
ARTÍCULO IV

ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y REGIONALIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN EL ECUADOR

Jean-François Nouvelot, Patrick Le Goulven, Miguel Alemán, Pierre Pourrut

Aunque la lluvia no es sino uno de los componentes del balance hídrico, es evidente que constituye el principal factor condicionante de los regímenes hidrológicos. Especialmente en la zona intertropical, en donde la escasez al igual que el exceso de agua limitan en gran parte el desarrollo de los países, la elaboración de una estrategia de utilización racional de los recursos hídricos no es posible si no se dispone de una información pluviométrica suficiente.

En el capítulo 1 del artículo III se señalaron ya los diversos problemas que afectan a las observaciones pluviométricas en el Ecuador. Raras son las series de larga duración y la calidad de la información es mediocre, sobre todo la de los últimos años que por cierto no siempre está disponible. Así, por el momento, es impensable realizar un análisis estadístico exhaustivo de todas las estaciones de la red pluviométrica para un período homogéneo actualizado.

A falta de ello, el tratamiento aplicado a las lluvias observadas, que por lo señalado es incompleto y está limitado ya sea espacialmente o en el tiempo, se centró en considerar un imperativo derivado directamente de las necesidades más urgentes de los países en vías de desarrollo, el de responder a la demanda de los actores del ordenamiento del territorio, planificadores e ingenieros que reclaman instrumentos que permitan rellenar las lagunas de información pluviométrica incluso si se trata solo de valores estimados. Elaborados con ópticas distintas, dos métodos arrojan ciertos resultados y proponen algunas técnicas que permiten lograrlo.

El más antiguo de ellos (normas pluviométricas aplicables en el Ecuador) fue elaborado en el marco de la regionalización agro-pastoral del país utilizando las estaciones representativas que disponían de registros suficientemente extensos; proporciona una información estadística sintética a nivel nacional y propone una

división zonal que, gracias a cálculos simples y rápidos, permite estimar el valor de los datos faltantes en las series incompletas, con una precisión aceptable.

El más reciente de los métodos (regionalización de las pluviometrías en el Norte del Ecuador), limitado geográficamente a una gran cuenca hidrológica, fue elaborado en el contexto de los trabajos destinados a proporcionar ciertos elementos de planificación del riego; apoyándose en la utilización de un vector regional, establece una zonificación pluviométrica más exacta que la anterior.

I. Normas pluviométricas aplicables en el Ecuador

1. OBJETIVO Y METODOLOGÍA

A nivel nacional, la información a la que se puede acceder más fácilmente es aquella relativa a los totales anuales, representada de manera global en los mapas de isoyetas que permiten evaluar rápidamente los aportes de origen meteórico. Sin embargo, la noción de media anual, suficiente en el marco de una planificación general de los recursos naturales renovables, siempre debe completarse (por ejemplo, con la información relativa a las frecuencias raras, a la irregularidad interanual o a los totales recogidos durante períodos más cortos) cuando se abordan los estudios de factibilidad de los proyectos de manejo hidráulico o de equipamiento de infraestructuras. Es la razón por la cual, en zonas en donde la información es deficiente, es indispensable disponer de un método de estimación de los parámetros de cálculo de las obras. El establecimiento de normas pluviométricas es una forma de responder a esa necesidad.

Como la gran diversidad de las regiones climáticas existentes (ver artículo III) no permite establecer fórmulas válidas para todo el territorio, se debió proceder a una

zonificación y a la división del país en zonas pluviométricas homogéneas. Estas, cuya cantidad se buscó limitar al máximo, son seis. Tal zonificación, al igual que las relaciones que unen a las diversas variables pluviométricas entre sí, se fundamentó en los resultados del análisis estadístico de los datos, para el cual se utilizaron los tipos de correlaciones simples o múltiples o las leyes de ajuste más comunes en hidroclimatología: Gauss (normal), Galton (gaussologarítmica), Gumbel (doble exponencial), Fréchet (gumbel-logarítmica), Pearson III (gamma incompleta) y Goodrich (caso particular de la ley exponencial generalizada).

Las estaciones de referencia escogidas para llevar a buen término este estudio fueron 65 (24 equipadas con un pluviógrafo) y el número de años de observaciones varía entre 10 y 85. La mayoría de las series tienen una duración superior a los 15 años, pero sólo 14 de ellas superan los 30 años y 6 tienen más de 50 años de observaciones. Los datos de cada una de las estaciones fueron procesados sistemáticamente de la siguiente manera:

- para los totales anuales, las lluvias máximas diarias y las intensidades entre 5 minutos y 24 horas, búsqueda de la ley estadística que ofrecía el mejor ajuste;

- para las lluvias anuales y diarias, búsqueda de las relaciones que unen a los valores de las frecuencias medianas y decenales, y luego de las frecuencias decenales y centenales, y establecimiento de las relaciones que permitan calcular una altura pluviométrica de una frecuencia cualquiera:

- cálculo de los intervalos de confianza;
- búsqueda de las relaciones que permitan determinar las intensidades en intervalos de tiempo que van de 5 minutos a 24 horas, a partir de las lluvias diarias de igual frecuencia.

Incluso si las sucesivas aproximaciones y ciertas simplificaciones se traducen en resultados que no siempre tienen un rigor científico extremo, el método de evaluación propuesto es sumamente fácil de utilizar. Una vez situado la región o el lugar a estudiarse en una de las grandes zonas pluviométricas homogéneas, el procedimiento a seguirse dependerá de los datos disponibles y de la diversidad de las informaciones buscadas:

- determinación de la altura pluviométrica promedio anual \bar{P} , ya sea utilizando una estación de referencia o por interpolación en el mapa de isoyetas. En ciertos casos, \bar{P} puede constituir el único dato de entrada;

- estimación de las alturas anuales para diversas frecuencias, ya sea a partir de ecuaciones generales derivadas de las leyes estadísticas (a menudo las de Galton y Pearson) o mediante las relaciones de tipo:

$$P_{0.5} = f_1(\bar{P}); \quad P_{0.1} = f_2(P_{0.5}); \quad P_{0.01} = f_3(P_{0.1})$$

- determinación de la precisión de los resultados en función del número de años de observaciones disponible o, a la inversa, definición del número de años necesario para obtener una precisión dada;

- estimación de las alturas pluviométricas diarias H para diversos períodos de retorno, a partir de las leyes estadísticas o mediante las relaciones:

$$H_{0.5} = f_1(H); \quad H_{0.1} = f_2(H_{0.5}); \quad H_{0.01} = f_3(H_{0.1})$$

- estimación de diversas frecuencias de las intensidades I (o de las láminas precipitadas h) correspondientes a diferentes intervalos de tiempo t , a partir de las lluvias diarias de igual frecuencia F :

$$I_F = \Phi(t, H_F)$$

2. ALTURAS PLUVIOMÉTRICAS ANUALES

El cuadro 5 presenta los valores característicos de los totales pluviométricos anuales en las principales estaciones consideradas en cada una de las seis zonas homogéneas escogidas.

Los valores de las frecuencias raras de ser o no superadas (secas, $F = 0,90$ y $0,99$; húmedas, $F = 0,10$ y $0,01$) se calculan con base en la ley que da el mejor ajuste o mediante interpolación entre los valores obtenidos cuando dos leyes son de calidad equivalente. Salvo el caso de las estaciones de la cuenca amazónica en su conjunto o el de algunos raros puestos situados en la vertiente occidental de la cordillera andina, que presentan distribuciones estadísticas simétricas, todas las demás series siguen leyes cuya función de densidad presenta una disimetría positiva más o menos pronunciada según su pertenencia a una u otra de las zonas homogéneas. Como las leyes que dan el mejor ajuste son las de Pearson III y sobre todo de Galton, el valor de los intervalos de confianza se calcula suponiendo que las distribuciones empíricas corresponden a una ley gaussologarítmica. Se debe agregar que, aparte de la ley normal, sólo la ley de Galton permite calcular la precisión de los resultados de manera relativamente simple y sin mayor riesgo de error (cuando no se dispone de una computadora, lo que era el caso en el Ecuador en esa época). Se juzgó efectivamente útil indicar esa precisión dada la gran diversidad de regímenes pluviométricos al igual que la disparidad en la duración de las series observadas.

