
ARTÍCULO VI

ESTIMACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES DE AGUAS ALTAS Y ANÁLISIS DE LAS RELACIONES LLUVIA-ESCORRENTÍA

*Éric Cadier, Georges Girard, Jean-François Nouvelot, Pierre Pourrut,
Michel Travaglio, Rafael Ahulema, Iván Leiva, Fabián Burbano, Roberto Cruz*

El método de estudio de la escorrentía ya fue objeto de una corta presentación en el artículo I. Destinado a estimar los recursos hídricos superficiales con fines agro-pastorales, inicialmente estaba centrado en la evaluación de los parámetros hidrológicos, ya sea necesarios para la elaboración de los proyectos de valorización de los perímetros agrícolas, o requeridos para la construcción de obras de almacenamiento o captación. Se trataba entonces esencialmente de apreciar el valor de los módulos y de los estiajes. Es sorprendente constatar que el estudio de las aguas altas era considerado entonces como relativamente secundario por las entidades encargadas de la recolección de datos hidrológicos, indiferencia que se traducía por cierto en la inexistencia casi sistemática de medidas de caudales elevados, casi siempre estimados a partir de la extrapolación aventurada de las curvas de calibración establecidas con aforos de aguas bajas y medianas. A pesar de la insistencia ya antigua de los hidrólogos del ORSTOM, hubo que esperar el decenio de los ochenta para que la urgencia de resolver ciertos problemas específicos al desarrollo de las zonas secas, al igual que la absoluta necesidad de aumentar a corto plazo la dotación de agua potable de las grandes ciudades, permitieran finalmente equipar tres cuencas representativas.

Se revela primeramente útil indicar en pocas palabras algunos aspectos de los que se deriva la problemática de los estudios hidrológicos en el Ecuador:

- como en la mayoría de países en vías de desarrollo, las cuencas controladas por las estaciones hidrométricas de la red nacional son en general de gran

tamaño, siendo raras las de una extensión menor a varios centenares de Km²;

- al inicio, a falta de observaciones sobre las cuencas y subcuencas hidrográficas de reducida extensión equipadas con una cantidad suficiente de aparatos de medición, era por supuesto impensable establecer relaciones que permitan pasar de las lluvias a los escurrimientos, y menos aún proceder al análisis estadístico de los parámetros de la escorrentía utilizando, como de costumbre, los datos de las estaciones pluviométricas de referencia situadas en la misma zona. Afortunadamente, algunas estaciones de la red hidrométrica poseían observaciones de una duración bastante larga y de calidad aceptable a la vez que controlaban cuencas de superficie relativamente reducida; en cambio, tales cuencas no estaban equipadas con una red pluviométrica de densidad suficiente e incluso a veces no existía puesto pluviográfico alguno. El estudio estadístico de los parámetros hidrológicos debía entonces efectuarse independientemente de la pluviometría;

- la gran heterogeneidad de las condiciones físico-climáticas, sobre todo en las regiones secas, implica imperativamente la instalación de una cantidad importante de cuencas vertientes representativas de superficie reducida.

El presente artículo comprende dos partes, expuestas en el orden cronológico de su realización.

La primera se refiere a los estudios antiguos realizados en las estaciones hidrológicas de la red nacional de observación. Como ya se indicó, se trataba de rellenar de la mejor manera la importante laguna referente al

estudio de las crecidas. Esto explica que los valores estimados por los hidrólogos del ORSTOM, basados en una información precaria o insuficiente, sean probablemente aproximados incluso si algunos son aún de actualidad.

La segunda parte trata de los estudios realizados sobre tres conjuntos de cuencas representativas, en asociación con organismos de desarrollo regional y con un municipio. Tales estudios se proponían cuantificar las disponibilidades de agua e identificar los parámetros que permitieran la óptima utilización de los recursos existentes. En el plano estrictamente hidrológico, permitieron sobre todo afinar una buena cantidad de conceptos que habían permanecido imprecisos y especialmente establecer (como se verá, con una precisión muy desigual según los casos) las relaciones que, en cuencas de superficie limitada y con intervalos de tiempo cortos, unen las lluvias a la escorrentía.

I. Evaluación de las aguas altas en las estaciones de la red

En una primera fase, no se pudo hacer nada mejor que consultar los registros y diagramas originales de todas las estaciones de la red que tenían más de ocho años de observaciones a fin de buscar las alturas máximas de agua observadas y luego, una vez realizado el análisis crítico de la curva de calibración y de sus posibilidades de extrapolación, *evaluar los caudales máximos anuales* y calcular la media correspondiente. La representación gráfica de los valores de los caudales específicos (q en l/s/Km²) en función de las superficies de las cuencas (S en Km²) y el trazado de las curvas

$$q \cdot \sqrt{S} = \text{Cte}$$

permiten comparar los caudales máximos provenientes de cuencas de superficies diferentes.

Aunque constituye un procedimiento rudimentario, tal estudio, basado en aproximadamente 40 estaciones, permite apreciar que las zonas de alto relieve de la cordillera Occidental, en particular los sistemas hidrográficos situados en la fachada pacífica, producen crecidas desproporcionadas con relación a la superficie de las cuencas; ellas resultan probablemente de la ruptura brutal de tapones producto de enormes deslizamientos de terreno. Se constata igualmente que los ríos costeros están sujetos periódicamente a desbordamientos catastróficos que deberían ser objeto de estudios particulares para conocer su propagación y determinar las obras de protección necesarias.

Mientras las cuencas representativas en proceso de instalación proporcionaran los resultados esperados, lo que no podía esperarse, razonablemente, antes de tres a cinco años, se emprendió un *estudio hidrológico teórico sobre las cuencas hidrográficas de tamaño mediano no equipadas con red pluviométrica*. Tal estudio se proponía

remediar provisionalmente la falta de datos, sobre todos de aquellos relativos a las altas aguas, proporcionando estimaciones que, si se respetaban los criterios de representatividad puestos en evidencia, podían transferirse o extrapolarse a conjuntos más amplios.

Por principio, para tener una cierta representatividad, las estaciones hidrométricas escogidas debían tener cuencas de una superficie inferior a los 1.000 Km², estar equipadas con un limnógrafo que haya funcionado durante por lo menos diez años (duración que pudo disminuirse a cinco o seis años en ciertos casos), disponer de una calibración lo suficientemente extensa como para no tener que recurrir a extrapolaciones demasiado importantes, tener a proximidad (e incluso mejor en la cuenca misma) una o varias estaciones pluviométricas de referencia y finalmente pertenecer a grandes conjuntos físico-climáticos (zonas hidrológicas teóricamente homogéneas, ver artículo I).

Las observaciones y las medidas seleccionadas con base en los criterios expuestos dieron lugar a un tratamiento cuyas grandes líneas se indican a continuación.

1. Se calcularon de nuevo cuidadosamente las relaciones alturas-caudales. Se descartó toda relación no unívoca y se puso especial atención en los cambios de calibración que son muy frecuentes en el Ecuador. Se verificaron los valores de los caudales elevados gracias a una comparación de los resultados obtenidos de diversas maneras, por extrapolación ya sea de la curva de calibración o de las curvas de velocidades medias y de secciones mojadas, o finalmente mediante la utilización de fórmulas hidráulicas tradicionales (Manning ...).

2. Se procedió a una rigurosa selección de las crecidas observadas, conservando únicamente la muestra constituida por aquellas que tenían un caudal pico elevado y cuya forma era simple, con un ascenso y un descenso bien individualizados; solo en casos excepcionales, por falta de datos, se utilizaron hidrogramas resultantes de la descomposición de una crecida compleja. Las crecidas escogidas permitieron trazar y definir parámetros correspondientes a los hidrogramas de crecidas de frecuencias mediana y decenal (ver punto 4 más adelante). Por supuesto, no se puede hablar de verdaderos « hidrogramas unitarios », para los que se necesita conocer la distribución de las lluvias en el tiempo y el espacio, sino más bien de *hidrogramas característicos* cuya forma fue simplificada al máximo a fin de obtener resultados homogéneos. Se calcularon:

- el tiempo de subida t_s
- el tiempo de base t_b
- el volumen total escurrido V_e
- el volumen de escurrimiento superficial V_r
- la lámina total escurrida $L_e = V_e / S$
- la lámina de escurrimiento superficial $L_r = V_r / S$
- el caudal inicial Q_0

- el caudal máximo total $Q_{\max}$
- el caudal promedio escurrido Q_m
- el caudal máximo de escurrimiento superficial Q_r
- el coeficiente de forma $K_f = Q_r / Q_m$, en donde el

caudal promedio de escurrimiento superficial $Q_{mr} = V_r / t_b$

3. Debido al número generalmente insuficiente de años observados, la muestra necesaria para el análisis estadístico de los caudales pico no contempla un solo valor por año sino que está compuesta de todos los picos de crecidas no vinculados entre sí. Esta condición de independencia de los valores es fundamental, lo que explica que algunos de ellos fueran descartados. Una vez seleccionados, los datos de cada estación fueron clasificados en orden decreciente ($n, n+1, \dots$) y se calculó la frecuencia empírica de cada valor a fin de buscar la ley de distribución que diera el mejor ajuste. Dada la utilización de series cuyo número de eventos N es ampliamente superior al número de años de observación N_a , hay que señalar que las frecuencias calculadas tienen en cuenta este último valor; no se trata entonces de la frecuencia empírica obtenida a partir de las fórmulas tradicionales $F = n - 0,5 / N$, o incluso $F = n - 0,3 / N + 0,4$, sino de la frecuencia $f = F \cdot N_a / N$. Se realizaron igualmente pruebas comparativas trabajando por clases o en muestras reducidas con valores superiores al umbral.

4. Conociendo para cada estación los valores de los diversos caudales pico de frecuencia 0,5 ó 0,1 (las muestras no permitieron estimar los valores de recurrencia mayor), se elaboró un hidrograma promedio ya sea por comparación de las crecidas relacionándolas con una misma lámina escurrida (10 mm por ejemplo) o simplemente adoptando como valores las medianas de los tiempos de subida y de los tiempos de base, así como el mayor coeficiente de forma.

5. Para relacionar las crecidas con las lluvias que las han provocado, por ejemplo, para estimar el coeficiente de escurrimiento superficial K_r , se debe admitir primeramente que toda crecida de una cierta frecuencia ha sido provocada por un aguacero diario (excepcionalmente lluvias de varios días consecutivos cuando los tiempos de base son muy largos) con una frecuencia idéntica y bastante bien repartida en toda la cuenca. En el capítulo 1 del artículo IV se demostró que se podían utilizar las leyes de Galton y de Pearson III para el análisis de las lluvias diarias (o de varios días consecutivos) en la mayor parte de las regiones del país. Es posible entonces, ya sea servirse de los datos de una estación de referencia de larga duración si existe en la cuenca o a proximidad, o utilizar el mapa de isoyetas anuales y los ábacos del artículo mencionado para calcular la precipitación diaria que tenga la frecuencia buscada.

Sin embargo, el valor obtenido es puntual y, una vez conocida esa altura pluviométrica P_x que tiene una cierta probabilidad de observarse en cualquier punto de

una cuenca de superficie S , se debe pasar a la lluvia media P_m que tenga la misma probabilidad de observarse en el conjunto de la cuenca. Se debe entonces definir un coeficiente de reducción $k_a = P_x / P_m$. Desgraciadamente, como los estudios realizados en el Ecuador sobre la variabilidad del coeficiente de reducción son incompletos o poco convincentes, se debió recurrir a la fórmula propuesta por Gabriel Vuillaume para África Occidental y Central:

$$k_a = 1 - (9 \log T - 42 \cdot 10^{-3} P + 152 \pm 10) 10^{-3} \log S$$

en donde S es la superficie de la cuenca, P la altura pluviométrica anual y T el período de retorno para el que se calcula k_a . El empleo de esta fórmula (se conservó el coeficiente 9, probablemente un poco elevado en el Ecuador, y se escogió 152 como valor del factor constante) se justificó mediante una verificación realizada *a posteriori* en la cuenca vertiente representativa del Tinto, en donde dio resultados muy coherentes.

6. Gracias a las características definidas por los hidrogramas (t_b , K_f y V_r) y a partir de lo anterior, se puede, para las frecuencias escogidas, proceder al cálculo de los demás parámetros y en particular del coeficiente de escurrimiento superficial K_r . Es así como, a partir de la fórmula que define el coeficiente de forma

$$K_f = \frac{Q_r}{Q_m} = Q_r \cdot \frac{t_b}{V_r}, \text{ se deduce:}$$

$$V_r = \frac{Q_r \cdot t_b}{K_f}$$

$$L_r = \frac{V_r}{S} = \frac{Q_r \cdot \frac{t_b}{K_f}}{S}$$

y después de haber estimado el aguacero promedio P_m en la cuenca:

$$K_r \text{ en } \% = 100 \frac{L_r}{P_m}$$

7. Regresando a la extrapolación a las zonas desprovistas de observaciones de los principales parámetros de las crecidas, especialmente los caudales pico, se comprenderá fácilmente que el reducido tamaño de la muestra de trabajo no permitía abarcar el territorio en su conjunto. El método indicado a continuación es entonces válido solamente:

- en el callejón interandino y en las estribaciones de la cordillera Occidental, para relieves con fuertes pendientes (clases R6 a R8, ver más adelante) en donde el aguacero diario mediano está comprendido entre 25 y 65 mm (clase H1). Se trata de zonas cuya altura anual de lluvia puede variar de 700 a 1.800 mm y en donde predomina una cobertura vegetal herbácea con raíces superficiales;

- en las regiones costaneras con un relieve fuerte a moderado (clases R4 y R5), en donde la lluvia diaria

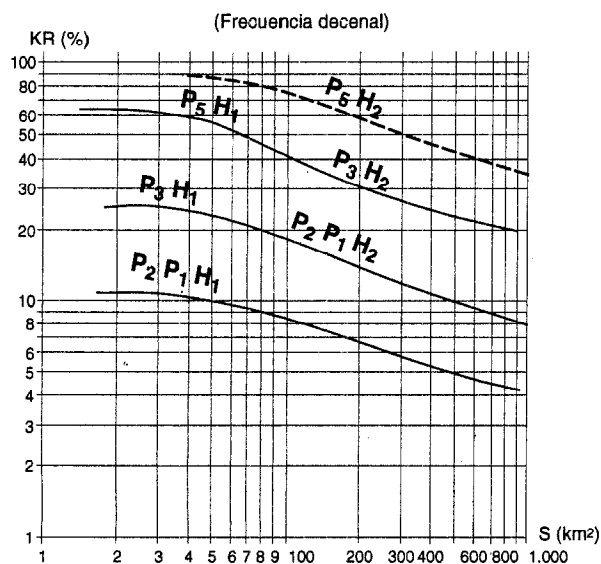


Fig. 22 - Variación del coeficiente de escurrimiento superficial en función de la superficie, de la permeabilidad de la cuenca y de las precipitaciones anuales

