

Variabilidad Climática y Caudales Mínimos en los Andes Ecuatorianos

Andrade L.*; Ríos C.**

* Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador
e-mail: laureano.andrade@epn.edu.ec

** Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador
e-mail: luis_riosc@hotmail.com

Resumen: El estudio de caudales bajos o mínimos toma cada vez mayor importancia en relación con la gestión del agua. Se analizan 6 cuencas hidrográficas de la región Andina ecuatoriana, para las cuales se generaron series en valores mínimos de precipitación y de caudal, y de temperatura máxima, en base a registros históricos de 9 estaciones meteorológicas y 6 hidrológicas. Se analizan las características físico – geográficas de las cuencas, se establecen los balances hídricos respectivos, se evalúa la duración general de los caudales mediante formas gráficas adimensionales y se determinan los coeficientes de regulación natural de las cuencas. El análisis de tendencias entre las series refleja la disminución de las precipitaciones y de los correspondientes caudales de los períodos de aguas bajas, así también el incremento de la temperatura máxima mensual. El análisis correlacionante entre las series muestra la existencia de dependencias entre las series de precipitación y caudales mínimos.

Palabras clave: Caudales mínimos, duración general de caudales, precipitación, temperatura y estiajes.

Abstract: Low and minimum flows studies are more relevant nowadays in the relation with water resources management. Based in the historical data of 9 meteorological stations and 6 hydrological stations in the High Andes of Ecuador, 6 watersheds are analyzed for which time series of minimum precipitation, discharge, and maximum temperatures are generated. Physical and geographic characteristics of the basins are analyzed, water balance studies are done, general duration of flows by using dimensionless analysis is evaluated and basin natural regulation coefficients are determined. Trend analysis between the series reflects the decrease in rainfall and associated flows for low water periods, as well as the increase in the maximum temperature increase monthly. Correlation analysis between sets shows the existence of dependencies between sets of precipitation and minimum flows.

Key Words: Low flows, flow duration curve, precipitation, temperature and droughts.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de caudales mínimos o de estiaje se asocia generalmente con el diseño de proyectos de aprovechamiento de agua potable, riego, generación hidroeléctrica, navegación, recreación, manejo y preservación de cuencas, protección de ecosistemas acuáticos. Maspor la alta demanda de caudales y la notable concurrencia por el recurso, incluso con miles de usuarios en áreas relativamente pequeñas (1), la gestión del agua debería iniciarse desde los planes de desarrollo regionales y locales, tomando en cuenta la protección del recurso hídrico; luego enfocarse en el aprovechamiento integrado del agua y no solo sectorial; y por supuesto, considerar la administración y operación de los diferentes sistemas existentes de aprovechamiento o uso del agua. En este amplio contexto, la determinación y aseguramiento de los caudales mínimos (incluyendo los ecológicos) debe priorizarse, así también la protección de la calidad del agua.

El resumen para los tomadores de decisiones del Grupo de Trabajo 1 - IPCC (2007), evidencia la ocurrencia de sequías más intensas y prolongadas en amplias áreas desde 1970, particularmente en los trópicos y subtropicos; y también, el incremento de los períodos secos, condicionados por las altas

temperaturas y por la disminución de las precipitaciones, agravando la sequía.

En el contexto indicado se analiza: la incidencia de la variabilidad climática a través de los registros de precipitación y temperatura; y, se evalúa la ocurrencia y severidad de los caudales mínimos, tema que en gran parte corresponde al Proyecto de Titulación, Ríos (2010).

2. MARCO CONCEPTUAL

Según Vladimirov (1990), la escorrentía de los ríos en el período de aguas bajas, que es producto principalmente de la disminución o ausencia de precipitación, toma el nombre de caudales mínimos o de estiaje y al período durante el cual se presentan estos caudales, se denomina estiaje o estío.

Smathkin (2001) establece que los caudales bajos son un fenómeno estacional y un componente integral del régimen de caudales de cualquier río, y en cambio, la sequía es un evento resultante de una precipitación menor a la normal, durante un período relativamente largo.

Indica además que los caudales bajos son normalmente aportaciones de las descargas subterráneas o aportaciones superficiales de lagos, humedales (páramos) o de glaciales, y

anota que los caudales bajos ocurren generalmente en la misma estación del año.

En relación con el régimen climático de la región Andina ecuatoriana, se destaca:

- La distribución estacional e interanual de la precipitación en el trópico de Sud América está condicionada por: la zona de convergencia intertropical (ZCIT); las masas de aire húmedas originadas en el Pacífico (oeste), en el Atlántico tropical (noreste) y en la cuenca Amazónica; y, por la cordillera de los Andes, que constituye una barrera física que incide en la ocurrencia y distribución espacial y temporal de las lluvias [9] y [15].
- En escala interanual el fenómeno océano – atmosférico de larga – escala y de baja frecuencia (El Niño) es el principal mecanismo de forzamiento de anomalías climáticas e hidrológicas en la zona [9] y [15].
- Las variaciones interanuales de la precipitación pueden ser considerables durante los fenómenos El Niño – Oscilación del Sur (ENSO), con lluvias torrenciales en la zona costera, que no llega a alturas superiores a 2 000 m s.n.m. [10] y [15].
- Los valles interandinos, localizados entre las Cordillera Occidental, y las Cordilleras Central y Oriental, soportan la influencia variada de masas de aire oceánicas y continentales, con dos períodos húmedos; febrero – mayo (muy lluvioso) y octubre – noviembre y dos períodos secos: junio – septiembre (más notable) y diciembre – enero [15].
- Las condiciones climáticas medias en Los Andes tropicales sufrieron cambios considerables durante el siglo XX; la temperatura aumentó en alrededor de 0.7 °C entre 1939 y 2006, en dependencia de la elevación y de la pendiente de las áreas; y, que este incremento permite entender las tasas de retroceso de los glaciares [16].

