

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS  
HIDROGRÁFICAS**



**“BALANCE HÍDRICO USANDO UN MODELO HIDROLÓGICO  
DISTRIBUIDO EN LA UNIDAD HIDROGRÁFICA RÍO PINDO,  
PROVINCIAS DE LOJA Y EL ORO, ECUADOR”**

**Presentada por:**

**ADRIANA PAULINA TAPIA ALVARADO**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE MAGÍSTER SCIENTIAE  
EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**Lima – Perú**

**2016**

## **DEDICATORIA**

A mis abuelitos Enrique y Piedad,  
personas fieles y ejemplares que  
forman parte de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirme alcanzar mis sueños y darme la oportunidad de obtener experiencias nuevas cada día que me permiten crecer y ser feliz con este proceso de aprendizaje.

A mi patrocinadora de tesis Dra. Lía Ramos por todo su apoyo, confianza y consejos.

Agradecimiento especial a Junior Pastor Pérez Molina consultor del CATIE por todo su apoyo incondicional en el desarrollo de los índices de variabilidad climática.

Al Instituto de Fomento al Talento Humano del Ecuador (IFTH), por la beca de estudios.

Al Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INHAMI) en la persona del Sr. Fredy Mejía por brindarme todo el apoyo con información para realizar la tesis.

A la Secretaría del Agua (SENAGUA) en la persona de los Ing. Galo Segovia; Javier Segovia y Rafael Guamán por facilitarme información esencial para culminar mi tesis.

A mi gran amiga Diana Ulloa por sus enseñanzas en hidrología así como facilitarme la información para realizar el estudio.

A todas las personas que de alguna manera hicieron posible este sueño y me dieron la mano cuando necesitaba: mi hermano José Tapia; amigos Viviana Suárez, Ximena Valarezo y Henry Palomino.

# INDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>8</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Modelo hidrológico .....	3
2.1.1 Modelo hidrológico distribuido .....	5
2.2 Modelo hidrológico distribuido TETIS .....	5
2.2.1 Aplicación del modelo hidrológico TETIS .....	8
2.3 Variabilidad climática.....	10
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>14</b>
3.1 Zona de estudio.....	14
3.2 Materiales y Software .....	15
3.3 Metodología.....	16
3.3.1 Sistematización y procesamiento de información básica .....	17
3.3.2 Precipitación, temperatura y caudal.....	18
3.3.3 Evapotranspiración de referencia .....	19
3.3.4 Índice de cobertura vegetal ( $\lambda$ ) .....	20
3.3.5 Información espacial.....	21
3.3.6 Calibración y validación del modelo TETIS .....	25
3.3.7 Variabilidad climática e hidrológica en el Río Pindo.....	28
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>33</b>
4.1 Sistematización de la información.....	33
4.1.1 Caracterización de la información hidrometeorológica.....	33
4.1.2 Parámetros derivados del modelo de elevación digital del terreno .....	35
4.1.3 Parámetros hidráulicos del suelo .....	36
4.2 Calibración y validación del modelo distribuido TETIS .....	38
4.2.1 Calibración .....	39
4.2.2 Validación del modelo distribuido TETIS en la estación Pindo AJ Amarillo.....	41
4.3 Simulación de caudales en la zona de estudio .....	43
4.3.1 Disponibilidad hídrica .....	47
4.3.2 Variabilidad climática e hidrológica en la unidad hidrográfica Río Pindo .....	50
4.3.2.1 Variabilidad climática en la zona de estudio .....	50
4.3.2.2 Variabilidad hidrológica en el Río Pindo .....	56

<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>60</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>65</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Aspectos a considerar en la distribución de frecuencias de temperaturas .....	13
Cuadro 2: Información utilizada para el desarrollo del estudio.....	16
Cuadro 3: Estaciones climáticas e hidrométricas usadas en el estudio .....	18
Cuadro 4: Valores mensuales de $K_c$ para las coberturas presentes en el Río Pindo.....	21
Cuadro 5: Intercepción y almacenamiento superficial para diferentes coberturas .....	25
Cuadro 6: Parámetros y factores correctores del modelo distribuido TETIS .....	26
Cuadro 7: Resumen de los 27 índices de RCLimindex usado en el estudio .....	28
Cuadro 8: Valores de referencia usados con R climdex .....	32
Cuadro 9: Factores correctores calibrados en la estación de aforo Pindo AJ Amarillo .....	40
Cuadro 10: Estadísticos obtenidos en la calibración con datos diarios.....	41
Cuadro 11: Estadísticos obtenidos de la validación temporal .....	42
Cuadro 12: Niveles de rendimiento de índices de eficiencia.....	43
Cuadro 13: Componentes del balance hídrico en la unidad hidrográfica Río Pindo.....	45
Cuadro 14: Proyectos en planificación, rehabilitación y tecnificación en Río Puyango....	49
Cuadro 15: Índices de temperatura y precipitación en el periodo 1975-2008 del Río Pindo..	51
Cuadro 16: Magnitudes de cambio de los índices de temperatura .....	54
Cuadro 17: Magnitudes de cambio de los índices de precipitación .....	56
Cuadro 18: Análisis de resultados de los índices R climdex .....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de modelos hidrológicos. ....	4
Figura 2. Esquema conceptual del movimiento vertical a nivel de celda en TETIS. ....	7
Figura 3: Eventos extremos y desplazamiento de la distribución de promedios. ....	12
Figura 4: Localización geográfica de la unidad hidrográfica Río Pindo. ....	15
Figura 5: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el presente estudio. ....	17
Figura 6: $ET_0$ mensual calculada a partir del método de Hargreaves. ....	20
Figura 7: Mapas <i>ráster</i> (a) textura del suelo, (b) permeabilidad del suelo en el Río Pindo. ....	23
Figura 8: Variación espacial de los usos del suelo y su distribución en el Río Pindo. ....	24
Figura 9: Estaciones pluviométricas con pv significativo. ....	33
Figura 10: Diagrama de cajas de los caudales diarios observados en el Río Pindo. ....	34
Figura 11: Temperatura máxima y mínima de las estaciones significativas. ....	35
Figura 12: Mapas derivado del DEM para la unidad hidrográfica Río Pindo. ....	36
Figura 14: Parámetros hidráulicos en la unidad Río Pindo. ....	38
Figura 14: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo TETIS. ....	40
Figura 15: Hidrograma generado de la calibración de los caudales observados. ....	41
Figura 16: Hidrograma generado de la validación temporal a escala diaria. ....	42
Figura 18: Variabilidad de los componentes del balance hídrico en el Río Pindo. ....	44
Figura 19: Hidrograma de los caudales diarios simulados. ....	44
Figura 20: Porcentajes de la composición de la escorrentía total en el Río Pindo. ....	46
Figura 21: Variación de la probabilidad de excedencia de caudales en el Río Pindo. ....	47
Figura 22: Persistencia de caudales al 50; 75; y 95 por ciento en el Río Pindo. ....	48
Figura 23: Proyectos hidráulicos en planificación y rehabilitación en el Río Pindo. ....	50
Figura 24: Índices TXX, TX90P con pv significativo en el Río Pindo. ....	52
Figura 25: Distribuciones decanales de las temperaturas diarias máximas, mínimas. ....	53
Figura 26: Índices significativos ( $p < 0.05$ ) RX1DAY; RX5DA; SDII; R20MM; R95P. ....	55
Figura 27: Índices con información de probabilidad, pendiente y error de la figura. ....	57
Figura 28: Distribuciones decanales de la escorrentía diaria ( $p < 0.05$ ). ....	57

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Fotografías de la zona de estudio.....	65
---	----

## RESUMEN

Para evaluar la disponibilidad hídrica de las unidades hidrográficas se requiere del uso de métodos que permitan conocer el balance hídrico. El ámbito de estudio es la unidad hidrográfica Río Pindo ubicada al sur del Ecuador en la que se aplicó a escala diaria el modelo distribuido de simulación lluvia-escorrentía TETIS que considera la precipitación, temperatura, caudal, tipo de cobertura, características, y morfología del suelo para generar información de procesos como: intercepción, infiltración, evapotranspiración, percolación, interflujo y flujo base, con el objetivo de conocer la disponibilidad hídrica del Río Pindo. Para examinar los procesos del ciclo hidrológico relacionados con la cantidad de agua se realizaron varias simulaciones en el periodo 1975 a 2008, y análisis de frecuencia de caudales, además se analizó la variabilidad climática para establecer la influencia en la variabilidad hidrológica en el Río Pindo.

La calibración analizada con los índices Nash–Sutcliffe (E), RSR y error en volumen (Ev), mostraron resultados de rendimiento muy buenos, lo que permitió corregir parámetros para conseguir información adecuada de los procesos hidrológicos que se desarrollan en el Río Pindo. El análisis de sensibilidad mostró que la infiltración e interflujo afectan directamente el proceso de escorrentía total, siendo el interflujo el mayor flujo de salida en la zona de estudio. Una vez calibrado y validado el modelo se procedió a la simulación en la zona alta y baja del Río Pindo, los resultados presentan mayor precipitación, infiltración, escorrentía directa e interflujo en la zona alta y en la zona baja mayores valores de evapotranspiración y flujo base. La influencia de variabilidad climática se presenta en estaciones de la zona alta y baja del Río Pindo con aumento de temperaturas y precipitaciones, sin embargo no existe variabilidad hidrológica, estos resultados pueden atribuirse a que la unidad de estudio esta amortiguando los cambios producidos.

Palabras claves: TETIS, balance hídrico, calibración, simulación, variabilidad hidrológica.

## ABSTRACT

To assess the water availability it is requires the context analysis of hydrographic units using methods that permit know the water balance. The study zone is the hydrographic unit Rio Pindo located south of Ecuador where the model simulation TETIS, of runoff rain was applied to daily scale that considers precipitation, temperature, flow, type of coverage, features, and morphology of floor to generate hydrological processes information as interception, infiltration, evapotranspiration, percolation, subsurface flow and flow basis. To examine the processes of the hydrological cycle related to the quantity of water were performed several simulations to daily scale for the period 1975-2008, and frequency analysis flow, also evaluated the influence of hydrological variability in the study area.

The calibration was analyzed with Nash-Sutcliffe (E), RSR and error in volume (Ev) and showed results very good, for to correct the parameters and find information proper on hydrological processes that developed in the study area. The sensitivity analysis showed that infiltration e interflow directly affect the process of total runoff, being the interflow the largest outflow the in the study area. Once calibrated and validated the model was proceeded to the simulation in the low area and high side of the Rio Pindo, the results showed increased precipitation, infiltration, direct runoff and subsurface flow in the high side and high values evapotranspiration and flow base in the low area. The influence of climate variability occurs in seasons uptown and down Pindo River with increased temperatures and rainfall, nevertheless not exist hydrological variability, these results can be attributed that the unit of study is muffling the changes.

Key words: TETIS, hydric balance, calibration, simulation, hydrological variability.

## **I. INTRODUCCIÓN**

Ecuador tiene una alta disponibilidad hídrica que bordea los 20700 m<sup>3</sup>/habitante por año, lo que supera por mucho la media mundial que es de 1700 m<sup>3</sup>/habitante por año (SENAGUA, 2012). Este alto potencial hídrico se da por la vertiente del Atlántico, sin embargo, la mayor población se concentra en la vertiente del Pacífico. Conocer la disponibilidad del recurso hídrico en las diversas regiones del Ecuador es uno de los mayores retos para el manejo del agua y de los ecosistemas que regulan su ciclo. La generación de información sobre cantidad y calidad de agua es responsabilidad del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), que por sus limitaciones presupuestarias y de personal no logra cubrir todo el territorio nacional. Esta limitante de información ha provocado que ciertos proyectos hidroeléctricos o sistemas de riego estén sobreestimados generando conflictos en las zonas donde se requiere el agua para las diversas actividades. La falta de estudios sobre la cantidad y calidad de agua disponible, pero sobre todo de la cantidad, es uno de los mayores desafíos para otorgar nuevas autorizaciones de uso o para la redistribución de las autorizaciones en lugares donde hay acumulación de caudal en pocas personas. Sin datos cualquier intención de manejar adecuadamente el agua quedará en meras declaraciones, leyes o reglamentos que no se pueden ejecutar en el campo (Calles, 2016).

Bajo estas condiciones, un clima cambiante, y un bajo conocimiento sobre la dinámica del ciclo hidrológico, es de esperarse que los conflictos por acceso al agua se acentúen en el Ecuador si no se toman medidas. Es necesario realizar análisis de la variabilidad climática para determinar los cambios del clima en determinados periodos de tiempo, con el fin de establecer tendencias de aumento o disminución de la precipitación y temperatura, y así determinar la influencia de éstas variables en la variabilidad hidrológica, por tanto, incluir análisis de este componente en la gestión de cuencas hidrográficas es fundamental para garantizar el suministro de agua en el futuro cercano.

El Río Pindo es cabecera de la unidad hidrográfica Puyango en Ecuador, aguas abajo en Perú se forma la unidad hidrográfica binacional Puyango-Tumbes, por lo que cualquier tipo de actividad desarrollada en la parte alta afectará directamente a la parte baja en Tumbes, por ello es conveniente trabajar en la conservación de las zonas donde nacen las unidades hidrográficas. Río Pindo, que es el caso del presente estudio donde la disponibilidad hídrica es usada principalmente para producción agrícola, turismo, entre otros, y en los últimos años se ha visto afectado por actividades antrópicas, principalmente por cambios de uso en el suelo, por lo que para un adecuado manejo y gestión del agua es necesario cuantificar los recursos hídricos disponibles para encontrar el equilibrio entre las necesidades humanas y el ecosistema natural. En la actualidad una herramienta generalmente usada en este tipo de estudios es la implementación de diferentes modelos matemáticos como el modelo hidrológico distribuido TETIS (Ramírez, 2012).

Esta investigación tiene como objetivo la aplicación de un modelo hidrológico distribuido llamado TETIS, con el fin de conocer la capacidad hídrica de la unidad hidrográfica del Río Pindo, los resultados servirán como apoyo en la gestión y manejo del agua, lo que a su vez permitirá determinar las medidas necesarias para proteger el recurso hídrico.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

- Obtener el balance hídrico para conocer la disponibilidad de agua en el Río Pindo cabecera de la unidad hidrográfica binacional Puyango-Tumbes con apoyo del modelo hidrológico distribuido TETIS.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Formular el modelo hidrológico distribuido TETIS en la unidad hidrográfica Río Pindo.
- Calibrar y validar el modelo hidrológico distribuido TETIS en la unidad hidrográfica Río Pindo a escala diaria.
- Simular los caudales diarios para el periodo de 01 de enero 1975 al 31 de diciembre de 2008 y evaluar la influencia de la variabilidad hidrológica en la unidad hidrográfica del Río Pindo.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

El balance hídrico es considerado como una herramienta útil para la planeación y manejo del recurso hídrico, y sobre todo si se considera de manera integral tanto el agua superficial como subterránea. El concepto de balance hídrico, que ampliamente se usa en hidrología, puede causar alguna confusión al suponer que la precipitación es igual a la suma de la escorrentía y la evaporación; ya que en muchos casos sucede que las cuencas no tienen un ciclo exclusivo de su entorno, es por ello que el término ciclo hidrológico tome el sentido de distribución y movimiento del agua en diferentes fases, bajo y sobre la superficie de la tierra. El ciclo del agua implica un cambio continuo de grandes masas de agua de un estado físico a otro y su transporte de un lugar a otro. Al volumen de agua que se desplaza de un depósito a otro a lo largo de un año se llama balance hídrico global.

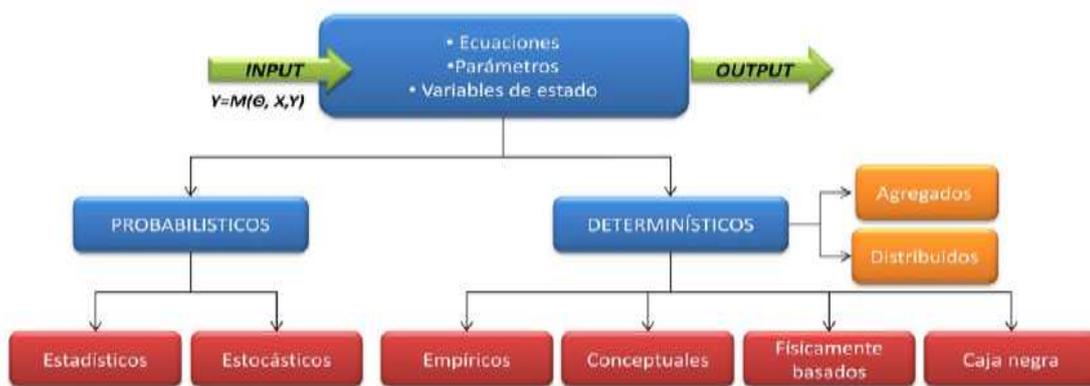
### 2.1 Modelo hidrológico

Sánchez (2001) indica que el ciclo hidrológico es el movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea; es decir, que es el proceso global por el cual se considera al agua un recurso natural renovable; debido a que en esa circulación espontánea y continua el líquido vital se purifica y retorna temporalmente a sus fuentes, que la ponen al alcance de sus múltiples demandantes. Para la evaluación de la respuesta hidrológica de una cuenca, regularmente es indispensable la elaboración de algún tipo de esquema, por medio del cual se pueda representar en forma simplificada, un sistema real; en otras palabras: un modelo. El mismo podrá ser utilizado para reconstruir eventos pasados y predecir los futuros. El modelo es la representación de algún objeto o sistema, en un lenguaje o forma de fácil acceso y uso, con el objetivo de entenderlo y poder generar sus respuestas para diferentes entradas. Un modelo hidrológico es una herramienta que la ciencia desarrolló para entender mejor y representar el comportamiento de los sistemas hidrográficos y prever condiciones diferentes a las observadas. Con la presentación del modelo agregado conceptual *Stanford Watershed Model*, se inició el desarrollo de muchos modelos, partiendo de los más simples

modelos lineales con parámetros concentrados hasta los más complejos modelos no lineales con parámetros distribuidos. Por lo tanto se puede afirmar que los modelos son de diferentes tipos y fueron desarrollados para distintos propósitos (Ramírez, 2012).

Los modelos en cualquier ámbito de la ciencia se clasifican en diferentes criterios: según las ecuaciones utilizadas, pueden ser modelos probabilísticos y determinísticos. Los primeros se basan en las leyes del azar o probabilidad y son de tipo estadísticos y estocásticos. Los modelos estadísticos tratan con ejemplos observados, mientras que los modelos estocásticos con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales por ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas de tamaño medio. Por su parte en los modelos determinísticos las variables vienen establecidas por leyes físicas consideradas como exactas y que explican toda su variabilidad.

Los modelos determinísticos pueden ser clasificados en cuatro subgrupos en función de los procesos físicos que simulan, los algoritmos que el modelo emplea para describir dichos procesos y la dependencia de datos del modelo: (1) modelos empíricos: estimación por tablas, problemas de extrapolación, (2) conceptuales cierto grado de simplificación, (3) físicamente basados: parámetros medibles directamente y (4) “caja negra”: no es posible la estimación de parámetros, calibración imprescindible y problemas de extrapolación, para una mejor ilustración de esta clasificación, a continuación se presenta en detalle en la figura 1 la distribución de modelos hidrológicos.



**Figura 1. Clasificación de modelos hidrológicos.**

**Fuente: Ramírez (2012)**

Uno de los modelos hidrológicos distribuidos más usados es el '*Soil & Water Assessment Tool*' (SWAT), un modelo de cuenca fluvial desarrollado para cuantificar el impacto de las prácticas de manejo de tierras y aguas en cuencas grandes y complejas. SWAT ha sido aplicado con éxito en cuencas agrícolas a nivel mundial, una aplicación para la predicción de los cambios en los recursos hídricos bajo escenarios de cambio climático y herramienta para la gestión del agua es el caso de la cuenca del Río Mendoza (Schwank *et al.*, 2014).

### **2.1.1 Modelo hidrológico distribuido**

Este tipo de modelos considera las ecuaciones de conservación de masa, energía y movimiento, para describir el movimiento del agua en superficies y subsuelo (zona saturada y no saturada), usando técnicas de discretización numérica tal como el método de las diferencias finitas o de elementos finitos. El cálculo se realiza para cada celda de la grilla que representa la cuenca. Los modelos distribuidos se pueden discretizar basándose en la definición de una grilla regular donde se realiza el cálculo distribuido o teniendo como base las líneas de escurrimiento y las curvas de nivel. Dentro del primer grupo se puede citar los siguientes modelos distribuidos: ANSWER, SHE, THALES, FLORA y DBSIM y del segundo grupo, el caso más notorio es un modelo hidrológico distribuido utilizado para predicción de zonas saturadas y generación de escurrimiento, TOPOG, similar al modelo TOPMODEL (Ramírez, 2012).

La modelación distribuida presenta varias ventajas respecto de la agregada, la principal consiste fundamentalmente en la mejor representación de la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados dentro de los procesos hidrológicos, adicionalmente, la modelación distribuida ha surgido en los últimos años para lograr un mejor entendimiento de los procesos a nivel de cuenca y de parcela, aunque en ocasiones requiere de información detallada de la zona de estudio. Este tipo de información detallada día a día se encuentra más a disposición gracias al desarrollo en los últimos años de los ordenadores, la cartografía digital, los sistemas de información geográfica y las mediciones con sensores remotos (Puricelli, 2003).

