

Estimación de Caudales Máximos Instantáneos Anuales, Medios Anuales y Mínimos Anuales

Por: Oscar Mesa S. *

Enrique Angel S.*

Luis Carlos Rubiano O.*

1. PRESENTACION

La Corporación Autónoma Regional Río Negro-Nare contrató con el programa de Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional, la elaboración de un estudio para la estimación de caudales medios, máximos y mínimos para 162 cuencas hidrológicas en su jurisdicción. Se buscaba desarrollar una herramienta que ayude en la toma de decisiones relacionadas con: obras de protección para la defensa de comunidades e infraestructura contra inundaciones, prestación del servicio de distribución de agua potable y en general para constituir un marco donde cuantificar espacial y temporalmente el recurso agua en la región.

Se procedió en primera instancia a calcular los parámetros estadísticos (media y desviación típica) de las series de caudales de las subcuencas, teniendo en cuenta -donde fue necesario- que alguna información se encontraba influenciada por trasvases de una cuenca a otra.

Como segundo paso se formularon modelos de corre-

lación entre los parámetros geomorfológicos y estadísticos y se escogieron los de mejor ajuste, manteniendo un uso razonable de parámetros.

Finalmente con los modelos de regresión desarrollados se estimaron los caudales extremos para varios períodos de retorno en las 162 subcuencas.

2. INFORMACION DISPONIBLE

2.1 Información Hidrológica

En la región estudiada han operado 53 estaciones hidrométricas; de éstas solamente 21 tienen la información en una etapa de procesamiento acorde con las necesidades y el alcance del estudio.

En la Tabla 1, aparecen las estaciones que poseen información con sus nombres, su localización y con los códigos que las identifican a lo largo del estudio. Para cada estación se conformaron tres series de caudales: Máximos instantáneos anuales, medios anuales y mínimos anuales.

TABLA 1. Estaciones de aforo con información en el área de Comarca

CODIGO	ESTACION	CORRIENTE	MUNICIPIO	LATITUD N	LONGITUD W	ENTIDAD
2618701	BP-1	Buey	Abejorral	05 55'	75 27'	EPM
2618702	BP-2B	Piedras	La Ceja	05 57'	75 25'	EPM
2618703	Sonsón	Sonsón	Sonsón	05 43'	75 18'	HIMAT
2308719	La Garrucha	Samaná Norte	San Luis	06 04'	74 54'	HIMAT
2308720	Pailanía	Sto. Domingo	Cocomá	05 58'	75 04'	HIMAT
2308713	Balseadero R-11	San Carlos	San Carlos	06 15'	74 54'	EPM
2308710	Puerto Belo RN-10	Guatapé	San Carlos	06 13'	74 51'	EPM
2308712	Las Playas RN-12	Guatapé	San Rafael	06 19'	74 57'	EPM
2308707	Guatapé RN-9	Guatapé	San Rafael	06 18'	75 02'	EPM
2308718	Los Sirpes	La Concepción	Concepción	06 24'	75 10'	HIMAT
2308705	Termales RN-6	Nare	Sto. Domingo	06 25'	75 08'	EPM
2308706	La Unión RN-5	Nare	Alejandría	06 20'	75 10'	EPM
2308711	San Lorenzo RN-13	Nare	San Rafael	06 23'	75 00'	EPM
2308709	Panelera RN-4A	Negro	San Vicente	06 16'	75 18'	EPM
2308702	Río Abajo RN-4	Negro	San Vicente	06 14'	75 19'	EPM
2308704	La Pereira RN-3	Q. La Pereira	Rionegro	06 08'	75 23'	EPM
2308715	Puente Real	Negro	Rionegro	06 10'	75 23'	HIMAT
2308701	Rionegro RN-1	Negro	El Retiro	06 06'	75 29'	EPM
2308708	RN-7A	Q. Las Palmas	El Retiro	06 06'	75 30'	EPM
2308703	La Mosca	Q. La Mosca	Guarne	06 14'	75 24'	EPM
2308717	Canteras	Nare	Nare	06 12'	74 37'	HIMAT

* Postgrado de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.

La ocurrencia de caudales mínimos, por corresponder a un fenómeno de agotamiento, está condicionada a las reservas de agua en los acuíferos de la cuenca y a su velocidad de flujo; por esta razón para fines de cuantificar la capacidad de responder a una demanda dada, los caudales mínimos diarios reemplazan perfectamente a los mínimos instantáneos.

Los caudales máximos necesarios para la estimación de riesgos de inundación sí deben estar dados a nivel instantáneo. Como algunas estaciones no poseen limnógrafos que proporcionen lecturas del caudal instantáneo sino que están dotados de limnímetros que dan medidas de caudales diarios, se decidió inferir los primeros a partir de estos últimos, la metodología empleada para ello se discute en la sección 3.1.2.