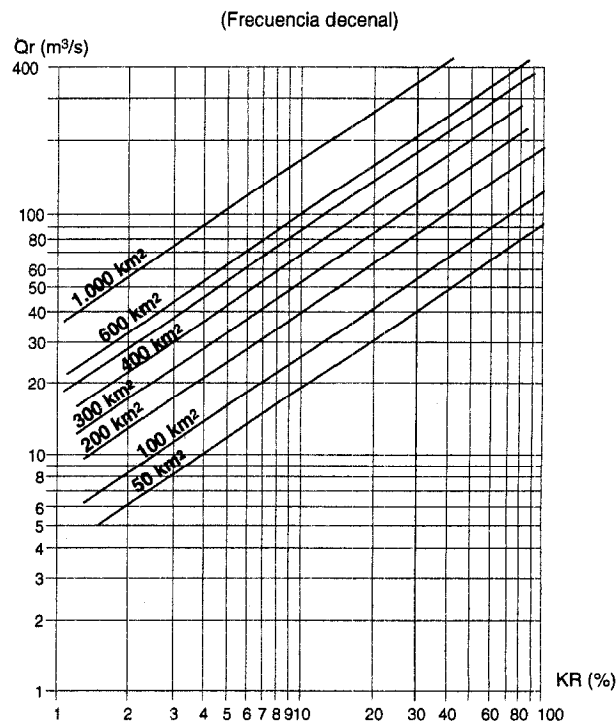


Fig. 23 - Variación del caudal máximo de crecida en función del coeficiente de escurrimiento superficial y de la superficie de la cuenca

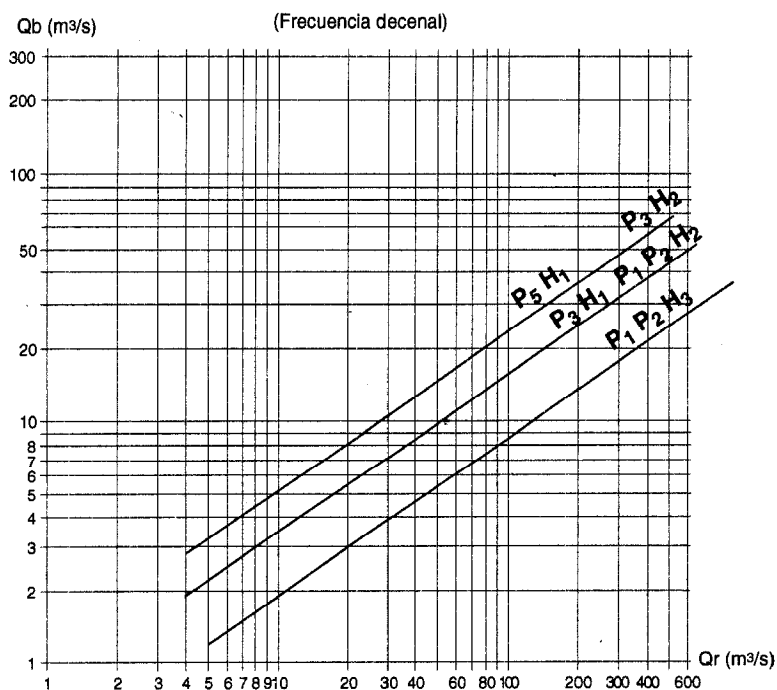


Fig. 24 - Variación del caudal de base en función del caudal máximo de crecida, de la permeabilidad de la cuenca y de las precipitaciones anuales

está comprendida entre 65 y 100 mm (clase H2). Se trata de una vasta zona en donde la altura pluviométrica anual varía de 1.200 a 2.500 mm y en donde la vegetación natural dominante, bastante densa, es un bosque cuyos árboles tienen un sistema radicular bien desarrollado.

El procedimiento de estimación de los valores de frecuencia decenal comprende las siguientes etapas:

a) en primer lugar, corresponde calcular la superficie S de la cuenca y definir a qué clases de permeabilidad P y de altura pluviométrica diaria H corresponde. Mientras que los dos primeros parámetros requieren una documentación cartográfica, se puede estimar el último, ya sea tomando como referencia un puesto pluviométrico con un período de registro bastante largo, o, en su defecto, utilizando las normas presentadas en el artículo IV de esta obra;

b) luego se debe utilizar la figura 22 para estimar el valor probable del coeficiente de escurrimiento superficial $K_r = f(S, P, H)$;

c) una vez conocido K_r , se puede evaluar el caudal máximo de escurrimiento superficial Q_r utilizando la figura 23, en donde $Q_r = \phi(K_r, S)$;

d) finalmente, para pasar del caudal máximo de escurrimiento superficial al caudal pico total Q_{max} , hay que agregarle el valor del caudal de base Q_b que fluye en el mismo instante, parámetro que se puede estimar con la ayuda de la figura 24.

Estas estimaciones proporcionan a los diseñadores de proyectos (incluso si se trata solo de una evaluación para un período de retorno de diez años) el valor de los parámetros que generalmente hacen falta cuando se deben dimensionar obras hidráulicas, por ejemplo calcular sobre bases racionales la apertura de un puente, la sección de un canal o las características de un vertedero de crecida.

Las cuencas de referencia y los principales resultados se presentan en los cuadros 12 y 13.

En el cuadro 12 figuran las características físicas y climáticas en 12 cuencas hidrográficas que sirvieron de referencia para realizar el presente análisis; su superficie varía de 66 a 715 Km². A pesar de la presentación general del método de extrapolación espacial y de regionalización utilizado en el Ecuador, que aparece en el artículo I, la comprensión del cuadro requiere la siguiente información complementaria:

- columna 2: nombre de la estación hidrométrica de control; las abreviaciones a.j. y d.j. significan « antes de la confluencia » y « después de la confluencia »;
- columna 5: altitud de la estación, en m.s.n.m.;
- columna 6: superficie, en Km²;
- columna 7: índice de Gravelius (compacidad de la cuenca);
- columna 8: índice de pendiente o clase de relieve, calculado a partir del desnivel específico D_s :

R1 = relieve muy reducido	$D_s < 10$ m
R2 = relieve reducido	$10 < D_s < 25$
R3 = relieve reducido a moderado	$25 < D_s < 50$
R4 = relieve moderado	$50 < D_s < 100$
R5 = relieve moderado a fuerte	$100 < D_s < 250$
R6 = relieve fuerte	$250 < D_s < 500$
R7 = relieve muy fuerte	$500 < D_s < 1.000$
R8 = relieve extremadamente fuerte	$1.000 < D_s$

- columna 9: clase de aporte subterráneo, es decir de participación efectiva de las aguas del subsuelo en la escurrimiento; esta noción es más o menos asimilable a la permeabilidad (el índice H es signo de heterogeneidad):

- P1 = zona muy permeable, con o sin napa acuífera;
- P2 = zona permeable con napa acuífera;
- P3 = zona de permeabilidad mediana a baja;
- P4 = zona kárstica o macro-fisurada;
- P5 = zona impermeable;

- columnas 10 y 11: pluviometría anual y diaria de frecuencia mediana.

El cuadro 13 resume las características principales de las crecidas de frecuencia mediana y de frecuencia decenal para las mismas estaciones: caudal pico total, caudal máximo de escurrimiento superficial, tiempo de subida, tiempo de base, coeficiente de forma y coeficiente de escurrimiento superficial.

II. Estudios de las aguas altas realizados en cuencas vertientes representativas o experimentales

El 14 de julio de 1978, se suscribió en Quito un convenio interinstitucional de cooperación técnica relativo a « la realización de estudios en cuencas vertientes representativas o experimentales ». Los signatarios eran el Ministerio ecuatoriano de Agricultura y Ganadería a través del PRONAREG, el INERHI, el CRM, el CREA, el PREDESUR y la EMAP-Quito, con la asistencia técnico-científica se confiaba al equipo de hidrólogos del ORSTOM en Quito. El objetivo fundamental de ese acuerdo era instalar, en cuencas de tamaño pequeño o mediano, una red de observación hidro-climatológica suficiente como para analizar y cuantificar los diversos parámetros del balance hídrico y, especialmente, para estimar las características de los escurrimientos excepcionales y establecer las relaciones lluvia-escurrimiento superficial.

Como las regiones áridas (península de Santa Elena, provincia de Manabí) y las zonas urbanas podían presentar un déficit en el abastecimiento de agua potable (aglomeración de la capital), se consideraron prioritarias y los primeros sitios equipados abarcaron las tres cuencas vertientes juzgadas representativas de cada una de esas regiones: la del río Tinto, la del río Banchal y la de la ciudad de Quito.

nº	Estación	Latitud	Longitud W	A en m	Características físicas de la cuenca				Lluvia media	
					S (km²)	C	R ~	P ~	año	día
1	Portoviejo a Santa Ana	01° 12' 10" S	80° 22' 00"	50	466	1,82	R5	P3H	1.550	95
2	Carrizal a Calceta	00° 50' 40" S	80° 09' 35"	20	546	1,42	R4	P3H	1.800	93
3	Bulubulu a.j. Payo	02° 15' 11" S	79° 33' 23"	40	687	1,52	R3-5	P2	2.000	95
4	Calera a.j. Amarillo	03° 38' 23" S	79° 38' 32"	680	215	1,20	R7-8	P3-4	1.500 ?	62 ?
5	Chimbo a San Lorenzo	01° 04' 11" S	79° 00' 15"	2.400	616	1,30	R7	P3-4	780	37
6	Chima a.j. Pesquerías	01° 51' 25" S	79° 04' 15"	2.100	96	1,30	R7-8	P4	1.200 ?	60
7	Matadero d.j. Alausí	02° 52' 01" S	79° 04' 00"	2.645	312	1,22	R6	P3H	1.200	45
8	Yanayacu Puente Pucará	01° 04' 27" S	78° 27' 18"	3.095	256	1,32	R6	P3H/4	1.400 ?	59*
9	Ambato a Ambato	01° 15' 32" S	78° 39' 46"	2.680	715	1,20	R6-7	P4/3H	850	27
10	Apaquí d.j. Minas	00° 32' 16" N	77° 47' 00"	2.650	329	1,23	R6	P3H	1.300?	47
11	Guachalá a.j. Granobles	00° 00' 41" N	78° 10' 00"	2.740	411	1,39	R6-7	P2-4	1.500	47
12	Ozogoche desagüe lago**	02° 14' 43" S	78° 35' 52"	2.715	66	1,22	R7	P3H	1.200 ?	42

* Lluvia de 2 días consecutivos

** existencia de lagos

C es el índice de compacidad de Gravelius

R ~ es la clase de relieve, definida a partir del desnivel específico de la cuenca (ver artículo I)

P ~ es el tipo de aporte subterráneo deducido de la permeabilidad de las rocas (ver artículo I)

? valor aproximado

Cuadro 12 - Estaciones de estudio de las crecidas

nº	Estación	Crecida de frecuencia mediana						Crecida de frecuencia decenal					
		Qmax	Qr	tm	tb	Kf	Kr (%)	Qmax	Qr	tm	tb	Kf	Kr (%)
1	Portoviejo a Santa Ana	88	76	8h30	28h00	2,35	12	137	122	10h30	35h00	2,15	17
2	Carrizal a Calceta	240	215	10h00	43h00	2,70	25/30	265	235	12h00	50h00	2,60	30/35
3	Bulubulu a.j. Payo	77	62	7h30	30h00	2,20	6	110	90	12h00	40h00	2,10	9
4	Calera a.j. Amarillo	83	63	1h35	8h00	3,50	6	110	85	2h15	11h00	3,00	9
5	Chimbo a San Lorenzo	75	60	1h30	11h00	3,10	4	128	108	2h00	13h30	3,10	6,5
6	Chima a.j. Pesquerías	16	8	3h00	11h00	2,85	3	23	13	4h30	15h00	2,80	4,5
7	Matadero d.j. Alausí	69	58	2h30	16h00	3,40	10	96	84	3h00	19h00	3,35	13
8	Yanayacu Puente Pucará*	78	66	12h30	72h00	2,60	55/58	92	77	13h00	80h00	2,55	60/65
9	Ambato a Ambato	92	80	4h00	12h30	2,55	11	115	100	5h00	15h00	2,50	14
10	Apaquí d.j. Minas	56,5	50	4h30	22h00	3,00	14	76	65	7h00	30h00	3,00	17
11	Guachalá a.j. Granobles	64	54	8h00	26h00	2,60	13	92	79	9h00	33h00	2,90	15/16
12	Ozogoche desagüe lago**	12,5	7,5	11h00	33h00	2,90	13	18	12	13h30	38h00	3,10	16

* lluvia de dos días consecutivos

** existencia de lagos

Cuadro 13 - Características de las crecidas

Tal como lo especifica el título de este artículo, se abordarán aquí únicamente los aspectos relativos a las aguas altas y a las relaciones entre las lluvias y la escorrentía. Para todo complemento de información respecto a los estudios realizados en los tres conjuntos de cuencas, el lector podrá remitirse a las informes técnicos correspondientes. Por razones diversas, la calidad de los resultados obtenidos es sumamente heterogénea.

1. LA HOYA DE QUITO

Situada en un compartimento fallado de la vertiente interandina de la cordillera Occidental, enmarcada por los altos relieves de los volcanes Pichincha (4.680 m.s.n.m.) y Atacazo, al Oeste, y por el *horst* de Puengasí-Bellavista al Este, la ciudad de Quito se extiende de Norte a Sur en más de 35 Km, mientras que su ancho nunca supera los 8 Km. En su mayoría, está construida sobre la llanura lacustre que ocupa el eje de la depresión (2.800 m.s.n.m.) pero, como consecuencia del incremento explosivo de la población durante el último decenio, algunos barrios periféricos recientes ocupan los flancos del Pichincha y llegan a veces a los 3.200 m.s.n.m.

Los estudios duraron cuatro años a contarse desde el 1º de marzo de 1981. Fueron realizados por un grupo de ingenieros de alto nivel y de técnicos pertenecientes a la EMAP-Q y al PRONAREG, en cooperación con los hidrólogos del ORSTOM. Además, la EMAP-Q financió una colaboración de expertos de calidad y el programa contó con el apoyo del *Centre Informatique Géologique* — Centro Informático Geológico — de la *École Nationale des Mines* — Escuela Nacional de Minas — de París, para el aspecto modelización, y del *Bureau de Géologie Appliquée* — Oficina de Geología Aplicada — (BURGEAP), para el aspecto alimentación artificial de las napas.

Contrariamente a las soluciones de gran envergadura contempladas (tal como la transferencia de los recursos de la cuenca amazónica o el proyecto Mica-Tambo a cargo de una consultora francesa, con financiamiento muy importante y puesta en servicio relativamente lejana en el tiempo), las investigaciones emprendidas debían en principio proporcionar al municipio de la capital ecuatoriana una opción de costo razonable que pueda contribuir a resolver a un menor plazo su principal problema, el abastecimiento de agua potable para una población urbana en permanente crecimiento.