Varios autores referidos en [16] coinciden en que los ríos alimentados por páramos se caracterizan por tener un caudal base elevado, por la capacidad de retención de agua de los suelos y de la vegetación; y, que se enfrentan con la amenaza del cambio climático puesto que las temperaturas más altas ocasionarían mayores tasas de evapotranspiración y por consecuencia, una menor producción de agua de los páramos.

La ocurrencia junto con la variación espacial y temporal de los caudales mínimos pueden ser analizadas considerando los aspectos ya mencionados, en función de los escenarios propuestos por WMO (2009), que se presentan en forma de cubo Fig. 1.

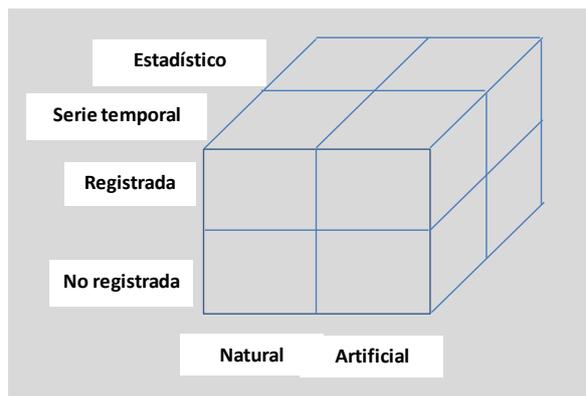


Figura 1. Esquema de cubo para analizar los caudales mínimos

En la gráfica anterior se definen los siguientes factores principales, en relación con las cuencas de estudio:

- La disponibilidad o no de estaciones hidrológicas con información representativa en la cuenca de interés (cuenca registrada o no);
- Los requerimientos operacionales de estudios hidrológicos, en función de la magnitud de las obras de aprovechamiento hídrico, que pueden demandar estudios estadísticos o análisis a mayor detalle mediante series temporales; y,
- La influencia antrópica en la cuenca, en función de los usos y derivaciones de agua, y también por el cambio en el uso del suelo, que puede demandar la conformación de series históricas de caudales, sumando los caudales derivados a los registros observados.

La combinación de los diferentes factores, define 8 escenarios potenciales, que condicionan el estudio de los caudales mínimos.

Por otra parte, los métodos de análisis de los caudales mínimos en relación con la determinación de sus características se sustentan en series de caudales históricos, y consisten básicamente en: curvas de duración general (CDG); análisis de frecuencias (AF) de eventos de caudales mínimos extremos, correspondientes a intervalos continuos de caudales bajos; y, separación de caudales base y caracterización de las curvas de recesión [5], [6], [8], [11], [12], [13] y [14].

Aplicaciones sobre AF a partir de series de caudales mínimos, para cuencas hidrográficas del sur ecuatoriano, se presentan en las referencias [1] y [2].

Entre los conceptos utilizados adelante se tienen los siguientes [12] y [14]:

- El coeficiente de regulación natural del caudal (ϕ_1);
- El coeficiente modular (k) como relación entre el caudal y su valor medio (valor adimensional); y,
- La probabilidad (p) de que un caudal sea igualado o excedido (seguridad), expresada en fracción respecto a 1.

El coeficiente de regulación natural del caudal se determina mediante la siguiente relación (ver Fig. 2).

$$\phi_1 = \int_0^1 p dk \quad (1)$$

Hay que considerar que ϕ_1 expresa el área bajo la CDG adimensional [12] y [14], en la cual la ordenada se representa con el coeficiente modular k , por lo que el coeficiente de regulación máximo será 1, para cuencas con regulación hipotética total, si el coeficiente modular $k = 1$.

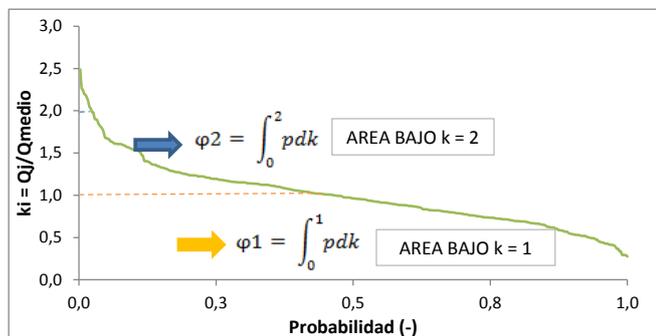


Figura 2. Áreas bajo la CDG adimensional

Con el fin de explicar la variación de los caudales en el tiempo, se determinó adicionalmente el coeficiente ϕ_2 , cuyo valor numérico representa el área bajo la CDG adimensional, considerando $k = 2$. La expresión de cálculo es por tanto:

$$\phi_2 = \int_0^2 pdk \quad (2)$$

3. METODOLOGÍA APLICADA

Como procedimiento de análisis de los caudales mínimos se aplicó la siguiente secuencia:

- Selección de 6 cuencas hidrográficas con disponibilidad de registros históricos, localizadas en los Andes ecuatorianos: 2 de la vertiente occidental (ríos Alambi y Toachi) y 4 de la vertiente oriental (ríos Quijos, Yanahurco, Alao y Matadero);
- Conformación de la base de datos, consistente en: características físico – geográficas de las cuencas; series mensuales de precipitación y temperatura; y, series de caudales medios diarios, todo para el período 1971–2005 (35 años), con el siguiente detalle global: 11 estaciones con registros de temperatura media mensual, 18 estaciones con datos de precipitaciones medias mensuales y 6 estaciones hidrométricas con registros de caudales medios diarios; la ubicación de las estaciones constituye la sección de cierre de cada una de las cuencas hidrográficas consideradas;
- Relleno de datos faltantes mediante técnicas de regresión y correlación a nivel zonal con otras estaciones;
- Validación de los registros históricos aplicando pruebas no paramétricas, como son las curvas de masas y la prueba de rachas;
- Caracterización climática con la definición de los periodos de estiaje para cada una de las cuencas de drenaje;
- Determinación de series de precipitación acumulada, con valores mensuales mínimos anuales, considerando 1, 2, 3, 4, 5 y 6 meses consecutivos; y, generación de series de temperaturas máximas anuales para intervalos de 1, 3 y 6 meses consecutivos;

- Obtención de series de caudales medios mensuales mínimos anuales, para intervalos de tiempo de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 meses consecutivos;
- Obtención de los coeficientes de regulación natural ϕ_1 y también ϕ_2 , para las cuencas hidrográficas;
- Análisis estadístico de las series generadas de caudales, evaluación de tendencias y de correlación entre series.