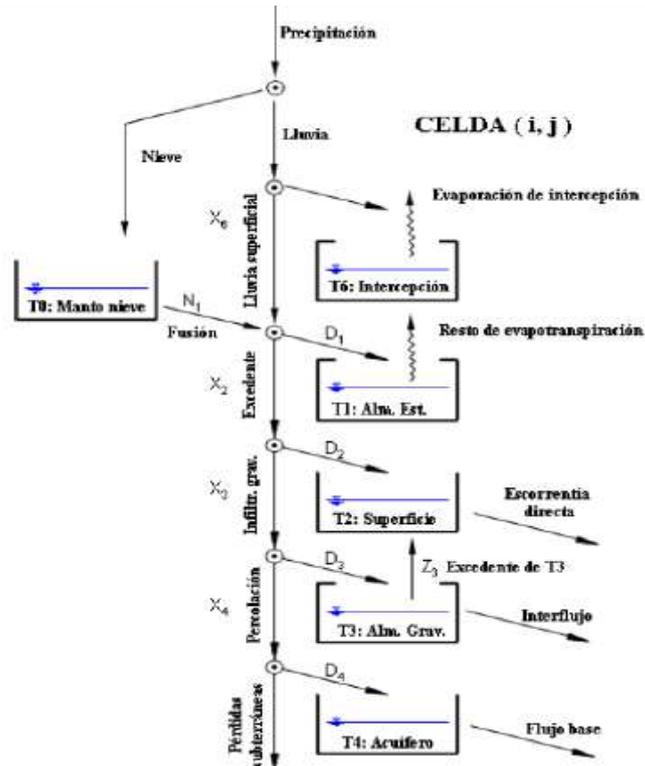
### **2.2 Modelo hidrológico distribuido TETIS**

El modelo de simulación hidrológica TETIS desarrollado por el Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA), perteneciente al Instituto de Ingeniería del

Agua y Medio Ambiente (IIAMA), de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Es un modelo de libre acceso que puede ser descargado:

<http://lluvia.dihma.upv.es/ES/software/software.html>, y ha sido probado en numerosos estudios y aplicaciones en diferentes climas y regiones del mundo con resultados satisfactorios, como: España, Italia, Francia, y Colombia. El modelo representa a la cuenca como una malla rectangular y en cada celda se modela el proceso lluvia escorrentía usando seis tanques verticales (figura 2), donde cada tanque representa el almacenamiento del agua en una columna extendida del suelo: la nieve, almacenamientos atmosféricos, superficiales, gravitacionales y el acuífero. La relación entre los distintos tanques se basa en las características del suelo tales como capacidad de campo y las conductividades hidráulicas saturadas del suelo y subsuelo. Estas características del suelo han sido estimadas previamente en cada celda usando las principales características y propiedades del suelo como: litología, edafología, usos del suelo, características geomorfológicas y toda aquella información de tipo ambiental disponible que sirva para caracterizar el suelo (Ramírez, 2012).

Las conexiones verticales entre los tanques describen los procesos de lluvia (X1) y nieve (X0), correspondiente a la precipitación total, lluvia directa (X6), excedente (X2), infiltración (X3), percolación (X4), y pérdidas subterráneas (X5). Las conexiones horizontales representan respectivamente escorrentía directa (Y2), interflujo (Y3), y flujo base (Y4). También existen otros dos flujos de salida: evapotranspiración desde el conjunto suelo-vegetación (Y1) y evaporación de agua interceptada (Y6). (Francés *et al.*, 2014). Por último, una descripción más detallada del modelo hidrológico TETIS se puede encontrar en Francés *et al.* (2014).



**Figura 2. Esquema conceptual del movimiento vertical a nivel de celda del modelo TETIS (celda  $i,j$ ).**

**Fuente: Francés *et al.* (2014).**

El tanque  $T_0$  corresponde al almacenamiento de altura equivalente de agua, producto de las nevadas. El  $T_0$  no se usó en la modelación de la cuenca del Río Pindo porque no existe un porcentaje de nieve en el sitio.

El  $T_1$  representa el agua que transita por la cuenca y que solamente sale de ella por evapotranspiración ( $Y_1$ ), por lo tanto no hace parte de la escorrentía. Este almacenamiento tiene en cuenta la detección de agua en los charcos y el agua que retiene el suelo por fuerzas capilares. El almacenamiento por intercepción ocurre en  $T_6$  cuya salida es la evaporación de intercepción ( $Y_6$ ).

El  $T_2$  representa el agua que se encuentra en la superficie y es susceptible de moverse superficialmente por la ladera (escorrentía directa) o de infiltrarse al nivel inferior. La cantidad de agua que se deriva para escorrentía superficial depende de la capacidad del suelo para dejar pasar el agua y del estado del almacenamiento en la capa superior del suelo. La capacidad para dejar pasar el agua se puede asociar a la conductividad hidráulica en la capa superior del suelo. Finalmente la cantidad de agua que sigue por el conducto  $X_3$  se relaciona con la capacidad del suelo para dejar pasar el agua a su interior  $K_s$  (conductividad hidráulica

saturada del suelo asociada a la cobertura), con un intervalo de tiempo y el flujo excedente del almacenamiento estático X2.

En el tanque T3 el agua gravitacional almacenada en el suelo parte de este volumen pasa al nivel inferior por percolación y otra parte produce el interflujo. El tanque representa el interflujo que, a través de la capa superior del suelo, se desarrolla inicialmente sobre una delgada capa que fluye lateralmente hacia abajo en la ladera y se ve concentrado en pequeñas depresiones, grietas o pequeños conductos por el interior de esta capa, hasta que sale a los elementos de la red de drenaje.

La formulación hidráulica para la propagación en la red de cauces utilizada en el modelo TETIS se basa en una aproximación de la onda cinemática, asumiendo un lecho fijo en cada celda en el cual se aplica una ecuación de balance, más detalles del esquema conceptual se remiten al lector al manual del modelo Francés *et al.* (2014).

La calidad y la precisión de los datos es un problema en la modelación hidrológica, por tanto, existe un grado de incertidumbre asociada. Por otro lado, la metodología de estimación de los parámetros involucra una serie de incertidumbre debidas principalmente a la cantidad, calidad y grado de definición espacial de la información básica empleada. Ante, esto, la ventaja del modelo TETIS es que se puede corregir en gran medida todos estos errores, calibrando los factores correctores del modelo (Francés *et al.*, 2014).

El modelo TETIS utiliza una estructura de parámetros efectivos separada en dos partes: las características físicas del medio natural, estimadas según la información disponible y medida a una escala espacial definida y los factores correctores, y las características físicas expresan el valor medido o estimado del parámetro para cada celda de la cuenca, describen la variabilidad espacial del mismo y poseen significado físico. La ventaja principal de esta estructura del parámetro es que, en la fase de calibración, se reduce notablemente el número de variables que deben ser ajustadas, siendo sólo necesario calibrar los  $p$  factores correctores, en vez de  $np$  valores (número de parámetros por número de celdas) Francés *et al.* (2014).

### **2.2.1 Aplicación del modelo hidrológico TETIS**

El modelo hidrológico distribuido TETIS se utilizó para evaluar el impacto directo del cambio climático en una cuenca mediterránea erosionable (la cuenca del Río Ésera, Pirineos

centrales del sur, España). Los resultados del modelo mostraron una disminución general en la humedad del suelo y la descarga de agua, también se muestra grandes inundaciones debido a la movilización de sedimentos. El estudio muestra una metodología para implementación de un modelo distribuido de sedimentos mediante la explotación volúmenes de sedimentación del yacimiento. Esta metodología puede ser aplicada a una amplia gama de zonas de captación, dada la alta disponibilidad de los datos de sedimentación del yacimiento. Por otra parte, este estudio mostró cómo un modelo de este tipo se puede utilizar en el marco del estudio del cambio climático, proporcionando una medida del impacto de cambio climático sobre la erosión del suelo y la producción de sedimentos (Bussi *et al.*, 2014).

Según Orozco (2014) el modelo TETIS ha sido aplicado en Estado Unidos y España con la finalidad de proporcionar una alternativa parsimoniosa a la simulación de la fusión de nieve en la modelación hidrológica, cuya problemática principal es no contar con la información suficiente para aplicar otros modelos de fusión conceptualmente más completos, se obtuvieron resultados de un modelo híbrido de fusión parsimonioso para afrontar la problemática de la falta de información e introdujo la variabilidad del factor de fusión. Asimismo se buscó evaluar el efecto que la variabilidad de los factores de fusión pueden introducir en la modelación de la producción de escorrentía. Así, como en el efecto de ésta en la modelación de los procesos de acumulación y fusión de nieve.

A través del modelo hidrológico TETIS se estimó la lluvia mediante satélite. Se empleó la lluvia estimada por el algoritmo PERSIANN a partir de mediciones de satélite, con una resolución temporal diaria y resolución espacial de  $0.25^\circ$  para el periodo comprendido entre el 01 de marzo del 2000 al 31 de octubre del 2009 en la Cuenca del Río Júcar (España) con un área de 21 434 km<sup>2</sup> (Ramos, 2013).

El modelo hidrológico TETIS también se ha aplicado en España para predecir y analizar la respuesta hidrológica en cuencas hidrográficas con escasez de datos y aprovechando información estándar. La aplicación del modelo hidrológico distribuido TETIS en las cuencas de los Ríos Ésera, Siurana y Júcar desarrolló una nueva propuesta metodológica, que combina la hidrología con el aprovechamiento de información estándar, de libre acceso y disponible online (Ramírez, 2012).

Además TETIS se aplicó en las cuencas de los Ríos Illinois, Barony Elk (en Oklahoma, Arkansas y Missouri, respectivamente), dentro del Proyecto Comparación de Modelos Distribuidos en la fase 2 (DaMIP2), dirigido por la *National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service* (NOAA/NWS) de EEUU, para predecir las crecidas e incorporarlo dentro de la gestión de los ríos en EEUU (Dávila y Francés, 2011).

### **2.3 Variabilidad climática**

El clima es una estimación del promedio de datos en el tiempo que se calcula a partir de datos puntuales, también es posible determinar cuáles son las variaciones respecto a esa situación promedio. Esas variaciones respecto a las condiciones promedio es lo que se conoce como “variabilidad del clima”. En palabras del IPCC (2002) la variabilidad climática *“se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos del clima (...) en todas las escalas temporales y espaciales más allá de los fenómenos meteorológicos determinados”*. Las formas estadísticas en que se puede describir la variabilidad del clima incluyen las desviaciones estándar y sus derivados, la frecuencia de fenómenos extremos, y otras.

La variabilidad natural del clima se debe a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna) y a variaciones o forzamientos externos (variabilidad externa). La variabilidad externa se refiere a forzamientos como erupciones volcánicas, variaciones en la radiación solar, cambios en la inclinación del eje terrestre respecto al plano de traslación alrededor del sol (eclíptica) y otros IPCC (2002), así la variabilidad climática es una medida del rango en que los elementos climáticos, como temperatura o lluvia, varían de un año a otro. Incluso puede incluir las variaciones en la actividad de condiciones extremas, como las variaciones del número de aguaceros de un verano a otro. La variabilidad climática es mayor a nivel regional o local que al nivel hemisférico o global (PACC, 2012).

Estos procesos naturales relativamente cíclicos y aún no enteramente comprendidos científicamente en su totalidad, se han visto sujetos a una nueva influencia: la de las modificaciones introducidas por la especie humana en la composición de la atmósfera y el cambio en el uso de las tierras IPCC (2002), es decir las modificaciones que están conduciendo al cambio climático.

En otras palabras, existen evidencias científicas de que el cambio climático está incidiendo no solamente en el clima (estado promedio de las condiciones atmosféricas) sino también en su variabilidad. Más aún, esta incidencia en la variabilidad parece ser mayor y con más efectos inmediatos sobre la actividad humana que el mismo cambio climático en muchas regiones del mundo. Los efectos de la variabilidad natural son mayores a medida que la escala temporal disminuye, siendo más importantes en las escalas entre anuales y decanales, y en una escala mayor la variabilidad climática se puede confundir con el cambio climático. El otro elemento es el cambio en sí de la variabilidad, la cual es atribuible al cambio climático. Es decir el análisis para determinar si la variabilidad del clima está cambiando a medida que pasa el tiempo (Brunet *et al.* 2009).

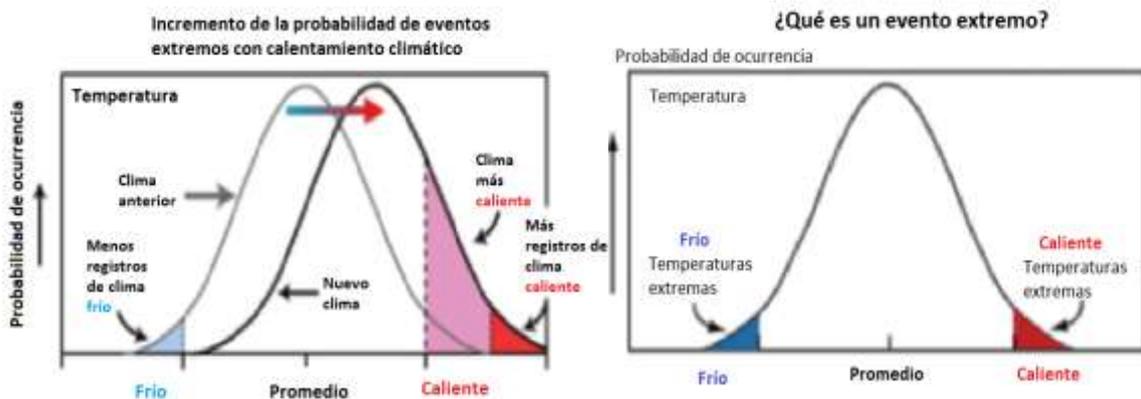
Para análisis de variabilidad climática muchas veces no existe disponibilidad de información detallada es una limitante importante. En el caso concreto del Río Pindo se han logrado secuencias de 34 años de datos, iniciando en la década de los 70s.

La variabilidad climática permite analizar los cambios en valores extremos de temperatura y precipitación, obteniendo de esta forma una tendencia del cambio en los sitios de estudio. De acuerdo al estudio realizado Imbach *et al.* (2013), se detectaron aumentos en el rango de temperaturas y también cambios en las temporadas (días sucesivos similares) de calor y de frío. Las primeras, olas de calor, aumentan significativamente, mientras que las otras, olas de frío, disminuyen significativamente en la costa de Chiapas, México. El porcentaje anual de días y noches calientes analizados a partir del percentil 90 de temperatura máxima y el percentil 90 de la temperatura mínima denota un incremento del 2,5 por ciento por década y 1,5 por ciento por década respectivamente De forma inversa se evidencia que el número de días y noches frías (a partir del percentil 10 de la temperatura máxima y mínima) tienen un decrecimiento del 2,2 por ciento por década y 2,4 por ciento por década.

En el análisis de datos extremos de precipitación y temperatura se usa el programa de RCLimindex, que proporciona una interfaz escrita en lenguaje de programación R versión 3.2.3 (R Development Core Team 2010, Crawley 2007). Esta interfaz permite calcular los índices de extremos climáticos con límites que pueden ser definidos por el usuario. Este programa permite calcular los 27 índices básicos que recomienda el Equipo de Expertos de CCI/CLIVAR para “*Climate Change Detection Monitoring and Indices*” (ETCCDMI). Para construir los índices se requiere una homogenización de los datos, por lo que la interfaz

realiza un proceso simple de control de calidad antes del análisis, esto consiste en eliminar datos atípicos de la base (Imbach y Pérez-Molina, 2014, Imbach *et al.*, 2013). Todas la distribución de frecuencias de temperaturas (mínima y máxima) y precipitaciones fueron realizadas en lenguaje de programación R versión 3.0.2 (R Development CoreTeam 2010, Crawley 2007 ver anexo 2).

En el caso de la temperatura los valores de temperatura tienden a ser más frecuentes alrededor del promedio y por lo tanto su probabilidad de ocurrencia es muy alta; a medida que las temperaturas se alejan de ese promedio (por encima o por debajo) el número de registros disminuye y por lo tanto ocurren con cada vez menos frecuencia. Muy alejados del promedio y con una frecuencia muy baja se encuentran los eventos extremos (Imbach *et al.*, 2013, Imbach y Pérez-Molina, 2014). En la figura 3 se puede observar la representación de eventos extremos y desplazamiento de la distribución de promedios de temperaturas.

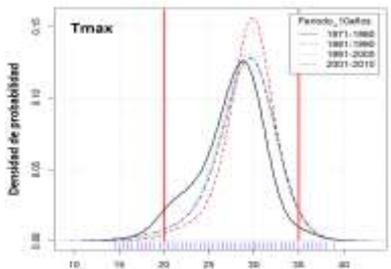
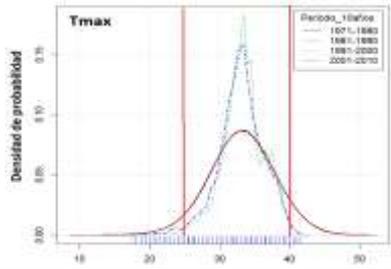


**Figura 3: Eventos extremos y desplazamiento de la distribución de promedios de temperaturas.**

**Fuente: Imbach *et al.* (2013), Imbach y Pérez-Molina (2014).**

En el cuadro 1 se resume los principales aspectos a considerar cuando se analiza la distribución de frecuencias de temperaturas.

**Cuadro 1: Aspectos a considerar en la distribución de frecuencias de temperaturas**

Aspectos de análisis	Posibles cambios	Interpretación	Gráfico
Desplazamiento lateral de la curva	Se desplaza a la derecha	Aumento de temperatura entre décadas. Aumento de los valores promedios de las temperaturas.	 <p>Gráfico superior: T<sub>max</sub>. Muestra la densidad de probabilidad (eje Y, 0.00 a 0.15) frente a la temperatura (eje X, 10 a 40). Se observan cuatro curvas de densidad de probabilidad para diferentes décadas: 1971-1980 (negra), 1981-1990 (rojo), 1991-2000 (verde) y 2001-2010 (azul). Las curvas se desplazan lateralmente hacia la derecha a lo largo de las décadas, indicando un aumento de temperatura.</p>
	Se desplaza a la izquierda	Disminución de la temperatura entre décadas. Disminuyen los valores promedios de las temperaturas.	
Cambios en el rango de las curvas sin desplazamiento de las curvas	Curvas más anchas	La curva inicia en valores menores y termina en valores mayores. Existe más variabilidad de temperaturas.	 <p>Gráfico inferior: T<sub>max</sub>. Muestra la densidad de probabilidad (eje Y, 0.00 a 0.15) frente a la temperatura (eje X, 10 a 50). Se observan cuatro curvas de densidad de probabilidad para diferentes décadas: 1971-1980 (negra), 1981-1989 (rojo), 1991-2000 (verde) y 2001-2010 (azul). Las curvas muestran cambios en su rango y anchura, pero no se desplazan lateralmente.</p>
	Curvas más angostas	Desaparecen valores extremos máximos y mínimos. Las temperaturas no varían mucho en referencia al valor promedio.	

Fuente: Imbach *et al.* (2013), Imbach y Pérez-Molina (2014).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

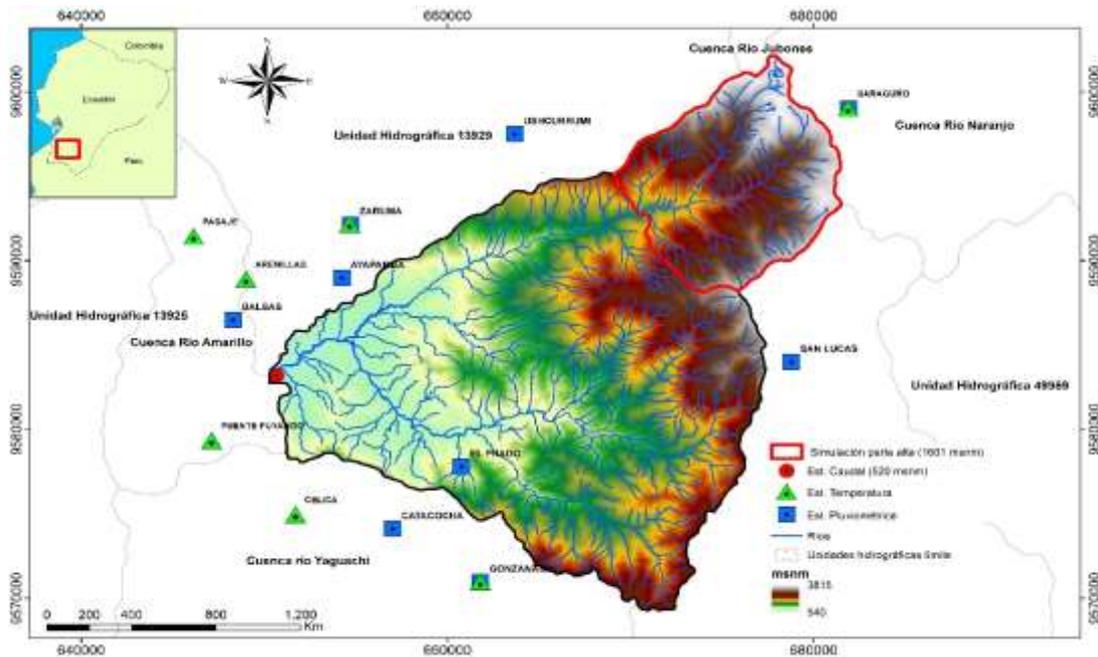
En el presente capítulo se presenta la descripción de los factores hidrológicos y geomorfológicos que sirvieron de insumos para analizar la variabilidad hídrológica en el Río Pindo.

#### **3.1 Zona de estudio**

La unidad hidrográfica del Río Pindo se ubica al sur del Ecuador, en parte de las provincias Loja y El Oro, a una altitud de 3500 msnm con una superficie de 524.669 km<sup>2</sup>.

La humedad relativa es de 85 por ciento a altitudes de 1150 msnm. Geográficamente la zona de estudio se encuentra en las coordenadas 4°13' y 3°19' de latitud sur y los meridianos 79°25' y 79°35' de longitud oeste.

Según la metodología Pfafstetter para delimitación de unidades hidrográficas SENAGUA (2009), el Río Pindo se encuentra en el nivel cinco con el código 13948, y los límites son: al norte con la unidad hidrográfica Jubones y Unidad Hidrográfica 13929; al sur con la unidad hidrográfica Yaguachi y Gualel; al este con la unidad hidrográfica Gualel y Naranjo y al Oeste con la unidad Río Amarillo y unidad 13923. En el Anexo 1 se muestra fotografías de la zona de estudio.



**Figura 4: Localización geográfica de la unidad hidrográfica Río Pindo al sur del Ecuador. Los cuadros azules y triángulos verdes representan las estaciones hidrometeorológicas. Fuente: Elaborado con el SRTM resolución 90m de la SENAGUA (2015).**

El clima de la unidad hidrográfica Río Pindo se divide en ecuatorial de alta montaña (parte alta de la unidad hidrográfica) y ecuatorial mesotérmico semi-húmedo (parte baja de la zona de estudio). La litología en la unidad de estudio está representada principalmente el 43 por ciento de andesita, pordifo, andesítico, toba andesítica, aglomerática; 25.5 por ciento de esquistos capiro: arenisca, lutita, pizarra, filita, esquisto, cuarcita; 7.6 por ciento rocas volcánica, toba, pórfido cuarcífero, toba, andesita, ignimbrita, 6.7 por ciento rocas granítica indiferenciadas, granodiorita, adomelita 6.7 por ciento capa de lutita negra; roca granítica, granodiorita, tonalida, y diorita.

