

BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS TUMBES Y ZARUMILLA

Ing. Héctor Vera Arévalo, Ing^o Julia Acuña A., Ing^o Jorge Yerrén S.,
Dirección General de hidrología y Recursos Hídricos

RESUMEN

El presente estudio sobre el Balance Hídrico Superficial en las cuencas de los ríos Tumbes y Zarumilla, pretende evaluar a nivel multianual la variación espacial y temporal del ciclo hidrológico durante el periodo 1969 – 1999, para lo las estaciones más representativas y se realizó un análisis previo de los datos obtenidos en las referidas estaciones, para agruparlas, verificar su consistencia, extender y completar la información faltante, mediante el empleo del método de doble masa y el análisis de regresión lineal simple.

Debido a la escasa información, las variables climáticas (Temperatura, humedad relativa, horas de sol, viento) se han obtenido en base a análisis regionales, para lo cual fue necesario elaborar gradientes mensuales que correlacionan con ajustes significativos, el valor mensual de la variable con la altura, a partir de los cuales se ha generado la información en diversos puntos de la cuenca en donde no se tiene. Para la obtención de la evapotranspiración de referencia se ha utilizado el modelo Crop Evapotranspiration (FAO-56, 1998), desarrollado por la FAO mediante la aplicación del método de Penman-Monteith, el cual está basado en la determinación de los balances de energía y el balance aerodinámico.

Conocidos los valores de precipitación y evapotranspiración, se determinaron los valores mensuales del escurrimiento superficial, mediante la aplicación de la ecuación del balance hídrico. A nivel multianual en el río Tumbes hasta El Tigre presenta una precipitación media areal de 711,7 mm y una evapotranspiración media areal de 1 325,0 mm, lo que significa un déficit de 298,2 mm. En el río Zarumilla hasta La Palma, se presenta una precipitación media de 1 001,0 mm y la evapotranspiración es 1 325,0 mm, lo que representa un déficit de 324,0 mm.

Con los caudales medidos en la estación El Tigre, y bajo las condiciones actuales y naturales, el río Tumbes satisface holgadamente las demandas existentes en la cuenca, sin embargo en la cuenca del río Zarumilla hasta la estación La Palma existe un déficit del recurso hídrico.

SUMMARY

The present study on Surface Water Balance in the basins of the Tumbes and Zarumilla rivers, intends to evaluate at a multiannual level, the spatial and temporal variation of the hydrologic cycle during the 1969-1999 period. For this purpose, there were selected the most representative stations and a previous analysis of the stations data was made in order to group them and to verify their consistency, to extend and complete the missing information, by means of statistical techniques and methods, that allows us to identify time series breaks and gaps. The Double mass method and its extension, was used, to check the consistency, using the simple linear regression analysis.

Due to the scarce information, the climate variables (temperature, relative humidity, sun hours, wind) have been obtained based on regional analysis, for which, monthly gradients have been necessary to elaborate, that correlates with significant adjustments the monthly value of the variable with the height, obtaining. In this way, the missing information for different places in the basin, was generated. To obtain the referential evapotranspiration the Crop Evapotranspiration model was used (FAO-56, 1998), developed by FAO applying the Penman-Monteith method, which is based on the determination of the energy balances and aerodynamic balance.

Once the precipitation and evapotranspiration values are known, the surface runoff monthly values were determined, applying the water balance equation. At a multiannual level, in the Tumbes river up to El Tigre, there is a mean areal precipitation of 711,7mm and a mean areal evapotranspiration of 1325,0mm which means that there is a deficit of 298,2 mm. In the Zarumilla river up to La Palma river, there is a mean precipitation of 1001,0 mm and the evapotranspiration is 1325,0 mm which represents a deficit of 324,0mm.

With the water volume measured in the El Tigre station, and under the natural current conditions, the Tumbes river meets the existing demands in the basin, however in the Zarumilla river basin up to La Plama station there is a water resource deficit.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos dos decenios, se ha expresado una preocupación creciente por el aumento cada vez mayor de la demanda de este limitado recurso, en los diversos sectores socioeconómicos.

El ciclo hidrológico gobierna caprichosamente la presencia del agua, que es decidida en cada momento por la latitud, altura, vegetación, orografía, temperatura y la influencia de los océanos, así como por el tiempo y las actividades humanas. Pero cuando la disponibilidad del agua es discontinua o intermitente o cuando su exceso es causa de desastres por inundaciones y avenidas, deslizamientos de terreno, huaycos y sequías, entonces es necesario contar con esquemas de evaluación de los recursos hídricos adecuados y fiables para hacer frente a estos desafíos.

Con la finalidad de poder responder a la creciente demanda actual y futura de información sobre el agua y los conocimientos necesarios para el desarrollo sostenible, es indispensable conocer el comportamiento de las diversas variables que intervienen en el ciclo hidrológico (Precipitación, Evapotranspiración, Caudal) a través del **Balance hídrico superficial**.

El Balance Hídrico es también de gran utilidad en muchos campos de la investigación. Por ejemplo el conocimiento del déficit de humedad es primordial para comprender la factibilidad de irrigación, ya que provee información sobre el volumen total de agua necesaria en cualquier época del año y entrega un valor importante sobre la sequedad. La información sobre los excedentes de agua y la cantidad por la cual la precipitación excede las necesidades de humedad cuando el suelo está en su capacidad de campo, es fundamental en todo estudio hidrológico, lo cual nos conllevaría a una adecuada planificación y gestión de los recursos hídricos, de tal forma que el desarrollo socioeconómico tenga como base el uso racional y armónico de sus recursos naturales.

II. OBJETIVOS

- ✍ Proporcionar un documento que contenga información de los recursos hídricos superficiales de la cuenca del río Tumbes y Zarumilla, que sirva como base para la planificación óptima de este recurso.
- ✍ Estimar la disponibilidad neta mensual del recurso hídrico en la cuenca del río Tumbes y Zarumilla a través del Balance Hídrico Superficial.

III. ZONA DE ESTUDIO

3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CUENCAS

3.1.1. Cuenca del río Tumbes

Políticamente, la parte peruana de la cuenca del río Tumbes forma parte de los distritos de Tumbes, San Juan de la Virgen, Pampas de Hospital, San Jacinto, La Cruz y Corrales de la provincia y departamento de Tumbes; limita por el Norte con el océano Pacífico y la cuenca del río Zarumilla, al Sur con la quebrada Bocapán y la cuenca del río Chira, al Este con las cuencas de los ríos Zarumilla y Chira y al oeste con el océano Pacífico y la quebrada Bocapán.

