

ESTUDIO DEL REGIMEN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN LA CUENCA ANDINA DEL RIO BENI

Luis M. CARRASCO N.⁽¹⁾, Jacques BOURGES⁽²⁾

(1) S.H.N.B., CP 5962, La Paz, Bolivia

(2) ORSTOM, CP 9214, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

El Río Beni -que forma parte de la cuenca Amazónica- es uno de los complejos hidrológicos más importantes de Bolivia, tanto por las diversas posibilidades de aprovechamiento que ofrece, como también por su valor como reserva ecológica a nivel mundial.

CARACTERISTICAS DE LA CUENCA

La cuenca del Río Beni está situada entre los paralelos 14°10'-17°42' de latitud Sud y 66°03'-69°15' de longitud Oeste, se extiende sobre una superficie de 68.900 Km², abarcando gran parte del Departamento de La Paz, una parte de Cochabamba y una pequeña superficie del Beni. Su topografía es variada, ya que presenta zonas altas o cordilleranas en sus regiones del Oeste y del Sur, pasando por zonas de transición o valles interandinos, para posteriormente confluir en el Subandino, que es el límite natural con el llano beniano. Por todo ello, no resulta extraño que en la cuenca se tengan marcadas diferencias de altitud, desde los 6420 m.s.n.m. en el Nevado Illampu, hasta los 300 m.s.n.m. en el Angosto del Bala.

En la cuenca existe mayoría de suelos impermeables con escasos suelos semipermeables. Predomina la vegetación que no pierde su follaje en todo el año excepto durante la floración (bosques siempre verdes). En la zona montañosa de ambiente seco, pero con pendientes más abruptas, existen afloramientos rocosos, la vegetación es inexistente, por lo que se les denomina, "Tierras Eriales". Estas condiciones de cobertura abarcan un 15%. En tierras de altura intermedia y en tierras eriales, existen pastos y arbustos aunque en menor porcentaje.

La Zona de Vida predominante en el área de estudio es la ST=SUBTROPICAL que ocupa dos regiones:

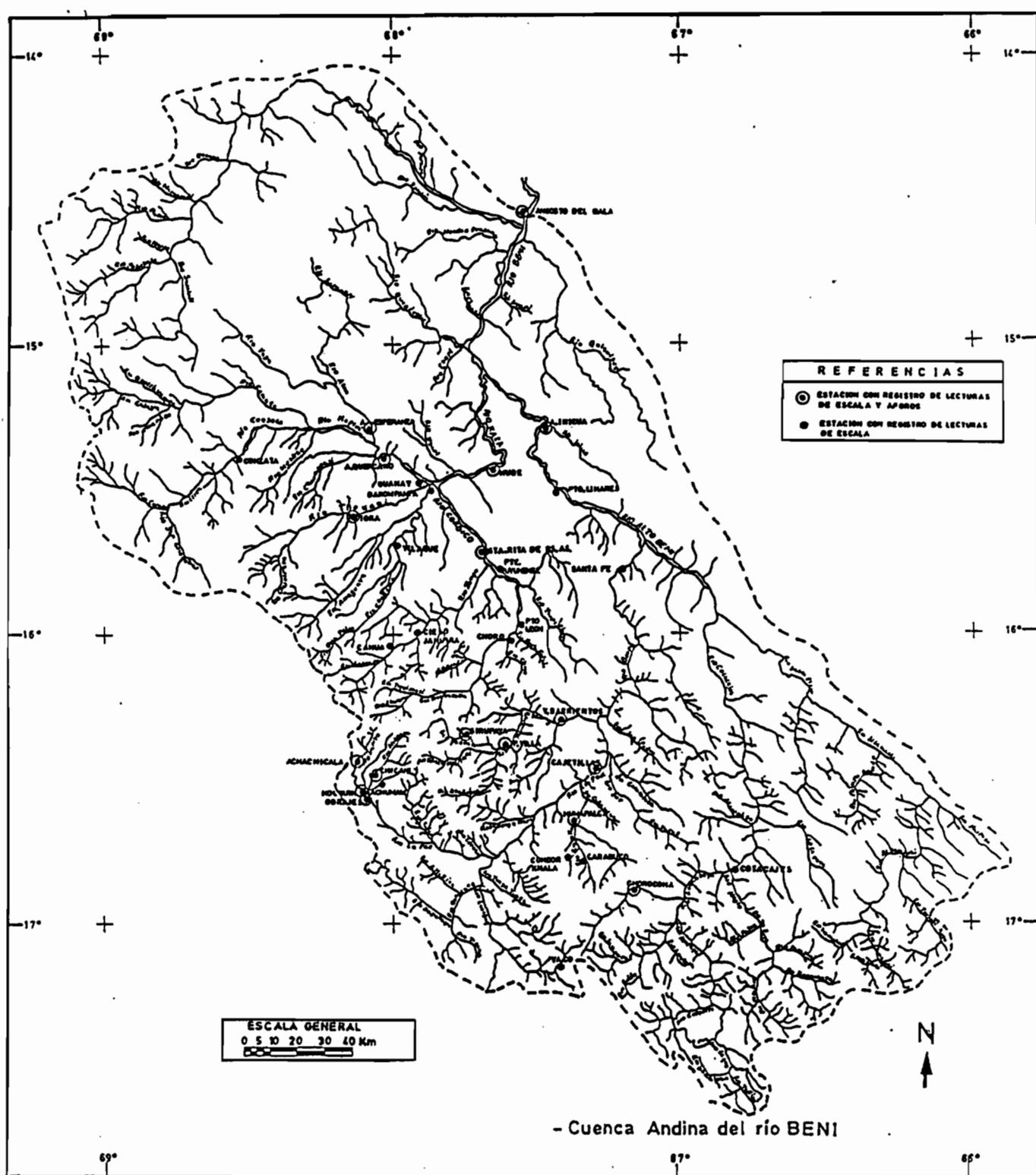
- Región Subtropical de tierras de valles, llamada también "Yungas" y "Faja Subandina", es la más extensa y de ecología más variada en toda la cuenca.
- Región Subtropical Andina, se destacan los valles profundos, valles interandinos y cumbres cordilleranas, muchas de nieves perpetuas, lo que da lugar a numerosos ríos y arroyos.

