

ANÁLISIS REGIONAL DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES DE LA CUENCA DEL RÍO PATÍA

REGIONAL ANALYSIS OF MONTHLY AVERAGE DISCHARGES AT THE PATIA RIVER BASIN

Mario Erik Castro Gama¹, Luis Eduardo Machado Hernández²

¹Unesco - Ihe 2611 Ax Delft, the Netherlands

^{1 y 2}Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá)

Cra. 45 No. 26-85 Bogotá, D.C.

mariocastrogama@gmail.com¹, leduardo.machado@gmail.com²

Castro, M. y Machado, L. 2008. Análisis regional de caudales medios de la cuenca del río Patía. Boletín Científico CCCP, (15): 123-138.

RESUMEN

Dentro del territorio nacional existen muy pocas cuencas que no procedan o correspondan a la vertiente de las cuencas de los ríos Magdalena, Cauca, Orinoco y Amazonas. En cierta medida a esas cuencas autónomas de estos grandes sistemas hídricos no se les presta atención, más aún por estar ubicadas en zonas aisladas del país, por fuera de la Región Andina. La cuenca del Patía es una de ellas, ubicada en el Pacífico colombiano, y, sin embargo, dada su magnitud (área aproximada = 22000 km²), muy poco se conoce acerca del comportamiento de los caudales de sus afluentes. Existen publicaciones que han intentado presentar las características más representativas de los caudales de esta cuenca. Sin embargo, el análisis sólo se hace en algunos puntos sobre el cauce principal del Patía, basado en un modelo indirecto lluvia-escorrentía, sin tener en cuenta la información hidrológica de caudales. Debido a esto surgió el interés de realizar una investigación que mostrara a ciencia cierta y en detalle, con base en información hidrológica, los patrones de distribución de caudales en esta cuenca.

Palabras clave: hidrología regional, Pacífico colombiano, caudales medios mensuales, río Patía.

ABSTRACT

In Colombia there are few river basins that could not be represented inside bigger hydrosystems like Magdalena, Cauca, Orinoco and Amazonas. This so called automata systems are pretty overlooked by scientist cause they usually become a very far central urban population cities. Patia basin is one of those, located right in the south of the Colombian pacific, and should be seen that it drains something like 22000 km². Actually in the country exist very few investigation related with the behavior of monthly average flows in this river and his tributaries.

A preview publication was developed trying to fulfill the basic characteristics of the mean multianual stream flows of the river basin. However, they've failed to accomplish the task due to little issues. The first one, the analysis was made only taking into account a few points of the main stream of the Patia basin; second, the model used corresponds to an indirect rainfall-stream flow one, without comparing it to the whole series of data available. So that became the main reason of exploring even more deep the temporal configuration of the stream flows in that basin. It could be noticed that many investigations could be elaborated further for the physical understanding of the stream flows in this region of the country.

Key words: Regional hydrology, Colombian Pacific, mean monthly streamflows, Patia River Basin.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es presentar mediante herramientas determinísticas el comportamiento de los caudales medios mensuales en el área del río Patía, sobre el Pacífico colombiano. Hasta la fecha se conoce sólo un trabajo de características similares, que presenta una propuesta para la determinación del caudal en la desembocadura del Patía sobre el océano Pacífico (Restrepo, 2003). Adicionalmente muestra la tendencia central de variación con base en un modelo de lluvia escorrentía, sin embargo, los valores hallados no se comparan con registros existentes sobre el cauce principal del Patía o sobre los afluentes.

De allí surgió la idea de desarrollar un análisis un poco más amplio del comportamiento de los caudales en esta cuenca del territorio colombiano, con aproximadamente 22000 km² de área de drenaje.

Durante los últimos años la producción científica en hidrología se ha enfocado principalmente al análisis y producción de modelos que integren herramientas matemáticas para la simulación de procesos físicos en cuencas colombianas. Dado que esto representa un gran aporte a la ciencia se ha dejado a un lado la producción en temas relacionados como variabilidad de tipo determinístico que pueda ser relevante y en realidad muy pocos aportes se han llevado a cabo en este sentido, pues la academia orienta el rumbo de los estudiantes de postgrado hacia la elaboración de aportes empleando modelos guiados por datos, mientras que en cierta forma los modelos determinísticos descriptivos tradicionales son subestimados en muchos sentidos. De este punto en particular parte el interés de presentar de manera amplia el comportamiento cualitativo y cuantitativo de los caudales en el río Patía.

ÁREA DE ESTUDIO

Se ha estudiado el área de la cuenca del río Patía, localizada en el sector suroccidental de Colombia. Cubre parcialmente los departamentos de Cauca y Nariño, en un área aproximada de 22000 km². Para llevar a cabo esta investigación se empleó información de dos tipos: (1) Geográfica, como mapas y planos de localización generales y para caracterización geológica; (2) Hidrológica, en forma de series de tiempo de caudales.

El análisis se extendió hasta la franja del río Patía que no presenta influencia de la marea del océano Pacífico, de ahí que no se tuvo en cuenta la parte baja de la cuenca en su desembocadura.

Información cartográfica empleada

Toda la información cartográfica fue obtenida del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac) y del Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). Dado que la información cartográfica recopilada es posterior al año 2004, se cuenta con la información más actualizada disponible para cualquier tipo de análisis.

- La ubicación general de la cuenca en el territorio nacional se obtuvo a partir de planos departamentales Igac de escala 1:500.000.
- La delimitación de cuencas y subcuencas fue realizada a partir de planos Igac de escala 1:100.000.
- La caracterización de la geología regional se elaboró a partir del Mapa Geológico de Colombia (MGC).

METODOLOGÍA

Como base para la estimación de las características regionales de los caudales en la cuenca del río Patía se establecieron las metodologías que garanticen la calidad de la información y realizar el análisis determinístico de las series, a saber:

Información hidrológica adquirida

Como primera medida la información correspondiente a la vertiente del Pacífico colombiano, fue posible recopilar información disponible de una fuente, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). La información recopilada correspondiente a caudales medios mensuales, fue adquirida en su totalidad para 28 estaciones. De éstas, 27 son limnigráficas y sólo una es limnimétrica (Figura 1). Unas de las estaciones (S1) no corresponde a la cuenca y se empleó para verificar la posible diferencia del comportamiento con respecto a una cuenca vecina de la vertiente del Pacífico.

La información posee períodos de registro variable entre 1956 y 2006. El período de mayor homogeneidad entre las series comprende los años 1996 a 2006. El listado de estaciones recopiladas se presenta en la Tabla I. Las series han sido numeradas para todo el documento de acuerdo con esta tabla.