El tipo de suelo del Río Pindo es de textura fina, media, a moderadamente gruesa, bien drenados, con capacidades limitadas de retención de agua y con estabilidad estructural moderada.

### 3.2 Materiales y Software

Para la modelación hidrológica se usó el modelo distribuido TETIS versión 8.3 (Francés *et al.* 2014) y para el procesamiento de la información espacial se usó Arc Gis versión 10.1. La conversión de los datos a formato TETIS se realizó con el programa *EditPad Lite 7* y el *Interactive Data Language (IDL)*.

Las series de datos diarios fueron organizados y analizados con ayuda del lenguaje de programación R, se usó la interface de RClimdex para calcular todos los índices de variabilidad climática. Asimismo, todas las densidades de probabilidad de precipitación y temperatura (máxima, mínima y ámbito) fueron realizadas en lenguaje de programación R versión 3.0.2 R Development Core Team 2010, (Crawley, 2007).

La elaboración del estudio demandó información a nivel: geográfica, hidrológica, meteorológica, tipo y uso del suelo. La información, formato, fuente y año se detallan en el cuadro 2.

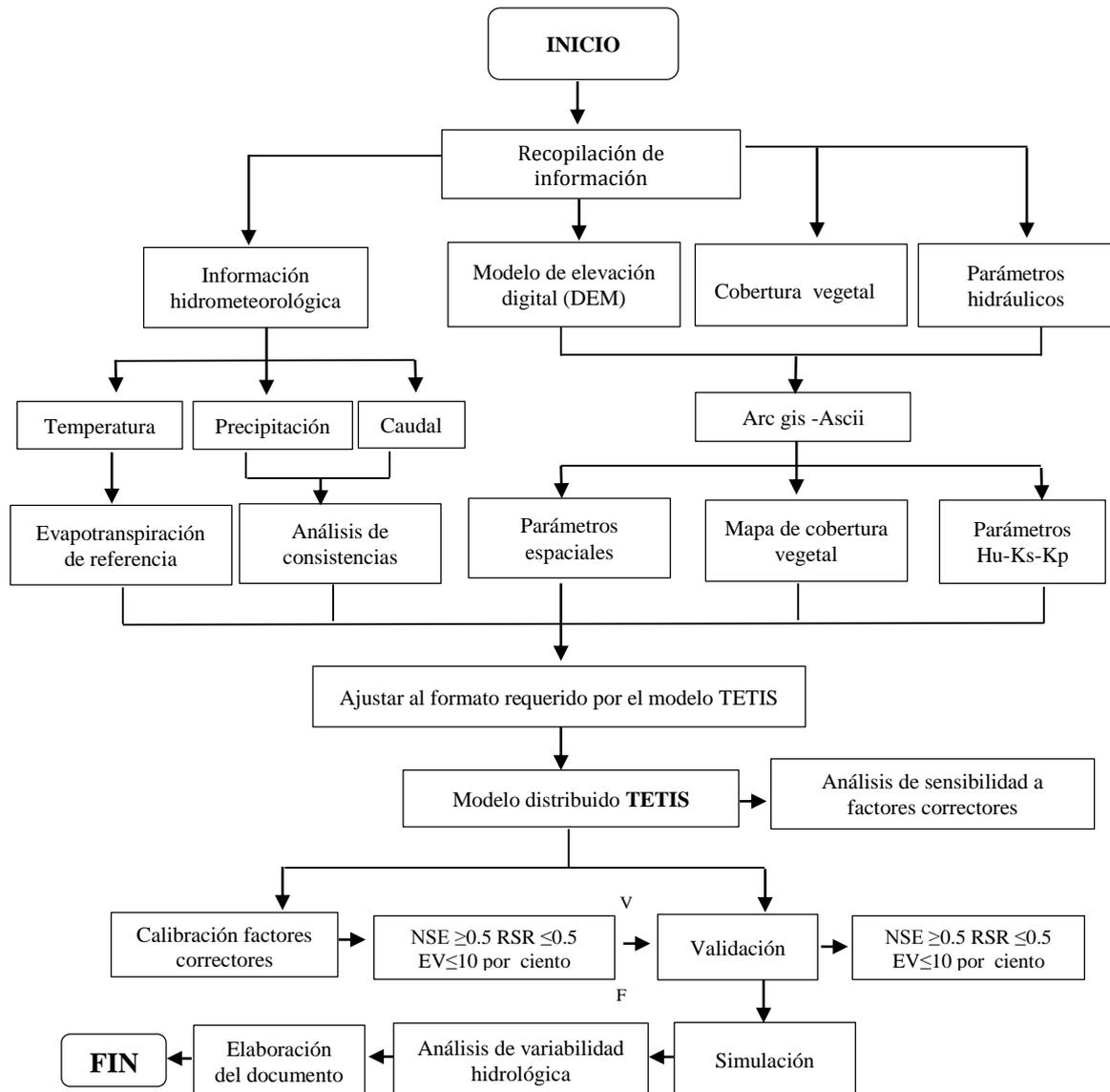
**Cuadro 2: Información utilizada para el desarrollo del estudio**

Información utilizada	Fuente	Año
Delimitación y codificación de unidades hidrográficas con la Metodología Pfafstetter	Secretaría del Agua (SENAGUA)	2009
Cartografía escala 1:50 000 1:250 000	Instituto Geográfico Militar (IGM); Servicio Nacional de Información (SNI)	2012
Información meteorológica e hidrológica	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)	1975-2008
Mapa cobertura y uso de la tierra escala 1: 100 000	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca (MAGAP)	2002

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Metodología

En la Figura 5 se presenta el diagrama de flujo de la metodología seguida en el presente estudio, como la aplicación del modelo hidrológico distribuido TETIS, así como el análisis de la variabilidad hidrológica en la unidad hidrográfica Río Pindo, el proceso es el siguiente: (1) Recopilación de información básica, (2) Preparación de *inputs* y aplicación del modelo hidrológico TETIS, (3) Simulación de caudales y (4) Análisis de la variabilidad hidrológica.



**Figura 5: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el presente estudio.**

### 3.3.1 Sistematización y procesamiento de información básica

En el presente estudio, la escala temporal en la modelación hidrológica fue diaria ( $\Delta t = 1$  día), y la escala espacial correspondió a un tamaño de celda de 90 m x 90 m. La información hidrometeorológica con series temporales de lluvia, caudal y temperatura requirió una codificación para ajustarla al formato CEDEX (datos en fila), compatible con el modelo hidrológico TETIS en el periodo de análisis del 01 de enero del 1975 al 31 de diciembre del 2008. A continuación se presenta la descripción de la información requerida para el desarrollo del estudio.

### 3.3.2 Precipitación, temperatura y caudal

Para el modelamiento hidrológico del Río Pindo se utilizó series hidrometeorológicas proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) a escala diaria. Las estaciones y su ubicación se pueden visualizar en el cuadro 3:

**Cuadro 3: Estaciones climáticas e hidrométricas usadas en el estudio**

Estación	Provincia	Tipo de Estación	Localización		Altitud (msnm)	Periodo registrado
			E (m)	N(m)		
Ayapamba	El Oro	PP	646917	9599769	1425	1999-2008
Balsas	El Oro	PP	630233	9583208	700	2000-2008
Prado	El Oro	PP	659656	9577144	850	2003-2008
San Lucas	Loja	PP	693086	9587311	2525	1990-2008
Saraguro	Loja	PP, T° (máx.-min)	696167	9600576	2525	1976-2008
Ushcurrumi	El Oro	PP	657393	9632801	290	1979-2008
Zaruma	El Oro	PP, T° (máx.-min)	653970	9590667	1100	1990-2008
Catacocha	Loja	PP	650235	9551207	1808	1975-2008
Gonzanamá	Loja	PP, T° (máx.-min)	673885	9531875	2042	1977-2008
Arenillas	El Oro	T° (máx.-min)	605084	9608573	26	2000-2008
Celica	Loja	T° (máx.-min)	616149	9545853	1904	1998-2008
Pasaje	El Oro	T° (máx.-min)	636774	9632736	40	1999-2008
Puente Puyango	El Oro	T° (máx.-min)	602051	9568410	305	2000-2008
Pindo	El Oro	Q	650312	9583294	520	1975-2008

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

Es importante subrayar que los registros de estas bases de datos suelen verse alterados por factores no climáticos (cambios en el entorno, en los aparatos de medición, etc.) que afectan al proceso de medición y pueden modificar la señal climática de las series de datos observados, por lo que para el presente estudio se realizó análisis de consistencias mediante pruebas estadísticas *F de Fisher* y *T de Student*.

Para la información hidrometeorológica se tomó en cuenta las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2015) por lo que se trabajó con nueve estaciones de precipitación, seis estaciones de temperatura y una estación de caudal las mismas que fueron ingresados en formato CEDEX en el modelo distribuido TETIS, primeramente se realizó una simulación con todo el registro de caudales históricos de enero 1975 a diciembre 2008, un total de 12419 datos, en esta primera simulación se identificó el período donde los picos y tendencia de los caudales simulados asemejen a los observados, siendo el periodo el considerado para calibración y validación del modelo TETIS de enero

2004 a agosto 2008. Luego de calibrar y validar el modelo TETIS se procedió a la etapa de simulación para determinar el comportamiento hidrológico de la zona de estudio.

### 3.3.3 Evapotranspiración de referencia

En la modelación se ha utilizado la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) a partir de la cual el modelo calcula la evapotranspiración real ( $ET_r$ ). Por definición la  $ET_o$  corresponde a la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cubierta vegetal estuvieran en condiciones óptimas. La  $ET_r$ , en cambio, es la producida realmente bajo las condiciones existentes en la unidad hidrográfica de estudio (FAO, 2006).

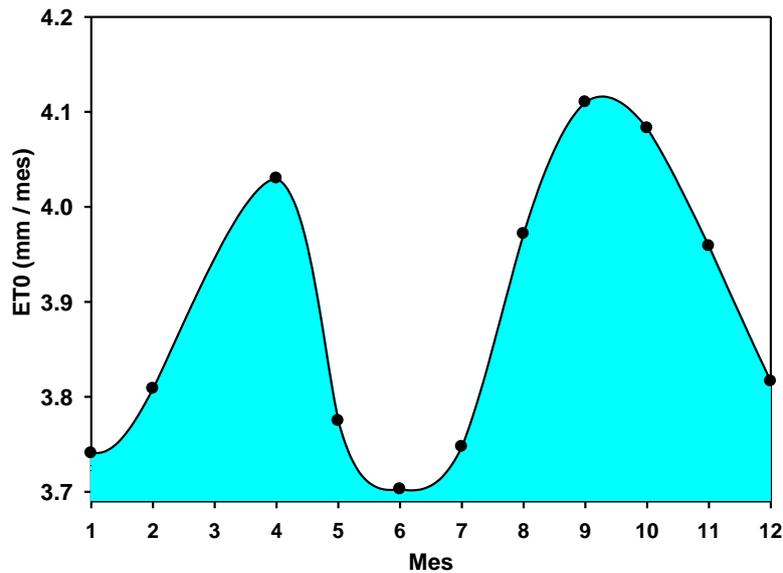
La evapotranspiración de referencia se obtuvo con la ecuación de Hargreaves que es una de las más sencillas ya que solo requiere datos de temperatura y la radiación extraterrestre tabulada  $R_a$ . La ecuación se detalla a continuación:

$$ET_o = 0.135 * KT * (T_{med} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} * R_a$$

donde:  $ET_o$ = evapotranspiración de referencia, mm/día;  $T_{med}$ = temperatura media diaria, °C;  $T_{max}$ = temperatura diaria máxima, °C;  $T_{min}$ = temperatura diaria mínima, °C;  $KT$ = coeficiente;  $R_a$  = radiación solar extraterrestre, convertida en mm/día (tabulada).

El coeficiente  $KT$  es un coeficiente empírico, para el caso del presente estudio se usó el valor de  $KT=0.162$  para regiones del interior (estaciones de la provincia de Loja) y  $KT=0.19$  para regiones costeras (estaciones en la provincia del Oro). Para el cálculo de la radiación solar extraterrestre, se usó la “Tabla de Radiación solar extraterrestre”, esta tabla está en mm/día en función de la latitud del lugar y del mes.

Tomando las series de temperatura y radiación solar se aplicó la ecuación de Hargreaves y se calculó la serie diaria de  $ET_o$  asumiendo como  $T_{med}$  el promedio entre la  $T_{max}$  y la  $T_{min}$ . Los valores de  $ET_o$  mensual se presentan en la figura 6.



**Figura 6: Evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) promedio calculada a partir del método de Hargreaves en la unidad hidrográfica Río Pindo.**

La ET<sub>0</sub> promedio mensual de la unidad hidrográfica del Río Pindo es de 3.9 mm, registrando valores bajos en el mes de junio con 3.7 mm y el valor más alto en el mes de octubre con 4.1 mm.

### 3.3.4 Índice de cobertura vegetal ( $\lambda$ )

Representa el comportamiento del ciclo vegetativo de la cubierta vegetal y es usado por el modelo para evaluar la variabilidad en el ciclo anual de la evapotranspiración de referencia. Es importante señalar que para calcular la evapotranspiración de los cultivos, además de la ET<sub>0</sub> es necesario determinar el coeficiente cultivo o K<sub>c</sub>, llamado también factor de vegetación, ya que no se evalúa solo cultivos sino todo tipo de coberturas (Ramírez, 2012). El modelo TETIS calcula la evapotranspiración real a partir del ingreso en formato CEDEX de los valores diarios de evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo K<sub>c</sub> mensual, a continuación se presenta los factores de vegetación en base a las coberturas mencionada en la figura 8.

**Cuadro 4: Valores mensuales de  $K_c$  para las coberturas presentes en la unidad hidrográfica Río Pindo**

Coberturas	Factores $K_c$											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Montaña de pino	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7
Montaña matorral	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6
Secano arborizado	0.2	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.4	0.2
Secano no arborizado	0.2	0.2	0.2	0.4	0.7	0.7	0.7	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2
Regadío	0.2	0.2	0.5	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.2
Frutales	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Hortalizas	0.2	0.2	0.5	0.8	0.9	0.9	1.1	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2
Ríos	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Pastizales	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Urbano	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Vegetación escasa	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

Fuente: Elaborado con el mapa de cobertura del MAGAP (2014), a partir de la metodología de *Corine Land Cover* (2000) (Ramírez, 2012).

Los valores finales de estos parámetros corresponden a los parámetros efectivos del modelo, resultado de la corrección global de posibles errores de cálculo en el proceso de calibración.

### 3.3.5 Información espacial

Obtenida la información en el formato *shape* seguidamente se procesó al formato *ráster* con la ayuda de las herramientas de Arg Gis para convertirlos al formato *ascii* y mediante un pre procesamiento y codificación ajustarlos al formato CEDEX.

Además de la información hidrometeorológica, el modelo TETIS requiere una estructura de parámetros que describa la variabilidad espacial de las características de los suelos, del sustrato y de la cubierta vegetal representada mediante la estimación de mapas de parámetros a partir de información medioambiental disponible, de esta manera para representar las características físicas de la unidad hidrográfica, se usó información cartográfica estándar de libre acceso en el geportal de la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, los parámetros estimados son los siguientes:

#### a. Parámetros derivados del modelo de elevación digital del terreno

En la figura 4 se puede observar el modelo de elevación digital del terreno de la unidad de estudio en el que el tamaño de celda es 90 m x 90 m. El tamaño de celda es adecuada para el área de estudio puesto que cuanto más información se tenga, se podrá usar un tamaño de

celda más pequeña pero en contrapartida se empleará un tiempo computacional mayor en la modelación. (Ramos, 2013).

A partir del modelo de elevación digital del terreno se derivaron mapas que representan las características geomorfológicas y topológicas en la red de drenaje necesario para el modelo TETIS: mapa de pendientes; mapa de velocidad de flujo en ladera; mapa de dirección de flujo; y mapa de celdas acumuladas.

#### **b. Parámetros derivados del mapa de textura**

Otra capa adicional de información de suelos disponible para el estudio es la clasificación cualitativa de la textura del suelo tomada del geoportal del SNI (2016), la cual hace referencia a tres categorías de textura que corresponden a clases texturales fina, media gruesa según el *US Soil Conservation Service* (1972), como se muestra en la figura 7.

En términos generales se puede decir que en la unidad hidrográfica Río Pindo predominan suelos con textura fina, media y gruesa, esta última en menor porcentaje lo que indica que existen suelos arcillosos, suelos francos y suelos arenosos. A partir del mapa de textura se elaboró el ráster de conductividad hidráulica del suelo  $K_s$ .

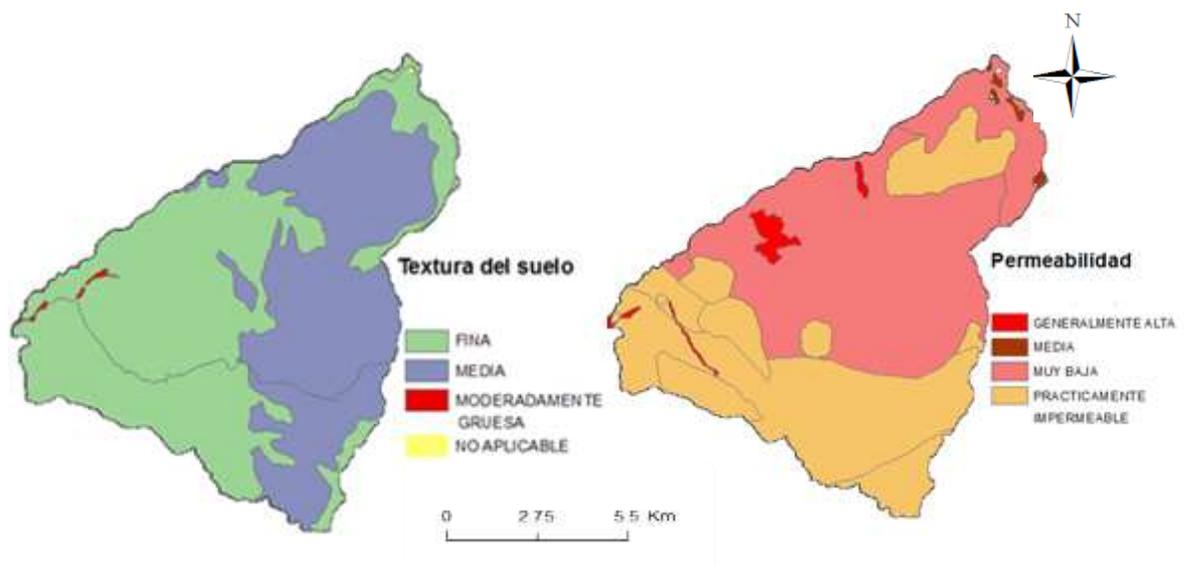
#### **c. Parámetros derivados del mapa de permeabilidad**

Se usó el mapa hidrogeológico del geoportal del SNI (2016), a escala 1:250000. Las categorías cualitativas de permeabilidad del substrato rocoso son: permeabilidad alta, media, muy baja y prácticamente impermeable. Con la información del mapa de permeabilidad se obtuvo el ráster de conductividad hidráulica del acuífero  $K_p$ . En la figura 7 se muestra la clasificación para la unidad de estudio.

#### **d. Parámetros derivados del mapa de cobertura vegetal**

Para estimar los parámetros de caracterización del suelo se usó la metodología de clasificación de Corine Land Cover 2000, en base al mapa de cobertura y uso de la tierra Ministerio de Agricultura del año 2014. Se agrupó la información de usos del suelo en diferentes categorías, para simplificar la gran variedad de aprovechamientos que se le da al suelo (Ramírez, 2012). La clasificación es la siguiente y se puede visualizar en la figura 8.

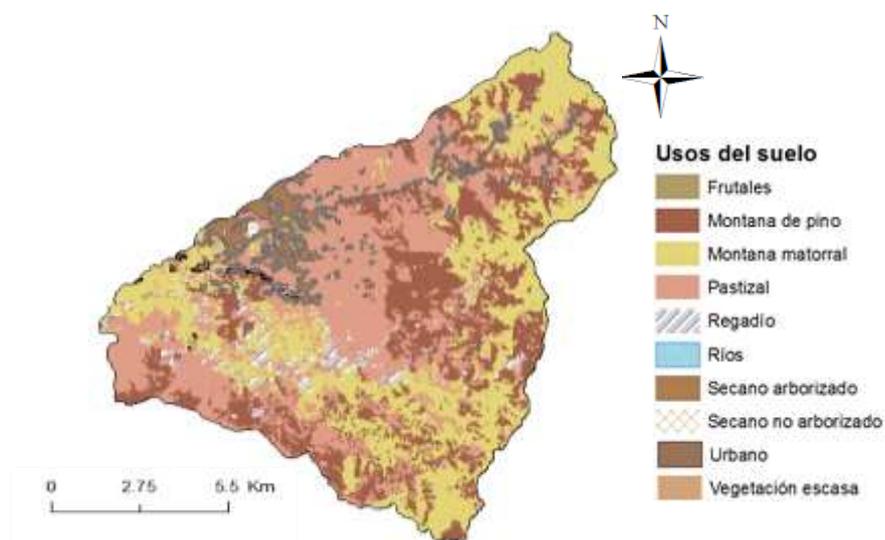
- Montaña matorral: Se le asigna tres tipos de cobertura, vegetación arbustiva, herbácea y páramo.
- Montaña de Pino: En esta categoría se incluye bosques de coníferas, bosques mixtos.
- Vegetación escasa: Todo espacio que este ocupado por roca o donde no exista ningún tipo de vegetación.
- Pastizales: Dentro de esta categoría se incluye toda área cuya vegetación predominante consiste en hierbas y pastizales.
- Regadío: Cultivos regados permanente o periódicamente, usando una infraestructura permanente (canales de riego, redes de drenaje). La mayoría de estos cultivos no pueden cultivarse sin un aporte artificial de agua.
- Frutales: Parcelas plantadas con árboles frutales y terrenos principalmente agrícolas.
- Ríos: En esta categoría se incluye toda superficie de agua como ríos.
- Urbano: La mayor parte del suelo está cubierto de estructuras asociadas con tejido urbano.
- Hortalizas: Se agrupo a los cultivos de ciclo corto que se cultivan en el Río Pindo.
- Secano arborizado: Zonas donde predominan cultivos donde su desarrollo se expande a lo largo de todo el ano.
- Secano no arborizado: Se tomó en cuenta las zonas del Rio Pindo que tienen cultivos herbáceos, con una cantidad de recubrimiento de la superficie pequeña.