Las características climáticas más importantes son:

- Un gradiente de temperatura en el eje O-E, en valores medios anuales de 12 a 25 °C y en el eje S-N de 07 a 22 °C.
- La precipitación promedio en el eje O-E varía de 560 a 2360 mm, en el eje S-N, varía desde los 650 a los 1700mm.
- La humedad relativa, varía con la altitud, en el eje O-E varía del 60 al 82% y en el eje S-N de 66 al 77%.

MAPA I

HIDROGRAFIA DE LA CUENCA Y UBICACION DE ESTACIONES



SISTEMA HIDROGRAFICO DE LA CUENCA

Surcada por más de 120 cursos de agua (Mapa I), presenta los siguientes ríos principales: Cotacajes, Santa Elena, La Paz, Tamampaya, Boopi, Alto Beni, Coroico, Zongo, Mapiri, Atén, Kaka, Quiquibey, Tuichi y Beni, que definen unidades hidrológicas, de las que se presenta a continuación sus características morfométricas.

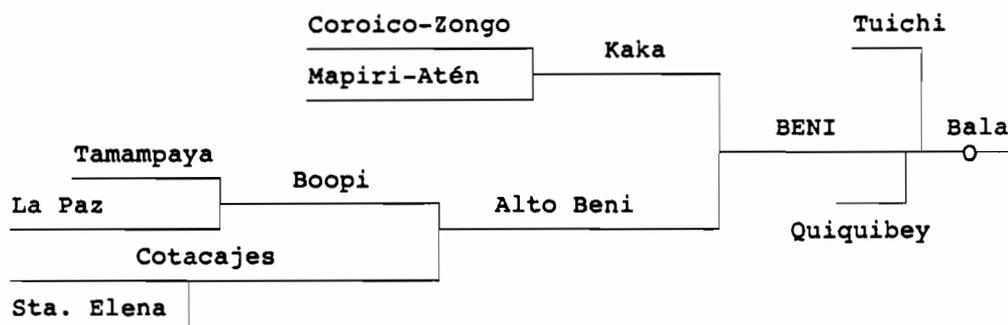
Características Morfométricas por Sub-Cuencas