Para facilitar el análisis mediante la CDG, se generó una aplicación con la herramienta MACROS en Microsoft Excel, denominada CDG 1.05. El programa permite obtener resúmenes de caudales característicos, dibujar la gráfica y determinar las características ϕ_1 y ϕ_2 .

En base a la información meteorológica e hidrológica validada se establecieron balances hídricos anuales a nivel de cuenca hidrográfica; las láminas de evaporación real fueron estimadas mediante la relación de Turc.

Para el cálculo del balance hídrico anual se consideró a la cuenca como un sistema, con entradas y salidas de agua; y, se asumió despreciable la variación del volumen de almacenamiento de agua en la cuenca, en el período multianual 1971 – 2005, la ecuación utilizada es:

$$h_Q \cong h_p - h_e \quad (3)$$

Donde: h_Q : lámina de escurrimiento superficial media anual, (mm), h_p – lámina de precipitación anual media, (mm); y, h_e : lámina de evaporación anual media, (mm).

4. CUENCAS ANALIZADAS

En la selección de las cuencas se consideró los siguientes aspectos: la ubicación geográfica en la región Andina; el régimen climático; y, la disponibilidad de información climática e hidrológica.

La ubicación de las cuencas de estudio se muestra en la Fig.3, y sus características físico – geográficas principales se incluyen en la Tabla 1.

Las cuencas por localizarse en la región montañosa tienen suelos de origen volcánico, con capacidad de infiltración entre media y baja. Las áreas de drenaje varían entre 78.3 km² (cuenca del río Yanahurco) y 1526 km² (cuenca del río Toachi); las pendientes medias de las cuencas fluctúan entre 25.3 % (cuenca del río Yanahurco) y 65.5 % (cuenca del río Alambi), que corresponden a áreas fuertemente accidentadas y escarpadas; y, la elevación media de las cuencas está, en todos los casos, por sobre los 2 200 m s.n.m.

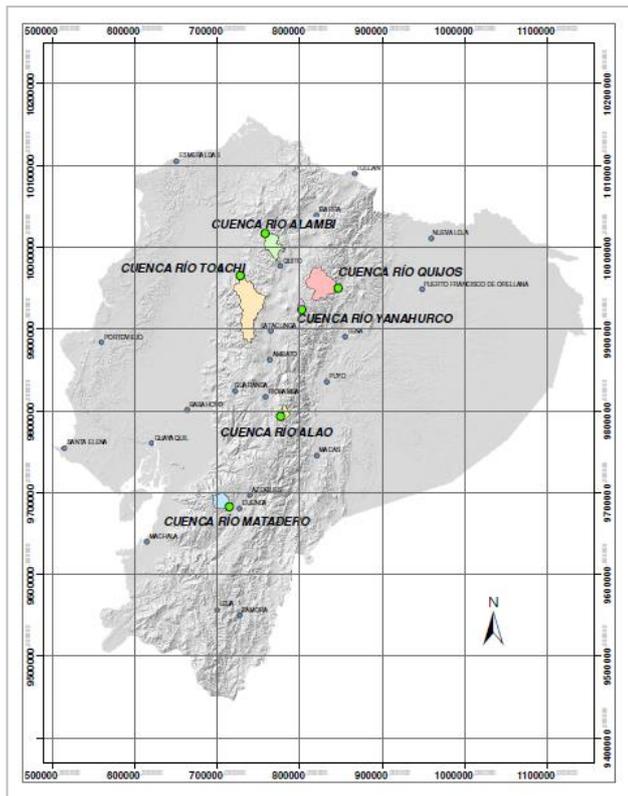


Figura 3. Ubicación de las cuencas hidrográficas

Tabla 1. Características físicas de las cuencas hidrográficas

Cuenca	X (m)	Y (m)	Área (km ²)	Scuenca (%)	Emedia (m s.n.m.)	Vertiente
Río Alambi	758166	10016593	442.0	65.5	2247.1	Occidental
Río Toachi	728005	9965099	1526.4	54.6	2845.4	Occidental
Río Alao	776892	9793144	108.0	59.4	3562.5	Oriental
Río Matadero	714912	9682700	304.0	55.1	3500.7	Oriental
Río Quijos	846638	9949710	932.5	31.2	3492.4	Oriental
Río Yanahurco	802637	9923470	78.3	25.3	3796.8	Oriental

En el cuadro anterior: X, Y: coordenadas de la sección de cierre (UTM WGS84 Z17S); Scuenca: pendiente media de la cuenca, (%) y, Emedia: elevación media de la cuenca, (m s.n.m).

En función de su ubicación las cuencas hidrográficas se identifican como:

- Cuencas con régimen climático occidental: ríos Alambi y Toachi;
- Cuencas con régimen climático Andino, con influencia principalmente mixta: ríos Alao y Matadero; y,
- Cuencas con régimen climático oriental: río Quijos y Yanahurco.

El uso del suelo de las cuencas [7] se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Cobertura vegetal en las cuencas hidrográficas

Cuenca	Páramo	Bosque	Cultivos y arbustos	Otros
	(%)	(%)	(%)	(%)
Río Alambi	2.0	47.7	50.2	0.1
Río Toachi	17.4	47.4	27.9	7.3
Río Alao	41.6	0.0	26.9	31.5
Río Matadero	85.5	3.2	9.7	1.5
Río Quijos	53.6	33.4	10.1	2.9
Río Yanahurco	100.0	0.0	0.0	0.0

El cuadro anterior muestra por una parte que la categoría páramo está presente, en porcentaje mayor al 41 % respecto al área, en las cuencas de la vertiente oriental (ríos Alao, Matadero, Quijos y Yanahurco), y, que la categoría Cultivos y Arbustos prevalecen en las cuencas de los ríos Alambi, Toachi y Alao (la categoría varios incluye principalmente áreas erosionadas, urbana y afloramientos rocosos).