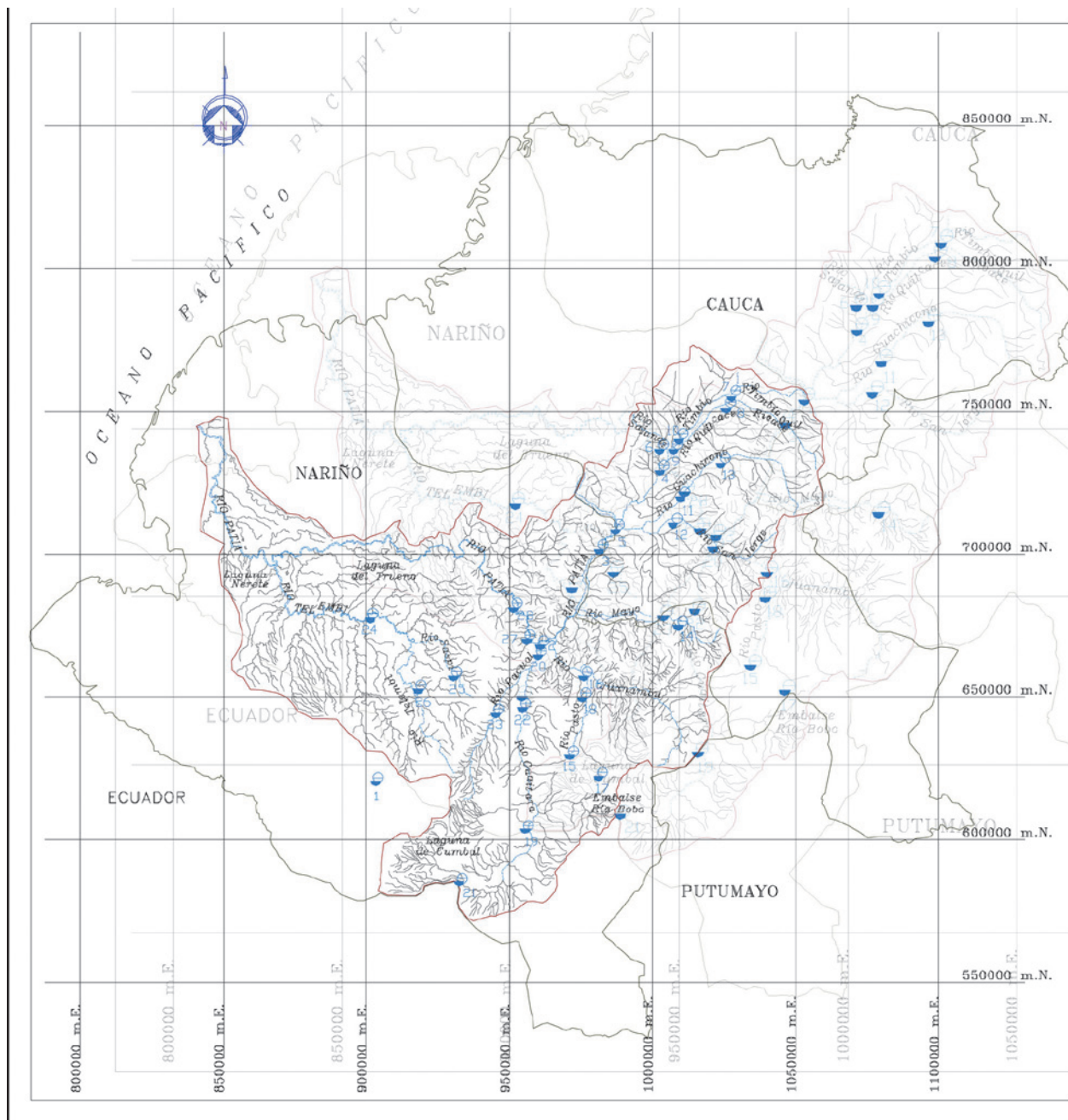


Figura 1. Ubicación de estaciones de medición de caudales en el río Patía.

Dada la cantidad de información fue necesario llevar a cabo un análisis de consistencia de las series para verificar su calidad y correlación.

Análisis de consistencia

Dado que las series pueden contener errores en la medición se validó la información hidrológica adquirida mediante el análisis de consistencia.

Como primera medida se verificó la correlación de las series. Esto permitió establecer sectores o

subcuencas con comportamientos similares. Para esto se elaboraron gráficas de dispersión cruzada o gráficas de dispersión S-S, empleadas frecuentemente para observar tendencias claras entre las series. Cabe señalar que para los análisis de correlación cruzada la estación Ricuarte presentó un período homogéneo muy corto y simultáneo con tan solo ocho de las series. Este análisis permite además hallar valores atípicos, que se encuentran muy alejados de la tendencia central y que por tanto pueden

ser considerados *outliers*. No se presentan aquí las Gráficas S-S generadas, pues por la cantidad sería imposible incluirlas en este artículo; sin embargo, se aclara que no se hallaron discrepancias o divergencias inexplicables del comportamiento central.

Con base en las tendencias halladas se llenaron los datos faltantes a partir de las series que otorgaran la mejor correlación respecto de las series origen. En caso de no existir dato en la estación de llenado con el primer ajuste se procedió a la serie que presentó el segundo mejor ajuste. Si la serie que corresponde al segundo mejor ajuste no posee información para llenado, se procedió a emplear la serie del tercer ajuste.

Las series completas por correlación permitieron acumular los valores medios mensuales para determinar su comportamiento en gráficas de masa. En general, estas gráficas y sus tendencias permiten determinar si las series son consistentes o no.

Gráficas de dispersión S-S

Son gráficas en las cuales se presentan dos series que se representan en cada uno de los ejes X o Y. Las series deben corresponder temporalmente, es decir el valor de X y el valor de Y deben corresponder al mismo mes del mismo año. Para llevar a cabo esta tarea se llamó a las series con el prefijo S y el numeral de la primera columna de la Tabla I.

Estas series pueden ser ajustadas mediante el empleo de análisis de regresión. Los correspondientes coeficientes de correlación varían según el tipo de regresión empleado.

Llevar a cabo cualquier análisis con las series requiere un esfuerzo informático grande, pues fueron elaborados tres análisis de regresión a seguir: lineal, potencial y exponencial (750 figuras/regresiones x 3 regresiones \approx 2250 figuras). Se estableció que el análisis de regresión de tipo lineal otorgaba mejores resultados que los otros dos. En la Figura 2 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos.

Llenado de datos faltantes de series de caudal medio mensual

Dado que algunas series presentaron valores incompletos, se hizo el llenado de datos empleando para tal fin el análisis de regresión lineal entre las series, usando la ecuación:

$$Q_y = m \cdot Q_x - b \quad (1)$$

donde,

Q_x es la precipitación conocida en la estación X para el mes dado.

m es la pendiente de la recta.

b es la ordenada de la recta.

Q_y es la precipitación hallada en la estación Y para el mes dado.

Del resultado de este análisis era posible llevar a cabo el llenado de datos de las series dado que los coeficientes de correlación fueron superiores a 0.50 en la mayoría de los casos para el mejor ajuste.