La cuenca del río Tumbes total de 1 893,4 km² con alturas que van hasta los 885 msnm. Geográficamente, sus puntos extremos de la cuenca se hallan comprendidos entre los 03° 30' y 04° 15' de Latitud Sur y los 80° 07' y 80°40' de Longitud Oeste. En el valle destacan cultivos de plátano y arroz, y en menor escala maíz amarillo duro, mango, soya y frejol.

El clima en la cuenca peruana del río Tumbes, varía desde el clima desértico en la zona costera al semiárido de las zonas montañosas en la parte fronteriza, y está influenciado por la zona de convergencia intertropical (ZCIT) además de la interacción de las corrientes marinas de El Niño y de Humboldt.

El río Tumbes nace en las cordilleras del Zaruma en los andes occidentales del Ecuador, formado por los afluentes de los ríos Amarillo y Calera. En el hito Cazaderos - Tumbes se unen el río Puyango y la quebrada Cazaderos, ingresando a territorio peruano como un solo curso de agua que toma el nombre de río Tumbes, el cual recorre predominantemente en dirección Este - Oeste, unos 130 km, hasta desembocar en el Océano Pacífico donde forma un delta.

Los caudales del río Tumbes son conocidos en la parte peruana solamente en la estación hidrométrica El Tigre. En territorio peruano su longitud aproximada es de 142,1 km, sus aguas normalmente llegan hasta el mar, y en los meses de agosto y setiembre alcanzan sus caudales más bajos, debido a la disminución significativa de sus precipitaciones; y al uso intensivo del recurso hídrico con fines agropecuarios, principalmente.

2.1.2 Cuenca del río Zarumilla

Políticamente, la parte peruana de la cuenca del río Zarumilla forma parte de los distritos de Zarumilla, Papayal, Matapalo y Aguas Verdes de la provincia de Zarumilla del departamento de Tumbes; limita por el este con el Ecuador, al oeste con la cuenca del río Tumbes, al norte con el océano Pacífico, y al sur con la cuenca del río Tumbes, y La superficie total de la cuenca abarca un área de 731,2 km².

La cuenca del río Zarumilla se extiende desde el océano Pacífico hasta los 850 msnm. Geográficamente, sus puntos extremos de la cuenca se hallan comprendidos entre los 03° 24' y 03° 53' de Latitud Sur y los 80° 09' y 80°23' de Longitud Oeste. En el valle los principales cultivos son plátano y arroz y, en menor escala se cultiva maíz amarillo duro, limón, soya y fréjol.

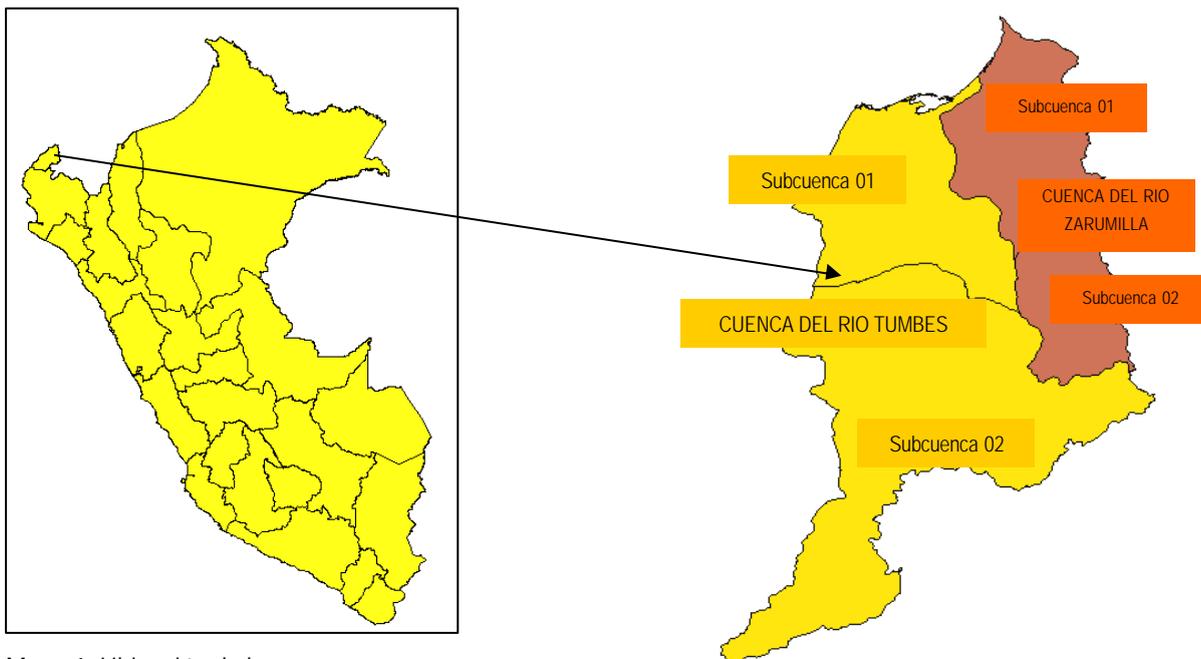
El clima en la cuenca peruana del río Zarumilla, varía desde el clima desértico en la zona costera al semiárido de las zonas montañosas en la parte fronteriza, y está influenciado por la zona de convergencia intertropical (ZCIT) además de la interacción de las corrientes marinas de El Niño y de Humboldt.

Tiene su origen en las serranías del Ecuador, y en su recorrido de 62,6 kms en territorio peruano, su cauce constituye el límite entre Perú y Ecuador. Varía notablemente el caudal de sus aguas a lo largo de todo el año, aumentando su volumen en las épocas de grandes precipitaciones pluviales. A partir del mes de Mayo el río se seca en su parte baja.

IV. REQUERIMIENTO DE INFORMACIÓN

Para el estudio se utilizaron datos de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad de viento, horas de sol y caudal obtenida del Banco Nacional de Datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), la cual fue seleccionada, procesada, analizada y consistenciada, llegándose a obtener 24 estaciones localizadas en las cuencas de los ríos Tumbes, Zarumilla y cuencas vecinas, tal como se muestra en el Mapa 2.