2.1. Zonificación de las pluviometrías

Después de haber retomado todos los parámetros estadísticos característicos de las leyes de Gauss, Galton, Pearson (diversas frecuencias calculadas con un parámetro de posición P_0 , ya sea nulo o diferente de cero; valores de la pendiente « a » y de la constante « b » de la recta de Galton; valores del parámetro de escala S o del parámetro de forma g de Pearson) y de haberlos comparado

ESTACIONES				VALORES CARACTERÍSTICOS									
nombre	altitud	latitud	longitud	N	P	σ	Cv	0,99	0,90	0,50	0,10	0,01	
SALINAS	6	2° 12' S	80° 59' W	21	140,4	136,7	0,97		24	100	200		
LIBERTAD	6	2° 12' S	80° 52' W	18	194,1	171,9	0,88		55	145	250		
ANCÓN	25	2° 20' S	80° 51' W	10	200,5	204,9	1,02		20	140	460		
MANTA	6	0° 57' S	80° 41' W	27	210,1	142,6	0,68		75	170	385		
PLAYAS	6	2° 38' S	80° 33' W	14	401,5	243,7	0,61		135	360	720		
MACHALA	6	3° 15' S	79° 58' W	24	576,7	388,9	0,67	(145)	225	465	1.050	(2.000)	
ZAPOTILLO	335	4° 23' S	80° 14' W	14	448,0	328,5	0,73		100	365	900		
MACARÁ	430	4° 23' S	79° 57' W	15	506,3	261,6	0,52		205	460	865		
BAHÍA	3	0° 36' S	80° 23' W	19	551,7	191,2	0,35		310	530	810		
ROCAFUERTE	10	0° 55' S	80° 27' W	15	392,9	156,4	0,40		210	375	600		
PORTOVIEJO	44	1° 04' S	80° 26' W	41	515,1	210,4	0,41	185	285	477	790	1.180	
LA NARANJA	520	1° 24' S	80° 27' W	14	1.193,3	422,0	0,35		655	1.130	1.735		
QUAYAQUIL	6	2° 09' S	79° 53' W	65	1.100,9	466,9	0,42	390	600	1.015	1.710	2.600	
PASAJE	15	3° 19' S	79° 48' W	16	768,2	304,0	0,40		438	715	1.165		
MARABELLI	680	3° 44' S	79° 48' W	11	1.351,5	529,9	0,39		745	1.280	2.090		
SAN LORENZO	5	1° 17' N	78° 51' W	27	2.680,6	758,8	0,28	1.290	1.790	2.595	3.685	4.850	
ESMERALDAS	6	0° 57' N	79° 37' W	33	769,6	237,4	0,31	365	500	730	1.083	1.490	
LITA	571	0° 51' N	78° 28' W	16	3.738,8	700,6	0,19		2.895	3.675	4.860		
STO. DOMINGO	660	0° 14' S	79° 11' W	31	3.237,5	747,9	0,23	1.970	2.370	3.135	4.230	5.400	
PUERTO ILA	260	0° 33' S	79° 23' W	14	2.767,2	571,8	0,21		2.040	2.765	3.500		
CHONE	20	0° 41' S	80° 05' W	16	1.224,4	322,1	0,26		815	1.220	1.640		
CALCETA	10	0° 50' S	80° 09' W	15	1.017,6	363,2	0,36		600	970	1.490		
ZAPOTE	50	0° 54' S	80° 04' W	12	1.579,1	509,8	0,32		930	1.580	2.235		
PICHILINGUE	73	1° 05' S	79° 27' W	32	2.160,8	501,4	0,23	1.230	1.565	2.105	2.820	3.550	
CORAZÓN	1.500	0° 18' S	79° 04' W	10	2.414,5	501,8	0,21		1.840	2.400	3.060		
ISABEL MARÍA	7	1° 49' S	79° 33' W	39	1.840,9	677,1	0,37	660	1.060	1.750	2.735	3.800	
MILAGRO	13	2° 09' S	79° 36' W	56	1.530,2	556,6	0,36	600	900	1.440	2.260	3.240	
PORTOVELO	920	3° 43' S	79° 37' W	78	1.566,9	365,6	0,23	900	1.135	1.525	2.050	2.600	
CARIAMANGA	1.950	4° 20' S	79° 34' W	20	1.197,9	217,1	0,18	(700)	920	1.195	1.480	(1.705)	
TULCÁN	2.950	0° 49' N	77° 42' W	44	882,4	199,7	0,23	500	646	865	1.140	1.450	
EL ÁNGEL	3.055	0° 37' N	77° 56' W	17	1.023,3	342,0	0,33		640	970	1.470		
SAN GABRIEL	2.860	0° 36' N	77° 50' W	22	943,7	222,3	0,24	490	660	925	1.250	1.575	
CAHUASQUÍ	2.340	0° 31' N	78° 13' W	14	805,3	174,8	0,22		600	785	1.036		
IBARRA	2.228	0° 21' N	78° 08' W	36	634,7	145,3	0,23	380	466	616	825	1.050	
OTAVALO	2.556	0° 14' N	78° 16' W	23	854,6	191,5	0,22	495	625	835	1.110	1.380	
SAN PABLO	2.680	0° 12' N	78° 11' W	13	1.071,4	212,8	0,20		816	1.052	1.352		
QUITO-Observ.	2.818	0° 12' S	78° 29' W	85	1.216,9	218,5	0,18	765	947	1.204	1.504	1.780	
ISOBAMBA	3.058	0° 22' S	78° 33' W	13	1.484,9	225,0	0,15		1.210	1.470	1.775		
COTOPAXI	3.560	0° 42' S	78° 33' W	30	1.136,7	357,2	0,31	570	745	1.075	1.605	2.250	
LATACUNGA	2.560	0° 54' S	78° 37' W	19	501,7	75,5	0,15		415	495	600		
CUSUBAMBA	3.205	1° 04' S	78° 42' W	14	589,5	211,4	0,36		355	555	865		
ANGAMARCA	2.970	1° 07' S	78° 56' W	14	667,1	204,0	0,31		430	645	835		
PÍLLARO	2.805	1° 10' S	78° 33' W	16	678,9	137,1	0,20		515	670	859		
AMBATO	2.523	1° 15' S	78° 37' W	57	488,7	120,6	0,25	260	341	475	650	800	
PATATE	2.360	1° 19' S	78° 30' W	22	623,9	150,0	0,24	325	440	610	825	1.035	
TISALEO	3.327	1° 21' S	78° 40' W	22	692,0	105,2	0,15	480	552	685	830	970	
BAÑOS	1.843	1° 24' S	78° 25' W	60	1.405,7	271,7	0,19	1.085	1.155	1.340	1.740	2.390	
URBINA	3.609	1° 29' S	78° 43' W	14	967,3	172,1	0,18		770	955	1.193		
L. HERRERÍAS	3.650	1° 36' S	78° 56' W	13	771,0	255,8	0,33		470	740	1.110		
SAN SIMÓN	2.800	1° 38' S	78° 59' W	14	762,1	149,8	0,20		580	750	960		
RIOBAMBA	2.796	1° 39' S	78° 39' W	27	413,8	96,3	0,23	235	300	405	540	685	
GUASLÁN	2.750	1° 44' S	78° 39' W	14	623,5	118,1	0,19		484	615	775		
CAÑAR	3.104	2° 34' S	78° 56' W	19	473,8	111,9	0,24	268	341	481	622	790	
CUENCA	2.527	2° 54' S	78° 59' W	25	858,6	149,0	0,17	515	670	855	1.050	1.205	
STA. ISABEL	1.598	3° 20' S	79° 20' W	15	501,8	131,6	0,26		340	485	675		
OÑA	2.430	3° 28' S	79° 09' W	14	534,0	172,6	0,32		335	510	760		
LA TOMA	2.238	3° 52' S	79° 23' W	16	404,7	120,0	0,30		260	390	565		
LOJA	2.135	4° 00' S	79° 12' W	35	819,0	138,2	0,17	530	645	815	1.000	1.170	
MALACATUS	1.600	4° 13' S	79° 16' W	14	671,0	140,8	0,21		500	660	855		
PUTUMAYO	230	0° 07' S	75° 52' W	8	3.308,3	761,8	0,23		2.410	3.225	4.315		
PAPALLACTA	3.160	0° 20' S	78° 05' W	12	1.360,0	234,5	0,17		1.085	1.330	1.670		
LIMONCOCHA	219	0° 25' S	76° 37' W	7	3.244,2	324,0	0,10		2.830	3.240	3.660		
TIPUTINI	220	0° 47' S	75° 31' W	16	2.521,4	514,9	0,20		1.870	2.480	3.200		
TENA	527	1° 00' S	77° 48' W	17	3.931,3	758,6	0,19		3.080	3.900	4.910		
PASTAZA	1.043	1° 10' S	78° 03' W	15	5.088,9	506,0	0,10		4.475	5.050	5.760		
PUYO	950	1° 30' S	77° 51' W	13	4.582,6	473,2	0,10		4.010	4.540	5.210		
ZAMORA	970	4° 05' S	78° 58' W			166,1	0,08		1.755	1.963	2.175		