5. ESTACIONES Y REGISTROS

Las estaciones hidrológicas principales consideradas en el análisis se muestran en la Tabla 3, en donde constan los siguientes códigos para las estaciones meteorológicas, de acuerdo al INAMHI: CP – climatológica principal, CO – climatológica ordinaria, PG – pluviográfica; y, PV – pluviométrica.

Tabla 3. Estaciones hidrometeorológicas principales

CUENCA	ESTACIÓN HIDROLÓGICA	ESTACIÓN METEOROLÓGICA
Río Alambi	Río Alambi en Churupamba (H136)	Nanegalito (M339) - PG La Perla (M213) - CP
Río Toachi	Río Toachi A.J. Pilatón (H161)	Las Pampas (M362) - CO Santo Domingo (M027) - CP
Río Alao	Río Alao en Hacienda Alao (H797)	Alao (M396)
Río Matadero	Río Matadero en Sayausí (H896)	El Labrado (M141) - CO Piscícola Chirimachay (M417) - PV
Río Quijos	Río Quijos en Baeza (H718)	Baeza (M215) - CP
Río Yanahurco	Río Yanahurco D.J. Valle (H722)	Papallacta (M188) - CO

Una vez conformada la base de datos en forma de series de precipitación, temperatura y de caudales medios diarios y mensuales para el período 1971-2005, se analizó la consistencia de la información mediante dobles masas y pruebas estadísticas de secuencias o rachas. Los resultados de las pruebas para las series de caudales medios anuales se indican en la Tabla 4.

Tabla 4. Prueba de secuencias para las series de caudales medios anuales

CUENCA	NA	NS	SERIE HOMOGÉNEA
Río Alambi	17	14	SI
Río Toachi	17	14	SI
Río Alao	17	16	SI
Río Matadero	17	16	SI
Río Quijos	17	15	SI
Río Yanahurco	17	14	SI

En la tabla anterior: NA - número de valores por sobre la mediana; y, NS - número de rachas en la serie.

6. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

La variación interanual y estacional de la precipitación y de la temperatura en el Ecuador se analizó de forma general en el numeral 2, sin embargo caben las siguientes puntualizaciones:

- El reconocimiento de que las cuencas hidrográficas tienen régimen climático occidental (del Pacífico), Oriental (del Atlántico tropical y Amazonía); y, régimen mixto, propio de las cuencas de la región montañosa de los Andes; y,
- La influencia del fenómeno ENSO, principalmente en las cuencas occidentales, en áreas con cotas menores a 2 000 m s.n.m.

La distribución de las lluvias en las cuencas - que se observa en la Fig.4 - presenta tres tendencias principales:

Clara presencia de masas de humedad occidentales en las cuencas de los ríos Alambi y Toachi, con un único período seco (junio - octubre);

Influencia prevaleciente de masas de humedad orientales en las cuencas de los ríos Alao, Quijos y Yanahurco; con un período de menores precipitaciones entre noviembre y febrero; y,

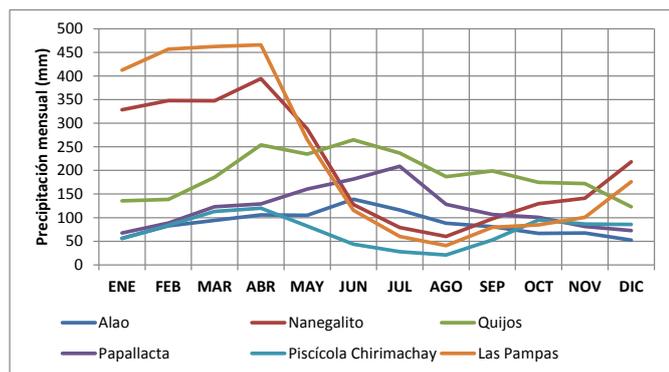


Figura 4. Variación mensual de la precipitación en las estaciones meteorológicas.

Régimen mixto de lluvias en la cuenca del río Matadero, con influencia occidental y oriental, con 2 períodos secos: junio septiembre (principal) y diciembre - enero.

La Tabla 5 muestra las características climáticas principales en función de los registros de las estaciones hidrometeorológicas, con lo cual se establece el período seco principal, y también se refiere la influencia del fenómeno ENSO con información de Rossel (1997).

Tabla 5. Características climáticas de las cuencas

Cuenca	Temperatura media anual	Precipitación anual media	Período seco principal	Influencia ENSO
	(°C)	(mm)		
Río Alambi	19.3	2552.4	Jun - Oct	Media
Río Toachi	23.5	2256.0	Jun - Oct	Media
Río Alao	7.9	1054.8	Nov - Feb	No
Río Matadero	16.3	867.6	Jun - Sep	No
Río Quijos	16.6	2326.8	Nov - Feb	No
Río Yanahurco	10.0	1448.4	Nov - Feb	No

Se propone el balance hídrico aproximado para cada una de las cuencas; ante la ausencia de información de evaporación real, se estimó esta característica mediante la relación de Turc, con datos de temperatura y precipitación. Las temperaturas y precipitaciones para las cuencas se evaluaron considerando la variación espacial y altitudinal de estas variables, con información de estaciones a nivel zonal. La lámina de escurrimiento se estableció en base al caudal medio anual de la cuenca; los valores obtenidos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Balance hídrico para las cuencas hidrográficas.

CUENCA	Lámina de precipitación anual	Temperatura media anual	Lámina de escurrimiento anual	Lámina de evaporación anual	Lámina de evaporación anual Turc	Caudal medio anual
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(m³/s)
Río Alambi	1757	16	1238	519	822	17.3
Río Toachi	1414	14	955	459	692	46.2
Río Alao	2777	9	2320	457	562	7.9
Río Matadero	1127	11	725	402	573	7.0
Río Quijos	1962	12	1495	467	636	44.2
Río Yanahurco	1220	8	834	386	495	2.1

7. SERIES HIDROMETEOROLÓGICAS

Las variables utilizadas en el análisis estadístico-probabilístico para evaluar la relación entre variables climáticas e hidrológicas representativas de los caudales mínimos son precipitación, temperatura, y caudal, todo en valores mensuales. Se utilizó además registros diarios de caudal de las estaciones hidrológicas.