El período de análisis corresponde al comprendido entre los años 1969 - 1999



Mapa 1: Ubicación de las cuencas

V. METODOLOGÍA

A) Análisis de precipitación

Precipitación es todo tipo de humedad que cae de la atmósfera a la superficie de la tierra, ya sea en forma de lluvia, granizo, pedrisco, nieve, etc. Los factores que determinan el desigual reparto de las precipitaciones son múltiples y complejos, desde los de ámbito general hasta los regionales o locales.

Los **factores regionales** o locales determinan aspectos tales como la mayor humedad de las zonas costeras y la mayor frecuencia de lluvias en las barreras montañosas, en especial en su vertiente orientada al mar. Este parámetro se puede considerar como el más importante que interviene en el balance hídrico y la exactitud en su medición y su evaluación es determinante en el resultado.

- **Análisis de consistencia de datos:** Los datos pluviométricos a nivel mensual, se procesaron con el fin de determinar su confiabilidad y consistencia, la que comprende la elaboración de tablas con valores promedios a nivel mensual y anual, la construcción de histogramas, curvas de doble masa y pruebas estadísticas, con el fin de identificar y si es necesario cuantificar inconsistencias, saltos o tendencias de los datos.

Para el estudio se utilizó el método de **doble masa**, empleándose el siguiente procedimiento:

- ↴ Se seleccionó el período común de información del grupo de estaciones utilizadas en el estudio.
- ↴ Se determinó la precipitación anual para cada estación; para los datos faltantes a nivel mensual, se procedió a reemplazar temporalmente por los promedios mensuales de la serie, hasta máximo 6 datos faltantes.
- ↴ Los valores anuales son acumulados en orden cronológico, a partir del año más antiguo (1969) hasta el más reciente (1999).
- ↴ Se grafica cada uno de los valores de las precipitaciones acumuladas de cada estación con el promedio acumulado de ellas, para determinar la estación patrón en cada grupo.
- ↴ Si los puntos ploteados presentan una sola tendencia, es decir si se puede trazar por ellos una recta sin quiebres, significa que la estadística es consistente.
- ↴ Si los puntos presentan quiebres o mucha dispersión, la estadística no es consistente y se procede a su corrección o eliminación del análisis.
- ↴ Las estaciones cuyas precipitaciones registren diferentes pendientes (quiebres), serán ajustadas mediante la multiplicación de esos valores por un factor de corrección cuya expresión matemática es:

$$\frac{m_2}{m_1}$$

Donde:

- m_1 ? Factor de corrección
- m_2 ? Pendiente de la recta del período más antiguo
- m_1 ? Pendiente de la recta del período más reciente

La expresión se utiliza para corregir los valores inconsistentes del período más antiguo, y si requiere corregir el período más reciente la relación entre pendientes se invierte.

A cada uno de los períodos seleccionados, de acuerdo al quiebre de la información, se ajusta a una ecuación de regresión lineal del tipo:

$$Y = mX + b$$

$$Y = mX$$

Donde:

- Y ? Variable dependiente
- X ? Variable independiente
- m ? Pendiente de la recta a determinarse
- b ? Constante a determinarse

- **Completar y/o utilizar información para su extensión:** Comprobada la consistencia del registro, es necesario completar los datos faltantes por medio de métodos estadísticos – matemáticos. Dentro de los métodos estadísticos utilizados en el presente fueron los modelos de regresión lineal simple y múltiple.

Análisis de regresión lineal simple (RLS) consiste en graficar el diagrama de dispersión, ajustar una recta a ese diagrama de dispersión, esta recta es llamada línea de regresión se usa para completar y extender la información faltante.

- **Determinación del gradiente pluviométrico:** Debido a la escasa cantidad de estaciones que registren o midan la precipitación en estas cuencas fue necesario determinar un **gradiente pluviométrico**, que es un indicador de gran importancia que permite tener una idea de la variación de la precipitación en relación con la altitud.

Para la obtención del gradiente se toma en consideración los módulos de la precipitación total media, máxima y mínima de las estaciones que se ubican dentro y alrededor de la zona de estudio y su correlación con la posición altitudinal de cada una de ellas.

- **Estimación de la precipitación a nivel mensual y areal:** Analizada la información anual de la serie histórica, se procede a completar los valores mensuales faltantes en la serie, los cuales se generaron en base a pesos porcentuales de cada uno de los meses en cada estación.

La precipitación media areal se puede estimar por los métodos: Media aritmética; Polígono de Thiessen y de Isoyetas, en el estudio se utilizará el de Isoyetas.

Obtenidos los valores puntuales de precipitación, se procedió a plotear en un mapa las estaciones y sus cantidades de lluvia, luego se interpola para obtener isoyetas de igual valor pluviométrico.

La precipitación promedio sobre un área determinada se evalúa ponderando la precipitación entre isoyetas sucesivas por el área entre isoyetas, relación que se expresa por la siguiente expresión:

$$P_m = \frac{\sum AP}{A_T}$$

Donde:

P_m = Precipitación media de la cuenca
 AP = área parcial entre isoyetas
 A_T = área total de la cuenca

Para la interpolación de los valores puntuales se realizó con la ayuda del software Surfer 7.0.

B) Análisis de temperatura

Esta variable se analizará a nivel anual y mensual, considerando los valores mínimos, máximos y medios, para las cuencas de los ríos: Tumbes y Zarumilla

La información seleccionada, corresponde a las estaciones Climatológicas Ordinarias ubicadas dentro de la zona de estudio y de estaciones de apoyo ubicadas en cuencas vecinas (Tabla 1). Con dicha información, se realizó el análisis regional de esta variable con el fin de conocer el comportamiento y distribución espacial y temporal.

- **Estimación del gradiente térmico:** la temperatura varía en función a la altitud, consideramos conveniente determinar los gradientes térmico a nivel medio, mínimo y máximo (ver Tabla 1), en las cuencas de estudio, con el fin de conocer el comportamiento y distribución en función de la altitud, y poder estimar valores de temperatura en puntos en la cual no se tiene registro.
- **Determinación de la temperatura a nivel mensual:** Analizada la información a nivel mensual y anual, se pasó a completar la serie de datos mensuales, para lo cual se procedió de la misma forma que en el análisis de la precipitación, determinándose los diferentes factores de corrección, mediante los cuales se determinarán los valores de las temperaturas medias mensuales para cada una de las estaciones.