Los valores de pendientes y ordenadas para cada caso se presentan en la Tabla II. Los valores en rojo corresponden al mejor ajuste entre series, los valores en verde al segundo mejor ajuste hallado y los valores en azul al tercer mejor ajuste. El llenado de datos faltantes se realizó de la siguiente manera:

(i) Si un mes de una serie no tenía dato se procedía a llenar el mismo con el primer mejor ajuste por regresión (rojo), (ii) Si se intentaba llenar con la serie de mejor ajuste (rojo) pero esta también carecía de dato en ese mes se procedía a realizar el llenado a partir de la serie y regresión del segundo mejor ajuste (verde), (iii) Si el segundo mejor ajuste (verde) también carecía de información se procedía al llenado a partir del tercer mejor ajuste (azul).

Para verificar que las series tuvieran un llenado que no afectara los estadísticos de la serie original, fueron establecidos dos tipos de errores en la estimación: (i) Error en la media, correspondiente al cálculo de la diferencia entre la media de la serie original y aquella de la serie completada. (ii) Error en la desviación estándar, correspondiente a la diferencia entre la desviación de la serie original y de la serie generada.

Con base en este análisis fue obtenida la Figura 3, la cual presenta los dos tipos de errores estimados para cada serie generada. A partir de los errores estimados fue posible concluir que estos fueron, en general, inferiores para la media que los correspondientes para la desviación estándar. El rango de los errores llegó al 20 % para la media y al 30 % para la desviación estándar. El mayor error de estimación en la media se presentó para la serie de la estación La Cañada (S_{14}), pero es necesario aclarar que sólo fueron llenados dos datos en total; en esta estación se registró a su vez un error en la desviación muy alto. El mayor error de estimación en la desviación estándar se presentó para la serie de Puente Pusmeo, los coeficientes de correlación de esta fueron

**CORRELACIÓN CRUZADA LINEAL (R^2) - REZAGO (τ) = 0.
RÍO PATÍA - CAUDALES MEDIOS MENSUALES.**

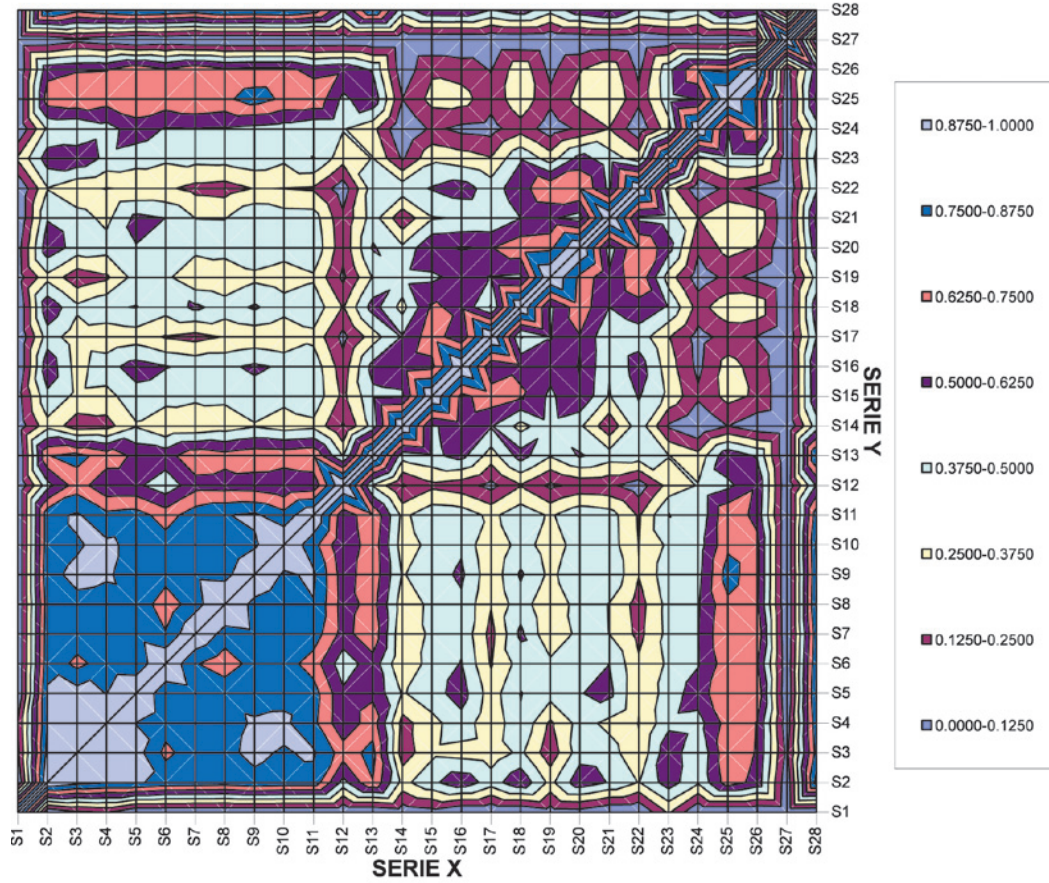


Figura 2. Correlación cruzada lineal de las series de caudales medios mensuales, río Patía.

ERROR DEL LLENADO DE DATOS EN LA ESTIMACIÓN DE CADA SERIE

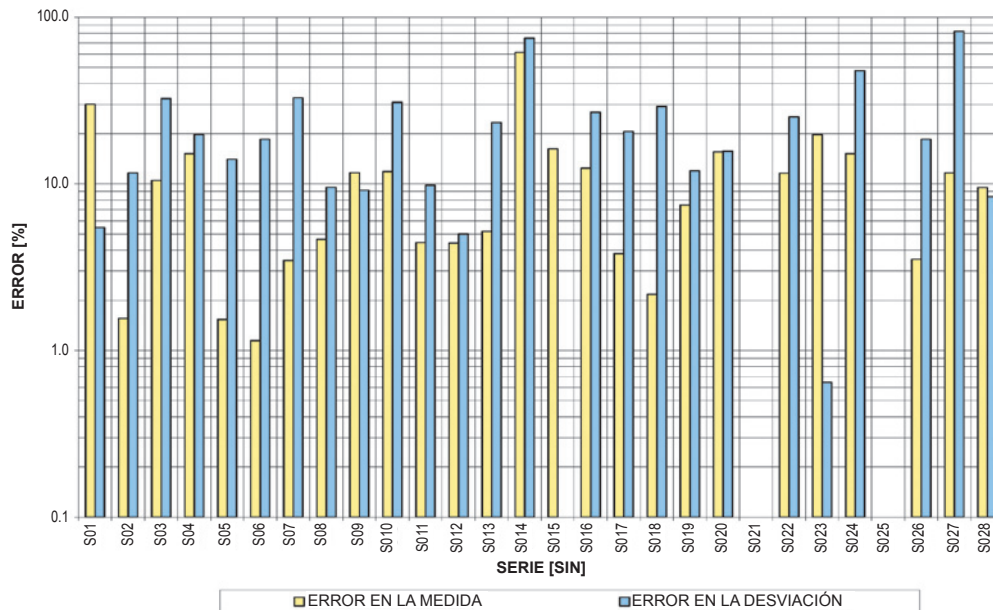


Figura 3. Errores estimados para cada una de las series de caudal medio mensual (CMM).

Tabla II. Regresión lineal, m y b hallados para series de caudal medio mensual (CMM).