Las series históricas se disponen como una matriz $X_{i,j}$, en donde el subíndice i representa el año y el subíndice j los meses.

La Tabla 7 indica a manera de ejemplo una serie de valores anuales característicos, definida como matriz $Z_{i,k}$; en donde i es el año al que corresponde el registro y k es el número de meses consecutivos considerados (entre 1 y 6).

Tabla 7. Matriz de valores críticos anuales

AÑO	NÚMERO DE 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	$Z_{n,1}$	$Z_{n,2}$	$Z_{n,3}$	$Z_{n,4}$	$Z_{n,5}$	$Z_{n,6}$

Las relaciones para la determinación de los valores críticos de las series de precipitación, caudal y temperatura se incluyen como Apéndice A.

8. DURACIÓN GENERAL DE CAUDALES

A través de la duración general o permanencia de caudales se determinan los gastos correspondientes al rango de probabilidades de excedencia entre 50% y 90%, tomando en cuenta la práctica hidrológica nacional. Esta experiencia considera como caudales limitantes del uso del recurso hídrico (caudales mínimos) a los valores correspondientes a

las frecuencias 80% (para riego), 90% o 95% (para abastecimiento humano).

Las ventajas y desventajas que se presentan al determinar los caudales mínimos en base a la duración general son [2]:

- Se considera solo datos históricos y la distribución de probabilidades utilizada es en general empírica;
- Los resultados dependen en mucho del tamaño de la muestra (representatividad temporal); y,
- No toma en cuenta la estacionalidad de los caudales, sino implícitamente;

Los caudales medios diarios y mensuales fueron procesados para todo el período (1971 – 2005) y también para cada uno de los años, mediante curvas de duración general, con lo que se obtuvo los caudales mínimos con probabilidad de excedencia. En la Tabla 8 se presenta de forma esquemática los valores de la correspondiente matriz $Q_{i,p}$, en donde i es el año, y p , la probabilidad de excedencia en %.

Tabla 8. Matriz de caudales medios y mínimos anuales de la CDG

AÑO	CAUDALES MEDIOS Y MÍNIMOS ANUALES					
	Q ₉₀	Q ₈₀	Q ₇₀	Q ₆₀	Q 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}

En la tabla anterior: $Q_{i,90}$: caudal diario con probabilidad de excedencia del 90%, del año i , (m^3/s); $Q_{i,80}$: caudal diario con probabilidad de excedencia del 80%, del año i , (m^3/s).

Los caudales característicos de la CDG en valores diarios del período (1971 – 2005), para las cuencas hidrográficas, se muestran en el Apéndice B, en tanto que las formas gráficas correspondientes se presentan en valores específicos en la Fig.5.

La CDG en caudales específicos posibilita conocer la producción de caudales de las cuencas, sin embargo su forma dependerá de la mayor o menor humedad de la cuenca, por lo que se analiza las CDG en valores adimensionales de caudal, con ayuda del coeficiente modular (k), como se muestra en la Fig. 6 y en la Fig. 7, en donde se incluye la tendencia medias para las cuencas occidentales y orientales.

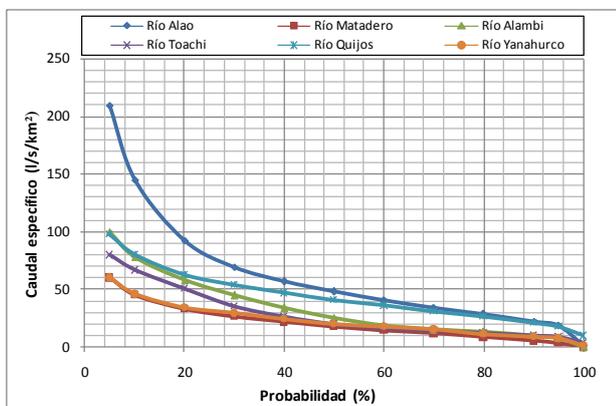


Figura 5. CDG de caudales específicos para las cuencas hidrográficas

De la gráfica anterior se desprende:

- La superposición de las curvas correspondientes a las cuencas de los ríos Matadero y Yanahurco, en todo el rango de probabilidades;
- La coincidencia en las curvas correspondientes a las cuencas de los ríos Toachi, Matadero, Alambi y Yanahurco, en el tramo con probabilidad de excedencia mayor a 60 %; y,
- La coincidencia en las curvas de las cuencas de los ríos Quijos y Alao, en el rango mayor al 70 %.

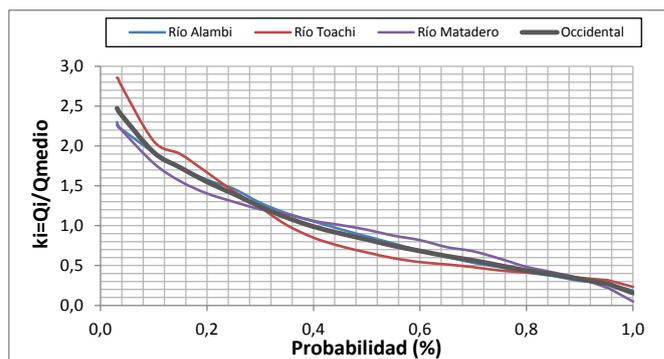


Figura 6. CDG adimensionales para las cuencas occidentales

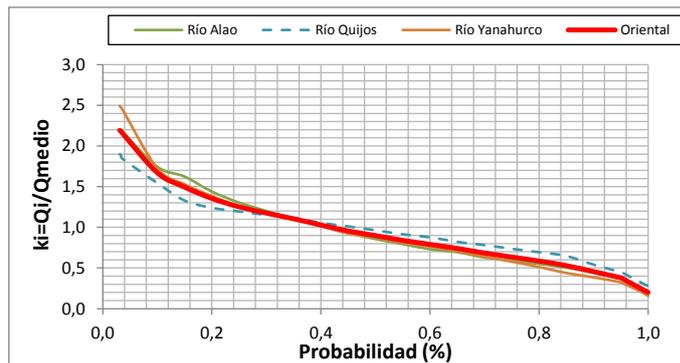


Figura 7. CDG adimensionales para las cuencas orientales.