S-CUENCA	S.ELENA	COTACAJES	LA PAZ	TAMAMPAYA	BOOPI	ALTO BENI	COROICO-ZONGO
Lr (Km)	210	230	160	83	250	372	140
A (Km ²)	5980	8560	7560	2090	12640	31160	5310
P (Km)	431	550	445	191	560	958	319
HM (msnm)	4800	4250	4800	4250	4800	4250	5000
Hm (msnm)	840	840	980	980	750	603	910
Ic	1.5606	1.6645	1.4330	1.1698	1.3947	1.5196	1.2257
L	182.78	239.22	180.65	61.536	223.43	401.36	112.15
l	32.716	35.783	41.849	33.964	56.573	77.635	47.345
R	0.1193	0.1091	0.1358	0.2096	0.1419	0.1241	0.1833
Ff	0.1800	0.1500	0.2300	0.5500	0.2500	0.1900	0.4200
Am	2.3637	2.5856	2.0777	1.3460	1.9873	2.2737	1.5391
Ip	0.1373	0.1218	0.1545	0.1985	0.1273	0.0990	0.1709
Ir	1.9000	1.4800	2.3800	3.9300	1.6200	0.9800	2.9200
Dd	0.1786	0.2280	0.2388	0.3005	0.2385	0.2047	0.2119
Ct	0.0174	0.0215	0.0262	0.0354	0.0278	0.0211	0.0235

S-CUENCA	MAPIRI-TIPUANI	KAKA	QUENDEQUE	HONDO	QUIQUIBEY	TUICHI	BENI(A.BALA)
Lr (Km)	153	231	89	55	121	240	442
A (Km ²)	13200	20460	2130	820	2900	9790	68900
P (Km)	509	670	215	120	263	505	1265
HM (msnm)	3000	3000	1900	1100	1070	5500	4250
Hm (msnm)	910	603	600	450	350	290	284
Ic	1.2405	1.3115	1.3044	1.1734	1.3675	1.4291	1.3519
L	181.95	254.66	81.301	38.944	103.47	204.67	493.38
l	72.546	80.344	26.199	21.056	28.026	47.834	139.12
R	0.1781	0.1585	0.1601	0.2074	0.1468	0.1364	0.1498
Ff	0.4000	0.3200	0.3200	0.5400	0.2700	0.2300	0.2800
Am	1.5837	1.7803	1.7616	1.3600	1.9215	2.0685	1.8832
Ip	0.1169	0.1019	0.1209	0.1087	0.0771	0.1473	0.0947
Ir	1.3700	1.0400	1.4600	1.1800	0.5900	2.1700	0.8900
Dd	0.1534	0.1684	0.1338	0.1317	0.1014	0.1138	0.1700
Ct	0.0109	0.0137	0.0103	0.0061	0.0024	0.0074	0.0153

Lr = Longitud del curso principal	R = Radio de elongación
A = Area de la cuenca	Ff = Factor de forma
P = Perímetro de la cuenca	Am = Alejamiento medio
HM = Altura máxima de la cuenca	Ip = Índice de pendiente
Hm = Altura mínima de la cuenca	Ir = Pendiente media
Ic = Índice de compacidad	Dd = Densidad de drenaje
L = Lado mayor del rectángulo equivalente	Ct = Coef. de torrencialidad
l = Lado menor del rectángulo equivalente	

Para una mejor visión de la distribución de los ríos en la cuenca Andina del Río Beni, se presenta a continuación el siguiente esquema:



RED HIDROMETRICA Y SISTEMATIZACION DE LA INFORMACION.

La Red Hidrométrica, se halla constituida por 10 Estaciones representativas (Mapa I), emplazadas convenientemente en la Cuenca, cada una de ellas cuenta con datos de lecturas de escala y aforos en el período 1973 a 1984.

Los bancos de datos, se crearon con el paquete HYDROM (distribuido por ORSTOM), el mismo que permite un amplio manejo de archivos tanto de lecturas de escala, aforos y curvas de calibración. Mediante la interacción de dichos bancos de datos, se generaron caudales: instantáneos, medios (diarios, mensuales y anuales) y máximos-mínimos (instantáneos y diarios).

Al tener en el período de registros lagunas de información y dado que el escurrimiento superficial, no es un fenómeno local, el relleno de los datos limnimétricos faltantes se realizó por medio de correlación lineal y compuesta, entre estaciones, próximas y/o sobre el mismo curso. Del total de las estaciones en estudio, el 75% de ellas, presenta una variación máxima del nivel de aguas de 4.50 Mts., mientras que el restante 25% presentan una variación mayor, en estas últimas se corrigieron los aforos (medidos en época de crecidas) debido al ángulo que se forma entre el cable que sostiene el escandallo y la superficie del agua.

Las variaciones climáticas, inciden en el régimen de precipitaciones, la presencia de fuertes crecidas en época de lluvias y bajos caudales en época de estiaje provoca fenómenos alternativos de socavaciones y embanques, por ello es posible tener en una estación varias curvas de calibración, que van desde algunos meses hasta varios años.

Al contar con las curvas definitivas para las estaciones de la cuenca, se procedió a realizar la extrapolación de la parte alta mediante 3 métodos; gráfico, area-velocidad media y analítico, para el caso de la parte baja se empleó el método de Johnson/Glusov.

