

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**INCIDENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS CAUDALES
MÍNIMOS DEL ECUADOR**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

LUIS ENRIQUE RÍOS CANDO
(luisitoriosc84@hotmail.com)

DIRECTOR: Dr. Ing. Laureano Andrade Chávez
(laureano.andrade@epn.edu.ec)

Quito, febrero 2010

DECLARACIÓN

Yo, Luis Enrique Ríos Cando, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Luis Enrique Ríos Cando

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Luis Enrique Ríos Cando, bajo mi supervisión.

Dr. Ing. Laureano Andrade

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

“Gratitud uno de los valores más sublimes”

GRACIAS, a Dios y a mi Virgencita Auxiliadora por haber llenado mi espíritu de valor para poder cumplir con mis metas y por el haberme regalado 8 angelitos de la guarda que me cuidan en la Tierra.

GRACIAS, desde lo más profundo de mi corazón a todas las personas que contribuyeron para que este sueño se haga realidad; de manera especial al Dr. Laureano Andrade por su tutela, sus sabios consejos y la confianza brindada.

GRACIAS, a mi querida Escuela Politécnica Nacional por haberme brindado la oportunidad de llegar a obtener una profesión y así servir a la sociedad.

Luis Enrique

DEDICATORIA

A MIS ANGELITOS DE LA GUARDA

Reny, Pauly, Mariu, Adry, Mamita Inesita, Papito Luis, Mamalita

Con cariño

Luis Enrique

CONTENIDO

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	1
MARCO CONCEPTUAL	1
1.1. EL CICLO HIDROLÓGICO	1
1.2. CUENCA HIDROGRÁFICA Y ECUACIÓN HIDROLÓGICA	4
1.3. VARIABLES CLIMÁTICAS	8
1.3.1. PRECIPITACIÓN	8
1.3.2. TEMPERATURA	11
1.3.3. EVAPORACIÓN	14
1.3.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN	15
1.4. VARIABLES HIDROLÓGICAS	19
1.4.1. LECTURA LIMNIMÉTRICA	19
1.4.2. CAUDAL	22
1.5. EL CLIMA Y SU VARIABILIDAD	24
1.6. CAUDALES MÍNIMOS, ESTIAJES Y SEQUÍAS	27
1.6.1. INTRODUCCIÓN	27
1.6.2. CURVA DE DURACIÓN GENERAL	29
1.6.3. CAUDALES MÍNIMOS	31
1.6.4. ESTIAJES	32
1.6.5. SEQUÍAS	33
1.6.6. EVALUACIÓN DE SEQUÍAS	35
1.6.7. ARIDEZ Y DIAGRAMA OMBROTERMICO	36
1.7. INFORMACIÓN BÁSICA DISPONIBLE	38

1.7.1. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....	38
1.7.2. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA	39
CAPÍTULO 2	40
METODOLOGÍA	40
2.1. METODOLOGÍA APLICADA.....	40
2.1.1. CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN ESTUDIO.....	41
2.1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS CUENCAS DE DRENAJE	47
2.1.3. SERIES DE DATOS CONSIDERADAS Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD.....	50
2.1.4. SERIES DE TEMPERATURAS MÁXIMAS, PRECIPITACIONES MÍNIMAS Y CAUDALES MÍNIMOS.....	57
2.1.5. SERIES DE CAUDALES MÍNIMOS ANUALES	60
CAPÍTULO 3	63
BASE DE DATOS CLIMÁTICA E HIDROLÓGICA	63
3.1. FUENTES DE INFORMACIÓN	63
3.2. CONFORMACIÓN DE LA BASE DE DATOS	64
3.2.1. INFORMACIÓN CLIMÁTICA	64
3.2.2. INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA.....	66
3.2.3. RELLENO DE DATOS FALTANTES	67
3.3. HOMOGENEIZACIÓN DE LAS SERIES CLIMÁTICAS E HIDROLÓGICAS	69
3.3.1. CURVAS DE DOBLE MASA.....	69
3.3.2. PRUEBA DE RACHAS	74
CAPÍTULO 4	78
DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DE LAS CUENCAS DE DRENAJE	78
4.1. INTRODUCCIÓN	78

4.2. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y BALANCE HÍDRICO DE LAS CUENCAS DE DRENAJE.....	78
4.2.1. PRECIPITACIÓN.....	79
4.2.2. TEMPERATURA.....	81
4.2.3. DIAGRAMAS OMBROTÉRMICOS E IDENTIFICACIÓN DE PERÍODOS SECOS EN LAS CUENCAS DE DRENAJE.....	83
4.2.4. BALANCE HÍDRICO DE LAS CUENCAS DE DRENAJE	92
CAPÍTULO 5.....	102
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	102
5.1. INTRODUCCIÓN	102
5.2. CARACTERIZACIÓN DE CAUDALES MEDIOS Y MÍNIMOS.....	104
5.2.1. CURVAS DE MASAS REDISUALES.....	104
5.2.2. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE MASAS RESIDUALES.....	105
5.2.3. CURVAS DE MASAS RESIDUALES DE CAUDALES ANUALES DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN ESTUDIO	106
5.2.4. CURVAS DE DURACIÓN GENERAL DE CAUDALES MENSUALES Y DIARIOS	109
5.2.5. CURVAS ADIMENSIONALES DE DURACIÓN GENERAL.....	113
5.2.6. RELACIONES ANUALES ENTRE EL CAUDAL MEDIO Y LOS CAUDALES MÍNIMOS	115
5.2.7. RELACIONES MULTIANUALES ENTRE EL CAUDAL MEDIO Y LOS CAUDALES MÍNIMOS	118
5.3. ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE CAUDALES MÍNIMOS DIARIOS.....	121
5.4. ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE CAUDALES, PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MENSUALES CONSECUTIVAS	125
5.4.1. RÍO ALAMBI EN CHURUPAMBA.....	129

5.4.2. RÍO TOACHI A.J. PILATÓN	131
5.4.3. RÍO ALAO EN HACIENDA ALAO.....	134
5.4.4. RÍO MATADERO EN SAYAUSÍ.....	136
5.4.5. RÍO QUIJOS EN BAEZA	139
5.4.6. RIO YANAHURCO D.J. VALLE	142
5.4.7. RESUMEN.....	144
5.5. CAUDALES MÍNIMOS CONSECUTIVOS ASOCIADOS PERIODOS DE RETORNO.....	147
5.6. TENDENCIAS DE LAS ÁREAS BAJO LAS CURVAS DE DURACIÓN GENERAL ADIMENSIONALES.....	151
CAPÍTULO 6	157
PROPOSICIÓN DE INDICADORES CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS.....	157
6.1. DESCRIPCIÓN DE INDICADORES DE LA SEVERIDAD DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA E HIDROLÓGICA.....	157
6.1.1. PRECIPITACIONES Y CAUDALES MEDIOS MENSUALES MÍNIMOS CONSECUTIVOS.....	157
6.1.2. PRECIPITACIONES ANUALES Y CAUDALES MEDIOS ANUALES ...	158
6.1.3. TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES MÁXIMAS CONSECUTIVAS 159	
6.1.4. ÁREAS BAJO LAS CURVAS DE DURACIÓN GENERAL ADIMENSIONALES Y VOLUMEN BAJO LA CURVA DE DURACIÓN GENERAL ABSOLUTA	159
6.2. CALIFICACIÓN DE INDICADORES DE LA SEVERIDAD DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA	160
6.3. MATRICES DE CALIFICACIÓN DE INDICADORES DE LA SEVERIDAD DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA.....	162

CAPÍTULO 7171

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES171

 7.1. CONCLUSIONES.....171

 7.2. RECOMENDACIONES178

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS179

ANEXOS181

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Información meteorológica	38
Tabla 1.2. Información hidrológica	39
Tabla 2.1. Características físicas de las cuencas en estudio	49
Tabla 2.2. Distribución del número de rachas (según Thom).....	53
Tabla 2.3. Test de secuencias de precipitación estación Piscícola Chirimacay.	54
Tabla 2.4. Matriz mensual $X_{i,j}$ de variables climáticas e hidrológicas.....	57
Tabla 2.5. Matriz $Z_{i,k}$, de valores máximos/mínimos consecutivos	60
Tabla 2.6. Matriz de caudales mínimos anuales	61
Tabla 3.1. Estaciones meteorológicas de interés.....	65
Tabla 3.2. Estaciones hidrométricas	67
Tabla 3.3. Ecuaciones de relleno de información.....	69
Tabla 3.4. Test de secuencias en series de precipitación mensual.....	75
Tabla 3.5. Test de secuencias en series de temperatura mensual	76
Tabla 3.6. Test de secuencias en series de caudales mensuales.....	76
Tabla 4.1. Precipitaciones características mensuales	79
Tabla 4.2. Precipitaciones características anuales	79
Tabla 4.3. Temperaturas características mensuales	81
Tabla 4.4. Resumen de las características climáticas principales de las cuencas	92
Tabla 4.5. Balances hídricos cuencas en estudio	95
Tabla 5.1. Caudales mínimos absolutos y específicos (caudales medios diarios)	110
Tabla 5.2. Caudales mínimos absolutos y específicos cuencas en estudio (caudales medios mensuales).....	110

Tabla 5.3. Coeficiente de ajuste lineal caudales medios vs caudales mínimos	117
Tabla 5.4. Matriz de caudales medios y mínimos	118
Tabla 5.5. Coeficiente k_j propios de las cuencas hidrográficas en estudio	119
Tabla 5.6. Coeficiente k_j regionales	120
Tabla 5.7. Arreglo de caudales mínimos diarios	122
Tabla 5.8. Caudales anuales 70% (Q70) río Matadero en Sayausí	122
Tabla 5.9. Indicadores f_j de caudales mínimos medios diarios	125
Tabla 5.10. Matriz mensual $X_{i,j}$ de variables climáticas e hidrológicas	126
Tabla 5.11. Matriz i, k de valores máximos/mínimos consecutivos	127
Tabla 5.12. Análisis del incremento de evaporación en la cuenca del río Matadero	137
Tabla 5.13. Análisis del incremento en porcentaje de la relación (h_e/h_p) en la cuenca del río Quijos	140
Tabla 5.14. Factores f_j de caudal, precipitación y temperatura	145
Tabla 5.15. Caudales mínimos probables de 1 mes consecutivo de las cuencas hidrográficas en estudio	149
Tabla 5.16. Caudales mínimos probables de 3 meses consecutivos de las cuencas hidrográficas en estudio	149
Tabla 5.17. Caudales mínimos probables de 6 meses consecutivos de las cuencas hidrográficas en estudio	150
Tabla 5.18. Valores medios de las áreas bajo la curva de duración general adimensional de las cuencas en estudio	153
Tabla 5.19. Factores f_j dados por las áreas bajo la curva de duración general adimensional de las cuencas en estudio	156
Tabla 6.1. Escala de calificación cualitativa	162
Tabla 6.2. Escala de calificación cualitativa para caudales mínimos	162

Tabla 6.3. Calificación de indicadores en la cuenca del río Alambi en Churupamba	164
Tabla 6.4. Calificación de indicadores en la cuenca del río Toachi A.J. Pilatón	164
Tabla 6.5. Calificación de indicadores en la cuenca del río Alao en Hacienda Alao	165
Tabla 6.6. Calificación de indicadores en la cuenca del río Matadero de Sayausí	165
Tabla 6.7. Calificación de indicadores en la cuenca del río Quijos en Baeza ...	166
Tabla 6.8. Calificación de indicadores en la cuenca del río Yanahurco D.J. Valle	166
Tabla 6.9. Calificación de indicadores por división geográfica	167
Tabla 6.10. Calificación de indicadores por vertientes hidrográficas	168
Tabla 6.11. Calificación de indicadores por grado de conservación de la cuenca	168
Tabla 6.12. Calificación de indicadores por características físico-geográficas	169

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Sistematización del ciclo hidrológico.....	4
Figura 1.2. Esquema de la cuenca hidrográfica	5
Figura 1.3. Flujo de agua subterránea en una cuenca hidrográfica	7
Figura 1.4. Sensor por radar RLS OTT colocado en sitio	21
Figura 1.5. Curvas de descarga estación Toachi D.J. Sarapullo.....	24
Figura 1.6. Indicadores y cambios del sistema climático a nivel mundial y Ecuador	26
Figura 1.7. Indicadores y cambios del sistema climático en el Ecuador.....	26
Figura 1.8. Curva de duración general de caudales mensuales de la estación Alao en Hacienda Alao.....	30
Figura 1.9. Modelo de interacción de sequías con la economía	35
Figura 1.10. Diagrama ombrotérmico	37
Figura 2.1. Cuencas hidrográficas en estudio	42
Figura 2.2. Modelo de curva de doble masa $\Sigma QiQm$ vs $\Sigma PiPm$	56
Figura 3.1. Modelo gráfico de correlación lineal	68
Figura 3.2. Curva de doble masa cuenca río Alambi.....	70
Figura 3.3. Curva de doble masa cuenca río Toachi.....	71
Figura 3.4. Curva de doble masa cuenca río Alao	72
Figura 3.5. Curva de doble masa cuenca río Matadero.....	73
Figura 3.6. Curva de doble masa cuenca río Quijos.	73
Figura 3.7. Curva de doble masa cuenca río Yanahurco	74
Figura 4.1. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Alambi en Churupamba	85
Figura 4.2. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Toachi A.J. Pilatón	86

Figura 4.3. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Alao en Hacienda Alao	87
Figura 4.4. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Matadero en Sayausí	88
Figura 4.5. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Quijos en Baeza	89
Figura 4.6. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Yanahurco D.J. Valle	90
Figura 4.7. Tendencias de precipitación y temperatura con la altitud	96
Figura 4.8. Coeficientes de escurrimiento de las cuencas hidrográficas en estudio	101
Figura 5.1. Curva de masas residuales cuencas de la región sierra	106
Figura 5.2. Curva de masas residuales cuencas de la región oriental	107
Figura 5.3. Curva de masas residuales cuencas de la región litoral	108
Figura 5.4. Curvas de duración general en caudales específicos	112
Figura 5.5. Curvas adimensionales de duración general de las cuencas	115
Figura 5.6. Correlación caudal medio vs caudal mínimo	116
Figura 5.7. Tendencias de k_j para cuencas con régimen occidental y oriental	121
Figura 5.8. Variación de caudales 70% río Matadero en Sayausí	123
Figura 5.9. Variación de caudales, precipitaciones mínimas y temperaturas máximas	127
Figura 5.10. Variación de las temperaturas mensuales máximas de la cuenca del río Alambi en Churupamba	130
Figura 5.11. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 1 y 2 meses consecutivos de la cuenca del río Alambi en Churupamba	130
Figura 5.12. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 3, 4, 5 y 6 meses consecutivos de la cuenca del río Alambi en Churupamba	131

Figura 5.13. Variación de las temperaturas mensuales máximas en la cuenca del río Toachi A.J. Pilatón.....	132
Figura 5.14. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas en la cuenca del río Toachi A.J. Pilatón.	133
Figura 5.15. Variación de las temperaturas mensuales máximas en la cuenca del río Alao en Hacienda Alao.	135
Figura 5.16. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 1 y 2 meses consecutivos de la cuenca del río Alao en Hacienda Alao.	135
Figura 5.17. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 3, 4, 5 y 6 meses consecutivos de la cuenca del río Alao en Hacienda Alao.....	136
Figura 5.18. Variación de las temperaturas mensuales máximas en la cuenca del río Matadero en Sayausí.....	138
Figura 5.19. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 1 y 2 meses consecutivos de la cuenca del río Matadero en Sayausí.....	138
Figura 5.20. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 3, 4, 5 y 6 meses consecutivos de la cuenca del río Matadero en Sayausí.....	139
Figura 5.21. Variación de las temperaturas mensuales máximas en la cuenca del río Quijos	140
Figura 5.22. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas en la cuenca del río Quijos.....	141
Figura 5.23. Variación de las temperaturas mensuales máximas en la cuenca del río Yanahurco D.J. Valle	142
Figura 5.24. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mensuales mínimas consecutivas en la cuenca del río Yanahurco D.J. Valle .	143

Figura 5.25. Curva de duración general adimensional	152
Figura 5.26. Variación de las áreas bajo las curvas adimensionales de las cuencas	155
Figura 6.1. Variación de las precipitaciones mínimas consecutivas de 2 meses, estación Alao.	158
Figura 6.2. Variación del volumen de autorregulación de la cuenca del río Alao	160

RESUMEN

El clima del planeta y del país está experimentando variaciones en diferentes escalas de espacio y tiempo, realidad que junto con mi responsabilidad como ciudadano del mundo me ha motivado a realizar la presente investigación, cuyo objetivo principal es analizar y evaluar la variabilidad climática, a través de la precipitación y temperatura en los caudales mínimos del Ecuador.

Los resultados obtenidos gracias a las metodologías y técnicas de investigación aplicadas, permitieron validar las hipótesis planteadas y determinar la existencia de una dependencia de las variables hidrológicas con las climáticas para las distintas cuencas hidrográficas de las 3 regiones de nuestro país.

La estacionalidad de las lluvias define en gran parte la severidad de los períodos de estiaje, así también se demuestra que la variabilidad del clima, especialmente de la precipitación y temperatura incide directamente en la ocurrencia de caudales mínimos y su duración. La disminución de los caudales y precipitaciones mensuales mínimas en el tiempo es evidente, así también el incremento de la temperatura.

La dependencia demostrada entre las variables hidrológicas y climáticas en la ocurrencia de caudales mínimos, se refleja claramente en los indicadores que se generan al final del presente estudio.

PRESENTACIÓN

Una de las tareas importantes que responsablemente tiene el hombre con el medio en el cual se desarrolla es preservarlo; sin embargo, este buen sentir a momentos se vuelve irrealizable en razón de que es el mismo hombre quien provoca ciertos desórdenes que van en contra del normal ciclo del agua tales como el cambio del uso del suelo, el avance de la frontera urbana, y el incremento de las actividades agro-productivas, entre otras, que originan el decrecimiento de la infiltración, la disminución de los caudales y el incremento de las tasas de erosión ante eventos de crecidas.

Ante la realidad descrita, constituye un reto para el joven profesional, identificar las causas por las cuales ocurren estos fenómenos.

Los objetivos propuestos son:

1. Objetivo General

Detectar la incidencia de la variabilidad del clima en los caudales mínimos a través del análisis de registros históricos climáticos e hidrológicos.

2. Objetivos Específicos

- Mejorar el conocimiento científico sobre los procesos climáticos e hidrológicos ligados a los estiajes y sequías hidrológicas del Ecuador;

- Conformar la base de datos para 6 cuencas seleccionadas del Ecuador y evaluar su confiabilidad;
- Analizar la variabilidad de las características del clima de estas cuencas en función de los registros mensuales y anuales de precipitación y temperatura de estaciones seleccionadas, a través de indicadores;
- Analizar la variabilidad estacional y multianual de los caudales mínimos a través de indicadores representativos;
- Generar balances hídricos de las cuencas hidrográficas y establecer las variables del clima con mayor influencia en los caudales medios y mínimos; y,
- Definir tendencias sobre el comportamiento de los caudales mínimos y de los estiajes, establecer su severidad y temporalidad, incluyendo valoraciones probabilísticas.

El presente Proyecto de Titulación contiene los siguientes capítulos:

CAPITULO 1: Marco Conceptual. Se describen los conceptos básicos hidrológicos, ciclo del agua y las variables climatológicas.

CAPITULO 2: Metodología. Se exponen la metodología y los procedimientos estadísticos y matemáticos aplicados para la obtención de las series de datos que relacionan a los caudales, precipitaciones y temperaturas, que refieran su variabilidad.

CAPÍTULO 3: Base de datos climática e hidrológica. Se describe la información utilizada en el estudio y su correspondiente homogeneización mediante el test de secuencias y curvas de doble masa.

CAPITULO 4: Descripción climática de las cuencas de drenaje. Se caracterizan la precipitación y temperatura para las estaciones representativas en las cuencas de drenaje, además se realiza un balance hídrico de las cuencas considerando las láminas de precipitación, escurrimiento y evaporación determinada mediante la Fórmula de Turc. Se establecen coeficientes de escurrimiento para las distintas cuencas de drenaje.

CAPITULO 5: Presentación de resultados. En este capítulo consta el análisis de tendencia de caudales, precipitaciones, temperatura y áreas bajo las curvas de duración general adimensionales para el período 1971-2005; además se establecen factores que refieren las tendencias de estas variables en el tiempo. Como aspecto complementario se describen curvas de duración general absolutas y adimensionales.

CAPITULO 6: Proposición de indicadores climáticos e hidrológicos. Se proponen 12 indicadores de la severidad de la variabilidad climática e hidrológica y sus respectivas calificaciones en función de un análisis de frecuencias relativas y acumuladas.

CAPITULO 7: Conclusiones y recomendaciones

CAPÍTULO 1

MARCO CONCEPTUAL

1.1. EL CICLO HIDROLÓGICO

Se denomina ciclo hidrológico a la circulación o movimiento del agua en la tierra, que incluye los almacenamientos de agua en la atmósfera, en la superficie terrestre, en el subsuelo y en los océanos y mares, y los procesos que permiten el intercambio o el flujo del agua entre ellos.

El ciclo hidrológico se puede modelar a través de variables que se relacionan entre sí por la interacción de varios procesos climáticos e hidrológicos, siendo estos procesos condicionados por factores físico-geográficos que intervienen principalmente en el movimiento del agua.

Se puede distinguir 4 sistemas en el ciclo hidrológico:

- **SISTEMA ATMOSFÉRICO**

Este proceso se abastece de la evaporación, que llega a la atmósfera alta desde los cuerpos de agua (océanos, mares, ríos, lagos, lagunas) y desde la superficie terrestre, se presenta también una variante de la evaporación cuando existe cobertura vegetal, dando como resultado la evapotranspiración.

El vapor de agua es otro de los gases que constituyen la atmósfera, y cuya presencia y distribución está condicionado por la circulación general de la atmósfera; si se presentan las condiciones adecuadas, el vapor de agua cambiará de fase a través de la precipitación en sus distintas formas ya sea nieve, lluvia, hielo, rocío, etc.

La precipitación que ocurre sobre la superficie continental pasa a formar parte del almacenamiento superficial o subsuperficial, exceptuando a la parte de la precipitación que es interceptada por la vegetación, y que puede evaporarse.

- **SISTEMA DE AGUA SUPERFICIAL**

En este sistema, la precipitación se considera como una entrada. Sin considerar el agua re-evaporada, el volumen restante que no se infiltra escurrirá por la superficie del terreno, hasta llegar al sistema de drenaje natural y formar parte de la escorrentía superficial; y la otra parte del escurrimiento saldrá de este sistema mediante el proceso de infiltración y se incorporará al sistema subterráneo.

- **SISTEMA SUBTERRÁNEO**

El agua infiltrada pasa a formar parte de la zona no saturada del suelo o de la zona saturada, desde la cual se puede presentar la infiltración profunda llamada percolación, o también puede alimentar los caudales de los ríos como caudal base.

El flujo subterráneo puede ocupar grandes extensiones y actuar como una salida de agua al océano o a otros sistemas regionales. El flujo subsuperficial es generalmente local y puede tener afloramientos a la superficie. Este flujo que tiene lugar en un sitio

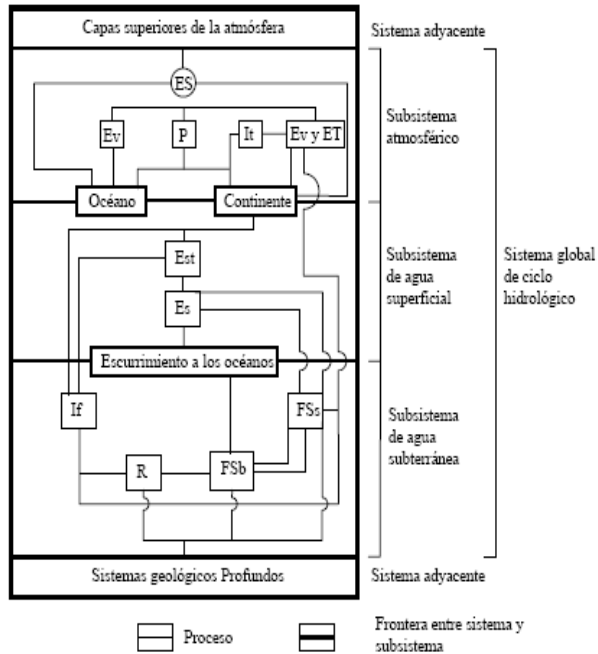
del suelo superior puede convertirse en una salida del sistema mediante la evapotranspiración.

- **SISTEMA OCÉANOS Y MARES**

Este sistema comprende la mayor extensión de la Tierra (aproximadamente 75%), y se convierte en una fuente importante de evaporación. Todo el escurrimiento superficial que tiene lugar en la superficie terrestre y que se transporta mediante los cauces naturales (ríos, quebradas) desemboca en este sistema; así como también los afloramientos subterráneos.

Los sistemas que actúan en las cuencas hidrográficas son 3: atmósfera, aguas superficiales y aguas subterráneas. En la Figura 1.1 se presenta un esquema del ciclo del agua donde se evidencia el alto grado de interrelación entre estos sistemas, que están condicionados por los procesos meteorológicos tales como la precipitación (P), evaporación (EV), evapotranspiración (ET) que están en el sistema superior (atmosférico).

Figura 1.1. Sistematización del ciclo hidrológico



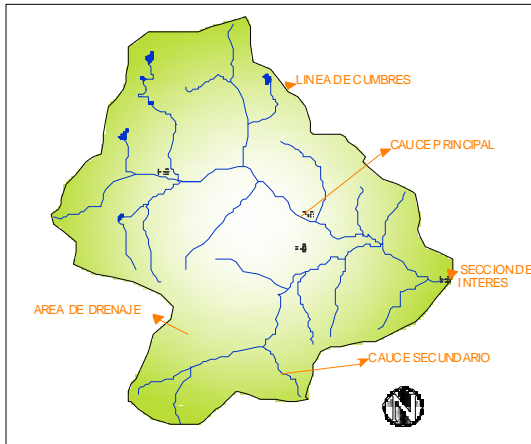
FUENTE: (BREÑA & JACOBO, 2006)

1.2. CUENCA HIDROGRÁFICA Y ECUACIÓN HIDROLÓGICA

“Una cuenca hidrográfica es un área delimitada por la línea de cumbres o divisoria, drenada por un curso de agua o por un sistema interconectado de cauces naturales, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple y común”¹ (ver Figura 1.2).

¹ (MONSALVE, 1990)

Figura 1.2. Esquema de la cuenca hidrográfica



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Una cuenca hidrográfica discretizada como un modelo simple de entrada – salida de agua, responde a la siguiente ecuación:

$$E - S = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde:

Entradas (E)

- Precipitación
- Trasvases de agua
- Escorrentía superficial de otras cuencas
- Aguas subterráneas de otras cuencas

Salidas (S)

- Evaporación
- Transpiración
- Exportaciones de agua, aprovechamientos consuntivos en la propia cuenca.
- Infiltración
- Escurrimiento superficial hacia otras hoyas
- Aguas subterráneas hacia otras cuencas.

Variación del almacenamiento (ΔV)

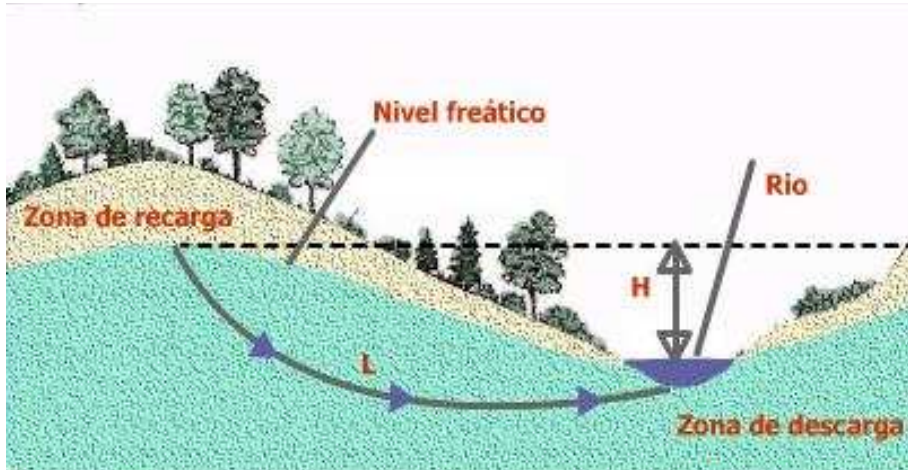
- Aguas subterráneas
- Humedad de suelo
- Almacenamiento superficial como embalses, canales.

La ecuación 1.1, es conocida como **ecuación hidrológica** e indica que:

En volumen o lámina de agua lo que ingresa menos lo que sale es igual al cambio en los volúmenes o láminas de almacenamiento, asociado a un determinado período de tiempo, y dentro de una cuenca hidrográfica.

El agua infiltrada, en alto porcentaje a los cauces en término de caudal base (ver Figura 1.3).

Figura 1.3. Flujo de agua subterránea en una cuenca hidrográfica



FUENTE: <http://www.ucm.es/info/diciex/proyectos>

Para el presente estudio, la ecuación hidrológica a ser evaluada toma la siguiente forma:

$$h_p - h_Q - h_e \cong \frac{\Delta V}{A} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

$$h_Q \cong h_p - h_e \quad (\text{Ec. 1.3.})$$

Donde:

h_Q : lámina de escurrimiento superficial (mm);

h_p : lámina de precipitación (mm);

ΔV : variación de volumen del almacenamiento (m^3); y

A : área de la cuenca de drenaje (km^2).

La ecuación 1.3, define un balance hídrico básico de una cuenca de drenaje, refiriendo que el caudal líquido disponible en un curso natural es el resultado de la interacción de procesos de precipitación y evaporación por efecto principalmente de la temperatura. A parte de considerar que $\frac{\Delta V}{A} = 0$ para períodos anuales, situación que puede ser entendida si se asume que la humedad del suelo o del nivel de aguas subterráneas al final del período seco de cada año es relativamente la misma.

1.3. VARIABLES CLIMÁTICAS

La ecuación 1.3 definida en el numeral 1.2, refiere variables climáticas que intervienen en el ciclo hidrológico y por ende su presencia en el balance hídrico de una cuenca hidrográfica. Estas variables climáticas principales son:

- Precipitación;
- Temperatura; y,
- Evaporación

1.3.1. PRECIPITACIÓN

- **DEFINICIÓN**

Se le da el nombre de precipitación al agua en cualquiera de los tres estados físicos en que alcanza la superficie terrestre, proveniente de la atmósfera.

La humedad presente en la atmósfera para que se precipite requiere de algún mecanismo que enfríe el aire lo suficiente para que se aproxime o llegue a su punto de saturación.

En relación a su origen, pueden distinguirse los siguientes tipos de precipitación:

- Las *ciclónicas* son provocadas por los frentes asociados a fuertes vientos tales como un ciclón. La mayor parte del volumen de precipitación recogido en una cuenca se debe a este tipo de precipitaciones:
- Las de convección se producen por el ascenso de bolsas de aire caliente; los aguaceros o lluvias intensas; y,
- Las precipitaciones *orográficas* se presentan cuando masas de aire húmedo son obligadas a ascender al encontrar una barrera montañosa.

Las lluvias orográficas y por convección se caracterizan por ocupar áreas relativamente pequeñas y por presentar generalmente altas intensidades.

El estudio de las precipitaciones es básico en cualquier estudio hidrológico regional, para cuantificar los recursos hídricos, puesto que constituyen la principal (en general la única) entrada de agua a una cuenca. También es fundamental en la previsión de avenidas, diseño de obras de drenaje urbano y vial y en estudios de erosión, etc.

- **MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN**

Todas las formas de precipitación se miden a partir de asumir una columna vertical de agua que se acumularía sobre la superficie plana, si el agua no escurriera hacia ningún lado y permaneciera en el lugar en que cayó. A continuación se describen los instrumentos de medición de la pluviosidad.

- **PLUVIÓMETRO:** Se mide la altura de una columna de agua acumulada durante un determinado período de tiempo.
- **PLUVIÓGRAFOS:** Se registra sus mediciones en una tira de papel continuo que se desplaza a velocidad constante, relacionando así las lecturas con el tiempo.

- **REPRESENTACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN**

- **PLUVIOGRAMA:** Registro obtenido de un pluviógrafo, que en el eje horizontal consta el tiempo, y en el vertical la altura de agua acumulada. Presenta descensos debidos a que cuando el nivel llega a 10 mm. de precipitación, se desaloja el agua.
- **CURVA DE MASA:** Es una gráfica de precipitación acumulada y por tanto siempre es creciente, y su pendiente representa la intensidad de la lluvia (altura de precipitación acumulada por unidad de tiempo) en un intervalo de tiempo.
- **HIETOGRAMA:** A partir de una curva de precipitación acumulada se genera el diagrama de barras verticales, que representan las

variaciones de la altura de precipitación o de su intensidad en lapsos o intervalos de tiempo determinados.

La pluviosidad y su distribución en nuestro país tienen gran variabilidad espacial, se presentan zonas con lluvia anual menor a 500 mm (Palmira, Santa Isabel) y por otras con valores por sobre los 5000 mm en la región oriental (Puyo). Ecuador se encuentra en la zona ecuatorial en donde se presenta la Zona de Convergencia Intertropical que, está influenciada por corrientes oceánicas (El Niño y Humboldt).

Además geográficamente, el Ecuador está atravesado por la Cordillera de los Andes que juega un papel importante en el origen, aislamiento y repartición de las masas de aire, las cuales dependiendo de sus características meteorológicas presentan condiciones de diferente naturaleza.

1.3.2. TEMPERATURA

- **DEFINICIÓN**

En Meteorología e Hidrología, el término temperatura se refiere a la cantidad de calor presente en la capa baja de la atmósfera, y para su medición, se emplean termómetros, mismos que se colocan en sitios donde:

- No se obstruya la circulación del aire.
- Estén protegidos de los rayos directos del sol
- No se mojen en caso de precipitación

Existen varias formas de referirse a la temperatura del aire, siendo las más usuales, las siguientes (INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología):

- **TEMPERATURA PROMEDIO DIARIA:** Se hacen lecturas cada 3 o 6 horas y se calcula la media aritmética.
- **TEMPERATURA MEDIA DIARIA:** Es el promedio de la temperatura máxima y mínima diaria.
- **TEMPERATURA DIARIA NORMAL:** Es el promedio de la temperatura media diaria de una fecha dada, para los últimos 30 años.
- **TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL:** Es el promedio de las temperaturas medias mensuales máximas y mínimas.
- **TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL:** Es el promedio de las temperaturas promedio mensuales para un año.
- **TEMPERATURA MÁXIMA DIARIA:** Es la temperatura absoluta máxima maximorum registrada en un día, existe un termómetro específico para medir una temperatura.
- **TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA:** Es la temperatura absoluta mínima minimorum registrada en un día, existe un termómetro específico para medir esta temperatura.

- **MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA**

Existen varios tipos de termómetros (INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología):

- **TERMÓMETRO DE MÍNIMA:** Es de alcohol en recipiente de vidrio, tiene un indicador que permanece marcando la menor temperatura que se produjo desde que se colocó por última vez.
- **TERMÓMETRO DE MÁXIMA:** Es de mercurio y tiene una contracción cerca del recipiente de mercurio que impide que el mercurio regrese al recipiente cuando la temperatura disminuye, registrando de esta manera la máxima temperatura que se produjo desde que se colocó por última vez.
- **TERMÓGRAFO:** Es un instrumento que registra la temperatura en una cinta continua de papel, relacionando dichas lecturas con el tiempo.

Durante el día, la mayor temperatura se alcanza entre las 13 y 15 horas: mientras que la menor se data antes de la salida del sol. Esto depende de la nubosidad del cielo. La presencia de varios pisos altitudinales del país incide en la variabilidad de temperatura, desde los 0°C en las áreas nevadas hasta por sobre los 26°C de temperatura media mensual en la costa ecuatoriana.

1.3.3. EVAPORACIÓN

- **DEFINICIÓN**

Se define a la evaporación como la tasa neta de transporte de vapor de agua hacia la atmósfera desde la superficie terrestre.

En la tierra, las máximas tasas de evaporación ocurren en la región ecuatorial y disminuyen hacia los polos; mientras que localmente, las máximas se dan en el período seco del año y decrecen durante el período lluvioso, que por lo general corresponde al de mayor humedad relativa.

Esta tasa varía en dependencia de los siguientes factores:

- Radiación solar
- Velocidad del viento
- Presión de vapor de la capa de aire inmediata superior
- Temperatura del aire
- Presión atmosférica

Se debe considerar que todas las superficies expuestas a la precipitación, sean vegetales, pavimentos, tierra, agua etc., son superficies potenciales de evaporación. Además, la tasa de evaporación de una superficie saturada es aproximadamente igual a la de una superficie de agua a la misma temperatura (BREÑA & JACOBO, 2006).

- **MEDICIÓN DE LA EVAPORACIÓN**

La determinación de la evaporación en forma exacta es prácticamente imposible, pero existen diversos métodos para calcularla en forma estimativa, mismos que se clasifican como directos e indirectos.

- **MÉTODOS DIRECTOS:** Los tanques *evaporímetros* son recipientes de sección circular con diámetros entre 2 y 16 pies, y profundidades entre 1.5 y 3 pies. Deben tener un tirante de agua de 20 cm, y volverse a llenar cuando el nivel descienda a 18 cm. La evaporación es la disminución de peso del recipiente con agua, entre dos pesadas consecutivas (MONSALVE, 1990).
- **MÉTODOS INDIRECTOS:** Consisten en la aplicación del enfoque teórico a partir de un balance ya sea en volumen de agua o en cantidad de energía de un sistema.