Las coordenadas de las dos CDG adimensionales muestra la mayor humedad para las cuencas orientales (línea en rojo), respecto a las cuencas occidentales (línea negra), considerando el área $\phi 1$, bajo la ordenada $k = 1$ (ver Fig. 8). La información de soporte consta como Apéndice C.

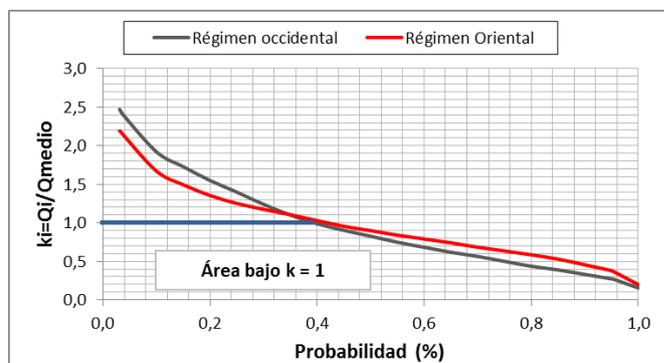


Figura 8. CDG adimensionales para las cuencas occidentales y orientales

El valor ϕ_1 medio para las cuencas con influencia de las masas de humedad occidentales, es del orden de 0.73; y, para las cuencas con influencia oriental, alcanza 0,76. Esta condición se podría asociar con las mayores precipitaciones en el período con estiaje, que presentan generalmente las cuencas bajo influencia oriental de lluvias. Este rango de valores corresponde a regiones boscosas con presencia de lagos entre el 5 y 10 % del área de drenaje [12]. El valor ϕ_2 , toma valores del orden de 0.93 para todas las cuencas.

9. TENDENCIA DE LAS SERIES ANUALES

En base a las series generadas de precipitación, caudal mínimo y temperatura máxima, se analizó la variación temporal, para el periodo 1971-2005. Como metodología se utilizó la tendencia lineal para las series, como se muestra en la Fig. 9, para la estación Las Pampas, y en la Fig. 10, para los caudales mínimos de la estación hidrométrica Toachi A.J. Pilatón (en los dos casos para la cuenca del río Toachi).

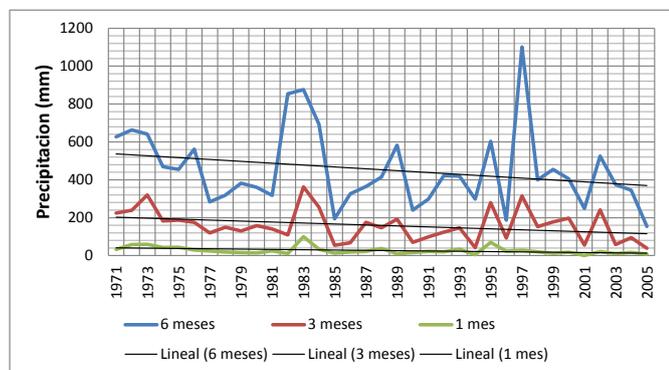


Figura 9. Decrecimiento de las precipitaciones de la estación Las Pampas (cuenca del río Toachi).

En la Tabla 9 se incluye en resumen, la tendencia para las variables hidrometeorológicas analizadas, negativa (disminución) y positiva (aumento).

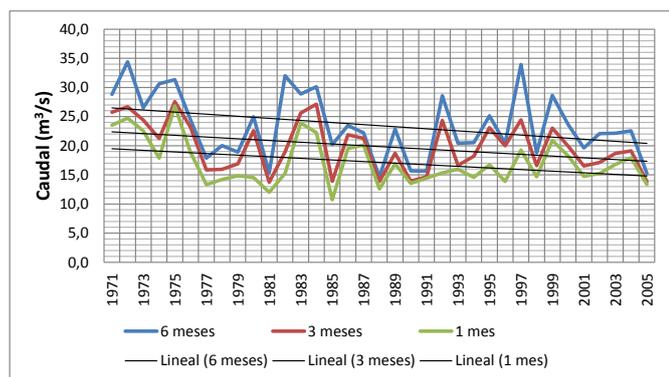


Figura 10. Decrecimiento de los caudales mínimos – río Toachi

Tabla 9. Variación (%) de las variables hidrometeorológicas consideradas

CUENCA	PRECIPITACIONES MÍNIMAS			CAUDALES MÍNIMOS			TEMPERATURAS MÁXIMAS		
	1 MES	3 MESES	6 MESES	1 MES	3 MESES	6 MESES	1 MES	3 MESES	6 MESES
Alambi	-83	-60	-40	-51	-36	-24	3	3	6
Toachi	-75	-40	-30	-22	-22	-24	0	1	2
Alao	-36	-44	-27	-18	-45	-32	6	4	1
Matadero	-100	-40	-125	-79	-54	-42	8	5	4
Quijos	9	0	-11	-16	-15	-18	5	5	5
Yanahurco	0	-27	-29	-45	-33	-6	14	14	12

El Apéndice D muestra la información correspondiente, de donde se concluye lo siguiente:

- De manera general las series de precipitación observan un disminución de los valores, siendo más notable para el intervalo de 6 meses consecutivos de precipitaciones mínimas; las series de las estaciones representativas de las cuencas de los ríos Quijos y Yanahurco, muestran una tendencia contraria para intervalos de tiempo de 1 mes y de 3 meses consecutivos (zona con clara influencia oriental de lluvias);
- Las series de caudales mínimos en todos los casos presentan disminución de los valores (para intervalos de 1, 3 y 6 meses consecutivos);
- Las series de temperaturas máximas (17 de las 18 analizadas), observan el incremento de la temperatura, en valores entre 0,1 y 1,4 °C en el período.