2.2 Información Geomorfológica

En el área se establecieron 7 cuencas y en cada una de ellas varias subcuencas identificadas por un código de 3 ó 4 dígitos; para estas subcuencas, la Corporación suministró (CORNARE, 1988) los parámetros geomorfológicos:

- Altura media de la cuenca (msnm) (ALTURA)
- Precipitación media (mm/día) (PRECIP)
- Pendiente media (m/m) (PEND)
- Área de drenaje (Km²) (AREA)
- Número de corrientes () (NCORR)
- Medido según el modelo de Strahler
- Perímetro de la divisoria de aguas (Km) (PERIM)
- Longitud del cauce principal (Km) (LONG)

Y los parámetros de zonas de vida y usos del suelo:

- Porcentaje de bosque.
- Porcentaje de plantaciones
- Porcentaje de rastrojos (PRASTR)
- Zonas de vida, agrupadas en la siguiente clasificación:

Unidad

Zona de vida

1	Colinas del bh-T
2	Colinas del bmh-T
3	Colinas del bmh-P
4	Cafiones del bh-T
5	Montañas de bmh-T
6	Montañas del bp-P
7	Montañas y colinas del bp-P
8	Montañas y cimas del bmh-MB, bp-MB y bp-M.
9	Montañas del bp-P
10	Montañas Argelia-Nariño del bmh-P
11	Montañas del bmh-P.

Unidad	Zona de vida
12	Colinas del bp-MB
13	Montañas del bp-P y bp-MB
14	Montañas y colinas Concepción-Alejandría del bmh-MB.
15	Colinas del bmh-MB
16	Terrazas y colinas altiplano de Rionegro del bh-MB y bmh-MB.
17	Terrazas y colinas La Unión del bmh-MB
18	Cafiones Retiro-Guarne del bmh-MB
19	Montañas Sonsón-Abejorral del bmh-MB
20	Cafiones ríos Arma-Buey.

Donde:

bh	bosque húmedo
bmh	bosque muy húmedo
bp	bosque pluvial
T	tropical
P	premontano
MB	Montano bajo
M	Montano

A partir de éstos se estimaron otros parámetros de importancia, así:

- Temperatura media (°C) (TEMP)

Mediante las expresiones:

ALTURA (msnm)	TEMP (°C)
0-750	27.6-0.00*ALTURA
750-1230	23.1-0.0046*(ALTURA-750)
1230-2100	20.9-0.0062*(ALTURA-1230)
>2100	15.5-0.0033*(ALTURA-2100)

- Relación de Holdridge (Holdridge, 1969) entre precipitación y evapotranspiración potencial () (R).

$$R = ETP \text{ (mm/día)} \quad PRECIP \text{ (mm/día)}$$

donde ETP es la evapotranspiración potencial (mm/día), calculada de:

$$ETP - Biotemperatura * 58.93$$

La biotemperatura se tomó igual a la temperatura media.

- Frecuencia de canales (1/Km²) (FREC)

$$FREC = NCORR / AREA$$

- Indice de compacidad () (COMPAC)

Es una medida de la proximidad de la forma de la cuenca a la del círculo:

$$\text{COMPAC} = 0.282 * \text{PERIM}/(\text{AREA})^{1/4}$$

- Porcentaje de bosque () (PBOSQ)

Se calculó como la suma de los porcentajes de bosques más plantaciones.

3. METODOLOGIA

3.1 Procesamiento de la información

La metodología para adaptar la información disponible a las necesidades del estudio se describe a continuación:

3.1.1 Bombeos y trasvases

Muchas de las estaciones no presentaron ningún tipo de influencia. Algunas, en especial las operadas por Empresas Públicas de Medellín, habían recibido un tratamiento de reconstrucción, de tal manera que en la información disponible en la entidad, ya se ha descuentado la influencia.

Para las que no habían sido reconstruidas y la influencia (bombeo o trasvase) era poco significativa por su pequeño valor relativo, ésta se despreció.

Finalmente, para aquellas estaciones para las cuales la influencia era del mismo orden de magnitud del caudal sin alterar, se procedió a su reconstrucción, sumando o restando el valor de la influencia a la información disponible, así:

$$Q_{\max \text{ reconstruido}} = Q_{\max \text{ registrado}} + Q_{\text{medio m\'aximo bombeo}}$$

$$Q_{\text{medio reconstruido}} = Q_{\text{medio registrado}} + Q_{\text{medio bombeo}}$$

$$Q_{\min \text{ reconstruido}} = Q_{\min \text{ registrado}} + Q_{\text{medio m\'ınimo bombeo}}$$

3.1.2 Estimación de caudales máximos instantáneos

En las estaciones que no presentan máximos instantáneos, se hizo necesaria su estimación por métodos indirectos.