1.3.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN

- **DEFINICIÓN**

Es la cantidad de agua que retorna a la atmósfera en forma de vapor, debido tanto a la evaporación en la superficie del suelo como a la transpiración de la vegetación, y cuya magnitud depende del agua realmente disponible, es decir, la que el suelo ha logrado retener para el consumo de la vegetación (en la zona no saturada y saturada del suelo).

La evapotranspiración potencial, es la pérdida de humedad que ocurriría en un sistema, si en ningún momento existiera una deficiencia de agua en el suelo para uso de la vegetación; para ello es necesario agregar agua continuamente al sistema.

La evapotranspiración real, es la pérdida de humedad que ocurre en un sistema sin manipular la cantidad de agua disponible.

- **MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN**

- **BALANCE HÍDRICO:** si el agua almacenada y los componentes de entrada y salida de un sistema pueden medirse exactamente, el volumen de agua necesario para balancear la ecuación del balance hídrico es la evapotranspiración. La confiabilidad de los cálculos se incrementa para períodos a largo plazo y disminuye en el corto plazo.
- **EVAPOTRANSPIRÓMETROS:** Son recipientes de fondo impermeable que miden la evapotranspiración potencial, deben regarse homogéneamente, de manera que no exista déficit ni exceso de humedad en el sistema.
- **LISÍMETROS:** Tanques de fondo permeable e incluso con succión en el fondo, que miden la evapotranspiración real. Son de mayor longitud para permitir que las raíces crezcan libres.
- **REGISTROS METEOROLÓGICOS:** Tanto la evapotranspiración real como la potencial dependen de la radiación solar, humedad, viento y

temperatura. Se pueden hacer correlaciones estadísticas en función de la latitud y las horas de sol por día.

Existen varios métodos y fórmulas que permiten estimar la evapotranspiración de una zona, dependiendo de factores meteorológicos y geográficos que caractericen al sitio en estudio, tales como:

- MÉTODO DE THORNTWAITE

Este método se desarrollo correlacionando datos de evapotranspiración potencial medida en evapotranspirómetros localizados en hoyas hidrológicas, con datos de temperatura media mensual y longitud del día.

$$E_j = \left(\frac{10t_j}{I} \right)^a * 1.6 \quad (Ec. 1.4)$$

E_j : evapotranspiración potencial mensual del mes j, no ajustada (cm);

t_j : temperatura media mensual del mes j, (°C); y,

I: Índice de calor

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (Ec. 1.5)$$

$$i_j = \left(\frac{t_j}{5} \right)^{1.514} \quad (Ec. 1.6)$$

a: ecuación cúbica que depende del índice de calor

$$\alpha = 0.675 \times 10^6 I^3 - 0.771 \times 10^4 I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49 \quad (\text{Ec. 1.7})$$

- FÓRMULA DE COUTAGNE

Se trata de una fórmula establecida empíricamente comparando las precipitaciones y la esorrentía total de numerosas cuencas.

$$E_r = P - \chi P^2 \quad (\text{Ec. 1.8})$$

E_r : evapotranspiración real, (m/año);

P: precipitación, (m/año).

$$\chi = \frac{1}{0.8 + 0.14t} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

t: temperatura media anual (°C);

La fórmula es válida para valores den P (m/año) comprendidos entre $\frac{1}{8\chi}$ y $\frac{1}{2\chi}$.

- FÓRMULA DE TURC

Esta fórmula es el resultado del estudio de 254 hojas hidrográficas en el mundo.

$$E = \frac{P}{\left(0.9 + \frac{P^2}{[L(t)]^2}\right)^{0.5}} \quad (Ec. 1.10)$$

E: evapotranspiración real anual (mm)

P: precipitación anual (mm);

L(t): $300 + 25t + 0.05t^2$; y,

T: temperatura media anual (°C).

Si $\frac{P}{[L(t)]^2} \leq 0.1$ entonces $E=P$

1.4. VARIABLES HIDROLÓGICAS

1.4.1. LECTURA LIMNIMÉTRICA

El nivel de un río es la elevación de la superficie libre superior del agua con respecto a un nivel arbitrario de referencia, que en algunos casos es el nivel del mar.

- **MEDICIÓN DEL NIVEL DE UN RÍO**

Los instrumentos empleados para medir el nivel de un río son;

- **LIMNÍMETROS:** son escalas verticales que tiene su parte inferior siempre sumergida en el agua, normalmente lo son las pilas de los puentes, los soportes de los muelles, y otras estructuras similares.

Se puede bajar un contrapeso desde cualquier estructura fija hasta la superficie del agua, y el nivel puede determinarse midiendo la longitud de cable necesario para que el peso haga contacto con el agua.

- **LIMNÍGRAFOS:** Son aparatos que registran el movimiento de un flotador, haciendo el trazo de una línea continua sobre un papel que gira a velocidad constante.

Generalmente se instalan dentro de una caseta de protección localizada sobre una especie de pozo, con el objeto de minimizar los errores debidos a las fluctuaciones que producen las ondas superficiales de la corriente.

- **SENSORES DE NIVEL DE AGUA:** : existen varios sensores automáticos de registro continuo de niveles tales como:
 - Sensores por radar RLS;
 - Decodificadores angulares Thalimides; y,
 - Sensores por burbujeo Nimbus, CBS;

El instrumento que muestra mayor versatilidad y utilidad en la práctica ingenieril es el RLS (Radar Level Sensor) que es un sensor para medir sin contacto físico directo. El sensor utiliza la tecnología de radar por

impulsos para determinar el nivel de las aguas; tiene dos antenas que cumplen la función de enviar y recibir las señales del radar, además cuenta con un data logger que procesa y almacena la información.

El RLS (Figura 1.4) se instala sobre la superficie del agua por ejemplo: en un puente o en una construcción auxiliar. Es sólido, relativamente ligero y la carcasa, resistente al agua, es fácil de instalar. El margen de medición del RLS comprende hasta 35 m, ha sido especialmente creado para su uso sobre el terreno en estaciones de medición que se abastecen de modo libre, realiza 16 lecturas por segundo radicando ahí su confiabilidad. El RLS es la alternativa económica, práctica y fiable de los sensores convencionales de nivel de agua.

Figura 1.4. Sensor por radar RLS OTT colocado en sitio



FUENTE: www.ott.com

En general los limnímetros son más sencillos y menos costosos, pero tienen el inconveniente de que deben leerse con frecuencia. La información que proporcionan tanto los limnímetros como los limnígrafos sirve para construir un gráfico llamado hidrograma, el cual en el eje horizontal presenta el tiempo, y en el vertical el caudal o gasto.

1.4.2. CAUDAL

Se denomina caudal o gasto a la cantidad de agua que se mueve en un cauce, y generalmente se concibe como:

- La relación entre el volumen de agua que atraviesa una sección, y el tiempo que tarda en hacerlo; o,
- El producto de la velocidad del agua al atravesar una sección del cauce, por el área de dicha sección transversal.

Los procedimientos usuales de medición del caudal de una corriente están en función de la segunda forma.

- **MEDICIÓN DEL CAUDAL**

- **CORRENTÓMETROS:** Se da el nombre de correntómetros de hélice al aparato que mide la velocidad del agua en corrientes fluviales.

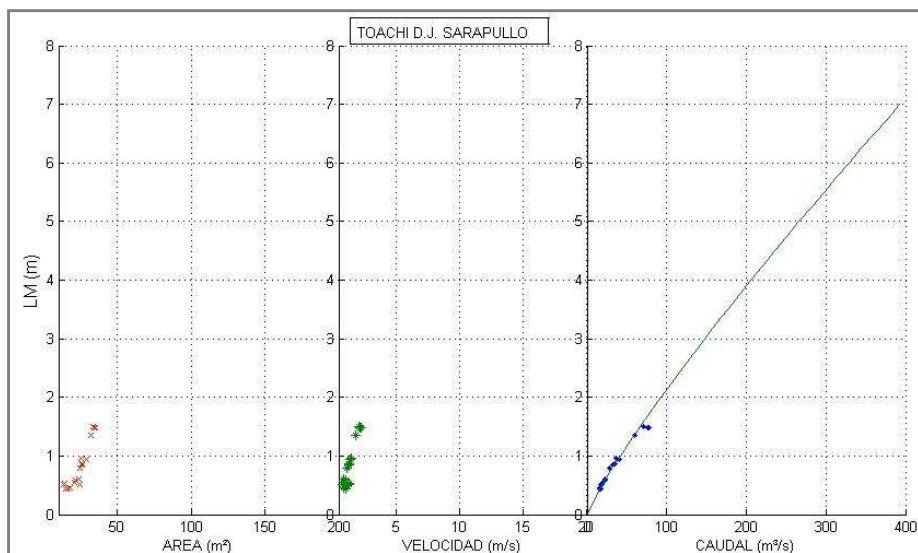
- **MEDICIÓN CON AGENTES QUÍMICOS:** La medición con agentes químicos que normalmente son sal común coloreada o material fluorescente; o cualquier material que flore fácilmente, pueda detectarse y no se diluya. El gasto se calcula estimando el área en dos secciones consecutivas del río y midiendo la velocidad que tarda la sustancia en desplazarse entre las secciones.

- **RELACIONES NIVEL – CAUDAL O CURVA DE DESCARGA:** Las mediciones periódicas del gasto o caudal de un río y las observaciones simultáneas del nivel del mismo, permiten construir una gráfica en la que en el eje horizontal se muestra el gasto o caudal, y en el vertical el nivel correspondiente. De ello se obtiene una curva que es aproximadamente parabólica, pero que puede llegar a mostrar algunas irregularidades debidas principalmente al algún cambio en la forma ya sea de evaluar las secciones, de estimar las velocidades; o a la existencia de tramos con pendiente pronunciada.

Si el control que se lleva en los registros es permanente y la curva tiene regularidad en su trazo, con una calibración se puede estimar el gasto de la sección; pero si la curva presenta irregularidades, o el control de los registros se nota alterado por causas tales como erosión, sedimentación, azolve u otros, es necesario efectuar mediciones más frecuentes para determinar el caudal.

Un ejemplo de curva de descarga se incluye en la Figura 1.5 y corresponde a la estación del río Toachi D.J. Sarapullo.

Figura 1.5. Curvas de descarga estación Toachi D.J. Sarapullo



ELABORACIÓN: Luis Ríos

LM: Lectura limnimétrica (m)

1.5. EL CLIMA Y SU VARIABILIDAD

El clima es el estado medio de la atmósfera en periodos de tiempo de varios años, y comprende un conjunto de valores que caracterizan las condiciones atmosféricas de una región. Estos valores promedio se obtienen a partir de información meteorológica correspondiente a un período de tiempo suficientemente largo.

El estudio del clima es un campo de investigación complejo y en rápida evolución, debido a la gran cantidad de factores que intervienen; el clima de la Tierra no es inmutable. Como consecuencia de alteraciones en el balance energético, está sometido a variaciones en todas las escalas temporales, desde decenios a miles y millones de años. Entre las variaciones climáticas más destacables que se han

producido a lo largo de la historia de la Tierra, figura un ciclo de unos 100.000 años, de períodos glaciares, seguido de períodos interglaciares.²

El cambio climático se define como la variación global del clima de la Tierra. Esta variación tiene su origen en causas naturales y también en la acción del hombre y se produce a muy diversas escalas de tiempo y sobre el conjunto de parámetros climáticos; temperatura, precipitaciones, nubosidad, evaporación, entre otras³.

La variabilidad climática se muestra mediante la fluctuación en el tiempo de las diferentes características medias de la atmósfera como son la precipitación, temperatura, evaporación entre otras, que dispuestos de una manera geográfica y espacial muestran los rasgos propios o efectivos de los regímenes climáticos de determinados sitios.

“Se están acumulando numerosas evidencias de la existencia del cambio climático y de los impactos de que él se derivan. En promedio la temperatura ha aumentado aproximadamente 0,6 en el siglo XX. El nivel del mar ha crecido de 10 a 12 centímetros. La pluviosidad mundial aumentó un 2% durante el siglo pasado, registrándose grandes variaciones entre continentes y también dentro de Europa. La intensidad de las precipitaciones también ha cambiado, varios indicadores demuestran que en parte de Europa se intensifican los episodios lluviosos, mientras otras sufren más sequías”.⁴

² (IPPC, Panel Intergubernamental de Cambio Climático, 2007)

³ (IPPC, Panel Intergubernamental de Cambio Climático, 2007)

⁴ (IPPC, Panel Intergubernamental de Cambio Climático, 2007)

Figura 1.6. Indicadores y cambios del sistema climático a nivel mundial y Ecuador

Principales indicadores y cambios observados en el sistema climático durante los últimos decenios	
Concentración atmosférica de CO ₂	280 ± 6 ppm. Años 1000-1750 En la actualidad 371 ppm.
Concentración atmosférica de CH ₄	0,70 ± 6 ppm. Años 1000-1750 En la actualidad 1,775 ppm.
Concentración atmosférica de N ₂ O	0,270 ± 6 ppm. Años 1000-1750 En la actualidad 0,316 ppm.
Temperatura media superficial	0,6 ± 0,2 °C Años 1861 - 2000 Mayor en tierra que en mar.
Temperatura del Hemisferio Norte	El aumento durante el siglo XX ha sido el mayor del último milenio.
Rango diario de temperaturas.	Menor: las mínimas aumentan a doble ritmo que las máximas.
Nivel medio del mar	Entre 10 y 20 cm (1860 – 2000) con variaciones regionales.
Temporada de hielos en ríos y lagos.	15 días menor en latitudes medias y altas del Hemisferio Norte.
Cobertura nevosa	Disminución del 10% desde 1960.
Precipitaciones en los continentes	Mayor en el Hemisferio Norte.
Precipitaciones intensas	Aumentan en latitudes medias y altas del Hemisferio Norte.
Fenómeno El Niño – La Niña	Más frecuente, persistente e intenso en los últimos 30 años.
Ecosistemas naturales	Desplazamientos hacia mayores latitudes y altitudes.

FUENTE: (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, IPPC, 2007)

Figura 1.7. Indicadores y cambios del sistema climático en el Ecuador

ECUADOR
<p>La zona más vulnerable es el callejón interandino a pesar de no ser la más expuesta.</p> <p>En la costa las provincias de Esmeraldas, Manabí y Guayas son las más vulnerables en ese orden.</p> <p>Los indicadores de riesgo materializado son mayores en las poblaciones más grandes, con más población e infraestructura. Sin embargo, si a estos indicadores se los divide para la población, el número per cápita de eventos, muertes y viviendas destruidas, etc. es mayor en las provincias con menor desarrollo relativo en el país.</p>
<p>Entre los años 1960 y 2000¹⁰:</p> <p>Incrementos generales en la región Litoral del orden de hasta el 134% (Roca fuerte)</p> <p>Distribución irregular de la precipitación en la región Interandina con decrementos en la parte sur de la misma, registrándose el mayor porcentaje de decremento en Yangana (-30%) y el de incremento en Zapotillo (71%).</p> <p>Incrementos importantes en la temperatura media en la región Litoral, en Jama (1.1° C) y Machala Aeropuerto (1.5° C), en la región Interandina en Tulcán (1.4°C), Ibarra (1.3° C) y Ambato (1.8° C).</p>

FUENTE: (SGCAN, Secretaría General de la Comunidad Andina, 2007)

1.6. CAUDALES MÍNIMOS, ESTIAJES Y SEQUÍAS

1.6.1. INTRODUCCIÓN

La escorrentía superficial es el fenómeno más importante desde el punto de vista de ingeniería, y consiste en la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre”.⁵

El resultado visible del ciclo hidrológico en una cuenca de drenaje es la presencia de agua en los cauces naturales (ríos, quebradas), resultado de la interacción de varios factores tales como la precipitación (clima), características físicas de la hoya (fisiográficas) y la intervención del hombre.

Los factores climáticos asociados a la precipitación son su duración y la precipitación antecedente. Estos dos factores inciden en la humedad del suelo en la cuenca de drenaje, ya que existe mayor probabilidad de ocurrencia de escorrentía superficial cuando la duración de lluvia es mayor, y más aún cuando las precipitaciones son persistentes en el tiempo, el suelo se encontrará saturado y dará lugar a mayores tasas de escorrentía superficial.

Los factores fisiográficos de la cuenca de drenaje como el área, la forma y la permeabilidad del suelo, inciden en la escorrentía superficial; a mayor área y menor impermeabilidad existe una mayor posibilidad de que la escorrentía superficial se forme en menor tiempo y en mayor cantidad.

⁵ (MONSALVE, 1990)

La acción humana mediante la construcción de obras hidráulicas (embalses, captaciones, presas) en la cuenca hidrográfica, afectan necesariamente al régimen hidrológico natural de los ríos. Las variaciones de caudal definen el régimen hidrológico de un río; las variaciones temporales se dan durante o después de las precipitaciones, en casos extremos se producen crecidas cuando el aporte de agua es mayor que la capacidad de conducción del río para evacuarla, pudiendo ocasionar de esta manera inundaciones en zonas de llanura.

Otro caso de aporte de caudal a un cauce natural es el afloramiento de aguas subterráneas asociado con el proceso de infiltración que se puede definir como un aporte a mediano o largo plazo ya que puede tardarse días, semanas o meses después que tuvo lugar la precipitación que generó la escorrentía superficial.

La variación espacial se da porque el caudal del río aumenta aguas abajo, a medida que se van recogiendo las aguas de la cuenca de drenaje y los aportes de las cuencas de otros ríos que se unen a él como afluentes. Debido a esto, el río suele tener caudales bajos en las montañas, cerca de su nacimiento, y altos en las tierras bajas próximas a su desembocadura.

Existen varios tipos de presentación de caudales; medios diarios, medios mensuales, medios anuales. En el Ecuador la entidad encargada de la operación, mantenimiento de estaciones de medida y de generar información hidrometeorológica es el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

1.6.2. CURVA DE DURACIÓN GENERAL

La metodología estadística probabilística que permite evaluar principalmente los caudales medios y mínimos es la curva de duración general (CDG o curva de permanencia de caudales), que consiste en una distribución de frecuencias acumuladas.

La escala vertical de la curva de duración general representa los caudales medios y la escala horizontal contiene las probabilidades de que estos caudales puedan ser igualados o excedidos. La curva de duración general también indica el porcentaje del tiempo en el que un caudal de un río es igual o mayor que un determinado valor, independientemente de la periodicidad estacional o interanual.

El análisis de frecuencias empírica para la obtención de la curva de duración general de caudales (probabilidades $P(i)$), se representa mediante un vector de m elementos y está dado por la siguiente fórmula para valores descendentes:

$$P(i) = \frac{i}{m} * 100 \quad (\text{Ec. 1.11})$$

Donde:

$P(i)$: vector probabilidad (%);

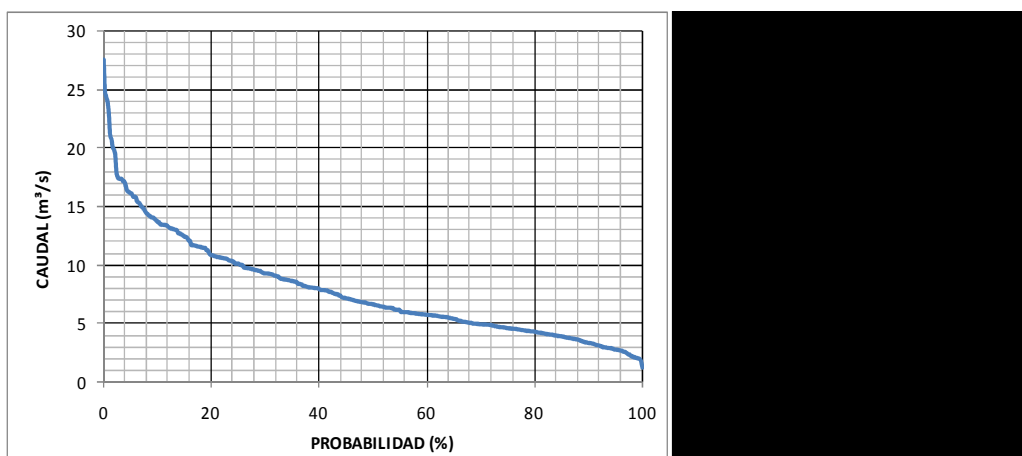
i : posición del vector;

m : número total de elementos del vector caudal.

Se asocia una probabilidad de excedencia para cada valor del vector de caudales.

La curva de duración general es muy útil para conocer la distribución de caudales en el tiempo y constituye la base para diseños hidráulicos; en la Figura 1.8 se muestra la forma característica que puede adoptar una curva de duración de general.

Figura 1.8. Curva de duración general de caudales mensuales de la estación Alao en Hacienda Alao



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Los caudales mínimos utilizados de manera general en el diseño de obras corresponden a probabilidades de excedencia entre el 70 y 95%.

1.6.3. CAUDALES MÍNIMOS

La práctica hidrológica nacional considera tomar como caudales limitantes del uso del recurso hídrico (caudales mínimos) a los valores correspondientes a las frecuencias 80, 90 o 95% de que estos valores sean igualados o excedidos, tomando como base la serie de caudales medios diarios o mensuales.⁶

En el presente estudio se consideran dos metodologías para determinar los caudales mínimos para las cuencas de drenaje:

- **MEDIANTE LA CURVA DE DURACIÓN GENERAL**

Se consideran caudales mínimos a los valores comprendidos en un rango de probabilidad de excedencia entre el 50 y 90% dada en la curva de duración general, por fines de evaluación de su variabilidad cronológica.

Los inconvenientes que se presentan al determinar los caudales mínimos en base a la curva de duración general, se enuncian a continuación:

- Se considera solo datos históricos y la distribución de probabilidades empírica no asocia una distribución teórica que permita incluir el riesgo de que se presenten caudales menores o mayores a los observados;

⁶ (ANDRADE, 1992)

- La curva de duración general no considera los periodos específicos de ocurrencia o su estacionalidad.
- Los caudales dados al 90 o 95%, no están directamente relacionados a los caudales mínimos consecutivos de 15, 30, 60 días u otro periodo.

- **MEDIANTE ANÁLISIS DE VALORES CONSECUTIVOS**

Dada la serie mensual de caudales, se determinan los valores mínimos anuales dados por el promedio de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 meses consecutivos tal como se muestra en el numeral 2.1.4. Con la aplicación de este análisis se permite que:

- La serie de caudales mínimos consecutivos se puede ajustar una distribución teórica de probabilidad; y,
- Se incluyan los periodos de ocurrencia y la estacionalidad.

1.6.4. ESTIAJES

Estiaje, etimológicamente proviene del francés “estiage” que designa al nivel más bajo que presenta un río en determinada época; por lo general en el verano cuando la insolación es mayor, la velocidad del viento aumenta, las precipitaciones son bajas y por consiguiente la escorrentía disminuye.

El incremento de la temperatura ambiente en una cuenca hidrográfica es un factor que incide directamente en el incremento del déficit de humedad en el suelo y junto con precipitaciones bajas en el período seco del año, generan un escurrimiento superficial muy bajo y a veces nulo, dado que el agua precipitada sirve

principalmente para saturar el sistema subterráneo (suelo) mediante los diversos procesos de infiltración.

Si no llueve en absoluto o la media de las precipitaciones es inferior a la normal durante largos períodos de tiempo, el río puede llegar a secarse cuando el aporte de agua de lluvia acumulada en el suelo y el subsuelo reduzca el caudal basal a cero. Esto puede tener consecuencias desastrosas para la vida del río, sus riveras y para la gente que depende de éste para su suministro de agua o riego.

En definitiva, un período de estiaje puede ser consecuencia de una eminente sequía en un lugar, además esta época será caracterizada por la presencia de caudales mínimos en un cauce.

1.6.5. SEQUÍAS

En general se clasifica a las sequías en dos tipos:

- Sequía meteorológica, y;
- Sequía hidrológica

Sequía meteorológica, de acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1986), ocurre cuando la precipitación anual de un determinado sitio está por debajo del 60% de lo normal durante más de dos años consecutivos. En definitiva una sequía está representada por déficits de precipitaciones y sequedad del suelo.

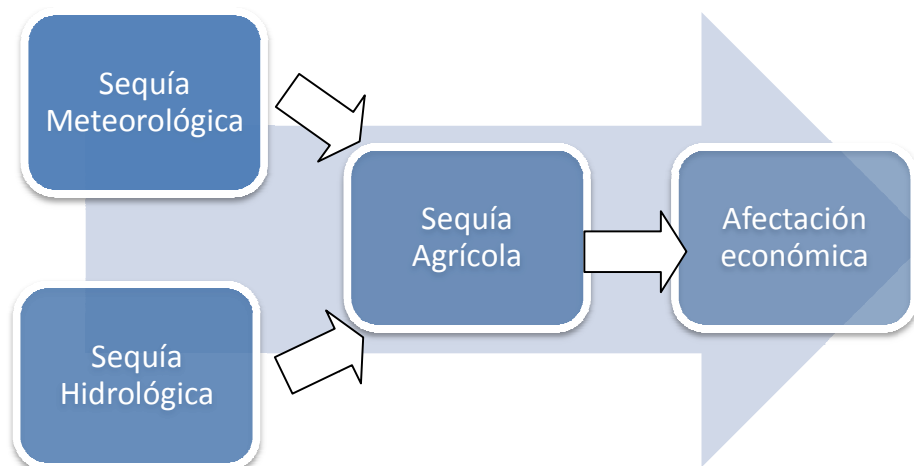
Sequía hidrológica, de acuerdo al Glosario Internacional de Hidrología (UNESCO/OMS, 1992) es definida como un período de clima anormalmente seco, lo suficientemente prolongado para ocasionar una disminución apreciable en el caudal de los ríos, nivel de los lagos y/o agotamiento de la humedad del suelo, y un descenso en los niveles de aguas subterráneas por debajo de sus valores normales.

El introducir los conceptos de sequía meteorológica e hidrológica fundamenta el presente estudio, más cabe resaltar la existencia de otro tipo de sequías como es la sequía agrícola que es consecuencia de la sequía meteorológica ya que se produce un tiempo después de la ausencia de lluvias perdiendo así el suelo humedad, y se diferencia de la sequía hidrológica en el sentido de que esta puede tener lugar durante meses o años después de la acentuada escasez de lluvia.

La sequía y sus procesos afectan a las actividades humanas que dependen del agua de los cauces para generar energía hidroeléctrica, abastecimiento de agua, riego, entre otros. La falta de agua se traduce en impactos negativos socio-económicos.

La Figura 1.9 muestra el modelo de interacción de los diferentes tipos de sequías.

Figura 1.9. Modelo de interacción de sequías con la economía



ELABORACIÓN: Luis Ríos

1.6.6. EVALUACIÓN DE SEQUÍAS

La evaluación de sequías desde el punto de vista estadístico consiste en analizar las series de datos de precipitación, en tanto que para la evaluación de sequías en un sentido hidrológico, interesan los datos sobre aguas superficiales o subterráneas.

Establecer el principio y el final de una sequía no es fácil, ya que el vapor de agua no falta en el aire, incluso en zonas áridas, en tanto que el factor que más contribuye a su prolongación es principalmente la falta de movimientos verticales en la atmósfera a gran escala, asociados a depresiones y frentes propios de la circulación del aire en la atmósfera.

Tomando en cuenta el agua almacenada en el suelo, el comienzo de una sequía tiene relación con las fechas de las últimas precipitaciones, y está condicionado por la vegetación. Su final, dependerá de que aparezca o no un período de lluvias que satisfaga las demandas hídricas de la vegetación.

Las sequías pueden considerarse como un fenómeno aleatorio, asociado a anomalías meteorológicas que pueden explicarse en términos de fuerzas y situaciones de bloqueo de los sistemas de circulación del aire y que dan lugar a ciertos tipos anómalos (CASTILLO, 2001).

1.6.7. ARIDEZ Y DIAGRAMA OMBROTÉRMICO

La aridez se define en término de lluvia escasa y es una característica propia de una región, llamada árida. Se asocia a bajas precipitaciones y temperatura elevadas.

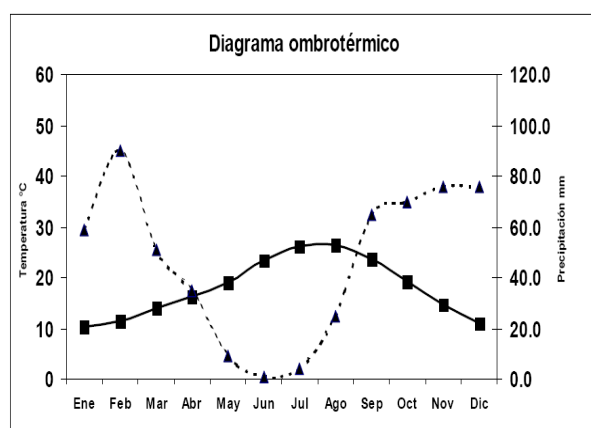
Los índices de aridez que se pueden determinar, definen períodos de sequía que se presentan en una cuenca hidrográfica; la relación entre temperatura y precipitación es el diagrama ombrotérmico propuesto como parte de la clasificación bioclimática (UNESCO-FAO, 1975).

Un mes seco (ms) se define como aquel en que el total de la precipitación (P), en mm, es igual o menor al doble de la temperatura media (t) en $^{\circ}\text{C}$, es decir cuando $P \leq 2t$, mientras que un período seco es el formado por varios meses secos consecutivos. Si $2t < P \leq 3t$, se tiene un mes subseco.

El diagrama ombrotérmico de Gausson permite representar gráficamente el clima de una zona evidenciando el tipo climático y similitudes, y además permite identificar el periodo seco cuando la precipitación es dos veces menor a la temperatura media (se considera a la evapotranspiración con 2 veces la temperatura media de un período). Este diagrama sobre un sistema de ejes lleva, en abscisas, los meses del año y en las ordenadas consta la precipitación media mensual (P) en mm, y como segundo eje, la temperatura media mensual (t) en °C.

La curva térmica se obtiene uniendo los valores de la temperatura media mensual. Si $P \leq 2t$, la curva ómbrica estará por debajo de la térmica y el área comprendida entre ambas curvas indicará la duración del período de sequía pero no su intensidad.

Figura 1.10. Diagrama ombrotérmico



FUENTE: (CASTILLO, 2001)

1.7. INFORMACIÓN BÁSICA DISPONIBLE

La información hidrológica y climática que sustenta el presente estudio está conformada por registros históricos del período 1971 – 2005 que fue conformada en base a los datos de los anuarios hidrológicos y meteorológicos editados por el INAMHI. Esta información en valores diarios, mensuales y anuales fue revisada y validada.

1.7.1. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

En la Tabla 1.1, se presenta la información climatológica utilizada

Tabla 1.1. Información meteorológica

VARIABLE	PERIODO	NÚMERO DE ESTACIONES
Temperatura Media Mensual (°C)	1971-2005	11
Precipitación Mensual (mm)	1971-2005	18

ELABORACIÓN: Luis Ríos

La Información disponible presenta vacíos que fueron rellenados con la aplicación de correlaciones entre estaciones vecinas.

1.7.2. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

La Tabla 1.2, muestra la información hidrométrica que fue recopilada para el presente estudio.

Tabla 1.2. Información hidrológica

VARIABLE	PERIODO	NÚMERO DE ESTACIONES
Caudales medios diarios (m ³ /s)	1971-2005	6
Caudales medios mensuales (m ³ /s)	1971-2005	6

ELABORACIÓN: Luis Ríos

La base de datos hidrológica está conformada por caudales medios diarios de 6 estaciones hidrométricas de cuencas hidrográficas de las 3 regiones del país: costa, sierra y oriente.

En base a los caudales medios diarios se conformó una base de datos de caudales medios mensuales que permitieron realizar el análisis hidrológico.

En el Capítulo 3, se describen a mayor detalle las estaciones hidrométricas y meteorológicas que fueron utilizadas en el estudio, en tanto que en el Anexo 1 se muestra el mapa de la ubicación de las estaciones.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1. METODOLOGÍA APLICADA

Para detectar la incidencia de la variabilidad del clima en los caudales mínimos del Ecuador y mejorar el conocimiento científico sobre los procesos climáticos e hidrológicos ligados a estiajes y sequías, se desarrollaron las siguientes fases en el presente estudio:

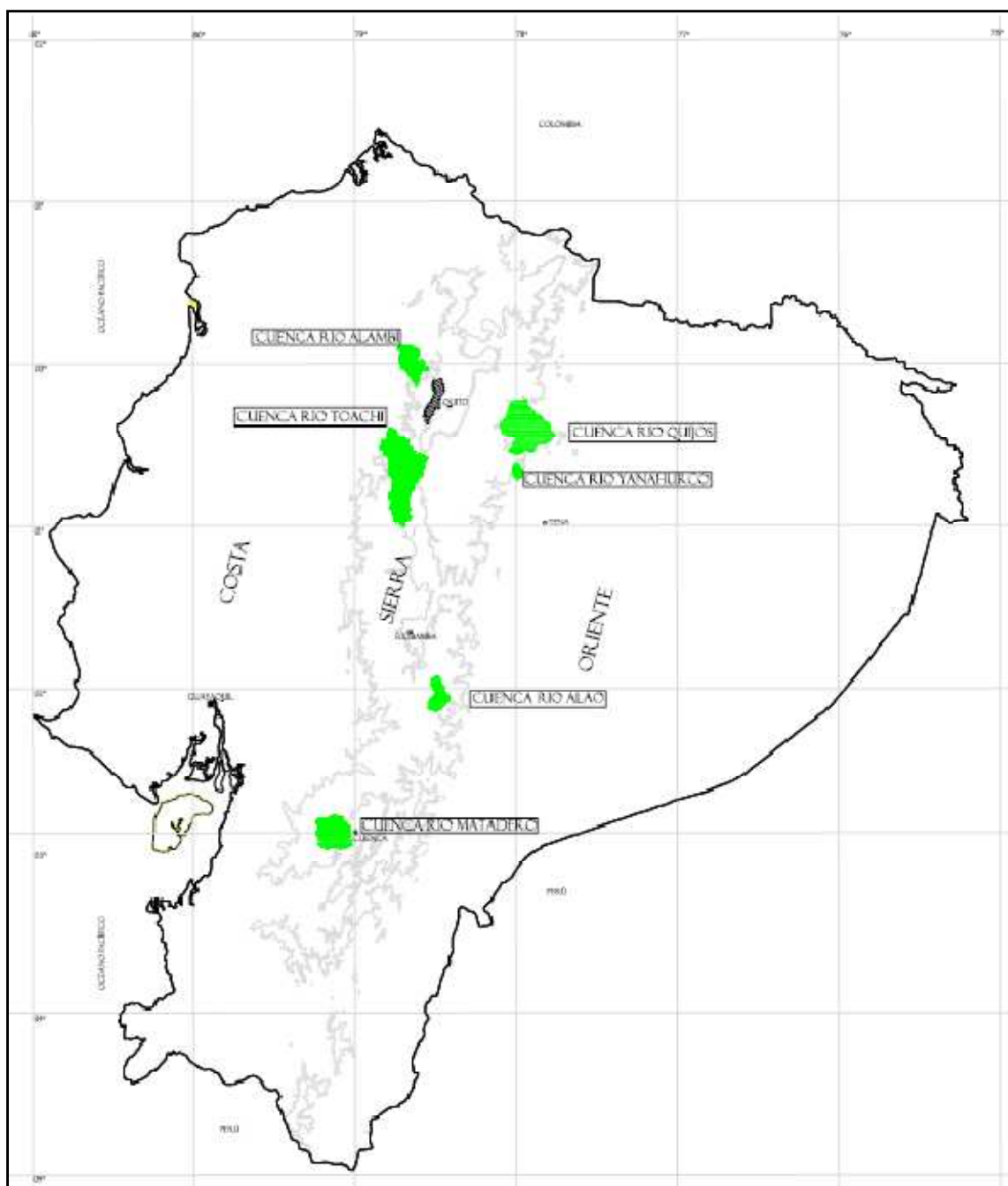
- Selección de las cuencas hidrográficas;
- Determinación de las características físicas de las cuencas;
- Validación y homogenización de las series de datos climáticos e hidrológicos;
- Caracterización climática de las cuencas hidrográficas;
- Análisis de tendencias de las variables climáticas, en función de la determinación de las nuevas series de precipitaciones y temperaturas mensuales, considerando 1, 2, 3, 4, 5, y 6 meses consecutivos de valores mínimos y máximos respectivamente.
- Análisis de tendencias de caudales mínimos anuales, tomados de las curvas de duración anuales, que conforman las nuevas series de datos.

- Análisis de tendencia de caudales medios mensuales considerando 1, 2, 3, 4, 5 y 6 meses consecutivos de valores mínimos para cada año; y,
- Proposición de indicadores de la variabilidad climática.

2.1.1. CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN ESTUDIO

Para analizar la variabilidad espacial y estacional de los caudales a nivel nacional se estudian 6 cuencas hidrográficas pertenecientes a las regiones de nuestro país, a razón de 2 cuencas por cada región tal como se muestra en la Figura 2.1; con lo cual se podrá evaluar la incidencia de las cuencas con régimen climático del Pacífico, de la Amazonía y mixto, que corresponden a la región interandina.

Figura 2.1. Cuencas hidrográficas en estudio



ELABORACIÓN: Luis Ríos

- **REGIÓN LITORAL**

En esta región se seleccionan las cuencas de los ríos Alambi y Toachi, que pertenecen al drenaje del río Esmeraldas (Vertiente del Pacífico).