C) Análisis de humedad relativa, viento y horas de sol

Variabes que se analiza a nivel regional, con información de las estaciones que se ubican en las cuencas los ríos Piura, Chira Tumbes y Zarumilla. Con información histórica de humedad relativa media a nivel mensual, velocidad media de viento mensual y Horas de sol, de las estaciones seleccionadas (Tabla 1), se realizaron análisis estadísticos

que nos permitieron conocer las características, distribución y comportamiento de estos parámetros en forma espacial y temporal, así como también la determinación del gradiente.

D) Estimación de la evapotranspiración

La determinación de esta variable, puede ser realizada mediante la aplicación de fórmulas empíricas, desarrolladas por diferentes investigadores que deseando encontrar la forma práctica de describir conceptualmente cada una de las variables que inciden en forma directa en la pérdida de agua. En nuestro caso se utilizara el método de Penman – Monteith.

➤ **Penman – Monteith:** utilizaremos el modelo Crop Evapotranspiration (FAO-56, 1998), desarrollado por la FAO mediante la aplicación del método de Penman-Monteith, el cual esta basado en la determinación de los balances de energía y el balance aerodinámico, cuya expresión final es:

$$E_t = \frac{0.408 \cdot R_n + G + \frac{900}{273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{0.34 \cdot U_2 + E_t}$$

Donde:

E_t	≙	Evapotranspiración [mm/días],
R_n	≙	Radiación neta en la superficie [MJ/(m ² *día)]
G	≙	Densidad de flujo de calor del suelo [MJ/(m ² *día)],
T_a	≙	Temperatura media del aire a 2 metros del suelo [°C],
U_2	≙	Velocidad de viento a 2 metros sobre el suelo [m/s],
e_s	≙	Presión de vapor de saturación [kPa],
e_a	≙	Presión de vapor actual [kPa],
$e_s - e_a$	≙	Déficit de presión de vapor de saturación [kPa],
γ	≙	Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa / °C],
γ	≙	Constante psicrométrica [kPa / °C].

Para la determinación de la evapotranspiración potencial, se utilizará la expresión siguiente:

$$ETP = K_c \cdot E_{To}$$

Donde:

ETP	≙	Evapotranspiración potencial
K_c	≙	Coefficiente de cultivo
E_{To}	≙	Evapotranspiración de referencia

El coeficiente de cultivo, k_c , es básicamente la relación de transformación del cultivo E_{Tc} a la referencia E_{To} , y representa una integración de los efectos de cuatro características primarias que distinguen el cultivo de la hierba de referencia. Estas características son: Altura del cultivo; Albedo (reflexión), Resistencia del pabellón (dosel); Evaporación del suelo.

Los factores que influyen en la determinación del coeficiente de cultivo (K_c), son el tipo de cultivo, clima, evaporación del suelo, etapas de crecimiento del cultivo (etapa inicial, desarrollo del cultivo, desarrollo completo del cultivo y etapa final). Los valores de K_c aumentan a medida que lo hace la superficie foliar, alcanzando los valores máximos cuando la cobertura alcanza el 60-80%. A medida que el cultivo avanza en su ciclo fisiológico y empieza la senescencia foliar, los valores de K_c decrecen hasta alcanzar sus valores mínimos cuando apenas quedan hojas verdes; en función a estos factores, se han seleccionado para los diferentes tipos de cultivos que existen en las cuencas estudiadas y se ha considerado para las 3 etapas de desarrollo.

TABLA 1: ESTACIONES CON VARIABLES CLIMATICAS

Estación	Altitud msnm	Latitud S	Longitud W	Temperatura °C (1969/ 1999)			H.R %	Viento m/s	Horas Sol Horas/mes
				Media	Mínima	Máxima			
Ayabaca	2700	-4.634	-79.72	13,3	9,3	17,5		1.6	172,0
Cañaverall	145	-3.934	-80.65	25,8	21,1	31,6	74,4	3.0	
Chilaco	90	-4.7	-80.5	24,8	19,3	31,5	68,9	3.0	200,4
Chulucanas	95	5.14	80.416	25,2	18,7	32,1		2.0	166,5
Chusis	18	5.31	80.5	23,4	19,3	28,7	73,6	3.1	
El Alto	195	-4.273	-81.22	22,2	17,8	27,7		3.2	
El Salto	13	-3.434	-80.32	24,8	21,6	27,8	82,7	2.4	
Huarmaca	2180	5.34	79.31	14,8	12,0	19,3	71,4	0.4	140,4
Huancabamba	3196	5.15	79.33	18,2	12,4	21,1	76,8	3.2	
La Esperanza	36	-4.917	-81.07	23,1	19,5	28,2		4.2	224,0
Los Cedros	100	-3.634	-80.53	24,6	21,7	28,4		2.5	158,7
Mallares	45	-4.85	-80.73	24,5	19,5	31,0	67,9	2.9	202,1
Miraflores	30	5.1	80.37	24,2	19,3	30,7			203,6
Montegrande	28	5.21	80.42	23,7	19,0	29,6		3.7	
Morropon	140	-5.184	-79.98	25,0	18,8	31,6	68,9	2.0	163,1
Paíta	70	-5.117	-81.13	23,5	19,2	28,6	75,4	5.1	
Papayal	60	-3.567	-80.23	25,4	21,3	30,3		2.3	
Pte.Internacional/La Tina	408	-4.384	-79.95	24,7	18,5	31,1	70,1	2.2	169,9
Pto. Pizarro	1	-3.5	-80.47	25,3	21,9	29,2	81,5	1.5	
Rica Playa	100	-3.8	-80.45	26,2	21,3	32,4	72,8	3.0	
San Miguel	29	5.14	80.41	23,8	18,8	30,1	73,2	4.9	202,5
Sausal de Culucan	1000	-4.75	-79.77	22,5	17,0	28,1		5.1	
Talara	50	-4.567	-81.27	22,4	19,1	28,0		7.9	
Tejedores	260	4.45	80.14	24,6	19,0	31,2			194,1
Tumbes	30	-3.55	-80.38	25,1	21,4	29,4		3.5	
Zarumilla	21	-3.5	-80.28	25,6	21,9	29,6	80,0	2.8	
Olmos	167	-5.983	-79.72	24,3	18,3	31,2	74,0	2.9	163,7
Zorritos/Los Pinos	1	-3.684	-80.67	24,9	-	28,0			
Arenales	3010	-4.917	-79.85	10,8	9,7	14,7	88,9	4,8	177,5

E) Análisis del caudal y determinación de la escorrentía



Caudal: Para el aprovechamiento del recurso hídrico, es necesario conocer en un punto dado o en la salida de la cuenca, el caudal disponible a partir de las precipitaciones. El problema es aparentemente simple, pero no es así para ello se han ideado una serie de metodologías que van desde las más simples a las más complejas, como: isolinneas de escorrentía, caudales específicos, generación por modelos de simulación precipitación – escorrentía, etc.