La metodología usada es la expuesta por Linsley (1977) que se basa en los caudales medios diarios registrados en los días anterior y posterior al día del máximo diario.

El método se probó en las estaciones en las que se contaba con registros máximos diarios y máximos instantáneos; en esa confrontación se hizo evidente que para

áreas menores de 800 km² el método subestima el valor del máximo instantáneo y que esta subestimación crece cuando decrece el área, llegando a ser del 115% del valor estimado para áreas del orden de 125 km².

Se introdujo por tanto un factor de corrección por área por el cual se multiplican los máximos instantáneos obtenidos por el método de Linsley para obtener los máximos definitivos.

Los valores de este factor de corrección por área, se presentan a continuación:

Estación	Area (Km ²)	Factor
2618702	148.0	2.02
2308707	182.0	1.90
2308709	842.0	1.02
2308702	834.8	1.01
2308701	167.0	1.93
2308703	125.0	2.15
2308717	22.4	2.15

3.2 Caracterización estadística de las series de caudales

Se calcularon medias y desviaciones típicas para las series de caudales máximos, medios y mínimos de cada estación.

Acerca de las distribuciones que mejor se ajustan a las series de eventos medios extremos, en la literatura se recomiendan ampliamente las distribuciones Normal y Log-Normal para caudales medios y para caudales extremos -máximos y mínimos- las distribuciones Log-Normal, Log-Pearson Tipo III y Gumbel. (Viessman, 1977).

Dada la poca extensión de los registros existentes - se necesitaría un buen número de estaciones con 25 años o más de información - las pruebas de ajuste, chi-2 y Smirnov-Kolmogorov realizadas arrojaron bajos niveles de significación estadística. Sin embargo, en ellas la distribución Log-Normal resulta ser la de mejor ajuste tanto para medios como para extremos.

Estos resultados concuerdan con lo concluido con Guzmán y Vélez (1979), Múnera y Muñoz (1980) y Camargo y Baquero (1981) en el sentido de que la distribución de mejor ajuste a los máximos instantáneos del oriente antioqueño es la Log-Normal.

Con base en esa evidencia, se elige la distribución Log-Normal como la de mejor ajuste a las series de caudales máximos, medios y mínimos en la zona de estudio.

En la Tabla 2, se muestran los parámetros estadísticos de las series de caudales y los parámetros geomorfológicos de las cuencas afluentes a cada estación de registro.

En lo que resta de este informe las variables estadísticas se representan así:

- M.MAX = Media de los caudales máximos instantáneos.
 V.MAX = Desviación típica de los caudales max. instantáneos.
 M.MED = Media de los caudales medios anuales.
 V. MED = Desviación típica de los caudales medios anuales.
 M. MIN = Media de los caudales mínimos anuales.
 V. MIN = Desviación típica de los caudales mínimos diarios.

3.3 Correlación de los estadísticos de las series con los parámetros geomorfológicos

Mediante el análisis de correlación se pretende encontrar expresiones para los momentos de las series de caudales, media y desviación típica, como función de parámetros geomorfológicos que como el área, la precipitación media o el porcentaje de bosques, son fácil y

rápidamente estimables a partir de planos topográficos, de variables climáticas o de usos del suelo.

Con el fin de refinar los resultados del análisis de correlación hasta donde la información lo permitiera, se dividió el área de estudio en dos regiones:

Región 1

Cuenca del río Nare, con 12 estaciones.

Región 2

Incluye toda el área de estudio, cuencas de los ríos Nare, Guatapé, Samaná, San Carlos y Buey-Piedras, con 21 estaciones.

3.3.2 Matrices de Correlación

Como un primer paso en la aproximación al problema se obtuvo la matriz de correlación de las variables dependientes (estadísticos), contra las independientes (parámetros geomorfológicos, zonas de vida y usos del suelo), para descartar las variables independientes que más baja correlación individual tengan con las respectivas variables dependientes.