Cuadro 5 - Alturas pluviométricas anuales (mm)

en todas las estaciones, la definición de la zonificación se efectuó escogiendo solo tres parámetros: el coeficiente de variación C_v , la pendiente « a » de la recta de Galton y el parámetro de forma γ de la ley de Pearson. Es interesante observar que, aunque los dos parámetros no sean matemáticamente comparables de una estación a otra sino cuando $P_0 = 0$, se constata que la simplificación utilizada nunca provoca un error significativo. Se perdonará entonces el hecho de haber sacrificado la precisión científica a la necesidad de obtener resultados homogéneos.

• **Zona 1, muy seca**

No cubre sino una reducida superficie, la de la punta de la Península de Santa Elena. Las estaciones más representativas son Salinas, La Libertad y Ancón. Los parámetros escogidos tienen los siguientes valores:

$$P_{0,5} < 170 \text{ mm}$$

$$0,8 < C_v < 1$$

$$2,7 < a < 3$$

$$\gamma \text{ cercano a } 1$$

• **Zona 2, seca**

Ocupa una franja de 30 a 50 Km de ancho, alargada del Norte al Sur de Manta hasta la frontera peruana. Las estaciones representativas de esta zona son Manta, Playas, Machala y Zapotillo. Se caracteriza por:

$$170 \text{ mm} < P_{0,5} < 500 \text{ mm}$$

$$0,5 < C_v < 0,8$$

$$3 < a < 4,5$$

$$1,5 < \gamma < 3,5$$

• **Zona 3, occidental de transición**

Situada al Este de la anterior, alcanza un ancho máximo de 100 Km en la latitud de Guayaquil. Aunque presenta totales pluviométricos bastante diferentes, se pueden citar como estaciones representativas Portoviejo, Guayaquil y Pasaje. Los valores de los parámetros característicos son:

$$500 \text{ mm} < P_{0,5} < 1.200 \text{ mm}$$

$$0,35 < C_v < 0,45$$

$$5 < a < 6$$

$$4 < \gamma < 6,5$$

• **Zona 4, occidental húmeda**

Situada de Norte a Sur a lo largo de la cordillera, cubre sobre todo la parte ubicada al Norte de 0°30' de latitud sur en donde ocupa todo el espacio de los Andes al litoral. La transición con la zona 3 es muy progresiva y el trazado cartográfico del límite que las separa no es sino la situación promedio de una franja más o menos ancha en donde por cierto están situadas las estaciones de Esmeraldas-Tachina, Calceta, Isabel María y Milagro. En esa franja de transición, los parámetros estadísticos tienen valores distintos a los del resto de la zona y se superponen parcialmente a los de la zona anterior:

$$1.000 \text{ mm} < P_{0,5} < 1.700 \text{ mm}$$

$$0,35 < C_v < 0,40$$

$$6,5 < a < 7$$

$$6,5 < \gamma < 12$$

La zona posee por otro lado cierta heterogeneidad debida esencialmente a la orografía, pero el reducido número y la repartición geográfica de las estaciones no permiten desgraciadamente establecer la relación entre la altitud y las lluvias. Solo se puede observar, del Oeste hacia el Este, la existencia de un gradiente pluviométrico que es positivo hasta aproximadamente los 1.000 a 1.500 m.s.n.m. y se vuelve luego negativo. Entre las estaciones representativas se pueden citar las de Pichilingue (120 m.s.n.m.), Puerto Ila (300 m.s.n.m.), Santo Domingo (600 m.s.n.m.), Lita (740 m.s.n.m.), Portovelo (900 m.s.n.m.) y El Corazón (1.560 m.s.n.m.). Los valores característicos resultado de las estadísticas son los siguientes:

$$1.500 \text{ mm} < P_{0,5} < 5.000 \text{ mm}$$

$$0,2 < C_v < 0,3$$

$$7,5 < a < 12,5$$

$$12,5 < \gamma < 30 \text{ (siendo el intervalo } 19-30 \text{ el más probable)}$$

• **Zona 5, callejón interandino**

Mientras que las cuatro zonas anteriores están todas sometidas a la influencia pacífica (una sola estación lluviosa de diciembre a mayo), aquí se reunieron las estaciones cuya característica común es estar situadas en el callejón interandino (dos estaciones lluviosas, de enero a mayo y en octubre-noviembre) sabiendo que el relieve y la exposición cuentan entre los factores más importantes de la pluviosidad de esta zona. Sin embargo, si se exceptúan los valles bien abrigados tales como el de Salinas-Imbabura, Palmira-Ambato, Santa Isabel o La Toma-Malacatus, o regiones situadas a una altura superior a los 3.000-3.200 m.s.n.m., la homogeneidad de las pluviometrías es relativamente satisfactoria. Las distribuciones son ligeramente hipernormales, a menudo cercanas a la distribución normal. Los parámetros característicos tienen los siguientes valores:

$$400 \text{ mm} < P_{0,5} < 1.500 \text{ mm (casi siempre } 500 - 1.000 \text{ mm)}$$

$$0,15 < C_v < 0,25$$

$$10 < a < 15$$

$$15 < \gamma < 50$$

De las estaciones representativas, la de Quito-Observatorio fue instalada en 1890.