ANALISIS ESPACIO TEMPORAL DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.

Análisis a nivel anual

La distribución del escurrimiento, tanto espacial como temporal, a nivel de los módulos anuales, es caracterizada a continuación :

Angosto del Bala:Angosto Inicua:Nube.

En las tres estaciones en general no se tienen variaciones marcadas con respecto al valor medio, debido al caudal elevado que controlan y a las características topográficas de emplazamiento de cada estación.

Al controlar la variación de un año con respecto al anterior en las tres estaciones se observa claramente que existe gran similitud a excepción del año 82 -en Angosto del Bala- lo que puede explicarse por el hecho de haberse presentado una fuerte crecida en el Bala, la que pudo controlarse convenientemente en dicha estación y no así en las otras dos, otra influencia también pudo provenir de la Sub-cuenca que existe entre A.Inicua-Nube y Angosto del Bala, donde los ríos Tuichi, Quiquibey y Quendque, pudieron haber tenido en ese año un régimen de caudales mayor que el año 1981. De todas maneras al provenir los datos de mediciones hechas en el campo y no como producto del relleno, no puede atribuirse tal variación a otro motivo que no sea físico.

Nube:Santa Rita de Bs. As.:Angosto Quercano.

En general se ve que las marcadas variaciones de un año a otro en Santa Rita, son explicables por la densidad de drenaje y coeficiente de torrencialidad altos de la sub-cuenca y por hallarse en una zona (como los Yungas), de alta pluviosidad.

Los caudales en el Río Kaka son atenuados por la variación gradual de un año a otro en Angosto Quercano (a excepción de 1980), fenómeno que es función del régimen de lluvias y tipo de clima en la zona. Las dos características anteriores unidas al efecto generado por los ríos Tipuani-Zongo (cuya sub-cuenca representa el 30% del total que controla Nube), nos permite tener variaciones no tan pronunciadas con respecto a la media en Nube.

Villa Barrientos:Puente Villa:Sirupaya.

Villa Barrientos se halla emplazada en un lugar rocoso y encajonado. lo que provoca su alta sensibilidad a las variaciones del caudal en el río, a excepción del año 79. La estación se presenta estable y con poca variación respecto a la media, empero en el año citado, se observó, que el nivel del río en dicho punto estuvo por encima de los 2.40 mts. durante los tres primeros meses del año. Esto no sucedió en los años anteriores y posteriores a 79, lo que se explica plenamente ya que ese año se presentó como el más lluvioso para el período en estudio.

En Puente Villa y Sirupaya, no se puede exigir más, debido al lugar y las características pedológicas de la zona. La zona en cuestión presenta suelos fácilmente erosionables, lo que incide en variaciones marcadas del caudal controlado. Esta característica ocasiona que estas variaciones no sean similares a las ocurridas en Villa Barrientos a pesar de ser próximas entre sí y encontrarse en el mismo curso.

Cajetillas:Chorocona.