- **CUENCA DE DRENAJE DEL RIO ALAMBI**

Está ubicada al noroccidente de la Provincia Pichincha, parroquia Nanegal y pertenece al sistema hidrográfico del río Esmeraldas. La sección de interés constituye la estación hidrométrica río Alambi en Churupamba con código (H136); el río Alambi posee un alto potencial para generación hidroeléctrica. La cuenca de drenaje de río Alambi tiene pendientes fuertes en su zona de cabecera y en los inicios del drenaje de los cauces naturales. Posee un área de drenaje de 442 km² y la longitud de cauce principal es de 55.1 km.

Ver Anexo 1. Mapa 1

- **CUENCA DE DRENAJE DEL RÍO TOACHI**

Es una subcuenca del sistema hidrográfico del río Esmeraldas y se localiza en las provincias de Cotopaxi, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas. La estación hidrométrica (H161) río Toachi A.J. Pilatón es la sección de interés de esta cuenca de drenaje. El río Toachi es parte del sistema de la generación hidroeléctrica Proyecto Toachi Pilatón; el área de drenaje de la cuenca es 1526.4 km² y la longitud del cauce principal es de 125.3 km.

Ver Anexo 1. Mapa 2

- **REGIÓN INTERANDINA**

Las cuencas de los ríos Alao y Matadero han sido seleccionadas en la región interandina. Estas cuencas pertenecen al sistema hidrográfico del río Pastaza.

- **CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO ALAO**

Se localiza en la provincia de Chimborazo, cantón Riobamba, parroquia Alao y pertenece al sistema hidrográfico del río Pastaza. La estación hidrométrica (H787) río Alao en Hacienda Alao, operada en la actualidad por el INAMHI constituye la sección de interés de esta cuenca. El río Alao es aprovechado para generar energía en la Central Hidroeléctrica Alao, regentada por la Empresa Eléctrica Riobamba S.A.

La cuenca del río Alao en Hacienda Alao, posee una configuración orográfica de montaña con la presencia de fuertes pendientes y una alta elevación sobre el nivel del mar; su cuenca forma parte del Parque Nacional Sangay, en donde la presencia humana es escasa.

Posee un área de drenaje de 108 km² y la longitud del cauce principal es de 23.3 km.

Ver Anexo 1. Mapa 3

- CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MATADERO

Se localiza en la provincia de Azuay, la sección de interés corresponde a la estación hidrométrica (H896) río Matadero en Sayausí que es operada por INAMHI; y está ubicada cerca de la parroquia Sayausí, 4.5 km al oeste de la ciudad de Cuenca. El río Matadero es un afluente del río Paute en su tramo superior y forma parte del sistema hidrográfico del río Santiago.

La cuenca de drenaje posee un relieve típico de montaña con pendientes altas en sus laderas y pisos altitudinales superiores a los 2500 metros sobre el nivel del mar; se tiene la presencia de vegetación y clima de páramo. Posee un área de drenaje de 304 km² y la longitud del cauce principal es de 29.2 km.

Ver Anexo 1. Mapa 4

• REGIÓN AMAZÓNICA

Las cuencas orientales seleccionadas son las de los ríos Quijos y Yanahurco y son parte del sistema hidrográfico del río Napo.

- CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO QUIJOS

Se encuentra ubicada geográficamente en la provincia de Napo en el cantón Baeza y forma parte del sistema hidrográfico del río Napo. La estación (H718) de tipo limnigráfico, río Quijos en Baeza es la sección de cierre de esta cuenca amazónica alta. Forma parte del sistema hidrográfico del río Napo que es importante por su

potencial navegabilidad. La cuenca del río Quijos se desarrolla desde la Cordillera Real o de los Andes hacia el oriente ecuatoriano. El cauce principal de esta cuenca tiene su origen en los páramos cercanos a la población de Papallacta y su área de drenaje es de 932.5 km² y la longitud del cauce principal es de 51.1 km.

Ver Anexo 1. Mapa 5

- CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO YANAHURCO

Se ubica al oeste de la provincia de Napo en el límite con la provincia del Cotopaxi. Esta cuenca alta tiene como punto de interés a la estación (H722) río Yanahurco D.J. Valle que es afluente del río Chalupas, cuenca de cabecera del sistema hidrográfico del río Napo.

El río Yanahurco nace en las inmediaciones de la población Saniacunga, a una altitud de 4000 metros. Paralelamente, el río Valle tiene su origen en los macizos montañosos vecinos. Los pisos altitudinales que se presentan en la cuenca fluctúan entre los 4000 y 3590 m.s.m.n., lo que permite afirmar la existencia de elevaciones importantes. Tiene un área de drenaje de 78.5 km² y la longitud del cauce principal es de 15.7 km.

Ver Anexo 1. Mapa 6

2.1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS CUENCAS DE DRENAJE

- **ÁREA DE DRENAJE Y PERÍMETRO:** Es el área plana o proyección horizontal que está comprendida entre la divisoria topográfica de la cuenca hidrográfica, en donde se genera el escurrimiento superficial.
- **COEFICIENTE DE COMPACIDAD O DE GRAVELIUS (Kc),** es una característica importante ya que está relacionada con el tiempo de concentración de la hoya, y definido por:

$$Kc = 0.28 \frac{P}{A^{0.5}} \quad (Ec. 2.1)$$

P: perímetro (km)

A: área de drenaje (km²)

- **FACTOR DE FORMA (Kf),** es la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la hoya. El ancho medio de la hoya se obtiene dividiendo el área total de drenaje para la longitud axial. Se define como longitud axial a la longitud del valle de la cuenca desde su cabecera hasta la sección de interés.

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (Ec. 2.2)$$

A: área de drenaje (km²)

L: longitud axial de la hoya (km)

- **PENDIENTE MEDIA (Sc)**, se calcula mediante la aplicación de métodos grafo-analíticos, y también con la ayuda de métodos que utilizan mapas digitales de los terrenos (modelos DEM).

La ecuación que permite conocer la Pendiente Media de la Cuenca ⁷es:

$$Sc = \frac{D L_L}{A} \quad (Ec. 2.3)$$

D: diferencia uniforme entre curvas de nivel (km)

L_L: longitud total de todas las curvas de nivel (km)

A: área de drenaje (km²)

- **ELEVACIÓN MEDIA DE LA CUENCA (E)**, se la obtiene con la curva hipsométrica, que es la representación gráfica del relieve de la hoya. Se muestra mediante una gráfica que visualiza el área acumulada y su altitud respecto al nivel del mar. El proceso de obtención de la elevación media de la hoya requiere de la determinación de áreas parciales entre curvas de nivel equidistantes.

La ecuación que determina la elevación media es:

$$E = \frac{\sum_1^n (Cota Media Intervalo_i * Area_i)}{\sum_1^n (Area_i)} \quad (Ec. 2.4)$$

⁷ (MONSALVE, 1990)

Las características físicas de las cuencas hidrográficas en estudio se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características físicas de las cuencas en estudio

CUENCA HIDROGRÁFICA	A (km²)	P (km)	Kc	Kf	Lc (km)	Sc (%)	E (msnm)	S (%)
Río Alambi en Churupamba	442.0	126.9	1.69	0.36	55.1	65.5	2247.1	5.5
Río Toachi A.J. Pilatón	1526.4	244.4	1.75	0.22	125.3	54.6	2845.4	2.5
Río Alao en Hacienda Alao	108.0	52.6	1.42	0.38	23.3	59.4	3562.5	2.9
Río Matadero en Sayausí	304.0	77.7	1.25	0.48	29.2	55.1	3500.7	4.6
Río Quijos en Baeza	932.5	157.8	1.45	0.33	51	31.2	3492.4	4.7
Río Yanahurco D.J. Valle	78.3	35.4	1.12	0.44	15.7	25.3	3796.8	2.8

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Donde:

- A: área de la cuenca hidrográfica;
- P: perímetro de la cuenca de drenaje;
- Kc: coeficiente de compacidad o Gravelious;
- Lc: longitud del cauce principal
- Sc: pendiente media de la cuenca de drenaje;
- E: elevación media de la cuenca: y,
- S: pendiente del cauce principal.

2.1.3. SERIES DE DATOS CONSIDERADAS Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

La confiabilidad de la información hidrometeorológica fue analizada en las siguientes series:

- Serie media mensual de temperatura 1971-2005;
- Serie media mensual de precipitación 1971-2005; y,
- Serie media mensual de caudal 1971-2005.

Los registros climáticos e hidrológicos fueron tomados en su gran mayoría de los anuarios editados por el INAMHI, y fueron levantados a hojas electrónicas. No se considera las series medias diarias de caudal para el análisis de confiabilidad de información, ya que la información mensual es lo suficientemente representativa para evaluar la homogeneidad. Estadísticamente las series de registros climáticos e hidrológicos reciben el nombre de muestra aleatoria ya que son datos consecutivos ordenados cronológicamente.

Según la OMM (CASTILLO, 2001) las series de datos deberán constar al menos de 30 años consecutivos. En la realidad es muy difícil encontrar estaciones con este número de años y se realizan análisis de series más cortas, siempre y cuando estas series sean representativas de las características que presenta la zona.

- **HOMOGENEIZACIÓN DE LAS SERIES CLIMATOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS**

Los datos de las series climatológicas e hidrológicas debieron haber sido obtenidos bajo las mismas condiciones de experimentación, es decir con los mismos instrumentos y en el idéntico lugar de implantación para así de esta manera generar una representación de la zona. Siendo así la serie recibe el calificativo de serie homogénea o en caso contrario la serie es heterogénea (CASTILLO, 2001).

Las causas más comunes de la heterogeneidad de las series de datos se deben a:

- Cambio de emplazamiento de la estación,
- Cambio de instrumentación, y;
- Modificación en las técnicas de observación.

Otros factores que causan la heterogeneidad de las series es la variación de clima del lugar como consecuencia de factores externos como deforestación, formación de pantanos o la acentuada variabilidad climática.

Las lagunas presentadas en las series fueron rellenadas mediante correlaciones con estaciones cercanas que presentan un régimen climático similar; tal como se muestra en el Capítulo 3.

A continuación se describen las pruebas de calidad de información a las que fueron sometidas las series de datos:

- Prueba de rachas o secuencias; y,
- Curva de doble masas.

- **PRUEBA DE RACHAS O SECUENCIAS**

El test de secuencias o rachas fue aplicado para todas las series anuales y mensuales de precipitación y caudales medios. El análisis se lo realizó con la ayuda de una hoja electrónica dispuesta para determinar la homogeneidad de las series o su heterogeneidad y sus resultados se presentan en el numeral 3.3 del presente estudio.

El test de secuencias o rachas desarrollado en 1966 por Thom se describe a continuación:

- Una vez conformada la base de datos se calcula la mediana de la serie (N);
- Conteo del número de cambios hacia arriba (+) o hacia abajo (-) de la mediana;
- Conteo de número de rachas (NS). Siendo una racha cada cambio de signo que se produzca en el conteo referido en el literal anterior;
- Considerando que NA es el número de valores por encima de la mediana de la serie y NB lo valores por debajo de la mediana, entonces por definición $NA=NB$ y le corresponden un número determinado de rachas con una probabilidad de excedencia entre 10% y 90% de que sean homogéneas; y,

- Estos valores dependen del número de elementos que posea la serie y se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Distribución del número de rachas (según Thom)

NA	P 10%	P 90%	NA	P 10%	P 90%
10	8	13	19	16	23
11	9	14	20	16	25
12	9	16	25	22	30
13	10	17	30	26	36
14	11	18	35	31	41
15	12	19	40	35	47
16	13	20	45	40	52
17	14	21	50	45	57
18	15	22			

FUENTE: (CASTILLO, 2001)

Se presenta a continuación el test de secuencia aplicado a las precipitaciones anuales de la estación Piscícola Chirimachay (Tabla 2.3.), siendo la mediana 1306.7 mm.

Tabla 2.3. Test de secuencias de precipitación estación Piscícola Chirimacay.

AÑO	P (mm)	NA	NS
1971	1371.5	+	1
1972	2298.7	+	0
1973	1278.6	-	1
1974	1476.5	+	1
1975	1554.8	+	0
1976	1496.3	+	0
1977	1914.3	+	0
1978	1399.8	+	0
1979	998.0	-	1
1980	1330.2	+	1
1981	1178.9	-	1
1982	1236.2	-	0

AÑO	P (mm)	NA	NS
1983	1248.5	-	0
1984	1584.9	+	1
1985	1124.1	-	1
1986	1204.8	-	0
1987	1337.5	+	1
1988	1592.1	+	0
1989	1199.1	-	1
1990	1108.0	-	0
1991	1052.5	-	0
1992	1002.5	-	0
1993	1533.7	+	1
1994	1461.4	+	0

AÑO	P (mm)	NA	NS
1995	1126.2	-	1
1996	1341.8	+	1
1997	1157.6	-	1
1998	1392.0	+	1
1999	1733.0	+	0
2000	1306.7	-	1
2001	1060.8	-	0
2002	1254.5	-	0
2003	1184.3	-	0
2004	1169.9	-	0
2005	1515.0	+	1
MEDIANA	1306.7	17	17

ELABORACIÓN: Luis Ríos

P: precipitación media anual (mm);

NA: número de valores por sobre la mediana de la serie; y,

NS: número de rachas.

En este ejemplo existen 17 valores superiores a la mediana en la serie (NA) lo que indica un intervalo entre 14 y 21 variaciones de signo o rachas (NS) para cumplir con la homogeneidad de la serie: situación que se verifica porque existen 17 rachas. El conteo de rachas se fundamenta en identificar el número de veces en que los valores anuales ordenados cronológicamente cambian de un valor superior a un valor por debajo de la mediana de la serie.

Una serie no será homogénea si el número de rachas es pequeño es decir por debajo del valor permitido en el intervalo de probabilidad o muy grande (por encima del intervalo)

Cuando el número de rachas está por debajo del intervalo definido, significa que los términos de la serie tienen una alta dependencia positiva y por ende la media de la serie tiene una tendencia a aumentar o disminuir en el tiempo. En el caso contrario, cuando el número de rachas es mayor al valor correspondiente a la probabilidad 90%, denota una alta dependencia negativa y por lo tanto la serie tiende a variar de manera aleatoria.

- **CURVA DE DOBLE MASA**

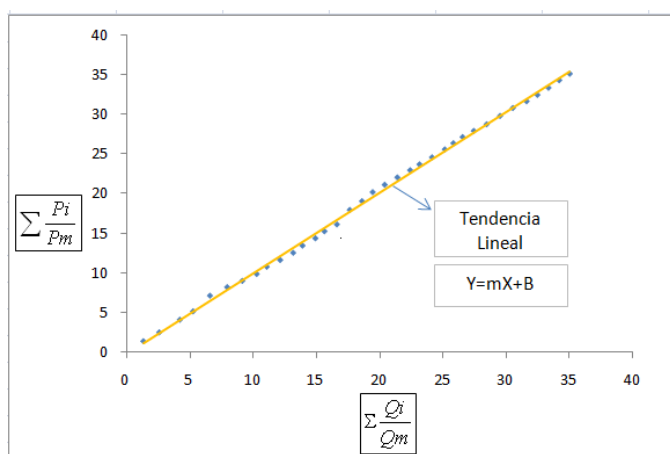
Una curva de doble masa muestra gráficamente la relación que existe entre dos conjuntos de registros. El procedimiento se basa en la selección de dos estaciones de una zona, los datos anuales de cada una de ellos se los acumula de manera sucesiva para luego realizar una gráfica, en donde a cada eje le corresponde una estación.

Si se presenta el caso ideal de que la información es homogénea a lo largo del periodo de estudio, se obtendrá entonces una línea recta perfecta con alineación única de los pares ordenados, en caso contrario denotará la existencia de información errada (uno o varios periodos) lo cual deberá ser corregido a partir de un factor que se obtiene del propio gráfico.

Las curvas de doble masa en el presente estudio fueron aplicadas a registros mensuales de precipitación y caudal. En la Figura 2.2 se muestra un modelo gráfico

del tipo de curva de doble masa aplicada en el presente estudio donde: Q_m : caudal medio y P_m : precipitación media de la serie.

Figura 2.2. Modelo de curva de doble masa $\Sigma \frac{Q_i}{Q_m}$ vs $\Sigma \frac{P_i}{P_m}$



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Q_i : caudal medio anual del año i (m^3/s);

Q_m : caudal medio multianual (m^3/s);

P_i : precipitación anual del año i (mm); y,

P_m : precipitación media multianual (mm).

Las curvas de doble masa se presentan a mayor detalle en el Capítulo 3 del presente estudio.

2.1.4. SERIES DE TEMPERATURAS MÁXIMAS, PRECIPITACIONES MÍNIMAS Y CAUDALES MÍNIMOS

Las variables utilizadas en el análisis estadístico-probabilístico para evaluar los periodos secos mediante el análisis de valores consecutivos mensuales son temperatura, precipitación y caudal.

Las series hidrometeorológicas iniciales están dispuestas de acuerdo a la siguiente matriz:

Tabla 2.4. Matriz mensual $X_{i,j}$ de variables climáticas e hidrológicas.

AÑO (i)	MESES (j)				
	1	2	3	...	12
1	$X_{1,1}$	$X_{1,2}$	$X_{1,3}$	...	$X_{1,12}$
2	$X_{2,1}$	$X_{2,2}$	$X_{2,3}$	...	$X_{2,12}$
...					
n	$X_{n,1}$	$X_{n,2}$	$X_{n,3}$	...	$X_{n,12}$

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Se muestra a continuación el algoritmo de obtención de valores de precipitación mínima para el año $i=1$. La matriz resultante del proceso está conformada por elementos $Z_{i,k}$; donde i es el año al que corresponde el registro y k es el número de meses consecutivos en análisis (1-6 meses).

- Valor mínimo de 1 mes consecutivo:

$$Z_{1,1} = \min(X_{1,1}, X_{1,2}, X_{1,3}, X_{1,4}, \dots, X_{1,12}) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

- Valor mínimo de 2 meses consecutivos:

$$Z_{1,2} = \min(X_{1,1} + X_{1,2}, X_{1,2} + X_{1,3}, X_{1,3} + X_{1,4}, \dots, X_{1,11} + X_{1,12}) \quad (Ec. 2.6)$$

- Valor mínimo de 3 meses consecutivos:

$$Z_{1,3} = \min(X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3}, X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,4}, X_{1,3} + X_{1,4} + X_{1,5}, \dots, X_{1,10} + X_{1,11} + X_{1,12}) \quad (Ec. 2.7)$$

- Valor mínimo de 4 meses consecutivos:

$$Z_{1,4} = \min(X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,4}, X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,4} + X_{1,5}, X_{1,3} + X_{1,4} + X_{1,5} + X_{1,6}, \dots, X_{1,9} + X_{1,10} + X_{1,11} + X_{1,12}) \quad (Ec. 2.8)$$

- Valor mínimo de 5 meses consecutivos:

$$Z_{1,5} = \min(X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,4} + X_{1,5}, X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,4} + X_{1,5} + X_{1,6}, X_{1,3} + X_{1,4} + X_{1,5} + X_{1,6} + X_{1,7}, \dots, X_{1,8} + X_{1,9} + X_{1,10} + X_{1,11} + X_{1,12}) \quad (Ec. 2.9)$$

- Valor mínimo de 6 meses consecutivos:

$$Z_{1,6} = \min(X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,4} + X_{1,5} + X_{1,6}, X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,4} + X_{1,5} + X_{1,6} + X_{1,7}, \dots, X_{1,7} + X_{1,8} + X_{1,9} + X_{1,10} + X_{1,11} + X_{1,12}) \quad (Ec. 2.10)$$

Donde:

i: año de registro;

j: mes del registro; y,

$X_{i,j}$: registro meteorológico perteneciente al año i, mes j.

En la determinación de los valores mínimos de caudales mensuales consecutivos, se emplean los promedios aritméticos dados por las mismas series; así por ejemplo para tres meses consecutivos se tiene:

$$Z_{1,3} = \min \left(\frac{X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3}}{3}, \frac{X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,4}}{3}, \frac{X_{1,3} + X_{1,4} + X_{1,5}}{3}, \dots, \frac{X_{1,10} + X_{1,11} + X_{1,12}}{3} \right) \quad (Ec. 2.11)$$

En tanto que para la determinación de los valores máximos consecutivos de temperatura, no se aplica la suma de los valores mensuales sino las medias aritméticas como se muestra a continuación (para 3 meses consecutivos):

$$Z_{1,3} = \max \left(\frac{X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3}}{3}, \frac{X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,4}}{3}, \frac{X_{1,3} + X_{1,4} + X_{1,5}}{3}, \dots, \frac{X_{1,10} + X_{1,11} + X_{1,12}}{3} \right) \quad (Ec. 2.12)$$

Tanto para las series de caudal y temperatura se emplean de manera análoga los algoritmos presentados para la conformación de las series de precipitación, considerando las variantes expuestas en las ecuaciones 2.11 y 2.12 respectivamente.

En general se obtiene como resultado la siguiente matriz para las diversas variables:

Tabla 2.5. Matriz $Z_{i,k}$, de valores máximos/mínimos consecutivos

AÑO	MESES CONSECUTIVOS					
	1	2	3	4	5	6
1	$Z_{1,1}$	$Z_{1,2}$	$Z_{1,3}$	$Z_{1,4}$	$Z_{1,5}$	$Z_{1,6}$
2	$Z_{2,1}$	$Z_{2,2}$	$Z_{2,3}$	$Z_{2,4}$	$Z_{2,5}$	$Z_{2,6}$
...						
n	$Z_{n,1}$	$Z_{n,2}$	$Z_{n,3}$	$Z_{n,4}$	$Z_{n,5}$	$Z_{n,6}$

ELABORACIÓN: Luis Ríos

2.1.5. SERIES DE CAUDALES MÍNIMOS ANUALES

Los valores mínimos de precipitación con probabilidad de excedencia asociada son comprables con datos hidrológicos. Los caudales medios diarios fueron procesados año a año, generando curvas de duración general y por ende caudales mínimos con probabilidades de excedencia.

Para determinar las curvas de duración general anuales, los caudales característicos y el área comprendida el caudal medio de la serie en la CDG, se creó una aplicación muy útil con la herramienta MACROS en Microsoft Excel que fue denominada CDG 1.05. La aplicación comprende un programa en el lenguaje Basic, que permitió general tablas de resumen con caudales característicos, la gráfica de la curva de duración general y el área bajo el límite del caudal medio de la serie en la CDG tal como se muestra en el Capítulo 5.

El área comprendida bajo el caudal medio y el eje de las abscisas en la CDG fue determinada con la aplicación del Teorema de Gauss es decir con una matriz de orden $n \times 2$, con las coordenadas dispuestas en sentido anti horario de los distintos puntos del área a encontrar.

El área mencionada anteriormente permite conocer la magnitud en que la cuenca hidrográfica gana o pierde su capacidad de retención de agua o autorregulación. Se conforma una matriz en base a los caudales mínimos anuales, obtenidos con la curva de duración general (Ver Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Matriz de caudales mínimos anuales

AÑO	CAUDALES MÍNIMOS ANUALES					
	Q90	Q80	Q70	Q60	Q50	Qm
1	$Q_{1,90}$	$Q_{1,80}$	$Q_{1,70}$	$Q_{1,60}$	$Q_{1,50}$	$Q_{1,m}$
2	$Q_{2,90}$	$Q_{2,80}$	$Q_{2,70}$	$Q_{2,60}$	$Q_{2,50}$	$Q_{2,m}$
...						
n	$Q_{n,90}$	$Q_{n,80}$	$Q_{n,70}$	$Q_{n,60}$	$Q_{n,50}$	$Q_{n,m}$

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Donde:

$Q_{n,90}$: caudal diario con probabilidad de excedencia 90% del año n (m^3/s);

$Q_{n,80}$: caudal diario con probabilidad de excedencia 80% del año n (m^3/s);

$Q_{n,70}$: caudal diario con probabilidad de excedencia 70% del año n (m^3/s);

$Q_{n,60}$: caudal diario con probabilidad de excedencia 60% del año n (m^3/s);

$Q_{n,50}$: caudal diario con probabilidad de excedencia 50% del año n (m^3/s); y;

$Q_{n,m}$: caudal medio del año n (m^3/s); y;

También se incluye un análisis de valores mínimos medios mensuales bajo la misma metodología aplicada para las variables climáticas, asociando valores promedios mínimos en cada uno de los meses.

Finalmente, se analizaron las tendencias a través del tiempo que presentan las distintas variables hidrológicas y climáticas generando criterios e indicadores que expresan el alto grado de variabilidad climática que se presenta en las distintas regiones del país; un ejemplo numérico y los resultados de este proceso se muestra en el Capítulo 5 del presente estudio.

CAPÍTULO 3

BASE DE DATOS CLIMÁTICA E HIDROLÓGICA

3.1. FUENTES DE INFORMACIÓN

La información climática e hidrométrica recopilada para el presente estudio fue obtenida de las siguientes fuentes:

- Anuarios Hidrológicos (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología 1971-2005);
- Anuarios Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología 1971-2005);
- Estudio de Prefactibilidad de la Central Hidroeléctrica Nanegal (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2008); y,
- Estudio de Prefactibilidad de la Central Hidroeléctrica Chanchán (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2008).

Se conformaron series de registros históricos de 35 años (1971-2005) de precipitaciones mensuales, caudales medios diarios y mensuales, y temperaturas mensuales del período 1971 – 2005, cumpliendo de esta manera con las recomendaciones de la OMM, para el análisis de tendencias.

3.2. CONFORMACIÓN DE LA BASE DE DATOS

3.2.1. INFORMACIÓN CLIMÁTICA

Las variables climáticas consideradas son: precipitación mensual y temperatura media mensual.

Las estaciones fueron seleccionadas por su ubicación y pertenencia a las cuencas de estudio, se procuró seleccionar al menos tres estaciones para evaluar la variabilidad espacial de estas variables; las estaciones meteorológicas dispuestas para el análisis se muestra en la Tabla 3.1.

La ubicación espacial y geográfica de las estaciones climáticas se encuentra en el Anexo 1-Mapas.

Tabla 3.1. Estaciones meteorológicas de interés.

COD.	ESTACION	TIPO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	INSTITUCION
CUENCA RIO ALAMBI EN CHURUPAMBA						
M339	Nanegalito	PG	00°03'41" N	78°40'44" W	1615	I NAMHI
M361	Nono	PG	00°03'41" S	78°34'31" W	2730	INAMHI
M213	La Perla	CP	00°11'34" N	78°40'10" W	1410	INE CEL
CUENCA RIO TOACHI A.J. PILATON						
M363	Sigchos	PV	00°41'58" S	78°53'25" W	2880	INAM HI
M362	Las Pampas	PG	00°26'36" S	78°58'00" W	1640	I NAMHI
M027	Santo Domingo Aeropuerto	CP	00°14'44" S	79°12'00" W	554	DAC
CUENCA RÍO ALAO EN HACIENDA ALAO						
M396	Alao	PV	01°53'00" S	78°29'00" W	3200	INAMHI
M135	Pachamama- Tixán*	CO	02°11'42" S	78°46'54" W	3690	INAMHI
M406	Chambo- Finca Guadalupe*	PV	01°42'42" S	78°36'05" W	2640	INAMHI
CUENCA RÍO MATADERO EN SAYAUSI						
M141	El Labrado	CO	02°43'58" S	79°00'29" W	3260	I NAMHI
M417	Piscícola Chirimachay	PV	02°46'28" S	79°10'20" W	3270	INAMHI
M067	Cuenca Aeropuerto	AR	02°53'02" S	78°59'00" W	2530	DAC
CUENCA RIO QUIJOS EN BAEZA						
M188	Papallacta	CO	00°21'54" S	78°08'41" W	3150	I NAMHI
M215	Baeza	CP	00°37'34" S	77°51'51" W	1960	INECEL
M201	El Chaco INECEL	CP	00°20'00" S	70°40'00" W	1570	INECEL
M700	Quijos Superior	PG	00°28'43" S	78°06'24" W	2950	INECEL
CUENCA RIO YANAHURCO D.J. VALLE						
M364	Loreto Pedregal	PV	00°33'41" S	78°25'35" W	3620	INAMHI
M188	Papallacta	CO	00°21'54" S	78°08'41" W	3150	I NAMHI
M135	Pachamama- Tixán	CO	02°11'42" S	78°46'54" W	3690	INAMHI

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Donde:

PV: Estación Pluviométrica

PG: Estación Pluviográfica

CO: Estación Climatológica Ordinaria

CP: Estación Climatológica Principal

AR: Estación Aeronáutica

(*) Estaciones vecinas de las cuencas hidrográficas, utilizadas para rellenar los datos faltantes.

Para efecto de relleno de la información de las estaciones climáticas, se establecieron correlaciones en valores mensuales.

3.2.2. INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

El análisis de la información hidrométrica se realizó con caudales medios diarios. En tanto que para el análisis a mayor escala se utilizan caudales medios mensuales.

En la Tabla 3.2 se muestran las estaciones hidrométricas en estudio y su ubicación se puede apreciar en el Anexo 1-Mapas.

Tabla 3.2. Estaciones hidrométricas

COD.	ESTACION	TIPO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	INSTITUCIÓN
H136	Alambi en Churupamba	LG	00°09'00" N	78°40'50' W	920	INECEL
H161	Toachi A.J. Pilatón	LG	00°18'56" S	78°57'05" W	820	INAMHI
H787	Alao en Hacienda Alao	LG	01°52'11" S	78°30'40" W	3200	INAMHI
H896	Matadero en Sayausí	LG	02°52'01" S	79°04'00" W	2645	INAMHI
H718	Quijos en Baeza	LG	00°27'16" S	77°53'11" W	1 770	INAMHI
H722	Yanahurco D.J. Valle	LG	00°41'30" S	78°16'52" W	3590	INAMHI

Donde:

LG: Estación limnigráfica

3.2.3. RELLENO DE DATOS FALTANTES

El relleno de datos faltantes en las series constituyó un tema fundamental para disponer de series homogéneas, para el efecto se aplicó métodos estadísticos con estaciones seleccionadas por pertenencia a la cuenca de drenaje, tenencia de características análogas y cercanía geográfica.

Los registros hidrométricos de caudales medios mensuales que se presentan incompletos fueron también completados mediante modelos de regresión de mínimos cuadrados, a partir de registros de precipitaciones mensuales.

En general, se adopta el modelo de correlación si la regresión por mínimos cuadrados presenta coeficientes (r) mayores a 0.7 (Ver Figura 3.1).

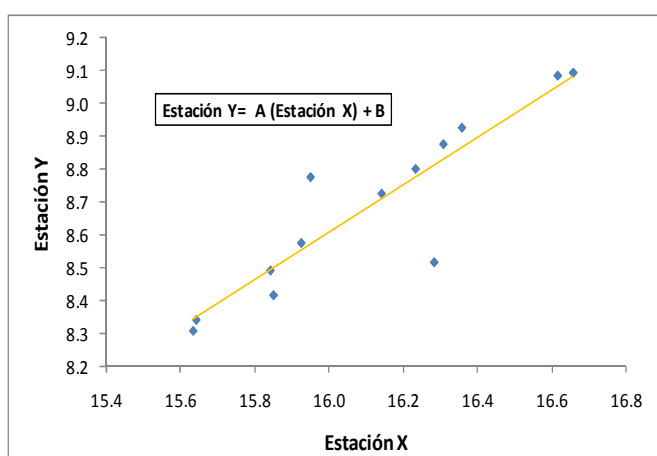
La ecuación lineal típica es de la forma:

$$\text{Estación } Y = A (\text{Estación } X) + B \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

A y B: coeficientes de tendencia lineal

Figura 3.1. Modelo gráfico de correlación lineal



ELABORACIÓN: Luis Ríos

En la Tabla 3.3, se muestran las ecuaciones de correlación con las que se completaron las series de registros de todas las estaciones hidrométricas y meteorológicas y sus respectivos coeficientes de correlación.

Tabla 3.3. Ecuaciones de relleno de información

ESTACION Y	ESTACION X	A	B	r
Nono	Nanegalito	0.4079	-8.0694	0.78
La Perla	El Chaco	0.4974	10.352	0.71
Piscícola Chirimachay	Cuenca AP	1.0821	28.65	0.77
El Labrado	Cuenca AP	0.7278	-2.9592	0.91
Baeza	Quijos Superior	-0.6729	282.6	0.73
Sigchos	Las Pampas	0.3667	12.37	0.78
Toachi A.J. Pilatón	Nanegalito	0.0672	3.0599	0.78
Alao en Hda. Alao	Alao	0.0861	0.5657	0.75
Quijos en Baeza	Baeza	0.2660	-5.8683	0.78
Toachi A.J. Pilatón	Las Pampas	0.2763	-2.6082	0.75

ELABORACIÓN: Luis Ríos

3.3. HOMOGENEIZACIÓN DE LAS SERIES CLIMÁTICAS E HIDROLÓGICAS

Una vez conformada la base de datos de precipitación, temperatura y caudales medios mensuales para el período 1971-2005, se procede a realizar pruebas de calidad de información: curvas de doble masa y pruebas estadísticas de secuencias, tal como se explicó en el numeral 2.1.3.

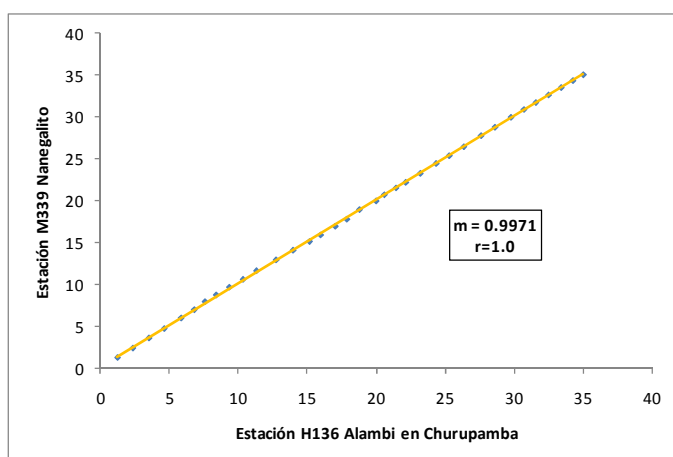
3.3.1. CURVAS DE DOBLE MASA

Se presentan curvas de doble masa representativas para cada cuenca hidrográfica, que relacionan precipitación acumulada y la sumatoria de caudales medios anuales, para verificar la correspondencia de las series de datos.

Si la curva de doble masa presenta una tendencia lineal (pendiente constante) se asume en primera instancia la homogeneidad de las series previa la realización de una prueba estadística no paramétrica (prueba de rachas). En el caso de poseer desviaciones importantes o varias pendientes, se identifican los períodos para ser revisados, y corregidos hasta alcanzar la homogeneidad.

La curva de doble masa de la cuenca del río Alambi (Figura 3.2), muestra una dispersión de valores casi nula en el período considerado, así el coeficiente de correlación lineal es igual a 1, y la pendiente de la recta es 0.99. Esta homogeneidad es producto de la alta dependencia entre precipitaciones y caudales de estas estaciones al aplicar un modelo de correlación para el relleno de datos faltantes.

Figura 3.2. Curva de doble masa cuenca río Alambi

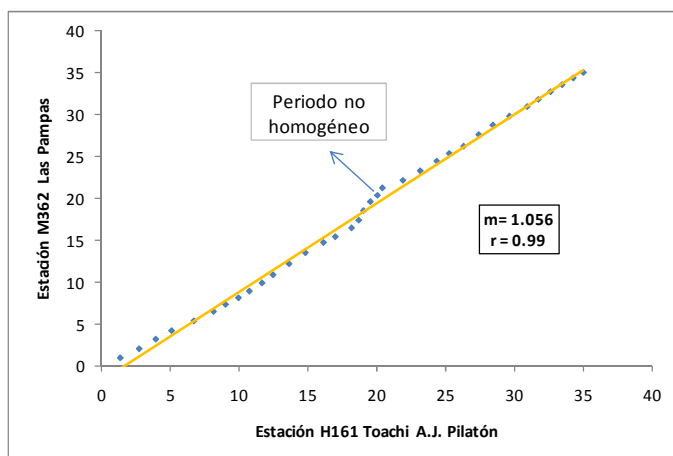


ELABORACIÓN: Luis Ríos

Se observa en la Figura 3.3 que existe una desviación en la curva de masas de la cuenca del río Toachi, este período corresponde a los años 1992 y 1995; por tanto se

realizó la validación de datos con estaciones cercanas y pertenecientes a la cuenca de drenaje como son: Sigchos y Santo Domingo Aeropuerto.

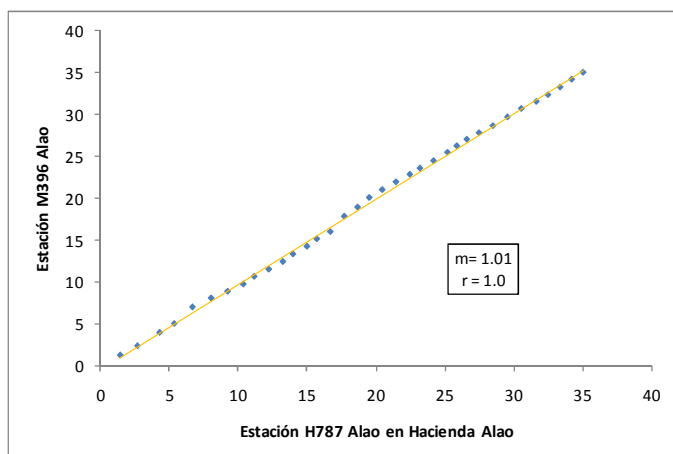
Figura 3.3. Curva de doble masa cuenca río Toachi.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Se muestra en la Figura 3.4 la curva de doble masa representativa de la cuenca del río Alao para el período 1971-2005 que tiene una tendencia lineal ($r=1.0$) con una pendiente promedio de la recta de 1.01. Cabe indicar que no existen cambios de pendiente importantes en el tiempo por lo que se considera a estas series de precipitaciones y caudales homogéneas.