En el caso de los valles abrigados:

$$300 \text{ mm} < P_{0,5} < 500 \text{ mm}$$

$$0,25 < C_v < 0,3$$

$$7 < a < 8$$

$$10 < \gamma < 15$$

Hasta los 4.000 m.s.n.m. (por sobre esa altura no existe información alguna), se observa una cierta irregularidad debida a la orografía, pero, al igual que en el caso de los valles secos, las distribuciones son generalmente más disimétricas. Esta región alta se caracteriza por:

$$P_{0,5} > 600 \text{ mm (casi siempre } > 1.000 \text{ mm)}$$

$$0,30 < C_v < 0,35$$

ESTACIONES	INTERVALO DE CONFIANZA																	
	F = 0,99		F = 0,90				F = 0,50				F = 0,10		F = 0,010					
	0,95	0,80	0,95	0,80	0,95	0,80	0,95	0,80	0,95	0,80	0,95	0,80	0,95	0,80				
SALINAS			(3)	(34)	(6)	(25)	67	147	78	128	181	494	218	412				
LIBERTAD			33	92	40	76	99	212	114	184	233	654	282	540				
ANCÓN			(0)	(81)	(2)	(51)	70	261	93	206	200	1.021	278	752				
MANTA	122	191	129	170	49	110	57	96	131	218	144	199	280	526				
PLAYAS			46	258	77	206	238	490	278	433	477	1.051	560	914				
MACHALA			180	295	194	266	370	594	401	543	729	1.534	831	1.335	1.557	2.570	1.697	2.860
ZAPOTILLO			25	221	49	169	237	542	280	468	538	1.468	656	1.223				
MACARÁ			113	330	144	279	342	608	384	547	606	1.213	694	1.070				
BAHÍA			218	414	250	374	444	624	475	588	662	976	715	917				
ROCAFUERTE			144	294	167	260	299	463	325	428	454	784	505	710				
PORTOVIEJO	143	237	156	218	240	337	255	318	422	538	441	516	673	927	941	1.478	1.018	1.367
LA NARANJA			475	891	537	794	922	1.380	996	1.280	1.331	2.252	1.472	2.042				
GUAYAQUIL	322	473	344	442	525	686	550	655	919	1.121	951	1.083	1.497	1.954	2.152	3.142	2.297	2.942
PASAJE			330	574	366	518	583	878	629	813	883	1.637	979	1.500				
MARCABELLI			465	1.107	564	957	974	1.649	1.085	1.499	1.480	2.783	1.682	2.480				
SAN LORENZO	1.033	1.612	1.119	1.498	1.541	2.080	1.626	1.971	2.376	2.895	2.419	1.783	3.180	4.271	3.944	5.964	4.248	5.537
ESMERALDAS	300	445	321	415	435	574	457	547	659	809	683	481	942	1.245	1.220	1.818	1.309	1.698
LITA			2.529	3.314	2.660	3.151	3.326	4.061	3.452	3.912	4.074	5.330	4.284	5.069				
STO. DOMINGO	1.735	2.249	1.812	2.147	2.146	2.625	2.220	2.533	2.897	3.396	2.977	3.303	3.783	4.738	4.591	6.369	4.855	3.014
PUERTO ILA			1.697	2.430	1.822	2.277	2.448	3.112	2.565	2.977	3.001	4.065	3.182	3.843				
CHONE			658	1.001	713	928	1.059	1.402	1.117	1.331	1.366	1.962	1.463	1.836				
CALCETA			460	783	508	709	799	1.177	860	1.095	1.148	1.934	1.266	1.754				
ZAPOTE			692	1.249	775	1.116	1.291	1.934	1.394	1.790	1.707	2.925	1.892	2.640				
PICHILINGUE	1.055	1.434	1.112	1.360	1.405	1.749	1.430	1.713	1.944	2.279	1.999	2.217	2.534	3.138	3.054	4.127	3.717	3.917
CORAZÓN			1.549	2.212	1.653	2.057	2.081	2.783	2.198	2.677	2.504	3.771	2.793	3.475				
ISABEL MARÍA	477	878	537	798	883	1.260	942	1.188	1.558	1.959	1.623	1.885	2.369	3.148	3.131	4.592	3.350	4.302
MILAGRO	490	730	526	683	788	1.026	805	1.005	1.312	1.680	1.355	1.630	1.999	2.553	2.726	3.848	2.894	3.626
PORTOVELO	811	997	841	963	1.050	1.219	1.083	1.190	1.448	1.605	1.474	1.577	1.917	2.192	2.301	2.857	2.444	2.765
CARIAMANGA	563	859	611	798	811	1.040	855	994	1.097	1.300	1.192	1.261	1.383	1.584	1.475	1.965	1.556	1.865
TULCÁN	438	570	459	545	591	706	609	685	791	903	809	882	1.044	1.245	1.277	1.647	1.334	1.576
EL ÁNGEL			509	804	554	739	819	1.148	872	1.078	1.172	1.843	1.275	1.695				
SAN GABRIEL	390	601	425	559	556	774	593	731	831	1.025	885	988	1.093	1.423	1.310	1.879	1.403	1.760
CAHUASQUÍ			508	709	541	666	693	889	728	848	875	1.226	933	1.151				
IBARRA	337	431	351	412	425	512	439	495	573	663	587	640	745	915	905	1.221	953	1.150
OTAVALO	411	596	440	552	549	712	575	679	759	919	786	888	973	1.264	1.051	1.655	1.229	1.549
SAN PABLO			694	960	738	907	838	1.186	977	1.133	1.151	1.588	1.224	1.494				
QUITO-Observ.	705	829	725	907	897	999	914	981	1.159	1.251	1.174	1.234	1.429	1.582	1.662	1.906	1.702	1.861
ISOBAMBA			1.070	1.369	1.101	1.306	1.341	1.611	1.389	1.556	1.570	2.007	1.645	1.916				
COTOPAXI	483	683	511	640	656	851	685	812	967	1.198	1.036	1.116	1.375	1.880	1.791	2.841	1.937	2.619
LATACUNGA			306	450	396	436	462	533	474	518	539	674	560	645				
CUSUBAMBA			270	466	300	421	453	679	489	630	658	1.137	730	1.075				
ANGAMARCA			332	550	367	501	540	767	578	718	742	1.172	810	1.077				
PÍLLARO			455	584	476	557	598	751	624	719	223	1.017	773	955				
AMBATO	220	295	239	283	312	372	322	362	446	506	456	495	597	708	714	897	742	862
PATATE	248	415	274	380	374	514	397	486	547	678	570	652	718	943	857	1.243	918	1.165
TISALEO	421	547	442	522	513	616	530	596	640	733	656	755	758	909	853	1.103	874	1.052
BAÑOS	1.064	1.114	1.070	1.103	1.141	1.171	1.146	1.165	1.292	1.397	1.307	1.376	1.501	1.911	2.033	2.870	2.143	2.607
URBINA			673	881	708	837	862	1.058	896	1.018	1.039	1.373	1.096	1.303				
L. HERRERÍAS			357	618	396	557	608	801	655	836	851	1.447	941	1.309				
SAN SIMÓN			497	677	527	638	670	840	699	805	824	1.119	973	1.056				
RIOBAMBA	197	280	210	263	266	339	277	324	370	443	382	429	478	610	576	815	618	766
GUASLÁN			416	561	440	531	552	685	575	658	672	891	710	846				
CAÑAR	218	338	233	308	292	398	310	376	412	518	429	495	534					
CUENCA	438	605	465	571	607	739	629	713	796	918	817	895	955	1.155	1.063	1.366	1.112	1.306
STA. ISABEL			278	416	300	385	419	560	443	531	556	820	598	762				
OÑA			272	422	293	386	428	612	457	571	588	992	647	896				
LA TOMA			209	323	227	298	334	456	354	430	457	699	495	646				
LOJA	473	583	492	571	598	696	614	678	771	862	786	846	928	1.078	1.055	1.297	1.094	1.252
MALACATUS			424	589	451	554	585	745	612	712	727	1.006	773	946				
PUTUMAYO			1.881	3.088	2.073	2.802	2.681	3.879	2.883	3.607	3.360	5.541	3.707	5.022				
PAPALLACTA			883	1.287	960	1.210	1.181	1.479	1.238	1.422	1.468	1.872	1.525	1.795				
LIMONCOCHA			2.444	3.216	2.597	3.063	2.954	3.526	3.068	3.412	3.274	4.046	3.427	3.893				
TIPUTINI			1.497	2.243	1.636	2.104	2.203	2.757	2.307	2.653	2.627	3.573	2.966	3.434				
TENA			2.468	3.531	2.667	3.333	3.507	4.293	3.653	4.147	4.379	5.441	4.577	5.243				
PASTAZA			4.094	4.856	4.236	4.713	4.768	5.332	4.874	5.226	5.379	6.141	5.522	5.990				
PUYO			3.622	4.398	3.768	4.250	4.252	4.828	4.362	4.719	4.822	5.598	4.698	5.451				
ZAMORA			1.605	1.905	1.662	1.848	1.854	2.076	1.896	2.034	2.025	2.325	2.082	2.260				