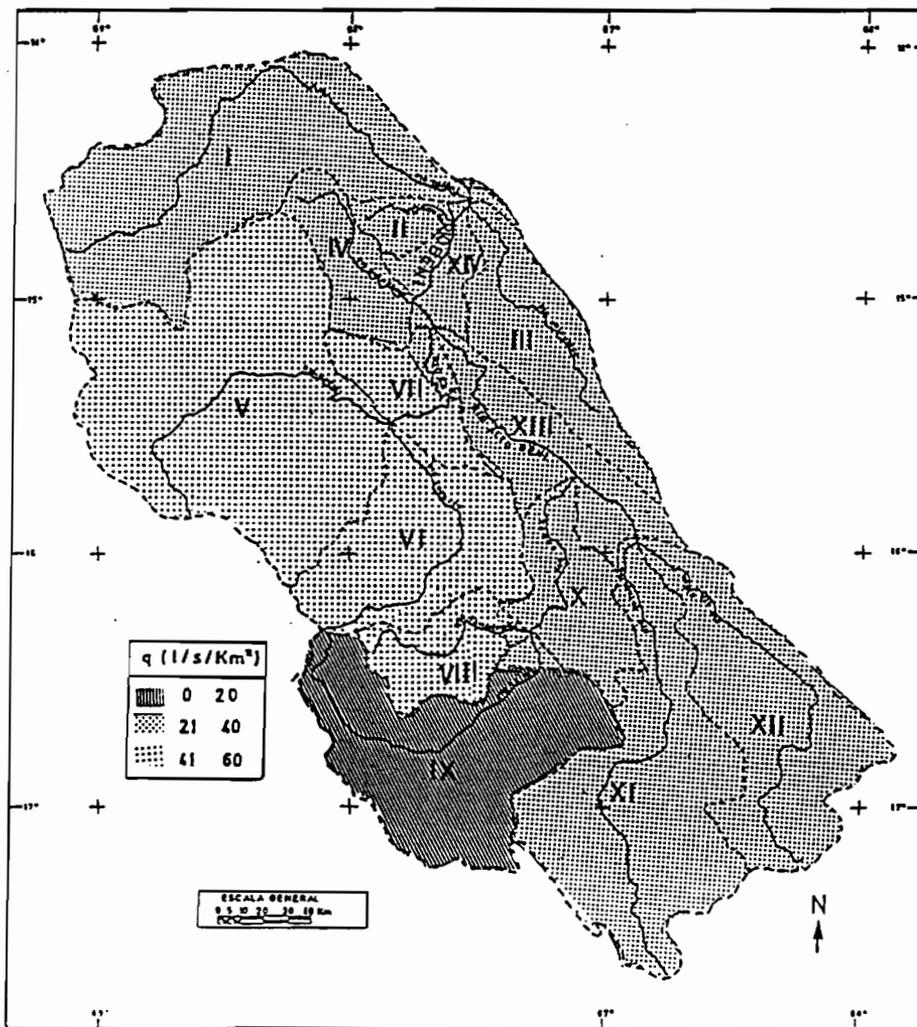
Cajetillas controla una Sub-cuenca, que se caracteriza por la influencia de la topografía, mayor que en el caso de las otras Sub-cuencas. En esta estación, a excepción de los años 78-79, los valores de nivel de aguas fluctúan alrededor del valor medio, por lo que podemos llegar a suponer que en ambos existió una medición de los niveles de agua en exceso. Este extremo no puede ser comprobado debido a que se trata de una estación aislada y que no presenta compatibilidad con las demás estaciones. Los datos obtenidos han sido aceptados como válidos, debido a que el mismo fenómeno de elevado caudal se presenta en los aforos tomados en la estación en los dos años en duda.

En Chorocona se vé que la fluctuación de los caudales respecto del valor medio, no es significativa, a excepción de los años 74, 80 y 83. Esto puede explicarse por su situación geográfica y área de control que es una zona con características de variabilidad del régimen, común a los ríos de tipo torrente, ya que se halla en una quebrada y cabecera de valle.

Caudales Medios Anuales (m^3s^{-1})