En la cuenca se tiene información en las estaciones HLG Canal Internacional y HLG La Palma, HLG El Tigre, las dos primeras operaron entre 1957 y 1986, la última tiene un record desde 1969 a la fecha; El consistenciado de la información se realizará con las pruebas t-Student y f – Fisher.

Para el análisis y estimación de caudales en las subcuencas se ha tenido en cuenta la ecuación a, la cual se considera como la más adecuada, ya que no solo relaciona área y caudal sino que también relaciona el aporte pluviométrico de las cuencas:

$$Q_x = \frac{A_x * P_x * Q}{A * P} \quad (a)$$

Donde:

- Q_x = Caudal a estimar subcuenca en m^3/s
- A_x = Área de la subcuenca en Km^2
- P_x = Precipitación espacial sobre la subcuenca en mm
- Q = Caudal del río (estación de aforo) en m^3/s .
- A = Área de la cuenca
- P = Precipitación espacial sobre la cuenca.

- **Escorrentía:** Para el cálculo de la escorrentía anual (mm) se utiliza la expresión matemática que relaciona el caudal y el área de drenaje. Su fórmula es:

$$E = \frac{31,536 * Q}{A}$$

Donde:

E	=	Escorrentía en mm
Q	=	Caudal en m ³ /s
A	=	Área de drenaje km ²

F) Balance hídrico

El Balance Hídrico Superficial de las cuencas de los ríos Tumbes y Zarumilla, se realizó a una escala temporal mensual, que relaciona las variables siguientes:

P	?	Precipitación en mm.,
ET	?	Evapotranspiración en mm.,
Esc	?	Representa la salida superficial de la cuenca o aportaciones de la Red Fluvial, en mm.,
$?S$?	Cambio de almacenamiento en mm.

Como el balance hídrico superficial se realizó a nivel mensual multianual, el término correspondiente al cambio de almacenamiento (S) se considera que toma el valor de 0, debido a que la variabilidad del agua almacenada en la cuenca en períodos largos no experimenta cambios significativos.

Finalmente nuestra expresión algebraica queda expresada por:

$$Esc_i = P - ET$$

- **BHS en áreas con control hidrométrico:** Para este caso se utiliza la siguiente expresión:

$$P = E + ETR + \Delta$$

Donde:

P	=	Precipitación media del período y área en mm
E	=	Escorrentía del período y área en mm
ETR	=	Evapotranspiración real media del período y área en mm
Δ	=	Término de discrepancia

- **BHS en áreas sin control hidrométrico:** El Balance hídrico en estas áreas es determinado mediante la siguiente ecuación.

$$E = P - ETR$$

VI. RESULTADOS

En gabinete, se realizó el procesamiento automático de la información de precipitación, temperatura, viento, horas de sol, humedad relativa y caudales medios mensuales de las cuencas, con el fin de caracterizar el régimen hidrológico y meteorológico de la cuenca, para ello se usó el período comprendido entre 1969 y 1999, que abarca un total de 31 años.

Con el fin de conocer si los datos de precipitación mensual recopilados en cada una de las estaciones, son consistentes y representativos de la zona, se realizó un análisis de consistencia, para lo cual se agruparon las estaciones en siete grupos de trabajo teniendo en cuenta su altitud y distribución espacial y temporal; como resultado de este análisis se tuvo que corregir la información de aquellas estaciones que presentaron saltos y quiebres, lo cual

nos permitió uniformizar el período de información (1969 – 1999) y caracterizar la zona de estudio de la manera siguiente:

- ↴ La distribución de la precipitación en las cuencas, a nivel medio mensual registra un comportamiento variable con valores que fluctúan entre 0,0 mm y 400 mm; siendo febrero el mes más lluvioso, donde se registra el 30% de la precipitación total anual. La distribución anual de la precipitación se muestra en el Mapa 3
- ↴ El período lluvioso se inicia en el mes de noviembre y termina en abril del año siguiente; siendo en este período donde se produce el 75% de la precipitación total del año, entre mayo y octubre se ocurre el 35% de la precipitación acumulada anual, siendo setiembre el mes más seco, donde se registra el 0,0% de la precipitación anual.
- ↴ La zona de mayor precipitación, esta ubicada agua arriba de la estación El Tigre (Subcuenca 02), donde la precipitación areal anual es de 711,7 mm.
- ↴ Para tumbes, la precipitación media áreal para la cuenca total es de 1 015,3 mm y para Zarumilla es de 711,1 mm.
- ↴ La precipitación mínima, varía de 0,0 mm a 20 mm, siendo febrero, y marzo los meses donde se presentan los mayores valores de este parámetro. En el período junio – setiembre, se presentan los menores valores de esta variable, siendo julio y agosto los mas secos del año.
- ↴ La precipitación máxima anual varía entre 800 a 2 500 mm, siendo marzo donde ocurren los mayores valores y en la zona de frontera (subcuenca 01) en este mes, los valores fluctúan entre 900 mm a 1 300 mm.
- ↴ Los menores valores de precipitación máxima areal, se presenta en la subcuenca 01, con valores de cero en los meses más secos del año (Julio y agosto).

El análisis de la variable temperatura, permitió conocer su distribución espacial y temporal, que tiene un comportamiento variable, el cual se cuantifica de la siguiente manera:

- ↴ La temperatura media registra en marzo las mayores temperaturas, con valores que fluctúan entre 26,0° C y 28,0° y el más frío en agosto con 23,0°C y 26,0°C.
- ↴ La temperatura mínima presenta durante julio y agosto las menores temperaturas que oscilan entre 12,0°C y 15°C y las mayores durante febrero y marzo con 20,0°C y 23,0°C.
- ↴ La temperatura máxima registra durante el mes de marzo las mayores temperaturas que oscilan entre 30,0°C y 35,0°C, y las menores en julio y agosto con valores que fluctúan entre 24,0°C y 27,0°C.