En efecto, se debe saber que, al iniciarse los estudios, el déficit de tal abastecimiento para el año 1994 era estimado en 1.300 l/s y que los caudales disponibles entonces, del orden de los 3.000 l/s, de los cuales un tercio provenía de la explotación de las aguas subterráneas de Quito, ya no podían responder a los picos de la demanda. Para hacer frente a esta situación, las reservas potenciales eran muy bajas: por una parte, los recursos en agua superficial localizada en la proximidad ya

habían sido utilizados en su totalidad, y por otra, la explotación desde hacía cuarenta años de la napa acuífera había sido tan intensa que los niveles piezométricos habían disminuido en promedio en 20 a 30 m, estando la baja de producción apenas compensada por el aumento de la profundidad de los antiguos pozos y la puesta en servicio de nuevas perforaciones. Este breve panorama de una situación socialmente explosiva explica el contenido de los dos principales objetivos de los estudios: en primer lugar, mejorar o al menos mantener el nivel de explotación de las aguas subterráneas mediante su recarga artificial, y, en segundo término, elaborar un modelo de manejo que permita definir las diversas estrategias que conduzcan a optimizar su utilización teniendo en cuenta al mismo tiempo los demás aportes.

Se repara en el carácter complejo de las investigaciones de hidrología tridimensional a desarrollarse en este perímetro enteramente modificado por la intervención humana, en donde los criterios habituales que rigen las leyes de los flujos tanto superficiales como subterráneos en medio natural ya no tienen vigencia. Es por ello que el amplio espectro de datos de base a recogerse exigía, de manera imperativa, no solo la instalación de redes hidroclimatológica e hidrogeológica de importancia, sino también la instauración de un sistema de control de las observaciones y de ejecución de mediciones de gran calidad.

1.1. Equipamiento de la cuenca

a) Red hidrométrica: El perímetro estudiado, llamado por comodidad « hoya de Quito », pertenece a dos sistemas hidrográficos (figura 25):

- en el Sur y en la zona central (dos sectores urbanos bien individualizados), el del Machángara y su afluente principal, la quebrada del Batán. Después de la confluencia de esta última, la cuenca abarca un total de 213 Km² en la estación hidrométrica de Dos Puentes;

- el del río Monjas, que drena el Norte de la ciudad y cuya estación S2 de El Colegio controla una superficie de 48,5 Km².

Entre las partes aguas arriba y aguas abajo, se extiende toda la zona urbanizada (superficie estimada en aproximadamente 9.500 ha en 1980). El flujo circulaba entonces por conductos subterráneos de una red única que evacúa al mismo tiempo las aguas lluvia y las aguas servidas cuya obstrucción sistemática al producirse aguaceros importantes ocasiona serias inundaciones e introduce errores sistemáticos en los valores característicos de las crecidas, los mismos que, según el deseo lógico de los hidrólogos, debían ser « puros ». Es una de las razones por las que se debió proceder a la instalación de cinco estaciones hidrométricas complementarias.

Dos de ellas controlaban a los afluentes principales del Machángara después de su trayecto subterráneo,

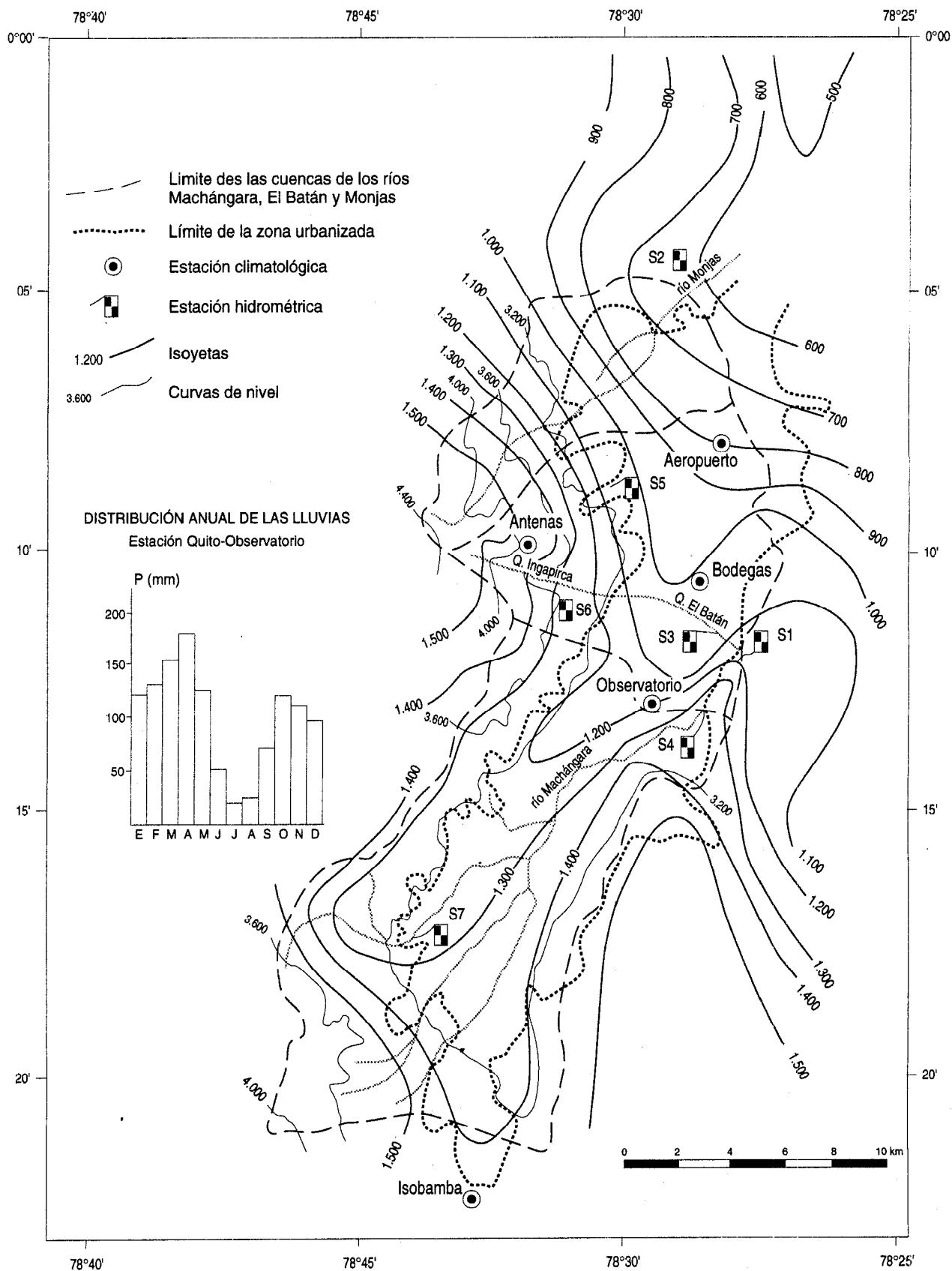


Fig. 25 - Red de observación hidrometeorológica y lluvias anuales en Quito

inmediatamente a la salida de la zona de intensa urbanización:

- estación S3 en El Batán (59,5 Km²);
- estación S4 en el Machángara en Guápulo, antes de su unión con El Batán (151 Km²).

Las otras tres estaciones estaban destinadas al estudio de los flujos que presumiblemente no estaban perturbados y fueron instaladas en las pequeñas cuencas en las faldas de los volcanes. Del Norte hacia el Sur:

- estación S5 de La Pulida Chica (3,5 Km²);
- estación S6 de Rumanaccha (6,7 Km²);
- estación S7 del Salto de la Libertad (16,2 Km²).

Todas estas estaciones estaban por supuesto equipadas con limnógrafos (tipo OTT X de rotación diaria) y con escalas limnimétricas. En cuanto a las secciones de aforo, presentaban diversas características:

- secciones naturales coronadas por puentes de carretera: S1 y S4;
- controles artificiales: canales y paredes de hormigón en V, más pasarela de medición: S2, S5, S6 y S7;
- canal de salida de la red de evacuación de las aguas de la ciudad, más pasarela de medición: S3.

b) Red meteorológica y climatológica: La ciudad de Quito disponía ya de un buen número de estaciones de larga y mediana duración, instaladas por razones específicas o para tratar de aprehender de la mejor manera el fuerte gradiente que, de Norte a Sur, afecta a la mayoría de elementos climáticos, muy especialmente las precipitaciones (figura 25). Aparte de aquella del Aeropuerto, manejada por la Dirección de Aviación Civil, todas las demás están controladas por el INAMHI:

- Quito-Observatorio, la más antigua puesto que entró en funcionamiento en 1890;
- Quito-Aeropuerto, instalada en 1957;
- Isobamba, cuya serie comienza en 1962;
- Cotocollao, instalada en 1963 por religiosos, al Norte de la ciudad, abandonada en 1984;
- Bodegas Ñaquito, en servicio desde 1974.

Salvo la estación Isobamba, situada a 3.060 m.s.n.m., en el borde meridional de la hoya, todas las demás están situadas en el eje de la depresión central a alturas muy cercanas, apenas superiores a los 2.800 m.s.n.m. Para caracterizar el clima de las partes altas de la cuenca y estimar diversos gradientes altitudinales (se instalaron igualmente varios puestos pluviométricos y tanques de evaporación intermedios a fin de precisar mejor las lluvias y la evaporación, factores importantes en el cálculo de los balances), se puso en funcionamiento, el 1º de agosto de 1981, una nueva estación climatológica llamada « de las Antenas », en las pendientes del Pichincha, a 3.900 m.s.n.m.

c) Red de medición de las precipitaciones: Además de los registradores de las 6 estaciones citadas, existían igualmente

12 pluviómetros o pluviógrafos pertenecientes al INERHI o al INAMHI, es decir una red inicial de 18 aparatos.

Para dar cuenta de la extrema heterogeneidad de la pluviometría, tanto a nivel diario (los quiteños dicen que « llueve por barrios ») como a nivel anual, la red definitiva fue incrementada a 47, de los cuales 26 pluviógrafos (17 de ellos funcionando con sifón y 9 con balancín).

d) Red de observación piezométrica: Se señaló ya la importancia de las aguas subterráneas y la antigüedad de su explotación, cuyas normas de utilización y de conservación, dictadas por el Cabildo de la ciudad, se remontan a 1535. Esto implica que, en 1981, había gran número de puntos de agua destinados a diversos usos y el inventario más o menos exhaustivo realizado en el marco de los estudios daba cuenta de 188, de los cuales 49 eran manantiales. Sin embargo, no se procedía sistemáticamente a medición alguna de los niveles de la napa, y las pocas referencias a la profundidad correspondían ya sea a niveles estáticos observados durante la perforación de las antiguas obras, o incluso a niveles dinámicos (o pseudo-estáticos dadas las interferencias entre pozos) medidos durante perforaciones recientes o suspensiones del bombeo para trabajos de mantenimiento. A esta falta de información bastante desconsoladora, había que agregar una situación igual de negativa: la extrema densidad de los pozos de ciertas zonas y la intensidad de la extracción (más de 40 sitios bombeados permanentemente por la EMAP-Q y alrededor de 50 utilizados por particulares con fines industriales).

A fin de estimar de la mejor manera los niveles piezométricos, una vez efectuada la indispensable nivelación topográfica de cada punto de agua, se procedió:

- a la instalación de tubos que permitieran el paso de una sonda eléctrica de medida, a lo largo de los conductos de las bombas de eje vertical de 16 pozos;
- a la colocación, en 4 pozos, de limnógrafos de rotación semanal, 2 fijos y 2 móviles, utilizándose episódicamente estos últimos como piezómetros de observación durante ciertos bombeos de prueba).

Conclusión relativa a los equipamientos: gracias a un esfuerzo financiero consecuente y a un trabajo meritorio, el equipo de la EMAP-Q respetó los planos de instalación y aceptó el control permanente de los trabajos así como las recomendaciones de los hidrólogos del ORSTOM. Se puede entonces considerar que las redes de observaciones y de medidas proporcionaban las garantías teóricas necesarias y suficientes para la obtención de los resultados esperados.

1.2. Operación de las redes

Paralelamente a la instalación o mejoramiento de las redes de observación y medición, los hidrólogos del

ORSTOM, ayudados por los responsables del PRONAREG, del INERHI y de la EMAP-Q, se dedicaron a mejorar la capacitación del personal local de los diversos equipos que se encargarían de la recolección de los datos de base, su clasificación e incluso su interpretación. Se dispuso entonces un entrenamiento intensivo. En el plano de los ejercicios prácticos de campo, el esfuerzo se centró particularmente en la correcta utilización de los aparatos de medición y de los registradores, en la ejecución de las mediciones de caudales en las condiciones a menudo difíciles impuestas por el contexto y en la obtención de los diversos datos hidrogeológicos, tales como la realización de bombeos de prueba. En cuanto al complemento de conocimientos necesario para la buena ejecución de las tareas de oficina, se dictaron varios cursos teóricos (entre otros sobre las estadísticas utilizadas en hidroclimatología y sobre hidráulica subterránea) y se procedió a la transferencia de las técnicas ORSTOM utilizadas tradicionalmente para la clasificación y el procesamiento de la información; este último aspecto fue completado más tarde mediante la elaboración de programas adaptados a las calculadoras entonces disponibles, tales como los relativos a la depuración de los aforos, las leyes de distribución o la repartición espacial de las precipitaciones.

Sumándose a la amplitud de la capacitación dispensada a los diversos participantes, el permanente control asumido por el equipo del ORSTOM a todo lo largo del estudio permite afirmar la buena calidad de los datos elaborados con base en la información recogida en el campo.

¿Cuál es actualmente la situación en cuanto a la calidad de los datos de base recogidos por el personal encargado de la operación de las diversas redes? Sin que, por supuesto, sea posible generalizar al extremo, la calidad de la información en bruto generada por el estudio estuvo muy condicionada por la existencia de factores, algunos de los cuales escapaban totalmente al control del equipo científico.

Se debe ante todo señalar la importancia de ciertos aspectos del contexto físico-climático:

1. Indiscutiblemente, la urbanización puede considerarse como un factor primordial de complejidad. Todos conocen el considerable aumento de los escurrimientos superficiales con la paralela disminución de los tiempos de respuesta de la cuenca y de subida de las crecidas, como consecuencia de la impermeabilización de parte de la zona de abastecimiento. En el presente caso, se agrega a él el efecto inducido por ciertas características de las tuberías subterráneas: mezcla de las aguas servidas y las aguas de origen pluvial, insuficiente capacidad de evacuación lo que coloca el sistema en carga hidráulica. Además de la inundación de numerosos sectores urbanos, las consecuencias hidrológicas son las siguientes:

- sesgo, cuya importancia es difícil de determinar, de las características de las fuertes crecidas, en particular

de los caudales pico y de los tiempos de subida. ¿Cómo, en esas condiciones, trazar un hidrograma estándar y relacionar los escurrimientos superficiales con las alturas y la intensidad pluviométricas? ¿Cómo apreciar la influencia de las zonas urbanizadas?