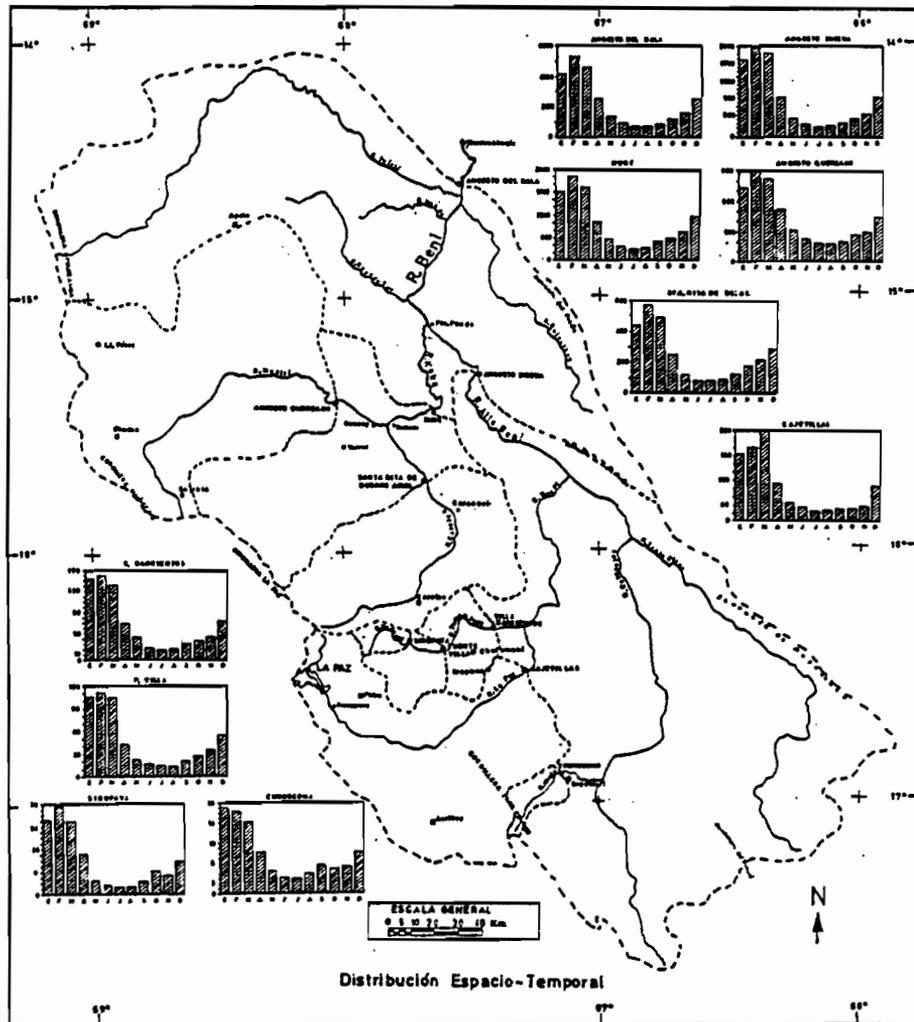
AÑO	BALA	INICUA	NUBE	QUERCANO	S.RITA	V.BARR.	P.VILLA	SIRUP.	CAJET.	CHOROCONA
74	2330	915	1080	444	276	83.5	54.3		113	5.34
75	2440	966	1070	469	236	69.9	49.1		92.6	9.02
76	2130	919	1060	409	216	69.9	50.9		77.3	7.54
77	2240	896	909	404	297	69.1	60.6		79.2	8.50
78	2070	808	837	358	227	77.7	45.9		140	9.92
79	2160	860	901	456	155	85.5	45.8	13.4	95.1	8.61
80	1890	722	842	563	178	68.1	39.7	10.9	47.0	6.93
81	2460	931	1110	457	351	62.7	49.5	15.9	67.3	9.93
82	2600	892	872	406	284	56.7	42.0	10.8	65.4	8.24
83	2000	607	974	280	211	43.6	37.1	8.5	30.3	5.08

Para cada Estación y considerando el período 74-83, se tienen un caudal promedio interanual característico, el mismo que reducido por unidad de superficie, define los caudales específicos. Aplicando éste criterio a las estaciones de la red, se observa (Mapa II), que la zona de los Ríos Mapiro, Coroico y Tamampaya, al ser de mayor pluviosidad, presentan también en promedio el mayor caudal específico ($40-60 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$). La cuenca del Río La Paz se muestra como la de menor ($10-20 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) escurrimiento específico, quedando las restantes sub-cuencas con un valor intermedio ($20-40 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$).



MAPA II
CAUDALES
ESPECIFICOS

REFERENCIAS	
I	S.CUENCA TUCUMI
II	S.CUENCA MONDO
III	S.CUENCA GURQUEBY
IV	S.CUENCA GUENDIPON
V	S.CUENCA MAFISI
VI	S.CUENCA CORICO
V-VI-VII	S.CUENCA KARA
VIII	S.CUENCA TAMAMPAYA
IX	S.CUENCA LA PAZ
VIII-IX-X	S.CUENCA BOOPI
XI	S.CUENCA COTACAJES
XII	S.CUENCA STA. ELENA-ALTAMACHI
VIII-XIII	S.CUENCA ALTO BENI
I-XIV	CUENCA ANDINA DEL RIO BENI



MAPA III
CAUDALES MEDIOS
MENSUALES

Distribución Espacio-Temporal

Análisis a nivel mensual

Los caudales mensuales, nos permiten visualizar las variaciones del caudal en el año, y con ello caracterizar el escurrimiento superficial a nivel mensual y estacional. Los histogramas en el total de las estaciones (Mapa III), muestran la misma tendencia a lo largo del año. Las diferencias que se observan se ubican fundamentalmente en las estaciones que controlan áreas de más de 5000 Km² y las de menos de 2000 Km². En las primeras, el ciclo de aguas altas se inicia en Noviembre y termina en Mayo, en las segundas se inicia en Diciembre y termina en Abril; en ambos casos, se tiene al mes de Febrero como el de mayor caudal y a Julio como el que presenta menor escurrimiento superficial. DE este modo se define 4 períodos: el de aguas altas de Enero-Marzo, de aguas bajas de Junio-Agosto y de transición de Abril-Mayo y Septiembre-Diciembre.