**Figura 7: Variación espacial de la textura del suelo (izquierda), y permeabilidad del suelo (derecha) en la unidad hidrográfica Río Pindo.**

**Fuente: SNI (2016).**

A continuación en la figura 8 se presenta el mapa que muestra la variabilidad espacial de los principales aprovechamientos del suelo en la unidad hidrográfica Río Pindo.



**Figura 8: Variación espacial de los usos del suelo y su distribución en la unidad hidrográfica Río Pindo.**

**Fuente: SNI (2016).**

Según la distribución de uso del suelo en la unidad hidrográfica Río Pindo el mayor porcentaje de cobertura vegetal corresponde a pastizales (35.79 por ciento), seguida de montaña matorral (31.4 por ciento), montaña de pino (24.1 por ciento) y en menor proporción secano arborizado (4.62 por ciento), regadío (2.67 por ciento), el resto lo constituyen categorías con muy bajo porcentaje como frutales (0.86 por ciento); urbano (0.28 por ciento); ríos y vegetación escasa (0.01 por ciento); y secano no arborizado (0.23 por ciento).

La mayor cobertura corresponde a pastizales, por lo que es importante tomar medidas de conservación del bosque natural y páramo existentes en la zona de estudio con el fin de evitar la erosión del suelo y mantener la cobertura vegetal para evitar problemas de inundaciones y sequías en la parte media y baja del Río Pindo.

#### **e. Intercepción y almacenamiento superficial**

No siempre la cantidad de lluvia precipitada llega a escurrir superficialmente por el terreno, muchas veces una parte suele ubicarse en la superficie y se almacena como charcos y otra parte se pierde a la atmósfera, por lo que no hacen parte de la escorrentía. (Francés *et al.*, 2014).

La intercepción se refiere al contenido de agua retenida por la vegetación por medio de la intercepción de la precipitación, es decir, el agua lluvia que se queda en la vegetación y que se evapora desde la superficie de las plantas y no alcanza el suelo, por otro lado el almacenamiento superficial es el contenido de agua almacenado a causa de la rugosidad del terreno, en los dos casos tanto la intercepción como almacenamiento superficial no hacen parte de la escorrentía y en TETIS forma parte de la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo ( $H_u$ ) (Francés *et al.*, 2014).

Para estimar la intercepción se tomó en cuenta la vegetación existente de acuerdo a las coberturas de uso del suelo presentes en la zona de estudio y para el almacenamiento superficial a más de usar los mapas de usos del suelo, se tomó en cuenta la pendiente del terreno. A continuación se presenta los valores de intercepción y almacenamiento superficial para cada cobertura del suelo en el Río Pindo.

**Cuadro 5: Intercepción y almacenamiento superficial para diferentes coberturas**

Clasificación usos del suelo	Clasificación CLC 2006	Prof. Raíces (m)	Almac. Superf (mm)	Intercep (mm)
Montaña matorral	Vegetación arbustiva	0.7	5.0	5.0
	Vegetación herbácea	0.7	5.0	5.0
	Páramo	0.7	6.0	3.0
Montaña de pino	Bosque natural	1.0	4.0	9.0
	Cultivo de café	0.8	6.0	1.0
Secano arborizado	Arboricultura tropical	1.5	6.0	1.0
	Cultivo de maíz	0.7	6.0	1.0
Secano no arborizado	Cultivo de caña	0.5	6.0	1.0
	Frutales	1.5	6.0	1.0
Hortalizas	Cultivos de ciclo corto	0.6	4.0	9.0
Ríos	Cuerpo de agua natural	0.0	0.0	0.0
Pastizales	Pastizales	0.6	6.0	3.0
Vegetación escasa	Sin cobertura vegetal	0.0	3.0	0.0
Urbano	Tejido urbano discontinuo	0.1	5.0	3.0

Fuente: Elaborado con el mapa de cobertura del MAGAP (2014), a partir de la metodología de *Corine Land Cover* (2000) (Ramírez, 2012).

### 3.3.6 Calibración y validación del modelo TETIS

Los parámetros del modelo son ajustados a través de nueve factores correctores, los cuales pueden ser calibrados manualmente o de manera automática. Por lo tanto la mayor virtud del modelo TETIS radica en la representación de la variabilidad espacial de las características físicas de la unidad hidrográfica y en el uso de una estructura separada de factores correctores para la calibración de parámetros efectivos Ramos (2012). Los nueve parámetros del TETIS

permitirán calibrar los *inputs* de entrada para la modelación de la unidad hidrográfica del Río Pindo. A continuación se presentan los parámetros para la calibración manual y automática del modelo TETIS.

**Cuadro 6: Parámetros y factores correctores del modelo distribuido TETIS**

Parámetros	FC	Expresión
Almacenamiento capilar del suelo	FC1	$H^*u=FC1 \cdot Hu$
Índice de cubierta vegetal	FC2	$\Lambda^*=FC2 \cdot \lambda_v$
Capacidad de infiltración	FC3	$K^*s=FC3 \cdot ks$
Velocidad en ladera	FC4	$U^*=FC4 \cdot u$
Capacidad de percolación	FC5	$K^*p=FC5 \cdot kp$
Conductividad hidráulica del interflujo	FC6	$K^*ss=FC6 \cdot kss$
Capacidad de pérdidas del acuífero	FC7	$K^*pp=FC7 \cdot ksa$
Conductividad hidráulica del acuífero	FC8	$K^*b=FC8 \cdot kps$
Velocidad en cauce	FC9	$V(t)^*=FC9 \cdot v(t)$

Fuente: Francés *et al.* (2014).

El modelo tiene un potente algoritmo de optimización “*Shuffled Complex Evolution-University of Arizona*” (SCE-UA) para calibración automática de sus parámetros, que permite de forma global una corrección rápida y ágil de los diferentes procesos representados. El objetivo de este método de optimización es buscar el conjunto óptimo de parámetros que minimicen una función objetivo, para luego comparar alguna variable observada contra la simulada por el modelo, usualmente el caudal de salida. Más información sobre la aplicación del algoritmo SCE-UA en la calibración automática del modelo TETIS se remite al lector a: Francés *et al.* (2014).

Ramos (2013) recomienda realizar calibración manual antes que calibración automática ya que si no habrá un elevado número de interacciones realizadas por el algoritmo SCE-UA para converger a la solución, lo cual tiene repercusión directa en el tiempo de cómputo de la optimización, para lo cual recomienda primero manualmente ajustar el flujo base, luego ajustar el error en el volumen que es más sensible a las condiciones iniciales de humedad en el tanque estático, acuífero y cauce; para finalmente realizar la calibración automática con la función objetivo al índice de *Nash-Sutcliffe*, que es más sensible a los caudales picos. Reduciéndose así, el tiempo de cómputo en el proceso de optimización automática.

Según Ramos (2013), en TETIS existen funciones objetivo que pueden usarse para calibración automática y validación del rendimiento del modelo, así tenemos: índice de

eficiencia de *Nash–Sutcliffe* (NSE), error cuadrático normalizado (RSR) y error en el volumen (EV). El índice de *Nash–Sutcliffe* (E), es la relación entre el error cuadrático medio de los valores simulados y la varianza en los datos observados, restado de la unidad. Sus valores adimensionales varían de menos infinito a uno. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$E = 1 - \frac{MSE^{sim}}{MSE^{obs}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{promedio})^2}$$

donde:  $MSE^{obs}$ ,  $MSE^{sim}$ , son los errores cuadráticos medios de los datos observados y simulados;  $Y^{obs}$ ,  $Y^{sim}$ , son los datos observados y simulados en el tiempo t;  $Y^{promedio}$  es el valor promedio de los datos observados; n es el número de intervalos temporales.

El índice RSR, es otro estadístico normalizado del error que relaciona la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar de las observaciones; cuyos valores adimensionales varían de cero al infinito El RSR se calcula con la siguiente ecuación:

$$RSR = \frac{RMSE^{sim}}{STDEV^{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{promedio})^2}}$$

donde:  $RMSE^{sim}$  es el error cuadrático medio de los datos observados y simulados;  $STDEV^{obs}$  es la desviación estándar de los datos observados;  $Y^{obs}$ ,  $Y^{sim}$ , son los datos observados y simulados en el tiempo t;  $Y^{promedio}$  es el valor promedio de los datos observados; n es el número de intervalos temporales.

El error en volumen (Ev) como índice de eficiencia de la lluvia, no es una medida de la diferencia de descarga como salida hipotética de un modelo de precipitación-escorrentía, sino más bien una conversión de la lluvia de mm/d a m<sup>3</sup>/d, según la dimensión de la cuenca. Su valor se representa en porcentaje y se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_v = \frac{V^{obs} - V^{sim}}{V^{sim}} * 100$$

donde:  $V^{obs}$ ,  $V^{sim}$  son los volúmenes de los datos observados y simulados.

### 3.3.7 Variabilidad climática e hidrológica en el Río Pindo

Se evaluó la variabilidad climática e hidrológica en la unidad hidrográfica Río Pindo a través de los siguientes índices usados por la The Nature Conservancy (TNC) donde se aplicó RCLimdex, para analizar la temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y precipitación diaria en la Costa y Depresión Central de Chiapas México (2013-2014). En el cuadro 7 se presenta un resumen de los 27 índices de RCLimdex que fueron utilizados en el presente estudio y se describen a continuación:

**Cuadro 7: Resumen de los 27 índices de RCLimdex usados en el estudio**

Índice	Descripción
Días de frío extremo (FD)	Este índice permite conocer el número de días del año que presentan una temperatura mínima que es menor a un umbral previamente establecido de 0°C. Para este estudio se seleccionaron los valores mínimos de las temperaturas mínimas registradas en los 10 primeros años de análisis ( $T_{min10años}$ , °C).  Dada $T_{nij}$ la temperatura mínima diaria en el día $i$ en el periodo $j$ , se cuenta el número de días cuando: $T_{nij} < T_{min10años}$
Días de calor extremo (SU)	Este índice se diseñó originalmente para contabilizar el número de días con una temperatura máxima mayor a 25 °C. Para este estudio se seleccionaron los valores máximo de las temperaturas máximos registradas en los 10 primeros años de análisis.  Si $T_{xij}$ representa la temperatura máxima diaria en el día $i$ periodo $j$ se cuenta el número de días cuando: $T_{xij} > T_{max10años}$
Días de temperatura máxima muy fría (ID)	El índice ID ( <i>ice days</i> ) fue diseñado para contabilizar los días de hielo cuando la temperatura máxima sea menor a 0°C. Dado que en la zona de estudio no se presentan temperaturas cercanas a cero, se usaron los valores mínimos registrados para la temperatura máxima de los 10 primeros años de registro ( $T_{maxmin10años}$ , °C). Si $T_{xij}$ es la temperatura máxima diaria en el día $i$ en el periodo $j$ , se cuenta el número de días cuando: $T_{xij} < T_{maxmin10años}$
Noches tropicales (TR)	Para definir el número de noches tropicales, se usaron los umbrales de temperatura mínima que se establecen a partir del mayor valor de temperatura mínima registrado en los 10 primeros años ( $T_{minmax10años}$ , °C).  Sea $T_{nij}$ la temperatura mínima diaria en el día $i$ en el periodo $j$ , se contabiliza el número de días cuando: $T_{nij} > T_{minmax10años}$
Duración de la estación de cultivo (GSL)	Para definir la duración de la estación de cultivo se cuentan los días cuando la temperatura media es mayor a 5°C. Todos los días del año en la zona de estudio, la temperatura es mayor a 5°C, por lo que no se utilizan los resultados de este índice. Si $T_{ij}$ es la temperatura media en el día $i$ en el periodo $j$ , se cuenta el número de días entre la primera ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con: $T_{ij} > 5^{\circ}C$ Y la primera ocurrencia después de 1 <sup>st</sup> Julio (1 <sup>st</sup> Enero en HS) de por lo menos 6 días consecutivos con: $T_{ij} < 5^{\circ}C$
Máxima temperatura máxima (TXx)	Este índice sirve para definir el máximo valor de temperatura identificado en la temperatura máxima diaria registrada por cada mes. Donde $T_{xkj}$ es

Máxima temperatura mínima (TNx)	<p>la temperatura máxima diaria en el mes <math>k</math>, periodo <math>j</math>. Entonces, la máxima temperatura máxima diaria de cada mes es: <math>TX_{kj} = \max(Tx_{kj})</math></p> <p>La máxima temperatura mínima, medida en grados centígrados, se establece a partir del valor más alto de temperatura mínima diaria registrado en cada mes. Siendo <math>Tn_{kj}</math> la temperatura mínima diaria en el mes <math>k</math>, periodo <math>j</math>, se define que la máxima temperatura mínima diaria cada mes es:</p> $TN_{kj} = \max(Tn_{kj})$
Mínima temperatura máxima (TXn)	<p>Define el valor mínimo (°C) que se registra cada mes dentro de las temperaturas máximas. Donde <math>Tx_{kj}</math> es la temperatura máxima diaria en el mes <math>k</math>, periodo <math>j</math>, entonces la mínima temperatura máxima diaria cada mes es:</p> $TXn_{kj} = \min(Tx_{kj})$
Mínima temperatura mínima (TNn)	<p>La mínima temperatura mínima en grados centígrados se obtiene a partir del menor valor de temperatura mínima registrado en cada mes. Donde <math>Tn_{kj}</math> es la temperatura mínima diaria en el mes <math>k</math>, periodo <math>j</math>, entonces la mínima temperatura mínima diaria en cada mes es:</p> $TNn_{kj} = \min(Tn_{kj})$
Noches frías (TN10p)	<p>El indicador de noches frías permite conocer el número de días al año que presentan valores de temperaturas mínimas muy bajas, registradas dentro del rango del percentil 10. Donde, <math>Tn_{ij}</math> es la temperatura mínima diaria en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math> y <math>Tn_{in10}</math> el día calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5-días<sup>1</sup>. El porcentaje del tiempo se define como:</p> $Tn_{ij} < Tn_{in10}$
Días fríos (TX10p)	<p>Si los valores de temperatura máxima registrados se encuentran dentro del percentil 10 y por lo tanto son valores muy bajos, entonces se considera que ese registro corresponde a un día frío. Este índice cuenta los días fríos donde <math>Tx_{ij}</math> es la temperatura máxima diaria en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math> y <math>Tx_{in10}</math> es el día calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5-días<sup>2</sup>, entonces:</p> $Tx_{ij} < Tx_{in10}$
Noches calientes (TN90p)	<p>Se consideran noches calientes a los días donde se registran datos de temperaturas mínimas que alcanzan valores altos ubicados dentro del percentil 90. Se obtienen contabilizando los días que alcanzan este percentil 90, donde <math>Tn_{ij}</math> la temperatura mínima diaria en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math> y <math>Tn_{in90}</math> es el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5-días<sup>2</sup>. El porcentaje de días se define como:</p> $Tn_{ij} > Tn_{in90}$
Días calientes (TX90p)	<p>Los días calientes son aquellos que presentan valores altos de temperatura máxima y se establecen a partir del número de días que la temperatura máxima presenta registros ubicados dentro del percentil 90. Donde <math>Tx_{ij}</math> es la temperatura máxima diaria en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math> y <math>Tx_{in90}</math> es el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5-días<sup>2</sup>. Los días calientes se definen como:</p> $Tx_{ij} > Tx_{in90}$

Indicador de la duración de periodos calientes (WSDI)	<p>Se define a partir del número de periodos con por lo menos 6 días consecutivos con temperaturas máximas dentro del percentil 90. Si <math>Tx_{ij}</math> es la temperatura máxima diaria en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math> y <math>Tx_{in90}</math> es el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5-días<sup>2</sup>, se suma el número de días por periodo donde <math>Tx_{ij} &gt; Tx_{in90}</math> durante 6 días consecutivos.</p>
Indicador de la duración de periodos fríos (CSDI)	<p>Sea <math>Tn_{ij}</math> la temperatura mínima diaria en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math> y sea <math>Tn_{in10}</math> el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5-días (calculado usando el método del Anexo D). Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos: <math>Tn_{ij} &lt; Tn_{in10}</math></p>
Rango diurno de temperatura (DTR)	<p>Establece la diferencia media mensual entre la temperatura máxima y la temperatura mínima. Donde <math>Tx_{ij}</math> y <math>Tn_{ij}</math> representan las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math>. Si <math>I</math> representa el número de días en <math>j</math>, entonces:</p> $DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I}$
Cantidad máxima de precipitación en un día (RX1day)	<p>Este índice permite conocer la máxima precipitación en un día (mm) dentro de cada mes. Donde <math>RR_{ij}</math> es el total diario de precipitación en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math> y los valores máximos de precipitación en 1 día para el periodo <math>j</math> se definen como: <math>Rx1day_j = \max(RR_{ij})</math></p>
Cantidad máxima de precipitación en 5 días (RX5day)	<p>Este índice sirve para obtener la cantidad máxima de precipitación (mm) que se presenta en 5 días consecutivos dentro de cada mes. Donde <math>RR_{kj}</math> es la cantidad de precipitación para el intervalo de cinco días terminando en <math>k</math>, periodo <math>j</math>. Entonces los valores máximos de precipitación durante 5 días para el periodo <math>j</math> son: <math>Rx5day_j = \max(RR_{kj})</math></p>
Índice simple de intensidad diaria (SDII)	<p>Para definir cambios en la intensidad de las precipitaciones (mm/día) se obtiene este índice que permite medir la intensidad a partir de la cantidad de lluvia anual dividida para el número de días húmedos (<math>PRCP \geq 1.0mm</math>). Si <math>RR_{wj}</math> es la cantidad diaria de precipitación en días húmedos, <math>w(RR \geq 1mm)</math> en el periodo <math>j</math> y <math>W</math> representa el número de días húmedos en <math>j</math>, entonces:</p> $SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W}$
Número de días con precipitación intensa (R10)	<p>Este indicador sirve para identificar el número de días que la precipitación es mayor o igual a 10mm. Este umbral de precipitación define la intensidad de lluvia diaria, siendo los días con precipitación igual o mayor a 10mm los</p>

	<p>que se consideran de lluvias intensas. Dado que <math>RR_{ij}</math> es la cantidad diaria de precipitación en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math>, se cuenta el número de días donde:</p> $RR_{ij} \geq 10mm$ <p>Para definir las lluvias muy intensas se establece un umbral de 20mm de precipitación diaria. Este índice sirve para contar el número de días donde</p>
Número de días con precipitación muy intensa (R20)	<p>la precipitación diaria es mayor o igual al umbral. Si <math>RR_{ij}</math> es la cantidad diaria de precipitación en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math>, se cuenta el número de días donde:</p> $RR_{ij} \geq 20mm$
Número de días sobre 10,5 mm (R10,5)	<p>Sea <math>RR_{ij}</math> la cantidad diaria de precipitación en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math>. Si <math>nn</math> representa cualquier valor razonable de precipitación diaria entonces, cuente el número de días donde:</p> $RR_{ij} \geq nnmm$ <p>Los días secos consecutivos son aquellos que presentan una precipitación igual o menor a 1mm diario. Este índice sirve para contar el mayor número</p>
Días secos consecutivos (CDD)	<p>de días consecutivos que superan o igualan el umbral señalado. Si <math>RR_{ij}</math> es la cantidad diaria de precipitación en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math>, se cuenta el más grande número de días consecutivos donde:</p> $RR_{ij} < 1mm$ <p>Los días que presentan una precipitación mayor o igual a 1mm se consideran húmedos. Este índice permite conocer el mayor número de días húmedos</p>
Días húmedos consecutivos (CWD)	<p>consecutivos que tienen precipitación igual o mayor a 1mm. Dado que <math>RR_{ij}</math> es la cantidad diaria de precipitación en el día <math>i</math> en el periodo <math>j</math>, se cuenta el más grande número de días consecutivos donde:</p> $RR_{ij} \geq 1mm$
Días muy húmedos (R95p)	<p>Para definir los días muy húmedos se seleccionan aquellos días que presentan precipitación mayor a 1mm y que además registran una precipitación que se ubica dentro del percentil 95 de todos los datos de precipitación. Los datos dentro del percentil 95 son valores muy altos de precipitación dentro de todos los datos registrados. Si <math>RR_{wj}</math> es la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo <math>w(RR \geq 1.0mm)</math> en el periodo <math>j</math>, <math>RR_{wn95}</math> es el percentil 95 de precipitación en los días húmedos, <math>W</math> representa el número de días húmedos entonces:</p> $R95 p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn95}$
Días extremadamente húmedos (R99p)	<p>Este índice cuenta los días que presentan valores extremadamente altos de precipitación y que representan datos dentro del percentil 99. Aquellos días húmedos con precipitación mayor a 1mm y que tengan registros dentro del percentil 99, se contabilizan en este índice. Dado que <math>RR_{wj}</math> es la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo <math>w(RR \geq 1.0mm)</math> en el periodo <math>j</math>, <math>RR_{wn99}</math> es el percentil 99 de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990 y <math>W</math> representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:</p> $R99 p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn99}$

Precipitación total anual en los días húmedos (PRCPTOT)

Este índice sirve para conocer la cantidad de precipitación que se acumula durante un año (mm), contando únicamente los días húmedos. Dado que  $RR_{ij}$  es la cantidad diaria de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $J$ ,  $I$  representa el número de días en  $J$ , entonces:

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}$$

\*C95P (Caudal anual total en que CC>95percentil

Registra caudales que se ubican dentro del percentil 95. Los datos dentro del percentil 95 son valores muy altos de caudal dentro de todos los datos registrados.

\*C99P (Caudal anual total en que CC>99percentil

Este índice cuenta los días que presentan valores extremadamente altos de caudal y que representan datos dentro del percentil 99. Aquellos días con caudales mayor a 1mm y que tengan registros dentro del percentil 99, se contabilizan en este índice.

*\*Índices de precipitación adaptados para analizar caudal en el presente estudio.*

---

Fuente: Elaborado con información de The Nature Conservancy (TNC, 2014).

A través de los índices analizados, se determinó primero la influencia de la variabilidad climática en estaciones que presentan datos de precipitación y temperatura que son las variables que el lenguaje de programación necesita para el análisis, en el caso del presente estudio se seleccionó las estaciones Saraguro, Gonzanamá y Zaruma ubicadas en la parte alta, media y baja respectivamente en la unidad de estudio, y para analizar la variabilidad hidrológica se adaptó los índices de precipitación que tenían relación con caudal de la estación Pindo AJ Amarillo, siendo solamente los índices C95P (caudales dentro del percentil 95) y C99P (caudales dentro del percentil 99).