- flujos de salida bajo la forma de un verdadero chorro con velocidades superiores a 5 m/s, de olor nauseabundo y con transporte sólido importante. Esto implicaba, por una parte, la imposibilidad de aplicar las fórmulas hidráulicas comunes dada la forma del canal de salida, y por otra, un riesgo sanitario inherente al inevitable contacto con las aguas contaminadas y a la inhalación de los efluvios químicos durante las tentativas de aforo. Así, se comprende por qué se debieron estimar los caudales de aguas altas en las estaciones hidrométricas S3 y S4 a partir de las velocidades de superficie medidas con flotadores naturales, con el elevado riesgo de error que presenta esa evaluación.

2. Otro factor, cuyo papel es esencial en la escorrentía, es el pronunciado relieve de la parte aguas arriba (estaciones S5 y S6 de las vertientes del Pichincha y, en un grado menor, la estación S7 del Atacazo) y del tramo situado inmediatamente aguas abajo de los colectores de la ciudad (en S2, después de S3, S4 y antes de S1). A pesar del cuidado con que se eligió la localización de las estaciones de medidas hidrológicas, las velocidades y los caudales sólidos son muy elevados. Es así como la estación S5 de La Pulida Chica debió abandonarse dada la importancia de la sedimentación (que alcanzó 1,5 m de espesor en el canal de medición de la estación durante la primera crecida de importancia) que volvía inútil cualquier esfuerzo de registro de los escurrimientos (colmataje del pozo del limnógrafo) o de medición de los caudales (rápidas variaciones de la sección mojada y de la cota de referencia). Aguas abajo, se observó frecuentemente el desplazamiento de bloques que podían alcanzar varios quintales, lo que explica la gran dificultad de realizar la calibración de las estaciones hidrométricas S1 y S4 sin exponer los costosos equipos a daños mayores (escandallo de 50 kg arrastrado en toda dirección, hélice torcida ...).

3. Finalmente, la heterogeneidad espacial de las alturas de lluvia y de las intensidades de los aguaceros debe considerarse como un factor que contribuyó en gran medida a dificultar el establecimiento de las relaciones lluvia-escorrentía. En efecto, no cabe duda de que, pese a su cobertura juzgada inicialmente satisfactoria, la red de observación no daba cuenta de la realidad de las precipitaciones, fenómeno que puede atribuirse a la vez a una densidad insuficiente y al mal funcionamiento (y en ocasiones al robo sistemático) de parte de los registradores. Prueba de ello es una crecida particularmente devastadora de la quebrada La Raya, que pasó desapercibida en el plano pluviométrico. Suponiendo que se hubieran

podido estimar correctamente las láminas escurridas y los caudales pico, se ve que no era posible atribuir sino una confianza limitada a los parámetros pluviométricos a tenerse en cuenta para el estudio de las crecidas y de las relaciones entre lluvias y escurrimiento superficial.

Sin embargo, las condiciones físico-climáticas enumeradas no son los únicos factores explicativos de la calidad de las observaciones y mediciones efectuadas en las diferentes redes. En el presente caso, se deben tomar en consideración también factores de orden humano y señalar que los funcionarios municipales (que ya ocupaban esos puestos) a quienes la EMAP-Q encargó la parte operativa de las redes no pudieron cumplir a cabalidad con sus tareas; en efecto, se trataba a menudo de realizar, fuera de los horarios habituales (los aguaceros tienen lugar generalmente a finales de la tarde o durante la noche), un trabajo de campo cuya dificultad ya se señaló. Fueron entonces los hidrólogos del ORSTOM, en ocasiones ayudados por los responsables de la EMAP-Q y del PRONAREG, quienes debieron asumir la realización de parte de las mediciones durante la estación lluviosa; dado su limitado número y los demás estudios en curso, no pudieron dedicarse a esa tarea sino de manera esporádica e imperfecta.

Conclusión relativa a la operación de las redes:

El gran esfuerzo que representa la constitución de redes amplias, lo mejor adaptadas posible al difícil contexto físico-climático, no tuvo desafortunadamente su equivalente en lo que respecta a la operación que fue deficiente durante eventos hidro-pluviométricos importantes.

1.3. Efecto de la urbanización y relación entre las lluvias y el escurrimiento superficial

Ya se mencionó que los estudios realizados en la hoya de Quito recibieron el apoyo del Centro Informático de la Escuela Superior de Minas de París, con miras a elaborar un modelo matemático acoplado destinado al manejo de los recursos hídricos. Basadas en un modelo tridimensional probado (MODCOU) que garantizaba la consideración de las transferencias y los intercambios entre aguas superficiales y subterráneas, las investigaciones dieron lugar a la redacción de un informe en idioma francés, el mismo que comprende, entre otras cosas:

- la presentación del conjunto de los datos anteriores a 1981 y de los recogidos en 1982 y 1983;
- la exposición de los resultados someros obtenidos utilizando todas las observaciones e informaciones derivadas de la explotación del modelo.

La experiencia y el renombre científico de los autores certifica que las conclusiones a las que llegan (al igual que las opiniones sin concesión alguna que expresan) son autoridad. Ello justifica el hecho de haber extraído de su obra largos extractos relacionados con el

tema del presente artículo, que son reproducidos a continuación (traducción libre).

« Es útil recordar que las instalaciones de las estaciones hidrométricas de la región de Quito fueron implantadas durante el segundo semestre de 1981 por el PRONAREG y la EMAP-Q (bajo el control del ORSTOM) pero que, debido a dificultades de retiro de aduana, los limnigrafos no pudieron colocarse sino durante el segundo trimestre del año 1982. Aunque los niveles eran levantados tres veces al día por los observadores de las escalas limnimétricas y se indicaban la cota máxima alcanzada por cada crecida así como la hora correspondiente, no fue posible reconstruir, ni siquiera aproximadamente, la variación de los niveles de agua a lo largo del tiempo (año 1981-1982). En efecto, tales niveles son extremadamente variables en el tiempo y solamente un registro continuo de los mismos permitiría obtener informaciones precisas. »

« Numerosos problemas prácticos quedan por resolverse y por repensarse en Quito dadas las dificultades técnicas locales. La estación de Pulida Chica fue completamente obstruida por el importante transporte sólido producto de una de las primeras crecidas de fines de 1982. El limnógrafo instalado aguas arriba de la estación Dos Puentes fue dañado casi por completo por una violenta crecida. Se lo debió instalar 200 m aguas abajo en donde fue averiado por la caída de bloques de roca descargados por camiones desde la cima de la colina.

Por otro lado, los ajustes y las calibraciones no pudieron efectuarse en buenas condiciones dado el difícil acceso a los aparatos, la falta de fondos y los medios inadecuados, pues los datos recogidos no están exentos de anomalías. Anotemos que las medidas de caudales realizadas en un curso de agua que recibe directamente las aguas servidas y las alcantarillas de una ciudad de más de 800.000 habitantes, sin depuración alguna en una planta de tratamiento, demandan a los operadores mucha buena voluntad, dados los riesgos sanitarios y los peligros que representa la potencia del flujo de agua de esos verdaderos torreses. Al parecer, en Quito no se percibieron en su justa magnitud las dificultades de realización de las mediciones.

Constatamos actualmente que numerosos registros limnigráficos son irrecuperables, que algunas calibraciones aún no son satisfactorias y que los caudales diarios obtenidos contienen gran cantidad de anomalías. »

« ... presentar dos casos tipo de respuestas observadas en las cuencas vertientes de Quito ante aguaceros moderados y mostrar las dificultades de las medidas completas y simultáneas de los eventos hidropuviométricos.

Durante el viaje de trabajo de junio de 1984, se pidieron las informaciones completas relativas a esos dos eventos, las mismas que se obtuvieron al final de dicho viaje. » Se presenta como ejemplo únicamente el evento más característico.

- El aguacero del 30 de agosto de 1983 fue observado:
- en el pluviógrafo PG 33: lluvia total de 40,6 mm, intensidad máxima de 53,5 mm/h en 11 minutos;
- en el pluviógrafo PG 15: lluvia total de 98,0 mm, intensidad máxima de 24 mm/h en 5 minutos;
- en el pluviógrafo PG 23: lluvia total de 29,6 mm, intensidad máxima de 60 mm/h en 20 minutos;
- el pluviógrafo PG 28 no funcionó;
- en el pluviógrafo PG 7: lluvia total de 20 mm, intensidad máxima de 31,2 mm/h en 25 minutos.

Las informaciones entregadas, aunque incompletas, permiten apreciar la variabilidad de las intensidades de las precipitaciones en el tiempo y el espacio, aunque sin precisarlas.

Los cuatro hietogramas trazados en la figura 26 muestran que el aguacero del 30 de agosto duró, según el lugar, entre 1 hora y 1 hora 30, siendo su período útil de aproximadamente 30 minutos con una intensidad promedio del orden de 40 mm/h (48-40-29).

Los hidrogramas de crecida en las estaciones El Batán, Guápulo y Dos Puentes, aunque presentan errores evidentes que indicaremos posteriormente, aportan valiosas indicaciones que figuran en el siguiente cuadro:

	El Batán	Guápulo	Dos Puentes
volumen escurrido (m ³)	370.500	446.400	1.281.000
caudal máximo (m ³ /s)	75	80	242
superficie urbana			
año 1976 (Km ²)	16,5	21,7	38,1
lámina de escurrimiento superficial en zona urbanizada (mm)	22,5	20,6	33,6
caudal específico, zona urbanizada (m ³ /s/Km ²)	6,35	4,54	3,69
superficie de la cuenca (Km ²)	56,21	51,0	208,2

La intensidad promedio de la lluvia de 40 mm/h en 30 minutos da un caudal específico de lluvia del orden de 11,1 m³/s/Km². Este último valor debe ser comparado con el caudal específico de crecida en zona urbanizada para poner en evidencia no solo el interés del conocimiento del grado de impermeabilización de las zonas urbanizadas sino la necesidad de conocer perfectamente la variación de las fuertes intensidades de las precipitaciones en el espacio mediante pluviógrafos registradores.

Subsisten numerosas incertidumbres a nivel de la superficie de las cuencas vertientes urbanizadas en la época de la fuerte precipitación del 30 de agosto de 1983 y a nivel de las intensidades de la misma en el espacio, para apreciar el coeficiente de escurrimiento superficial debido a la impermeabilización.

Desde el punto de vista crítico de los resultados de las medidas hidrológicas, los hidrogramas presentados comportan varias anomalías.

Dado que la cuenca vertiente intermedia para pa-

sar de la estación de El Batán a la de Guápulo apenas tiene una superficie de 1 Km², el hidrograma en la estación de Dos Puentes debería, con un margen de algunos por cientos, ser comparable al obtenido por adición directa de los hidrogramas de crecida de El Batán y Guápulo. De ello se deriva que:

- a) el hidrograma de El Batán está adelantado aproximadamente en 2 horas $\pm$ 20 minutos;
- b) admitiendo un sincronismo entre los dos picos de crecida en El Batán y en Guápulo, el caudal máximo en Dos Puentes no debería superar la suma del caudal máximo en El Batán (75 m³/s) y del caudal en Guápulo (80 m³/s), es decir 155 m³/s. Ahora bien, según las medidas en Dos Puentes, alcanzaría 240 m³/s.

El error cometido está comprendido entre el 35 y el 55 %.

En conclusión, se puede decir que las observaciones y las medidas efectuadas en la hoya de Quito permitieron adquirir una voluminosa y valiosa masa de información relativa a los elementos climáticos, al régimen de precipitaciones y a las láminas escurridas. Contribuyeron también a mejorar el conocimiento de la geometría de los acuíferos, de sus características hidrodinámicas y de sus reservas, incluso si la falta de fondos no permitió proceder a las pruebas de recarga artificial que constituían el objetivo principal del proyecto.

No sucede desgraciadamente lo mismo en lo que respecta a la distribución espacial de las intensidades y de las alturas diarias de lluvia o en lo relativo a la escurrimiento a intervalos cortos de tiempo, parámetros cuyo conocimiento sigue siendo muy impreciso, y en todo caso insuficiente como para permitir una evaluación ni siquiera aproximada de la influencia de la urbanización en el escurrimiento superficial o como para proceder al establecimiento de las relaciones lluvias-escurrimiento durante las fuertes crecidas. En ese campo, no se puede sino constatar la modestia del producto científico final.