Caudales Medios Mensuales (m³s⁻¹)

MES	BALA	INICUA	NUBE	QUERCANO	S.RITA	V.BARR.	P.VILLA	SIRUP.	CAJET.	CHOROCONA
ENE	4170	1780	1790	733	441	153	106	26.3	164	17.1
FEB	5300	2060	2210	898	573	160	112	31.1	179	16.4
MAR	4590	1940	1910	824	490	142	105	25.8	217	14.3
ABR	2550	916	1010	525	249	68.9	42.7	14.4	91.0	8.17
MAY	1420	444	580	320	121	44.2	23.0	4.98	45.3	4.56
JUN	958	324	387	232	82.9	24.4	17.7	3.34	33.9	3.19
JUL	753	247	304	184	82.1	19.1	14.9	2.58	26.4	2.91
AGO	746	275	341	181	89.2	21.7	14.2	2.79	28.2	4.04
SEP	899	330	505	202	123	31.7	21.5	4.67	30.9	5.70
OCT	1260	441	614	267	176	36.1	27.7	8.35	31.8	4.99
NOV	1620	547	763	293	215	43.7	35.3	6.80	36.6	5.29
DIC	2520	925	1170	435	284	74.0	54.4	11.7	84.6	8.23

La definición de año hidrológico, se basa en el hecho de que se inicia en el momento en que simultáneamente tanto el caudal como la precipitación dejan los valores mínimos de la época de estiaje e ingresan a la época de lluvias, tal fenómeno sucede a fines de Agosto y principios de Septiembre, por lo tanto el año hidrológico para la cuenca se define de Septiembre a Agosto. La variación mensual además nos muestra que se tendrán: Verano lluvioso, Invierno seco y Primavera, Otoño coincidentes con los períodos de transición.

Análisis a nivel diario

Para las estaciones de la cuenca se determinaron los caudales característicos, que permiten caracterizarlas en cuanto al escurrimiento superficial que controlan y son muy útiles para el diseño de obras hidráulicas. El detalle de los principales caudales característicos, por estaciones (sólo las que presentan años completos), se detalla a continuación:

Caudales Característicos en m³s⁻¹

MES	BALA	INICUA	NUBE	QUERCANO	S.RITA	V.BARR.	P.VILLA	SIRUP.	CAJET.
Qm	2220	846	958	410	236	66.7	48.3	11.7	76.9
Qc	19500	7230	5390	3280	2370	442	394	124	2032
QMc	6960	3100	3070	1260	931	234	189	46.7	351
Q90	3090	1180	1350	545	286	89.9	61.7	14.3	82.6
Q120	2380	838	1080	434	226	64.8	46.9	10.3	57.2
Q150	1910	609	871	356	181	50.5	37.2	8.48	45.8
Qs	1460	472	685	287	146	39.2	29.9	6.55	38.2
Q210	1220	393	569	245	126	33.3	23.9	5.47	33.4
Q240	1010	336	438	208	107	28.2	18.7	4.35	28.4
Q270	837	286	369	183	91.7	23.6	14.6	3.38	24.2
Q300	696	244	301	164	74.6	19.8	11.1	2.77	20.1
Q330	571	196	251	140	59.2	16.9	8.75	2.20	16.1
Qmc	453	149	196	115	44.8	13.1	5.39	1.59	12.0
Qe	333	104	142	65.5	31.7	5.63	0.223	1.01	0.076
A	70010	26680	30210	12930	7442	2103	1523	369	2425
L	1016	892	1541	1368	1600	1113	1603	1392	376

Qm	= Caudal Medio Anual (módulo)	Qmc	= Caudal de los 10 días más secos
Qc	= Caudal Máximo Diario	Qe	= Caudal Mínimo Diario
QMc	= Caudal igualado/superado en 10 días del año A	A	= Aportación Media Anual (Hm ³)
Qí	= Caudal igualado/superado en í días del año	L	= Lámina Escurrida (mm)
Qs	= Caudal semipermanente (al 50% del tiempo)		

ANALISIS ESTADISTICO

La difícil tarea de la planeación y diseño de obras hidráulicas está siempre relacionada con eventos hidrológicos futuros. La base de todo estudio hidrológico son los datos medidos sobre las diferentes variables que intervienen en la planificación, diseño y operación de obras de regulación, protección y aprovechamiento de los recursos hídricos de una región, por ello el camino estadístico es el más viable para obtener los resultados que se requieren, los que generalmente tienen que ver con eventos a producirse en el futuro y bajo ciertas condiciones límite.