Al analizar la variable de humedad relativa, se ha encontrado que:

- ↴ A nivel medio, esta variable registra un comportamiento uniforme en su distribución espacial y temporal, registrando en el período junio - octubre los mayores valores que oscilan entre 75% y 86%, mientras que entre noviembre y enero ocurren los menores valores con 71% y 83%.

La variable de velocidad de viento, tiene las siguientes características:

- ↴ La distribución eólica en la cuenca, experimenta un comportamiento variable en su distribución espacial y temporal, teniéndose durante el período setiembre - enero se registran las mayores velocidades de viento, con valores que oscilan entre 3,0 m/s y 6,0 m/s, mientras que en los meses de febrero y marzo, se obtienen las menores velocidades de viento con 2,0 m/s y 4,5 m/s.

Con respecto a la variable de horas de sol, el análisis nos indica lo siguiente:

- ↴ Experimenta un comportamiento variable en la distribución mientras que para las estaciones cercanas al litoral, la mayor cantidad de horas de sol se presenta en el período noviembre – abril y la menor en mayo – octubre, con valores de 130 horas/mes a 225horas/mes; sin embargo en la zona de frontera (Cabo Inga), la mayor cantidad de horas de sol ocurre entre los meses de junio – octubre, con valores de 140 horas/mes a 220 horas/mes mientras que la menor se presenta entre los meses de enero y marzo, con valores de 98 horas mes a 160 horas/mes.

La determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) se realizó mediante la aplicación del método de Penman – Monteith, el cual fue desarrollado y aplicado por la FAO, y utilizado debidamente en los balances hídricos de otras cuencas donde se ha obtenido muy buenos resultados.

Asimismo, para obtener la evapotranspiración de cultivo (ETc) y cuya variabilidad se muestra en el mapa 4, ha sido necesario conocer el valor del coeficiente de cultivo (Kc).

Los mayores valores de ETc, se presentan en el período octubre - abril, a razón de 115,0 mm/mes y los menores son de 100,6 mm/mes que ocurren en el período mayo – setiembre.

El caudal en las subcuencas del río Tumbes, se han obtenido en base a la información de caudales de la estación El Tigre, cuyo modulo medio es de 111,0 m³/s y para Zarumilla en base a la información de la estación La Palma cuyo modulo es de 11,7 m³/s.

Los mayores caudales se presentan en el período febrero – mayo y los menores en el período julio - octubre de cada año A nivel anual las subcuencas 02 de cada cuenca aportan mas al escurrimiento superficial, con 86,9 litros/seg/km² hasta el área de recepción (El Tigre) y 36,7 litros/seg/km². hasta La Palma.

Conocidos los valores de precipitación y evapotranspiración, se determinaron los valores mensuales del escurrimiento superficial, mediante la aplicación de la ecuación del balance hídrico, encontrándose que dicha variable, registra un comportamiento no uniforme, presentando en el mes más lluvioso (febrero) isolíneas con valores que oscilan entre +40 mm y + 160 mm y, en el mes donde ocurren las menores precipitaciones (julio) los valores de las isolíneas fluctúan entre – 100 mm a – 110 mm.

Al analizar los resultados obtenidos, la cuenca hasta El Tigre, se presenta dos características bien definidas; una que ocurre entre mayo y enero, con déficits que varían entre 2,1 mm/mes y 119,2 mm/mes que ocurren en enero y octubre, respectivamente; entre febrero y abril ocurre un superávit con valores que fluctúan 32,2 mm/mes y 151,8 mm/mes.

A nivel multianual la cuenca hasta El Tigre presenta una precipitación media areal de 711,7 mm y una evapotranspiración media areal de 1 325,0 mm, lo que significa un déficit de 298,2 mm.

Considerando que el caudal medio anual en El Tigre de 111,0 m³/s valor que equivale a 2 647,7 mm, lo que significa que en la cuenca del río Tumbes existe un superávit del recurso hídrico.

En Zarumilla a nivel multianual la cuenca presenta una precipitación media areal de 711,1 mm y una evapotranspiración media areal de 1 309,1 mm, lo que significa un déficit de 598,0 mm.

Hasta La Palma, se presenta una precipitación media de 1 001,0 mm y la evapotranspiración es 1 325,0 mm, lo que representa un déficit de 324,0 mm.

Considerando el caudal medio anual en La Palma es de 11,7 m³/s, valor que equivale a 1 098,9 mm, lo que significa que en la cuenca del río Zarumilla existe un déficit de los recursos hídricos.

Hay que considerar que la disponibilidad del recurso hídrico ha sido referida a las aguas superficiales y solo esta referido a la parte peruana de las cuencas no habiéndose considerado los aportes y demandas de las nacientes de la cuenca que se encuentra en territorio ecuatoriano.

Con los valores medidos en la estación El Tigre, y bajo las condiciones actuales y naturales, el río Tumbes satisface holgadamente las demandas hídricas existentes en la cuenca.

Asimismo el Balance a nivel mensual se muestra en la Tabla 2 y el escurrimiento en el mapa 5.