De la información suministrada por la matriz de correlación, se puede inferir que las variables relacionadas con las zonas de vida, debido a sus bajos coeficientes de correlación con los parámetros estadísticos, pueden ser excluidas en el siguiente paso:

TABLA 2 Parámetros geomorfológicos y estadísticos de las áreas tributarias a cada estación

CÓDIGO	ALTURA	PRECIP.	PEND.	AREA	NCORR	PERIM	LONG	TEMP	R	FREC	COMPAC	BOSQUE	RASTR.	M. MAX	V. MAX	M. MED.	V. MED	M. MIN	V. MIN
														%	%	M3/S	M3/S	M3/S	M3/S
2618701	2470.0	3000.0	.54	143.2	319	61.0	22.0	14.3	.28	2.23	1.44	1.75	65.50	120.44	40.150	8.13	1.347	2.98	0.741
2618702	2420.0	2800.0	.38	148.0	244	52.8	25.0	14.4	.30	1.65	1.22	18.40	29.54	163.83	64.850	7.86	2.149	2.47	0.612
2618703	2290.0	3150.0	.53	54.5	93	29.0	7.9	14.9	.28	1.71	1.11	14.00	20.64	76.54	41.170	2.69	0.524	1.22	0.149
2308719	375.0	4130.0	.67	1487.7	2964	208.0	55.0	25.4	.36	1.99	1.52	56.17	0.69	575.67	49.650	177.57	35.860	64.36	15.117
2308720	980.0	4290.0	.71	190.2	375	74.0	35.0	22.0	.30	1.97	1.51	44.89	0.00	213.73	89.802	27.31	4.552	6.13	3.066
2308713	1242.0	3720.0	.48	203.0	102	68.4	25.0	20.8	.33	.50	1.35	41.10	0.00	284.51	105.060	16.48	2.512	5.66	1.095
2308710	1267.0	3650.0	.57	590.0	292	114.0	40.0	20.7	.33	.49	1.32	46.81	0.55	256.59	165.720	51.35	13.970	17.18	6.540
2308712	1393.0	4010.0	.65	276.0	118	77.0	23.2	19.9	.29	.43	1.31	38.73	1.27	336.51	98.790	25.51	7.190	9.01	4.200
2308707	1570.0	4100.0	.75	182.0	89	64.5	14.0	18.8	.27	.49	1.35	40.11	1.73	*75.72	*14.960	16.89	0.831	5.91	1.810
2308718	2000.0	3000.0	.50	119.2	108	61.2	22.5	16.1	.32	.91	1.58	27.00	0.00	69.50	20.380	7.37	1.740	2.99	0.966
2308705	2170.0	2660.0	.46	1500.0	1296	213.8	91.0	15.3	.34	.86	1.56	36.84	11.23	529.86	162.380	78.03	14.210	31.69	8.455
2308706	2260.0	2280.0	.42	1250.0	1079	193.2	79.0	15.0	.39	.86	1.54	38.94	14.83	174.65	27.800	49.47	10.320	19.37	6.210
2308711	2130.0	2750.0	.47	1687.0	1369	240.0	111.2	15.4	.33	.81	1.65	36.89	10.45	527.36	101.200	89.75	19.690	35.00	13.570
2308709	2290.0	2100.0	.40	842.0	725	157.0	54.0	14.9	.42	.86	1.53	32.55	20.64	111.63	28.911	29.65	6.150	14.39	4.440
2308702	2290.0	2100.0	.40	834.5	716	155.2	50.2	14.9	.42	.86	1.52	32.55	20.64	92.22	20.870	27.46	7.960	12.17	3.610
2308704	2230.0	2000.0	.31	118.0	117	48.0	17.0	15.1	.44	.99	1.25	11.11	4.34	36.57	9.640	5.22	1.630	1.35	0.323
2308715	2340.0	2000.0	.46	307.0	270	93.0	35.0	14.7	.43	.88	1.50	24.58	26.26	77.40	20.024	14.36	2.037	3.56	0.839
2308701	2380.0	2000.0	.54	167.0	168	77.0	20.5	14.6	.43	1.01	1.68	31.56	38.32	68.05	22.711	6.38	1.426	2.77	0.790
2308718	2500.0	2000.0	.44	77.6	63	36.9	8.0	14.2	.42	.81	1.18	30.00	43.00	44.43	20.860	2.40	0.234	0.70	0.159
2308703	2280.0	2100.0	.36	125.0	120	48.6	15.7	14.9	.42	.96	1.23	33.84	30.19	36.46	19.770	3.72	1.000	1.36	0.366
2308717	2300.0	2000.0	.45	22.4	13	19.0	7.2	14.8	.44	.58	1.13	39.00	13.00	7.27	2.339	0.83	0.125	0.37	0.081

* Caudales Máximos Diarios

3.3.2 Regresión por Pasos

Como un segundo paso se utilizó el paquete STATGRAFHICS para poner en marcha un algoritmo de regresión por pasos que permite la entrada-salida de variables independientes del modelo de correlación. El funcionamiento del algoritmo se describe brevemente:

Paso 1

Se calcula el máximo nivel de significancia de cada variable explicativa o independiente y el mayor de ellos se compara con un criterio predeterminado como criterio de inclusión; si es mayor, la variable se incluye y se continúa con el paso 2 y en caso contrario, ninguna variable entrará el modelo y el proceso termina.