Figura 3.4. Curva de doble masa cuenca río Alao

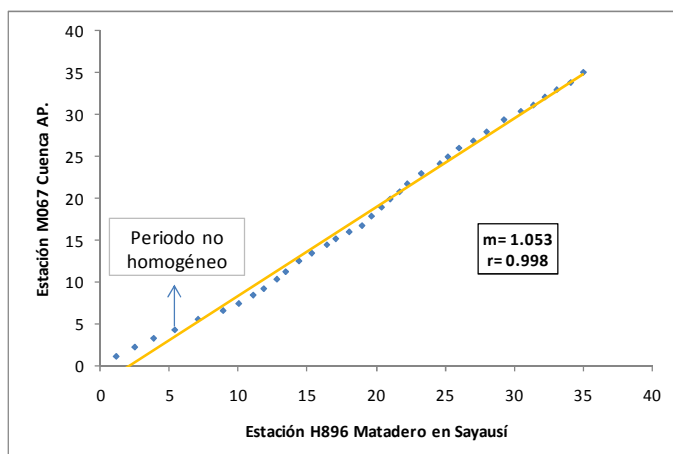


ELABORACIÓN: Luis Ríos

La curva de doble masa que caracteriza a las estaciones de la cuenca del río Matadero evidencia una desviación importante de las series en el período 1971-1975, período que fue tomado en consideración para una revisión detallada en los datos mediante correlaciones simples con otras estaciones geográficamente cercanas tales como El Labrado y Piscícola Chirimachay (Figura 3.5).

La recta que se ajusta a la mayoría de registros tiene una pendiente de 1.053 y un coeficiente de correlación (r) de 0.998.

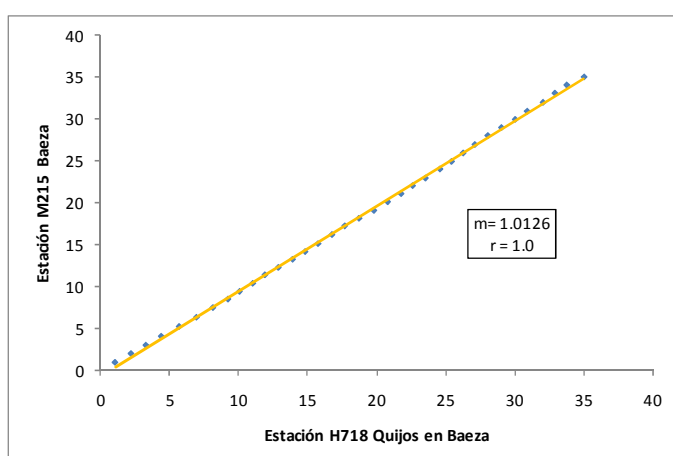
Figura 3.5. Curva de doble masa cuenca río Matadero



ELABORACIÓN: Luis Ríos

La curva de masas representativa de la cuenca del río Quijos (Figura 3.6) muestra una dispersión mínima en relación a la recta que se ajusta por mínimos cuadrados a la sumatoria de precipitación y caudal; mediante esta visualización preliminar se considera al período 1971-2005 como homogéneo. La recta tiene una pendiente de 1.01 y se ajusta a razón de un coeficiente $r=1$.

Figura 3.6. Curva de doble masa cuenca río Quijos.

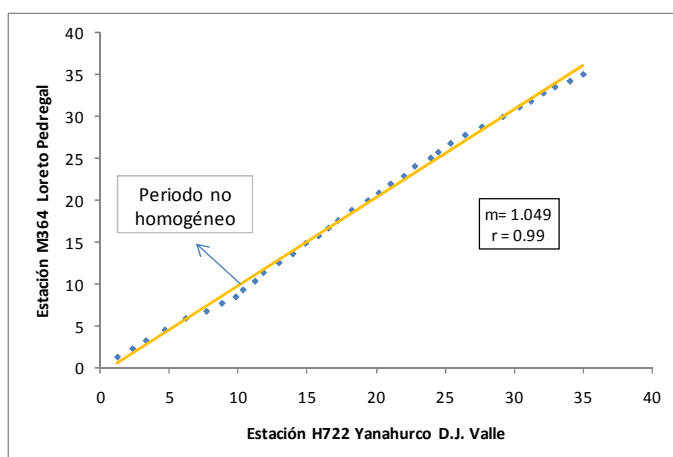


ELABORACIÓN: Luis Ríos

La curva de doble masa que representa a la cuenca alta del río Yanahurco, establece un período no homogéneo 1976-1981 que fue revisado y validado hasta alcanzar su homogeneidad.

La recta resultante tiene una pendiente de 1.049, y un coeficiente de correlación de 0.99 (Figura 3.7)

Figura 3.7. Curva de doble masa cuenca río Yanahurco



ELABORACIÓN: Luis Ríos

3.3.2. PRUEBA DE RACHAS

La prueba de rachas o secuencias refiere en su proceso a la homogeneidad de una serie de registros, tomando en consideración la desviación existente con la mediana de la serie.

El test de secuencias fue aplicado en las series mensuales y multianuales de precipitación, temperatura y caudales. En las Tablas 3.4, 3.5, y 3.6 se muestran los resultados de la prueba de secuencias aplicadas a las distintas series de información hidrometeorológica.

NS: número de rachas en la serie

NA: número de valores por encima de la mediana

Tabla 3.4. Test de secuencias en series de precipitación mensual

ESTACION	ANALISIS INTERANUAL		
	NA	NS	SERIE HOMOGenea
Alao	17	14	SI
Chambo Finca Guadalupe	17	16	SI
Cuenca AP	17	17	SI
Piscícola Chirimachay	17	17	SI
Nanegalito	17	14	SI
Nono	17	14	SI
Las Pampas	17	14	SI
Sigchos	17	19	SI
Baeza	17	16	SI
Loreto Pedregal	17	16	SI

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Tabla 3.5. Test de secuencias en series de temperatura mensual

ESTACION	ANALISIS INTERANUAL		
	NA	NS	SERIE HOMOGENEA
Pachamama - Tixán	17	14	SI
Cuenca AP	17	16	SI
El Labrado	17	14	SI
La Perla	17	15	SI
Santo Domingo Aeropuerto	17	15	SI
Baeza	17	14	SI
Papallacta	17	4	NO

ELABORACIÓN: Luis Ríos**Tabla 3.6.** Test de secuencias en series de caudales mensuales

ESTACION	ANALISIS INTERANUAL		
	NA	NS	SERIE HOMOGENEA
Alambi en Churupamba	17	14	SI
Toachi A.J. Pilatón	17	14	SI
Alao en Hacienda Alao	17	16	SI
Matadero en Sayausí	17	16	SI
Quijos en Baeza	17	15	SI
Yanahurco D.J. Valle	17	14	SI

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Con la aplicación del test de secuencias en las series corregidas de precipitaciones, temperatura y caudales se verifica la homogeneidad de las mismas a nivel interanual en un 96%, a excepción de la temperatura en la estación Papallacta; en particular esta estación muestra casi todos valores de temperatura por debajo de la mediana de la serie.

En todos los test aplicados se puede observar que el número de registros superiores a la mediana es de 17, condición que concuerda con las recomendaciones de la OMM (Tabla 2.2) que establece en este caso un intervalo de rachas de entre 14 y 21 para determinar la homogeneidad de la serie; situación que se muestra en las tablas anteriores.

A nivel mensual, el 20% de las series no cumplen con las condiciones de homogeneidad; situación que puede verse justificada por problemas en la recopilación de información, la ausencia de lecturas e inclusive por algún cambio en el instrumental de medición.

Por tanto se verificó que las series son homogéneas y por ende la existencia de una variabilidad casual de los registros en el tiempo; en consecuencia se las considera aptas para el análisis en el presente estudio.

Las series hidrometeorológicas homogéneas del período 1971-2005 se presentan en el Anexo 2.

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DE LAS CUENCAS DE DRENAJE

4.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se analiza la variabilidad del clima en las cuencas hidrográficas de interés para de esta manera comprender de manera preliminar a su variación estacional e histórica y poder relacionarlas con sus características físicas que dependen netamente de propiedades como el relieve, la forma, la altitud, entre otras.

4.2. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y BALANCE HÍDRICO DE LAS CUENCAS DE DRENAJE

La caracterización climática de las cuencas de drenaje refleja la variabilidad en el tiempo y en el espacio de los diferentes parámetros meteorológicos al interior de las hoyas. Se caracteriza la variabilidad climática en base a los registros históricos de precipitación y temperatura media mensual de las estaciones, cuyas series fueron analizadas en el Capítulo 3.

4.2.1. PRECIPITACIÓN

La pluviosidad que se presenta en cada una de las hoyas, representa en gran porcentaje a la humedad disponible y que forma el escurrimiento directo; los valores representativos de precipitación en valores mensuales y anuales constan en las Tablas 4.1 y 4.2 de las estaciones consideradas.

Tabla 4.1. Precipitaciones características mensuales

CUENCA HIDROGRÁFICA	PLUVIOSIDAD MENSUAL (mm)		
	MÁXIMA	MEDIA	MÍNIMA
Río Alambi en Churupamba	651.1	212.7	0.3
Río Toachi A.J. Pilatón	823.7	188.0	0.0
Río Alao en Hacienda Alao	648.9	87.9	0.0
Río Matadero en Sayausí	255.7	72.3	3.6
Río Quijos en Baeza	432.8	193.9	47.5
Río Yanahurco D.J. Valle*	822.3	120.7	6.6

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Tabla 4.2. Precipitaciones características anuales

CUENCA HIDROGRÁFICA	PLUVIOSIDAD ANUAL (mm)		
	MÁXIMA	MEDIA	MÍNIMA
Río Alao en Hacienda Alao	2105.0	1186.0	782.0
Río Matadero en Sayausí	1320.0	940.0	640.0
Río Alambi en Churupamba	3345.0	2488.0	1801.0
Río Toachi A.J. Pilatón	3458.9	2258.8	1703.4
Río Quijos en Baeza	2722.0	2328.0	2023.6
Río Yanahurco D.J. Valle	3856.3	1448.6	877.8

ELABORACIÓN: Luis Ríos

(*) Se utilizó estaciones de la zona con características similares a la cuenca en estudio.

La ubicación geográfica en las laderas occidentales de la Cordillera Real o de los Andes de la región litoral permite que las precipitaciones sean cercanas a los 2500 mm anuales, se muestran períodos de precipitaciones abundantes y asimismo escasez en el periodo seco del año.

De las cuencas hidrográficas de la sierra se puede concluir que la ubicación es altamente predominante en la evaluación de la precipitación media de la cuenca. Es así que la cuenca del río Alao posee una pluviosidad mayor a la presentada en la hoya del río Matadero en 15% en lluvias anuales, incremento debido a que está mejor expuesta a las masas de humedad.

En tanto que la región amazónica, y su conocida alta pluviosidad corresponde claramente al régimen hidrológico de cuencas ubicadas en los flancos orientales de la Cordillera de los Andes, con precipitaciones mayores a 2000 mm anuales y mejor distribuidas al interior del año, que permiten conservar la vegetación y cobertura de las cuencas hidrográficas.

La variabilidad climática señalada por la fluctuación de la pluviosidad se considera un indicador imperante al momento de definir la ausencia o excedencia de escorrentía superficial en las cuencas hidrográficas de manera generalizada o por períodos.

Los caudales mínimos en los cauces de las cuencas hidrográficas, obviamente tienen lugar en los períodos del año, cuando las precipitaciones son mínimas, como se puede notar las precipitaciones mensuales mínimas en las cuencas hidrográficas en

estudio toman un valor preocupante de ausencia de lluvias (0 mm), situación que provoca balances hídricos negativos en determinados meses del año y por ende calificar a estos períodos de tiempo como estiajes.

4.2.2. TEMPERATURA

La temperatura definida como el indicador de la cantidad de energía calorífica acumulada en la atmósfera baja, es un parámetro influyente en el régimen hidrológico de una zona, ya que incide en la evaporación.

El tratamiento de la temperatura y su consiguiente fenómeno la evaporación adquiere importancia en la ecuación hidrológica, puesto que representa la parte de la precipitación que no forma escurrimiento. Esta variable meteorológica se evalúa con registros históricos en valores medios mensuales; y los datos constan en la Tabla 4.3 (las series mensuales constan en el Anexo 2).

Tabla 4.3. Temperaturas características mensuales

CUENCA HIDROGRÁFICA	TEMPERATURA MENSUAL (°C)		
	MÁXIMA	MEDIA	MÍNIMA
Río Alambi en Churupamba	20.0	19.3	18.8
Río Toachi A.J. Pilatón	24.9	23.5	22.7
Río Alao en Hacienda Alao*	9.7	7.9	6.4
Río Matadero en Sayausí	17.0	16.3	15.0
Río Quijos en Baeza	17.2	16.6	15.6
Río Yanahurco D.J. Valle*	11.9	10.0	7.9

ELABORACIÓN: Luis Ríos

(*) Se utilizó estaciones de la zona con características similares a la cuenca en estudio.

En la cuenca del río Alao se presentan las temperaturas más bajas, lo que refleja la existencia de pisos altitudinales superiores hasta el sitio de interés de la cuenca con cobertura vegetal típica de páramo. Las cuencas de la región litoral muestran una alta dependencia de la temperatura con la altitud (mayor temperatura a menor altitud) con un rango de variación de 19.3 y 23.5 °C.

La Amazonía caracterizada por sus regímenes de alta humedad ambiente, y por ende temperaturas altas características de zonas tropicales y subtropicales siendo éste el caso de la zona cercana a la estación Quijos en Baeza. Los pisos orientales altitudinales superiores mayores a 3200 m s.n.m. poseen temperaturas relativamente bajas respondiendo a un régimen de páramo.

La variabilidad que muestra la temperatura en las diferentes regiones continentales del Ecuador refleja adecuadamente su variabilidad estacional e interanual.

Definitivamente, la variabilidad que muestra la precipitación y la temperatura a través del tiempo permite establecer períodos de estiaje e incluso sequía que tienden a presentarse con mayor frecuencia en nuestro país; a continuación se presenta un análisis de esta variabilidad y la respectiva identificación de períodos secos (estiajes) con la interacción de variables netamente climáticas.

4.2.3. DIAGRAMAS OMBROTÉRMICOS E IDENTIFICACIÓN DE PERÍODOS SECOS EN LAS CUENCAS DE DRENAJE

Se define a un diagrama ombrotérmico como la superposición a una misma escala aritmética de la curva ómbrica (precipitación) y la curva térmica para una zona, el cual permite identificar cualitativamente los períodos secos del año (aridez); en definitiva, muestra la estacionalidad intraanual conjunta de la precipitación y temperatura.

Este diagrama es de utilidad ya que permite identificar los períodos más propensos a que los caudales en los ríos sean mínimos; el intervalo de tiempo del período seco de acuerdo a las condicionantes de temperatura y precipitación escasa.

Para identificar un mes seco o subseco se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Mes seco: $P \leq 2t$
- Mes subseco: $2t < P < 3t$

Donde la precipitación mensual (P) está en mm, y la temperatura media mensual (t) en °C.

En el análisis de los diagramas ombrotérmicos se pudo identificar que las 6 cuencas objeto de estudio, no se presentan períodos secos ni subsecos excepto en la cuenca del río Matadero como se mostrará en su descripción, Los diagramas ombrotérmicos para las diferentes zonas que presentan en escalas diferentes en los ejes

correspondientes a la precipitación y temperatura para facilitar la visualización de la VARIACIÓN ESTACIONAL de estas variables.

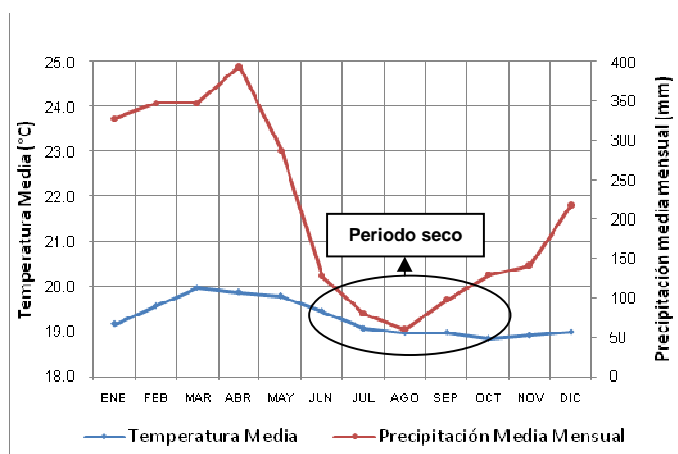
- **CUENCA DEL RÍO ALAMBI EN CHURUPAMBA**

La zona de influencia de la estación hidrométrica río Alambi en Churupamba cuenta con una pluviosidad alta en el período enero-mayo con láminas de precipitación mayores a los 300 mm mensuales, mientras que los meses comprendidos entre junio-octubre presentan lluvias menores a 120 mm (Ver Figura 4.1).

La zona se caracteriza por poseer un clima subtropical con temperaturas ambiente no mayores a 20°C teniendo picos importantes en los meses de marzo, abril y mayo. Los meses con temperaturas mínimas en el año se presentan en el período julio-diciembre. Una vez analizados los datos de precipitación y temperatura en conjunto, no se identificaron meses que respondan a un régimen seco o subseco definidos.

Se advierte una mayor probabilidad de ocurrencia de caudales mínimos en el cauce del río Alambi en el período junio-octubre.

Figura 4.1. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Alambi en Churupamba



ELABORACIÓN: Luis Ríos

- **CUENCA DEL RÍO TOACHI A.J. PILATÓN**

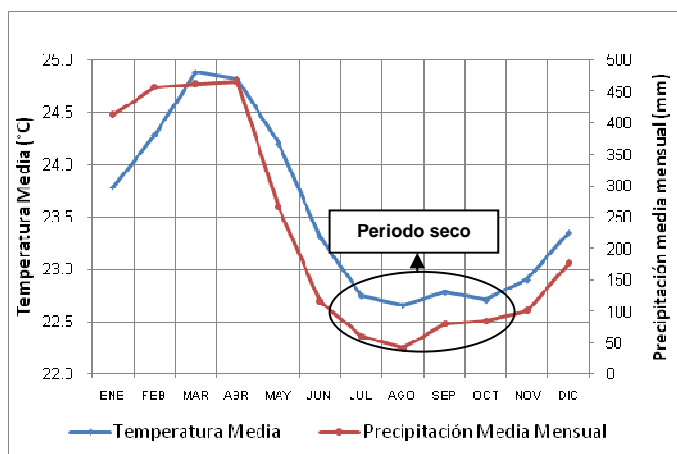
La zona circundante a la estación hidrométrica río Toachi A.J. Pilatón localizada a 820 m.s.n.m. posee un régimen de precipitaciones mayores en el período enero-abril, notándose claramente que existen picos importantes en los meses marzo y abril, cuando las láminas de precipitación son mayores a 300 mm mensuales. El período julio-octubre presenta valores de pluviosidad menores a 50 mm por mes.

Los meses más calurosos en esta zona de la región litoral son marzo y abril con valores muy cercanos a 25°C, en tanto que las temperaturas más bajas se registran en el período julio-octubre cuando fluctúan entre los 22.6 y 23°C con una dispersión muy baja en el tiempo.

Se observa en la Figura 4.2 que el mes de agosto presenta mayor sensibilidad a poseer períodos secos, por una precipitación baja y temperatura ambiente. Los

meses comprendidos en el período julio-octubre generan una tendencia alta a la existencia de caudales mínimos.

Figura 4.2. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Toachi A.J. Pilatón



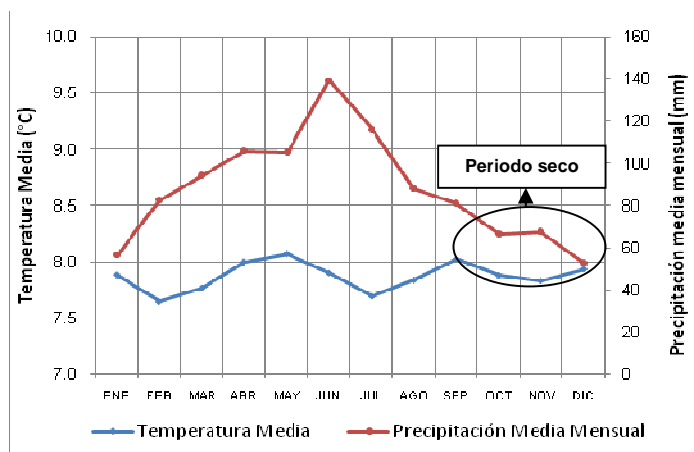
ELABORACIÓN: Luis Ríos

- **CUENCA DEL RÍO ALAO EN HACIENDA ALAO**

La Figura 4.3 muestra la variabilidad estacional de la precipitación y temperatura media mensual para esta cuenca hidrográfica, las precipitaciones máximas tienen lugar en el periodo abril-julio, en tanto que los restantes meses del año mantienen un rango uniforme de pluviosidad no mayor a 100 mm/mes.

El análisis conjunto de precipitaciones y temperaturas, permite afirmar que la cuenca del río Alao no posee meses ni períodos secos o subsecos extremos de acuerdo con el diagrama ombrotérmico. No obstante es importante señalar que en los meses de menor precipitación octubre-enero, existe mayor probabilidad de ocurrencia de caudales mínimos en la cuenca.

Figura 4.3. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Alao en Hacienda Alao



ELABORACIÓN: Luis Ríos

- **CUENCA DEL RÍO MATADERO EN SAYAUSÍ**

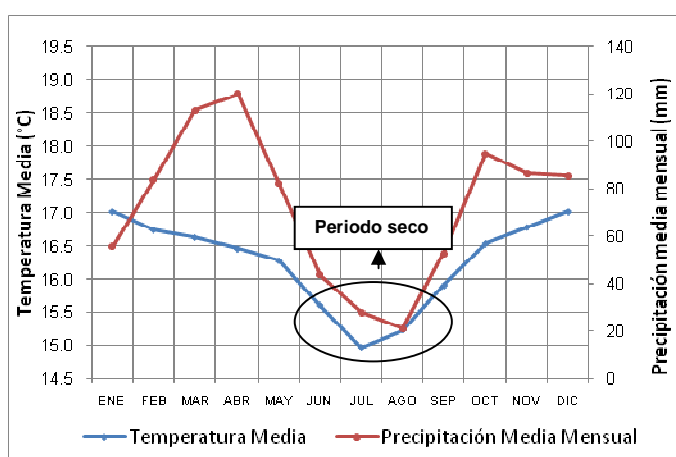
En la Figura 4.4 se presentan las precipitaciones medias mensuales de la zona en donde se puede observar que las mayores lluvias tienen lugar en los períodos febrero-mayo y octubre-diciembre, con láminas de precipitación mayores a 85 mm; en tanto que el período con menor presencia de lluvias para esta zona está comprendido entre junio y septiembre, con precipitaciones menores a 40 mm por mes.

La temperatura y su variación estacional en esta zona muestran que el período junio-agosto presenta menores valores de esta variable. Los meses que complementan a este período tienen registros con mínima dispersión, no mayores a 17°C.

El análisis ombrotérmico de esta zona, en donde se localiza la cuenca del río Matadero en Sayausí, presenta que los meses de julio y agosto deben ser

catalogados como meses secos ya que se cumple la condición $P \leq 2t$; en tanto que el mes de junio adquiere la identificación de mes subseco. El período que tiene la mayor probabilidad de ocurrencia de caudales mínimos es junio-septiembre.

Figura 4.4. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Matadero en Sayausí



ELABORACIÓN: Luis Ríos

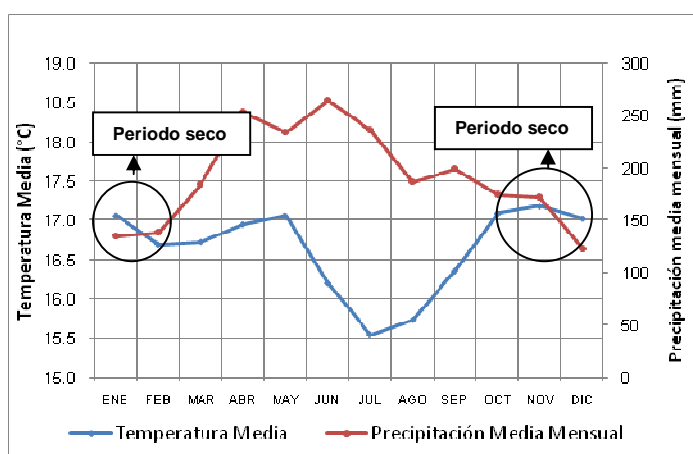
- **CUENCA DEL RÍO QUIJOS EN BAEZA**

La estación hidrométrica ubicada en las cercanías del cantón Baeza y su zona de influencia posee un régimen de lluvias abundantes en el período abril-julio con láminas de precipitación mayores a 225 mm mensuales; mientras que los meses con menores precipitaciones son enero, febrero y diciembre (110 mm). Durante la mayor parte del año la temperatura mantiene un valor estable entre los 16.5 °C y 17°C que a la vez se constituyen en los meses más calurosos, exceptuando al período junio-septiembre donde la temperatura del aire en esta zona disminuye hasta alcanzar 15.5°C.

El análisis ombrotérmico (Figura 4.5) de esta zona no cataloga a ninguno de los meses del año como propensos a períodos secos, situación típica de una cuenca amazónica con una cobertura vegetal aún conservada y con una pluviosidad considerable.

Los caudales firmes o mínimos en esta estación hidrométrica refieren su ocurrencia en los meses de enero, febrero y diciembre.

Figura 4.5. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Quijos en Baeza



ELABORACIÓN: Luis Ríos

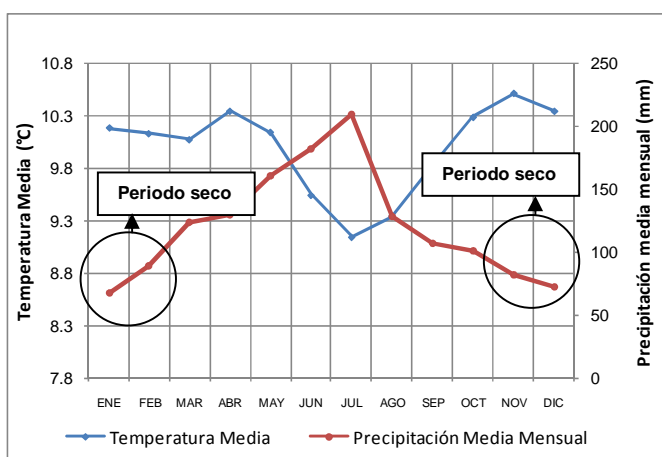
- **CUENCA DEL RÍO YANAHURCO D.J. VALLE**

El régimen de precipitaciones en la zona de la estación en el río Yanahurco muestra mayores lluvias en el período mayo-agosto con valores cercanos a 200 mm mensuales mínimas ocurren en los meses de noviembre, diciembre y enero con láminas de lluvia inferiores a 100 mm/mes. La temperatura y su variación estacional en esta zona muestran que el período junio-agosto presenta menores valores. Los

meses del año que complementan a este período tienen registros con mínima dispersión, no mayores a 10°C.

Pese a que la pluviosidad es considerablemente baja para una cuenca amazónica alta, no se presentan períodos secos en el lugar, ya que el fenómeno de evaporación no toma mayor importancia por la temperatura baja que existe y la alta humedad. Los meses de noviembre, diciembre y enero son los más susceptibles a presentar caudales mínimos en el cauce del río Yanahurco por las bajas precipitaciones existentes.

Figura 4.6. Diagrama ombrotérmico de la cuenca del río Yanahurco D.J. Valle



ELABORACIÓN: Luis Ríos

En general, la variación estacional de la temperatura y precipitación responde a los ya conocidos regímenes climáticos complementarios de nuestro país: regímenes con influencia oriental y de régimen occidental.

- Régimen oriental: ríos Alao, Quijos y Yanahurco; y
- Régimen occidental; ríos Matadero, Alambi y Toachi.

De acuerdo a la variabilidad estacional de las precipitaciones se puede concluir que en las cuencas de la región sierra se producen variaciones climáticas mixtas es decir combinaciones de variabilidad dependiendo de la altitud. El río Alao que pertenece al sistema hidrográfico del río Pastaza (vertiente oriental) tiene una variabilidad propia de las cuencas orientales ya que por su altitud y su condición de cuenca de cabecera se encuentra influenciada por las mismas masas de aire que se precipitan en el oriente. En tanto que la cuenca del río Matadero en su zona intermedia muestra una variabilidad estacional propia de una cuenca del Pacífico pese a pertenecer a un sistema de drenaje oriental.

Con un análisis cualitativo de las 6 curvas ombrotérmicas, se concluye que las tendencias intranuales de precipitación y temperatura son semejantes al asociar períodos secos y húmedos con la clasificación presentada anteriormente.

En la Tabla 4.4 se muestra un resumen con las características climáticas principales de las cuencas hidrográficas en estudio.

Tabla 4.4. Resumen de las características climáticas principales de las cuencas

CUENCA HIDROGRÁFICA	REGIÓN	TEMPERATURA (°C)			PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)			PERIODO SECO
		Máx.	Med.	Mín.	Máx.	Med.	Mín.	
Río Alambi en Churupamba	Costa	20	19.3	18.8	651.1	212.7	0.3	Junio-Octubre
Río Toachi A.J. Pilatón	Costa	24.9	23.5	22.7	823.7	188	0	Julio-Octubre
Río Alao en Hacienda Alao	Sierra	9.7	7.9	6.4	648.9	87.9	0	Octubre-Diciembre
Río Matadero en Sayausí	Sierra	17	16.3	15	255.7	72.3	3.6	Junio-Septiembre
Río Quijos en Baeza	Oriente	17.2	16.6	15.6	432.8	193.9	47.5	Diciembre-Febrero
Río Yanahurco D.J. Valle	Oriente	11.9	10	7.9	822.3	120.7	6.6	Noviembre-Enero

ELABORACIÓN: Luis Ríos

4.2.4. BALANCE HÍDRICO DE LAS CUENCAS DE DRENAJE

El balance hídrico de las cuencas en estudio se realizó en base a la ecuación hidrológica simplificada para una cuenca de drenaje (Ec. 4.1); que es válida para intervalos de tiempo multianuales, en el presente estudio se considera el período 1970-2005 (35 años).

$$h_Q \cong h_P - h_e \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

h_Q : lámina de escurrimiento superficial (mm);

h_P : lámina de precipitación media anual de la cuenca (mm); y,

h_e : lámina de evaporación real media anual de la cuenca (mm).

Por la información escasa e incompleta de registros históricos de evaporación al interior de las cuencas y además porque en el análisis se requiere disponer de la evaporación real y no de la potencial se recurre a la aplicación de la ecuación de Turc (Ec. 4.2.) que asocia la precipitación y temperatura media en valores anuales y que se sustenta en datos medidos en diferentes regiones del mundo.

$$E = \frac{P}{\left(0.9 + \frac{P^2}{[L(t)]^2}\right)^{0.5}} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

E: evapotranspiración media anual (mm);

P: precipitación media anual (mm);

L(t): $300 + 25t + 0.05t^2$; y,

t: temperatura media anual (°C)

Para la determinación de la temperatura media anual han sido consideradas tres ecuaciones representativas de la variabilidad de temperatura en el país, que relacionan a la temperatura y a la altitud, generadas con datos directos.

- Cuencas de los ríos Matadero, Alambi y Toachi

$$T(^{\circ}C) = -0.0039 E + 24.947 \quad (\text{Ec. 4.3})^8$$

⁸ (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2008)

- Cuenca del río Quijos

$$T(^{\circ}C) = -0.0007 E + 17.779 \quad (Ec. 4.4)$$

- Cuencas de los ríos Alao y Yanahurco

$$T(^{\circ}C) = -0.0045 E + 25.375 \quad (Ec. 4.5)^9$$

Como punto representativo de altitud se considera a la elevación media de las cuencas (E), obtenida de la curva hipsométrica.

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados de los balances hídricos de las cuencas en estudio y coeficientes de escurrimiento, representativos del período 1971-2005, en valores medios anuales.

⁹ (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2008)

Tabla 4.5. Balances hídricos cuencas en estudio

CUENCA HIDROGRÁFICA	BALANCE HÍDRICO						E (msnm)	Área (km ²)
	hp (mm)	T (°C)	he (mm)	hQ (mm)	Q (m ³ /s)	C=hQ/hp		
Río Alambi en Churupamba	1757.2	16.2	524.8	1232.4	16.14	0.70	2247.1	442.0
Río Toachi A.J. Pilatón	1414.3	13.9	462.7	951.5	47.26	0.67	2845.4	1526.4
Río Alao en Hacienda Alao	2777.3	9.3	458.1	2319.2	7.81	0.84	3562.5	108.0
Río Matadero en Sayausí	1126.6	11.3	400.4	726.2	6.95	0.64	3500.7	304.0
Río Quijos en Baeza	1962.2	11.6	468.6	1493.5	44.21	0.76	3692.4	932.5
Río Yanahurco D.J. Valle	1220.3	8.3	369.4	832.9	2.10	0.69	3796.8	78.3

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Donde:

hp: lámina de precipitación media anual (mm);

T: temperatura media anual en elevación media de la cuenca (°C);

he: lámina de evaporación real media anual (mm);

hQ: lámina de escurrimiento superficial media anual (mm);

Q: caudal medio anual (m³/s);

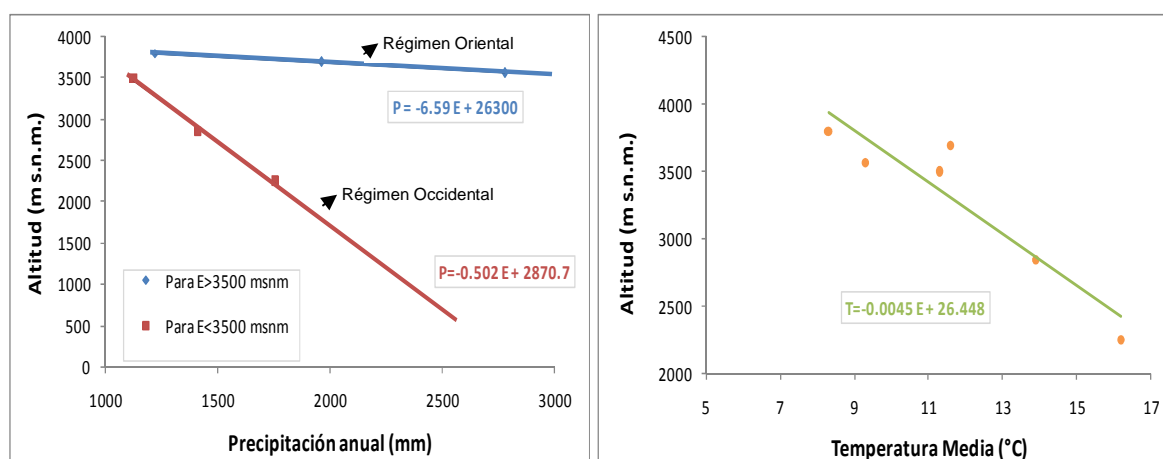
C: coeficiente de escurrimiento;

E: elevación media de la cuenca (m s.n.m.); y,

Área: área de la cuenca hidrográfica (km²)

Con los resultados obtenidos de los balances hídricos se pueden establecer tendencias de precipitación media anual y temperatura con la altitud en las cuencas de drenaje (Figura 4.7).

Figura 4.7. Tendencias de precipitación y temperatura con la altitud.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Se evidencian dos tendencias de precipitación establecidas por la elevación media de la cuenca, para elevaciones menores a 3500 m s.n.m. con un gradiente de -50.2 mm por cada 100 m de disminución de la altitud; en tanto que la tendencia para elevaciones mayores a 3500 m s.n.m. denota un gradiente de -659 mm por cada 100 m de decremento en la elevación. Cabe indicar que estas tendencias presentan un coeficiente de correlación (r) muy próximo a 1.

La temperatura muestra una tendencia única con la altitud de todas las cuencas en estudio, refiriendo un gradiente de -0.45°C por cada 100 m de disminución en la altitud; el coeficiente de correlación r es de 0.93.

A continuación se describen los resultados y los procedimientos aplicados en los balances hídricos:

- **BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO ALAMBI**

La información base de precipitación corresponde a la estación pluviométrica Nanegalito (2561 mm/año), esta precipitación fue afectada por un coeficiente de 0.68 para así determinar la lámina de lluvia media anual. Se determina que en los pisos altitudinales superiores de la cuenca de río Alambi la pluviosidad es menor.

La ecuación 4.3 permite estimar la temperatura media anual en la elevación media de la cuenca (2247 m), para así generar una lámina de evaporación media en el período (1971-2005) de 524.8 mm.

Se obtiene un coeficiente de escurrimiento medio (C) en la cuenca de 0.70; asignando de esta manera un 30% a las pérdidas.

- **BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO TOACHI**

El balance hídrico de la cuenca del río Toachi A.J. Pilatón, se fundamenta inicialmente en los registros de precipitación de la estación Las Pampas (2220 mm/año). La elevación media de la cuenca (2845 m) y la ecuación 4.3 establecen una temperatura media anual característica de 13.9 °C con la aplicación de la fórmula empírica de Turc se obtiene una lámina de precipitación media de 462.7 mm.

Se estima que la precipitación media en la hoya del Toachi es de 1414.3 mm/año y que el 63% de la precipitación corresponden la cuenca baja; describiéndose así un comportamiento de la pluviosidad con expectativas de incremento a medida que la altitud disminuye.

La relación entre lámina de escurrimiento y lámina de precipitación ($C=0.67$), establece un 33% de pérdidas de humedad que tiene lugar en la cuenca del río Toachi.