* Estaciones situadas en el límite de dos zonas

Cuadro 6 - Alturas pluviométricas anuales (mm)

$$6,5 < a < 8$$

$$9 < \gamma < 12$$

• **Zona 6, oriental húmeda**

Corresponde a la región amazónica que se mantiene permanentemente bajo la influencia de masas de aire húmedo continental. Aunque la información disponible no es suficiente como para poder sacar conclusiones definitivas, parece indiscutible que la cordillera andina juega un papel importante en la distribución de las lluvias: es así como, al igual que en la vertiente occidental, las alturas pluviométricas máximas anuales se observan entre los 1.000 y los 1.500 m de altura. Sus características generales son las siguientes:

$$1.500 \text{ mm} < P_{0,5} < 6.000 \text{ mm}$$

$$0,1 < C_v < 0,2$$

$$10 < a < 27$$

$$22 < \gamma < 150$$

Sin embargo, sin que se pueda por ahora adelantar una explicación satisfactoria del fenómeno, existe una cierta heterogeneidad y se pueden distinguir dos grupos de estaciones.

El primero está constituido por las estaciones de la parte septentrional: Tena, Tiputini y Putumayo:

$$C_v \text{ cercano a } 0,2$$

$$10 < a < 12$$

$$22 < \gamma < 27$$

El segundo, caracterizado por una reducida variabilidad de las observaciones, está formado por las estaciones de Pastaza, Limoncocha, Zamora y El Puyo:

$$C_v \text{ cercano a } 0,1$$

$$22 < a < 27$$

$$100 < \gamma < 150$$

Aunque esta zona presenta algunas similitudes con la zona húmeda occidental, ciertos rasgos característicos permiten diferenciarlas:

- todas las estaciones de la cuenca amazónica tienen distribuciones normales o muy cercanas a la normal, mientras que ello es totalmente excepcional en la vertiente occidental en donde las funciones de densidad tienen una marcada disimetría positiva, consecuencia de la influencia del fenómeno El Niño (artículo V);

- a pesar de algunas ligeras fluctuaciones mensuales, la región oriental es regada abundantemente a todo lo largo del año mientras que la zona húmeda occidental tiene un ciclo estacional caracterizado por una estación seca marcada, entre junio y octubre.

2.2. Relaciones entre alturas pluviométricas anuales medias y medianas

Se sabe que la media aritmética, utilizada a menudo por la simplicidad de su cálculo, tiene una probabilidad que depende de la distribución estadística de la muestra estudiada; solamente en el caso de la ley

normal la frecuencia de la media es 0,5 puesto que entonces media \bar{P} , mediana $P_{0,5}$ y modal P_m tienen el mismo valor.

Al describir las seis zonas pluviométricas homogéneas, se pudo observar que si bien los totales anuales de algunas estaciones siguen leyes simétricas normales o casi normales (región oriental), la gran mayoría presenta ajustes unimodales disimétricos. Como siempre se trata de disimetría positiva, se encontrará, en orden creciente, modal-mediana-media. Estos tres parámetros están vinculados por la relación aproximada:

$$\bar{P} - P_{0,5} = \frac{(\bar{P} - P_m)}{3}$$

En cambio, las relaciones entre media y mediana dependen del tipo de ley escogida y del valor de sus parámetros.

A continuación se presentan las relaciones empíricas que, para cada una de las regiones pluviométricas homogéneas, permiten estimar el valor de la mediana a partir de la media, en milímetros. Todas esas relaciones son altamente significativas en el intervalo de confianza de probabilidad 95 % (J.-F. Nouvelot, 1982).

Zona 1: $P_{0,5} = 0,725 \bar{P}$

Se observará que la diferencia relativa entre las dos variables supera el 25 % y que la frecuencia atribuible a la media es del orden de 0,35, es decir un período de retorno ($T = 1/F$) cercano a los 3 años.

Zona 2: $P_{0,5} = 0,85 \bar{P}$

La diferencia relativa entre las variables ya no es sino del 15 %, es decir $T = 2,4$ años.

Zona 3: $P_{0,5} = 0,93 \bar{P}$

La diferencia relativa entre $P_{0,5}$ y \bar{P} se sitúa entre el 6 y el 7 % y la frecuencia de la media es de 0,45, es decir $T = 2,2$ años.

Zona 4: $P_{0,5} = 0,98 \bar{P} + 8,8$

La diferencia relativa entre las dos variables es apenas superior al 2 %.

Zona 5: $P_{0,5} = 0,985 \bar{P} + 6,4$

La diferencia relativa entre media y mediana ya no es sino del 2 %.

Zona 6: $P_{0,5} = 0,994 \bar{P} + 15,1$

La diferencia relativa entre las dos variables es solamente de 0,5 a 1,5 %, pues la gran mayoría de las estaciones tiene una distribución normal.

2.3. Estimación de las alturas pluviométricas anuales de frecuencia rara

La estimación de los totales pluviométricos anuales correspondientes a diversas frecuencias se realiza a partir de los valores de la mediana. Tal como se hizo en el caso de la evaluación de esta última, se deben considerar como aceptables ciertas hipótesis difíciles de demostrar. Se admite entonces que la relación estocástica $P_{F_2} = f(P_{F_1})$ es lineal, que las dos variables tienen distribuciones marginales normales, que la variable independiente P_{F_1} está determinada con un error inferior al de la variable dependiente P_{F_2} , y que la auto-correlación de los valores de esta última es despreciable.