Paso 2

Se recalculan los máximos niveles de significancia para todas las variables presentes o no en el modelo.

Paso 3

Se selecciona la variable del modelo con menor nivel de significancia y se compara con un valor predeterminado

como criterio de exclusión; si es menor, la variable sale del modelo y se continúa con el paso 2, y si es mayor, no se elimina ninguna variable y se continúa con el paso 4.

Paso 4

De las variables aun fuera del modelo, se selecciona la de mayor nivel de significancia y se compara éste con el criterio de inclusión; si es mayor se incluye esa variable en el modelo y se continúa con el paso 2, de lo contrario el proceso de selección termina, pues ninguna variable puede entrar o salir del modelo sin quebrantar los criterios de selección.

Para cada región se hicieron correlaciones en el espacio natural y en el espacio logarítmico para cada variable dependiente y se escogió la más representativa de los dos.

En la Tabla 3 se muestran los modelos obtenidos, acompañados de su coeficiente de determinación (R^2) que da una medida del ajuste del modelo a los datos. Se suministra además un estimativo del aumento en el coefi-

TABLA 3. Modelos resultantes Región 1

MODELO	FORMA	REGION 1		
		R2	DELTA R2	NUEVA VARIAB.
1	$M_{MAX} = 24.868 + 12.558 * M_{MED} - 0.350 * AREA$ (100) (99.96)	0.9811	0.0065	LONG
2	$LN(M_{MAX}) = -3.442 + 1.1681 * LN(PERIM) - 2.848LN(R)$ (100) (98.01)	0.9306	0.0469	PRECIP
3	$LN(M_{MED}) = -4.342 + 0.932 * LN(PERIM) + 0.781LN(LONG)$ (87.3) (84.6)	0.9905	0.0020	R
4	$LN(M_{MIN}) = -2.464 + 1.008 * LN(M_{MED}) + 0.429 * LN(PBOSQ)$ (100) (99.36)	0.9888	0.0051	V. MED
5	$LN(M_{MIN}) = 16.307 - 2.969 * LN(ALTURA) + 1.818 * LN(PERIM)$ (98.37) (100)	0.9886	0.0074	FREC
6	$LN(V_{MAX}) = 121.988 - 19.068 * LN(PRECIP) + 0.738 * LN(PERIM) - 26.929 * LN(R)$ (99.18) (99.66) (98.91)	0.8937	0.0460	FREC
7	$V_{MAX} = 40.890 + 4.372 * M_{MED} - 2.756 * LONG$ (99.87) (99.09)	0.8795	0.0359	FREC
8	$LN(V_{MED}) = -4.417 + 1.628 * LN(LONG) + 1.657 * LN(FREC)$ (100) (99.05)	0.9824	0.0020	PEND
9	$V_{MED} = 0.191 + 0.200 * M_{MED}$ (100)	0.9744	0.0039	LONG
10	$LN(V_{MIN}) = -21.243 + 1.684 * LN(PRECIP) + 1.899 * LN(PERIM)$ (99.31) (100)	0.9870	0.0039	FREC
11	$V_{MIN} = -0.237 + 0.136 * M_{MIN}$ (100)	0.9611	0.0013	LONG

MODELO	FORMA	REGION 2		
		R2	DELTA R2	NUEVA VARIAB.
12	$LN(M_{MAX}) = 0.567 - 2.459 * LN(R) + 0.638 * LN(M_{MED})$ (100) (100)	0.9252	0.0028	LONG
13	$LN(M_{MAX}) = -2.735 + 0.689 * LN(AREA) - 3.573 * LN(R)$ (100) (100)	0.9001	0.0279	TEMP
14	$LN(M_{MED}) = -9.405 + 0.976 * LN(AREA) + 2.367 * LN(TEMP)$ (100) (100)	0.9760	0.0149	R
15	$M_{MIN} = -0.667 + 0.004 * AREA + 0.326 * M_{MED}$ (99.99) (100)	0.9953	0.0022	LONG
16	$LN(M_{MIN}) = -14.678 + 1.327 * LN(PRECIP) + 1.043 * LN(AREA)$ (100) (100)	0.9870	0.0022	PERIM
17	$LN(V_{MAX}) = -37.970 + 1.225 * LN(ALTURA) + 3.765 * LN(PRECIP) - 0.417 * LN(TEMP)$ (99.53) (100) (99.98)	0.8148	0.0178	LONG
18	$LN(V_{MED}) = -11.419 + 1.616 * LN(LONG) + 2.530 * LN(TEMP)$ (100) (99.98)	0.9252	0.0147	AREA
19	$V_{MED} = 0.111 + 0.205 * M_{MED}$ (100)	0.9757	0.0018	PEND
20	$LN(V_{MIN}) = -21.075 + 1.985 * LN(PERIM) + 1.608 * LN(PRECIP)$ (100) (100)	0.9690	0.0030	FREC
21	$LN(V_{MIN}) = -2.607 + 1.111 * LN(M_{MED})$ (100)	0.9620	0.0045	FREC