2. CUENCA VERTIENTE REPRESENTATIVA DEL RÍO BANCHAL

Situada entre 01° 34' 20" y 01° 46' 55" de latitud Sur y entre 80° 28' 28" y 80° 35' 40" de longitud Oeste, la cuenca vertiente del río Banchal es representativa del 40 % de Manabí, vasta provincia litoral cuyo elevado potencial agro-pastoral está sometido a las incertidumbres del clima, en particular a las variaciones de un régimen pluviométrico caracterizado por un fuerte gradiente negativo de Este a Oeste y una gran irregularidad anual y estacional. Contrastando con la franja costera en donde el riego es de rigor, la región central, en donde está situada la cuenca, tienen una producción agraria muy diversificada (algodón, cacao, frutas y verduras de pretemporada, pastizales para un importante ganado bovino) durante los años normalmente regados por la

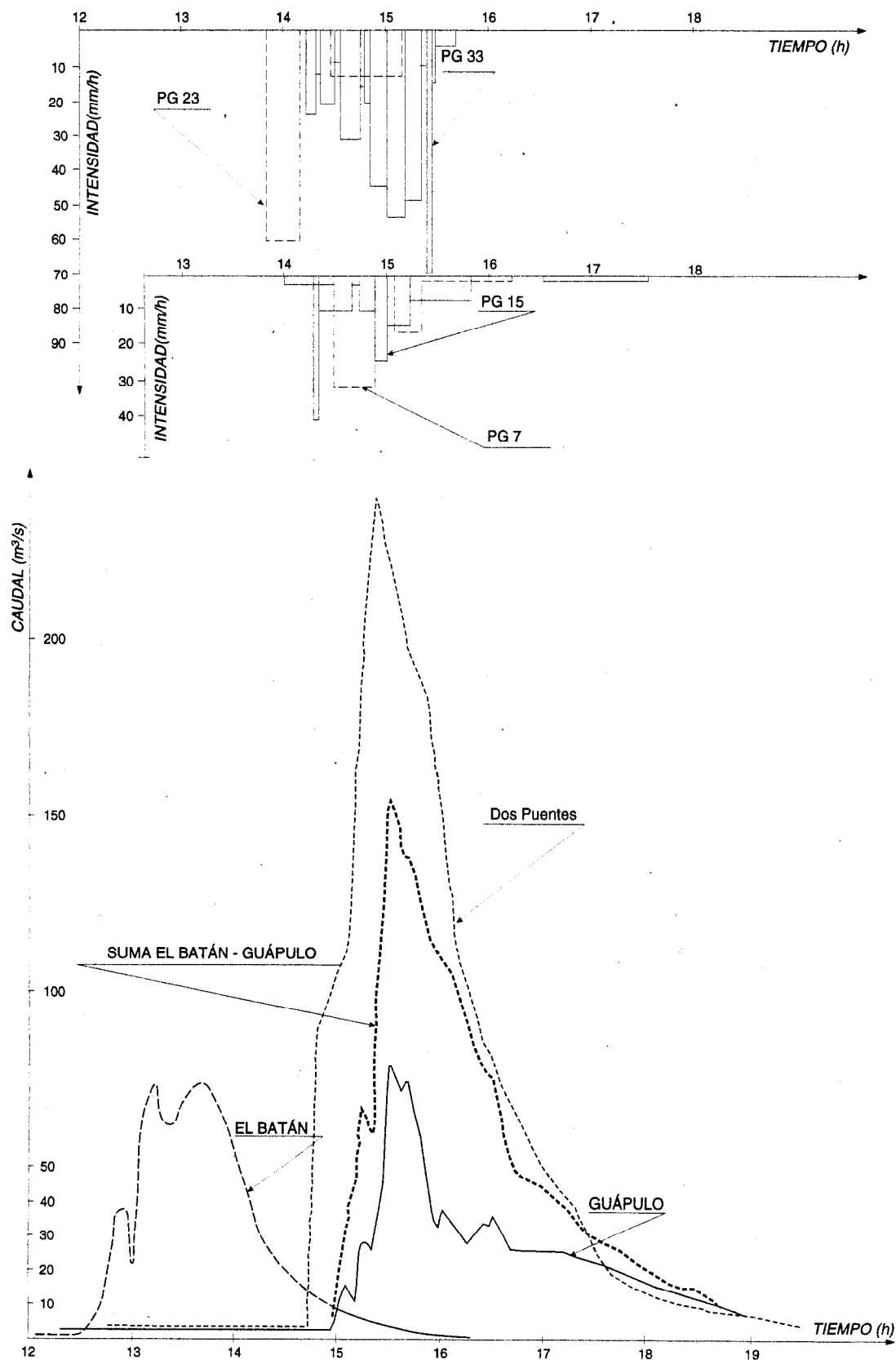


Fig. 26 - Aguaceros y crecidas del 30 de agosto de 1983

lluvia (800 a 1.000 mm repartidos en 5 meses), lo que justifica plenamente que se hable de ella como la « provincia verde ». Sin embargo, tal situación no es la norma y toda la región se ve afectada episódicamente ya sea por lluvias catastróficas consecutivas a los fenómenos de El Niño, o por sequías aún más calamitosas.

Se comprende entonces toda la importancia económica que reviste una estimación objetiva de los recursos hídricos disponibles y un buen conocimiento de los fenómenos pluviométricos e hidrológicos extremos, tanto para los responsables regionales del sector silvo-agropastoral como para aquellos responsables del ordenamiento y de las infraestructuras.

Los estudios fueron desarrollados en colaboración con el PRONAREG y con un organismo regional de desarrollo, el CRM. Comenzaron en febrero de 1980 con la instalación de la red de observación pluviométrica pero las estaciones hidrométricas no pudieron ser colocadas sino en noviembre de 1982, afortunadamente antes de que se desarrollara el Niño de 1982-1983 cuya elevada recurrencia se conoce.

2.1. Equipamiento de la cuenca (figura 27)

a) Red hidrométrica: situada a dos horas por carretera de Portoviejo, centro operacional del CRM, y un kilómetro aguas arriba del puente del eje Jipijapa-Cascol-Guayaquil, la cuenca vertiente escogida tiene una superficie de 155,5 Km² y sus alturas extremas son 760 m.s.n.m. y 120 m.s.n.m. Estaba controlada ya por una estación hidrométrica de la red nacional del INAMHI, río Banchal d.j. Guabas, cuyo funcionamiento había sido poco satisfactorio hasta entonces puesto que no se disponía de observaciones confiables ni de aforos sino para las aguas bajas (caudal mayor medido de 1976 a 1980: 4,76 m³/s). Para necesidades del estudio, se conservaron los 5 m de la escala limnimétrica existente pero se reemplazó el vetusto limnógrafo a fines de 1982 por un limnógrafo con flotador de rotación semanal (estación H2). En previsión de flujos importantes, se construyó un dique de tierra en la orilla izquierda, a nivel de la torre del cable teleférico que sostiene a la vagoneta móvil destinada a la realización de aforos de aguas altas. Por otro lado, para estimar mejor los caudales en período de estiaje, se instaló, un centenar de metros aguas abajo, un vertedero triangular de pared delgada.

Para precisar ciertos aspectos de los parámetros del balance hídrico y de la escorrentía, fue necesario equipar una subcuenca, la de la quebrada Las Guabas, cuya estación H3 (río Guabas a.j. Banchal) drenaba una superficie de 7,75 Km² comprendida entre 440 y 190 m.s.n.m. Allí se instaló un vertedero de hormigón (6,5 m de largo), equipado en su eje con un vertedero tipo Venturi (alrededor de 3.900 l/s de caudal máximo) que fue prolongado lateralmente en V (pendientes del 10

por ciento) hasta los muros verticales que limitaban la obra. Una pasarela de aforo, una escala limnimétrica 0-3 m y un limnógrafo diario completaban la estación, cuya instalación finalizó el 18 de diciembre de 1982. Desgraciadamente, una crecida extraordinaria, cuyo caudal — estimado a partir de la fórmula de Manning después de la nivelación de las huellas de crecida — debía ser del orden de 42 m³/s (es decir más de 5 m³/s/Km²), la destruyó por completo el 11 de marzo de 1983.

b) Red climatológica: En marzo de 1980, se instaló una estación climatológica cerca de la salida de Las Guabas, a 280 m.s.n.m. El equipo correspondiente comprendía: un abrigo (termómetros, psicrómetro, termohigrógrafo y evaporímetro Piche), tanque de evaporación clase A con anemómetro totalizador, veleta, heliógrafo Campbell, pluviómetro y pluviógrafo de sifón.

c) Red pluviométrica: Además de los aparatos de la estación climatológica (PV 1 y PG 2), se procedió a la instalación de 13 pluviómetros y 9 pluviógrafos de balance, 8 de rotación diaria y uno de rotación semanal (PG 22). La mayoría de pluviómetros fueron instalados en marzo-abril de 1980; posteriormente la red fue ampliada parcialmente en agosto del mismo año para ser completada finalmente con la instalación de los pluviógrafos en 1982.

d) Red piezométrica: Tres pozos, inicialmente previstos para garantizar el control de las variaciones del nivel piezométrico de la napa, no fueron perforados por razones financieras.

Conclusiones respecto al equipamiento de las redes: Hay que felicitarse por el hecho de que el CRM, aunque debió afrontar serias restricciones presupuestarias, tomó conciencia de la verdadera significación de los estudios emprendidos y atribuyó al programa el financiamiento mínimo necesario. Pese a ciertas deficiencias, se puede estimar que, a fines del año 1982, la cuenca vertiente estaba provista del equipamiento suficiente como para llevar a buen término los estudios programados.

2.2. Operación de la red

Todo el período comprendido entre marzo de 1980 y diciembre de 1982, incluso si puede parecer largo, no fue en realidad sino una época de entrenamiento para los observadores en la cuenca y para el equipo de Portoviejo encargado de los controles periódicos y de las medidas de caudal. La verdad obliga a decir que se debió ante todo vencer una cierta dejadez, tradición heredada de culturas milenarias y por cierto totalmente adaptada a las condiciones climáticas particularmente difíciles de la región. Pero también se debe agregar que,

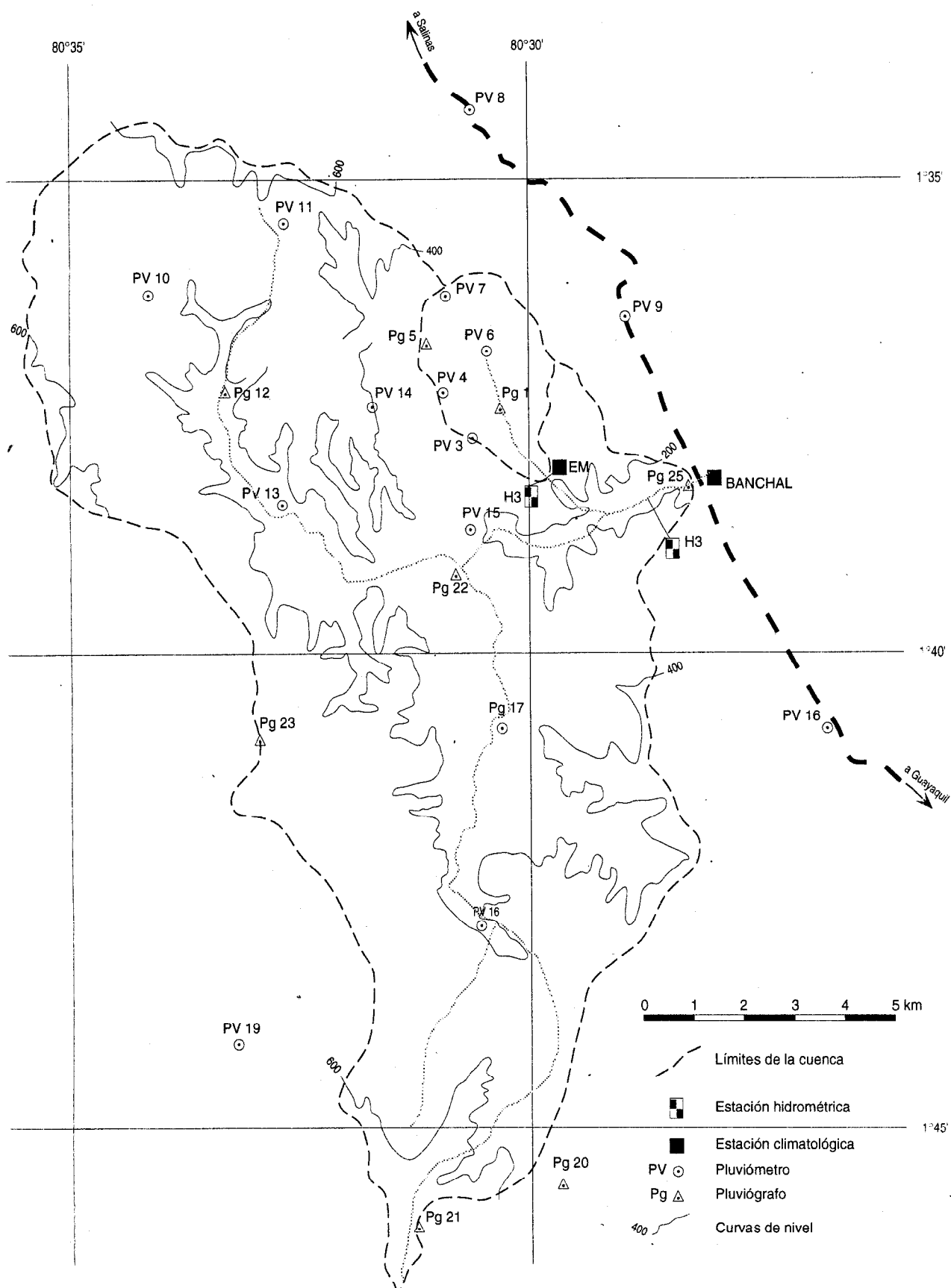


Fig. 27 - Cuenca vertiente representativa del río Banchal. Mapa de base y equipamiento

aprovechando el tiempo dejado por la llegada escalonada de los equipos, un entrenamiento técnico y teórico intensivo suscitó en todos los participantes una notable toma de conciencia, creándose así condiciones favorables para la ejecución de los trabajos.

Señalemos igualmente que ese intermedio no fue totalmente estéril en el plano de la recolección de información y que se recogieron numerosos datos durante más de dos años, incluso si a menudo están incompletos o son poco precisos por las razones invocadas anteriormente. Ellos permitieron apreciar el orden de magnitud alcanzado por los parámetros del balance hídrico en 1981 y 1982 (isoyetas de la figura 28), años cercanos a la normal, y constituyen por lo tanto valiosos elementos de referencia para establecer comparaciones con los años subsiguientes o con las estaciones de larga duración situadas a proximidad.

Mediocre al inicio, la calidad de las medidas obtenidas en la red de observación de las precipitaciones mejoró en gran medida cuando algunos lectores que no satisfacían fueron reemplazados y algunos pluviómetros fueron sustituidos por pluviógrafos. Los valores observados son entonces en general de una confiabilidad razonable y se prestan a los tratamientos estadísticos habituales.

Para llevar a buen término las medidas de hidrografía, se construyó un abrigo de madera cerca de la estación climatológica. A pesar de las condiciones bastante rústicas (el respeto a la tradición de los hidrólogos del ORSTOM así lo imponía), se instauró una vigilancia de casi todos los instantes durante la estación lluviosa excepcional de 1983 (isoyetas de la figura 29). Es así como se efectuaron numerosas medidas de caudal, 65 en la estación de la cuenca principal (6 de ellas superiores a 20 m³/s) y 28 en la de Las Guabas, permitiendo establecer curvas de calibración de excelente precisión en aguas bajas y medianas. En cuanto a la calibración en aguas altas, se puede considerar que es aceptable, pues un levantamiento topográfico preciso de las huellas de crecida permitió estimar, con un margen razonable de error, el caudal pico de las dos crecidas fuertes observadas el 28 de febrero y el 11 de marzo de 1983:

- río Las Guabas a.j. Banchal:

H = 1,90 m y Q = 42 m³/s el 11.03.83;

- río Banchal d.j. Las Guabas:

H = 2,14 m y Q = 110 m³/s el 28.02.83

H = 3,40 m y Q = 320 m³/s el 11.03.83

Las observaciones en la red limnigráfica son buenas en su conjunto aunque hay que lamentar:

- por una parte, no haber podido instalar nuevamente la estación de Las Guabas después de su destrucción; solo se dispone de un registro de un período corto, por lo tanto poco representativo y en todo caso inutilizable para el estudio de las crecidas;

- por otra, que el abandono prematuro de la vigilancia de la cuenca, a fines de mayo de 1983, haya tenido repercusiones en el funcionamiento del limnógrafo del río Banchal y se haya traducido en una inexistencia de datos hidrométricos en junio y julio.