Se presentan a continuación, para cada una de las zonas pluviométricas homogéneas, las ecuaciones que permiten estimar las lluvias anuales decenales (a partir de la mediana), centenales (a partir de la decenal), así como las de las frecuencias intermedias. Se diferencian las frecuencias superadas (frecuencias secas, 0,9 y 0,99) de aquellas no superadas (húmedas, 0,1 y 0,01). Por otro lado, se verificó que todos estos vínculos eran fuertemente significativos en el intervalo de confianza de probabilidad 95 %. El lector que desee obtener muy rápidamente una evaluación de los valores de las frecuencias raras a nivel regional, encontrará al final de cada párrafo el cociente P_{F_2} / P_{F_1} ; tal método de estimación es evidentemente menos exacto.

a) Lluvias anuales de frecuencia decenal seca, en mm

Zonas 1 y 2: $P_{0,9} = 0,53 P_{0,5} - 35$

Zona 3: $P_{0,9} = 0,61 P_{0,5} - 14$

Zona 4: $P_{0,9} = 0,82 P_{0,5} - 169$

Zona 5: $P_{0,9} = 0,81 P_{0,5} - 47$

Zona 6: $P_{0,9} = 0,87 P_{0,5} - 121$

Valores del cociente $P_{0,9} / P_{0,5}$:

Zonas 1 y 2 = 0,40; Zona 3 = 0,60; Zona 4 = 0,75;

Zona 5 = 0,76; Zona 6 = 0,83.

b) Lluvias anuales de frecuencia decenal húmeda, en mm

Zona 1: $P_{0,1} = 2,20 P_{0,5} + 100$

Zona 2: $P_{0,1} = 1,97 P_{0,5} + 44$

Zona 3: $P_{0,1} = 1,74 P_{0,5} - 66$

En la franja de transición entre las zonas 3 y 4:

$R = 0,998$ con $N = 5$; $P_{0,1} = 1,60 P_{0,5} - 51$

Zona 4: $P_{0,1} = 1,26 P_{0,5} + 104$

Zona 5: $P_{0,1} = 1,23 P_{0,5} + 73$

Zona 6: $P_{0,1} = 1,13 P_{0,5} + 227$

Valores del cociente $P_{0,1} / P_{0,5}$:

Zona 1 = 3; Zona 2 = 2; Zona 3 = 1,71 (ó 1,59 en la franja de transición); Zona 4 = 1,30; Zona 5 = 1,25; Zona 6 = 1,17.

c) Lluvias anuales de frecuencia centenal seca, en mm

Dado que no existen sino pocas series lo suficientemente largas como para permitir la evaluación de los totales pluviométricos anuales correspondientes a esta frecuencia, fue necesario agrupar las tres zonas occidentales

más o menos secas.

Zonas 1, 2 y 3: $P_{0,99} = 0,65 P_{0,9}$

Zona 4: $P_{0,99} = 0,84 P_{0,9} - 90$

Zona 5: $P_{0,99} = 0,80 P_{0,9} - 5$

Zona 6: Para compensar la falta de datos, solo se puede proponer la siguiente relación: $P_{0,99} = 0,85 P_{0,9}$

Valores del cociente $P_{0,99} / P_{0,9}$:

Zonas 1, 2 y 3 = 0,65; Zona 4 = 0,77; Zona 5 = 0,80; Zona 6 = 0,85.

d) Lluvias anuales de frecuencia centenal húmeda, en mm

En este caso también, la falta de observaciones en la región seca litoral se traduce en ecuaciones aproximadas cuya precisión no está determinada.

Zona 1: $P_{0,01} = 2,20 P_{0,1}$

Zona 2: $P_{0,01} = 1,60 P_{0,1}$

Zona 3: $P_{0,01} = 1,54 P_{0,1} - 35$

Zona 4: $P_{0,01} = 1,35 P_{0,1} - 238$

Zona 5: $P_{0,01} = 1,38 P_{0,1} - 81$

Zona 6: $P_{0,01} = 1,15 P_{0,1}$

Valores del cociente $P_{0,01} / P_{0,1}$:

Zona 1 = 2,20; Zona 2 = 1,60; Zona 3 = 1,51; Zona 4 = 1,28; Zona 5 = 1,23; Zona 6 = 1,15.

Los ábacos 1 a 6 permiten, a partir de la media aritmética, estimar las alturas pluviométricas anuales de frecuencia mediana y de frecuencias decenales y centenales secas y húmedas.

2.4. Estimación de los totales pluviométricos anuales de una frecuencia cualquiera

Para realizar ciertos estudios, a veces es necesario estimar no solamente los valores de las lluvias de frecuencias decenales y centenales sino también los de frecuencias intermedias P_F . Su cálculo se posibilita gracias a ciertas propiedades de las leyes de Gauss, Galton y Pearson III. Sin desarrollar el fundamento de las mismas, se presentan a continuación las fórmulas utilizables:

- a partir de la ley normal, en las regiones en donde las pluviometrías siguen esa distribución (siendo u la variable reducida, ver una tabla de Gauss):

$$P_F = P_{0,5} (1 + u \cdot Cv)$$

- a partir de la ley gaussologarítmica, con $P_0 = 0$ (parámetro de posición):

$$P_F = 10 \left(\frac{u + a \log P_{0,5}}{a} \right)$$

Con una tabla de Gauss para conocer los valores de u , se dispone en los acápites 2.1 y 2.2 de los elementos necesarios para el cálculo, a y $P_{0,5}$.

- a partir de la ley Gamma incompleta, con la aproximación de Wilson:

$$P_F = P_{0,5} \left(1 - \frac{1}{9\gamma} + u \sqrt{\frac{1}{9\gamma}} \right)^3$$

Se estima γ (parámetro de forma) ya sea a partir de una estación de referencia, o a nivel regional (valores límite superior e inferior para cada zona homogénea, acápite 2.1).

2.5. Precisión de los resultados

La precisión de los resultados depende directamente del tamaño de las muestras a partir de los que han sido calculados. La amplitud de los errores puede definirse mediante el intervalo de confianza en donde existe la probabilidad α % de encontrar el verdadero valor de parámetros conocidos solamente mediante su estimación empírica. En el presente caso, los valores de los intervalos de confianza del cuadro 6 son calculados utilizando parámetros de la ley de Galton y, cada vez que es posible, los de la ley normal (región amazónica por ejemplo).

Es interesante anotar que las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los valores límite de los intervalos de confianza permiten también estimar el tamaño N de la muestra teórica necesaria para conocer, con la probabilidad α , el valor de una variable de precisión x %. Como ejemplo, tomando en cada zona pluviométrica un valor promedio de la pendiente a de la recta de Galton, se presentan a continuación los valores límite superiores e inferiores de N para obtener valores de la pluviometría anual de frecuencia decenal que tengan una precisión del 90 %, con una probabilidad del 95 %.

- Zona 1** ($a = 3$): $N_1 = 387$ años $N_2 = 473$ años
- Zona 2** ($a = 4$): $N_1 = 218$ años $N_2 = 266$ años
- Zona 3** ($a = 5,5$): $N_1 = 115$ años $N_2 = 141$ años
- Zona 4** ($a = 10$): $N_1 = 35$ años $N_2 = 43$ años
- Zona 5** ($a = 12$): $N_1 = 24$ años $N_2 = 30$ años
- Zona 6**: - primer grupo: muy cercano a la zona 5
- segundo grupo ($a = 25$): $N =$ del orden de 6 a 7 años.

Al examinar estos valores, se constata que a veces habría que moderar la confianza que se tiende a atribuir a ciertos resultados estadísticos con el pretexto de que se refieren a un período homogéneo, olvidando que su precisión está ligada igualmente a la forma de su distribución, y por lo tanto a su variabilidad. En todo caso, abogan por la perennidad y el refuerzo de la densidad de las redes de medidas.

3. ALTURAS PLUVIOMÉTRICAS DIARIAS

El estudio de las alturas pluviométricas diarias se basa en las relaciones que, a nivel regional (y solamente a ese nivel), las vinculan con las alturas pluviométricas anuales de igual frecuencia.