ciente de determinación (DELTA R²) al incluir una nueva variable (la de mayor nivel de significancia por fuera del modelo); esto para mostrar que el modelo con pocas variables es representativo y que la inclusión de una variable mejora muy poco el ajuste. Debajo de cada variable involucrada en el modelo se muestra el valor de su significancia estadística en porcentaje. A mayor significancia, más peso tiene la variable dentro del modelo.

Para cada variable dependiente (estadístico) a estimar, excepto para el valor esperado de los caudales medios, se obtuvieron dos expresiones, una basada solamente en parámetros y otra en éstos y parámetros estadísticos básicos (valor esperado y/o desviación típica de los caudales medios); estas últimas expresiones presentan mejores coeficientes de determinación, mostrando la alta dependencia de las variables estadísticas entre sí.

Los gráficos 1 y 2 son una muestra del ajuste de los valores de los estadísticos de las series de caudales calculados a partir de cada uno de los modelos, en las abscisas, contra los valores observados en las ordenadas. La línea que aparece en cada gráfico es simplemente una recta a 45 grados representando la relación $x=y$, o sea, el ajuste perfecto entre lo observado y lo calculado a través de cada modelo.

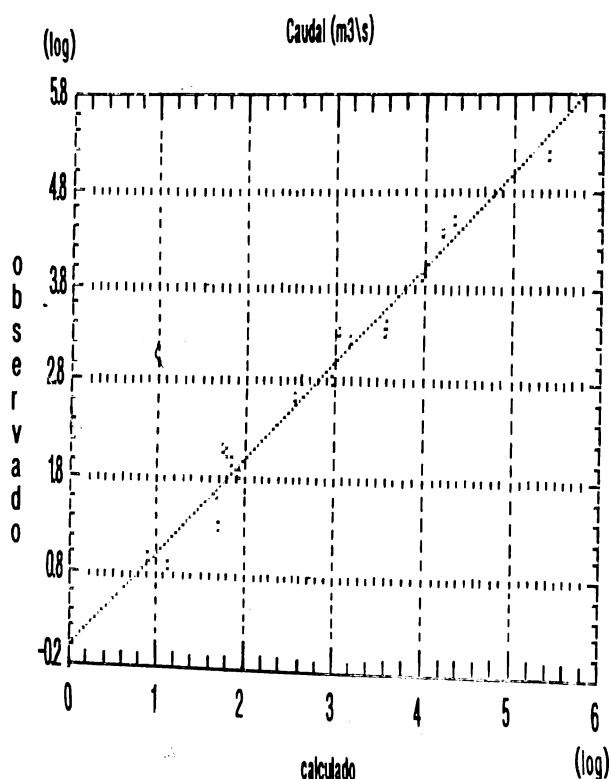


FIGURA 1.
Ajuste del modelo de regresión 14 a las medias observadas de los caudales medios diarios en la región 2

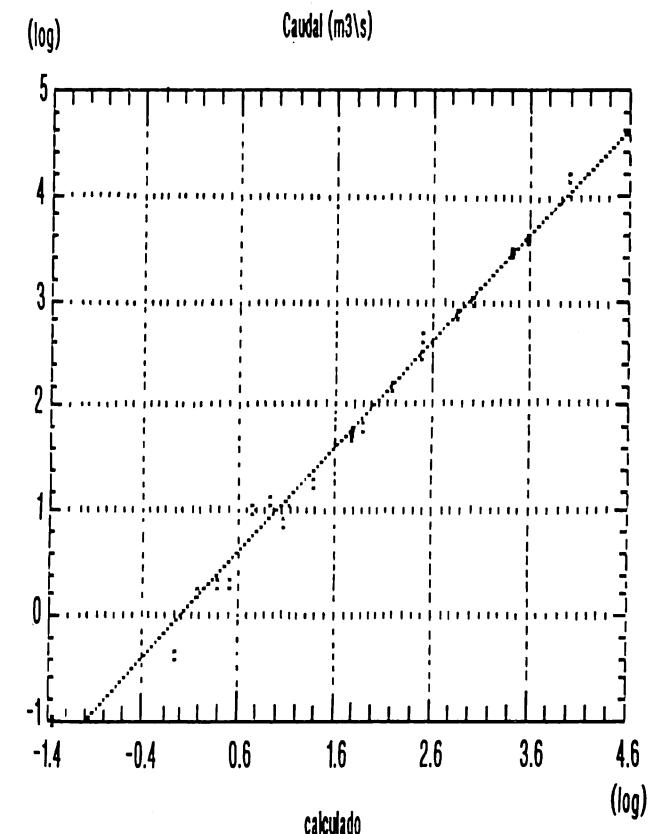


FIGURA 2.
Ajuste del modelo de regresión 16 a las medias observadas de los caudales mínimos diarios en la región 2