2.3. Aguas altas y relaciones entre las lluvias y la escorrentía

Pese a su consistencia, se debe insistir en el carácter estimativo de los resultados presentados cuando se trata de una cuenca vertiente que, como la del Banchal, tiene un tamaño importante y un relieve acentuado. Gracias a un estudio de la distribución espacial de las lluvias, se pudo constatar en efecto que la repartición espacial de los aguaceros es de las más heterogéneas. Para un mismo evento, las lluvias pueden tener formas, duraciones e intensidades muy variables, lo que por cierto se refleja en los hidrogramas resultantes: en su gran mayoría son complejos y, cuando no lo son, casi siempre se debe a que la crecida es producto de precipitaciones localizadas.

A continuación se presenta un cuadro que resume las principales características de los hidrogramas simples cuyo pico de crecida máxima supera los 40 m³/s. Los parámetros correspondientes son bien conocidos y no requieren una explicación particular, salvo tal vez en lo que respecta a IH, que no es otra cosa que un índice de humedad tradicional calculado en secuencia a partir de una ecuación exponencial que tiene en cuenta a la vez el total acumulado de las precipitaciones y su anterioridad.

Para permitir un mejor análisis de las relaciones entre lluvias y escurrimientos superficiales, fue necesario utilizar crecidas complejas después de separar los escurrimientos

Fecha	Pm (mm)	IH	Le (mm)	Ke (%)	Lr (mm)	Kr (%)	Ts (h-min)	Tb (h-min)	Qo (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)	Qr (m ³ /s)	Kf
03/01/83	22,7	38,8	2,7	12	2,06	9,1	1h15	5h50	2,2	41,9	39	2,5
27/01/83	15,7	30,7	2,2	14	1,77	11,2	0h15	4h50	3	66	63	3,9
16/02/83	12,2	38,1	3	24	2,47	20,3	0h45	3h00	0,7	86,4	83	2,3
11/03/83	43,2	56,1	13	30	12,6	29,1	1h10	3h40	2,3	324	319	1,9
23/03/83	29,7	59,3	5,9	20	4,97	16,7	1h55	4h00	5,8	135	125	2,3

Cuadro 14 - Río Banchal d.j. Guabas (156 km²) - Características de algunas crecidas simples

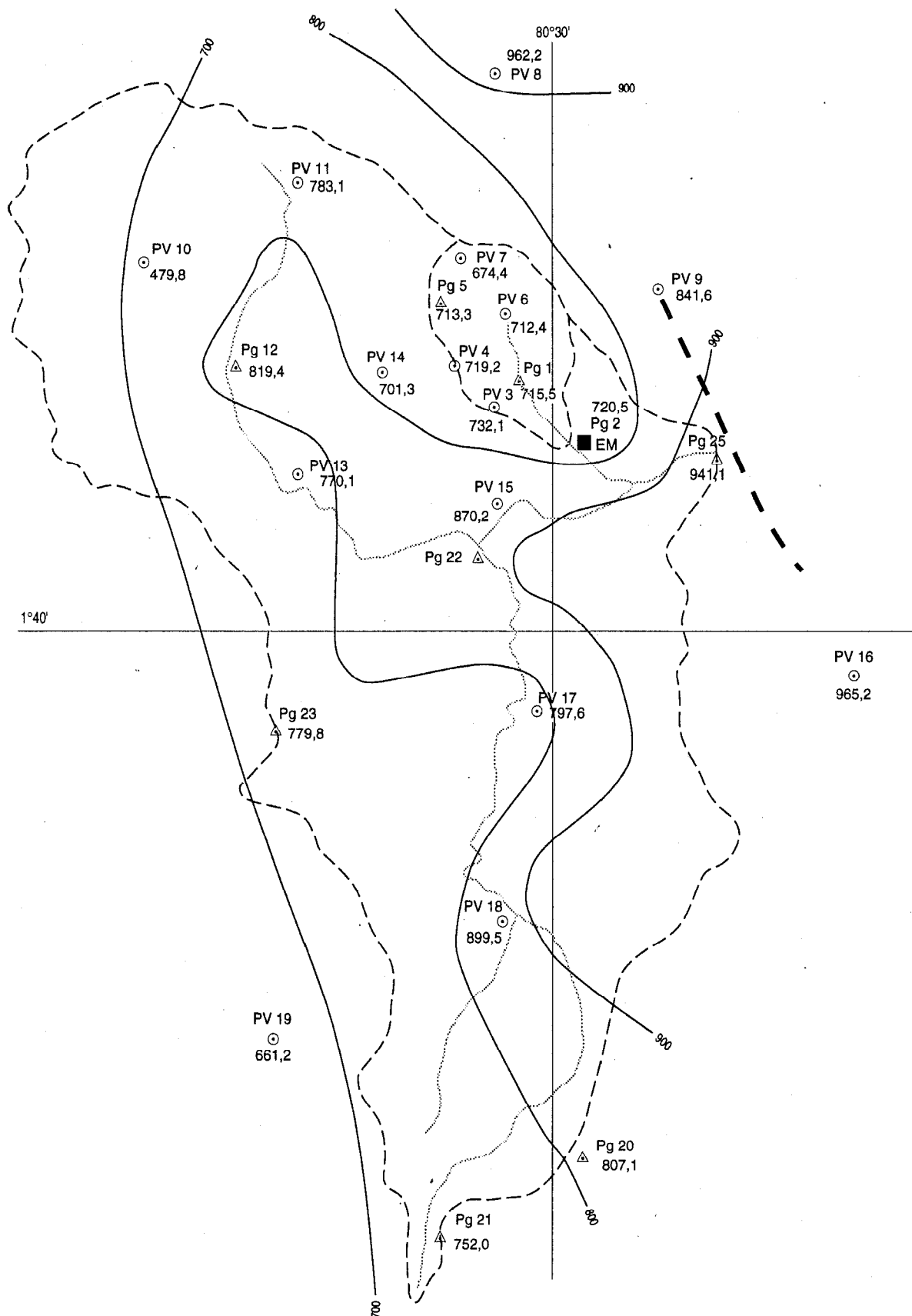


Fig. 28 - Cuenca vertiente representativa del río Banchal - Isoyetas 1982

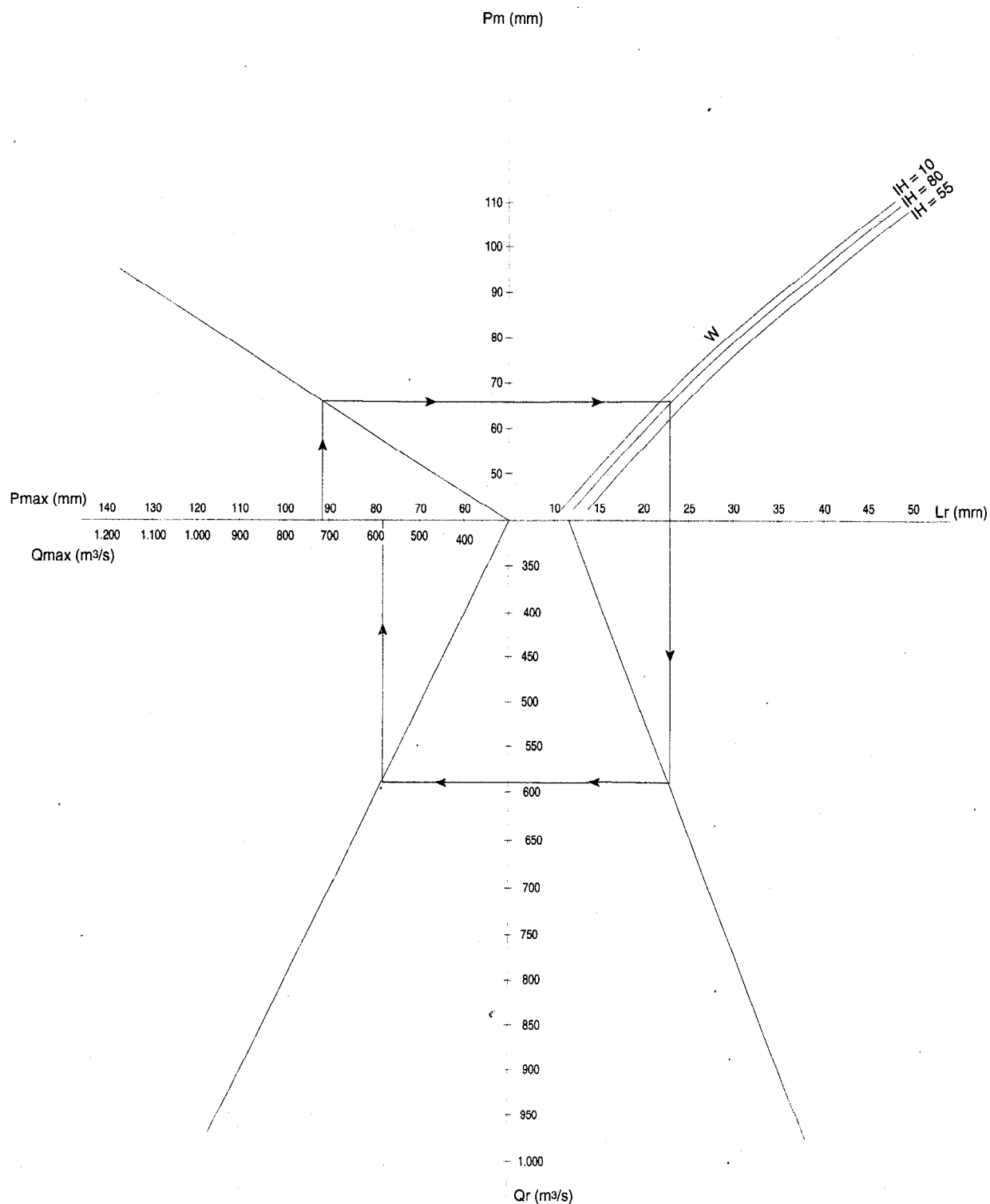


Fig. 30 - Cuenca representativa del río Banchal
Estudio de las crecidas y de las relaciones lluvia-escorrentía

e individualizar las precipitaciones correspondientes. Los valores así obtenidos, extremadamente coherentes, permitieron ampliar sustancialmente la muestra disponible y conferirle la representatividad necesaria y suficiente para el establecimiento, con una precisión aceptable, de las relaciones $P_{max}/P_m/L_r$ (ponderado por IH)/ Q_r/Q_{max} resumidos gráficamente en el ábaco de vocación práctica de la figura 30.

3. CUENCA VERTIENTE REPRESENTATIVA DEL RÍO TINTO

Representativa de toda la faja litoral comprendida entre el cabo San Lorenzo y la frontera peruana, la cuenca del río Tinto está situada en el corazón de la península de Santa Elena, entre 2° 22' y 2° 28' de latitud Sur y 80° 24' y 80° 31' de longitud Oeste. Con una pluviosidad anual que no supera los 500 mm y probablemente inferior a 100 mm en ciertos lugares, es posiblemente la región más árida del Ecuador. Hay que agregar que esas alturas de lluvia anuales, ya bastante bajas, sufren una irregularidad interanual y estacional excepcional y que son afectadas por una preocupante tendencia a la baja desde hace varios decenios (ver análisis abordado en el artículo V).

Se comprende toda la importancia de la elección de esa cuenca, cuando se sabe que los suelos de la península de Santa Elena son ricos y que el único obstáculo para un desarrollo agrícola sostenido es la falta de agua. Hecho notable, la población rural de la zona se incrementa o disminuye al ritmo de los eventos de El Niño: aumenta sistemáticamente después de los episodios lluviosos, cuando los reservorios naturales o artificiales al llenarse permiten una actividad agrícola temporal, pero fructuosa. Es así como centenares de familias, que vinieron a instalarse en 1983 ó 1984 a la salida y en la periferia del embalse El Azúcar, abandonaron ese sitio solamente cinco años más tarde, cuando este estaba totalmente seco; como último recurso, habían incluso cultivado los perímetros situados aguas arriba de la represa, allí donde los sedimentos estaban aún húmedos y subsistía una delgada napa freática.

Los estudios fueron realizados con el PRONAREG, contraparte habitual, y con el INERHI que es el instituto encargado de manejar el conjunto de los recursos hídricos a nivel nacional. Sin embargo, como dicho instituto depende del Ministerio de Agricultura y Ganadería, el sector que privilegia es el del agua destinada a la agricultura. La importancia de su presupuesto, muy superior a la partida global de los fondos asignados al MAG, se explica por el hecho de que toma a su cargo la totalidad de estudios de factibilidad (tanto los referentes a las infraestructuras hidro-agrícolas como los relativos a la instalación de perímetros regados) al tiempo que asume los gastos de construcción de las obras requeridas. Para ese

organismo estatal, cuyo objetivo prioritario era el desarrollo de las regiones secas mediante proyectos de agricultura regada a partir de reservorios, tales como los contemplados en Salanguillo o en San Vicente, las investigaciones emprendidas en la cuenca vertiente del río Tinto eran por lo tanto de gran interés. Se debe agregar también que respondían a una voluntad manifiesta de los responsables políticos, la de dar nuevamente al sector silvo-agro-pastoral una importancia que había perdido un tanto después del inicio de la explotación de las riquezas petroleras de la región amazónica.

Aunque algunos pluviógrafos fueron instalados en abril de 1979, se puede considerar que la obtención de datos se inició verdaderamente en noviembre de 1980.

3.1. Equipamiento de la cuenca (figura 31)

a) Red hidrométrica: El río Tinto es un afluente del Zapotal, curso de agua de flujo intermitente que drena una superficie del orden de los 1.000 Km². La estación hidrométrica principal H1, alimentada por una cuenca de 69,3 Km², fue instalada bajo un puente de la carretera Guayaquil-Salinas a una altura de 45 m.s.n.m. El relieve general es moderado (clase R4), salvo en la parte aguas arriba que alcanza 420 m.s.n.m. en la loma Ánimas, punto culminante de la región. La cobertura vegetal, característica de las zonas áridas, está constituida principalmente de ipomeas asociadas a cactus; se observa sin embargo la presencia de amplias extensiones herbáceas (de origen antrópico?) en las partes bajas y, en los altos relieves, se destaca la existencia de *Bursera Graveolens* (palo santo), testimonio probable de una cobertura antigua mucho más densa relacionada con un clima más húmedo (según el botánico Charles Huttel). La estación hidrométrica, construida a nivel del puente de carretera, fue equipada con una escala limnimétrica de 0-4 m y un limnógrafo de flotador de rotación diaria colocado el 28 de enero de 1982. Para efectuar la medición de los caudales, se construyó, bajo el arco central, un vertedero de hormigón de pared gruesa de 7,8 m de ancho y de forma triangular. Su punto bajo estaba situado a 0,4 m del fondo del lecho natural y sus paredes laterales tenían una pendiente del 5 por ciento. Por otro lado, se acondicionaron los dos arcos laterales para que constituyan, de cada lado del vertedero, un control horizontal de igual altura en caso de crecida muy grande.