TABLA 4,2, BALANCE HÍDRICO MENSUAL

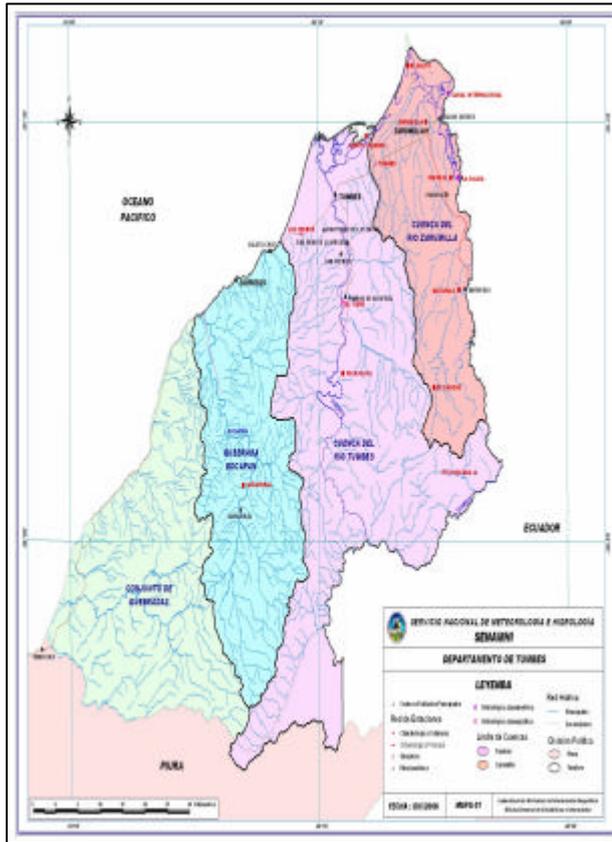
MESES	CUENCA DEL RIO TUMBES			CUENCA DEL RIO ZARUMILLA				
	SUB 01	SUB 02 (EL TIGRE)	CUENCA TOTAL	SUB 01	SUB 02	LA PALMA	CANAL INTER	CUENCA TOTAL
Enero	-56,6	-2,1	-18,6	-47,1	43,7	26,0	22,8	-14,5
Febrero	36,9	151,8	117,1	69,4	230,7	228,6	219,6	139,8
Marzo	-14,3	95,6	62,4	-2,6	137,8	133,7	120,7	58,5
Abril	-31,0	32,2	14,4	-30,2	78,8	76,1	67,0	17,2
Mayo	-84,0	-60,9	-67,9	-82,5	-53,6	-53,6	-56,7	-69,9
Junio	-94,1	-87,0	-89,1	-90,1	-86,7	-86,7	-86,8	-88,6
Julio	-91,7	-101,5	-98,5	-90,8	-102,0	-101,7	-101,0	-95,7
Agosto	-84,4	-97,9	-93,9	-88,9	-92,9	-92,5	-90,7	-90,7
Setiembre	-104,4	-116,0	-112,5	-104,0	-112,5	-112,0	-110,5	-107,7
Octubre	-112,8	-119,2	-117,2	-113,4	-112,2	-111,7	-111,2	-112,9
Noviembre	-104,7	-105,8	-105,4	-99,1	-104,2	-103,3	-103,5	-101,3
Diciembre	-72,7	-82,3	-79,4	-68,2	-75,6	-75,4	-75,1	-71,3

VI. CONCLUSIONES

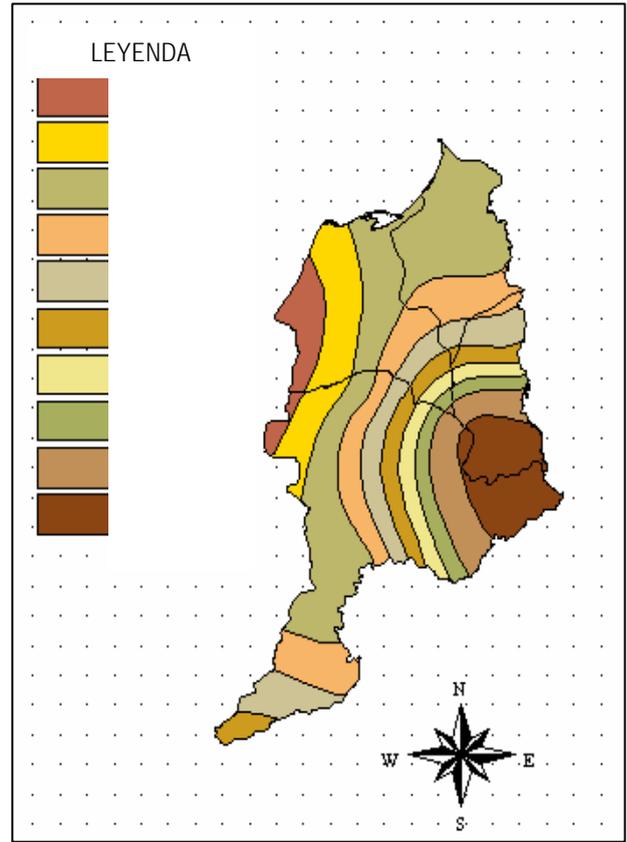
- ↴ Del análisis de precipitación se determinó que el mes más lluvioso es febrero, y en el período julio - octubre ocurren las menores precipitaciones, siendo setiembre el mes más seco de la época.
- ↴ Al analizar los gradientes medios pluviométricos mensuales, se determinó que el régimen de precipitación media, se caracteriza por aumentar con la altitud, en el mes más lluvioso (febrero) la precipitación se incrementa a razón de 29,5 mm/100 m hasta los 500 msnm, entre los 500 y 1 000 msnm, las lluvias crecen a razón de 8,8 mm/100 m y entre los 1 000 y 1 500, las lluvias decrecen a razón de 1,6 mm/100 m y por encima de los 1 500 msnm se incrementan a razón de 6,5 mm/100 m. Y en el mes menos lluvioso (setiembre), las lluvias hasta los 1 600 msnm es de cero.
- ↴ El régimen térmico en las cuencas analizadas, registran un comportamiento variable en su distribución espacial y temporal, registrándose en el mes de Marzo las mayores temperaturas medias, las cuales oscilan entre 28 °C y 26 °C, y las menores temperaturas en el mes de agosto con 23 °C y 26 °C
- ↴ El régimen eólico, se caracteriza por presentar un comportamiento mensual inversamente proporcional a la altitud, es decir que la velocidad del viento disminuye con la altitud. Durante el período setiembre - enero se registran las mayores velocidades de viento, con valores que oscilan entre 3,0 m/s y 6,0 m/s, mientras que en los meses de febrero y marzo, se obtienen las menores velocidades de viento con 2,0 m/s y 4.0 m/s.
- ↴ A nivel mensual la humedad relativa, se caracteriza por presentar mayores valores en la parte baja de la cuenca y los menores en la cuenca alta, lo indica que varía inversamente con la altitud. Y en la cuenca la humedad relativa registra un comportamiento uniforme, con valores que oscilan en 70% y 85% y, a nivel medio mensual la humedad es del 76% en promedio. A nivel anual se caracteriza por presentar variaciones de 72% a 82%, donde a mayor altitud se registra valores menores.
- ↴ Las horas de sol, presenta un comportamiento variable, mientras que para las estaciones cercanas al litoral, la mayor cantidad de horas de sol se presenta en el período noviembre – abril y la menor en mayo – octubre, con valores de 130 horas/mes a 225 horas/mes; sin embargo en la zona de frontera (Cabo Inga), la mayor cantidad de horas de sol ocurre entre los meses de junio – octubre, con valores de 140 horas/mes a 220 horas/mes mientras que la menor se presenta entre los meses de enero y marzo, con valores de 98 horas mes a 120 horas/mes.
- ↴ Los valores Eto, registran un comportamiento variable en su distribución mensual, registrando en el valle y zona cercana al litoral los mayores valores en el período diciembre – abril, los que fluctúan entre 145 mm/mes a 165mm/mes y los menores en el período mayo – diciembre con valores que fluctúan entre 105/mes a 125 mm/mes. Sin embargo aguas arriba de la estación el Tigre, los valores de Eto son más estables y presentan el mismo comportamiento descrito, pero con valores menores los que fluctúan entre 100 a 155mm/mes.
- ↴ En función de los diferentes tipos de cultivos que existe en las cuencas, los cuales fueron identificados y evaluados en su período vegetativo, el cual permite zonificar la cuenca por el grado de cobertura vegetal, obteniéndose que en la parte baja (valle) este valor es mayor en comparación con la cuenca media y alta.
- ↴ La cuenca integral del río Tumbes registra un déficit promedio mensual de 86,9 mm/mes durante el período mayo – enero y entre febrero y abril el superávit es de 64,6 mm/mes.
- ↴ En la cuenca de Tumbes hasta la estación El Tigre el caudal medio anual es 111,0 m³/s valor que equivale a 2 647,7 mm, lo significa un superávit del recurso hídrico, y bajo las condiciones actuales y naturales, el río Tumbes satisface holgadamente las demandas existentes en la cuenca. Y en Zarumilla hasta la estación La Palma, el caudal medio anual es de 11,7 m³/s valor que equivale a 1 098,9 mm, lo que indica un déficit del recurso hídrico.