Los valores de referencia que se requieren para el análisis de los índices se obtuvieron de los registros diarios de los 10 primeros años de estudio (1975-1984). A continuación se presentan los valores máximos de precipitación diaria que se registran en el 90% de las precipitaciones (se elige el 90% para eliminar valores extremos poco frecuentes), los valores máximos y mínimos de la temperatura máxima y los valores máximos y mínimos diarios registrados en la temperatura mínima:

**Cuadro 8: Valores de referencia usados en el análisis de variabilidad climática con R climdex**

Estación	PRCP 90P	Temperatura máxima °C		Temperatura mínima °C	
		Valor máximo	Valor mínimo	Valor máximo	Valor mínimo
Saraguro	57.6	26.2	11.6	23.9	4.0
Gonzanamá	91.0	34.7	16.3	19.0	5.0
Zaruma	97.2	36.0	19.0	19.3	11.0

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Sistematización de la información

#### 4.1.1 Caracterización de la información hidrometeorológica

El análisis de la precipitación se realizó a partir del promedio desde 1975 hasta 2008 de la precipitación mensual acumulada de las nueve estaciones utilizadas para la modelación en TETIS. La información procesada muestra que la precipitación total anual en la unidad hidrográfica Río Pindo es de 1165 mm. Los valores más altos de precipitación se presentan en los meses de enero a mayo en la época lluviosa, siendo el mes de marzo con 252 mm el que presenta las máximas precipitaciones y valores menores de precipitación en la época de verano a partir del mes de julio o agosto con 4.58 mm. En la figura 9 se observa la precipitación total anual de las estaciones Gonzanamá, Saraguro y Zaruma y su distribución en los meses del año.

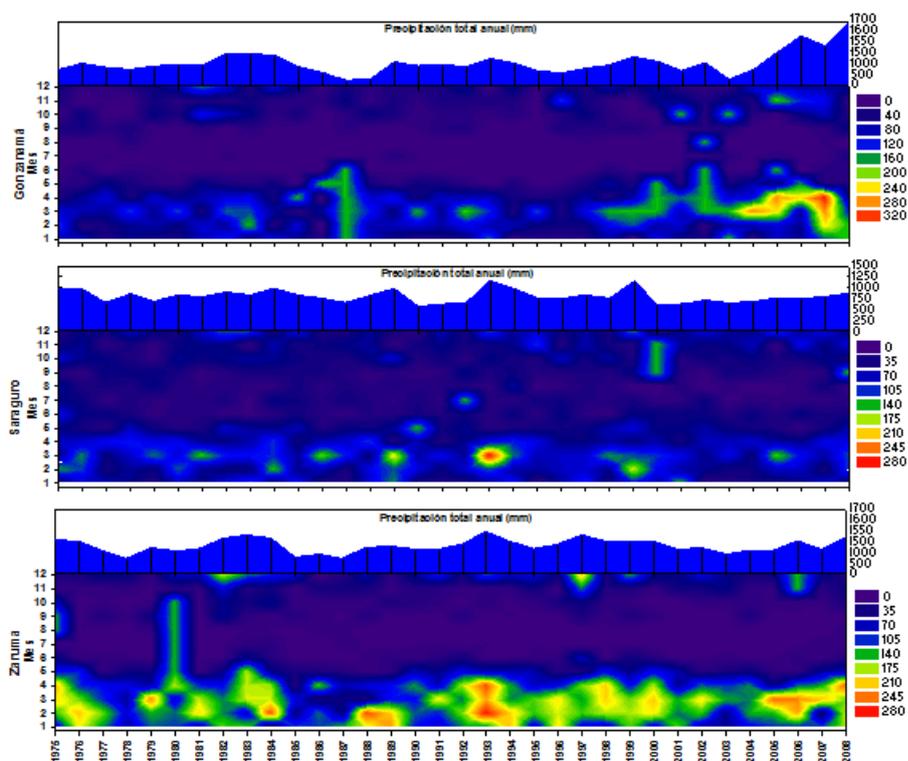
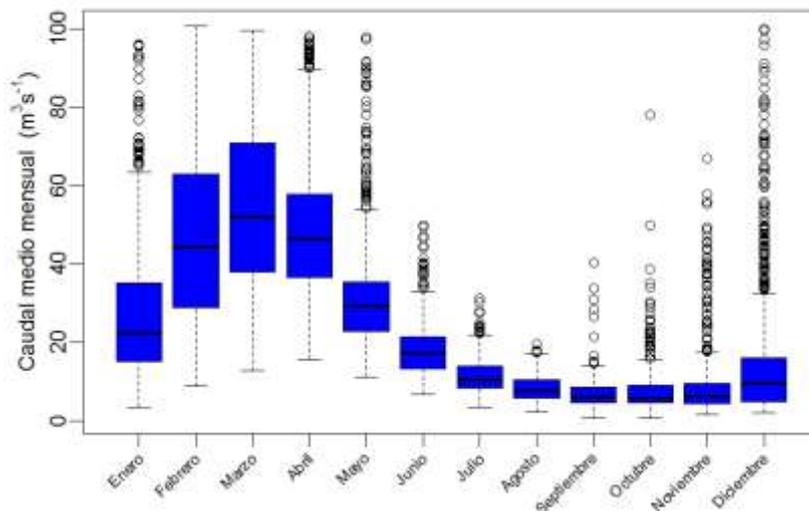


Figura 9: Variación temporal de la precipitación a escala mensual y anual para el periodo: enero de 1975 a diciembre de 2008 en las estaciones Gonzanamá, Saraguro y Zaruma.

Se observa un aumento gradual de la intensidad de la lluvia para la estación Gonzánama. La estación Saraguro parece ser la estación con menores lluvias a lo largo del periodo y Zaruma la de mayor precipitación con épocas de lluvias claramente contrastantes. La precipitación máxima se da en el mes de marzo, que representa el 21-27 por ciento de la escorrentía anual; la precipitación mínima se da en los meses de septiembre y octubre, representando el 1,5-2,3 por ciento de la escorrentía anual.

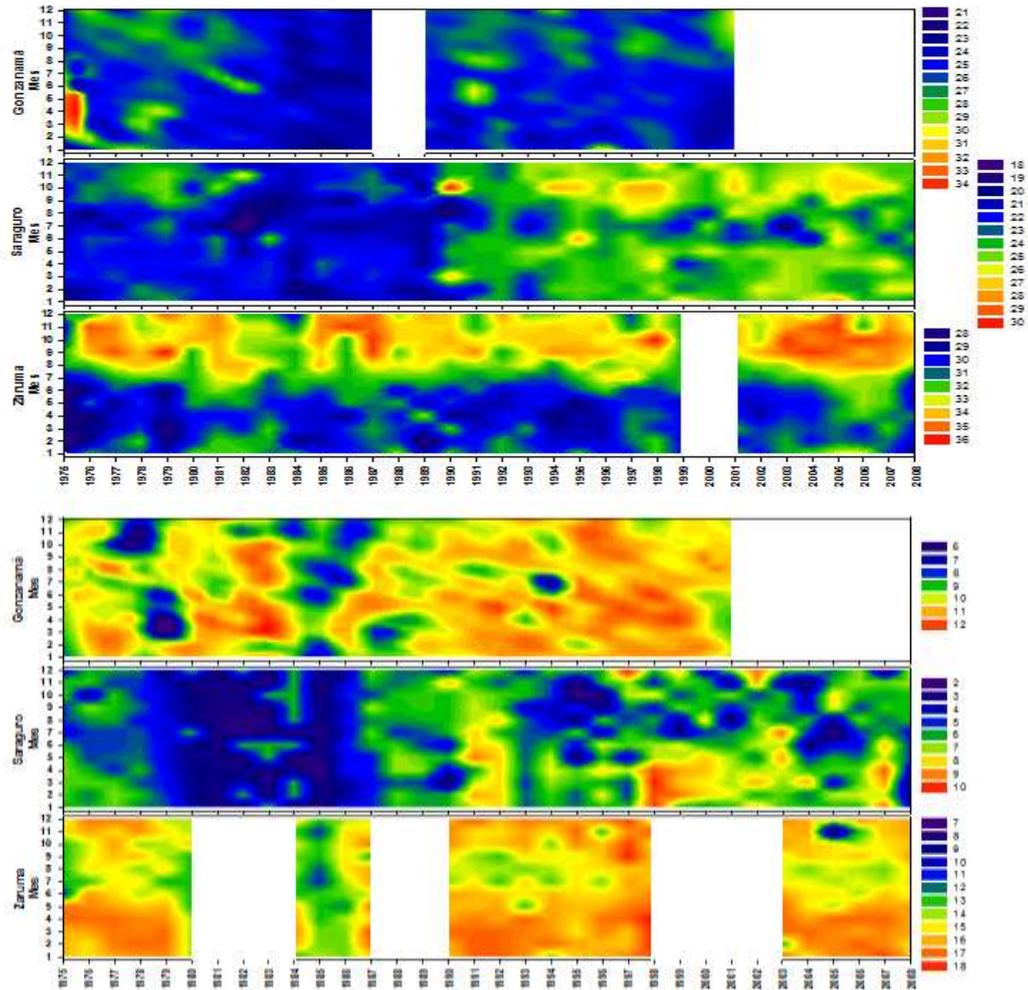
La serie de caudales observados fue tomada de la estación de aforo Pindo AJ Amarillo ubicada en la provincia de El Oro, en las coordenadas UTM (X: 650.312 ; Y: 9583294). En la figura 10 se observa la distribución de los datos y los caudales medios mensuales de la estación hidrométrica de estudio, donde el periodo húmedo se encuentra entre enero a mayo, y el periodo seco entre junio a diciembre. Las líneas negras representan las medias de los datos observados, las líneas discontinuas que se extienden hacia los extremos son los valores máximos y mínimos.



**Figura 10: Diagrama de cajas de los caudales diarios observados en la unidad hidrográfica Río Pindo. Periodo de análisis 01 de enero de 1975 al 31 de diciembre de 2008.**

Los caudales observados reportan épocas de alto caudal por lo menos una vez al año, que coincide con el mes de marzo.

Con la información disponible además se pudo establecer la temperatura máxima y mínima en las estaciones Gonzanamá, Saraguro y Zaruma:

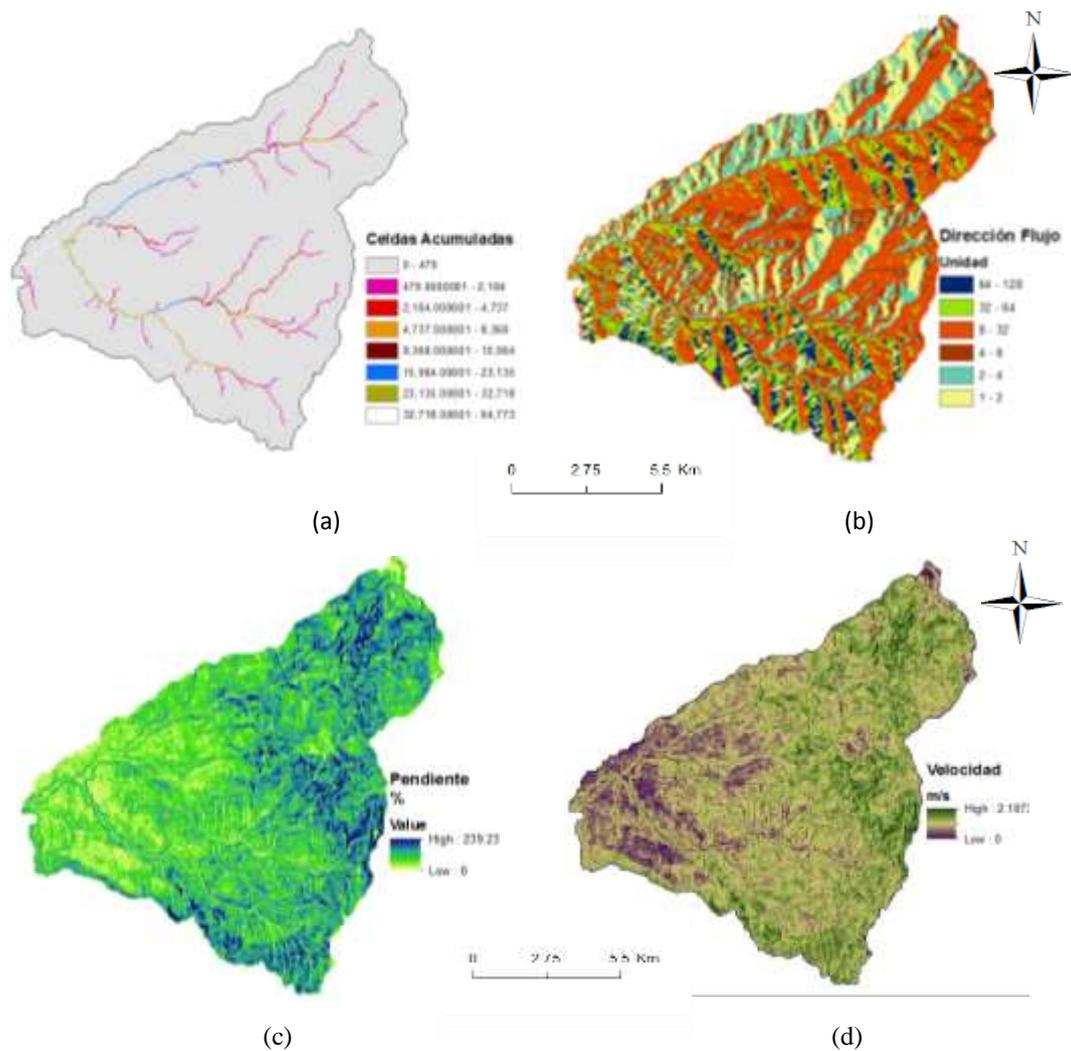


**Figura 11: Temperatura máxima y mínima diaria de las estaciones Gonzanamá, Saraguro y Zaruma en la unidad hidrográfica Río Pindo. Periodo de análisis 01 de enero de 1975 al 31 de diciembre de 2008.**

Esta figura resume gráficamente en una sola imagen el espectro completo de temperaturas, entre las observaciones más evidentes se destacan: diciembre a mayo los meses más calientes y de julio a noviembre el periodo con reducción de temperatura. La temperatura media varía entre 14 °C en la cabecera y 24 °C en la parte baja.

#### 4.1.2 Parámetros derivados del modelo de elevación digital del terreno

En la figura 12 se presentan los mapas derivados de la topografía para la unidad hidrográfica Río Pindo basados en el modelo de elevación digital del terreno.



**Figura 12: Mapas derivado del DEM tamaño de celda 90 x 90m a) mapa de celdas acumuladas; b) mapa de direcciones de flujo; (c) mapa de pendiente; d) y mapa de velocidad de flujo para la unidad hidrográfica Río Pindo.**

### 4.1.3 Parámetros hidráulicos del suelo

Los parámetros hidráulicos del suelo en Río Pindo son los siguientes:

-Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo,  $H_u$  (mm). Este mapa incluye el almacenamiento capilar del suelo y el almacenamiento superficial. Para obtener el almacenamiento estático del suelo ( $H_u$ ), se usó los datos del cuadro 5.

-Conductividad hidráulica del suelo,  $K_s$  (mm/h). Utilizada en los procesos de infiltración y en la estimación del interflujo. Este parámetro se estimó a partir del mapa de textura del geoportal del SNI (2016). Se asignó valores a cada unidad cartográfica según la clase de textura definida y se obtuvo el respectivo mapa del parámetro  $K_p$ .

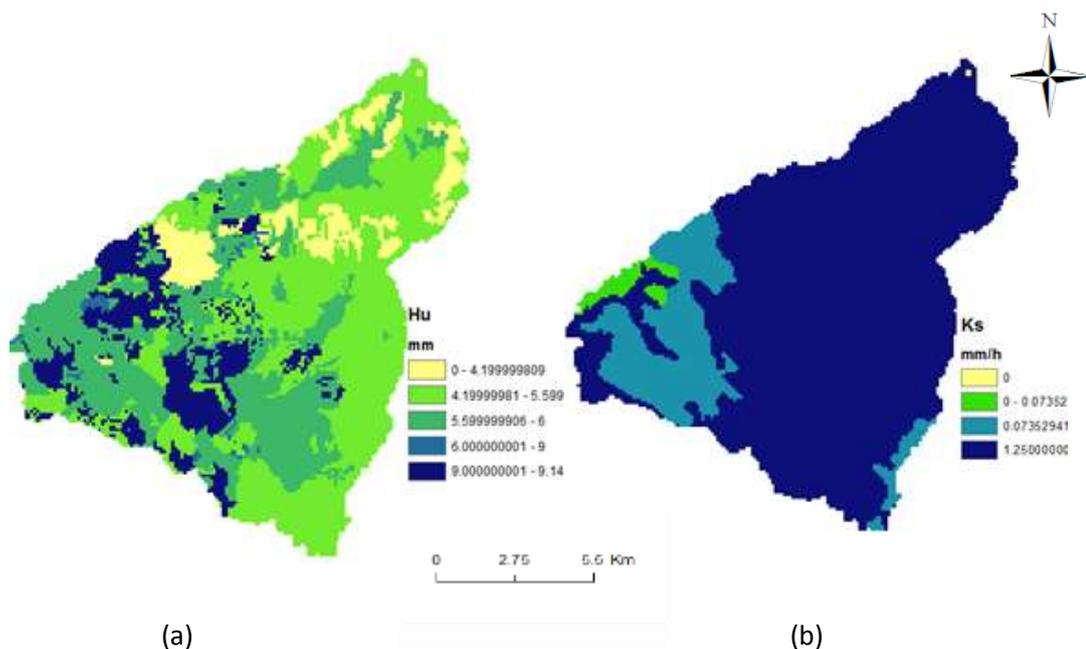
-Conductividad hidráulica del acuífero,  $K_p$  (mm/h). Utilizada en los procesos de percolación, pérdidas subterráneas y en la estimación del flujo base. Este parámetro se estimó a partir del mapa de hidrogeología del geoportal del SNI (2016), identificando los tipos de permeabilidad de la unidad hidrográfica Río Pindo.

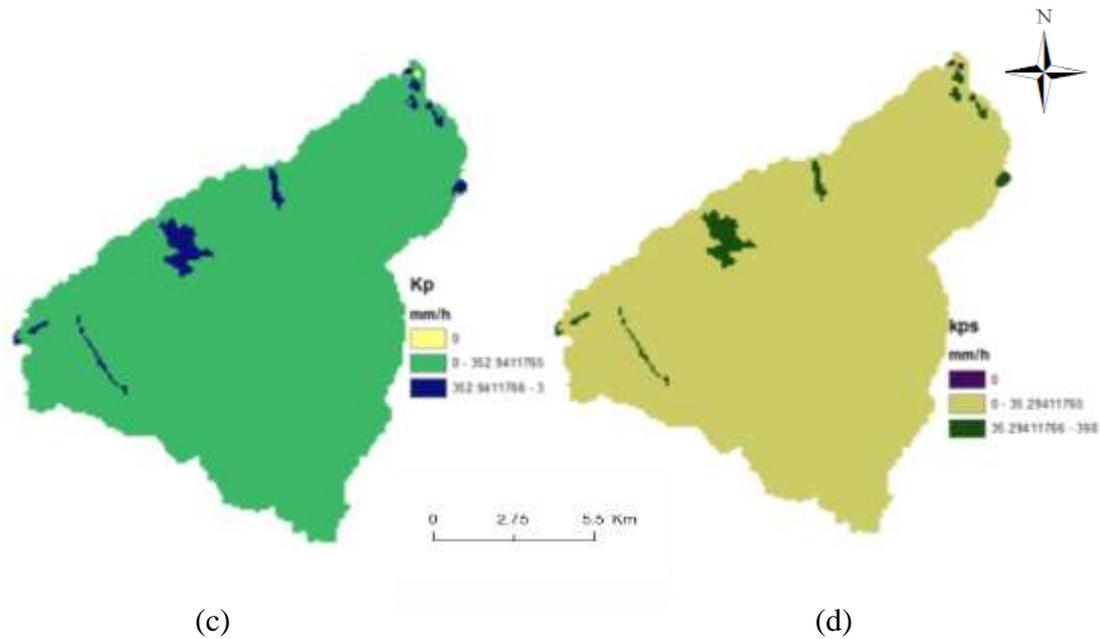
-Conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso por percolación,  $K_{ps}$ .

-Conductividad hidráulica horizontal saturada del suelo,  $K_{ss}$ .

-Conductividad hidráulica horizontal saturada del estrato rocoso,  $K_{sa}$ .

Debido a la incertidumbre para la estimación de los tres últimos parámetros  $K_{ps}$ ,  $K_{ss}$  y  $K_{sa}$ , ya que no se tiene información, es válida la siguiente aproximación:  $K_{ss}=K_s$ ,  $K_{sa}=K_p$  y  $K_{ps}=0.1K_p$  Ramírez (2012). A continuación se presenta los parámetros hidráulicos:





**Figura 13: Parámetros hidráulicos en la unidad Río Pindo a) capacidad de almacenamiento hídrico del suelo  $H_u$  (mm); b) conductividad hidráulica del suelo  $K_s$  (mm/h); c) conductividad hidráulica del acuífero  $K_p$  (mm/h); d) conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso por percolación  $K_{ps}$  (mm/h).**

Los parámetros hidráulicos del suelo son una cuantificación inicial de los mismos, de acuerdo con la calidad de la información y la resolución espacial utilizada. Los valores finales de estos parámetros corresponden a los parámetros efectivos del modelo, resultado de la calibración.