3.4 Cálculo de caudales para las subcuencas

Para cada una de las subcuencas en el área de estudio, se calcularon a partir de los parámetros geomorfológicos, y usando los modelos de regresión, los estadísticos de las series de caudales y a partir de esto y usando la distribución Log-Normal, se calcularon caudales máximos y mínimos para varios períodos de retorno.

3.4.1 Modelos usados

Como sólo se disponía de parámetros geomorfológicos sin tener ningún estimativo previo de los estadísticos básicos, se utilizaron los modelos 2, 3, 5, 6, 8 y 10 para la región 1 y los 13, 14, 16, 17, 18 y 20 para la región 2. Como puede verse, estos modelos operan todos sobre el espacio logarítmico pero producen como resultados medias y desviaciones en el espacio natural.

3.4.2 Estimación de caudales asociados a varios períodos de retorno

Chow (1951) demostró que para la distribución Log-

Normal, el caudal asociado a un período de retorno T_r está dado por:

$$Q(T_r) = \mu + k \sigma$$

en la que:

μ = media de los caudales

σ = desviación típica de los caudales

k = factor de frecuencia

El factor de frecuencia (k) se calcula así:

Escogido el período de retorno T_r se halla la probabilidad de excedencia, mediante:

$$p = 1 - 1/T_r$$

Luego se concentra el valor de la abscisa para la cual el área bajo la curva Normal es p ; esa abscisa es el factor k .

El uso de este k exige que se trabaje con las medias y desviaciones en el espacio logarítmico, valores que se pueden obtener de las relaciones:

$$\mu = \exp(\mu\gamma + \sigma\gamma^2/2)$$

$$\sigma^2 = \mu^2 (\exp(\sigma\gamma^2) - 1)$$

En las que $\mu\gamma$ y $\sigma\gamma$ son la media y desviación en el espacio logarítmico, respectivamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se hace a continuación una breve discusión de la significación física de los modelos obtenidos.

4.1 Modelos para la media de los caudales medios

El modelo 14, región 2 incluye como era de esperarse un factor de escala, el área, y una variable íntimamente ligada a la precipitación, como es la temperatura.

El modelo 3, región 1, incluye longitud y perímetro, que juntos están altamente correlacionados con el área y la precipitación no aparece por ser muy uniforme en toda la zona.

4.2 Modelos para la desviación de los caudales medios

Los basados en información estadística, 9 y 19, dicen que la desviación es un porcentaje de la media, alrededor del 20%, lo que implica una regulación muy alta, expllicable por el nivel de agregación, en este caso anual. Por tanto para cuencas de mayor tamaño, la desviación debe ser mayor, aunque el coeficiente de variación (desviación/media), permanezca constante o disminuya ligeramente;

mente; es por eso que los modelos basados en información geomorfológica, 8 y 18, incluyen un factor de escala, longitud, y otras variables climáticas o geoclimáticas.

4.3 Modelos para la media de los caudales máximos

De los basados en información estadística, el 1 básicamente predice la media de los máximos como 12 veces la media de los medios, los tres modelos restantes, 2, 12 y 13, incluyen la relación R de Holdridge con coeficientes negativos, pues a un menor valor de R, corresponde un clima más húmedo tropical y se esperan unos caudales máximos mayores. En los modelos 1, 2 y 13 aparecen además las variables per metro y área como factores de escala.

4.4 Modelos para la desviación de los caudales máximos

Este es el estadístico que presenta menor ajuste debido a que está influenciado por la simultaneidad o no de la ocurrencia de precipitaciones en diferentes zonas de la cuenca.

Para la región 2, sólo se presenta el modelo basado en información geomorfológica, pues al introducir los parámetros estadísticos la correlación no mejoró en nada.

Para la región 1, el modelo 7, basado en información estadística, incluye la media de los caudales medios como factor de escala y la longitud del cauce principal como factor de atenuación, pues a mayor longitud, el tránsito de la creciente será más regulado y por tanto las variaciones alrededor de la media serán menores.

En los modelos 6 y 17 fue necesaria la inclusión de tres variables en cada uno; la correlación es baja y el DELTA R^2 es relativamente alto, lo que demuestra la dificultad de predecir el comportamiento de la desviación de los caudales máximos.