Para apreciar mejor las relaciones entre las características físicas de la zona, las lluvias y la escorrentía, en caso de que esta última fuera limitada, se instaló igualmente una estación (H2) en la quebrada Cunquinllique. Ella controlaba una subcuenca de 4,8 Km² y estaba equipada con una escala limnimétrica de 0-4 m y con un limnógrafo con flotador de rotación diaria. Para efectuar las medidas de caudal, se colocó un pequeño vertedero

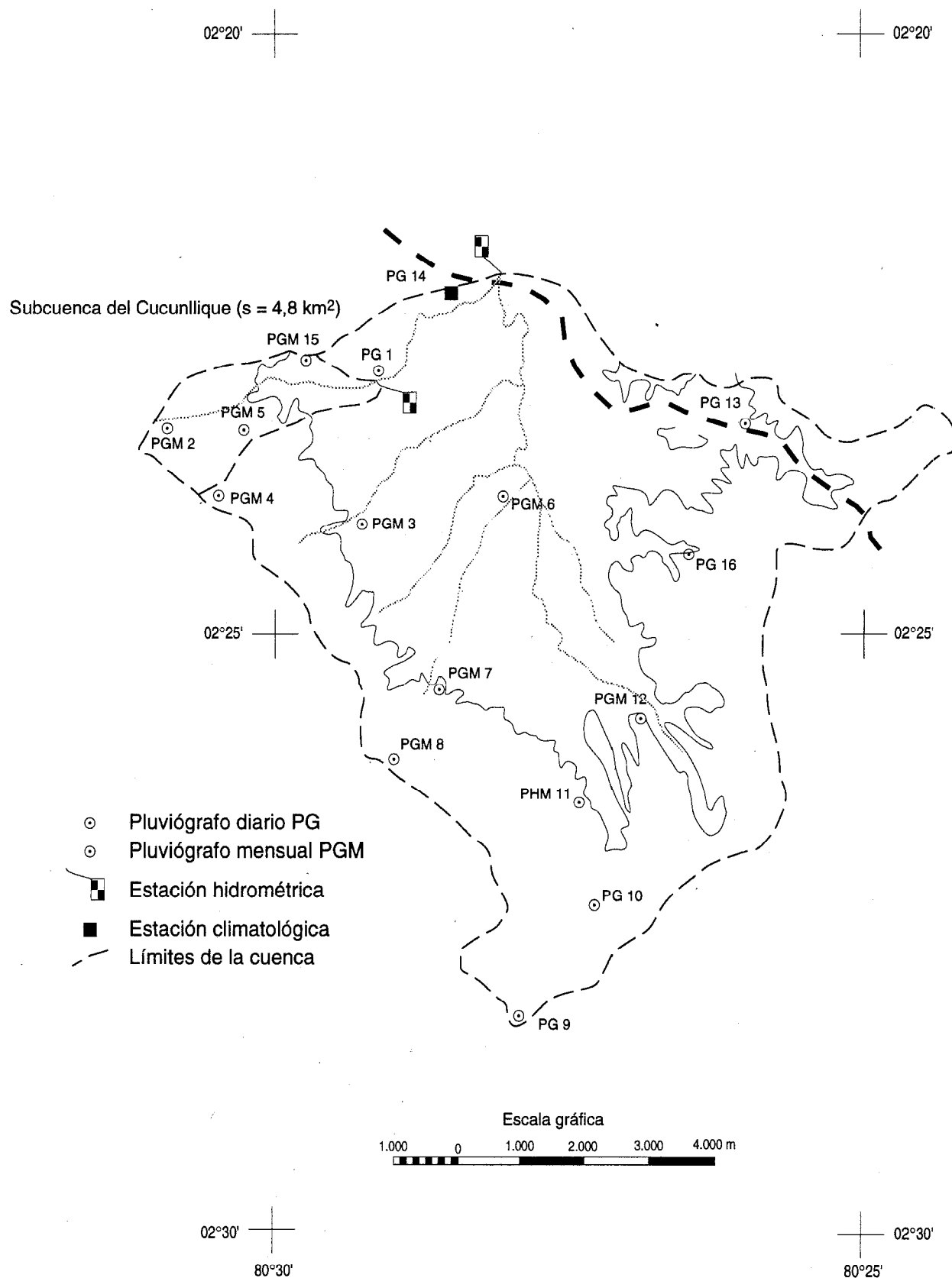


Fig. 31 - Cuenca vertiente del río Tinto ($S = 69,3 \text{ Km}^2$) - Mapa de base y equipamiento

Parshall (Qmax de 25 l/s) prolongado lateralmente por paredes cuyas pendientes correspondían más o menos a las de las orillas naturales (5,8 por ciento en la orilla izquierda y 4,5 por ciento en la derecha), todo coronado por una pasarela de aforo de 10 m de ancho, sostenida por tres pilares y anclada en el dique de la orilla izquierda que soportaba al limnígrafo.

En ambos casos, los trabajos se realizaron sin mayor problema puesto que, hay que recordarlo, los ríos estaban secos desde varios años atrás. La estación H1, gracias a buenos márgenes de seguridad que respondían al optimismo premonitorio con el que había sido realizada, funcionó satisfactoriamente a pesar de ciertos problemas, muy comprensibles, de sedimentación. La estación H2 en cambio fue completamente destruida en cuanto se produjeron las primeras crecidas de 1983 y no pudo ser reconstruida sino a fines de 1984.

b) Red climatológica: Ya en abril de 1979, se comenzó a equipar una estación climatológica cerca de la estación hidrométrica H1, a 50 m.s.n.m., 02° 22' 07" de latitud Sur y 80° 28' 29" de longitud Oeste. Estaba destinada especialmente a estimar los factores condicionantes de la evaporación y la evapotranspiración. Terminada en noviembre de 1981, estaba equipada con un abrigo meteorológico que comprendía termómetros, psicrómetros y termohigrógrafo, un heliógrafo de tipo Campbell, una veleta a 10 m de altura, una tanque de evaporación clase A completado con un anemómetro totalizador, un pluviómetro y un pluviógrafo diario (Pg 14) de sifón.

c) Red pluviométrica: Pese al elevado costo que implicaba, la ausencia total de población en la cuenca impuso la instalación de una red compuesta exclusivamente de pluviógrafos. Las medidas eran levantadas por observadores que se desplazaban a pie o en bicicleta, pero solo numerosas visitas de mantenimiento y de control, efectuadas desde Quito, pudieron garantizar su buen funcionamiento.

Originalmente, en abril de 1979, se había procedido a la instalación de 4 pluviómetros, red provisional que no funcionó sino algunos meses y cuyos datos no son utilizables debido a la mala calidad de las observaciones y a la pura y llana desaparición de los aparatos. Se debe entonces postergar el origen de la red al 22 de noviembre de 1980, cuando entraron en funcionamiento 7 pluviógrafos semanales y 2 pluviómetros. En septiembre y en noviembre de 1981, los pluviógrafos semanales fueron reemplazados por registradores de rollos de duración mensual y los pluviómetros por pluviógrafos de rotación diaria. La red definitiva comprendía entonces 16 pluviógrafos (5 de ellos situados en la pequeña cuenca de Cucunllique), 7 diarios y 9 mensuales.

3.2. Operación de la red

De manera general, se puede adelantar que el aislamiento, el aislamiento, la ausencia de población en la zona estudiada, la inexistencia de caminos transitables y de telecomunicaciones, la falta de vigilancia permanente por parte de un hidrólogo y finalmente el aspecto aleatorio que reviste la aparición de una crecida después de varios años de estiaje absoluto, son elementos que, incluso tomados separadamente, limitan ya en gran medida la probabilidad de obtención de datos hidrológico-métricos consistentes. La convergencia de todos esos factores en la cuenca vertiente del río Tinto permite apreciar en su justo valor la buena calidad de las observaciones y de las mediciones que fueron efectuadas, pues se debe subrayar la seriedad que fue el denominador común de todos los trabajos de campo, se trate ya sea de la colocación y el mantenimiento de los registradores, de la construcción de las estaciones, de la recolección de las observaciones o de la medida de los caudales durante la campaña 1982-1983.

Sin embargo, al iniciarse las investigaciones, los obstáculos eran numerosos, ante todo porque a los factores limitantes evocados se agregaban consideraciones ligadas a la actitud del personal que intervenía, muy similar a la señalada en el caso de la cuenca del Banchal. En segundo término, el personal local que trabajaba en la cuenca fue objeto de una elección forzada entre los miembros de las dos únicas familias que vivían en las cercanías, la una en el recinto de Sucre, dos personas de edad, y la otra en Olmedo, una pareja y tres niños; las inquietudes eran entonces legítimas puesto que para efectuar la recolección de los datos y proceder al cambio de diagramas de los registradores gráficos, los dos observadores, sometidos a horarios difíciles, debían recorrer la cuenca varias horas al día, a veces en bicicleta y casi siempre a pie.

De manera un tanto inesperada, los cursos teóricos (en Quito) y la capacitación « sobre la marcha » (en el campo, durante la instalación de los aparatos y la construcción de las estaciones) dispensados por los hidrólogos del ORSTOM, parecen haber suscitado el interés y la motivación suficientes como para que, en cuanto se anunció la llegada de El Niño 1982-1983, el personal técnico de Guayaquil se movilizara inmediatamente. Dicho personal asumió luego el seguimiento de las mediciones y los controles periódicos con la frecuencia y el rigor requeridos, puesto que, del 4 de enero al 27 de julio de 1983, realizó la mayoría de 66 aforos, 12 de ellos entre 30 y 80 m³/s. Paralelamente, después de una primera corrección de las carencias reveladas por el total fracaso de la red de pluviómetros instalada en 1979, pero sobre todo a costa de largas jornadas de aprendizaje, la calidad del trabajo efectuado por los dos observadores evolucionó de manera satisfactoria, desde el punto de vista

tanto de la calificación técnica como de la seriedad con que se cumplieron las tareas cotidianas.

Ciertamente, algunas observaciones o medidas no siempre tienen la precisión deseada, especialmente en hidrometría. Entre las fuentes de error relativas a las medidas de caudal, se pueden citar aquellas inherentes a la multiplicidad de operadores, a los transportes sólidos muy importantes y a las grandes variaciones de altura limnimétrica durante un mismo aforo. En cuanto a los registros, un número afortunadamente limitado de limnigramas es difícilmente interpretable: anotaciones poco realistas de la fecha, de la hora o de la cota limnimétrica, o incluso mal funcionamiento del limnógrafo cuando el pozo del flotador estaba taponado por falta de limpieza entre las crecidas. Tales deficiencias, en definitiva menores, no afectaron el buen nivel de confiabilidad general que puede atribuirse a la voluminosa información recogida.

3.3. Estudio de las crecidas y las relaciones lluvias-escorrentía

Los primeros aguaceros que pueden atribuirse a El Niño tuvieron lugar en octubre de 1982 (7 días de lluvia que totalizaban 7,8 mm — media en la cuenca —); es por esa razón que se prefirió utilizar, en lugar del año calendario, un recorte octubre-septiembre que permitía comparar los años observados entre sí. Un rápido examen comparativo de las figuras 32 (isoyetas 1981-1982: $P = 24,3$ mm) y 33 (isoyetas 1982-1983: $P = 2.691,1$ mm) ilustra bien el impacto de El Niño a nivel anual; da también una idea de la elevada recurrencia de los eventos hidrológicos derivados, algunas de cuyas características se indican a continuación:

- el escurrimiento fue permanente del 2 de enero al 20 de octubre, es decir durante 9 meses y 18 días;
- a partir del 13 de julio, fecha de la última crecida, se observa un decrecimiento exponencial de los caudales, agotamiento puro proveniente de la descarga de las napas acuíferas;
- durante el período que va de enero a fines de julio, se observaron algunos valores verdaderamente excepcionales:
 - lámina total escurrida de 945 mm, es decir un coeficiente de escurrimiento del 37,2 %;

- lámina escurrida mensual promedio de 135 mm (máximo de 245 mm en abril) ;

- en marzo, un coeficiente de escurrimiento máximo que alcanzó el 55,9 %.

Del 2 de enero al 13 de julio se registraron 69 crecidas en la estación principal H1 (recuérdese que la estación H2 desapareció completamente el 25 de enero) y, para proceder a la calibración del modelo global lluvias-caudales, se escogieron 4 crecidas de tendencia unitaria entre los 48 hidrogramas simples observados. Todas corresponden a aguaceros elevados, relativamente cortos, bien repartidos en el conjunto de la cuenca; la del 22 de febrero dio lugar al mayor caudal pico observado durante el período estudiado: 116 m³/s, es decir 1,7 m³/s/Km².

El cuadro presentado a continuación resume los principales valores característicos calculados a partir de los hidrogramas de crecida seleccionados.

Después de haber fijado en 30 mm el valor estándar de la lámina de escurrimiento superficial (valor compatible con las 4 crecidas utilizadas y por cierto superado por otros hidrogramas complejos), se estableció el hidrograma característico de escurrimiento superficial (figura 34) procediendo de manera tradicional, por centrado de los picos y cálculo de las medias de los caudales después de haberlos ponderado por un factor de corrección de lámina. Los parámetros de ese hidrograma son los siguientes:

- tiempo de subida $t_s = 3h00'$
- tiempo de base $t_b = 10h30'$
- volumen de escurrimiento superficial
 $V_r = 2.080 \times 10^3$ m³
- lámina de escurrimiento superficial
 $L_r = 30$ mm (valor seleccionado)
- caudal máximo de escurrimiento superficial
 $Q_r = 146$ m³/s
- caudal medio $Q_m = 55$ m³/s
- coeficiente de forma $K_f = 2,65$.