S_n	23	28	5	10	3	28	9	9	4	28	3	28	16	17	20	15	20	22	22	20	20	28	28	19	20	2	5	7	25	26	3	24	9	24	3	2						
R^2	0.2667	0.9220	0.9305	0.9014	0.9305	0.8578	0.8514	0.8903	0.8951	0.9014	0.8951	0.8903	0.8966	0.5623	0.6959	0.6316	0.6959	0.7044	0.7298	0.7525	0.5831	0.6558	0.7525	0.7525	0.7525	0.5931	0.7452	0.8062	0.7452	0.0877	0.7452	0.8062	0.7452	0.0877	0.7452	0.8062	0.7452	0.9220				
m_1	3.0204	0.5623	1.7062	2.5467	0.5454	0.0386	0.5283	0.0217	0.7113	0.3539	1.2583	0.4918	0.0474	0.2438	1.2217	0.4079	0.5697	0.1082	0.5417	1.2737	0.0064	0.5908	0.0064	0.0064	0.0492	18.6447	0.1581	0.0400	0.0082	0.0400	0.1581	0.0400	0.0082	0.0400	0.1581	0.0400	0.0082	0.0400	1.6397			
b_1	25.9219	-5.0263	8.4934	-1.3759	0.1519	-0.7753	2.7059	-0.1803	-4.9885	3.0586	9.5109	-16.1530	1.8904	5.0120	1.2615	4.9886	-0.2364	0.2385	5.0169	7.6190	0.9475	8.9283	0.9475	0.9475	0.9475	0.9238	118.2103	0.8042	-0.7937	2.7406	-0.7937	0.8042	-0.7937	2.7406	-0.7937	0.8042	-0.7937	2.7406	38.2221			
S_n	4	3	2	9	2	2	4	11	3	3	28	3	26	3	17	18	28	20	15	20	19	5	19	5	2	2	5	7	25	26	3	24	9	24	3	2	10	8984				
R^2	0.1309	0.9208	0.8864	0.8864	0.8884	0.8417	0.8489	0.8637	0.8914	0.8984	0.8911	0.6055	0.7877	0.5094	0.6422	0.6203	0.6186	0.6422	0.6422	0.6422	0.6422	0.5332	0.7298	0.5332	0.0301	0.5639	0.5659	0.7273	0.0677	0.7273	0.0677	0.7273	0.0677	0.7273	0.0677	0.7273	0.0677	0.7273	0.0677	0.8984		
m_2	0.2035	1.2097	0.7611	3.5227	0.3868	0.0692	0.1452	0.2907	0.1376	0.0708	0.1958	3.9124	0.1132	4.3944	0.2403	0.0594	0.0214	2.6729	0.3561	2.0262	0.0254	1.3472	0.0254	0.0254	0.0301	2.0652	2.9006	0.0516	2.9006	0.0516	2.9006	0.0516	2.9006	0.0516	2.9006	0.0516	2.9006	0.0516	12.6956			
b_2	27.6609	49.4898	-26.8536	4.5603	-9.1885	-0.3760	2.8333	-0.4684	-0.5072	-5.5983	7.0026	-11.0874	5.7281	7.2622	1.0969	13.2689	-0.1281	0.2086	7.2870	6.6242	1.4116	7.8560	1.4116	1.4116	0.5412	264.8014	0.3611	5.536	2.406	5.536	2.406	5.536	2.406	5.536	2.406	5.536	2.406	116.7245				
S_n	3	5	9	2	28	9	10	3	4	3	8	7	2	15	28	18	16	16	16	16	18	19	18	19	18	20	25	11	7	4	13	13	11	7	4	13	13	11	7	4		
R^2	0.0639	0.8884	0.8914	0.8850	0.8882	0.8085	0.8424	0.8539	0.8864	0.8662	0.6697	0.5785	0.7455	0.4825	0.6127	0.5971	0.5275	0.5971	0.5971	0.5971	0.5437	0.7044	0.5184	0.5184	0.5757	0.5495	0.5011	0.7348	0.7176	0.0430	0.7176	0.0430	0.7176	0.0430	0.7176	0.0430	0.7176	0.0430	0.7176	0.0430	0.8866	
m_3	0.0680	2.2967	6.4775	0.3222	0.2135	0.6807	0.3769	0.0637	0.2516	0.1657	2.9921	3.9801	0.0847	2.7692	0.0045	3.0652	0.0374	0.1948	0.8210	6.4516	0.1032	4.3134	0.1032	0.1032	0.1204	50.7987	0.1091	0.8616	0.0115	0.8616	0.0115	0.8616	0.0115	0.8616	0.0115	0.8616	0.0115	0.8616	0.0115	0.8616	0.0115	18.9200
b_3	30.3583	46.5746	16.1969	-11.0371	-9.6287	2.5178	2.1107	0.4667	0.7543	0.0551	5.4726	3.1728	3.6894	5.1608	1.2722	9.3233	0.2194	1.7119	11.8696	21.8291	-0.1061	15.3939	-0.1061	-0.1061	-2.1299	232.3696	0.0646	5.3657	3.0576	5.3657	3.0576	5.3657	3.0576	5.3657	3.0576	5.3657	3.0576	5.3657	3.0576	5.3657	3.0576	10.6934

PRIMER AJUSTE
SEGUNDO AJUSTE
TERCER AJUSTE

muy bajos ($R^2 < 0,1$). Como se esperaba, las series con menores coeficientes de correlación para el llenado de datos presentaron mayores errores (Figuras 4 y 5). Las series con mayor error suelen ser aquellas

que necesitaron un menor número de datos llenados y por tanto no es posible estimar estadísticos muy cercanos pues corresponden a llenados puntuales.