#### 4.2 Calibración y validación del modelo distribuido TETIS

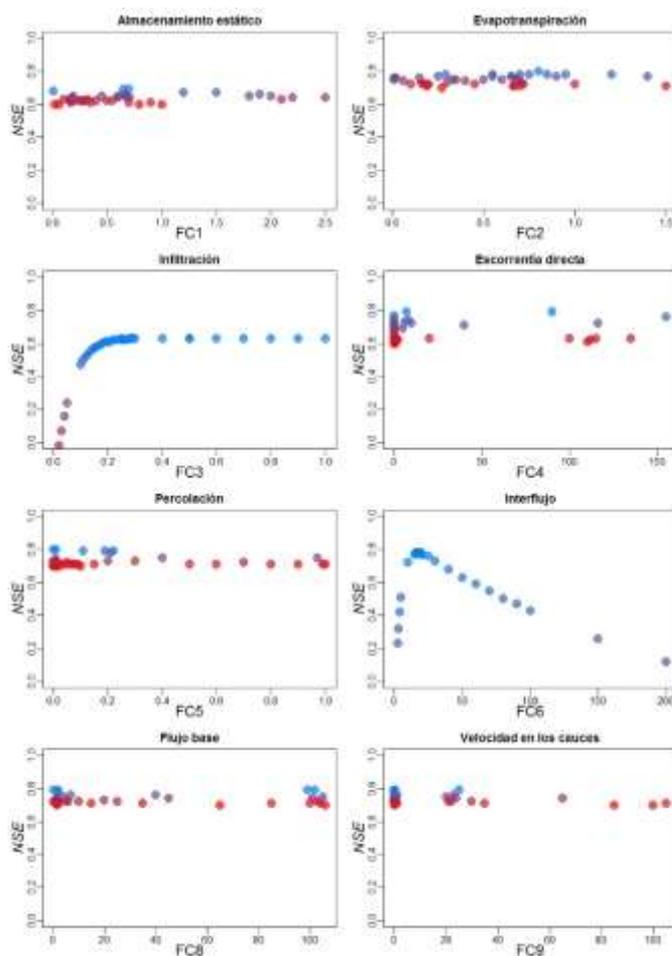
Para evaluar la seguridad predictiva de un modelo usualmente se divide el proceso en dos etapas diferentes: i) calibración y ii) validación. Para este propósito, dos grupos de series de datos de lluvia-caudal son reunidos. El primer grupo es utilizado en la calibración por sí mismo, mientras que el segundo grupo es usado en la verificación del modelo, esto es: una medición de la seguridad de la calibración. Una vez que el modelo ha sido calibrado y los parámetros validados, está listo para ser utilizado en la etapa predictiva de la modelación. Generalmente el ajuste entre los caudales calculados y observados obtenidos durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo (Palacios, 1986).

### 4.2.1 Calibración

El modelo hidrológico distribuido TETIS fue calibrado en la estación Pindo AJ Amarillo, por ser la única estación hidrométrica de la unidad hidrográfica de estudio en la red de estaciones del INHAMI. Primeramente se realizó una simulación con todo el registro de caudales históricos considerados en el presente estudio, enero 1975 a diciembre 2008, en esta primera simulación se identificó el período donde los picos y tendencia de los caudales simulados asemejen a los observados, siendo este periodo el considerado para la calibración del modelo de octubre 2004 a octubre 2006.

Posteriormente, el proceso de calibración, tanto manual como automática, se realizó ajustando los nueve factores correctores y considerando como índices de eficiencia el Error Volumétrico, Nash-Sutcliffe y RSR, obteniendo después de varias simulaciones, los valores finales de los factores correctores se pueden observar en el cuadro 8. En la mayoría de las unidades hidrográficas las pérdidas subterráneas son una pequeña parte del agua que circula en la unidad hidrográfica, por lo tanto se puede asumir que estas pérdidas son cero, por lo que se ajustó el factor  $FC7=0$  y así la totalidad del agua que percola pasa al almacenamiento subterráneo.

Según Ruiz-Villanueva *et al.* (2014), es indispensable realizar calibración manual, con un enfoque de ensayo y error simple, para definir el rango factible de factores de corrección de parámetros, y después de ello, usar el algoritmo automático para encontrar los valores finales, es por ello que primeramente se realizó una calibración manual mínimamente satisfactoria de los nueve factores correctores para seguidamente realizar la calibración automática en la unidad hidrográfica Río Pindo, para ello se determinó el rango en que se mueven los factores hidrológicos, la figura 14 se muestra los rangos en los que se mueven los factores correctores.



**Figura 14: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo TETIS en la unidad hidrográfica Río Pindo (Gradiente de intensidad de color de rojo a azul de los puntos indican la aproximación al coeficiente de *Nash Sutcliffe* de valores bajos a altos).**

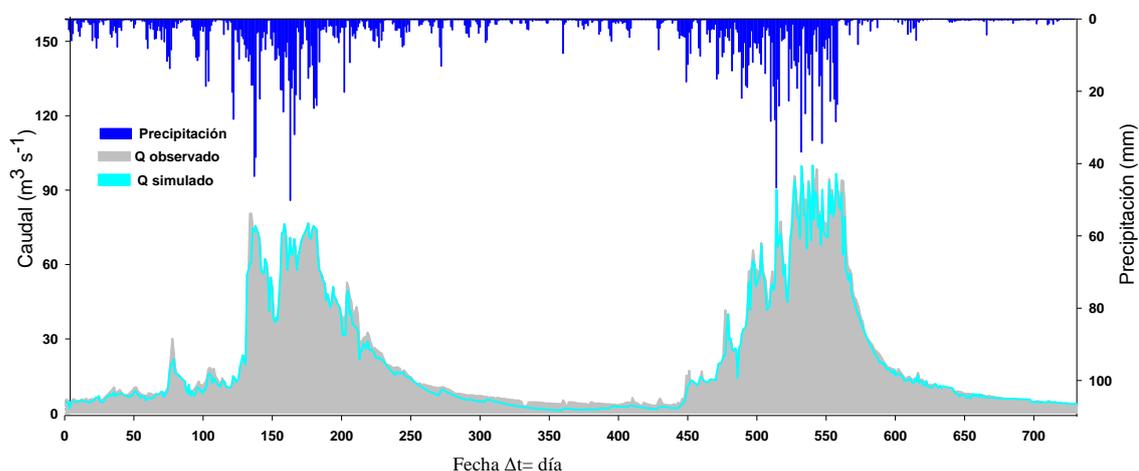
Los parámetros sensibles del modelo TETIS en la unidad hidrográfica Río Pindo son FC3 (infiltración) y FC6 (interflujo), por lo que se puso énfasis en estos dos parámetros en la calibración automática. Tras determinar la sensibilidad de los factores correctores, y realizar la calibración automática se obtuvieron los siguientes resultados:

**Cuadro 9: Factores correctores calibrados en la estación de aforo Pindo AJ Amarillo**

Factor corrector	Parámetro del modelo	Valor
FC-1	Almacenamiento estático	0.67265
FC-2	Evapotranspiración	0.71467
FC-3	Infiltración	0.35237
FC-4	Escorrentía directa	1.13535
FC-5	Percolación	0.06959
FC-6	Interflujo	22.13132
FC-7	Pérdidas subterráneas	0
FC-8	Flujo base	3.81742
FC-9	Velocidad en los cauces	0.82278

Fuente: Factores correctores y los respectivos parámetros ajustados Francés *et al.* (2014).

Estos resultados óptimos se visualizan en la figura 15 siendo muy cercano el hidrograma del caudal simulado con la del caudal observado, evaluándose el rendimiento del modelo a través del índice *Nash-Sutcliffe*, el error en el volumen y el error cuadrático medio. Estos índices y otras características de la calibración se detallan en la cuadro 9.



**Figura 15: Hidrograma generado de la calibración de los caudales observados a escala diaria en la estación Pindo AJ Amarillo. Período de análisis: 01 de octubre de 2004 al 01 de octubre de 2006.**

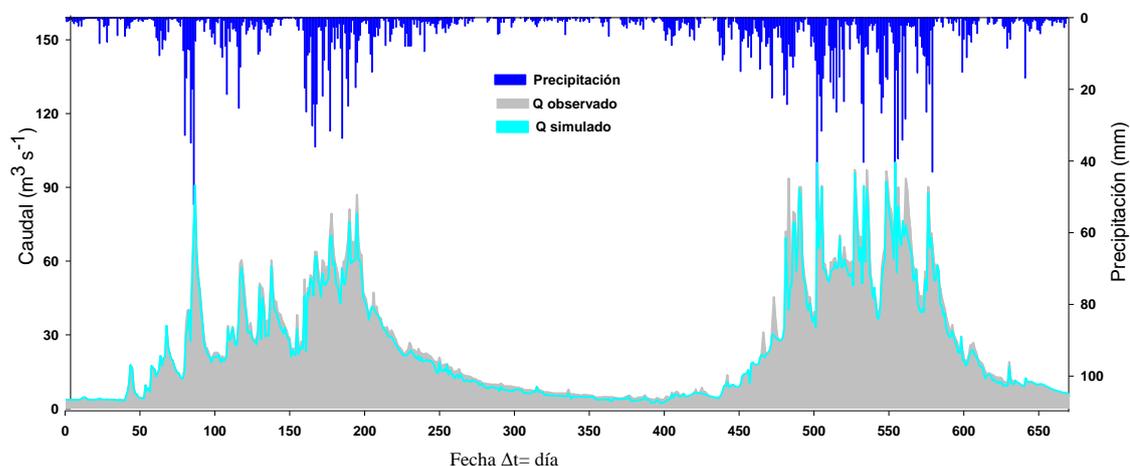
**Cuadro 10: Estadísticos obtenidos en la calibración con datos diarios en la estación Pindo AJ Amarillo. Período de calibración: 01 de octubre de 2004 al 01 de octubre de 2006.**

Estadísticos	Octubre 2004 -	Octubre 2004 -
	Octubre 2006	Octubre 2006
	$\Delta t = \text{día}$	$\Delta t = 1 \text{ mes}$
Caudal máximo observado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	98.5	22.44
Caudal máximo simulado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	87.6	20.24
Nro. de datos	731	25
Volumen observado (mm)	212.75	212.758
Volumen simulado (mm)	200.60	200.609
Error en el volumen (%)	8.08	8.08
NSE	0.81	0.89
RMSE ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0.31	0.49
Área acumulada ( $\text{km}^2$ )	524.669	

#### 4.2.2 Validación del modelo distribuido TETIS en la estación Pindo AJ Amarillo

Orozco (2014), indica que una limitación de los modelos hidrológicos es su grado de capacidad de predicción, es decir, no hay garantía que el modelo obtenga un buen rendimiento cuando se usa en condiciones diferentes a las presentes en el periodo de calibración. Por lo tanto, el proceso de validación demuestra la capacidad de predicción de

un modelo. En el caso del Río Pindo se seleccionó el periodo de octubre 2006 a agosto 2008 en el mismo punto de calibración para realizar la validación temporal ya que solo se dispone de la estación Pindo AJ Amarillo. En la figura 16 se observa el gráfico resultado de la validación y los valores obtenidos en los índices de eficiencia se observan en el cuadro 10.



**Figura 16: Hidrograma generado de la validación temporal a escala diaria en la estación Pindo A J Amarillo. Período de análisis: 02 de octubre de 2006 al 01 de agosto de 2008.**

Como se observa en la figura 15 y 16, existen valores de precipitaciones que no se expresan en caudales, esto puede deberse al tipo de cobertura así como el tipo de suelo con el que cuenta la zona de estudio.

**Cuadro 11: Estadísticos obtenidos de la validación temporal en la estación Pindo AJ Amarillo. Periodo de validación: 02 de octubre de 2006 al 01 de agosto de 2008.**

Estadísticos	Octubre 2006 -	Octubre 2006 -
	Agosto 2008	Agosto 2008
	$\Delta t = \text{día}$	$\Delta t = 1 \text{ mes}$
Caudal máximo observado ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	97.1	20.105
Caudal máximo simulado ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	95.8	21.245
Nro. de datos	670	18
Volumen observado (mm)	699.236	192.758
Volumen simulado (mm)	683.767	192.609
Error en el volumen (%)	9.08	9.08
NSE	0.79	0.80
RMSE ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	0.12	0.10
Área acumulada ( $\text{km}^2$ )	524.669	

Se evaluó el desempeño del modelo hidrológico, a través de índices de eficiencia como Nash–Sutcliffe (E), RSR, Error en volumen (Ev). Para la clasificación del rendimiento se comparó con los niveles reportados por Ramos (2013) detallados en el cuadro 11.

**Cuadro 12: Niveles de rendimiento de un modelo hidrológico en función del índice E, RSR y Ev con intervalo temporal mensual.**

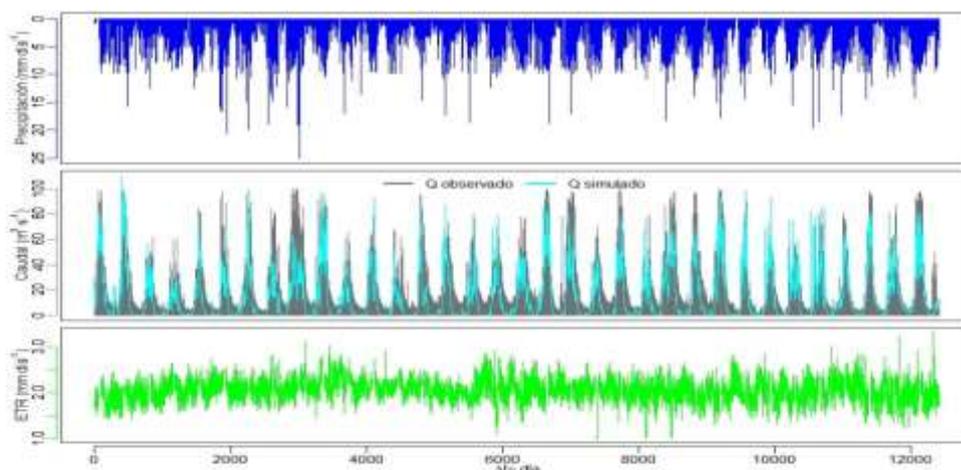
Rendimiento	RSR	E	Ev
Muy bueno	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < E \leq 1.00$	< 10 por ciento
Bueno	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < E \leq 0.75$	10-15 por ciento
Satisfactorio	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < E \leq 0.65$	
Insatisfactorio	$RSR > 0.70$	$E \leq 0.50$	
Desfavorable			15-25 por ciento

Fuente: Ramos (2013)

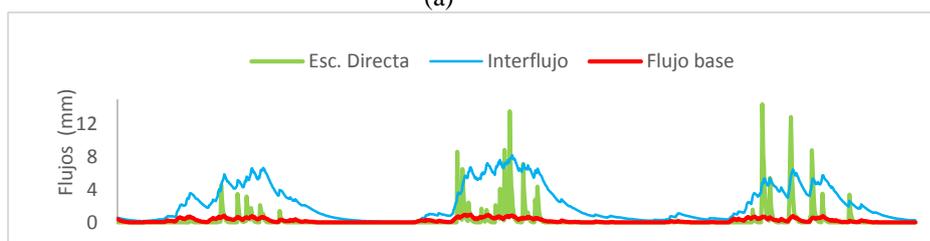
Se evidencia que los resultados obtenidos en calibración y validación se encuentran dentro del rendimiento muy bueno tanto a escala diaria como mensual.

### 4.3 Simulación de caudales en la zona de estudio

La etapa de simulación se realizó en el periodo de 01 de enero de 1975 al 31 de diciembre de 2008. En la figura 17 se puede observar los principales componentes del balance hídrico en el Río Pindo.

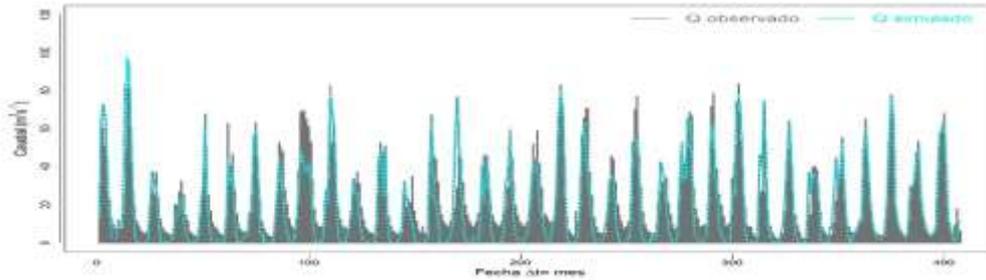


(a)





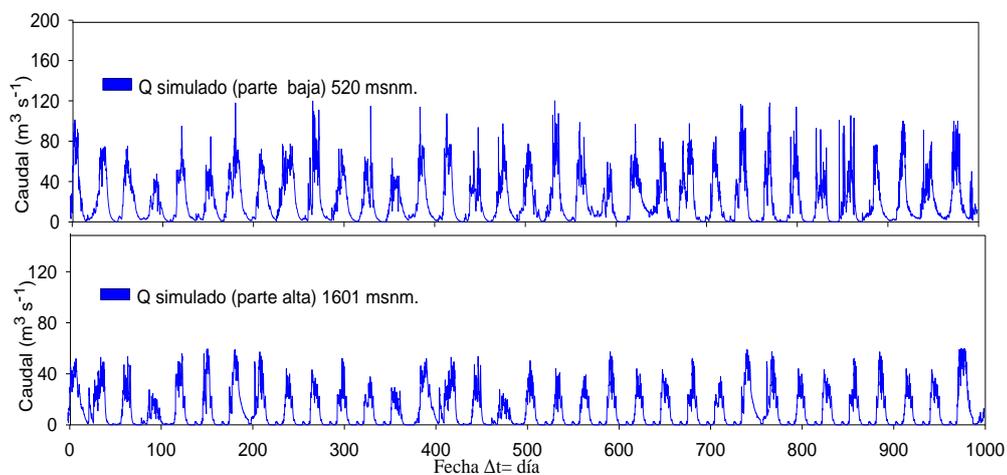
(b)



(c)

**Figura 17: Variabilidad a) precipitación, escorrentía y evapotranspiración real (b) flujos de salida y almacenamientos (c) hidrograma mensual. Principales variables del balance hídrico en el Río Pindo. Periodo de análisis 01 de enero de 1975 al 31 de diciembre de 2008.**

El modelo TETIS una vez calibrado y validado permite realizar simulaciones en diferentes puntos de la unidad hidrográfica, por lo que se realizó una simulación en la parte alta en una unidad hidrográfica nivel 6 en las coordenadas X: 672153.447; Y: 9591295.015 en la figura 4 se puede observar la ubicación de la simulación en la zona alta en el Río Pindo. En la figura 18 se puede observar el caudal simulado (parte baja) y simulado (parte alta) de la zona de estudio.



**Figura 18: Hidrograma de los caudales diarios simulados en la parte baja y alta de la zona de estudio. Periodo de análisis 01 de enero de 1975 al 31 de diciembre de 2008.**

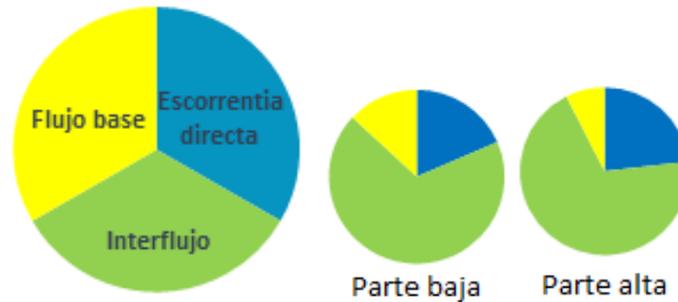
En el cuadro 12 se muestra un resumen de los componentes del balance hídrico en los sitios de simulación del caudal en la unidad Río Pindo.

**Cuadro 13: Componentes del balance hídrico en la unidad hidrográfica Río Pindo**

Cubierta vegetal	parte baja	parte alta
Lluvia [mm]:	4932.2	5616.9
Evaporación desde intercepción [mm]:	410.1	550.8
Suelo (almacenamiento estático):		
Lluvia directa [mm]:	4522.1	5066
Evapotranspiración [mm]:	2541.5	1800.1
Agua en superficie:		
Excedente [mm]:	1980.6	3265.9
Escorrentía directa [mm]:	515.9	667.7
Almacenamiento gravitacional:		
Infiltración [mm]:	1464.8	2598.2
Interflujo [mm]:	1911	2000
Acuífero:		
Percolación [mm]:	446.2	598.2
Flujo base [mm]:	365	215.1
Pérdidas subterráneas [mm]:	0	0

En el cuadro 12 y figura 18 se puede observar que los valores correspondientes al balance hídrico, la mayor aportación a la escorrentía total en la parte baja de la unidad hidrográfica de estudio está dado por interflujo (69 por ciento); escorrentía directa (18 por ciento); flujo base (13 por ciento), y en la parte alta del Río Pindo los valores cambian así tenemos interflujo (70% por ciento); escorrentía directa (22 por ciento); flujo base (8 por ciento).

Al analizar los resultados se observa que en la parte alta existe mayor cantidad de lluvia, y una mayor intercepción de la vegetación. Por lo tanto una mayor escorrentía directa, pero la evapotranspiración es mayor en la parte baja de la zona de estudio, por ello existe un mayor excedente de agua en la parte alta que infiltra en el suelo y forma parte del interflujo, luego por procesos de percolación penetra en las capas interiores del suelo una parte recarga el acuífero y otra sale a la superficie como flujo base en este caso en la parte baja este parámetro es mayor.



**Figura 19: Porcentajes de la composición de la escorrentía total en la parte baja y alta de la unidad hidrográfica Río Pindo. Período de análisis 01 de enero de 1975 al 31 de diciembre de 2008.**

Los valores de los flujos de salida pueden ser resultado del tipo de suelo con el que cuenta la zona de estudio ya que existen suelos francos en los cuales la tasa de velocidad de infiltración es de 9 mm/h y existe un buen drenaje, por lo que el movimiento del agua en el suelo es rápido. Según López y Viera (2014) este tipo de suelos se encuentran en el grupo B como suelos con moderado potencial de escorrentía. Las texturas de los suelos comprendidos en este grupo varía de franco a limoso, la profundidad efectiva de los mismos es profunda o moderadamente profunda. Cuando los suelos están muy húmedos poseen tasas de infiltración que varían entre 7 a 9 mm/hora. El drenaje natural para estos suelos comprende el rango entre algo excesivamente drenados y bien drenados, en este grupo el movimiento del agua puede ser moderadamente rápido, moderado u óptimo.

Otro factor que incide en los resultados de mayor interflujo es la cobertura vegetal del suelo ya que existe la presencia de páramo y bosque natural lo que permite que las precipitaciones no se escurran, infiltrándose a las capas interiores del suelo.