Cada uno de los datos obtenidos, representa un evento, el que puede ó no repetirse en el futuro, las condiciones necesarias para la ocurrencia ó no del evento, se cumplen por una ley de probabilidad que dará en general, con que frecuencia se presenta el evento, dadas ciertas condiciones. Como el escurrimiento en un río es una variable aleatoria continua, se emplearon funciones continuas de distribución de probabilidad para el análisis estadístico de los datos.

El análisis estadístico se realizó a nivel anual, mensual y máximo instantáneo y para el tratamiento de los datos se empleó un programa de amplia aplicación hidrometeorológica (M.C.M. ver 1.0) que permitió realizar cálculos simultáneos, incluyendo fórmulas complejas sin restricción.

Los resultados del análisis estadístico, pueden ser resumidos en las siguientes tablas:

Estadísticos de las series de Caudales Medios Anuales

ESTADÍSTICOS	A.B.	A.I.	N.	A.Q.	S.R.	V.B.	P.V.	SIR.	CAJ.	CHO.
N° de datos	10	10	10	10	10	10	10	5	10	10
Media Aritmética	2232	852	966	425	243	68.7	47.5	11.9	80.7	7.91
Media Geométrica	2222	844	960	418	237	67.5	47.0	11.6	74.6	7.73
Desviación	224	111	106	74.5	59.0	12.5	7.0	2.83	31.6	1.70
Máximo	2600	966	1110	563	351	85.5	60.6	15.9	140	9.93
Mínimo	1890	607	837	280	155	43.6	37.1	8.50	30.3	5.08
C.Variación	0.10	0.13	0.11	0.18	0.24	0.18	0.15	0.24	0.39	0.21
C.Sesgo	0.17	-1.45	0.14	-0.18	0.34	-0.64	0.35	0.47	0.32	-0.63

Extrapolación de Caudales Máximos Instantáneos en m^3s^{-1}

PERIODO DE RETORNO AÑOS	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA (%)	ANG. BALA	ANG. INICUA	NUBE	ANG. QUER.	STA. RITA	VILLA BARR.	PTE. VILLA	SIR.	CAJ.
1.0101	0.01	8928	929	4223	994	617	96	100	34	10.5
1.0526	0.05	9421	2626	4716	1112	847	157	143	38	93.6
1.11	0.1	9867	3484	5048	1205	1031	197	172	41	216
1.25	0.2	10594	4481	5530	1358	1340	250	209	45	379
2	0.5	12704	6261	6774	1841	2407	373	296	60	756
5	0.8	15972	7880	8636	2797	4857	538	414	89	1264
10	0.9	18198	8664	9969	3655	7357	648	492	115	1600
25	0.96	21008	9454	11774	5058	11914	786	590	157	2025
50	0.98	23057	9940	13206	6379	14754	889	664	196	2340
100	0.99	25059	10360	14718	7981	17058	991	736	243	2653
200	0.995	27085	10732	16320	8430	19354	1092	808	300	2965
1000	0.999	31603	11483	20480	10518	24672	1327	975	480	3687
10000	0.9999	37890	12352	27668	13501	32273	1663	1214	919	4718

BIBLIOGRAFIA

CARRASCO NATTES L.M., Aplicaciones y Manual de Manejo - Programa M.C.M. ver 1.0 (Mecanismos - Computacionales - Multipropósito ver 1.0), In Press.

CARRASCO NATTES L.M. (1990). Estudio del régimen del escurrimiento superficial en la cuenca andina del Río Beni. Tesis UMSA. Publ. PHICAB, La Paz.

HERAS RAFAEL (1976). Hidrología y Recursos Hidráulicos. Tomos I y II. (Madrid).

BOURGES J., GUYOT J.L., CARRASCO L.M., BARRAGAN M.C., CORTEZ J., (1990), Evolution spatio temporelle des débits et des matières particulaires sur un bassin des Andes Bolivienne: le Río Beni, 352-356, In Hydrology in Mountainous Regions, H. Lang & Musy (eds), IAHS Publ. 193.

BOURGES J., CARRASCO L.M., HYDROM, (1990), Manual del Usuario, ORSTOM. Eds, Montpellier.

ALDEGHERI M., ORSTOM.(1979), Manuel d'hydrométrie. Mesure des débits a partir des vitesses.Tomo IV., ORSTOM Eds, Paris

GUÍA DE PRÁCTICAS HIDOLÓGICAS VOLÚMEN I. No.168 (1984), Adquisición y proceso de datos. (OMM).

PROYECTO HIDROMETEREOLOGICO CENTRO AMERICANO (1969), Publicación No.70, Manual de Instrucciones - Estudios Hidrológicos (San José, Costa Rica).

SOUZA, PINTO, Hidrología Aplicada.