- **BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DE RÍO ALAO**

Para la representación del balance hídrico de la cuenca del río Alao se tiene como información referencial a la estación pluviométrica Alao (M396) emplazada en las inmediaciones del punto de interés hidrológico de la cuenca (estación Alao en Hacienda Alao). La estación M396 Alao tiene una precipitación media interanual de 1186 mm, pluviosidad que no es representativa de toda la hoya en especial de la parte alta; por lo que se afectó a esta precipitación por un factor de mayoración de 2.61 para así alcanzar la magnitud de precipitación que puede generar láminas de escurrimiento altas.

Con la ecuación 4.5 se obtiene una temperatura media representativa para la cuenca de 9.3°C, valor que en conjunto con la precipitación determinada con la fórmula de Turc produce una lámina de evaporación media anual de 458.1 mm. Se determina un coeficiente de escurrimiento de 0.84 para el período 1971-2005, que indica que el 84% de la precipitación total forma escurrimiento.

- **BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO MATADERO**

El balance hídrico en la cuenca del río Matadero en Sayausí, se sustenta en los registros de precipitación de la estación Piscícola Chirimachay (M417). La ecuación 4.3 permite generar la temperatura media (11.3 °C) que corresponde a la elevación media de la cuenca.

La precipitación media de la estación M417 fue afectada por un coeficiente de 0.84 hasta encontrar la pluviosidad que corresponde a la lámina de escurrimiento superficial real, situación que permite afirmar que en la cuenca alta del río Matadero (Alto Cajas) las precipitaciones son importantes y decrecen con la altitud; se estima el coeficiente de esorrentía de 0.64.

- **BALANCE HIDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO QUIJOS**

El balance hídrico de la cuenca del río Quijos en Baeza, se sustenta en los datos de pluviosidad de la estación meteorológica Baeza (2319 mm/año); valor que fue afectado por un coeficiente de 0.84 para definir la precipitación media representativa de la cuenca, para así determinar que en la cuenca de cabecera la precipitación es menor que en la cuenca baja, situación también justificada por el mapa de isoyetas (INAMHI, 2005).

En la elevación media de la cuenca (E) se determina una temperatura media de 11.6 °C, y en interacción con la precipitación se produciría una lámina de evaporación total de 468.6 mm. Aplicando la ecuación propuesta para el balance hídrico de las cuencas se genera una lámina de escurrimiento superficial de 1493 mm distribuido

en toda el área de la cuenca para obtener un caudal; se estima un coeficiente de escorrentía de 0.76.

- **BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RIO YANAHURCO**

La estación pluviométrica Papallacta dota de información inicial para el balance hídrico de la cuenca del río Yanahurco. Para la obtención de la precipitación característica de la cuenca se afecta a la precipitación de la estación con un coeficiente de 0.83 reduciendo así la magnitud de pluviosidad a 1220 mm.

La temperatura media se obtiene a la elevación media de 3796 m mediante la ecuación 4.5, se estima un coeficiente de escorrentía de 0.69.

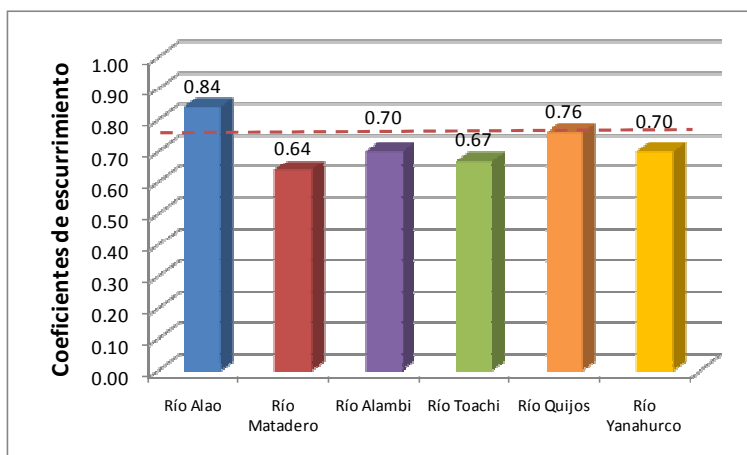
- **RESUMEN**

Los resultados presentados de balances hídricos pueden generalizarse y considerarse representativos de las cuencas análogas y/o con similares características físico-geográficas a las presentadas.

La cuenca con mayor pluviosidad es la del río Alao (2777 mm), mientras que la hoya del río Matadero cuenta con la menor lámina de precipitación (1126 mm); esta situación se justifica por los distintos grados de conservación de la cobertura vegetal, usos del suelo (intervención humana) y principalmente por su localización geográfica en el país.

Se comprueba que la precipitación en las cuencas de la región sierra aumenta con el incremento de la altitud; tendencia que no se cumple en las cuencas orientales y costeras donde la precipitación varía con un gradiente negativo (menor altitud denota mayor precipitación). La lámina de evaporación calculada con la fórmula de Turc, en todas las cuencas bordea un valor medio de 450 mm/año, que indica un 30% de pérdidas de humedad, en contraste con los coeficientes de escurrimiento que se establecieron en los balances hídricos (Figuras 4.8 y 4.9). El promedio de los coeficientes de esorrentía de todas las cuencas en análisis es 0.72.

Figura 4.8. Coeficientes de escurrimiento de las cuencas hidrográficas en estudio



ELABORACIÓN: Luis Ríos

CAPÍTULO 5

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

Con las series hidrológicas y meteorológicas, del período 1971-2005 que fueron verificadas mediante técnicas de homogeneización (prueba de secuencias y doble masa), se realizó el análisis de tendencias de caudales y precipitaciones asociado con sequías y estiajes mediante el siguiente procedimiento:

- Se analizó la variabilidad interanual de caudales en base a las curvas de masas residuales con las series homogéneas, lo cual permitió definir períodos húmedos y secos que responden a los ciclos hidrológicos.
- Se analizó las tendencias en base a las curvas de duración general absoluta con caudales medios diarios, con lo cual se obtuvo valores mínimos anuales. Si bien los caudales mínimos tiene alta probabilidad de excedencia en el tiempo el concepto estiaje, corresponde al período al interior del año en el cual el caudal se mantiene relativamente constante y se alimenta principalmente del afloramiento de aguas subterráneas. Se obtiene como resultado una base de datos de caudales mínimos anuales asociados a probabilidades de excedencia de 50, 60, 70, 80, 90% y el caudal medio.

- De las curvas de duración general absolutas se determinó el volumen existente bajo el límite del caudal medio, con el fin de evaluar su variabilidad en el tiempo.

- Asimismo se presentaron las curvas de duración general adimensionales de las diversas cuencas en estudio en función del caudal medio de la serie para definir las características y formas generales de las mismas para asociarlas con distintas clasificaciones. Además se obtuvieron los valores de área bajo la curva de duración general adimensional para distintos valores con el fin de calificar y definir la variabilidad en el tiempo de la capacidad de autorregulación de la cuenca.

- Se establecieron correlaciones directas entre el caudal medio y los caudales mínimos anuales para las cuencas en estudio, definiendo de esta manera su alta dependencia; además se incluye un análisis regional y nacional en valores promedios que precisan de forma indicativa los comportamientos de los caudales mínimos en función del caudal medio.

- Con los registros mensuales de precipitación, temperatura y caudal se realizó el análisis para períodos consecutivos de valores mínimos en el caso de las precipitaciones y caudales, y de valores máximos para temperatura. El análisis se realiza para 1, 2, 3, 4, 5 y 6 meses consecutivos asociando de manera referencial con las probabilidades de excedencia de 90, 80, 75, 70, 60 y 50% respectivamente.

- Se realizó un análisis de tendencia cronológica de las siguientes variables:
 - Caudales mínimos anuales 50, 60, 70, 80, 90% y caudal medio.
 - Caudales mínimos consecutivos de 1, 2, 3, 4, 5, y 6 meses;
 - Precipitaciones mínimas de 1, 2, 3, 4, 5, y 6 meses;
 - Temperaturas máximas consecutivas de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 meses; y,
 - Áreas bajo la curva de duración general adimensional.

Los parámetros que definen y caracterizan las tendencias de estas variables son: pendiente de la recta ajustada (m_i) y los factores f_i que muestran la tasa porcentual de decrecimiento lineal en función de la media aritmética de las series.

- Finalmente se aplicó una distribución teórica de probabilidades a las series de caudales mínimos consecutivos de 1,3 y 6 meses, asociándolos a periodos de retorno entre 5 y 100 años.

5.2. CARACTERIZACIÓN DE CAUDALES MEDIOS Y MÍNIMOS

5.2.1. CURVAS DE MASAS REDISUALES

Las curvas de masas residuales son gráficas que permiten definir la variabilidad hidrológica, y por tanto identificar períodos húmedos o secos en las series, estas curvas fueron obtenidas con valores medios anuales de caudales (VILLACÍS & ANDRADE, 1985).

5.2.2. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE MASAS RESIDUALES

Se aplicó el siguiente procedimiento para generar las curvas de masas residuales:

- Se conformó una base de registros medios anuales;
- Se generó una variable (Y) determinada por la sumatoria de las desviaciones o diferencias que presentan los registros hidrometeorológicos en relación a la media aritmética de la serie (residuos o anomalías), con lo cual se definen las tendencias positivas (incremento) y negativas (decremento); la representación matemática de la variable (Y) se muestra en la ecuación 5.1

$$Y = \sum_{i=1}^k \left(\frac{X_i}{\bar{X}} - 1 \right) \quad (Ec. 5.1)$$

Donde:

X_i : caudal medio anual (m^3/s);

\bar{X} : media aritmética de la serie de registros de caudal (m^3/s);

Cv : coeficiente de variación de la serie $Cv = \frac{S}{\bar{X}}$;

S : desviación estándar de la serie (m^3/s); y,

k : posición del vector caudal

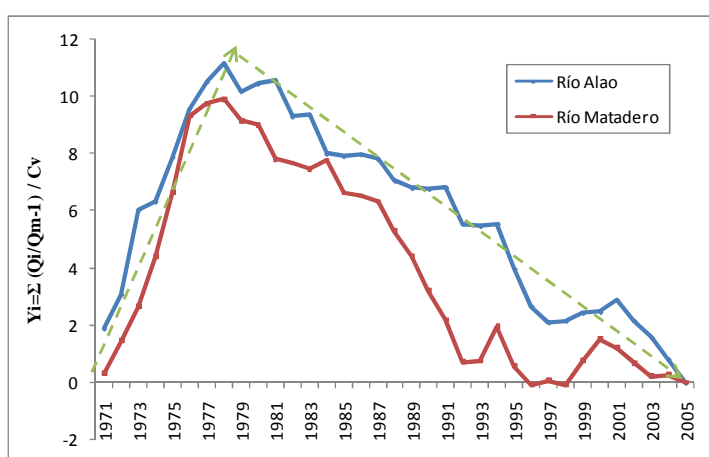
Se define como período húmedo (H) al intervalo de tiempo en el cual los caudales medios anuales son superiores a la media aritmética de la serie. Por tanto, la

sumatoria de sus residuos definen una tendencia creciente; en tanto que un período seco (S) comprende un intervalo de tiempo en el que los caudales son menores al promedio de la serie, determinando así una tendencia de disminución en la sumatoria de sus residuos.

5.2.3. CURVAS DE MASAS RESIDUALES DE CAUDALES ANUALES DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN ESTUDIO

Las cuencas de la región sierra y oriente muestran dos períodos marcados de variabilidad, un período húmedo (H) comprendido entre 1971 y 1978, en tanto que el período seco (S) se presenta entre los años 1979-2005, por tanto refleja cierta severidad de las sequías y estiajes en los últimos años (Figuras 5.1 y 5.2). El período seco tiene una duración de 27 años de manera generalizada, ya que existen períodos húmedos cortos (1998-2000) que sin embargo no afectan a la tendencia general de decrecimiento.

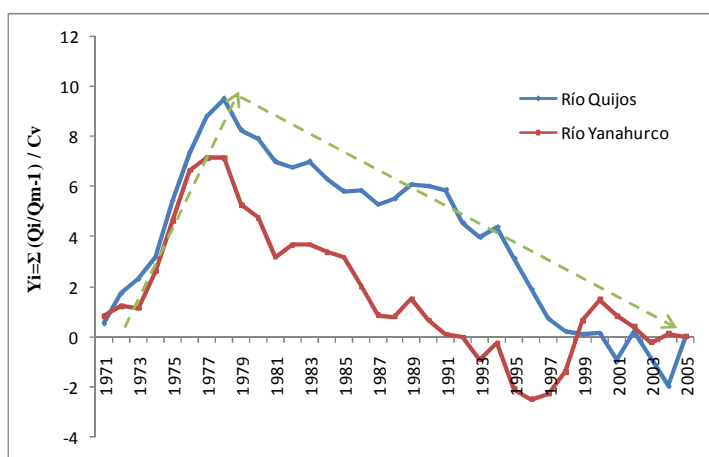
Figura 5.1. Curva de masas residuales cuencas de la región sierra



ELABORACIÓN: Luis Ríos

La variación anual de los caudales en las cuencas de drenaje del oriente muestra la existencia de un período largo de 27 años donde los caudales están por debajo de la media aritmética de la serie por lo tanto muestran una tendencia decreciente acumulada. El período húmedo (H) es relativamente corto en relación al período complementario pese que a partir del año 2002 se puede apreciar ligeros incrementos en el caudal.

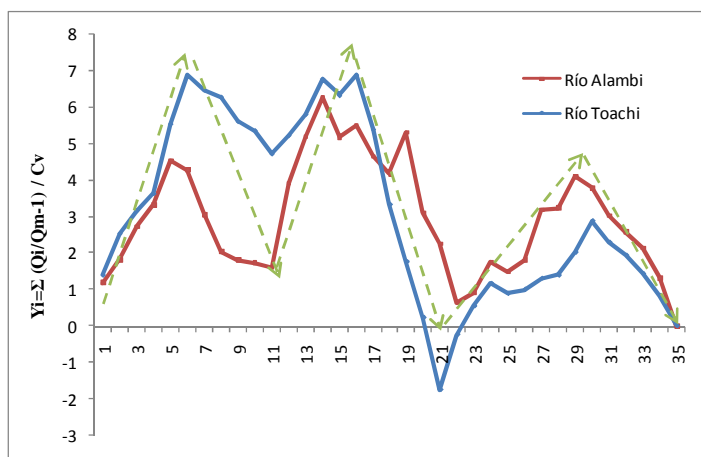
Figura 5.2. Curva de masas residuales cuencas de la región oriental



ELABORACIÓN: Luis Ríos

La variabilidad de los caudales medios anuales de las cuencas de la región litoral dadas por la curva de masas residuales de la Figura 5.3, denota la presencia de 6 períodos hidrológicos húmedos (3) y secos (3) con una duración promedio de 21 años por ciclo hidrológico (2 períodos húmedos y 2 secos)

Figura 5.3. Curva de masas residuales cuencas de la región litoral



ELABORACIÓN: Luis Ríos

El análisis a nivel nacional permite apreciar que la variación anual de los caudales es semejante al asociar las cuencas hidrográficas por su vertiente de drenaje, por ejemplo en las cuencas de la vertiente occidental o del Pacífico (ríos Alambi y Toachi) los períodos húmedos y secos tienen una igual ocurrencia en el tiempo aunque difieran en su magnitud; asimismo las cuencas del drenaje oriental asocian tendencias de semejantes duraciones y formas de la curva.

Estos antecedentes permitirían afirmar que la variabilidad climática y por ende hidrológica tiene un amplio rango de afectación tanto espacial como temporal, de forma tal que los fenómenos hidrometeorológicos no se convertirían en sucesos aislados (sequías, crecidas) para determinados lugares sino que se puede generalizar a mayores escalas como a nivel nacional e incluso regional.

5.2.4. CURVAS DE DURACIÓN GENERAL DE CAUDALES MENSUALES Y DIARIOS

La curva de duración general de caudales (CDG) fue obtenida para cada una de las cuencas hidrográficas seleccionadas para cada año del período (1971-2005). Para sistematizar la obtención de las curvas de duración general de caudales se creó un software que comprende hojas electrónicas y líneas de programación en lenguaje Visual Basic denominado CDG 1.07 (Ver Anexo 3).

El análisis de frecuencias para la obtención de la curva de duración general de caudales ordenados de manera descendente en un vector de m elementos está dado por la siguiente expresión:

$$P(i) = \frac{i}{m} * 100 \quad (\text{Ec. 5.2.})$$

Donde:

$P(i)$: vector probabilidad (%);

i : posición del vector;

m : número total de elementos del vector.

En la Tabla 5.1 se presentan los caudales mínimos para las seis cuencas en estudio del período (1971-2005) en base a datos diarios. En tanto que la Tabla 5.2 muestra los caudales mínimos obtenidos de datos mensuales; estos caudales se generan a partir de las correspondientes curvas de duración general anuales para todo el período considerado.

Tabla 5.1. Caudales mínimos absolutos y específicos (caudales medios diarios)

CUENCA HIDROGRÁFICA	Caudal 90%		Caudal 80%		Caudal 70%		Caudal 60%		Caudal 50%		Caudal Medio	
	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²
Río Alambi en Churupamba	4.70	10.63	5.70	12.90	6.80	15.38	8.40	19.00	11.30	25.57	16.14	36.52
Río Toachi A.J. Pilatón	16.06	10.52	19.19	12.57	22.63	14.83	25.94	16.99	31.04	20.34	47.26	30.96
Río Alao en Hacienda Alao	2.42	22.41	3.08	28.52	3.68	34.07	4.40	40.74	5.20	48.15	7.81	72.31
Río Matadero en Sayausí	1.62	5.33	2.66	8.75	3.64	11.97	4.55	14.97	5.54	18.22	6.95	22.86
Río Quijos en Baeza	19.81	21.24	25.12	26.94	29.32	31.44	33.76	36.20	38.50	41.29	44.21	47.41
Río Yanahurco D.J. Valle	0.70	8.94	0.90	11.49	1.20	15.33	1.40	17.88	1.60	20.43	2.07	26.44

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Tabla 5.2. Caudales mínimos absolutos y específicos cuencas en estudio (caudales medios mensuales)

CUENCA HIDROGRAFICA	Caudal 90%		Caudal 80%		Caudal 70%		Caudal 60%		Caudal 50%		Caudal Medio	
	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²
Río Alambi en Churupamba	5.29	11.97	7.19	16.27	9.28	21.00	11.92	26.97	15.03	34.00	17.35	39.25
Río Toachi A.J. Pilatón	15.93	10.44	19.02	12.46	22.14	14.50	25.05	16.41	30.71	20.12	46.14	30.23
Río Alao en Hacienda Alao	3.51	32.50	4.37	40.46	5.00	46.30	5.80	53.70	6.80	62.96	7.95	73.61
Río Matadero en Sayausí	2.37	7.80	3.38	11.12	4.74	15.59	5.72	18.82	6.63	21.81	6.98	22.96
Río Quijos en Baeza	23.92	25.65	30.69	32.91	34.54	37.04	38.78	41.59	42.59	45.67	44.21	47.41
Río Yanahurco D.J. Valle	0.80	10.22	1.06	13.54	1.33	16.99	1.58	20.18	1.82	23.24	2.07	26.44

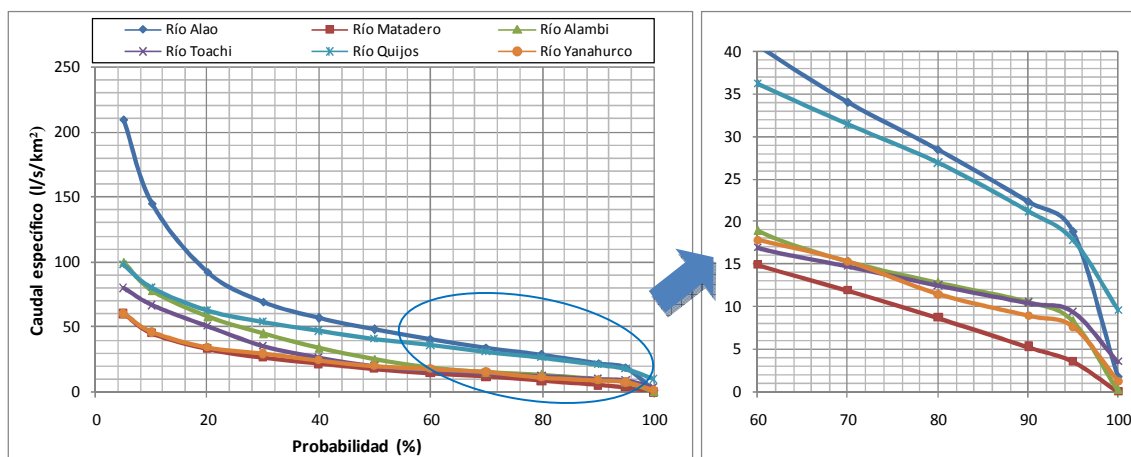
ELABORACIÓN: Luis Ríos

Las curvas de duración general de caudales específicos muestran los rendimientos de las cuencas hidrográficas y su forma expresa el estado de conservación de la cuenca. Es así que las cuencas de los ríos Alao y Quijos muestran los mayores caudales específicos en tanto que la cuenca del río Matadero y del río Yanahurco se presentan en las curvas inferiores.

En el período 1971-2005 los mayores caudales mínimos específicos se presentan en la cuenca del río Alao (22.41 l/s/km^2 para Q_{90}), en tanto que la cuenca con menor caudal por km^2 es la cuenca del río Matadero ubicada en la región sierra (5.33 l/s/km^2 para Q_{90}); las cuencas de la región costa presentan un caudal específico semejante entre sí que bordea los 10.5 l/s/km^2 .

Las cuencas del oriente ecuatoriano poseen grandes diferencias en su caudal específico pese a pertenecer a un mismo sistema hidrográfico (río Napo), situación que puede justificarse por la ubicación geográfica de las cuencas y por la creciente pluviosidad en dirección este; el río Quijos posee un caudal específico de 21.24 l/s/km^2 y el río Yanahurco 8.94 l/s/km^2 lo que permitiría aseverar que en la cuenca alta de este sistema hidrográfico se produce el 42% del caudal específico.

Figura 5.4. Curvas de duración general en caudales específicos



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Los caudales asociados a los rangos superiores de probabilidad denotan un quiebre discontinuo y no uniforme en la forma de las curvas que presumiblemente obedecen a errores de medición, al deficiente trazado de las curvas de descarga de las secciones o al exceso de derivaciones para diferentes usos del agua. Comparando los valores de caudales 90% obtenidos por datos diarios y mensuales, se establece que las estaciones de las tres regiones continentales de nuestro país cumplen las siguientes condiciones:

- Región litoral: —
- Región interandina: —
- Región amazónica: —

Donde:

Q_d : caudal diario asociado a una probabilidad de excedencia 90%; y

Q_m : caudal medio mensual asociado a una probabilidad de excedencia 90%.

Las condiciones anteriores permiten asumir un porcentaje de ajuste entre las curvas de duración general de caudales entre valores mensuales y diarios.

5.2.5. CURVAS ADIMENSIONALES DE DURACIÓN GENERAL

Se generan las curvas de duración general adimensionales respecto al caudal medio de las series anuales; la forma matemática de traspaso de los caudales absolutos a adimensionales se muestra en la ecuación 5.3;

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{medio}} \quad (Ec. 5.3)$$

Donde:

q_i : caudal adimensional;

Q_i : caudal absoluto (m^3/s); y,

Q_{medio} : caudal medio anual (m^3/s).

Los caudales traspasados conservan la misma probabilidad de ocurrencia de los caudales absolutos (Ecuación 5.2); pudiendo conformar de esta manera curvas que

contienen en el eje y valores caracterizados por las fracciones y múltiplos del caudal medio así por ejemplo:

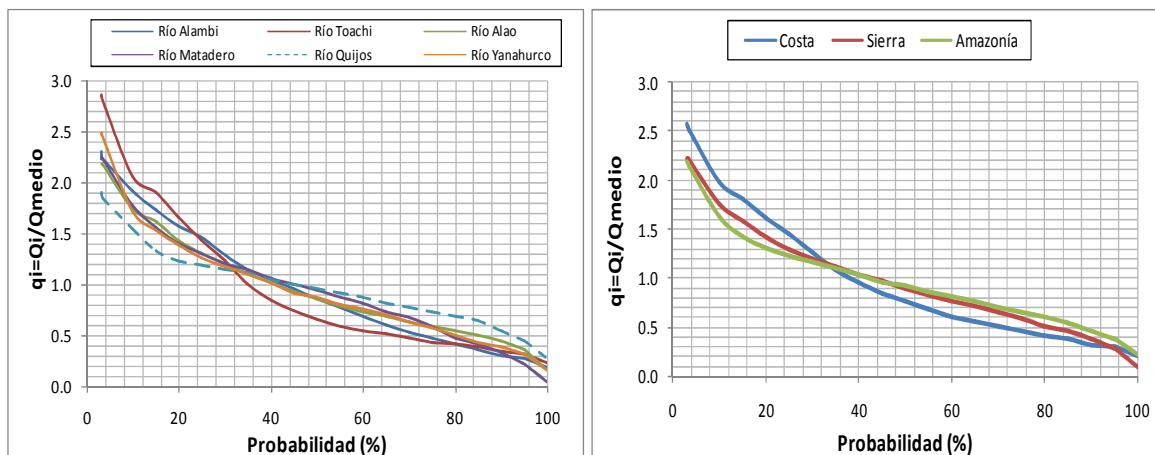
- $q_i=0.5$; refiere un caudal absoluto igual a la mitad del caudal medio;
- $q_i=1$; refiere un caudal absoluto igual al caudal medio;
- $q_i=2$; refiere un caudal absoluto igual a dos veces el caudal medio.

En la Figura 5.5 se presenta las curvas de duración general adimensionales para las seis diferentes cuencas en estudio, además se incluyen curvas regionales que permiten evaluar la capacidad de autorregulación y almacenamiento de las propias cuencas.

Las cuencas de los ríos de la Amazonía presentan valores superiores de caudales adimensionales para probabilidades superiores, lo que refiere una mayor capacidad de autorregulación de la cuenca, en tanto que las cuencas de la costa tienen los valores más bajos de este parámetro. La simultaneidad que muestran las curvas en el rango de probabilidades bajas se justifica por la magnitud y características propias de las crecidas que se generan en las cuencas.

Las curvas adimensionales de las cuencas de la vertiente oriental (ríos Alao, Matadero, Quijos y Yanahurco) tienen una forma semejante y casi proporcional en el rango de caudales mínimos.

Figura 5.5. Curvas adimensionales de duración general de las cuencas.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

5.2.6. RELACIONES ANUALES ENTRE EL CAUDAL MEDIO Y LOS CAUDALES MÍNIMOS

Debido a que la información hidrométrica tiene varios períodos de ausencia de registros, se plantean y se determinan correlaciones entre el caudal medio y los caudales con probabilidad de excedencia 50, 70, 80 y 90%, localizados estadísticamente en el segundo y tercer cuartil del vector de probabilidades.

Estas correlaciones son de tipo lineal con coeficientes (r) en su mayoría superiores a 0.70, y tienen las siguientes utilidades:

- Extender y rellenar la base de datos; y,
- Establecer, cuantificar y generalizar relaciones entre los caudales mínimos en función del caudal medio en cuencas de drenaje análogas.

La ecuación de ajuste es del tipo:

$$Q_p = A Q_{medio} + B \quad (Ec. 5.4)$$

Donde:

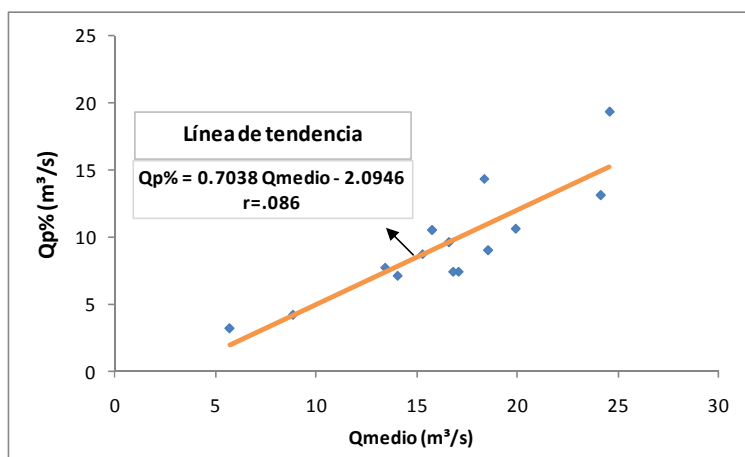
Q_p : caudal mínimo con probabilidad asociada (m^3/s); y

Q_{medio} : caudal medio (m^3/s); y,

A,B: coeficientes de ajuste lineal

La Figura 5.6 presenta la forma gráfica del ajuste lineal de los caudales mínimos con el caudal medio.

Figura 5.6. Correlación caudal medio vs caudal mínimo



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Las relaciones puntuales de caudales mínimos en función del caudal medio que se establecen para las distintas cuencas en estudio se aprecian en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Coeficiente de ajuste lineal caudales medios vs caudales mínimos

Caudal	Río Alambi en Churupamba			Río Toachi A.J. Pilatón			Río Alao en Hacienda Alao		
	A	B	r	A	B	r	A	B	r
Q90%	0.298	0.286	0.87	0.186	8.930	0.74	0.174	1.231	0.61
Q80%	0.345	0.494	0.89	0.232	9.037	0.78	0.283	1.050	0.75
Q70%	0.458	-0.066	0.91	0.293	9.167	0.81	0.366	1.035	0.78
Q60%	0.704	-2.095	0.87	0.410	7.918	0.85	0.475	0.919	0.84
Caudal	Río Matadero en Sayausí			Río Quijos en Baeza			Río Yanahurco D.J. Valle		
	A	B	r	A	B	r	A	B	r
Q90%	0.489	-1.246	0.81	0.536	-2.753	0.73	0.370	0.042	0.72
Q80%	0.600	-1.068	0.88	0.693	-5.368	0.79	0.431	0.116	0.74
Q70%	0.718	-1.067	0.93	0.840	-7.596	0.85	0.513	0.183	0.80
Q60%	0.848	-1.098	0.96	0.861	-4.116	0.89	0.594	0.193	0.80

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Estas ecuaciones de correlación lineal fueron utilizadas en el relleno de las series de caudales mínimos de las cuencas de los ríos: Alambi, Toachi y Quijos los cuales poseen coeficiente r que justifican la bondad del ajuste. En las cuencas hidrográficas restantes las relaciones caudal medio vs. Caudal mínimo fueron establecidas con la serie de registros completa es decir 35 años, observándose tendencias claras de dependencia del caudal medio.

5.2.7. RELACIONES MULTIANUALES ENTRE EL CAUDAL MEDIO Y LOS CAUDALES MÍNIMOS

Con el sustento de las relaciones establecidas en el numeral 5.5, se generó coeficientes k_j que refieren la proporción de los caudales mínimos en VALORES PROMEDIOS MULTIANUALES, cuya matriz se conforma de la siguiente manera:

Tabla 5.4. Matriz de caudales medios y mínimos

AÑO (i)	CAUDALES ANUALES (j)					
	90%	80%	70%	60%	50%	Q_m
1	$Q_{1,90}$	$Q_{1,80}$	$Q_{1,70}$	$Q_{1,60}$	$Q_{1,50}$	$Q_{1,m}$
2	$Q_{2,90}$	$Q_{2,80}$	$Q_{2,70}$	$Q_{2,60}$	$Q_{2,50}$	$Q_{2,m}$
...						
n	$Q_{n,90}$	$Q_{n,80}$	$Q_{n,70}$	$Q_{n,60}$	$Q_{n,50}$	$Q_{n,m}$
Media	$\overline{Q_{min,90}}$	$\overline{Q_{min,80}}$	$\overline{Q_{min,70}}$	$\overline{Q_{min,60}}$	$\overline{Q_{min,50}}$	$\overline{Q_m}$

ELABORACIÓN: Luis Ríos

El coeficiente k_j está expresado de la forma:

$$k_j = \frac{\overline{Q_{min,j}}}{\overline{Q_m}}$$

Donde:

k_j : coeficiente adimensional,

j : probabilidad de excedencia;

$\overline{Q_{min,j}}$: media aritmética de la serie de caudales mínimos (m^3/s); y,

$\overline{Q_m}$: media aritmética de la serie de caudales medios (m^3/s).

La Tabla 5.5 muestra los coeficientes k_j de las cuencas de estudio asociado a los caudales mínimos de ocurrencia. La cuenca del río Quijos en Baeza presenta los coeficientes k_j más altos, siendo estos mayores a 0.47 en k_{90} , refiriendo así la permanencia de caudales mínimos con valores superiores al 50% del caudal medio; en tanto que las cuencas de los ríos Alao, Matadero y Alambi tiene los coeficiente k_j menores asociando valores de caudales mínimos en el rango del 30 y 60% del caudal medio.

Tabla 5.5. Coeficiente k_j propios de las cuencas hidrográficas en estudio

CUENCA HIDROGRÁFICA	k_{90}	k_{80}	k_{70}	k_{60}
Río Alambi en Churupamba	0.32	0.37	0.45	0.58
Río Toachi A.J. Pilatón	0.38	0.43	0.49	0.58
Río Alao en Hacienda Alao	0.32	0.40	0.49	0.58
Río Matadero en Sayausí	0.31	0.45	0.56	0.69
Río Quijos en Baeza	0.47	0.57	0.67	0.77
Río Yanahurco D.J. Valle	0.39	0.49	0.60	0.69

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Los valores k_j analizados bajo un concepto regional y nacional adoptan valores medios referenciales para la obtención de caudales mínimos en función del caudal medio para cuencas análogas y geográficamente cercanas; estos valores regionales se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Coeficiente k_j regionales

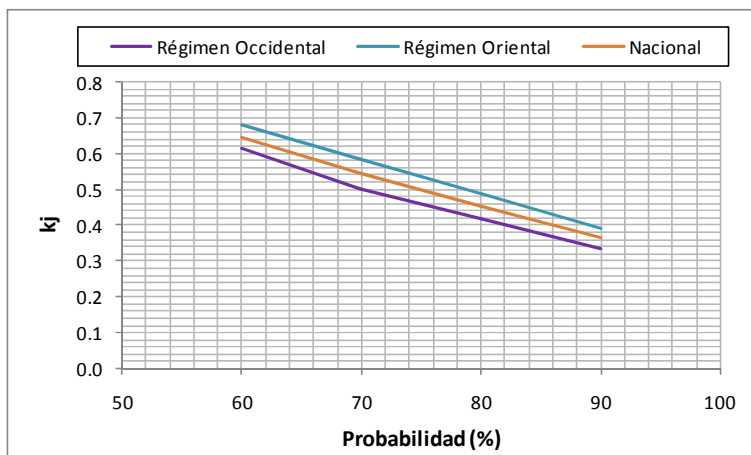
REGIÓN / ZONA / RÉGIMEN	k90	k80	k70	k60
Región Costa	0.35	0.40	0.47	0.58
Región Sierra	0.32	0.43	0.53	0.64
Región Amazonía	0.43	0.53	0.64	0.73
Régimen Occidental	0.34	0.42	0.50	0.62
Régimen Oriental	0.39	0.49	0.59	0.68
Nacional	0.37	0.45	0.54	0.65

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Las cuencas de drenaje pertenecientes a la amazonía presentan mayores valores de caudales mínimos en relación al caudal medio (43%) para el caudal 90%; en tanto que la región sierra pese a pertenecer al drenaje oriental refiere un 32% del caudal medio para la obtención del caudal firme, lo que permitiría afirmar que la pluviosidad en la zona baja oriental es un importante aporte a la esorrentía.

El análisis conjunto de las seis cuencas de drenaje permite obtener coeficientes k_j que fluctúan entre 0.37 y 0.65 para caudales 90 y 60%; donde se puede notar que los usos del agua pueden afectar las tendencias especialmente en las cuencas de la región Sierra. La Figura 5.7 muestra la variabilidad regional por vertientes oriental y occidental del coeficiente k_j en función de las probabilidades de los caudales medios y mínimos; estas gráficas son complementarias y referenciales para la obtención preliminar de caudales mínimos en cuencas hidrográficas que no posean información.

Figura 5.7. Tendencias de k_j para cuencas con régimen occidental y oriental



ELABORACIÓN: Luis Ríos

5.3. ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE CAUDALES MÍNIMOS DIARIOS

Los caudales mínimos son los que se asocian a probabilidades altas de ser igualados o de excedencia en una curva de duración general, siendo estos los más susceptibles a cambios por la severidad y presencia de períodos secos en el tiempo.

La base de datos de caudales medios diarios con probabilidad de excedencia asociada fue obtenida con las curvas de duración general anuales, donde se conformó arreglos con la siguiente información (Anexo 4):

Tabla 5.7. Arreglo de caudales mínimos diarios

AÑO	CAUDALES MÍNIMOS (m ³ /s)					
	90%	80%	70%	60%	50%	Q _m
1	Q _{1,90}	Q _{1,80}	Q _{1,70}	Q _{1,60}	Q _{1,50}	Q _{1,m}
2	Q _{2,90}	Q _{2,80}	Q _{2,70}	Q _{2,60}	Q _{2,50}	Q _{2,m}
...
n	Q _{n,90}	Q _{n,80}	Q _{n,70}	Q _{n,60}	Q _{n,50}	Q _{n,m}

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Se muestra a continuación un ejemplo numérico de la obtención y conformación de la serie de caudales mínimos anuales con la ayuda de la curva de duración general para la cuenca del río Matadero en Sayausí, para la serie de caudales con 70% de probabilidad de excedencia (Q70).