Aparecen área y perímetro como factores de escala y precipitación, altura y R de Hodridge como variables climáticas.

4.5 Modelos para la media de los caudales mínimos

Los modelos basados en información estadística, 4 y 15, muestran una clara dependencia lineal con respecto a la media de los caudales medios, aparece además una interesante correlación positiva con el porcentaje de bosques, pues a mayor cubrimiento del bosque, más capacidad de regulación tiene la cuenca y menos drásticas son las épocas de sequía.

Los modelos basados en información geomorfológica, 5 y 16, muestran área y perímetro como factores de escala y precipitación y altura, como variables climáticas.

4.6 Modelos para la desviación de los caudales mínimos

Los modelos basados en información estadística, 11 y 21, muestran que el coeficiente de variación de los mínimos es muy bajo, 13%, debido al nivel de agregación y a la naturaleza misma del fenómeno (proceso de agotamiento).

Los modelos basados en información geomorfológica, 10 y 20, presentan casi idéntica forma, lo que muestra que el fenómeno de los mínimos es altamente regionalizable, incluyendo los dos modelos, el perímetro como factor de escala, y la precipitación.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del estudio se desprenden las siguientes conclusiones:

- La distribución probabilística de los caudales máximos, mínimos o medios anuales para las cuencas de la región, no es claramente deducible por medios estadísticos, a partir de las observaciones.
- El uso de la distribución Log-Normal es justificado como una hipótesis razonable y no es posible descalificarla por la escasa información disponible.
- El procedimiento de regionalización da muy buenos ajustes a las observaciones (por ejemplo figuras 1 y 2).
- Los modelos obtenidos estadísticamente son razonables desde el punto de vista físico.
- La aplicación juiciosa de los modelos aquí desarrollados, es una herramienta aceptable para tratar cuencas sin registros hidrológicos.
- Los modelos de regresión presentados en la Tabla 3 permiten estimar parámetros estadísticos de las series y caudales para varios períodos de retorno, con base en información geomorfológica o estadística básica.
- Los caudales calculados asociados a varios períodos de retorno, permiten tener estimados iniciales bien sea para aprovechamiento, o bien para obras de defensa, en todas las subcuencas de importancia en la zona de estudio.

- Se debe ser sumamente cuidadoso al utilizar los modelos en situaciones de tamaño, clima o usos del suelo muy diferentes a los propios de las cuencas con estaciones (Tabla 2), pues al acercarse a los límites de las variables geomorfológicas, o sobrepasar éstos, se puede incurrir en errores tanto más grandes cuanto más alejamiento haya de los rangos originales.
- Los modelos de la región 1 son válidos para la cuenca del Nare, aguas arriba del embalse del Peñol; los de la región 2 son válidos para toda la zona de estudio, siempre y cuando se trabaje en el rango de validez de las variables.
- Como recomendación final se propone la aplicación de los modelos a cuencas agrupadas, es decir, a varios puntos de cada corriente de importancia, lo que permite una mejor caracterización tanto para aprovechamiento, como para obras de defensa. Para tal agregación, debe tenerse en cuenta que los modelos se aplican a la información geomorfológica correspondiente y no sumar caudales que no son sumables debido a la no linealidad.

BIBLIOGRAFIA

- CAMARGO, D. Y BAQUERO, H. "REGIONALIZACION DE CAUDALES MAXIMOS EN ANTIOQUIA". Proyecto de Grado. Universidad Nacional. Sede Medellín. 1981.
- CHOW, V. T. "A GENERAL FORMULA FOR HYDROLOGIC FREQUENCY ANALYSIS", Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 32, pp. 231-237, Abril, 1951.
- CORNARE-OFCINA DE PLANEACION, "INVENTARIO BIOFISICO". Santuario, Antioquia, 1988.
- GUZMAN, J. V. y VELEZ, M. V. (1979) "ANALISIS DE CAUDALES MAXIMOS EN ANTIOQUIA". Proyecto de Grado. Universidad Nacional. Sede Medellín. 1979.
- HOLDRIDGE, L. R. (1979) "ECOLOGIA BASADA EN ZONAS DE VIDA", Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica, 1979.
- LINSLEY, R. K. (1977) "HIDROLOGIA PARA INGENIEROS", 2a ed. Ed. McGraw-Hill, México, 386 p.
- MUNERA, J. I. y MUÑOZ, J. R. (1980) "INVESTIGACION REGIONAL DE CAUDALES MINIMOS EN ANTIOQUIA". Proyecto de Grado. Universidad Nacional. Sede Medellín.
- VIESSMAN, Jr. (1977) "INTRODUCTION TO HYDROLOGY". Harper & Row Publishers, New York, 702 p.