Con el fin de contrastar la información anterior se aplicó a las series la prueba estadística para medias, considerando la hipótesis nula, de que la diferencia entre los valores medios de las muestras es igual a 0. Los resultados se muestran en la Tabla 10. Para el efecto se dividió a las series en dos, la primera correspondiente al período 1971 – 1988, y la segunda con los datos del período 1989 – 2005.

Tabla 10. Resultados de la prueba de diferencia de medias (si – se rechaza la hipótesis nula ; no – no se rechaza la hipótesis nula).

CUENCA	PRECIPITACIÓN ACUMULADA			CAUDALES MÍNIMOS			TEMPERATURA
	1 MES	3 MESES	6 MESES	1 MES	3 MESES	6 MESES	6 MESES
Alambi	si	si	si	si	no	no	si
Toachi	si	no	no	no	no	no	no
Alao	no	no	si	no	no	si	si
Matadero	si	si	si	si	si	si	si
Quijos	no	no	no	no	no	si	si
Yanahurco	no	no	no	si	no	no	si

10. RELACIONES CAUDALES MÍNIMOS – PRECIPITACIONES MÍNIMAS MENSUALES

Si bien los caudales de estiaje y los caudales mínimos, dependen del afloramiento de aguas subterráneas, y de los aportes de lagos, humedales y glaciales (en función del grado de cobertura en la cuenca), mas es claro que la distribución estacional principalmente de las precipitaciones en la zona Andina condiciona los períodos de ocurrencia de aguas bajas, e incluso la magnitud de estos caudales.

Para evaluar este condicionamiento se analizan conjuntamente las series de precipitación mínima y de caudales mínimos, a través de matrices correlacionantes. En la Tabla 11 se muestran los resultados, como ejemplo para las cuencas de los ríos Alambi, Matadero y Yanahurco: en azul claro se presentan los coeficientes de correlación mayores a 0.6; y, en color gris constan los coeficientes de correlación entre 0.3 y 0.6.

CUENCA	VARIABLE		PRECIPITACIÓN MÍNIMA			CAUDAL MÍNIMO		
			1 mes	3 meses	6 meses	1 mes	3 meses	6 meses
Alambi	Precipitación mínima	1 mes	1,00					
		3 meses	0,83	1,00				
		6 meses	0,53	0,78	1,00			
	Caudal mínimo	1 mes	0,80	0,79	0,68	1,00		
		3 meses	0,63	0,81	0,69	0,82	1,00	
		6 meses	0,39	0,63	0,81	0,67	0,84	1,00
Matadero	Precipitación mínima	1 mes	1,00					
		3 meses	0,66	1,00				
		6 meses	0,65	0,83	1,00			
	Caudal mínimo	1 mes	0,55	0,65	0,69	1,00		
		3 meses	0,50	0,67	0,64	0,89	1,00	
		6 meses	0,58	0,62	0,69	0,85	0,88	1,00
Yanahurco	Precipitación mínima	1 mes	1,00					
		3 meses	0,61	1,00				
		6 meses	0,26	0,62	1,00			
	Caudal mínimo	1 mes	0,25	0,37	0,32	1,00		
		3 meses	0,32	0,48	0,24	0,80	1,00	
		6 meses	0,40	0,52	0,41	0,66	0,73	1,00

Tabla 11. Matriz correlacionante entre series de precipitaciones mínimas y de caudales mínimos anuales.

En base a los datos de la tabla anterior se concluye la existencia de dependencia entre las series de precipitación, entre las series de precipitación y caudal, y, entre las propias series de caudales mínimos.

En general, las correlaciones son mejores para las cuencas con influencia climática occidental (del Pacífico), puesto que el período de estiaje es más largo y severo (5 meses, entre junio y octubre); en tanto, en las cuencas con influencia oriental, el estiaje es más corto (4 meses, entre noviembre y febrero), y generalmente menos pronunciado.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El régimen climático estacional e interanual de los Andes ecuatorianos ha sido estudiado por varios autores, quienes destacan:

- Que la distribución estacional e interanual de la precipitación está condicionada por fenómenos de escala regional, como son: la ZCIT; la circulación del aire que transporta humedad del Pacífico, del Atlántico Norte y de la Amazonía; y, el ENSO. Todo condicionado por la presencia de la cordillera de los Andes. Como consecuencia, los valles interandinos presentan por lo general dos períodos secos: junio – septiembre (más pronunciado) y diciembre – enero.
- Los métodos de análisis de los caudales mínimos se sustentan en series históricas de caudales y consisten en la aplicación de CDG, AF de series de caudales mínimos, y curvas de recesión. Se aplican además las CDG adimensionales, en las cuales en lugar del caudal absoluto o específico, se considera el coeficiente modular k, que es la relación entre el caudal y su valor medio anual.

Las cuencas estudiadas son 6, y se localizan en la región intermontañosa y en las laderas exteriores de los Andes, con régimen climático occidental, mixto y oriental. Los suelos de las cuencas son por lo general de origen volcánico con capacidad de infiltración entre media y baja. El uso del suelo corresponde a páramo, bosques y cultivos, con gran variación de cobertura de una cuenca a otra. Las áreas de drenaje varían entre 78.3 km² y 1 526 km², y, sus pendientes son fuertemente accidentadas y escarpadas. La elevación media está por sobre los 2 200 m s.n.m

La información básica hidrometeorológica, corresponde principalmente a 9 estaciones meteorológicas; y, 6 estaciones hidrológicas, las ubicaciones de estas últimas constituyen las secciones de cierre de las cuencas estudiadas.

El balance hídrico anual generado para las cuencas muestra que la precipitación varía entre 1 127 mm (río Matadero) y 2 777 mm (río Alao); la lámina de evaporación estimada mediante la ecuación de Turc, está entre 369 (río Yanahurco) y 525 mm (río Alambi); y, el escurrimiento anual determinado a partir de los caudales medios anuales, varía entre 721 mm (río Matadero) y 2 281 mm (río Alao).