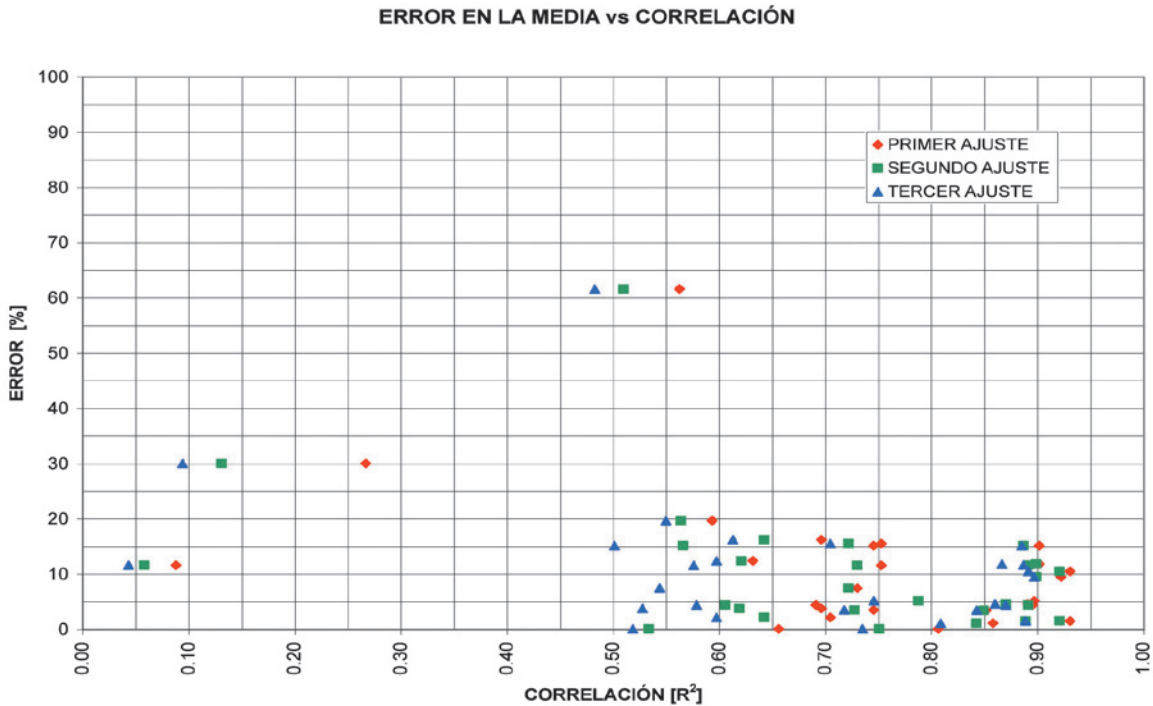


Figura 4. Error en la media vs. coeficiente de correlación (R^2) para llenado.

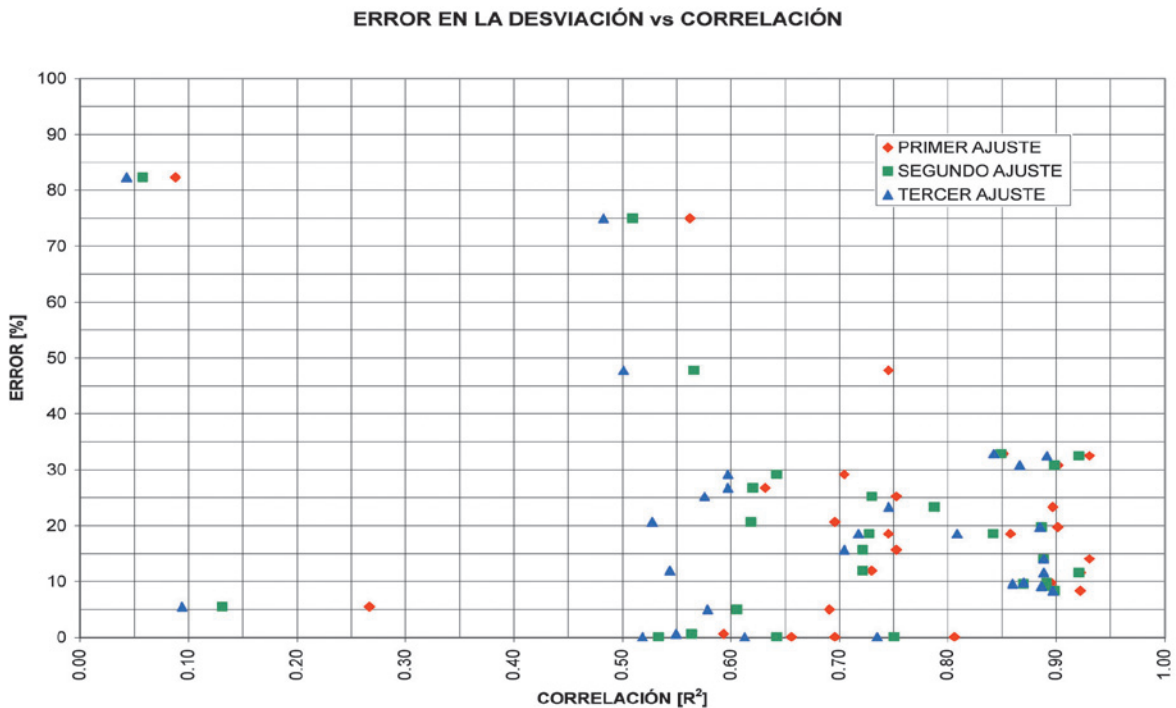


Figura 5. Error en la desviación estándar vs. coeficiente de correlación (R^2) para llenado.

Metodología de análisis básico de series de tiempo (Abst)

Para cada una de las series se realizó el análisis básico de series de tiempo de los datos originales. La información analizada de caudales medios corresponde a un período de agregación mensual (caudales medios mensuales). Sobre el río Patía y sus afluentes existen 28 estaciones para medición de caudales. Posterior a este análisis se hizo una regionalización de las series con base en parámetros morfológicos de las subcuencas del Patía.

Este análisis comprendió el cálculo de los estadísticos básicos de cada serie, media y desviación, más algunos de variabilidad de los parámetros estimados como son coeficiente de varianza, coeficiente de asimetría y curtosis.

Se muestra el comportamiento de las series de caudal medio multianual (Cmma). Se realiza aquí una descripción cualitativa del comportamiento interanual de las series, la cual permite concluir acerca de su comportamiento estacional.

La serie con el mayor caudal medio fue la del río Telembí (Salí), con 403.8 m³/s. La mayor

desviación estándar la arrojó la serie del río Patía (Los Nortes) con una magnitud de 235.8 m³/s. La estación del río Telembí antes mencionada se ubica aguas abajo de la última estación sobre el río Patía, por tal motivo su valor medio multianual fue inferior al registrado directamente por instrumentos sobre el cauce principal. Todas las series presentaron un coeficiente de variación inferior a la unidad, lo que indica una variabilidad dentro de los niveles normales para este tipo de series. El mayor valor de coeficiente de variación (0.9) correspondió a la serie del río San Jorge. El coeficiente de asimetría de todas las series se ubicó en el rango positivo, lo cual indica que todas las series tienen un sesgo positivo. Esto era de esperarse, ya que no es posible el registro de caudales negativos, pues los datos proceden de la medición directa en campo. Las series muestran en su gran mayoría una curtosis positiva, lo cual indica que las series son en su mayoría leptocúrticas y mesocúrticas. Sólo una de ellas sobre el río Telembí, arrojó un comportamiento platocúrtico.

Tabla III. Resumen de estadísticos de las estaciones del río Patía (01).