VIII. BIBLIOGRAFIA

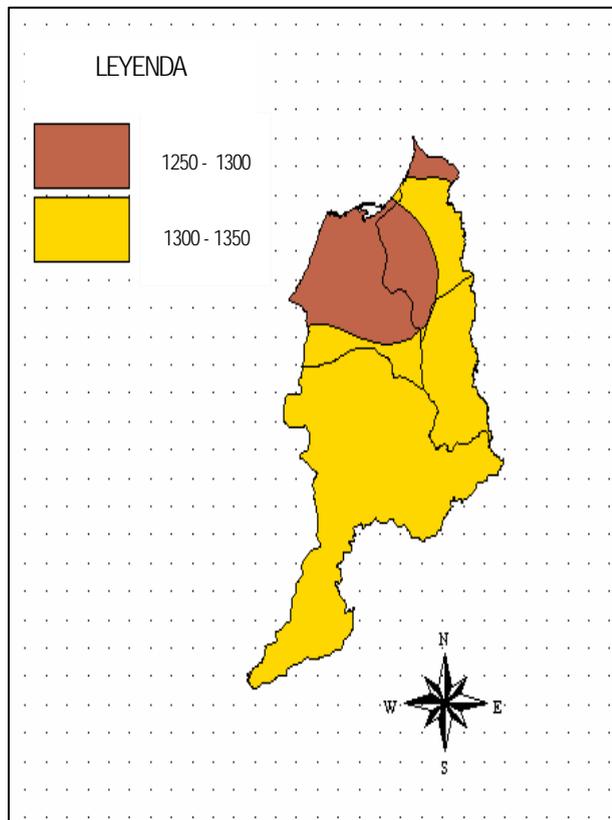
1. ALIAGA ARAUJO Vito (1983), Tratamiento de datos hidrometeorológicos, Lima.
2. CHEREQUE MORAN Wendor (1989), Hidrología para estudiantes de ingeniería civil, Pontificia Universidad Católica del Perú, obra auspiciada por CONCYTEC, Lima, Perú, 223 pp.
3. ESTRELA Teodoro (1992), Metodología y recomendaciones para la evaluación de los recursos hídricos. Centro de Estudios Hidrográficos – Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación, Madrid España. 52 p.
4. FAO (1998), Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 56. Roma, 301 p.
5. GOMEZ LORA Walter (1987), Primer curso nacional de recursos hídricos, Lima. Perú
6. INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS NATURALES – INRENA (1992), Estudio básico situacional de los recursos hídricos del Perú, Lima.
7. UNESCO, Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur, Uruguay – 1982.
8. SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA – SENAMHI (1976) – Dirección de Hidrología, "Atlas Hidrológico del Perú".
9. PROYECTO ESPECIAL DEPOLTI-INADE (2002). Diagnóstico de la gestión de la oferta de agua cuenca Olmos Tinajones.



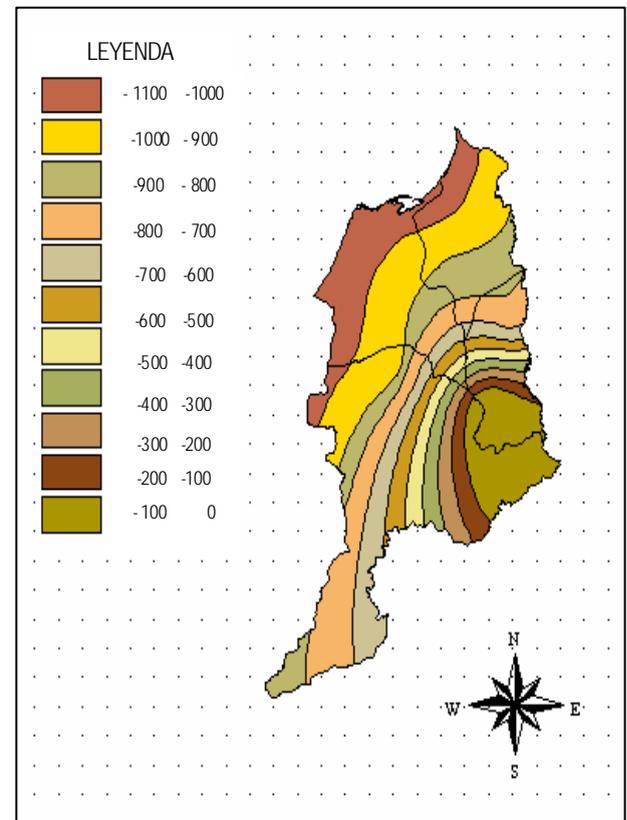
Mapa 2: Red Hidrometeorológica



Mapa 3: Precipitación media anual (mm)



Mapa 4: Evapotranspiración de cultivo (Etc mm)



Mapa 5: Escurrimiento medio anual (Etc mm)