El análisis estadístico se realiza con base en una muestra de las alturas máximas observadas en 24 horas, a razón de un valor por año de observación. Esta manera de proceder conlleva sin duda alguna ciertas imprecisiones:

- la altura total registrada no siempre se debe a una sola lluvia relacionada con un evento meteorológico continuo. Puede corresponder al total de los diversos aguaceros y, a la inversa, una lluvia de larga duración puede haber sido truncada por un observador que se atenía estrictamente a las instrucciones de efectuar las medidas según un horario preestablecido. Sin embargo, en lo que respecta especialmente al Ecuador, se puede constatar que cuando se trata de fuertes lluvias, es excepcional observar más de un evento por día. Por otro lado, la probabilidad de que un aguacero sea truncado es muy reducida;

- la consideración de todos los totales diarios, y no solamente de los más elevados, habría proporcionado una muestra más extensa, es decir teóricamente más confiable. La falta de un banco de datos, el largo tiempo necesario para un eventual ingreso de la información (300.000 datos aproximadamente), así como la búsqueda siempre laboriosa de los límites de truncamiento que den el mejor ajuste al utilizarse las leyes truncadas (es ese el caso puesto que, por definición, la variable es nula los días sin lluvia), no permitieron trabajar sobre esa base. Nótese sin embargo que se realizaron pruebas comparativas entre muestras restringidas y completas en las estaciones pluviométricas de referencia de los tres grupos de cuencas vertientes representativas estudiadas en el Ecuador y que las diferencias constatadas nunca fueron significativas, lo que justifica el método utilizado.

Las principales características de las alturas pluviométricas diarias de cada una de las regiones homogéneas se presentan en el cuadro 7.

3.1. Zonificación de las lluvias diarias

So pena de quitar todo interés al presente estudio, se comprende que no se trata en absoluto de buscar una zonificación distinta a la propuesta en el acápite 2.1.

A continuación, se indican, para cada una de las zonas pluviométricas homogéneas, los límites superior e inferior de las alturas pluviométricas diarias de frecuencia media $H_{0,5}$ y aquellos de los parámetros estadísticos calculados: el coeficiente de variación C_v , la pendiente a de la recta de Galton y el coeficiente de forma γ de la ley de Pearson III.

- Zona 1:** $25 \text{ mm} < H_{0,5} < 30 \text{ mm}$
 $0,85 < C_v < 0,95$
a cercano a 3; γ cercano a 1
- Zona 2:** $35 \text{ mm} < H_{0,5} < 65 \text{ mm}$
 $0,55 < C_v < 0,65$
 $4 < a < 4,5$; $2,5 < \gamma < 3,5$
- Zona 3:** $50 \text{ mm} < H_{0,5} < 85 \text{ mm}$
 $0,40 < C_v < 0,50$
 $5 < a < 6$; $5 < \gamma < 6$
- Zona 4:** $65 \text{ mm} < H_{0,5} < 120 \text{ mm}$
 $0,20 < C_v < 0,30$
 $7,5 < a < 12$; $12 < \gamma < 30$