	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
RÍO	GUABO	PATÍA	PATÍA	PATÍA	PATÍA	SAJANDÍ	TIMBÍO
ESTACIÓN	RICOURTE	PTE GUASCAS	PTO NUEVO	LA FONDA	LOMA ALTA	BOCATOMA SAJANDÍ	PTE CARRETERA - TIMBÍO
NDATOS	299	480	317	383	118	118	132
MED	35.9	222.1	136.5	59.5	78.4	14.8	11.6
MAX	160.2	1207.0	522.3	312.8	297.6	61.4	37.0
MIN	9.2	51.1	21.7	4.1	11.7	1.4	2.1
DESV EST	16.3	134.2	90.2	43.4	62.4	10.9	8.2
COEF VAR	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7
COEF ASIM	2.3	2.0	1.1	1.6	1.4	1.3	1.1
CURTOSIS	11.3	7.5	1.1	4.0	1.3	2.2	0.5
INTERMEDIO							
MÍNIMO							
MÁXIMO							

Tabla IV. Resumen de estadísticos de las estaciones del río Patía (02)

	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14
RÍO	QUILCASÉ	QUILCASÉ	TIMBÍO	GUACHICONO	SAN JORGE	GUACHICONO	MAYO
ESTACIÓN	PTE CARRETERA - QUILCASÉ	EL HOYO	PTE COLGANTE	GUACHICONO	LA PLAYA	PTE FIERRO	LA CAÑADÁ
NDATOS	127	142	139	172	141	144	550
MED	8.6	16.8	26.5	32.3	49.9	23.3	14.2
MAX	30.7	83.6	104.9	113.7	205.0	84.5	46.3
MIN	2.3	0.6	4.6	5.5	4.5	6.3	4.0
DESV EST	6.0	14.1	19.8	19.6	42.4	14.9	5.7
COEF VAR	0.7	0.8	0.7	0.6	0.9	0.6	0.4
COEF ASIM	1.6	1.8	1.4	1.4	1.3	1.6	1.3
CURTOSIS	2.4	4.1	1.8	2.0	1.5	2.6	3.4
INTERMEDIO							
MÍNIMO							
MÁXIMO							

Tabla V. Resumen de estadísticos de las estaciones del río Patía (03).

	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21
RÍO	PASTO	JUANAMBÚ	PASTO	PASTO	GUÁITARA	GUÁITARA	BLANCO
ESTACIÓN	UNIVERSIDAD	PUENTE JUANAMBÚ	BOCATOMA CENTENAR.	PROVIDENCIA	PILCUÁN	AGROYACO	CARLOSAMA
NDATOS	443	323	220	186	293	435	612
MED	3.3	35.4	1.6	8.8	34.2	79.9	3.7
MAX	10.3	160.2	7.8	26.5	99.1	248.5	18.1
MIN	0.8	9.2	0.4	1.4	3.5	29.1	0.6
DESV EST	1.4	16.1	0.9	4.5	13.7	31.3	2.4
COEF VAR	0.4	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.7
COEF ASIM	1.2	2.3	2.1	1.7	0.9	1.2	1.8
CURTOSIS	1.9	11.2	8.4	3.5	1.3	2.0	4.8
INTERMEDIO							
MÍNIMO							
MÁXIMO							

Tabla VI. Resumen de estadísticos de las estaciones del río Patía (04).

	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28
RÍO	GUÁITARA	PACUAL	TELEMBÍ	SASPI	CRISTAL	PATÍA	PATIA
ESTACIÓN	SAN PEDRO	YUNGUILLA	SALI	EL VERGEL	EL SANDE	PTE PUSMEO	L. NORTES
NDATOS	324	319	302	252	252	468	181
MED	53.3	6.9	403.8	3.5	15.6	3.7	384.2
MAX	190.1	32.3	853.0	14.7	39.6	18.1	1418.0
MIN	3.9	0.4	78.7	0.2	2.8	0.6	70.9
DESV EST	22.9	5.0	162.3	2.3	7.8	2.5	235.8
COEF VAR	0.4	0.7	0.4	0.7	0.5	0.7	0.6
COEF ASIM	1.4	2.0	0.3	1.4	0.5	1.9	1.9
CURTOSIS	4.1	5.2	-0.5	2.6	-0.3	5.0	4.6
INTERMEDIO							
MÍNIMO							
MÁXIMO							

Curvas de duración de CMM

A continuación se presentan las curvas de duración de caudales mensuales (CDC) con base en la información recopilada. De cada curva de duración fue posible obtener la correspondiente curva de duración de caudales adimensionales. Posteriormente fue analizado el comportamiento en conjunto de las curvas de duración adimensionales, con lo cual se facilita apreciar una regionalización de las series dentro de la cuenca del Patía. Se analizó que los caudales tienen un comportamiento regionalmente típico.

Para estimar la curva de duración de caudales se procedió a ordenar los datos de menor a mayor y se le asignó a cada dato una probabilidad de excedencia. La probabilidad se calcula empleando la fórmula de *Weibull* (Fórmula de Probabilidad de Weibull):

$$P = \frac{i}{N - 1} \cdot 100\% \quad (2)$$

Donde,

i = Orden del dato correspondiente

N = Número total de datos

P = Probabilidad de excedencia o porcentaje del tiempo que el caudal es igualado o excedido.

En el caso de la estimación de la curva de duración de caudales adimensionales, estos fueron calculados a partir de los valores mensuales y el promedio histórico de cada serie mediante:

$$Q_{\text{ADIMENSIONAL}} = \frac{Q_{\text{ESTACIÓN}}}{Q_{\text{ESTACIÓN}}} \quad (3)$$

A manera de resumen se presentan los resultados del análisis en la Figura 6. Las curvas de duración unitarias de las estaciones son similares en su comportamiento cualitativo; sin embargo, se aprecian dos regiones: una superior que establece un comportamiento típico de cuencas que se autorregulan, y otra inferior que presenta el comportamiento típico de cuencas de alta pendiente o de flujos transitorios. Este comportamiento se muestra claramente en la Figura 7, para probabilidades de excedencia entre el 5 y el 95 %.

Resultados obtenidos de la variación de caudales

De acuerdo con los análisis ya realizados se procedió a superponer los valores de caudales unitarios mensuales para determinar si a lo largo de la cuenca existía una tendencia regional aparte de la encontrada a partir de las CDC (Tabla VII).

Con este procedimiento fue posible verificar que las estaciones registran valores promedio men-