Se conformaron series mínimas anuales de: precipitación acumulada para períodos de 1 - 6 meses; y, de caudales medios para períodos de 1 - 6 meses consecutivos. Se generaron además series de temperaturas máximas, a partir de los valores medios de 1, 3 y 6 meses consecutivos.

La duración general de caudales en valores adimensionales, permite agrupar las formas de las curvas en dos, que corresponden a las cuencas con influencia principal de masas húmedas occidentales y orientales.

El coeficiente de regulación natural ϕ_1 es del orden de 0.73 para las cuencas occidentales y 0.76 para las orientales, lo cual indica que las cuencas con régimen de lluvias oriental (bajo influencia de las masas de aire originadas en el Atlántico tropical y en la Amazonía), presentan un caudal base mejor distribuido en el tiempo.

El análisis de tendencia de las series anuales de precipitaciones y caudales mínimos y de temperaturas máximas, reflejan la disminución de los valores en el período 1971 - 2005. Las series de temperaturas máximas (17 de las 18) presentan aumentos de entre 0.1 y 1.4 °C.

Se aplicó a las series la prueba estadística de diferencia de los valores medios, y se determinó que en el 48 % de los casos (20 de 42 series analizadas) se rechaza la hipótesis nula: diferencia de medias = 0.

El análisis correlacionante entre series de precipitaciones mínimas y caudales mínimos, muestra la existencia de dependencias entre las variables analizadas. En general, se obtienen mejores coeficientes de correlación para las cuencas con influencia occidental de lluvias, aspecto que podría explicarse por observar períodos de estiaje más pronunciado (largo y severo) en relación con el período de caudales bajos de las cuencas con influencia oriental de lluvias.

Se recomienda ampliar el análisis desarrollado considerando otras cuencas hidrográficas en la región Andina. El principal limitante del estudio es la insuficiencia de estaciones meteorológicas por sobre los 3 000 m de altitud, aspecto que redundaría en la obtención de series climáticas que representen de mejor manera el clima estacional e interanual de las partes altas de las cuencas Andinas.

12. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Si bien el presente análisis está limitado por la insuficiente representatividad de las estaciones meteorológicas consideradas, que redundaría en la evaluación del régimen estacional e interanual de la precipitación y temperatura de las cuencas, sin embargo, el objetivo principal del trabajo se ha alcanzado, esto es mostrar la gran dependencia entre la

variabilidad climática y los caudales mínimos en las cuencas estudiadas, ubicadas en los Andes ecuatorianos.

La bibliografía analizada en general establece que los factores que inciden en el régimen de caudales mínimos son principalmente el afloramiento de las aguas subterráneas, y la retención y aportaciones de lagos y humedales (por su capacidad reguladora), más la dependencia analizada entre precipitaciones y caudales en los períodos de estiaje, muestra justamente, que la ocurrencia y distribución de las lluvias estacionales (en el período de estiaje) incide directamente en la presencia y variabilidad de los caudales mínimos de los ríos, a través del escurrimiento superficial.

13. REFERENCIAS

- [1] L. S. Andrade, "El proyecto hidroeléctrico Paute y su problema hidrometeorológico". Revista Politécnica, vol. 17, 1992a.
- [2] L. S. Andrade, "Método de cálculo de los caudales mínimos para el sur ecuatoriano". Revista Politécnica, vol. 17, 1992b.
- [3] B. De Viebre y X. Coello, "Caracterización de la demanda hídrica", Proyecto manejo integrado de los recursos hídricos de la hoya de Quito, UICN-SUR, 2008.
- [4] IPCC, (2007). "Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis". Contribution of working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [5] Guía de Practicas Hidrológicas, OMM, No. 168, pp. 413 – 417; 407 – 503.
- [6] *Manual on Low – Flow, Estimating and Prediction, Operational Hydrology*, Report No. 50, WMO – No. 1029, IHP/HWRP.
- [7] L. E. Ríos, "Incidencia de la variabilidad climática en los caudales mínimos del Ecuador", Proyecto de Titulación, EPN, 2010.
- [8] G., Poveda et al., "Estimación de caudales mínimos para Colombia mediante regionalización y aplicación de las curva de recesión de caudales", Meteorología Colombiana, No. 6, pp. 73 – 80, 2002.
- [9] G., Poveda and J. Mesa, "Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large – scale ocean – atmospheric phenomena", Journal of Climate, vol. 10, pp. 2690 – 2702, 1996.
- [10] F. Rossel, "Influencia de El Niño sobre los regimenes hidropluviométricos del Ecuador". INAMHI, ORSTOM, pp.203, 1997.
- [11] V. U. Smakhtin, "Low flow hydrology: a review", Journal of Hydrology, vol. 240, pp. 147 – 186, 2001.
- [12] D. L. Sokolovski, "Esgurrimento fluvial". Ed. Gidrometeoizdat, pp. 249 - 253, 1968 (en ruso).
- [13] W. J. Viessman and L. L. Lewis, "Introduction to hydrology", Ed. Pearson – Prentice Hall, 2012, pp. 68 – 70.
- [14] A. M. Vladimirov, "Cálculos hidrológicos". Ed. Gidrometeoizdat, pp. 201 - 241, 1990 (en ruso).
- [15] M. Vuille, et al., "Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies", Journal of Climate, vol. 13, pp. 2520 – 2535, 2000.
- [16] M. Vuille, "El cambio climático y los recursos hídricos en los Andes tropicales". BID, IDB Technical Note; 517, pp. 29, 2013.

Apéndice A.DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE LAS SERIES.

Apéndice B. CAUDALES MEDIOS Y MÍNIMOS, TOMADOS DE LAS CDG DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS, PERÍODO (1971 – 2005).

Apéndice C. COORDENADAS DE LAS CDG ADIMENSIONALES (k) – PERÍODO (1971 – 2005).

Apéndice D. TENDENCIAS DE LAS SERIES ANUALES – PERÍODO (1971 – 2005).