Tabla 5.8. Caudales anuales 70% (Q70) río Matadero en Sayausí

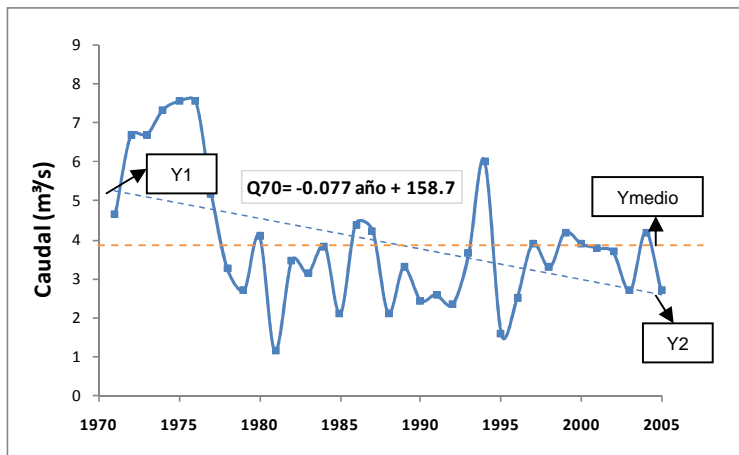
AÑO	Q70 (m ³ /s)	AÑO	Q70 (m ³ /s)	AÑO	Q70 (m ³ /s)
1971	4.66	1983	3.15	1995	1.60
1972	6.69	1984	3.85	1996	2.50
1973	6.69	1985	2.12	1997	3.90
1974	7.34	1986	4.40	1998	3.30
1975	7.56	1987	4.23	1999	4.20
1976	7.56	1988	2.13	2000	3.90
1977	5.19	1989	3.30	2001	3.80
1978	3.29	1990	2.45	2002	3.70
1979	2.71	1991	2.60	2003	2.70
1980	4.10	1992	2.38	2004	4.20
1981	1.16	1993	3.66	2005	2.70
1982	3.49	1994	6.03	MEDIA	3.92

ELABORACIÓN: Luis Ríos

La Figura 5.8 ilustra la variabilidad cronológica típica de los caudales mínimos, los cuales tienen una variación decreciente sin excepción alguna, siendo el parámetro

referencial la pendiente (m_j) negativa de la recta que se ajusta a la dispersión de datos.

Figura 5.8. Variación de caudales 70% río Matadero en Sayausí



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Una línea de tendencia representa el comportamiento interanual de la variable en un largo periodo de tiempo.

La cuantificación del decrecimiento porcentual dada por la línea de tendencia (Ver Figura 5.8), en función de la media aritmética de la serie de caudales mínimos está dada por la siguiente ecuación:

Donde:

- f_j : factor indicativo del decrecimiento porcentual;
- j : subíndice indicativo de la probabilidad asociada a los caudales mínimos;
- Y_1 : ordenada de la recta ajustada a la dispersión de datos en el año 1971;
- Y_2 : ordenada de la recta ajustada a la dispersión de datos en el año 2005; y;
- Y_{medio} : media aritmética de la serie de datos.

En la Tabla 5.9 se presentan los indicadores (f_j) de decrecimiento de los caudales mínimos medios diarios de las seis estaciones hidrométricas en estudio, en donde:

- f_{90} : factor de decrecimiento porcentual del caudal 90%;
- f_{80} : factor de decrecimiento porcentual del caudal 80%;
- f_{70} : factor de decrecimiento porcentual del caudal 70%
- f_{60} : factor de decrecimiento porcentual del caudal 60%
- f_{50} : factor de decrecimiento porcentual del caudal 50%
- f_m : factor de decrecimiento porcentual del caudal medio

Tabla 5.9. Indicadores f_j de caudales mínimos medios diarios

CUENCA HIDROGRÁFICA	f_{90}	f_{80}	f_{70}	f_{60}	f_{50}	f_m
Río Alambi en Churupamba	4.5	21.2	16.7	20.0	17.5	20.2
Río Toachi A.J. Pilatón	21.0	26.8	30.3	30.0	35.2	39.7
Río Alao en Hacienda Alao	13.6	22.9	32.6	38.9	42.5	41.0
Río Matadero en Sayausí	62.3	83.9	66.7	59.4	50.0	39.3
Río Quijos en Baeza	33.0	25.7	26.0	22.9	21.5	16.9
Río Yanahurco D.J. Valle	61.3	42.0	26.7	23.6	12.0	14.3

ELABORACIÓN: Luis Ríos

El índice de decrecimiento f_j con mayor grado de severidad ocurre en la cuenca del río Matadero en los caudales 80%, en tanto que el río Alambi presenta el menor decrecimiento en los caudales 90%.

Las cuencas de la amazonía ecuatoriana poseen la particularidad que los caudales con mayor probabilidad de excedencia tienen una alta tasa de decrecimiento respecto a la media aritmética, observándose una disminución de estos indicadores con caudales de menor probabilidad.

5.4. ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE CAUDALES, PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MENSUALES CONSECUTIVAS

Se muestra las tendencias que reflejan la presencia de eventos extremos en base a registros consecutivos de caudales, precipitaciones y temperaturas medias mensuales, mediante un análisis de distribución de frecuencias de las series acumuladas desde un mes hasta 6 meses para cada año.

La matriz de registros mensuales se la conforma de acuerdo al arreglo que se presenta en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Matriz mensual $X_{i,j}$ de variables climáticas e hidrológicas

AÑO (i)	MESES (j)				
	1	2	3	...	12
1	$X_{1,1}$	$X_{1,2}$	$X_{1,3}$	...	$X_{1,12}$
2	$X_{2,1}$	$X_{2,2}$	$X_{2,3}$	...	$X_{2,12}$
...					
n	$X_{n,1}$	$X_{n,2}$	$X_{n,3}$	...	$X_{n,12}$

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Se muestra a continuación el algoritmo de obtención de valores de precipitación mínimos para el año $i=1$ para un mes consecutivo $Z_{1,1}$.

$$Z_{1,1} = \text{mín}(X_{1,1}, X_{1,2}, X_{1,3}, X_{1,4}, \dots, X_{1,12})$$

Donde:

i: año del registro;

j: mes del registro; y,

$X_{i,j}$: registro meteorológico perteneciente al año i , mes j .

El proceso es análogo para el resto de meses consecutivos, tal como se muestra en el Capítulo 2. Para la determinación de los valores máximos consecutivos de

temperatura, no se aplica la suma de los valores mensuales sino las medias aritméticas y se obtiene como resultado la siguiente matriz de $n \times 6$ elementos.

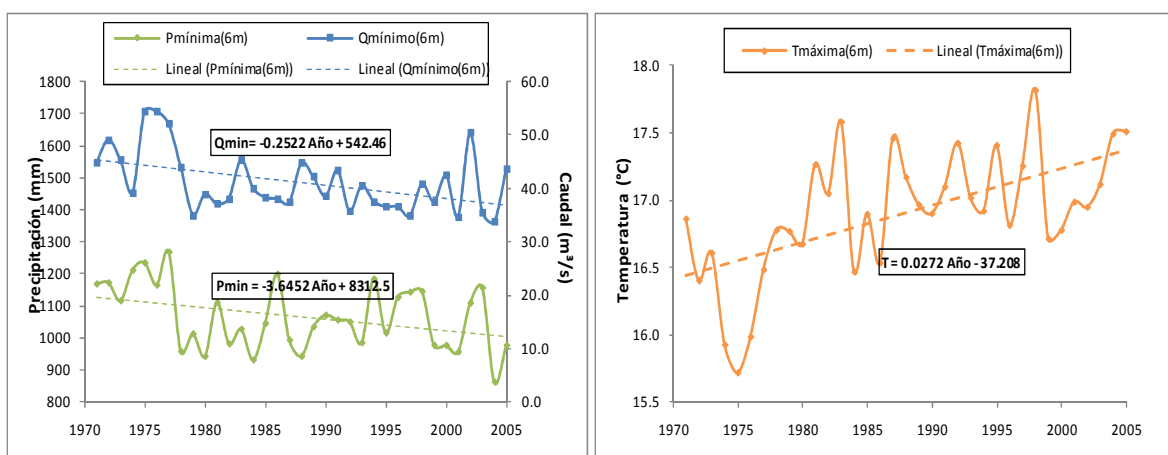
Tabla 5.11. Matriz i, k de valores máximos/mínimos consecutivos.

AÑO (i)	MESES CONSECUTIVOS (k)					
	1	2	3	4	5	6
1	$Z_{1,1}$	$Z_{1,2}$	$Z_{1,3}$	$Z_{1,4}$	$Z_{1,5}$	$Z_{1,6}$
2	$Z_{2,1}$	$Z_{2,2}$	$Z_{2,3}$	$Z_{2,4}$	$Z_{2,5}$	$Z_{2,6}$
...						
n	$Z_{n,1}$	$Z_{n,2}$	$Z_{n,3}$	$Z_{n,4}$	$Z_{n,5}$	$Z_{n,6}$

ELABORACIÓN: Luis Ríos

En la Figura 5.9, se muestra la variación cronológica y se contrasta de manera cualitativa los caudales y precipitaciones mínimas de las cuencas en estudio; y bajo la premisa de un incremento de la temperatura ambiente se analiza las temperaturas máximas acumuladas.

Figura 5.9. Variación de caudales, precipitaciones mínimas y temperaturas máximas.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Las Figuras que muestran la variación del caudal, precipitación y temperatura están dispuestas de la siguiente manera:

- Eje de las abscisas, años del período de análisis 1971-2005;
- Eje de ordenadas primario, precipitaciones mínimas consecutivas, temperaturas máximas;
- Eje de ordenadas secundario, caudales mínimos consecutivos;
- Tendencia de ajuste por mínimos cuadrados que responde a la ecuación:

$$X = m \text{ Año} + q \quad (\text{Ec. 5.7})$$

Donde:

X: caudal o precipitación mínima y/o temperatura máxima;

m: pendiente de la recta; y,

q: coeficiente de la ecuación lineal

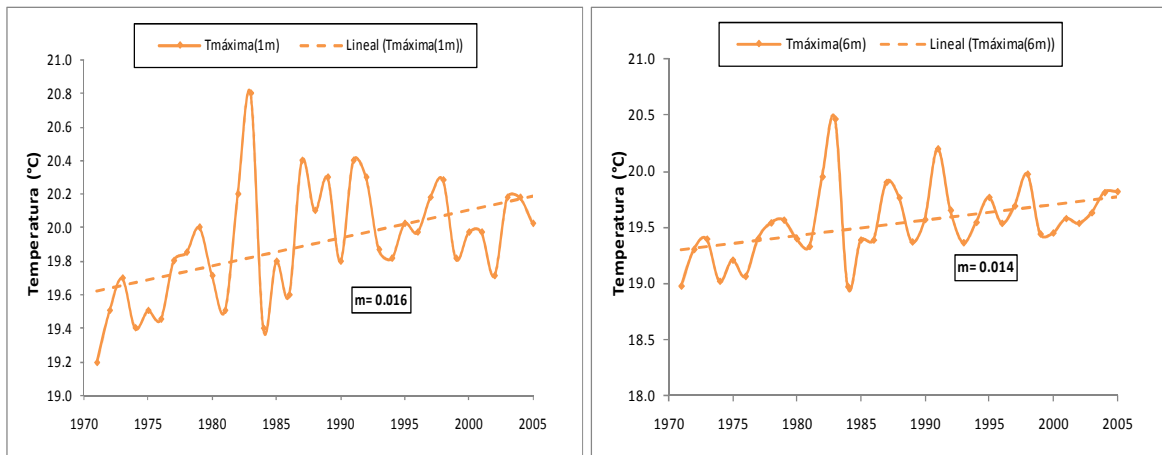
En las gráficas que se muestran a continuación de la variación de caudal, precipitación y temperatura de las cuenca en estudio solo consta el coeficiente m (pendiente de la recta) y su signo que denota el crecimiento (+) o decrecimiento (-) de los valores de las series; ya que la ecuación lineal ajustada por mínimos cuadrados no es útil para generar indicadores por los bajos coeficientes de correlación (r).

Se muestra la variabilidad de los caudales mínimos (color azul), precipitaciones mínimas (color verde) y temperaturas máximas (color anaranjado) representativas de las cuencas hidrográficas en estudio; donde se nota en la mayoría de los casos la severidad en la disminución de los caudales y precipitaciones a través del tiempo. El mayor número de casos de análisis de precipitaciones mínimas, la pendiente (m) tiene una relación inversa a la probabilidad de excedencia, y por tanto se incrementa con la disminución de la probabilidad.

5.4.1. RÍO ALAMBI EN CHURUPAMBA

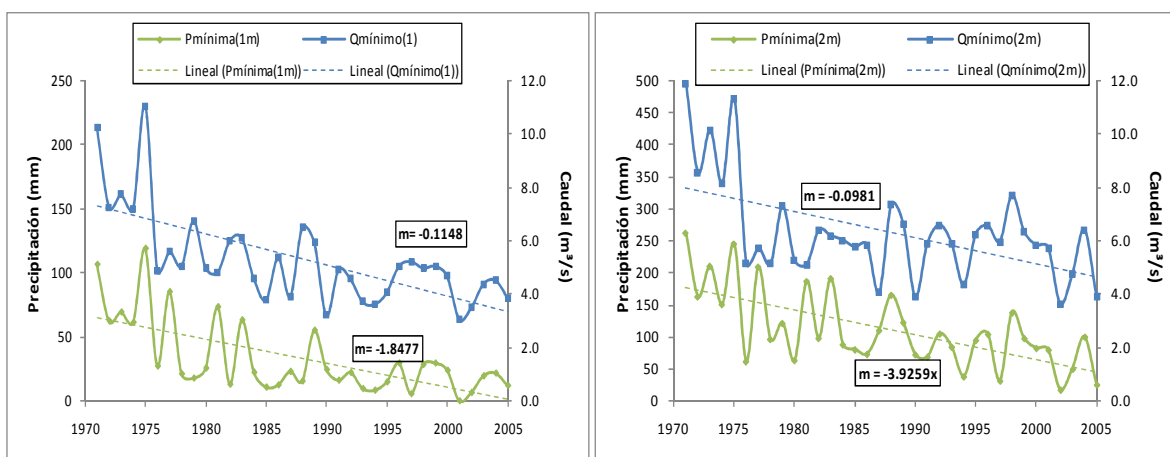
Se utilizan los registros pluviométricos de la estación Nanegalito para el análisis de precipitaciones mínimas consecutivas. Como se puede notar en las Figuras 5.11 y 5.12, la tendencia de caudales y precipitaciones es decreciente; los caudales mínimos mensuales varían entre 3.1 y 11.1 m³/s con una media aritmética de 5.3 m³/s. Las precipitaciones mínimas fluctúan en un rango de 0.3 y 19 mm. Tanto la variabilidad media, máxima y mínima tienen la misma tendencia de decrecimiento formando una banda de fluctuación de los caudales va desde 114 l/s (1 mes) hasta 70 l/s (6 meses) la disminución acentuada se produce a partir del año 1975 situación que se justifica por el incremento de los usos consuntivos en el río Alambi. En tanto que las precipitaciones mínimas van desde 1.8 mm (1 mes) hasta 9.47 mm (6 meses). En función del caudal medio, el porcentaje de disminución anual del caudal mínimo anual es de 75.8%.

Figura 5.10. Variación de las temperaturas mensuales máximas de la cuenca del río Alambi en Churupamba.



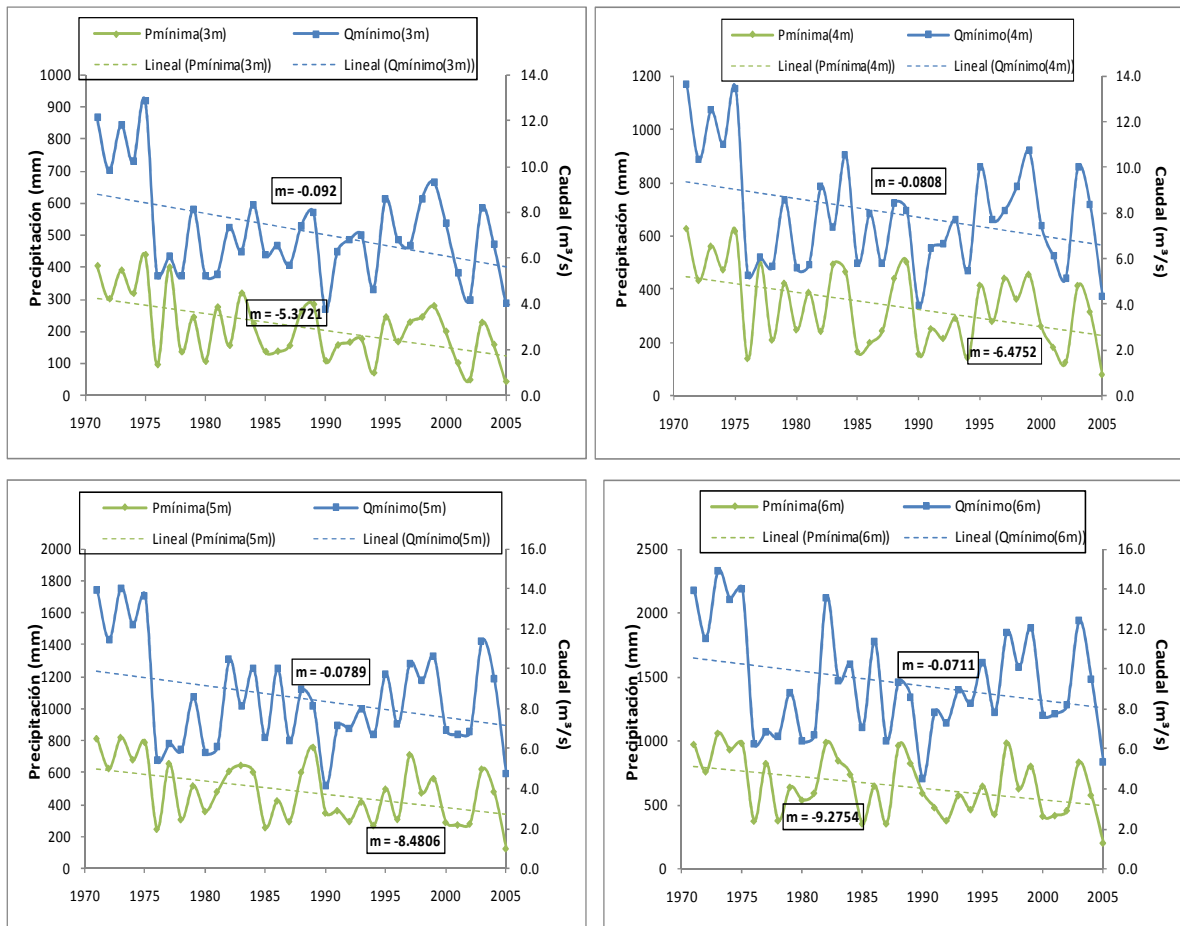
ELABORACIÓN: Luis Ríos

Figura 5.11. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 1 y 2 meses consecutivos de la cuenca del río Alambi en Churupamba.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Figura 5.12. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 3, 4, 5 y 6 meses consecutivos de la cuenca del río Alambi en Churupamba.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

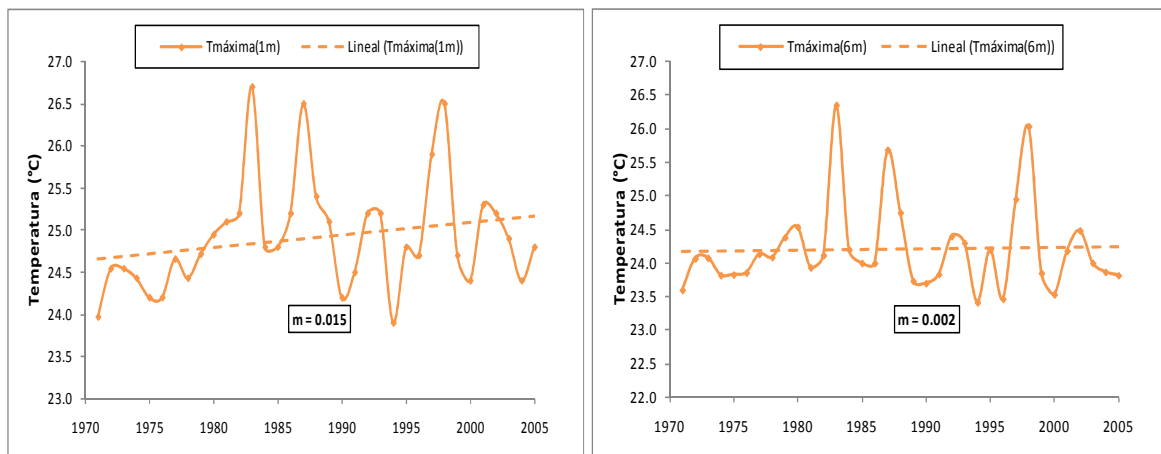
5.4.2. RÍO TOACHI A.J. PILATÓN

El río Toachi evidencia disminuciones importantes en sus caudales mensuales mínimos cercanas al 28%; los caudales mínimos asociados a un mes consecutivo fluctúan entre 10.7 – 26.8 m³/s con una media aritmética de 17.1 m³/s y un coeficiente de asimetría 0.75. Los índices de disminución anual de caudales varían

desde -137 l/s (1 mes) y -179 l/s (6 meses). La reducción de la precipitación fluctúa entre -0.7 mm (1 mes) y -9.3 mm (6 meses) (Figura 5.14).

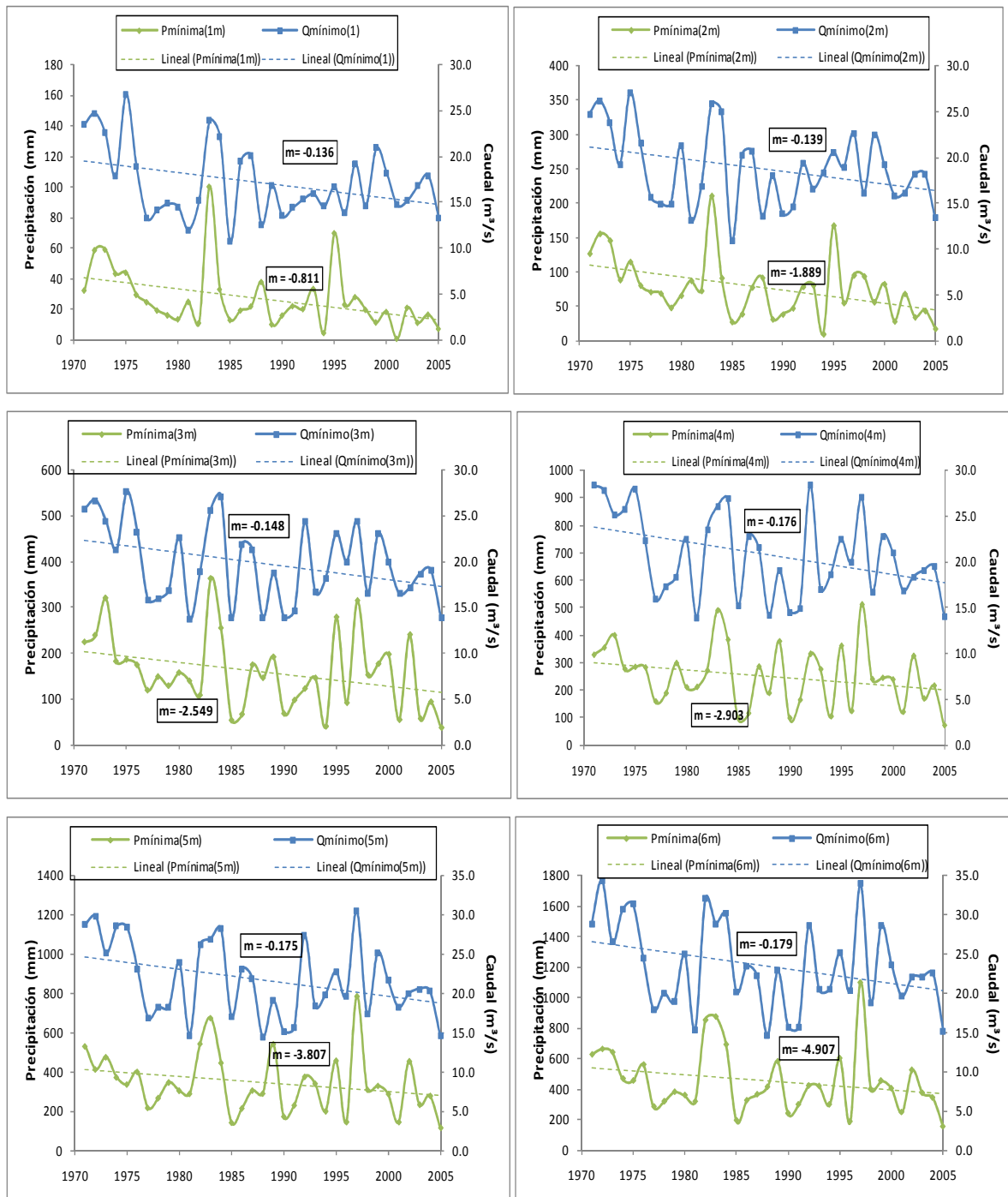
Las temperaturas máximas consecutivas evidencian un incremento cronológico que varían entre 2.1 y 0.3%, con una tendencia casi uniforme e invariable para las temperaturas con mayor número de meses consecutivos en análisis (Ver Figura 5.13).

Figura 5.13. Variación de las temperaturas mensuales máximas en la cuenca del río Toachi A.J. Pilatón.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Figura 5.14. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas en la cuenca del río Toachi A.J. Pilatón.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

5.4.3. RÍO ALAO EN HACIENDA ALAO

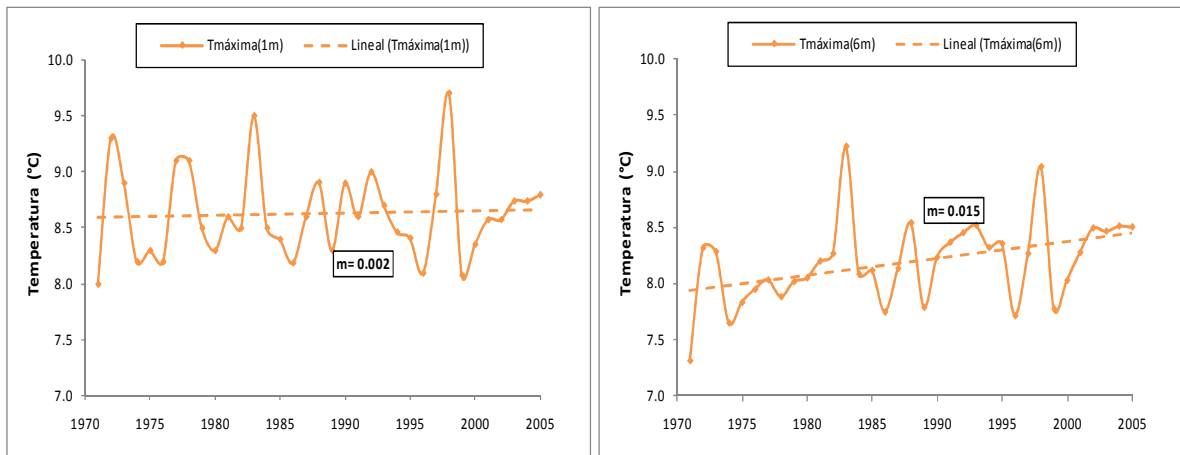
En la cuenca del río Alao el análisis de precipitaciones mínimas corresponde a la estación pluviométrica Alao que se encuentra ubicada en las cercanías a la estación hidrométrica. Las precipitaciones mensuales mínimas acumuladas de 1 mes fluctúan entre 4.2 y 68.8 mm, siendo su media aritmética 27.0 mm; en tanto que los caudales mínimos oscilan entre 1.2 y 5.0 m³/s con un valor promedio de 3.0 m³/s, que se registran en los años (1978-1979) y el coeficiente de variación fluctúa entre 0.21 y 0.29.

La pendiente de las rectas ajustadas a los caudales mínimos fluctúan entre -19.9 l/s (1 mes) hasta 86.1 l/s (6 meses); y las precipitaciones desde 0.12 mm (1 mes) hasta 7 mm (6 meses); valores que indican el decrecimiento anual. Nótese que en el último período de datos (2001-2005) existe una propensión de los caudales mínimos a decrecer (Figura 5.16 y 5.17)

El porcentaje indicativo de disminución anual del caudal mínimo de un mes en función de la media aritmética de la serie es del 24%.

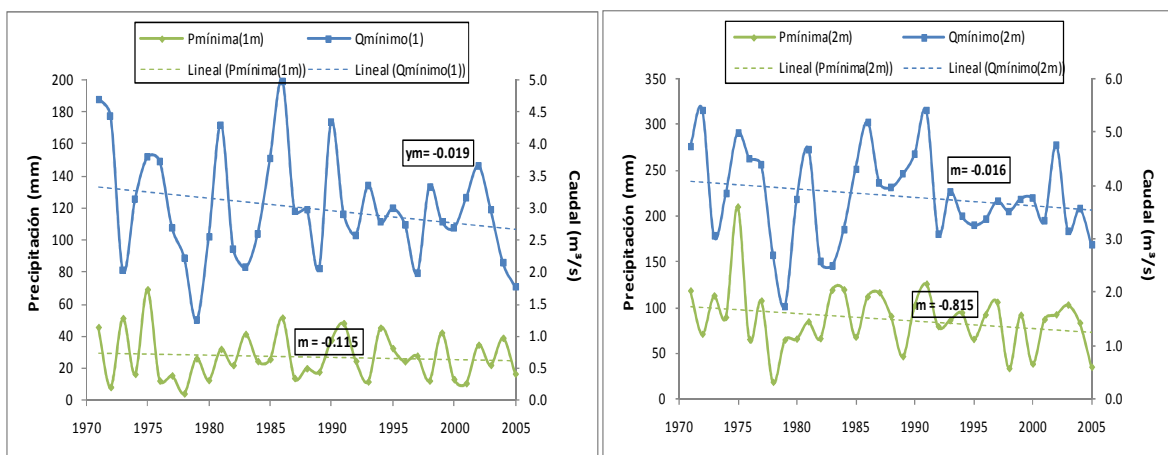
Las temperaturas máximas consecutivas soportan un incremento cronológico con tasas que varían entre 0.9% (1 mes) y 5.5% (6 meses) (Ver Figura 5.15).

Figura 5.15. Variación de las temperaturas mensuales máximas en la cuenca del río Alao en Hacienda Alao.



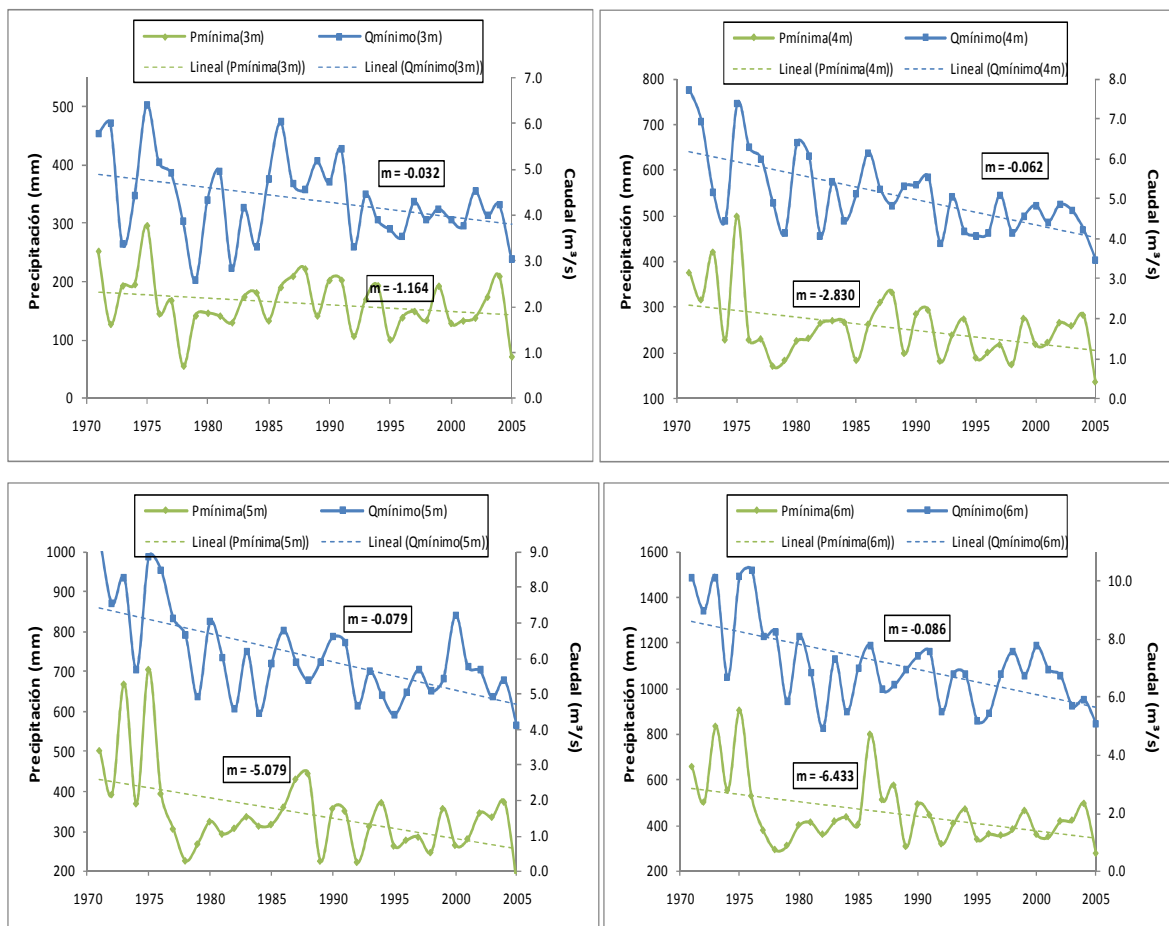
ELABORACIÓN: Luis Ríos

Figura 5.16. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 1 y 2 meses consecutivos de la cuenca del río Alao en Hacienda Alao.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Figura 5.17. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 3, 4, 5 y 6 meses consecutivos de la cuenca del río Alao en Hacienda Alao.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

5.4.4. RÍO MATADERO EN SAYAUSÍ

La decreciente variabilidad de los caudales mínimos del río Matadero es evidente tal como se muestra en la Figura 5.19 y 5.20; el caudal mínimo de 1 mes varía en el

rango 0.3 y 6.1 m³/s lo que muestra la variabilidad en el ciclo hidrológico para esta cuenca. El decrecimiento anual (pendiente) es de aproximadamente 90 l/s por año.

Las precipitaciones mínimas de 1 mes de la estación Piscícola Chirimachay fluctúan entre 17.7 y 78.6 mm con una media aritmética de 45.6 mm. Se analiza la variabilidad de la temperatura media de la estación El Labrado para estimar la lámina de evaporación, y justificar en parte el decrecimiento desmedido de la esorrentía en esta cuenca.

Se establecen tres períodos secuenciales para el análisis de la variación de la evaporación: 1971-1978 (período húmedo), 1979-1988 y 1989-2005 (períodos secos) en los cuales mediante la fórmula de Turc se determina la lámina de evaporación (he), obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 5.12. Análisis del incremento de evaporación en la cuenca del río Matadero.

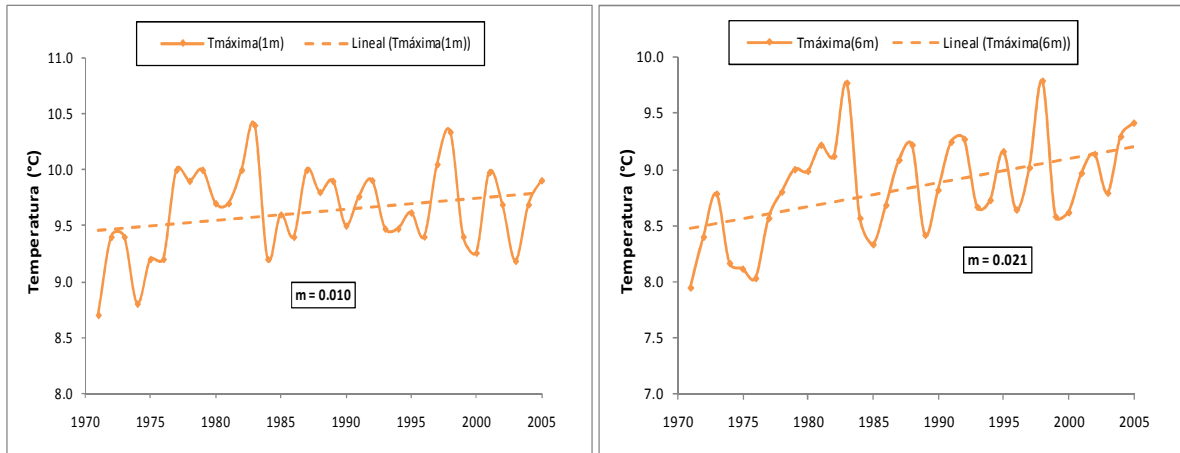
PERIODO	hp (mm)	he (mm)	he/hp (%)
1971-1978	1598.8	499	31
1979-1988	1283.5	487	38
1989-2005	1270.7	487	38

ELABORACIÓN: Luis Ríos

El porcentaje de pérdida de la precipitación se incrementa en el tiempo en el orden del 7%, justificándose en parte la disminución de caudales mínimos.

