumen máximo de 39.96 MMC, sin embargo, de acuerdo al análisis de capacidad de embalse se determinó que la cuenca colectora de Ancascocha tiene una capacidad máxima de almacenamiento de 84.0 MMC. Realizando una regulación adecuada de dicho volumen, tranquilamente se podría cubrir los déficit de agua, tanto del sector de riego Coracora como de Yauca.