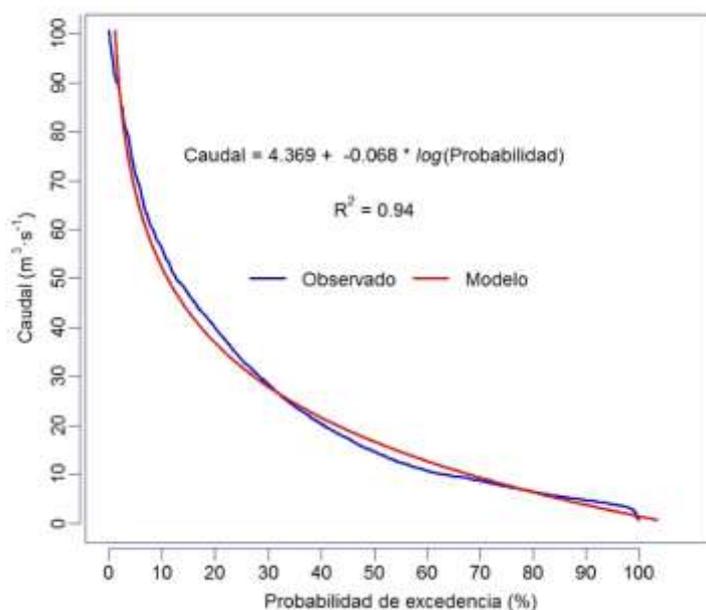
Debido a que el tipo de permeabilidad del suelo presente en la unidad de estudio en su mayor parte es relativamente impermeable, sucede que luego de la infiltración el agua en el suelo continúa moviéndose en función de los gradientes hídricos, especialmente el gradiente vertical y si se encuentra con una capa relativamente impermeable, se produce un flujo lateral el cual culmina con su intercepción por los cauces, o la vez podría recargarse el acuífero (Rojas, 2009).

Por el cambio de uso del suelo constante en la zona de estudio, los valores de interflujo podrían disminuir, esto no quiere decir que cambiará la cantidad de agua que se mueve en

la unidad hidrográfica sino más bien que se tendrán valores más elevados de escorrentía directa.

#### 4.3.1 Disponibilidad hídrica

La curva de caudales clasificados elaborada con datos diarios muestra la probabilidad de excedencia de caudales en la zona de estudio como se observa en la figura 20.

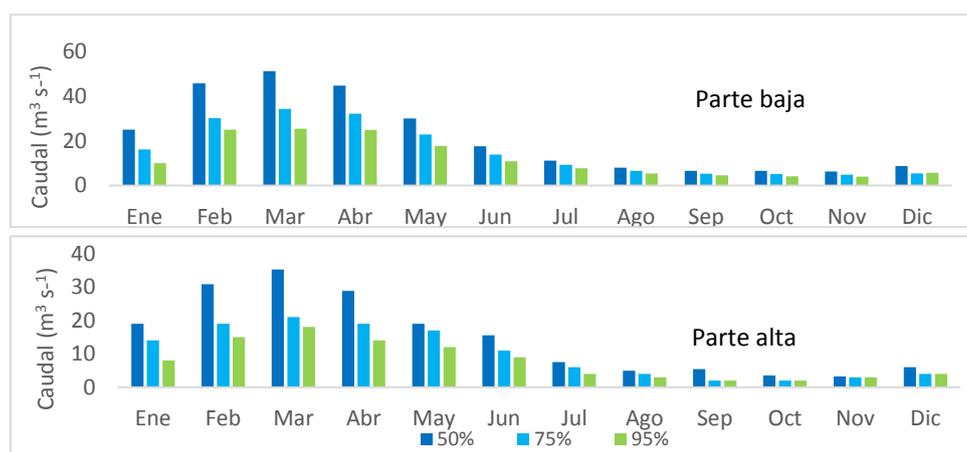


**Figura 20: Variación de la probabilidad de excedencia de caudales diarios en la unidad hidrográfica Río Pindo. Período de análisis 01 de enero de 1975 al 31 de diciembre de 2008.**

Los resultados muestran que los caudales modelados que corresponden a probabilidades mayores al 30% se ajustan satisfactoriamente entre sí. La probabilidad de excedencia por ejemplo para caudales de 5 m³/s existe hasta un 85 por ciento de probabilidad de excedencia; para caudales de 10 m³/s existe hasta 60 por ciento de probabilidad de excedencia; para caudales de 20 m³/s existe hasta un 40 por ciento de probabilidad de excedencia, a medida que los caudales aumentan menor es la probabilidad de que sean excedidos.

El análisis de persistencia de caudales se grafica en la figura 21 para los tres niveles evaluados (50, 75, y 95 por ciento). En la parte baja existe mayor persistencia que en la parte alta donde se simuló el caudal. Considerando el promedio al 50 por ciento de persistencia se alcanzó un caudal promedio anual de 21.80 m³/s, al 75 (15.49 m³/s), al 95 por ciento de (12.10 m³/s). En la parte alta al 50 (14.95 m³/s), 75 (10.17 m³/s) y al 95 por ciento (7.83 m³/s).

El caudal al 75 por ciento de persistencia anual (caudal mínimo probable para agricultura) en la estación Pindo AJ Amarillo es de 15.49m<sup>3</sup>/s que satisface la demanda de agua para agricultura en los meses de enero a mayo con 27 m<sup>3</sup>/s y en los meses de junio a diciembre son relativamente bajos con un promedio de 7 m<sup>3</sup>/s por lo que no satisface la demanda de agua en el sector en los meses de verano, y en el caso de los caudales de la parte alta con un promedio de 10.17 m<sup>3</sup>/s, en los meses húmedos con 18 m<sup>3</sup>/s y 5 m<sup>3</sup>/s en los meses secos tampoco satisfacen la demanda en este periodo seco de año. Para una probabilidad al 95 por ciento (caudal mínimo probable para las actividades energéticas) de enero a mayo existen un promedio de 21 m<sup>3</sup>/s y de junio a diciembre un promedio de 6 m<sup>3</sup>/s en la parte baja y un promedio de 13 m<sup>3</sup>/s de enero a mayo y 4 m<sup>3</sup>/s de junio a diciembre en la parte alta, por lo que deben ser analizada esta información antes del planeamiento de proyectos de infraestructura hídrica. En la figura 21 se puede observar la persistencia de caudales en la zona alta y baja del Río Pindo.



**Figura 21: Persistencia de caudales al 50; 75; y 95 por ciento en la zonas de simulación alta y baja de la unidad hidrográfica Río Pindo.**

Río Pindo forma parte de la unidad hidrográfica Puyango código 1392. En Puyango existen recursos hídricos, con una distribución espacio-tiempo desigual, y se encuentra ubicada en una zona montañosa adecuada para la construcción de proyectos de almacenamiento. Con la finalidad de resolver el déficit de agua en la estación seca, existen en planeación y rehabilitación obras de regulación y almacenamiento en lugares específicos para almacenar agua en periodo de escasez.

Según CISPDR (2016) en el 2035 la demanda de agua en Puyango será de 198. 26 hm<sup>3</sup>, y se tiene planeado algunas obras de suministro de agua en el cual el agua total anual será de

178.85 hm<sup>3</sup>, y el escenario de déficit de agua promedio anual será de 19.41hm<sup>3</sup>. Los proyectos hídricos planificados en Puyango con fines de riego y abastecimiento de agua potable se pueden visualizar en el cuadro 13.

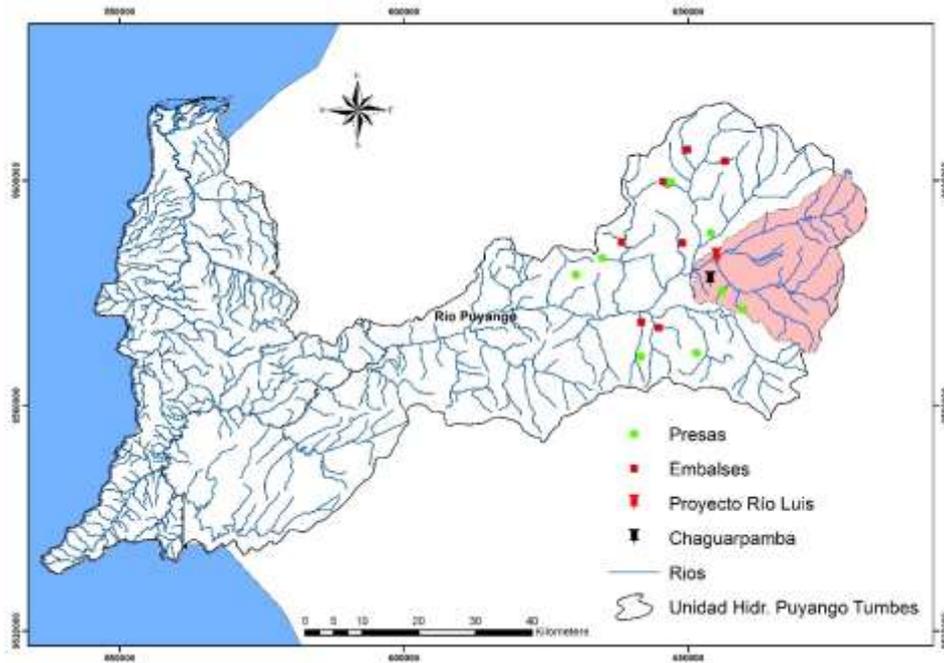
**Cuadro 14: Proyectos en planificación, rehabilitación y tecnificación en Río Puyango**

Tipo de proyecto	Nombre del proyecto	Tipo de obra	Río
Planificación	Chaguarpamba	Derivación	Río Ambocas Río Yaguachi
	Cazaderos	Embalse	Qda. Cazaderos
		Derivación	Qda. del Chorro
	Salado	Derivación	Río Salado
		Derivación	Río Palto
	Moromoro	Embalse	Río Moromoro
Rehabilitación y tecnificación	Balsas	Embalse	
	Marcabelito	Embalse	Río Marcabelí
	Río Luis-El Tablón	Derivación	Río Luis
		Derivación	Río Calera

Fuente: CISPDR (2016).

Los proyectos hídricos que se encuentran en la unidad hidrográfica Río Pindo son: rehabilitación y tecnificación Río Luis-El Tablón y proyecto en planificación Chaguarpamba, por lo que para tener la permanencia del recurso hídrico en cantidad y calidad se deberá realizar un adecuado manejo y gestión de los recursos hídricos con fines de protección.

En vista que Río Pindo se encuentra en la cabecera de la unidad hidrográfica Puyango y genera importantes caudales, se deberá priorizar su conservación para el mantenimiento de los ecosistemas naturales y asegurar el recurso hídrico en los proyectos hidráulicos previstos en la parte media y baja de la unidad. En la figura 22 se puede observar los proyectos hídricos en la unidad Río Pindo.



**Figura 22: Proyectos hidráulicos en planificación y rehabilitación en la unidad hidrográfica Río Pindo.**  
**Fuente CISPDR (2016).**

El caudal medio de la unidad hidrográfica Puyango-Tumbes es de 117 m<sup>3</sup>/s, siendo el aporte del Río Pindo con un caudal medio de 23 m<sup>3</sup>/s, es decir un 19.54%.

#### **4.3.2 Variabilidad climática e hidrológica en la unidad hidrográfica Río Pindo**

Las series de datos diarios de las estaciones con información de precipitación y temperatura fueron Saraguro (parte alta), Zaruma (parte media), y Gonzanamá (parte baja), y para analizar el caudal del Río Pindo se adaptó los índices de precipitación del cuadro 7.

##### **4.3.2.1 Variabilidad climática en la zona de estudio**

En el cuadro 14 se presenta el análisis de la variabilidad climática usando los índices de RClindex en las estaciones de estudio en el Río Pindo.

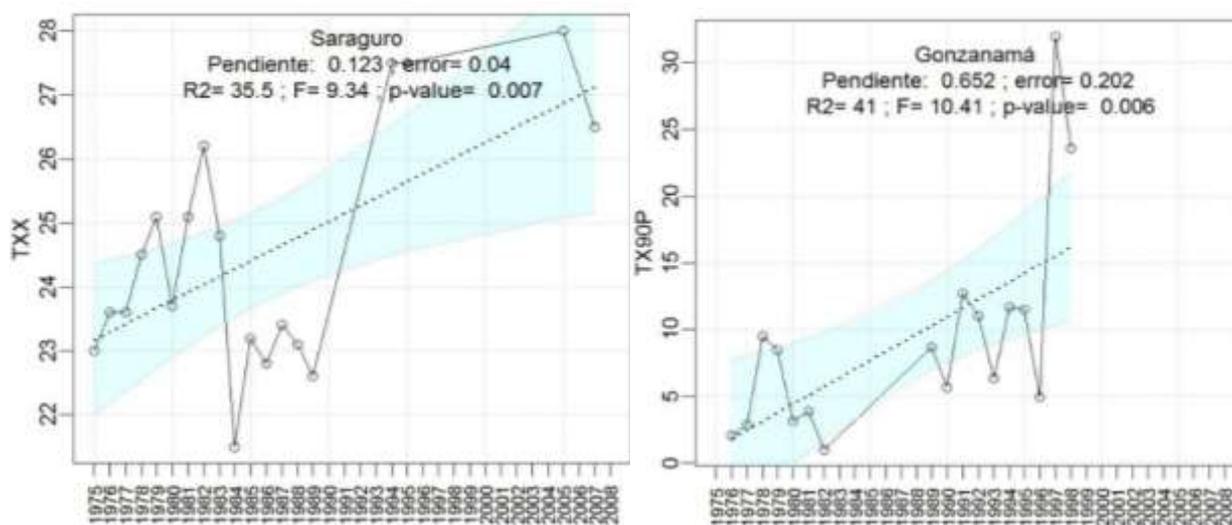
**Cuadro 15: Índices de temperatura y precipitación en el periodo 1975-2008 del Río Pindo. Siendo probabilidad (pv) el nivel de seguridad estadística que se tiene en el análisis y la pendiente de la curva de ajuste que indica la magnitud de la variación por década. Sombreado de color naranja (temperatura) y color azul (precipitación).**

ID	Descripción del índice	Zaruma		Gonzanamá		Saraguro	
		pv	pendiente	pv	pendiente	pv	pendiente
FD	Días de frío de T mínima inferior a 4°C	0.248	0.007	NaN	0	NaN	0
SU	Días de T máxima superior a 40°C	0.883	-0.375	NaN	0	NaN	0.132
ID	Días de temperatura máxima muy fría <15.5°C	0.638	-0.571	NaN	0	NaN	0
TR	Noches de T máxima superior a 24°C	0.702	-0.089	NaN	0	NaN	0
GSL	Duración de la estación de cultivo	NaN	NaN	0.727	-0.025	0.515	-0.012
TXX	Máxima Temperatura máxima registrada en cada mes	0.27	-0.059	0.145	-0.093	0.007	0.123
TNX	Máxima Temperatura mínima registrada en cada mes	0.238	-0.011	0.017	-0.063	0.037	0.135
TXN	Mínima temperatura máxima	0.597	0.064	0.053	0.06	0.02	0.054
TNN	Mínima temperatura mínima	0.504	-0.034	0.036	0.101	0.274	-0.045
TN10P	Días fríos	0.374	0.035	0.477	-0.112	0.67	0.028
TX10P	Días fríos	0.187	0.338	0.391	0.092	0.037	0.239
TN90P	Noches calientes	0.417	0.356	0.355	0.107	NaN	2.48
TX90P	Días calientes	0.127	0.317	0.006	0.652	NaN	2.108
WSDI	Cantidad de periodos de 6 días de temperaturas altas	NaN	NaN	0.081	0.491	NaN	3.724
CSDI	Indicador de la duración de periodos fríos	NaN	NaN	0.62	-0.04	0.038	0.099
DTR	Rango diario de temperatura (máxima menos mínima)	0.374	0.017	0.577	0.014	0.742	-0.015
RX1DAY	Cantidad máxima de precipitación en un día	0.173	0.44	0.004	1.27	0.124	-0.573
RX5DAY	Cantidad máxima de precipitación en 5 días	0.173	0.998	0.004	3.107	0.79	-0.156
SDII	Índice simple de intensidad diaria	0.618	0.018	0.001	0.207	0.358	-0.012
R10MM	Número de días con precipitación intensa	0.286	0.302	0.1	0.555	0.738	-0.04
R20MM	Número de días con precipitación muy intensa	0.623	0.086	0.008	0.619	0.172	0.077
22. R17.2MM	Número de días sobre 17,2 mm	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
CDD	Días secos consecutivos	0.756	0.147	0.356	0.512	0.759	-0.042
CWD	Días húmedos consecutivos	0.082	0.213	0.422	0.128	0.839	-0.014
R95P	Días muy húmedos	0.13	5.824	0.005	15.82	0.249	1.785
R99P	Días extremadamente húmedos	0.193	3.068	0.001	10.786	0.971	-0.033
PRCPTOT	Precipitación total anual en los días húmedos	0.274	8.692	0.018	26.125	0.607	-1.508

- Muy alta probabilidad de ocurrencia. Probabilidad mayor al 99 por ciento.
- Alta probabilidad de ocurrencia. Probabilidad al 90 por ciento.

En el presente estudio se analizó los índices con muy alta probabilidad de ocurrencia mayor al 99 por ciento en las tres estaciones analizadas, es decir las que presentaron probabilidad con una significativa ( $p < 0.05$ ). Como se observa en el cuadro 14 los resultados de las estaciones con tendencias significativas de los índices de temperatura se presentan en las estaciones Gonzanamá y Saraguro, en el caso de Zaruma ninguno de los 27 índices resultaron significativos, lo que indica que no existe variabilidad climática en esta zona de la unidad hidrográfica.

Se presentan cambios en las tendencias de temperatura de índices que cambiaron con alto grado de confiabilidad, se nota claramente la tendencia al calentamiento. Todos los índices que están creciendo muestran esa tendencia, máxima temperatura de cada mes, cantidad de días calientes superior al 90 por ciento del promedio. Esta información estadística se corrobora examinando las gráficas de la figura 23.

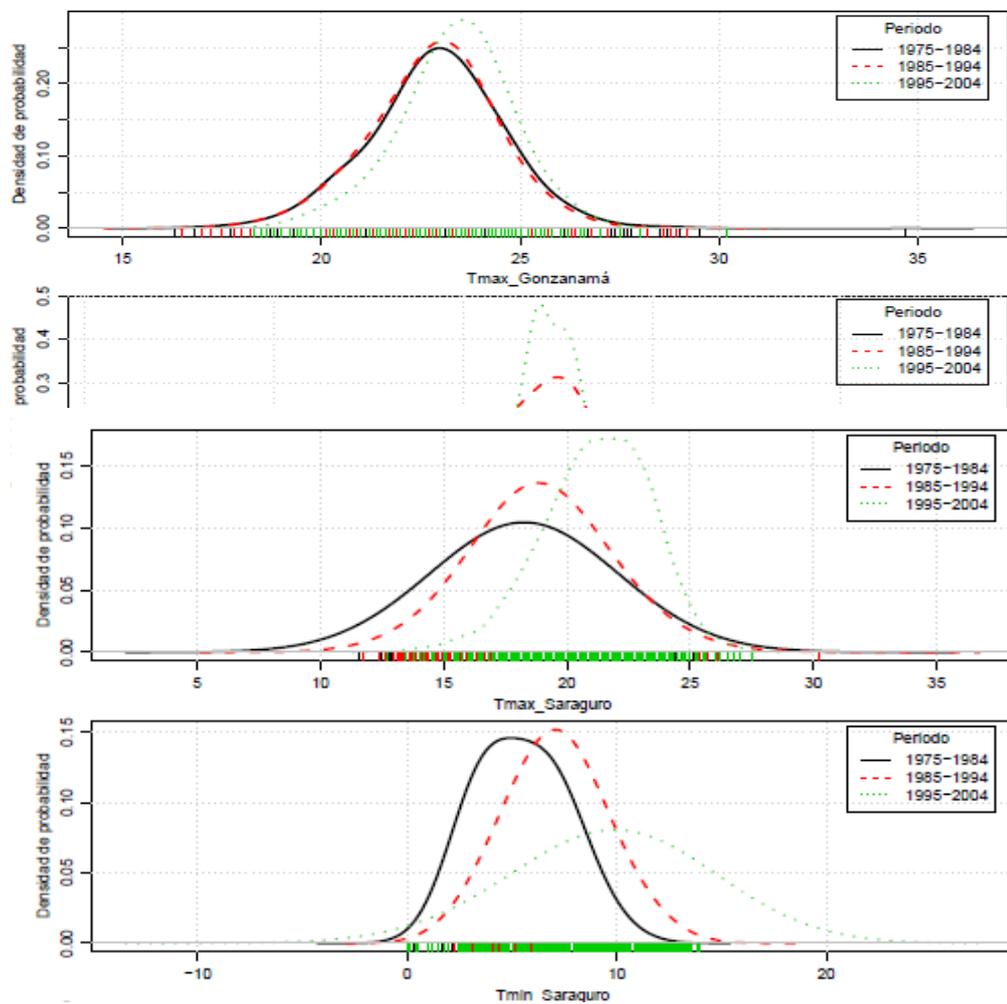


**Figura 23: Izquierda estación Saraguro índice TXX (Máximo valor de temperatura identificado en la temperatura máxima diaria registrada por cada mes) se denota un incremento de la temperatura en la década 1995-2004 y derecha estación Gonzanamá índice TX90P (días calientes son aquellos que presentan valores altos de temperatura máxima y se establecen a partir del número de días que la temperatura máxima presenta registros ubicados dentro del percentil 90), se observa un aumento de menor magnitud en la temperatura máxima.**

A continuación se presenta las figuras con curvas de densidad de probabilidad para únicamente las estaciones que presentaron índices de temperatura de RCLimdex con probabilidad significativa ( $p < 0.05$ ). Las curvas fueron construidas usando periodos decanales (1975-1984, 1985-1994, 1995-2004 y 1994-2004). Además, fue utilizado un periodo corto de solo 4 años entre 2005-2008. Este periodo es importante porque refleja información climática reciente, el cual vale la pena describir. Sin embargo, la descripción del periodo 2005-2008 fue solo posible para la estación Saraguro, ya que de la estación Gonzánama no se tenía suficiente datos diarios para una descripción sólida.

Las curvas decanales de densidad de probabilidad muestran claramente para la estación Saraguro un desplazamiento creciente entre décadas, que reflejan un aumento de temperatura

(Fig. 24). De esta forma, podemos concluir para la década (1995-2004), tiene los días y noches más caliente en comparación a las anteriores décadas, un claro aumento gradual de temperatura explicado por la variabilidad climática y ampliamente demostrado en los índices con tendencia significativa de RCLimdex. Por otra parte, la estación Gonzánama demuestra un aumento de menor magnitud en la temperatura máxima en comparación Saraguro, esto es observado en leves desplazamientos crecientes entre décadas en las temperaturas máximas en las curvas de densidad de probabilidad. Esta última estación a diferencia de Saraguro resalta poca variabilidad climática, lo que indica que en la parte baja de la zona de estudio donde se ubica la estación la temperatura presenta un aumento menor, y por lo tanto menor incidencia de la variabilidad climática.