Con miras a definir las relaciones lluvia-escorrentía, se utilizó la totalidad de crecidas simples para buscar los vínculos existentes entre los parámetros de forma (t_s/t_b , K_f/t_b y Q_r/K_f), los diversos parámetros de los escurrimientos superficiales (Q_{max}/Q_r , Q_r/L_r) y finalmente entre estos últimos y ciertos parámetros de las precipitaciones

Fecha	Pm (mm)	IH	Le (mm)	Ke (%)	Lr (mm)	Kr (%)	Ts (h-min)	Tb (h-min)	Qo (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)	Qr (m ³ /s)	Kf
23/02/83	74,1	63,5	30	41	24,3	32,8	2h37	10h07	0,2	116	110	2,4
21/04/83	47,3	94,5	19	41	14,5	30,6	2h30	9h50	4,3	75	68	1,74
24/04/83	56,6	152	17	30	13,1	23,1	2h11	6h06	2,9	81	72	1,74
02/05/83	74,7	115	25	34	20,9	28,1	1h55	12h55	2	69	66	2,11

Cuadro 15 - Río Tinto - Valores característicos de cuatro crecidas de tendencia unitaria

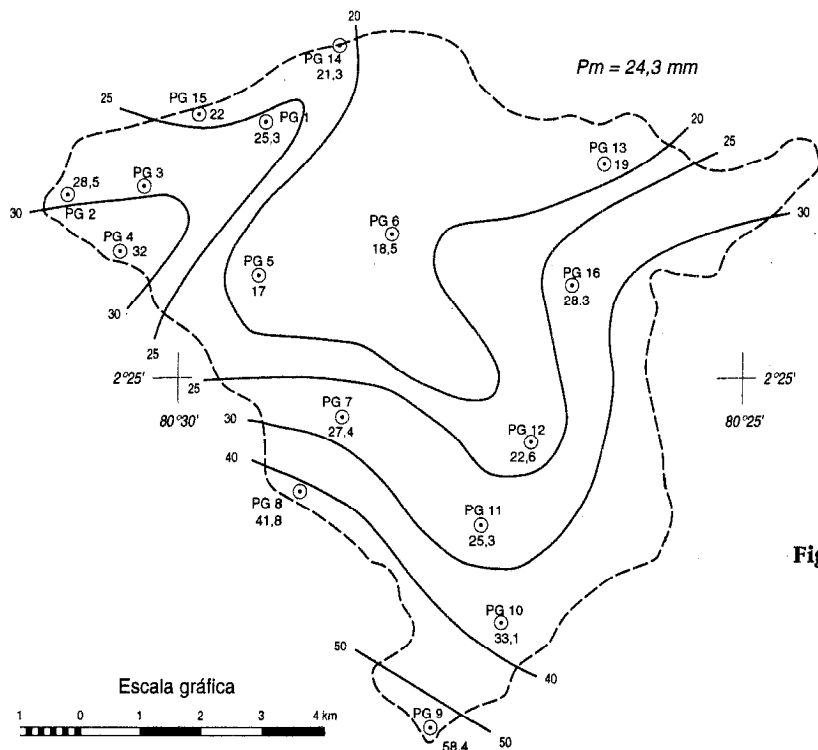


Fig. 32 - Cuenca vertiente del río Tinto
(isoyetas anuales 1981-1982)

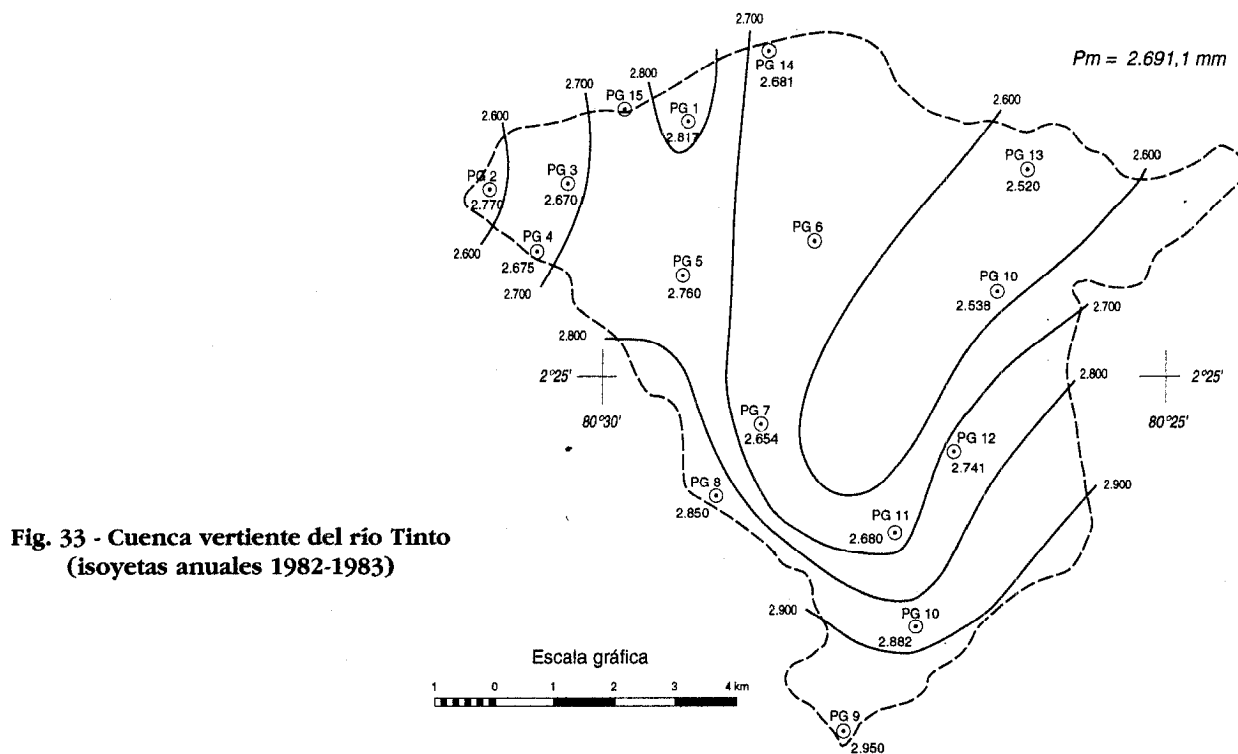


Fig. 33 - Cuenca vertiente del río Tinto
(isoyetas anuales 1982-1983)

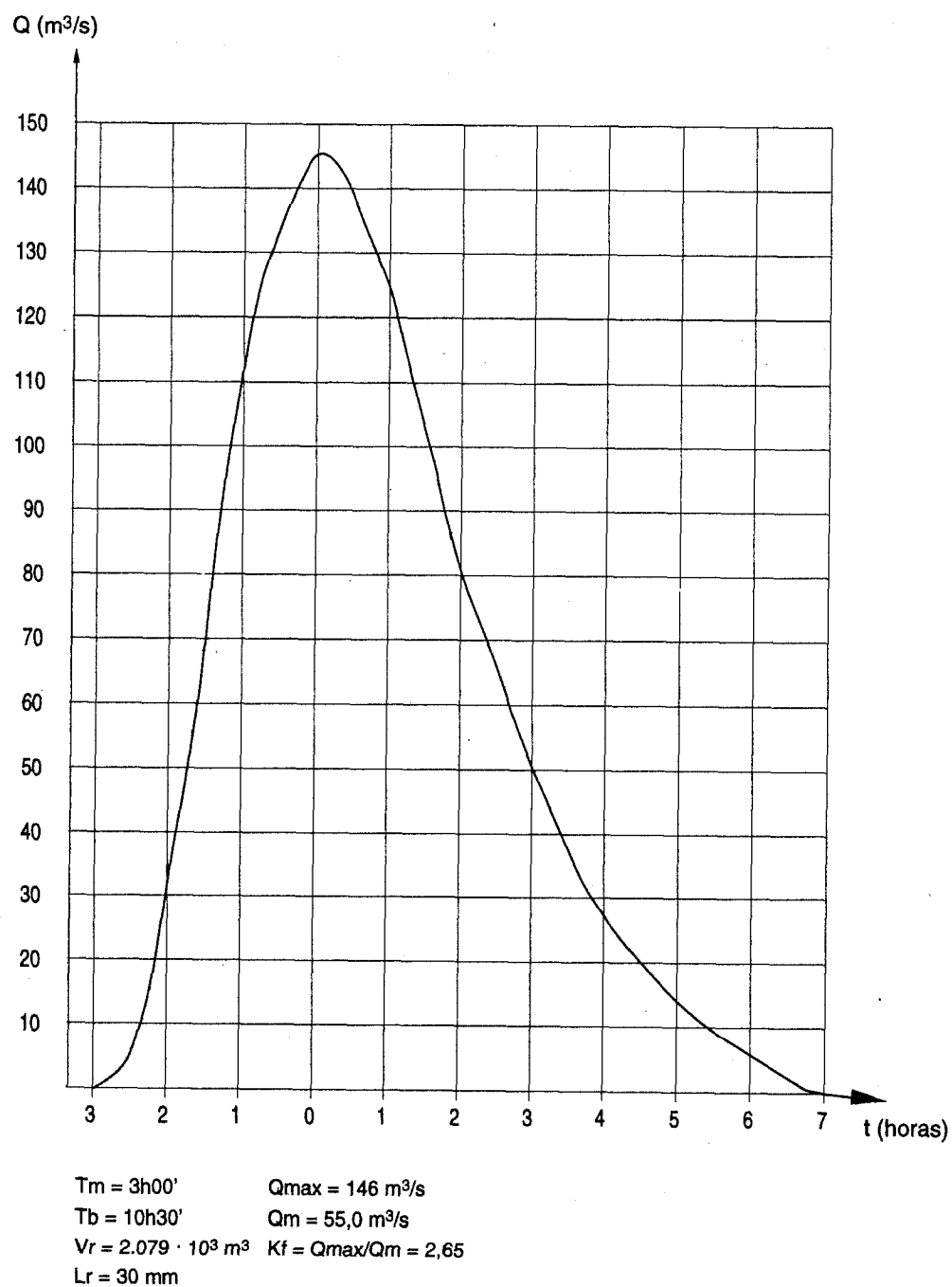


Fig. 34 - Cuenca del río Tinto
Hidrograma estándar

que los provocaron (L_r/P_m , P_m/P_x). A continuación se presentan brevemente los resultados obtenidos.

La primera relación buscada fue aquella que une las láminas de escurrimiento superficial con las precipitaciones medias en la cuenca. Se obtuvo una ecuación lineal con un coeficiente de correlación altamente significativo:

$$L_r = 0,288 P_m - 2,29 \text{ en mm, con } r = 0,92$$

Esta relación no es válida sino en el intervalo 30–90 mm de lluvia promedio en la cuenca, y por lo tanto para lluvias que son en la región de frecuencia inferior a la mediana.

Un intento de mejoramiento haciendo intervenir el índice de humedad I_H no dio resultados convincentes, lo cual es por cierto ilustrado por el gráfico de la figura 35. Asimismo, la consideración de las intensidades registradas en diferentes pluviógrafos (en 15 min, 30 min y

una hora) no mejoró considerablemente el ajuste y fue por lo tanto descartada.

Las demás relaciones que se establecieron son las siguientes:

$$P_m = 0,72 P_x + 1,2 \text{ en mm}$$

(P_x definido en el capítulo 1, acápite 5)

$$Q_{\max} = 0,80 + 1,11 Q_r \text{ en m}^3/\text{s, con } r = 0,98$$

$$Q_r = 10,5 L_r^{0,7} \quad Q_r \text{ en m}^3/\text{s y } L_r \text{ en mm}$$

En definitiva, todas estas relaciones permitieron elaborar un modelo gráfico global de buena calidad (figura 35) que une los eventos pluviométricos individuales a los escurrimientos superficiales resultantes de ellos. Instrumento esencialmente práctico, útil para el establecimiento de las normas de construcción de las obras civiles y de acondicionamiento agrícola, responde a las expectativas de numerosos encargados del ordenamiento del territorio.

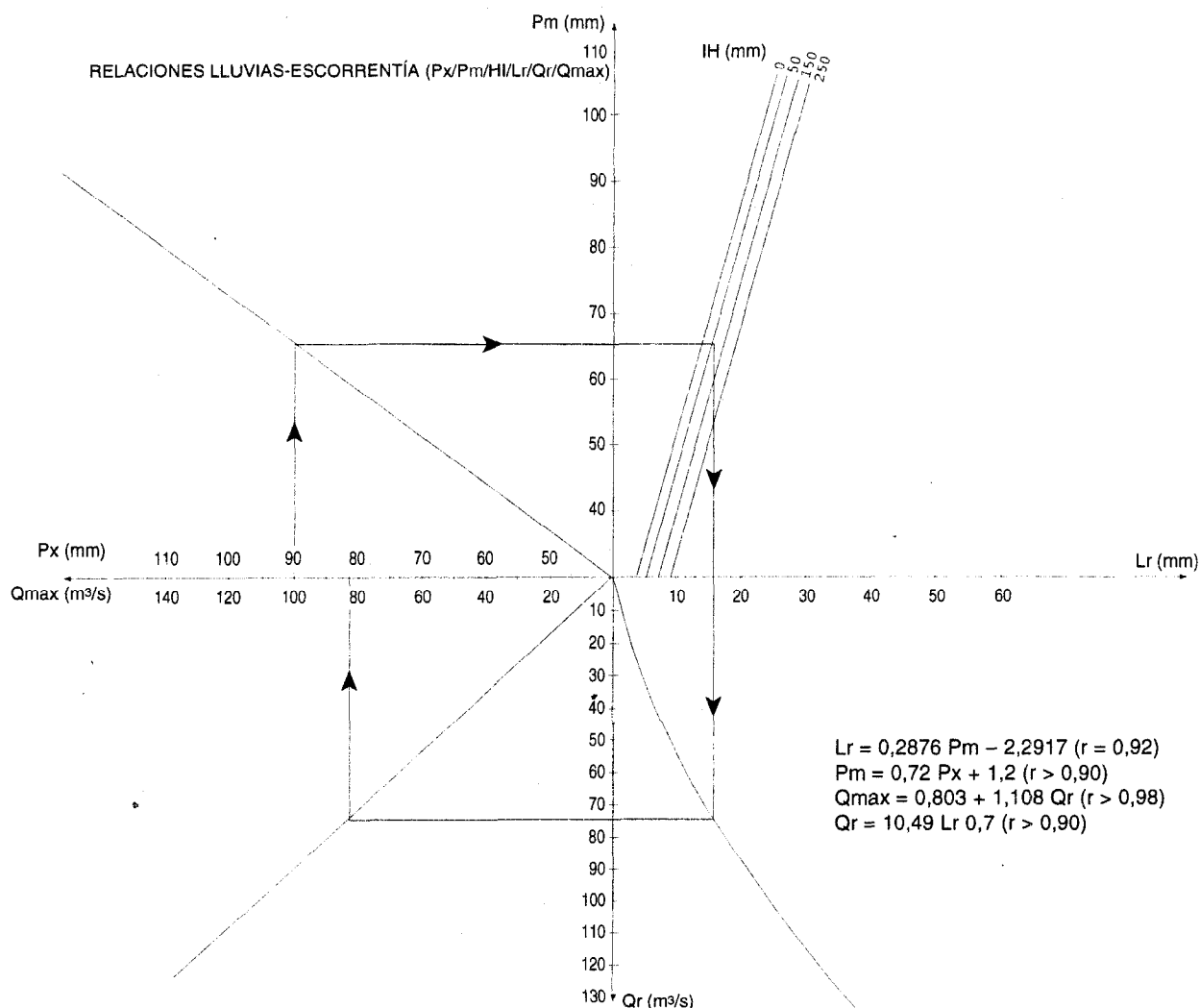


Fig. 35 - Cuenca del río Tinto - Estudio de las crecidas