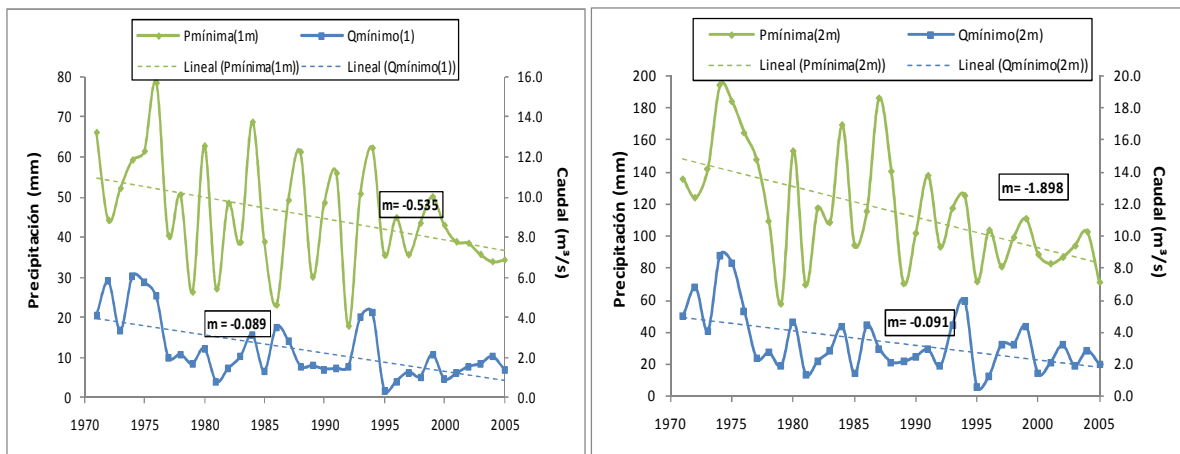
Por otro lado, la disminución cronológica de los caudales en la cuenca del río Matadero puede originarse en el incremento de usos consuntivos y no consuntivos tales como riego, abrevaderos, industrias, piscícolas (intervención humana).

Figura 5.18. Variación de las temperaturas mensuales máximas en la cuenca del río Matadero en Sayausí.



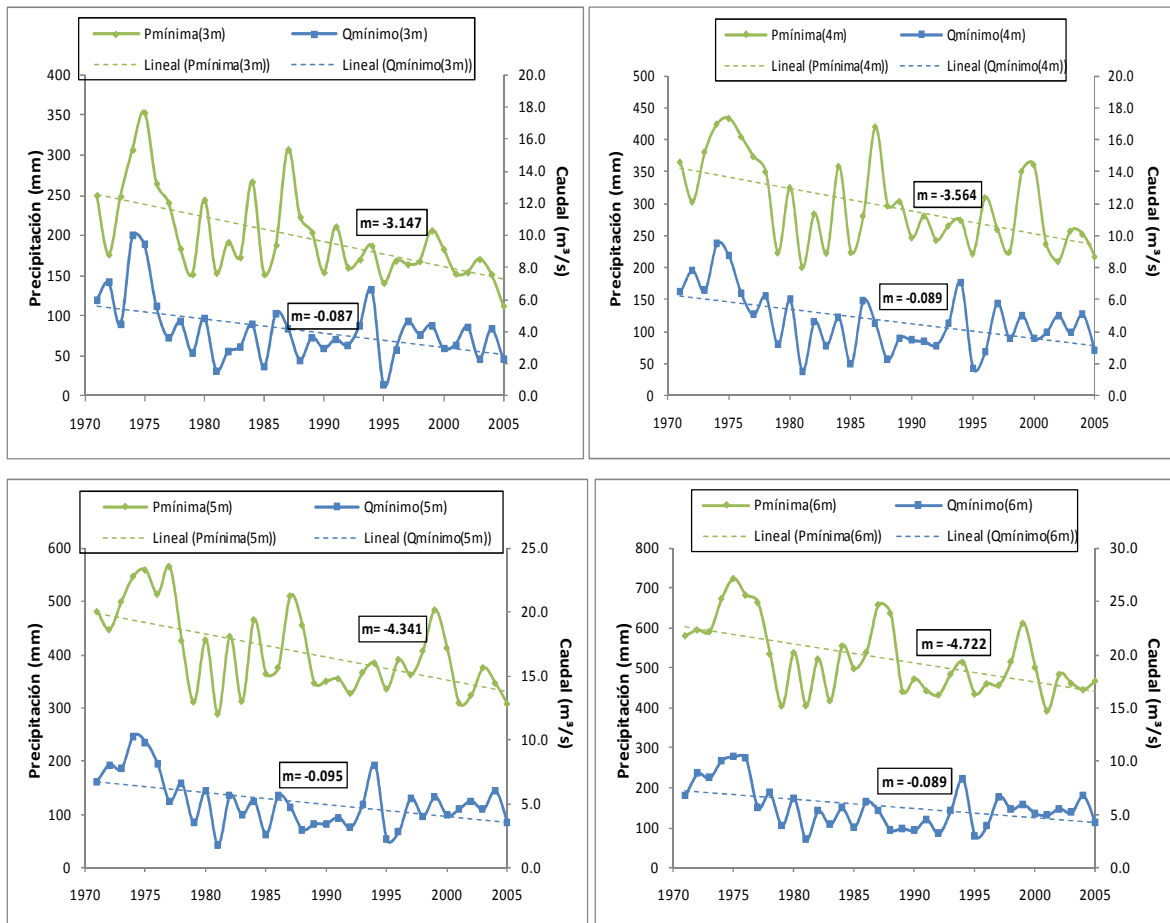
ELABORACIÓN: Luis Ríos

Figura 5.19. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 1 y 2 meses consecutivos de la cuenca del río Matadero en Sayausí.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Figura 5.20. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas de 3, 4, 5 y 6 meses consecutivos de la cuenca del río Matadero en Sayausí.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

5.4.5. RÍO QUIJOS EN BAEZA

En los caudales firmes o mínimos del río Quijos se observa una tendencia drástica al decrecimiento en un 29% referente a la media aritmética de la serie de caudales mínimos anuales. Los indicadores anuales de disminución de caudales (m) son mayores a 200 l/s; en tanto que las precipitaciones mínimas muestran una tendencia

a incrementar sus valores anuales en el tiempo para 1 y 2 meses consecutivos. Se justifica la no correspondencia en la tendencia de caudales y precipitaciones mediante la evaluación de la variabilidad de evaporación para dos períodos (ver Tabla 5.13).

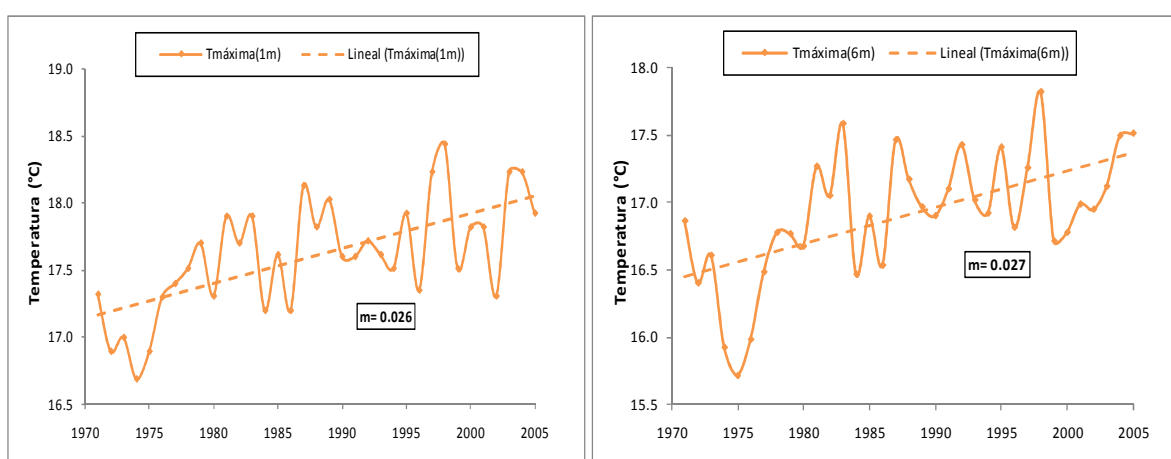
Tabla 5.13. Análisis del incremento en porcentaje de la relación (he/hp) en la cuenca del río Quijos.

PERIODO	hp (mm)	he (mm)	he/hp (%)
1971-1978	2483.4	864	35
1979-2005	2270.8	857	37

ELABORACIÓN: Luis Ríos

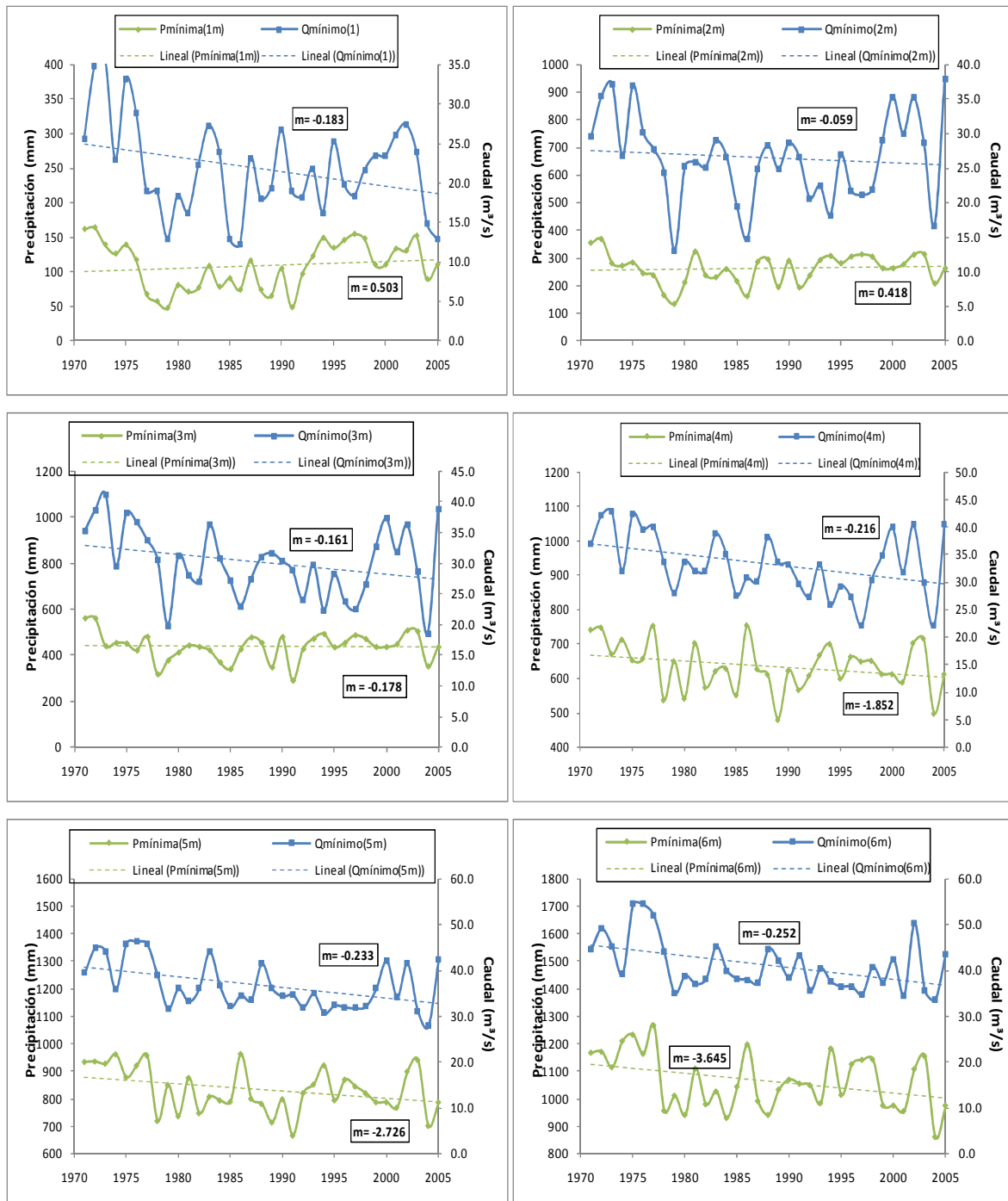
Se advierte un incremento medio multianual de la evaporación en una tasa del 2%, por efecto del incremento de la temperatura media (Ver Figura 5.21).

Figura 5.21. Variación de las temperaturas mensuales máximas en la cuenca del río Quijos



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Figura 5.22. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mínimas consecutivas en la cuenca del río Quijos



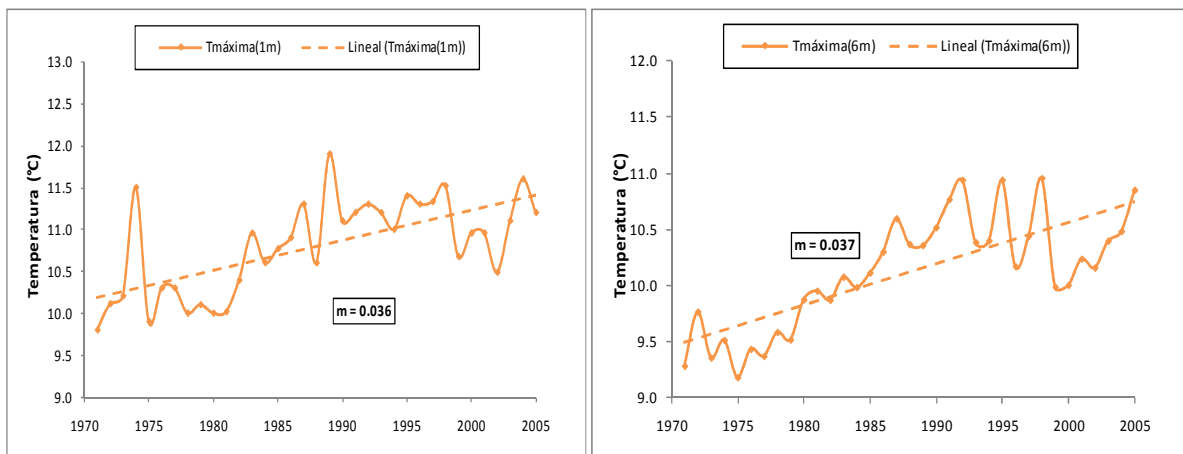
ELABORACIÓN: Luis Ríos

5.4.6. RIO YANAHURCO D.J. VALLE

Tal como se muestra en la Figura 5.24, los caudales mínimos presentan una tendencia con una disminución anual de 1.97% en relación con la media de la serie de caudales mínimos. Los indicadores (m) representan disminuciones en el rango de -18.8 l/s (1 mes) y 3 l/s (6 meses), de esta manera se concluye que en esta cuenca el caudal medio no presenta mayores anomalías (variaciones).

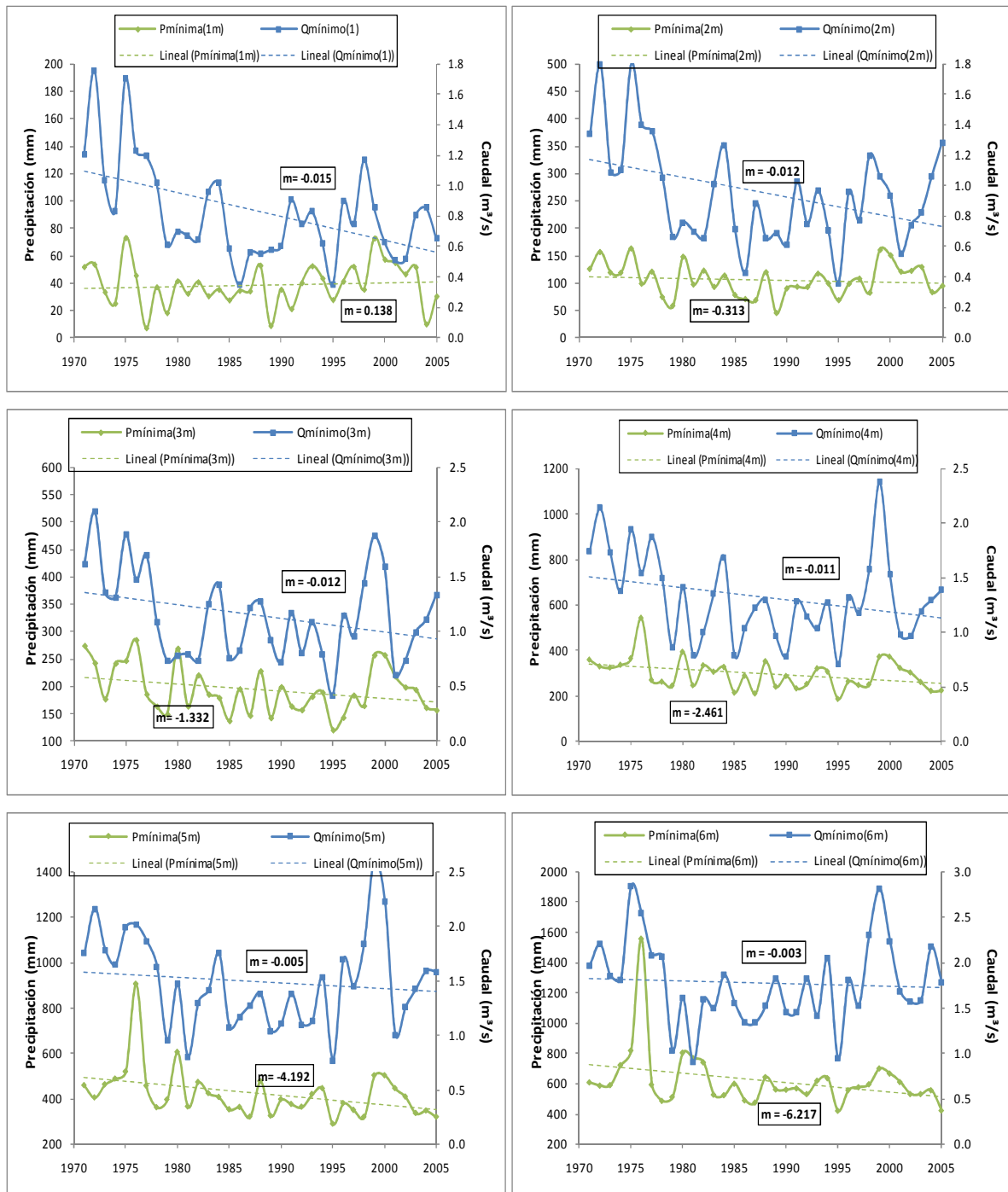
Las precipitaciones mínimas presenta un decrecimiento entre -0.31 mm (2 meses) y 6.21 mm (6 meses).

Figura 5.23. Variación de las temperaturas mensuales máximas en la cuenca del río Yanahurco D.J. Valle



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Figura 5.24. Variación de los caudales mínimos y de las precipitaciones mensuales mínimas consecutivas en la cuenca del río Yanahurco D.J. Valle



ELABORACIÓN: Luis Ríos

5.4.7. RESUMEN

En la Tabla 5.14 se muestran los factores (f_j) que son indicadores porcentuales de decrecimiento o incremento de precipitación, caudal y temperatura con un análisis de datos mensuales consecutivos, en donde:

$$f_j = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_{medio}} * 100$$

$Y_2 - Y_1$ es la disminución dada por la línea ajustada a la serie de datos, es decir el valor de la recta para el año 1971 (Y_1) y 2005 (Y_2). Al dividir este valor para la media aritmética de los valores obtenemos el porcentaje de disminución para el período.

Las variables consideradas son:

- f_1 : factor de decrecimiento porcentual de 1 mes consecutivo;
- f_2 : factor de decrecimiento porcentual de 2 meses consecutivos;
- f_3 : factor de decrecimiento porcentual de 3 meses consecutivos;
- f_4 : factor de decrecimiento porcentual de 4 meses consecutivos;
- f_5 : factor de decrecimiento porcentual de 5 meses consecutivos; y,
- f_6 : factor de decrecimiento porcentual del caudal medio

Tabla 5.14. Factores f_j de caudal, precipitación y temperatura

CAUDALES						
CUENCA HIDROGRÁFICA	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
Río Alambi en Churupamba	-75.8	-54.1	-44.7	-35.5	-32.4	-26.8
Río Toachi A.J. Pilatón	-28.0	-26.0	-26.0	-29.9	-28.3	-26.9
Río Alao en Hacienda Alao	-24.0	-14.5	-25.6	-43.1	-44.3	-40.8
Río Matadero en Sayausí	-129.9	-94.2	-74.8	-66.4	-65.3	-54.8
Río Quijos en Baeza	-29.3	-7.8	-18.8	-22.7	-22.2	-21.5
Río Yanahurco D.J. Valle	-69.1	-50.2	-39.1	-29.9	-12.1	-5.8
PROMEDIO	-59.4	-41.1	-38.2	-37.9	-34.1	-29.4

PRECIPITACIONES						
CUENCA HIDROGRÁFICA	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
Río Alambi en Churupamba	-194.8	-123.3	-88.5	-67.3	-61.8	-50.1
Río Toachi A.J. Pilatón	-106.3	-85.8	-56.0	-40.3	-38.7	-37.9
Río Alao en Hacienda Alao	-14.8	-34.4	-24.6	-39.2	-51.7	-43.8
Río Matadero en Sayausí	-41.1	-57.8	-55.6	-42.1	-37.5	-31.7
Río Quijos en Baeza	16.2	5.6	-1.4	-10.2	-11.4	-12.0
Río Yanahurco D.J. Valle	12.6	-10.4	-24.1	-29.2	-34.8	-35.1
PROMEDIO	-54.7	-51.0	-41.7	-38.1	-39.3	-35.1

TEMPERATURAS						
CUENCA HIDROGRÁFICA	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
Río Alambi en Churupamba	2.9	2.7	2.5	2.7	2.6	2.5
Río Toachi A.J. Pilatón	2.1	1.7	1.4	1.0	0.6	0.3
Río Alao en Hacienda Alao	0.9	3.0	3.9	4.8	6.1	5.5
Río Matadero en Sayausí	3.7	3.6	5.0	6.8	7.0	8.4
Río Quijos en Baeza	5.2	5.1	5.0	5.6	5.7	5.6
Río Yanahurco D.J. Valle	11.6	13.1	13.7	13.8	13.2	12.8
PROMEDIO	4.4	4.9	5.3	5.8	5.9	5.9

ELABORACIÓN: Luis Ríos

En base al análisis de las series y de la obtención de los factores f_j de precipitación, caudal y temperatura en el período 1971-2006, se determina que:

- El río Matadero presenta el mayor porcentaje de decrecimiento de caudales de 1 mes consecutivo (-129.9%) para el período 1971-2005 respecto al valor medio de la serie de caudales mínimos anuales; en tanto que el río Yanahurco presenta mayor estabilidad en sus caudales mínimos con tan solo una disminución del (-5.8%) del promedio de valores de caudales mínimos para el mismo período de análisis.
- Los mayores porcentajes de decrecimiento están dados para los caudales mínimos de 1 y 2 meses consecutivos en las cuencas altamente intervenidas por el ser humano, situación que puede justificarse por el progresivo incremento de los usos del agua en las cuencas; los caudales de estiaje o mínimos son más sensibles a la variabilidad climática.
- Las cuencas, cuyas áreas son parte de reservas protegidas o parques nacionales (río Alao, río Yanahurco) evidencian un decrecimiento de caudales y precipitaciones proporcional, es decir los caudales mínimos no se ven afectados en proporciones grandes ya que el estado de conservación de las mismas y la limitada presencia del hombre permite que el régimen natural del río se mantenga, pese a que el análisis de precipitaciones y temperaturas reflejen un decrecimiento e incremento respectivamente.
- El análisis de precipitaciones consecutivas refleja el decrecimiento general, a excepción de las cuencas orientales del río Quijos y Yanahurco para 1 y 2 meses, los factores f_i para las cuencas orientales son bajos, lo que permitiría afirmar la uniformidad en las precipitaciones; pese a que no se reflejen en los caudales. De manera particular los caudales del río Quijos tienen un decrecimiento trasvases hacia la cuenca del río Guayllabamba.
- Es evidente que la temperatura se incrementa, es así que en todas las estaciones en análisis los factores f_i son positivos, con incrementos porcentuales considerables como en la cuenca del río Matadero con valores

mayores al 8% en función del promedio de la serie de temperaturas máximas de 6 meses consecutivos.

- Las temperaturas máximas presentan cierta estabilidad y menor tendencia a incrementarse en el caso de las cuencas con menor intervención humana, así por ejemplo la cuenca del río Alao tiene un mínimo incremento (0.9%).

5.5. CAUDALES MÍNIMOS CONSECUTIVOS ASOCIADOS PERIODOS DE RETORNO

A las series de caudales mínimos consecutivos de 1, 3 y 6 meses del periodo 1971-2005 se aplica una distribución teórica de probabilidades, para así asociarlas a periodos de recurrencia; en cada análisis se cuenta con una serie de 35 elementos.

El análisis de frecuencias hidrológicas para la determinación de los caudales mínimos con períodos de retorno asignados responde a la siguiente ecuación:

$$Q_{min_{Tr}} = S * K_{Tr} + \overline{Q_{min}} \quad (Ec. 5.8)$$

Donde:

$Q_{min_{Tr}}$: caudal mínimo mensual consecutivo con periodo de retorno dado (m^3/s);

$\overline{Q_{min}}$: valor medio de los caudales mínimos consecutivos (m^3/s);

S: desviación estándar de los caudales mínimos anuales (m^3/s); y,

K_{Tr} : factor de frecuencia propio de cada distribución de probabilidades.

Un aspecto importante en este análisis es la adopción del tipo de distribución de probabilidades, que se sustentó en el coeficiente de asimetría (C_s) de la serie de caudales mínimos consecutivos de 1, 3 y 6 meses.

Se asumió entonces los siguientes criterios:

- Si el coeficiente de asimetría C_s está en el rango entre -0.5 y 0.5, entonces se adopta la distribución normal de probabilidades;
- Si el C_s es cercano a 1.14, entonces se asume la distribución de valores extremos tipo 1 (Gumbel); y,
- En otros casos se trabaja con la serie modificada a través de logaritmos naturales, es decir:

$$Y_i = \ln(Q_{min_i}) \quad (Ec. 5.9)$$

Al final, el valor $Q_{min_{Tr}}$ se determina a partir de la relación:

$$Q_{min_{Tr}} = \exp(Y_{min_{Tr}}) \quad (Ec. 5.10)$$

El periodo de retorno es calculado con la siguiente ecuación:

$$Tr = \frac{1}{p} \quad (Ec. 5.11)$$

Donde:

Tr: periodo de retorno (años); y,

P: probabilidad de no excedencia de la distribución

En la Tablas 5.15, 5,16 y 5,17 se presentan los caudales mínimos consecutivos de 1, 3 y 6 meses probables asociados a un periodo de retorno para las cuencas hidrográficas en estudio, también se presentan las medias aritméticas de las series (MEDIA).

Tabla 5.15. Caudales mínimos probables de 1 mes consecutivo de las cuencas hidrográficas en estudio

PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	RÍO ALAMBI	RÍO TOACHI	RÍO ALAO	RÍO MATADERO	RÍO QUIJOS	RÍO YANAHURCO
MEDIA	5.30	17.10	3.00	2.40	21.90	0.80
100	2.80	9.97	0.97	0.12	7.93	0.32
50	2.99	10.59	1.20	0.29	9.56	0.36
25	3.22	11.33	1.47	0.49	11.38	0.41
10	3.62	12.58	1.88	0.84	14.19	0.49
5	4.04	13.87	2.26	1.22	16.82	0.57

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Tabla 5.16. Caudales mínimos probables de 3 meses consecutivos de las cuencas hidrográficas en estudio

PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	RÍO ALAMBI	RÍO TOACHI	RÍO ALAO	RÍO MATADERO	RÍO QUIJOS	RÍO YANAHURCO
MEDIA	7.20	19.90	4.30	4.10	7.20	1.10
100	3.52	11.64	2.22	0.92	16.96	0.46
50	3.80	12.36	2.47	1.17	18.52	0.51
25	4.15	13.21	2.75	1.46	20.24	0.57
10	4.73	14.64	3.18	1.96	22.91	0.67
5	5.36	16.13	3.58	2.50	25.41	0.79

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Tabla 5.17. Caudales mínimos probables de 6 meses consecutivos de las cuencas hidrográficas en estudio

PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	RÍO ALAMBI	RÍO TOACHI	RÍO ALAO	RÍO MATADERO	RÍO QUIJOS	RÍO YANAHURCO
MEDIA	9.30	23.4	7.10	5.70	9.30	1.80
100	4.49	12.99	4.40	2.37	30.02	0.92
50	4.87	13.87	4.64	2.63	31.12	0.99
25	5.32	14.93	4.93	2.94	32.38	1.08
10	6.12	16.72	5.42	3.47	34.44	1.22
5	6.97	18.60	5.91	4.04	36.50	1.37

ELABORACIÓN: Luis Ríos

En general, las tasas de disminución de los caudales mínimos en relación al caudal medio de las series (1971-2005) son más drásticas y más altas para 1 mes. Estas tasas disminuyen su proporción en función del número de meses que se vayan incluyendo en el análisis, ya que se integran valores de caudal que pertenecen a la época de invierno en las cuencas y por ende un mayor valor promedio; es así por ejemplo para el río Alao la tasa de disminución del caudal de 1 mes consecutivo a 100 años es -68%, en tanto que para 6 meses esta tasa es de -38%. El río Matadero presentaría caudales a futuro menores a 1 m³/s situación que es preocupante por la importancia de este cauce el río Paute, en este río se esperan disminuciones para 100 años en una tasa del -95% del caudal medio.

A corto y largo plazo, los ríos Toachi y Quijos presentan los menores índices de decrecimiento; el río Toachi presenta una mayor estabilidad en sus caudales en el análisis para 6 meses consecutivos con una tasa mínima de -11% a 5 años de periodo de recurrencia.

Las tasas de disminución de caudales por obvias razones son mayores a largos plazos de tiempo, y menores con periodos de retorno de 5 y 10 años. En la Tabla

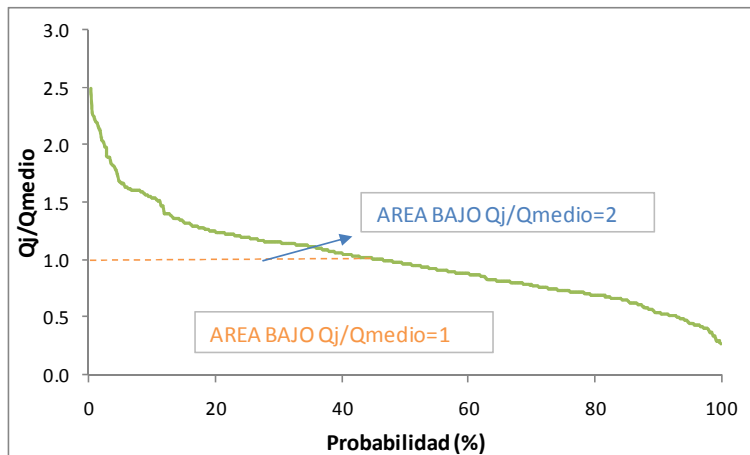
5.18 se pueden observar estas tasas de decrecimiento para las cuencas en estudio, además se define un promedio para cada uno de los periodos de recurrencia en las distintas series de meses consecutivos.

Es importante indicar que estos caudales probables a futuro se pueden ver afectados a razón de excesivas concesiones de agua, deforestación, cambio en el uso del suelo, avance de la frontera urbana, etc. Además no se debe olvidar que los caudales analizados corresponden a la SERIE MEDIA MENSUAL de las estaciones hidrométricas, por lo tanto los caudales probables enunciados en esta sección no son necesariamente comparables con datos diarios que se registraren a futuro ya que pueden ser menores en función de la variabilidad casual que se presente en el río. El análisis de caudales probables a futuro es netamente válido para series medias mensuales.

5.6. TENDENCIAS DE LAS ÁREAS BAJO LAS CURVAS DE DURACIÓN GENERAL ADIMENSIONALES

El objetivo primordial de las curvas de duración general adimensionales es generar parámetros comparativos referentes a las áreas dispuestas bajo los valores de caudales adimensionales 1 y 2 (Ver Figura 5.25), considerando a estas áreas como una representación de la autorregulación y capacidad de almacenamiento de las cuencas hidrográficas, así como también su grado de conservación; ya que estas áreas en realidad son volúmenes de agua.

Figura 5.25. Curva de duración general adimensional



ELABORACIÓN: Luis Ríos

El proceso de obtención de los datos que conforman las curvas de duración general adimensionales anuales consta en el numeral 5.4, donde la forma matemática de traspaso de los caudales absolutos a adimensionales es $q_j = \frac{Q_j}{Q_{medio}}$: q_j (caudal adimensional), Q_j (caudal absoluto (m^3/s)) y Q_{medio} (caudal medio anual (m^3/s)).

Los caudales q_j conservan la misma probabilidad de los caudales absolutos (Q_j)

En las curvas adimensionales anuales se calcula para cada año, las áreas referidas de las seis cuencas de estudio mediante un procedimiento matemático basado en matrices llamado Teorema de Gauss y que implica las posiciones en coordenadas cartesianas de los puntos que conforman el área en mención. Este proceso de cálculo de áreas fue sistematizado en el software creado para la determinación de la curva de duración general cuyas líneas de código constan en el Anexo 3.

En la Tabla 5.19 constan los valores medios de las series de las áreas antes mencionadas del período (1971-2005); también se incluye el volumen determinado en la curva de duración general bajo el caudal medio absoluto, asociando la probabilidad con el número de días de un año.

Tabla 5.18. Valores medios de las áreas bajo la curva de duración general adimensional de las cuencas en estudio.

CUENCA HIDROGRÁFICA	ÁREA DE DRENAJE (km ²)	ÁREAS BAJO q_j CDG ADIMENSIONAL		VOLUMEN BAJO Q_j CDG ABSOLUTA (x 10 ⁶ hm ³)
		$q_j=1$	$q_j=2$	Q_j =caudal medio
Río Alambi en Churupamba	442.0	2.2	2.9	39.8
Río Toachi A.J. Pilatón	1526.4	2.3	3.0	123.9
Río Alao en Hacienda Alao	108.0	2.2	2.7	16.8
Río Matadero en Sayausí	304.0	2.3	2.9	16.2
Río Quijos en Baeza	932.5	2.6	3.1	118.6
Río Yanahurco D.J. Valle	78.3	2.4	2.9	4.9

ELABORACIÓN: Luis Ríos

El análisis de las áreas bajo las curvas de duración general absolutas muestra claramente la disminución de la capacidad de autorregulación, situación que se refleja en la forma de las curvas (curvas más tendidas en probabilidades altas) y por ende mayor presencia de caudales mínimos.

Los parámetros más decisivos y comparativos entre cuencas son las áreas bajo las curvas adimensionales, donde se nota que en las cuencas de la región sierra y litoral el valor medio fluctúa entre 2.2 y 2.3, en tanto que en las cuencas de la amazonía los valores varían entre 2.4 y 2.6.

En el análisis multianual de estos parámetros, se puede notar un decrecimiento asociando una tendencia lineal referencial a través del tiempo en la mayoría de los casos, en algunas cuencas se nota que el área bajo $q_j = 1$ se mantiene constante en el tiempo en términos generales.

En la Figura 5.26 se muestra la variabilidad de estos parámetros en el tiempo, además se referencia un valor m_1 y m_2 que denota la pendiente de la recta que se ajusta a la dispersión de datos.

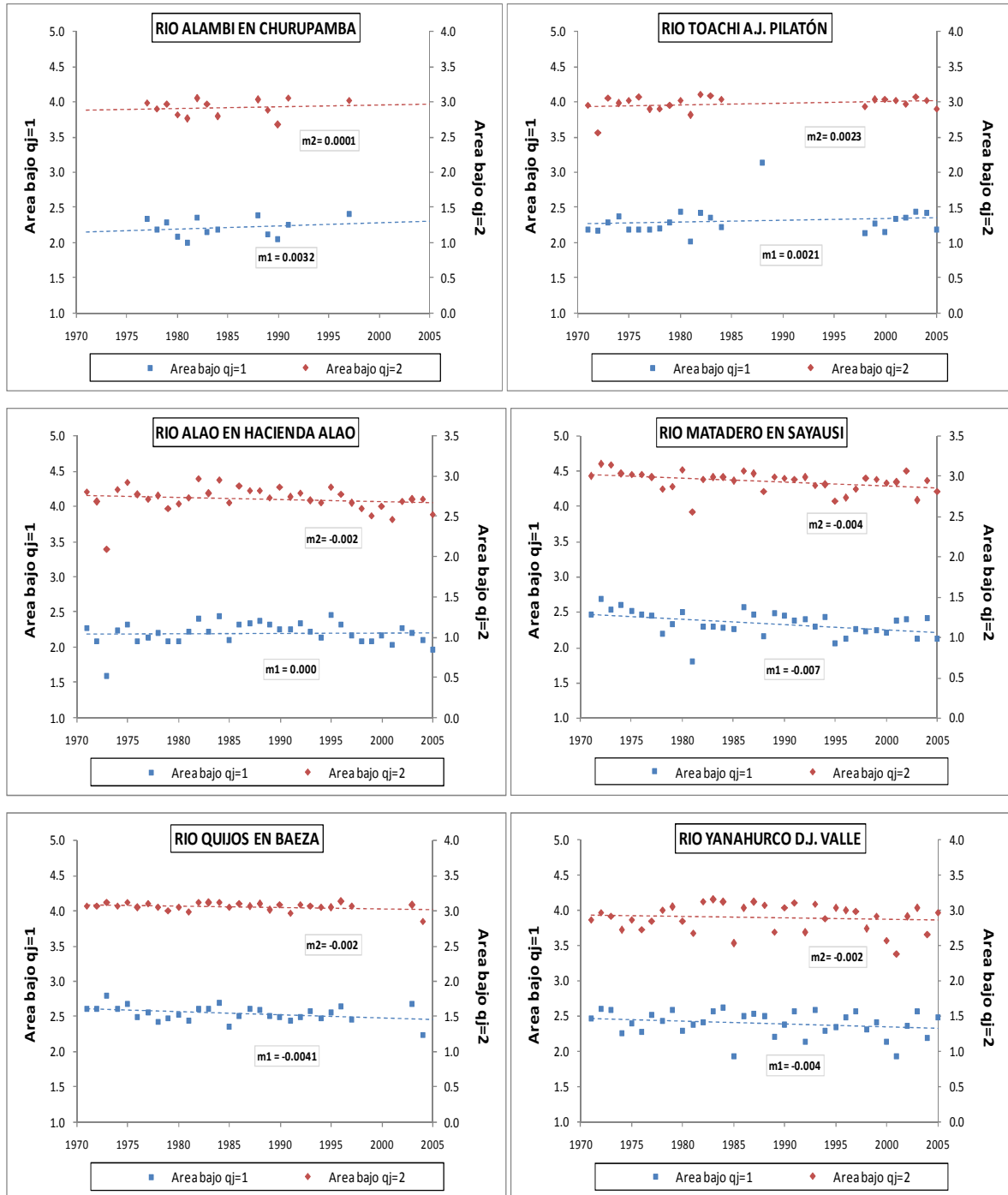
m_1 : pendiente de la recta ajustada a la serie multianual de datos de áreas bajo la curva de duración general adimensional bajo $q_j=1$; y,

m_2 : pendiente de la recta ajustada a la serie multianual de datos de áreas bajo la curva de duración general adimensional bajo $q_j=2$;

Las Figuras que muestran la variación de las áreas bajo las curvas adimensionales están estructuradas con los siguientes ejes:

- Eje de abscisas: años del período 1971-2005;
- Eje de ordenadas principal: área bajo la curva adimensional $q_j=1$
- Eje de ordenadas secundario: área bajo la curva adimensional $q_j=2$; y,
- Líneas de tendencia de ajuste por mínimos cuadrados.