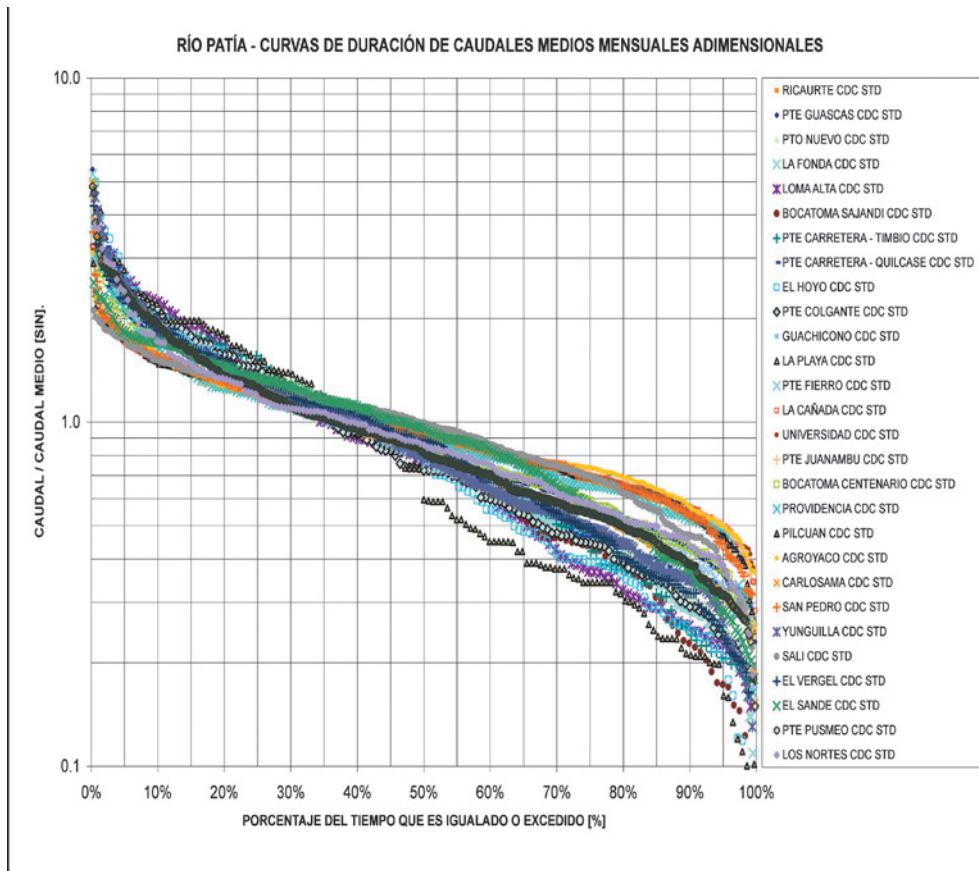


Figura 6. Comparación de curvas de duración de caudales adimensionales.

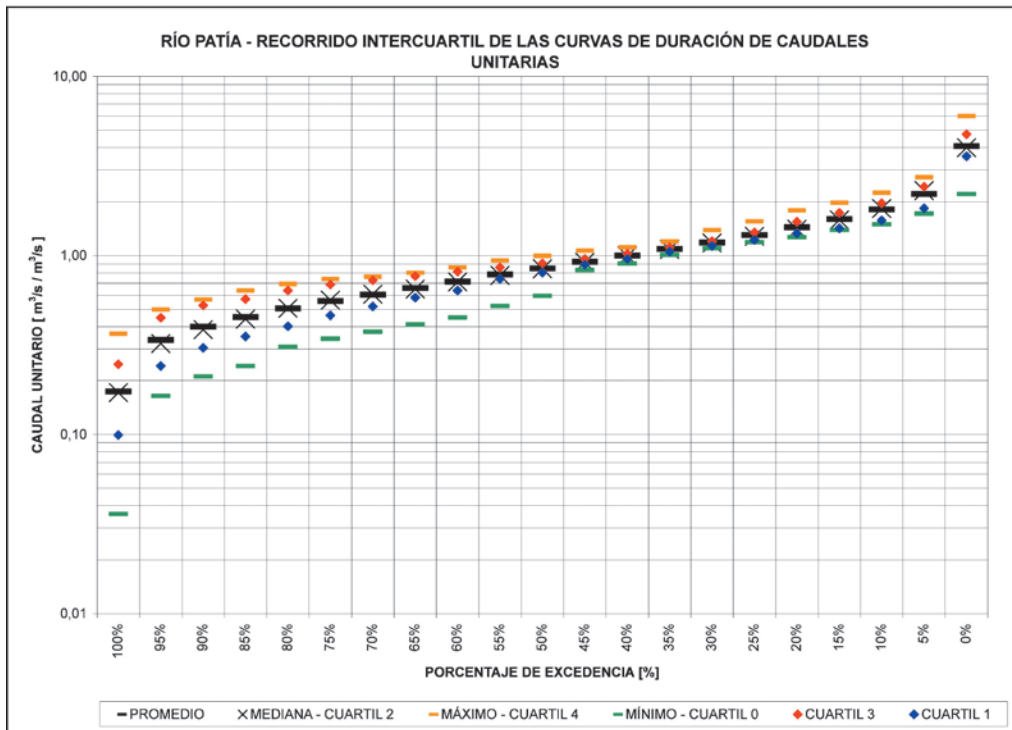


Figura 7. Recorrido intercuartil de las curvas de duración de caudales.

suales con un promedio unimodal marcado a lo largo de toda la cuenca del Patía, con una particularidad, las series presentan los valores pico respecto al medio mensual multianual entre noviembre y febrero. Adicionalmente, es claro que la tendencia a presentar caudales de estiaje es propia de los meses de junio a septiembre. Un detalle particular es que las series de las estaciones que suelen ubicarse en ríos afluentes a lo largo de una trayectoria sur-norte, presentan un desplazamiento de los meses de estiaje de aproximadamente dos meses (Figura 8).

Desde un punto de vista comparativo se puede establecer que el comportamiento de estas series es inversamente proporcional al que suelen presentar las series de caudales de los ríos de la Orinoquia.

Todas las series muestran un comportamiento regional característico. La variabilidad de los registros basado en el coeficiente de variación de las series es bajo pues el valor máximo de este estadístico comparativo es de 0.9.

Todas las series analizadas y por tanto los caudales medios mensuales presentan un compor-

tamiento sesgado hacia los valores máximos. Este comportamiento era de esperarse ya que el proceso físico no puede presentar caudales negativos.

Adicionalmente, al estimar las curtosis de las series se halló que estas son característicamente leptocúrticas y mesocúrticas ya que sólo una presenta un comportamiento platocúrtico.

Se halló una buena correlación entre las series de caudales medios mensuales a todo lo largo de la cuenca del río Patía. De esta forma fue posible llevar a cabo un llenado eficiente de datos faltantes. Las series estimadas respecto de los datos llenados presentan, en general, un error medio inferior al 20% para la media y al 30% para la desviación estándar respecto de las series originales. Este error medio se halla dentro de los rangos estimados a nivel nacional por Mesa *et. al.*, (2000).

A partir del análisis de consistencia se estableció que las series presentan buena consistencia y por lo tanto las mediciones y los datos adquiridos del IDEAM guardan buena confiabilidad para esta región del país.

Tabla VII. Resumen de datos de CDC unitarias vs. porcentaje de excedencia.

PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA	MÍNIMO –CUARTIL	CUARTIL	MEDIANA –CUARTIL	PROMEDIO	CUARTIL	MÁXIMO –CUARTIL
	0	1	2		3	4
100 %	0.036	0.099	0.172	0.174	0.247	0.365
95 %	0.164	0.242	0.322	0.336	0.449	0.499
90 %	0.211	0.305	0.385	0.399	0.526	0.567
85 %	0.242	0.353	0.442	0.453	0.570	0.637
80 %	0.308	0.402	0.507	0.506	0.637	0.693
75 %	0.343	0.462	0.563	0.556	0.688	0.738
70 %	0.375	0.519	0.607	0.604	0.726	0.760
65 %	0.411	0.581	0.649	0.658	0.767	0.801
60 %	0.450	0.638	0.712	0.715	0.812	0.858
55 %	0.521	0.739	0.773	0.783	0.859	0.938
50 %	0.595	0.802	0.842	0.845	0.904	0.995
45 %	0.827	0.888	0.916	0.924	0.957	1.064
40 %	0.901	0.955	0.993	0.996	1.025	1.109
35 %	1.006	1.050	1.082	1.085	1.112	1.193
30 %	1.098	1.132	1.173	1.180	1.203	1.384
25 %	1.186	1.220	1.280	1.299	1.345	1.549
20 %	1.262	1.329	1.400	1.436	1.541	1.785
15 %	1.385	1.415	1.579	1.595	1.731	1.973
10 %	1.492	1.570	1.830	1.808	1.959	2.240
5 %	1.712	1.833	2.302	2.203	2.419	2.733
0 %	2.200	3.581	4.000	4.078	4.750	6.000

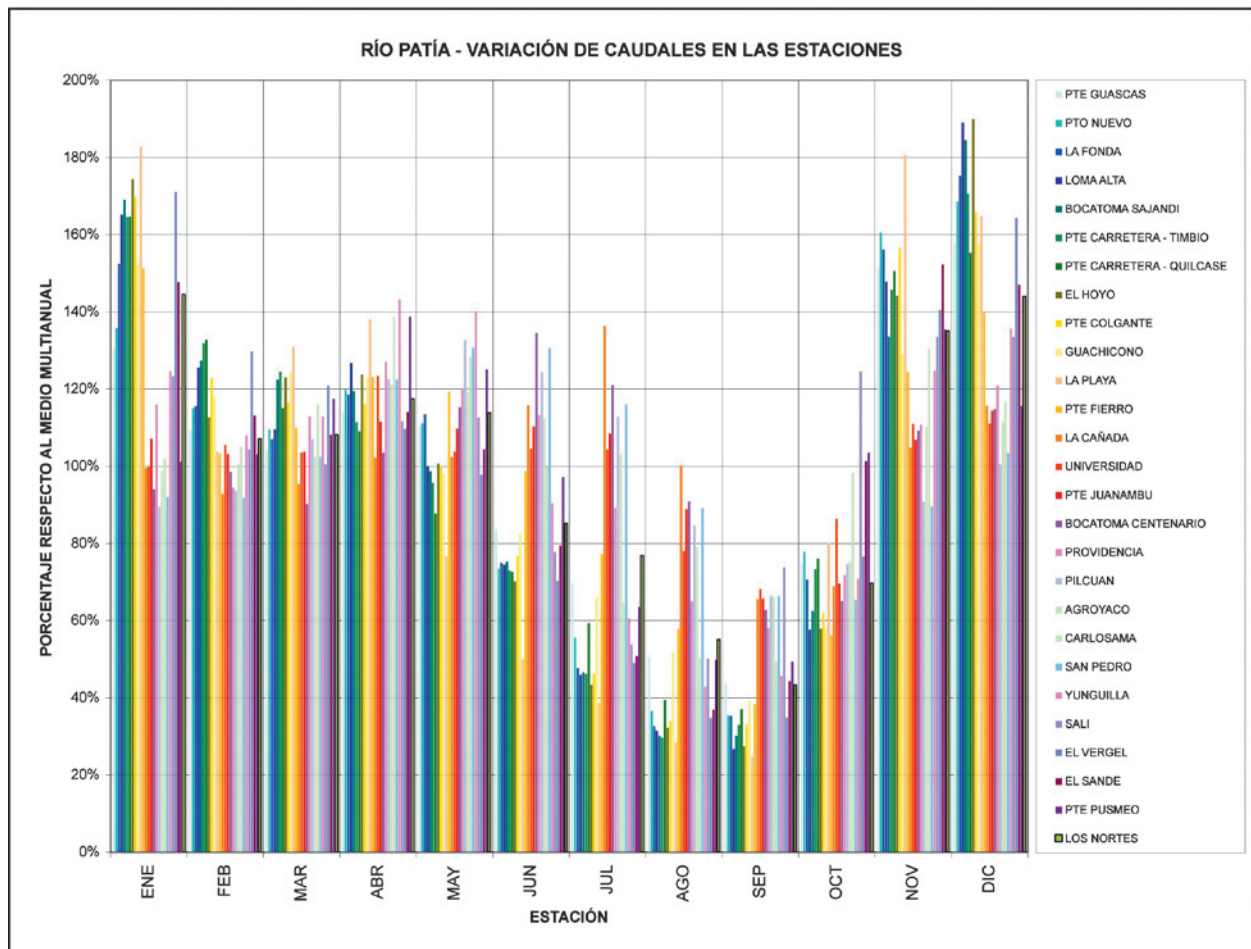


Figura 8. Variación intranual de caudales unitarios.

El análisis detallado del recorrido intercuartil de las curvas de duración de caudales unitarios, muestra claramente que los registros presentan un comportamiento muy similar para valores inferiores a un 45 % de probabilidad de excedencia, pero dada esta particularidad para probabilidades de excedencia inferiores a este valor se observa un rango muy amplio de valores, sobre todo para cuencas que no pueden regular caudales.

La variación interanual de las series de caudales medios mensuales muestra que estas presentan un comportamiento unimodal, hecho que ratifica lo expuesto por Mesa *et al* (1997). Los periodos de mayores magnitudes de caudal medio mensual a lo largo de toda la cuenca se ubican en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero. Los correspondientes periodos de estiaje se observan durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre.

Se destaca que las series de las estaciones que suelen ubicarse en ríos afluentes al Patía ubicados a lo largo de una trayectoria de sur a norte, muestran un desplazamiento de los meses de estiaje de aproximadamente dos meses, respecto de aquellos que vierten en el sentido de oriente a occidente.

La perspectiva posterior de esta investigación estará centrada en dos aspectos; el primero de ellos elaborar la caracterización morfológica de la cuenca, pues en este artículo no se hace referencia a este tema, y el segundo, en relación con la estimación y análisis del comportamiento de los caudales de estiaje y de creciente para la región.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de esta investigación no hubiera sido posible sin el apoyo de los ingenieros civiles

Eduardo Vargas y Eduardo Machado, quienes como docentes, amigos y colaboradores han impulsado mi interés en la investigación.

Se extienden agradecimientos a HVM Ingenieros Ltda., por facilitar la información hidrológica para llevar a cabo esta investigación.

LITERATURA CITADA

Mesa, O., Poveda, G. y Vélez, O. 2000. Balances hidrológicos de Colombia. Serie del Posgrado en Recursos Hidráulicos, No. 16, 2000. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín.

Mesa, O., Poveda, G. y Carvajal. 1997. Introducción al clima en Colombia. Imprenta Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín.

Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. Revista Academia Colombiana de Ciencias, Vol. 28 (107), 201-222 (2004).

Restrepo, J. 2003. Aporte de caudales de los ríos Baudó, San Juan, Patía y mira a la Cuenca Pacífica Colombiana. Boletín Científico CCCP No. 13: 17-32.

Rossel, F. y Garbrecht, J. 2001. Spatial variability and downscaling of precipitation". Phys. Chem. Earth (B). Vol 26 No 11-12, pp 863-867, (2001) Elsevier Science.