**Figura 24: Distribuciones decenales de las temperaturas diarias máximas, mínimas para las estaciones con índices de temperatura de RCLimdex con probabilidad significativas ( $p < 0.05$ ). Periodo de análisis entre 1975 y 2008 para las estaciones Saraguro y Gonzánama.**

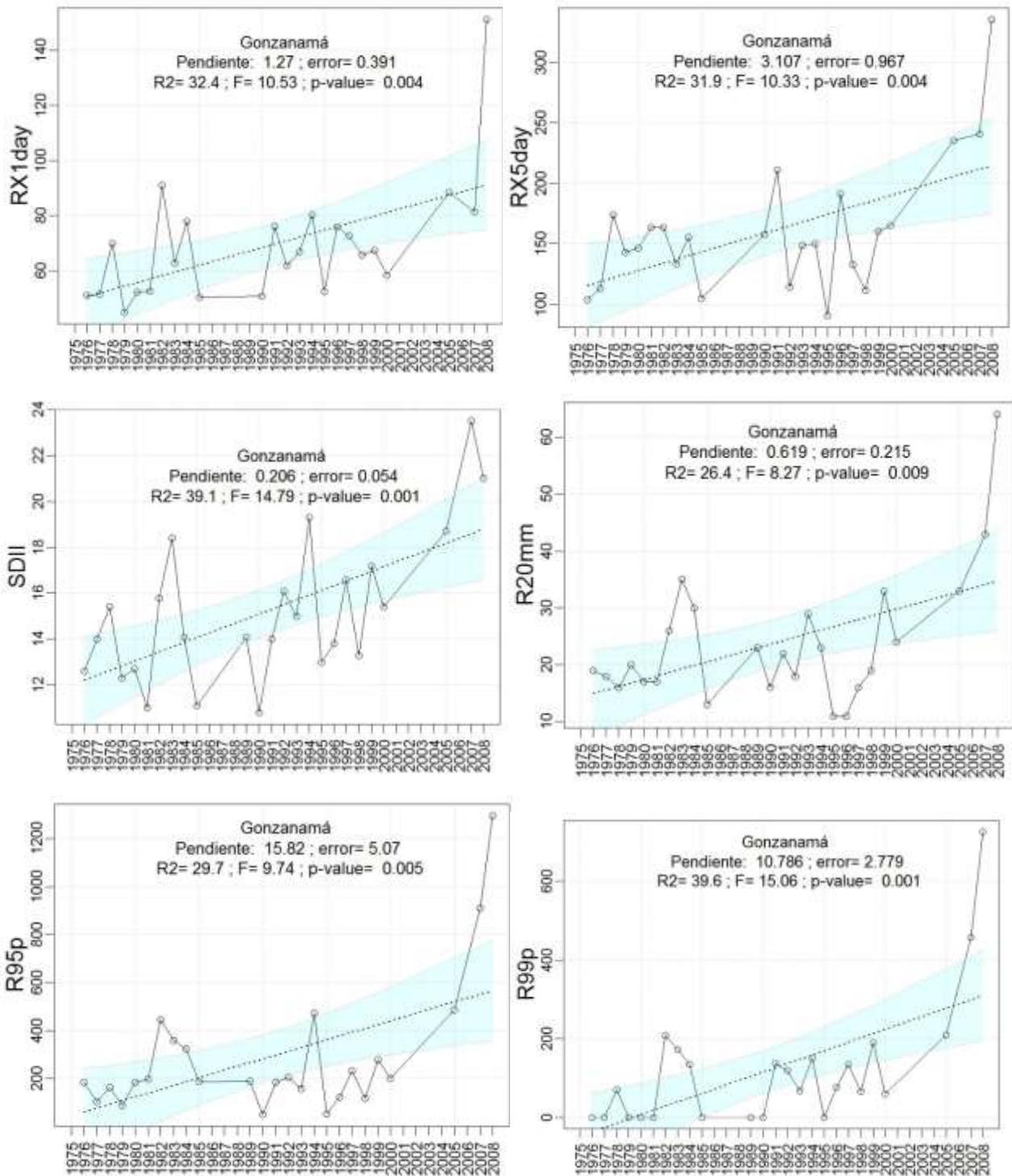
### **Magnitudes del cambio**

Usando las curvas de la figura 23 derivadas de RClimdex, se puede hacer el siguiente análisis del cambio ocurrido en los principales índices de temperatura:

**Cuadro 16: Magnitudes de cambio de los índices de temperatura con tendencias significativas para las estaciones Gonzanamá y Saraguro (1975-2008).**

Estación	ID	Descripción del índice	Tendencia	Magnitud de cambio
Saraguro	TXX	Máxima Temperatura máxima registrada en cada mes	Creciente	Aumento décanal de 1.2 °C
Gonzánama	TX90P	Días calientes	Creciente	Aumento décanal de 6.5 días calientes (temperatura mayor al 90% de la media)

En el análisis de la precipitación en el cuadro 14 se presentan cambios en las tendencias de precipitación solamente en la estación Gonzanamá. La información estadística de precipitación se corrobora examinando las gráficas de la figura 25.



**Figura 25: Índices significativos ( $p < 0.05$ ) para la estación Gonzanamá RX1DAY (Cantidad máxima de precipitación en un día); RX5DAY (Cantidad máxima de precipitación en 5 días); SDII (Índice simple de intensidad diaria); R20MM (Número de días con precipitación muy intensa); R95P (Días muy húmedos); R99P (Días extremadamente húmedos), como se evidencia todos los índices tienen tendencia creciente desde la primera hasta la última década.**

## **Magnitudes del cambio**

Usando las curvas de la figura 26 derivadas de RCLimdex, se puede hacer el siguiente análisis del cambio ocurrido en los principales índices de precipitación:

**Cuadro 17: Magnitudes de cambio de los índices de precipitación con tendencias significativas para las estaciones Gonzanamá (1975-2008).**

Estación	ID	Descripción del índice	Tendencia	Magnitud de cambio
Gozanamá	RX1DAY	Cantidad máxima de precipitación en un día	Creciente	Aumento décanal de 12.7mm
	RX5DAY	Cantidad máxima de precipitación en 5 días	Creciente	Aumento décanal de 31.07mm
	SDII	Índice simple de intensidad diaria	Creciente	Aumento décanal de 2.07mm
	R20MM	Número de días con precipitación muy intensa	Creciente	Aumento décanal de 6.19días
	R95P	Días muy húmedos	Creciente	Aumento anual de 15.8 días
	R99P	Días extremadamente húmedos	Creciente	Aumento anual de 10.7 días

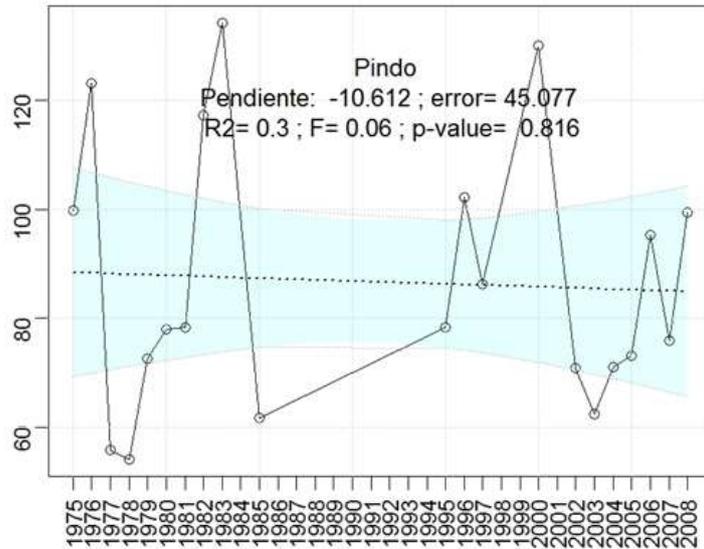
### **4.3.2.2 Variabilidad hidrológica en el Río Pindo**

Se evaluó con R climdex la variabilidad hidrológica en la estación de caudal Pindo AJ Amarillo los resultados se muestran en el cuadro 18.

**Cuadro 18: Análisis de resultados de los índices R climdex para las estación Pindo AJ Amarillo en la unidad hidrográfica Río Pindo en el periodo 1975-2008.**

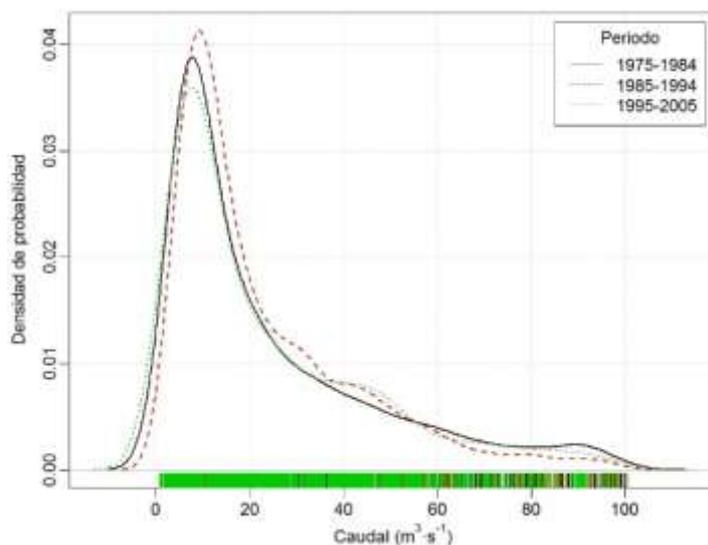
Índices	Slope	P value
C95P (Caudal anual total en que CC>95 percentil)	-20.8	0.605
C99P (Caudal anual total en que CC>99 percentil)	-12.6	0.57

Como se visualiza en el cuadro 18 no se presentan cambios en las tendencias del caudal. Esta información estadística se corrobora examinando las gráficas de la figura 27.



**Figura 26: Índices que demuestran que no existen cambios en aumento o disminución de caudales entre décadas en la estación Pindo A J Amarillo de la unidad hidrográfica Río Pindo (información de probabilidad, pendiente y error dentro de la figura).**

Las curvas decenales de densidad de probabilidad muestran que no existen cambios desplazamiento creciente entre décadas, esto se reflejan en la figura 27.



**Figura 27: Distribuciones decenales de la escorrentía diaria con índices para caudal con RCLimindex con probabilidad significativas ( $p < 0.05$ ). Periodo de análisis entre 1975 y 2008 en la unidad hidrográfica del Río Pindo.**

De acuerdo al análisis realizado en la temperatura, precipitación se presenta tendencias de cambios en las estaciones de Saraguro y Gonzanamá en la parte alta y baja respectivamente de las estaciones estudiadas, pero no se reflejan en el caudal, esto puede deberse a que el

Río Pindo esta amortiguando los cambios producidos al existir mayor precipitación ésta es devuelta a la atmósfera por proceso de evapotranspiración.

Los análisis identificaron tendencias claras y significativas de cambio de temperaturas y efectos asociados. Entre ellas las más significativas son los aumentos de los promedios de las temperaturas máximas y de las temperaturas mínimas, lo que sugiere que todo el rango de temperaturas se ha desplazado hacia temperaturas más altas. Los cambios de temperatura no tienen la misma intensidad en todas las estaciones, lo que sugiere que el clima no está cambiando de la misma manera en toda la unidad hidrográfica.

La variabilidad puede tener poco impacto actual en los medios de vida de las personas, el hecho de que estén ocurriendo es una señal de que otros aspectos del clima puedan estar cambiando también.

En un contexto general, las estaciones más sensibles a la variabilidad climática para los índices de temperatura son las estaciones de Gonzánama y Saraguro, y para los índices de precipitación únicamente la estación Gonzánama. Esto genera puntos clave de partida para considerar medidas de seguridad en las zonas alta y baja del Río Pindo que son las más vulnerables a estos cambios. Medidas de gestión deben ser consideradas en las zonas pobladas que se encuentran en la parte baja del Río Pindo, debido al riesgo de posibles inundaciones con el aumento de intensidad de las lluvias.

La mayor afectación por el fenómeno del niño se dio en los años 1972-1973, 1982-1983 y 1997-1998. Los últimos años coinciden con el análisis realizado con R climdex en el cual muestra un aumento de temperatura en la década (1995-2004), por lo que podría atribuirse los cambios por este fenómeno que altera el régimen en las precipitaciones y temperaturas. Como se ha analizado la presencia de cambios en los patrones de clima en la zona de estudio es necesario tomar en consideración medidas de adaptación al cambio climático en la unidad hidrográfica Río Pindo.

## V. CONCLUSIONES

1. El modelo hidrológico distribuido TETIS aplicado en la unidad hidrográfica Río Pindo permitió obtener calificación “muy bueno” en los índices de eficiencia (NSE-RSR-EV) en la calibración (0.81) y validación temporal (0.79) se puede asumir que los factores correctores obtenidos en la calibración, permiten obtener caudales a partir de la serie de precipitación registrada a escala diaria, siendo los parámetros sensibles a la calibración que afectan directamente la producción de escorrentía FC3 (Infiltración) y FC6 (Interflujo).
2. Se evidencia que con eventos más intensos de lluvias, la parte alta y baja del Río Pindo aumentan su rendimiento de agua sin que esto represente un gran aumento en los caudales de salida. Esto denota la importancia de los ecosistemas naturales como por ejemplo el páramo y bosque natural en el funcionamiento hidrológico para regular el rendimiento de agua y evitar que los caudales de salida aporten al proceso de inundaciones.
3. En el balance hídrico se observa que la mayor aportación a la escorrentía total se da por interflujo, esto se debe a condiciones propias del suelo, así como los tipos de cobertura presente en el Río Pindo.
4. Las estaciones sensibles a la variabilidad climática en la temperatura son Gonzánama y Saraguro, que corresponden a la parte alta y baja del Río Pindo, y para la precipitación únicamente la estación Gonzanamá de la parte baja, sin embargo no se evidenció variabilidad hidrológica en la estación Pindo AJ Amarillo. Esto genera puntos clave para considerar medidas de gestión y manejo del agua.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda realizar planes para la gestión del recurso hídrico que tome en cuenta la parte alta, media y baja de la zona de estudio, es decir trabajar en base a la unidad hidrográfica, ya que de acuerdo a los resultados se evidencia que existe páramo y bosque natural en la parte alta, ecosistemas prioritarios de conservación, que están siendo amenazados por el cambio de uso del suelo en el Río Pindo.
2. Dados los resultados de los índices de variabilidad climática e hidrológica con Rclimdex se recomienda en los planes de gestión y manejo de recursos hídricos colocar actividades y proyectos de adaptación al cambio climático en la unidad hidrográfica río Pindo.
4. Se recomienda realizar un plan de gestión de recursos hídricos transfronterizo en la unidad hidrográfica Puyango-Tumbes que involucre la conservación de la cabecera del Río Pino incluyendo actividades turísticas y monitoreo de la calidad del agua, ya que la zona posee coberturas importantes de conservación como páramo y bosque natural y a partir de la zona de estudio se desarrolla actividades de impacto como la minería y cambio de uso del suelo por lo que es prioritaria la conservación del Río Pindo para el mantenimiento de la parte media de Puyango y Tumbes en la parte baja.
5. Se recomienda realizar la validación con los factores correctores obtenidos en la calibración con TETIS en un periodo posterior al trabajo a continuación del año 2008.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ Bussi, G.; Francés, F.; & Horel, E. 2014. Modelling the impact of climate change on sediment yield in a highly erodible Mediterranean catchment. 1-17p.
- ✓ Brunet, M; Casado, M. J; Castro, Manuel de; Galán, P; López, J. M; Pastor, A; Petisco, E; Ramos, P; Ribalaygua, J; Rodríguez, E; Sanz, I; Torres, L. 2009. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España (en línea). Consultado 20 oct. 2016. Disponible en:[http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/cambio\\_climat/datos\\_diarios/Informe\\_Escenarios.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios/Informe_Escenarios.pdf)
- ✓ Calles, J. 2016. Monitoreo de la calidad y cantidad del agua. Disponible en: <http://agua-ecuador.blogspot.com/2016/07/monitoreo-de-la-calidad-y-cantidad-del.html> Blog El Agua en el Ecuador. Fecha de último acceso 22 de julio de 2016.
- ✓ CISPDR (Changjiang Institute of Survey Planning, Design, and Research. 2016. Plan Hidráulico Regional de la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo. Anexo I. 89 p.
- ✓ Crawley, W. 2007. The R Book. Wiley, Chichester, Inglaterra.
- ✓ Dávila, M.; y Francés, F. 2011. Modelación distribuida con “TETIS” dentro del marco del proyecto comparación de modelos distribuidos del de NWS EEUU aplicado en la “Región de Oklahima,” 149 p.
- ✓ FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia), 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. 298 p.
- ✓ Francés, F; Vélez, J; Múnera, J; Medici, C; Bussi, G; y Real, J. 2014. Manual del usuario: programa TETIS v.8.3.0. Valencia, es. Universidad Politécnica de Valencia. 94 p.

- ✓ Hargreaves, GH; & Samani, ZA. 1985. Estimating potential evapotranspiration journal of irrigation and drainage division, 223-230 p.
- ✓ INHAMI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). 1975- 2008. Anuarios y documentos hidrológicos de la cuenca del Río Puyango.
- ✓ Imbach, A; y Pérez-Molina, J. 2014. Análisis de la variabilidad climática en la depresión central de Chiapas, México. 108p.
- ✓ Imbach, A; Pérez-Molina, J; Ulloa, D; y Díaz, A. 2014. Análisis de la variabilidad climática en la costa de Chiapas, México. 90p.
- ✓ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2002a. Cambio climático y biodiversidad (en línea). Consultado 10 enero. 2016. Disponible en: [https://docs.google.com/file/d/0B1gFp6Ioo3akazFldDRpTXJ1OEE/edit?usp=drive\\_web&pli=1](https://docs.google.com/file/d/0B1gFp6Ioo3akazFldDRpTXJ1OEE/edit?usp=drive_web&pli=1)
- ✓ Karl, T; Meehl, G; Miller, C; Hassol, S; Waple, A; & Murray, W. 2008. Weather and climate extremes in a changing climate: regions of focus: North America, Hawaii, Caribbean and u. s. Pacific Islands. u. s. climate change science program. Washington, dc. 162 p.
- ✓ López, J; y Viera, P. 2014. Desarrollo de un manual hidrológico para el manejo de las cuencas del sur de la costa ecuatoriana. Tesis de ingeniería. Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. 267 p.
- ✓ MAGAP (Ministerio de agricultura ganadería acuicultura y pesca). 2012. Geoportal. Disponible en <http://geoportal.magap.gob.ec/>. Fecha de último acceso 08 de julio de 2015.
- ✓ Orozco, I. 2014. Modelación parsimoniosa y espacialmente distribuida de los procesos de acumulación y fusión de nieve. Tesis doctoral. Valencia, es. Universidad Politécnica de Valencia. 240 p.
- ✓ PACC (Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua). 2014. Variabilidad Climática conceptos. Disponible en: <http://www.pacc-ecuador.org/acerca-del-pacc/resumen/>. Fecha de último acceso 29 de Septiembre de 2016.
- ✓ Palacios, V. 1986. El uso de modelos en irrigación y áreas a fines. Terra, 4: 41-49.
- ✓ Puricelli, M. 2003. Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. 434 p.

- ✓ Ramírez, L. 2012. Análisis de la implementación de un modelo hidrológico distribuido con información estándar en España. Tesis mg. Valencia, es. Universidad Politécnica de Valencia. 159-184 p.
- ✓ Ramos-Fernandez, L. 2013. Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida [tesis doctoral]. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.doi:10.4995/thesis/10251/27548. disponible en <http://hdl.handle.net/10251/27548>. fecha de último acceso 9 de julio de 2016.
- ✓ R Development Core Team. 2010. R: A language and environment for statistical computing. r foundation for statistical computing, Vienna, Austria (Consultado: 25 nov. 2011, [www.r-project.org/](http://www.r-project.org/)).
- ✓ Rojas, R. 2009. Hidrología aplicada al manejo de cuencas. Universidad de los Andes 211p. p 34-35.
- ✓ Ruiz-Villanueva, V; Stoffel, M; Bussi, G; Francés, F; & Brethaut, CH. 2014. Climate change impacts on discharges of the rhone river in Lyon by the end of the twenty-first century: model results and implications.1-11p.
- ✓ Sánchez, FJ. 2001. El agua en el suelo. Disponible en [web.usual.es/javisan/hidro/temas/t040](http://web.usual.es/javisan/hidro/temas/t040). Fecha de último acceso 08 de diciembre de 2014.
- ✓ SENAGUA (Secretaria del Agua) 2009. Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas con metodología Pfafstetter. 34p.
- ✓ SENAGUA (Secretaria del Agua) 2012. La disponibilidad de agua en ecuador. disponible en <http://agua-ecuador.blogspot.com/2012/03/iniciamos-este-blog-para-compartir.html>. fecha de último acceso 15 de julio de 2015.
- ✓ SENAGUA (Secretaria del Agua) 2015. Modelo digital de elevación a nivel nacional (resolución 90 x 90 m).
- ✓ SENPLADES (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo), 2016. Servicio Nacional de Información. Geoportal disponible en: [http://app.sni.gob.ec/sni/index.php?option=com\\_content&view=article&id=132&itemid=158](http://app.sni.gob.ec/sni/index.php?option=com_content&view=article&id=132&itemid=158). Fecha de último acceso 28 de junio de 2016.
- ✓ Schwank, J., Escobar, R.; Girón, G.; & Morán, E. 2014. Modeling of the Mendoza river watershed as a tool to study climate change impacts on water availability. 92-96 p.
- ✓ U.S. Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook. Section 4, hydrology. Usda, Scs.

- ✓ Wilks, D. 2006. Statistical methods in the atmospheric sciences (en línea). 2ed. Elsevier, usa. disponible en: [http://web.unbc.ca/~ytang/text\\_book.pdf](http://web.unbc.ca/~ytang/text_book.pdf). fecha de último acceso 20 de noviembre de 2014.
  
- ✓ WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). 2015. Commission for atmospheric sciences. United Nation. 7 bis, Avenue de la paix, Geneva 2, Switzerland. disponible en: <http://www.wmo.int>.

## VIII. ANEXOS

Anexo 1: Área de estudio, Río Pindo.



Vista panorámica y cultivos en la unidad hidrográfica Río Pindo.



Pastos y cultivos a la margen derecha e izquierda de Río Pindo.



Río Pindo en época invernal. Ganado vacuno y bovino en la zona de estudio.



Estación hidrométrica Pindo AJ Amarillo sobre el Río Pindo.