Figura 5.26. Variación de las áreas bajo las curvas adimensionales de las cuencas



ELABORACIÓN: Luis Ríos

Las cuencas de la región litoral (río Alambi y Toachi) evidencian un incremento mínimo de las áreas bajo las curvas de duración general adimensionales, este incremento está referenciado por las pendientes de las rectas ajustadas que fluctúan entre 0.01 y 0.32%; en tanto que los ríos de la región oriental e interandina muestran un decrecimiento en los valores referenciales de la capacidad de autorregulación de la cuenca de drenaje (áreas bajo la curva de duración general), decrecimiento que varía entre 0.20 y 0.75%.

En la Tabla 5.19 se presenta una cuantificación generalizada de la tendencia cronológica de las áreas determinadas, esta cuantificación está dada por el factor f_j (Ec. 5.6), que representa el decrecimiento porcentual de la serie de datos en relación a la media aritmética tomando en consideración la línea recta ajustada por mínimos cuadrados.

f_{q1} : factor de decrecimiento porcentual de la serie de datos de las áreas bajo las curvas adimensionales $q_j = 1$; y,

f_{q2} : factor de decrecimiento porcentual de la serie de datos de las áreas bajo las curvas adimensionales $q_j = 2$.

Tabla 5.19. Factores f_j dados por las áreas bajo la curva de duración general adimensional de las cuencas en estudio.

CUENCA HIDROGRÁFICA	FACTORES f_j	
	f_{q1}	f_{q2}
Río Alambi en Churupamba	0.3	5.0
Río Toachi A.J. Pilatón	2.6	8.0
Río Alao en Hacienda Alao	0.0	-3.3
Río Matadero en Sayausí	-11.7	-6.6
Río Quijos en Baeza	-5.0	-2.6
Río Yanahurco D.J. Valle	-7.1	-2.1

ELABORACIÓN: Luis Ríos

CAPÍTULO 6

PROPOSICIÓN DE INDICADORES CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS

6.1. DESCRIPCIÓN DE INDICADORES DE LA SEVERIDAD DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA E HIDROLÓGICA

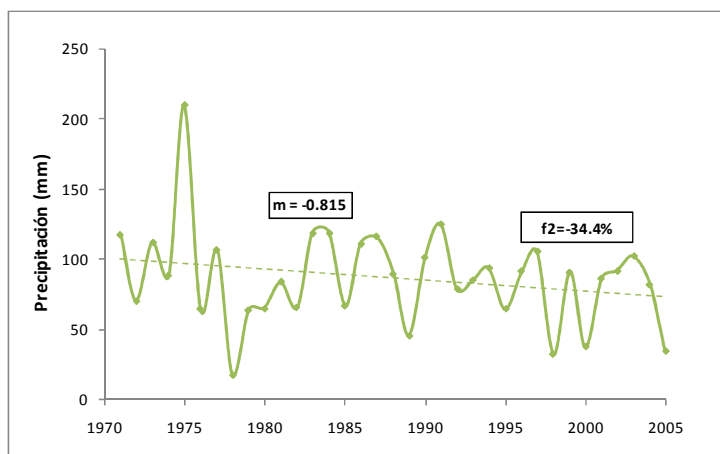
Los indicadores son un punto medio entre exactitud científica y la demanda por información concisa con tal de simplificar las relaciones complejas que se presentan en el medio natural, permitiendo analizar el comportamiento del mismo ya sea a través del tiempo o con otros parámetros de referencia (BARRANTES, 2006).

6.1.1. PRECIPITACIONES Y CAUDALES MEDIOS MENSUALES MÍNIMOS CONSECUTIVOS

Las precipitaciones medias mensuales mínimas consecutivas representan y evidencian el comportamiento de la pluviosidad en el periodo seco del año.

En el contexto del ciclo hidrológico, la ocurrencia de lluvias de menor magnitud naturalmente repercute en la magnitud de los caudales mínimos y su duración en el tiempo; es así que se propone a las precipitaciones medias mensuales mínimas consecutivas como un indicador representado por la pendiente (m) de la recta que determina la tendencia y por el factor f dado por el porcentaje de decrecimiento lineal de las series (ver Figura 6.1).

Figura 6.1. Variación de las precipitaciones mínimas consecutivas de 2 meses, estación Alao.



ELABORACIÓN: Luis Ríos

6.1.2. PRECIPITACIONES ANUALES Y CAUDALES MEDIOS ANUALES

La variación de las precipitaciones y caudales medios anuales evidencia de manera general el comportamiento del ciclo hidrológico en las cuencas a través de todo el año, tratando de manera incluyente a los eventos extremos (crecidas y caudales mínimos). Las series anuales de caudales y precipitaciones no toman en consideración la estacionalidad ni la ocurrencia de las sequías y estiajes.

Los índices que validan y sostienen a estas variables como indicadores de la variabilidad climática son: la pendiente de las rectas ajustadas (m) y los factores f_m dados por el porcentaje de variación respecto a la medida aritmética de la serie (Figura 6.1).

6.1.3. TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES MÁXIMAS CONSECUTIVAS

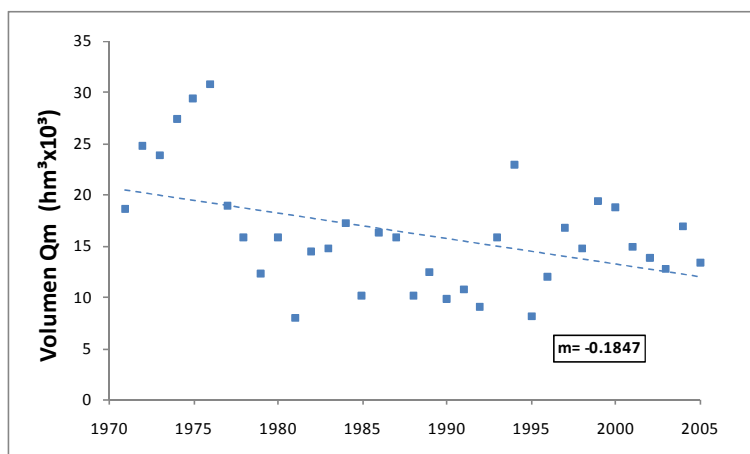
La temperatura es una variable meteorológica que incide en gran medida en la variabilidad climática, ya que en el ciclo hidrológico es el factor principal que define a la evaporación del agua desde la superficie de las cuencas. El cambio climático que se evidencia en la temperatura es resultado de la presencia de gran cantidad de moléculas de gases de efecto invernadero.

Las temperaturas máximas consecutivas definen la estacionalidad de los períodos calurosos en el año; se evidencia en este estudio que en todas las estaciones meteorológicas la temperatura se incrementa con índices f_j que varían entre los 0.9 para la cuenca del río Alao y 13.8% en la cuenca del río Yanahurco.

6.1.4. ÁREAS BAJO LAS CURVAS DE DURACIÓN GENERAL ADIMENSIONALES Y VOLUMEN BAJO LA CURVA DE DURACIÓN GENERAL ABSOLUTA

Las áreas obtenidas bajo las curvas de duración general adimensionales anuales, definen la capacidad relativa de autorregulación de las cuencas, proceso que implica varios factores tales como la cubierta vegetal, uso del suelo, precipitaciones entre otros; además se ve reflejada la forma de la curva; la tendencia está definida por la pendiente de la recta ajustada y los factores f_{q1} . El volumen bajo el caudal medio de la curva de duración general absoluta es un indicador fehaciente de la disminución de los caudales mínimos (ver Figura 6.2)

Figura 6.2. Variación del volumen de autorregulación de la cuenca del río Alao



ELABORACIÓN: Luis Ríos

6.2. CALIFICACIÓN DE INDICADORES DE LA SEVERIDAD DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Los indicadores de variabilidad climática que se proponen para sustentar el presente estudio, han sido calificados en base a frecuencias relativas y absolutas; es decir de acuerdo al número de eventos que se presentan en toda la muestra de indicadores de las cuencas hidrográficas en estudio dando mayor validez a los indicadores que muestran el decrecimiento para el caso de precipitaciones y caudales (evento SI), en tanto que los indicadores de temperatura serán calificados por su incremento (evento SI).

Previo al análisis de las series hidrometeorológicas y sus correspondientes valoraciones que evidencian la disminución de los caudales mínimos se plantean 12 indicadores que se evalúan en su gran mayoría mediante los factores de

decrecimiento porcentual respecto a la media de la serie de datos (f_j) y la pendiente de la recta ajustada por mínimos cuadrados de la variación multianual de datos (m).

- **PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES MÍNIMAS CONSECUTIVAS: 1, 2, 3, 4, 5, 6 MESES (Pre1):** Tabla 5.14 y Figura 5.10 hasta Figura 5.24.
- **PRECIPITACIONES ANUALES (Pres2):** Anexo 2
- **TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES MÁXIMAS CONSECUTIVAS: 1, 2, 3, 4, 5 Y 6 MESES (temp1):** Tabla 5.14 y Figura 5.10 hasta Figura 5.24
- **TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES (Temp2):** Anexo 2
- **CAUDALES MEDIOS MÍNIMOS CONSECUTIVOS: 1, 2, 3, 4, 5 Y 6 MESES (Cau1):** Tabla 5.14 y Figura 5.10 hasta Figura 5.24.
- **CAUDALES MEDIOS ANUALES (Cau2):** Referencia Tabla 5.9.
- **CAUDALES MEDIOS DIARIOS MÍNIMOS 90, 80, 70, 60, 50% DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (Cau3):** Tabla 5.9
- **ÁREAS BAJO LAS CURVAS DE DURACIÓN GENERAL ADIMENSIONALES $Q_j = 1$:** Tabla 5.20 y Figura 5.26
- **VOLUMEN BAJO LA CURVA DE DURACIÓN GENERAL ABSOLUTA $Q_i = \text{CAUDAL MEDIO (Vol1)}$:** Tabla 5.19 y Anexo 4.

Los indicadores fueron calificados de manera cualitativa en función de la siguiente escala basada en la frecuencia relativa del evento SI:

Tabla 6.1. Escala de calificación cualitativa

FRECUENCIA RELATIVA (FR)	CALIFICACIÓN DEL INDICADOR
$80 \leq FR \leq 100$	Muy Bueno (MB)
$60 \leq FR < 80$	Bueno (B)
$40 \leq FR < 60$	Regular (R)
$FR < 40$	Incierto (I)

ELABORACIÓN: Luis Ríos

La calificación de los indicadores referentes a caudales mínimos consecutivos y mínimos anuales la escala anterior adquiere una variación por la existencia de usos del agua que no fueron estudiados y que incide de manera directa en los caudales mínimos.

Tabla 6.2. Escala de calificación cualitativa para caudales mínimos

FRECUENCIA RELATIVA (FR)	CALIFICACIÓN DEL INDICADOR
$70 \leq FR \leq 100$	Muy Bueno (MB)
$50 \leq FR < 70$	Bueno (B)
$30 \leq FR < 50$	Regular (R)
$FR < 30$	Incierto (I)

ELABORACIÓN: Luis Ríos

6.3. MATRICES DE CALIFICACIÓN DE INDICADORES DE LA SEVERIDAD DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Las matrices de calificación contienen la siguiente información:

- **Indicador:** contiene los 9 indicadores climáticos e hidrológicos que fueron sustentados anteriormente.
- **Frecuencia absoluta:** esta columna contiene los dos criterios de calificación de los indicadores; evento SI cuando obedecen a las premisas de disminución de caudales, precipitaciones, áreas bajo las curvas de duración general adimensionales y volúmenes bajo la curva de duración general absoluta, además del evidente incremento en la temperatura. El evento NO asocia las contraposiciones del evento SI. La suma de los eventos SI y NO generan la columna TOTAL.
- **Frecuencia relativa:** asocia los porcentajes de los eventos SI y NO respecto al TOTAL.
- **Calificación:** contiene la calificación cualitativa de los indicadores en función a lo establecido en las Tablas 6.1 y 6.2.

A manera de ejemplo se explica la calificación del indicador Precipitaciones mínimas consecutivas (Pre1) para la cuenca del río Alambi (Tabla 6.3).

Luego del procesamiento de información en la Tabla 5.14 se establece que el número de eventos SI que denotan decrecimiento es de 6; en tanto que los eventos NO asocian un valor de 0. La frecuencia relativa del evento SI es del 100% de la muestra; de esta manera la calificación que se asigna de acuerdo a la Tabla 6.1 es de un INDICADOR MUY BUENO.

A continuación se presentan las tablas de frecuencias de los indicadores de variabilidad climática para cada cuenca y su respectiva calificación cualitativa.

Tabla 6.3. Calificación de indicadores en la cuenca del río Alambi en Churupamba

INDICADOR	FRECUENCIA ABSOLUTA			FRECUENCIA RELATIVA (%)			CALIFICACIÓN
	SI	NO	TOTAL	SI	NO	TOTAL	
Precipitaciones mínimas consecutivas (Pre1)	6	0	6	100	0	100	MB
Precipitaciones anuales (Pre2)	1	0	1	100	0	100	MB
Temperaturas máximas consecutivas (Temp1)	6	0	6	100	0	100	MB
Temperaturas medias anuales (Temp2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales mínimos consecutivos (Cau1)	6	0	6	100	0	100	MB
Caudales medios anuales (Cau2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales medios diarios mínimos (Cau3)	5	0	5	100	0	100	MB
Áreas bajo CDG adimensional (Ar1)	0	2	2	0	100	100	I
Volumen bajo CDG absoluta (Vol1)	1	0	1	100	0	100	MB

ELABORACIÓN: Luis Ríos**Tabla 6.4.** Calificación de indicadores en la cuenca del río Toachi A.J. Pilatón

INDICADOR	FRECUENCIA ABSOLUTA			FRECUENCIA RELATIVA (%)			CALIFICACIÓN
	SI	NO	TOTAL	SI	NO	TOTAL	
Precipitaciones mínimas consecutivas (Pre1)	6	0	6	100	0	100	MB
Precipitaciones anuales (Pre2)	1	0	1	100	0	100	MB
Temperaturas máximas consecutivas (Temp1)	6	0	6	100	0	100	MB
Temperaturas medias anuales (Temp2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales mínimos consecutivos (Cau1)	6	0	6	100	0	100	MB
Caudales medios anuales (Cau2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales medios diarios mínimos (Cau3)	5	0	5	100	0	100	MB
Áreas bajo CDG adimensional (Ar1)	0	2	2	0	100	100	I
Volumen bajo CDG absoluta (Vol1)	1	0	1	100	0	100	MB

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Tabla 6.5. Calificación de indicadores en la cuenca del río Alao en Hacienda Alao

INDICADOR	FRECUENCIA ABSOLUTA			FRECUENCIA RELATIVA (%)			CALIFICACIÓN
	SI	NO	TOTAL	SI	NO	TOTAL	
Precipitaciones mínimas consecutivas (Pre1)	6	0	6	100	0	100	MB
Precipitaciones anuales (Pre2)	1	0	1	100	0	100	MB
Temperaturas máximas consecutivas (Temp1)	6	0	6	100	0	100	MB
Temperaturas medias anuales (Temp2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales mínimos consecutivos (Cau1)	6	0	6	100	0	100	MB
Caudales medios anuales (Cau2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales medios diarios mínimos (Cau3)	5	0	5	100	0	100	MB
Áreas bajo CDG adimensional (Ar1)	1	1	2	50	50	100	R
Volumen bajo CDG absoluta (Vol1)	1	0	1	100	0	100	MB

ELABORACIÓN: Luis Ríos**Tabla 6.6.** Calificación de indicadores en la cuenca del río Matadero de Sayausí

INDICADOR	FRECUENCIA ABSOLUTA			FRECUENCIA RELATIVA (%)			CALIFICACIÓN
	SI	NO	TOTAL	SI	NO	TOTAL	
Precipitaciones mínimas consecutivas (Pre1)	6	0	6	100	0	100	MB
Precipitaciones anuales (Pre2)	1	0	1	100	0	100	MB
Temperaturas máximas consecutivas (Temp1)	6	0	6	100	0	100	MB
Temperaturas medias anuales (Temp2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales mínimos consecutivos (Cau1)	6	0	6	100	0	100	MB
Caudales medios anuales (Cau2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales medios diarios mínimos (Cau3)	5	0	5	100	0	100	MB
Áreas bajo CDG adimensional (Ar1)	2	0	2	100	0	100	MB
Volumen bajo CDG absoluta (Vol1)	1	0	1	100	0	100	MB

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Tabla 6.7. Calificación de indicadores en la cuenca del río Quijos en Baeza

INDICADOR	FRECUENCIA ABSOLUTA			FRECUENCIA RELATIVA (%)			CALIFICACIÓN
	SI	NO	TOTAL	SI	NO	TOTAL	
Precipitaciones mínimas consecutivas (Pre1)	4	2	6	67	33	100	B
Precipitaciones anuales (Pre2)	1	0	1	100	0	100	MB
Temperaturas máximas consecutivas (Temp1)	6	0	6	100	0	100	MB
Temperaturas medias anuales (Temp2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales mínimos consecutivos (Cau1)	6	0	6	100	0	100	MB
Caudales medios anuales (Cau2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales medios diarios mínimos (Cau3)	5	0	5	100	0	100	MB
Áreas bajo CDG adimensional (Ar1)	2	0	2	100	0	100	MB
Volumen bajo CDG absoluta (Vol1)	1	0	1	100	0	100	MB

ELABORACIÓN: Luis Ríos**Tabla 6.8.** Calificación de indicadores en la cuenca del río Yanahurco D.J. Valle

INDICADOR	FRECUENCIA ABSOLUTA			FRECUENCIA RELATIVA (%)			CALIFICACIÓN
	SI	NO	TOTAL	SI	NO	TOTAL	
Precipitaciones mínimas consecutivas (Pre1)	5	1	6	83	17	100	MB
Precipitaciones anuales (Pre2)	1	0	1	100	0	100	MB
Temperaturas máximas consecutivas (Temp1)	6	0	6	100	0	100	MB
Temperaturas medias anuales (Temp2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales mínimos consecutivos (Cau1)	6	0	6	100	0	100	MB
Caudales medios anuales (Cau2)	1	0	1	100	0	100	MB
Caudales medios diarios mínimos (Cau3)	5	0	5	100	0	100	MB
Áreas bajo CDG adimensional (Ar1)	2	0	2	100	0	100	MB
Volumen bajo CDG absoluta (Vol1)	1	0	1	100	0	100	MB

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Las matrices de calificación de indicadores que se presentan a continuación fueron obtenidas al discretizar las muestras para evaluar los comportamientos en varias escalas:

- Nacional
- Regional: Sierra, costa y amazonía
- Por vertientes de drenaje: Occidental y oriental;
- Por el grado de conservación de la cuenca: Intervenidas y no intervenidas;
- Por el área de la cuenca: Área mayor a 500 km² y área menor a 500 km²;
- Por la elevación media de la cuenca: Elevación media superior a 3500 m.s.n.m. y elevación media inferior a 3500 m.s.n.m.

Tabla 6.9. Calificación de indicadores por división geográfica

INDICADOR	NACIONAL	SIERRA	COSTA	AMAZONÍA
Precipitaciones mínimas consecutivas (Pre1)	MB	MB	MB	B
Precipitaciones anuales (Pre2)	MB	MB	MB	MB
Temperaturas máximas consecutivas (Temp1)	MB	MB	MB	MB
Temperaturas medias anuales (Temp2)	MB	MB	MB	MB
Caudales mínimos consecutivos (Cau1)	MB	MB	MB	MB
Caudales medios anuales (Cau2)	MB	MB	MB	MB
Caudales medios diarios mínimos (Cau3)	MB	MB	MB	MB
Áreas bajo CDG adimensional (Ar1)	R	B	I	MB
Volumen bajo CDG absoluta (Vol1)	MB	MB	MB	MB

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Tabla 6.10. Calificación de indicadores por vertientes hidrográficas

INDICADOR	OCCIDENTAL	ORIENTAL
Precipitaciones mínimas consecutivas (Pre1)	MB	MB
Precipitaciones anuales (Pre2)	MB	MB
Temperaturas máximas consecutivas (Temp1)	MB	MB
Temperaturas medias anuales (Temp2)	MB	MB
Caudales mínimos consecutivos (Cau1)	MB	MB
Caudales medios anuales (Cau2)	MB	MB
Caudales medios diarios mínimos (Cau3)	MB	MB
Áreas bajo CDG adimensional (Ar1)	I	MB
Volumen bajo CDG absoluta (Vol1)	MB	MB

ELABORACIÓN: Luis Ríos**Tabla 6.11.** Calificación de indicadores por grado de conservación de la cuenca

INDICADOR	INTERVENIDA	NO INTERVENIDA
Precipitaciones mínimas consecutivas (Pre1)	MB	MB
Precipitaciones anuales (Pre2)	MB	MB
Temperaturas máximas consecutivas (Temp1)	MB	MB
Temperaturas medias anuales (Temp2)	MB	MB
Caudales mínimos consecutivos (Cau1)	MB	MB
Caudales medios anuales (Cau2)	MB	MB
Caudales medios diarios mínimos (Cau3)	MB	MB
Áreas bajo CDG adimensional (Ar1)	B	R
Volumen bajo CDG absoluta (Vol1)	MB	MB

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Tabla 6.12. Calificación de indicadores por características físico-geográficas

INDICADOR	AREA < 500 km ²	AREA > 500 km ²	ELEVACION MEDIA < 3500 msnm	ELEVACION MEDIA > 3500 msnm
Precipitaciones mínimas consecutivas (Pre1)	MB	MB	MB	MB
Precipitaciones anuales (Pre2)	MB	MB	MB	MB
Temperaturas máximas consecutivas (Temp1)	MB	MB	MB	MB
Temperaturas medias anuales (Temp2)	MB	MB	MB	MB
Caudales mínimos consecutivos (Cau1)	MB	MB	MB	MB
Caudales medios anuales (Cau2)	MB	MB	MB	MB
Caudales medios diarios mínimos (Cau3)	MB	MB	MB	MB
Áreas bajo CDG adimensional (Ar1)	B	R	I	MB
Volumen bajo CDG absoluta (Vol1)	MB	MB	MB	MB

ELABORACIÓN: Luis Ríos

Las calificaciones asignadas para los indicadores muestran gran efectividad en las diversas clasificaciones; las precipitaciones mínimas consecutivas y anuales muestran un decrecimiento evidente, a excepción de las cuencas de la región oriental, donde el régimen climático muestra una cierta uniformidad con tendencia al incremento. Asimismo es evidente y preocupante el notable incremento de la temperatura ambiente en los períodos de estiaje lo que justifica el incremento de los índices de evaporación y por ende la menor escorrentía superficial en los ríos.

El indicador dado por la forma de las curvas de duración general adimensionales y su área bajo q_1 y q_2 , no muestran claridad en las diversas clasificaciones excepto en las cuencas orientales. Un evento a destacar ocurre en la cuenca del río Alao donde estas áreas guardan una tendencia a no variar en el tiempo lo que indica que las condiciones de drenaje en la cuenca se mantienen. Las cuencas pertenecientes a la

vertiente occidental tienden a incrementar sus valores en este indicador, situación que puede atribuirse a la ocurrencia de eventos extremos (crecidas) con mayores frecuencias.

En resumen, los indicadores propuestos cumplen las condiciones y obtienen la calificación de muy buenos (MB) en virtud de que los eventos son repetitivos en todas las cuencas de drenaje.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

DE LAS PRUEBAS DE CALIDAD DE INFORMACIÓN

- La prueba de rachas o secuencias permite evaluar la homogeneidad de una serie de datos, tomando en consideración a la variación existente con la mediana. Con la aplicación del test de secuencias en las series corregidas de precipitaciones, temperatura y caudales se verifica la homogeneidad de las mismas a nivel interanual y casi en su totalidad, en el análisis intermensual. En todos los test aplicados se puede observar que el número de registros superiores a la mediana es de 17(NA), condición que concuerda con las recomendaciones de la OMM que establecen para este caso un intervalo de rachas (NS) entre 14 y 21 para determinar la homogeneidad de la serie.

LOS DIAGRAMAS OMBROTÉRMICOS Y LA VARIACIÓN ESTACIONAL:

- Se define a un diagrama ombrotérmico como la superposición a una misma escala aritmética de la curva ómbrica (precipitación) y la curva térmica para una zona, y de esta manera se identifican cualitativamente los períodos secos del año (aridez); en definitiva, muestra la estacionalidad intraanual conjunta de la precipitación y temperatura.

Este diagrama es de utilidad ya que permite reconocer los períodos más propensos a que los caudales en los ríos sean mínimos y el lapso de tiempo sea considerado como período seco, de acuerdo a las condicionantes de temperatura y precipitación escasa.

- En general, la variación estacional de la temperatura y precipitación responde a los ya conocidos regímenes climáticos complementarios de nuestro país: régimen oriental y régimen occidental.

Régimen oriental: ríos Alao, Quijos y Yanahurco; y

Régimen occidental; ríos Matadero, Alambi y Toachi.

Con esta clasificación de acuerdo a la variabilidad estacional de las precipitaciones, se puede afirmar que en las cuencas de la región sierra se producen variaciones climáticas mixtas es decir combinaciones de variabilidad dependiendo de la altitud, tal como muestra el río Alao que pertenece al sistema hidrográfico del río Pastaza (vertiente oriental), que tiene una variabilidad propia de las cuencas orientales ya que por su altitud y su condición de cuenca de cabecera se encuentra influenciada por las mismas masas de aire que se precipitan en el oriente. En tanto que la cuenca del río Matadero, en su zona intermedia, muestra una variabilidad estacional de una cuenca del Pacífico pese a pertenecer a un drenaje oriental.

RESPECTO A LOS BALANCES HÍDRICOS EN LAS CUENCAS:

- La cuenca con mayor pluviosidad anual media es la del río Alao (2777 mm), mientras que la hoya del río Matadero cuenta con la menor lámina de precipitación (1126 mm); esta situación se justifica por los distintos grados de conservación de la cobertura vegetal, usos del suelo (intervención humana) y principalmente por su localización geográfica en el país.
- El promedio de los coeficientes de escorrentía de todas las cuencas en análisis es 0.72.
- El análisis a nivel nacional refleja que la variación anual de los caudales es semejante al asociar las cuencas hidrográficas por su vertiente de drenaje. Por ejemplo, en las cuencas de la vertiente occidental o del Pacífico (ríos Alambi y Toachi) los períodos húmedos y secos tienen igual ocurrencia en el tiempo aunque difieran en su magnitud. Asimismo las cuencas del drenaje oriental observan tendencias semejantes de duraciones y formas en la curva. Estos antecedentes permitirían afirmar que la variabilidad climática y por ende hidrológica tiene un amplio rango de afectación tanto espacial como temporal, de forma tal que los fenómenos hidrometeorológicos no se convertirían en sucesos aislados (sequías, crecidas) para determinados lugares, sino que se observa a mayores escalas, como son: nivel nacional e incluso regional.

DE LAS CURVAS DE DURACIÓN GENERAL ADIMENSIONALES:

- Las cuencas de los ríos de la amazonía presentan valores altos de caudales adimensionales para probabilidades superiores, lo que indica una mayor capacidad natural de autorregulación de la cuenca, en tanto que las cuencas de la costa tienen los valores más bajos de este parámetro. La simultaneidad que muestran las curvas en el rango de probabilidades bajas se justifica por la magnitud y características propias de los caudales altos que se generan en las cuencas. Las curvas adimensionales de las cuencas de la vertiente oriental (ríos Alao, Matadero, Quijos y Yanahurco) tienen una forma semejante y casi proporcional en el rango de caudales mínimos.
- El análisis conjunto de dependencia de los caudales mínimos en función del caudal medio, para las seis cuencas de drenaje, permite estimar los coeficientes (k) que determinan el porcentaje del caudal que tienen los caudales mínimos y fluctúan entre 0.37 y 0.65 para caudales 90 y 60%; donde se puede notar que los usos del agua pueden afectar las tendencias, especialmente en las cuencas de la región sierra.

ANÁLISIS DE VALORES MÍNIMOS CONSECUTIVOS DE PRECIPITACIÓN, CAUDAL Y VALORES MÁXIMOS CONSECUTIVOS DE TEMPERATURA

- El río Matadero presenta el mayor porcentaje de decrecimiento de caudales (-129.9%) para el período (1971-2005) respecto al valor medio de la serie de caudales mínimos anuales. En tanto que el río Yanahurco presenta mayor estabilidad de sus caudales mínimos con una

disminución del (-5.8%) en relación a la media de los caudales mínimos de 6 meses consecutivos, para el mismo período de análisis

- Los mayores porcentajes de decrecimiento están dados para los caudales mínimos de 1 y 2 meses consecutivos en las cuencas altamente intervenidas por el ser humano, situación que puede justificarse por el progresivo incremento de los usos del agua en las cuencas; los caudales de estiaje o mínimos son más sensibles a la variabilidad climática.
- Las cuencas que forman parte de reservas protegidas o parques nacionales (río Alao, río Yanahurco) evidencian un decrecimiento de caudales y precipitaciones pero en menor grado. Es por el estado de conservación de las mismas y la limitada presencia del hombre. No obstante de que las precipitaciones y temperaturas reflejan un decrecimiento e incremento respectivamente.
- El análisis de precipitaciones consecutivas refleja el decrecimiento general, a excepción de las cuencas orientales del río Quijos y Yanahurco para 1 y 2 meses. Los factores f_j para las cuencas orientales son bajos, lo que permitiría afirmar una uniformidad en las precipitaciones; pese a que no se reflejan en los caudales. De manera particular los caudales del río Quijos tienen un decrecimiento, en parte por los trasvases hacia la cuenca del río Guayllabamba.
- Es evidente que la temperatura se incrementa, es así que en todas las estaciones en análisis los factores f_j son positivos, con incrementos porcentuales considerables como en la cuenca del río Matadero con valores mayores al 8% en función del promedio de la serie de temperaturas máximas de 6 meses consecutivos.

- Las temperaturas máximas presentan cierta estabilidad y menor tendencia a incrementarse en el caso de las cuencas con menor índice de intervención humana, así por ejemplo la cuenca del río Alao tiene un mínimo incremento de (0.9%).

DE LOS CAUDALES MÍNIMOS CONSECUTIVOS ASOCIADOS A UN PERIODO DE RETORNO

- En general, las tasas de disminución de los caudales mínimos en relación al caudal medio de las series (1971-2005) son más drásticas y más altas para 1 mes. Estas tasas disminuyen su proporción en función del número de meses que se vayan incluyendo en el análisis, ya que se integran valores de caudal que pertenecen a la época de invierno en las cuencas y por ende tienen un mayor valor medio.

RESPECTO A LAS ÁREAS BAJO LAS CURVAS DE DURACIÓN GENERAL ADIMENSIONALES:

- Las cuencas de la región litoral (río Alambi y Toachi) evidencia en un incremento mínimo de las áreas bajo las curvas de duración general adimensionales, este incremento está referenciado por las pendientes de las rectas ajustadas que fluctúan entre 0.01 y 0.32; en tanto que los ríos de la región oriental e interandina muestran un decrecimiento en los valores referenciales de la capacidad de autorregulación de la cuenca de drenaje (áreas bajo la curva de duración general); el decrecimiento que varía entre 0.20 y 0.75%.

DE LOS INDICADORES:

- Los indicadores de variabilidad climática (12) que se proponen para sustentar el presente estudio, han sido calificados en base a frecuencias relativa y absoluta es decir, de acuerdo al número de eventos que se presenten en toda la muestra de indicadores de las cuencas hidrográficas en estudio dando mayor validez a los indicadores que muestran decrecimiento para el caso de precipitaciones y caudales (evento SI).
- Los indicadores se evalúan en general mediante los factores de decrecimiento porcentual respecto a la media de la serie de datos (f_j) y con la pendiente de la recta ajustada por mínimos cuadrados, respecto a la variación multianual de datos (m).
- Las calificaciones asignadas para los indicadores muestran gran efectividad en las diversas clasificaciones; donde las precipitaciones mínimas consecutivas y anuales muestran un decrecimiento evidente, a excepción de las cuencas de la región oriental donde el régimen climático muestra una cierta uniformidad con tendencia de incremento. Asimismo es evidente y preocupante el notable aumento de la temperatura ambiente en los períodos de estiaje lo que justifica el incremento de los índices de evaporación y por ende la menor escorrentía superficial de los ríos.
- El indicador dado por la forma de las curvas de duración general adimensionales y su área bajo los caudales q_1 y q_2 , no muestran claridad en las diversas clasificaciones excepto en las cuencas orientales. Un evento a destacar ocurre en la cuenca del río Alao donde estas áreas guardan una tendencia a no variar en el tiempo lo que

indica que las condiciones de drenaje se mantienen. Las cuencas de la vertiente occidental tienden a incrementar el valor en este indicador, situación que puede justificarse por la ocurrencia de fenómenos de precipitación extrema, dando lugar a mayores volúmenes de agua en el río.

7.2. RECOMENDACIONES

- Es fundamental poder contar con información hidrométrica y meteorológica continua y de calidad para estudios futuros; para lo cual la gestión integral de estaciones por parte del INAMHI debería contar con mayor apoyo profesional y económico para de esta manera tener acceso a una información completa y válida.
- Para ampliar el análisis de la variabilidad climática y su afectación a los caudales mínimos en las diversas cuencas hidrográficas del Ecuador, se recomienda realizar estudios futuros con mayor número de estaciones hidrometeorológicas, considerando también el grado de conservación y preservación de las cuencas, el uso del suelo y sobretodo, referenciando de manera puntual la afectación de los usos consuntivos del agua y su incremento cronológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, L. (1992). El proyecto hidroeléctrico Paute y su problema hidrometeorológico. *POLITÉCNICA. Revista de información técnico-científica. Vol 17*
- APARICIO, F. (2001). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Limusa.
- BARRANTES, G. (2006). *Identificación y uso de variables e indicadores: conceptos básicos y ejemplos*. San José, Costa Rica.
- BREÑA, A., & JACOBO, M. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. México.
- CASTILLO, F. C. (2001). *Agrometeorología*. Barcelona.
- ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. (2008). *Estudio de Prefactibilidad Central Hidroeléctrica "Chanchán"*. Quito.
- ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. (2008). *Estudio de Prefactibilidad Central Hidroeléctrica "Nanegal"*. Quito.
- INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. *Anuarios Hidrológicos 1971-2005*. Quito.
- INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. *Anuarios Meteorológicos 1971-2005*. Quito.
- INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2005). Mapa de Isoyetas.
- IPPC, Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2007). *Cambio Climático: Las bases científicas y físicas*.
- KENNEDY, J., & NEVILLE, A. (1982). *Estadística para Ciencias e Ingeniería*. México.
- MONSALVE, G. (1990). *Hidrología en la Ingeniería*.

OMM, Organización Meteorológica Mundial. (1994). *Guía de Prácticas Hidrológicas*.

SGCAN, Secretaría General de la Comunidad Andina. (2007). *Acerca del Cambio Climático: Algunos indicadores*.

VILLACÍS, O., & ANDRADE, L. (1985). *Instructivo detallado de cálculos hidrológicos*. Quito : EPN.

WWO, World Meteorological Organization. (2004). *Water and disasters: Be informed and be prepared*. Geneva, Suiza.

ANEXOS

- ANEXO 1:** Mapas de las cuencas de drenaje
- ANEXO 2:** Series hidrometeorológicas mensuales
- ANEXO 3:** Programa CDG 1.07 (Líneas de código)
- ANEXO 4:** Series de caudales mínimos diarios anuales, áreas bajo las curvas de duración general adimensionales con probabilidad de excedencia asociada
- ANEXO 5:** Series de datos mensuales de precipitaciones y caudales mínimos y temperaturas máximas consecutivas.