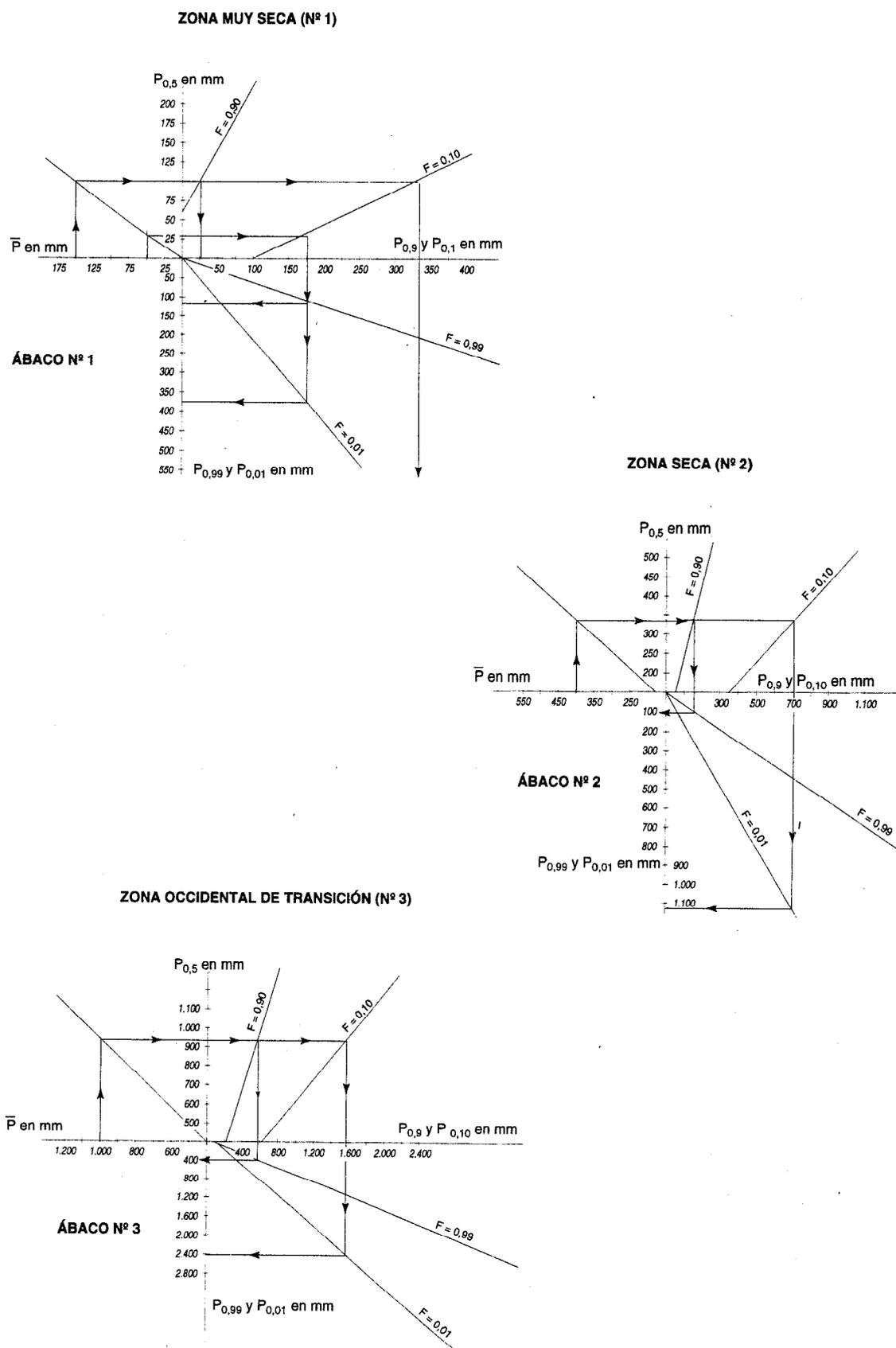


Fig. 4 - Alturas pluviométricas anuales (zonas nº 1, 2 y 3) — ábacos

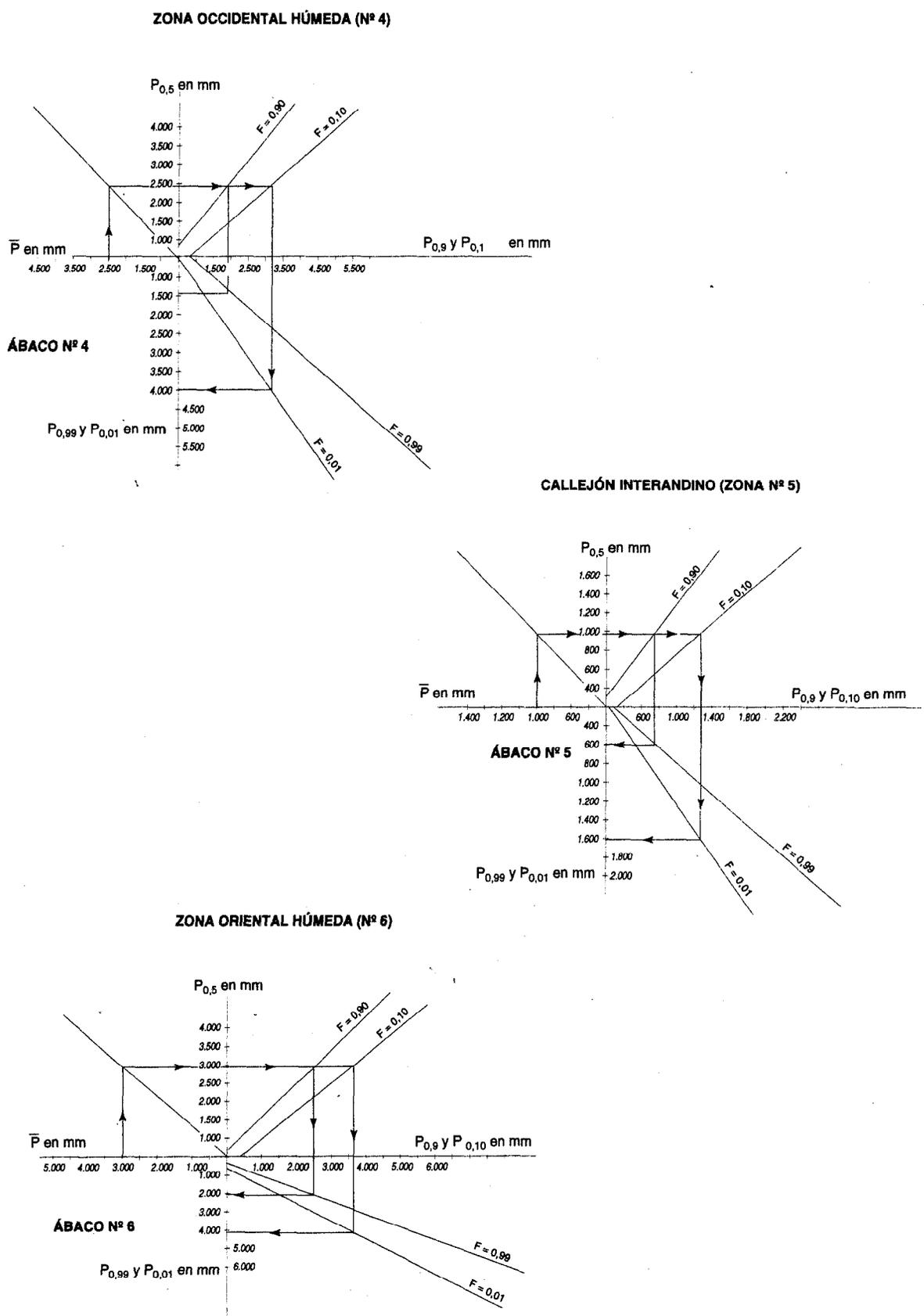


Fig. 5 - Alturas pluviométricas anuales (zonas nº 4, 5 y 6) — ábacos

En la zona de transición con la zona 3:

$$60 \text{ mm} < H_{0,5} < 110 \text{ mm}$$

$$0,30 < C_v < 0,35$$

$$6,5 < a < 7,5 ; 7 < \gamma < 35$$

Zona 5: $20 \text{ mm} < H_{0,5} < 40 \text{ mm}$

$$0,20 < C_v < 0,40$$

$$6 < a < 13; 7 < \gamma < 35$$

Al igual que en el caso de los totales pluviométricos anuales, los valores más bajos de a y de γ se relacionan con los valles secos abrigados y con las regiones cuya altura supera los 3.000 m.s.n.m.

Zona 6: $55 \text{ mm} < H_{0,5} < 130 \text{ mm}$

$$0,20 < C_v < 0,35$$

$$6 < a < 13; 10 < \gamma < 30$$

3.2. Relaciones entre alturas pluviométricas diarias y anuales de igual frecuencia

La búsqueda de estas relaciones es sumamente importante puesto que, según la lógica del estudio, van a permitir pasar de las lluvias anuales a las lluvias diarias, manteniéndose como documento de base el mapa de las isoyetas interanuales.

a) Análisis global

A continuación se presentan las relaciones que permiten calcular, en milímetros, cualquier altura diaria H de frecuencia F a partir de la altura anual P de igual frecuencia F . Se observará que las muestras utilizadas en cada zona reúnen todas las alturas pluviométricas sean estas de frecuencia mediana, decenal o centenal y es evidente que existe entonces una verdadera auto-correlación entre ciertos valores de la variables, la misma que va a traducirse en una sobreestimación del coeficiente de correlación. Por otro lado, aunque este último ya no sea lineal, el grado de dependencia de las variables fue evaluado en el intervalo de variación correspondiente a una probabilidad del 95 %. En todos los casos, el límite inferior de ese intervalo superó considerablemente el valor de 0,6.

La simplicidad y la facilidad de utilización de las relaciones propuestas justifican plenamente las aproximaciones realizadas.

Zonas 1 y 2: $H_F = 0,126 P_F + 14$

El agrupamiento de las dos zonas se debe al reducido tamaño de las muestras disponibles.

Zona 3: $H_F = 0,083 P_F + 13$

Zona 4: Como las tres zonas anteriores son bastante homogéneas en cuanto al relieve, no se consideró útil hacer intervenir la altitud para establecer la relación $H = f(P)$. El caso es distinto en las regiones que presentan fuertes desniveles en donde las relaciones no unívocas que unen respectivamente H y P a la altitud A no siguen las mismas variaciones. Es por esa razón que se

debió utilizar un sistema de correlaciones lineales múltiples.

$$H_F = 0,030 P_F - 0,018 A + 54$$

en donde H y P están expresadas en milímetros y A en metros.

De dos estaciones con alturas anuales idénticas para una misma frecuencia, aunque instaladas a altitudes diferentes, la más baja tiene una altura pluviométrica diaria máxima más elevada.

Zona 5: La altitud juega también un papel muy importante en esta zona.

$$H_F = 0,345 P_F - 0,115 A + 41$$

Zona 6: $H_F = 0,019 P_F - 0,0085 A + 54$

La linealidad de todas las relaciones propuestas no es totalmente fortuita. En efecto, al interior de cada zona homogénea, las formas de las distribuciones estadísticas de las alturas pluviométricas anuales y diarias son muy cercanas. Para convencerse de ello, basta con comparar los valores de los parámetros γ que caracterizan a cada una de esas zonas.

Si la igualdad de los parámetros de forma se verificara estrictamente, el coeficiente de paso de P_F a H_F estaría dado por la simple relación de las medias $\overline{P}/\overline{H}$.

Indiscutiblemente, esta similitud va en contra de las reglas conocidas, basadas en criterios estadísticos (teorema del límite central), que pueden enunciarse así: la ley de probabilidad ajustable a una muestra de alturas de lluvia es tanto más cercana a la normalidad cuanto que el régimen es abundante y la variable concierne una larga escala de tiempo. Se debe sin embargo señalar que esa « anomalía » se observa sobre todo al Oeste de la cordillera andina en donde la influencia de El Niño es más marcada (artículo V). Este fenómeno, de carácter a la vez oceánico y atmosférico, introduce en las muestras de los totales pluviométricos anuales valores excepcionalmente elevados (« outliers » de las estadísticas anglosajonas) que acentúan la asimetría de las distribuciones. Durante los mismos episodios, las alturas diarias máximas que intrínsecamente deberían presentar una asimetría mayor, no aumentan en las mismas proporciones, muy por el contrario, lo que explica una cierta convergencia en la forma de las distribuciones estadísticas.

b) Cálculo de las alturas pluviométricas diarias de una frecuencia cualquiera, a partir de las alturas anuales de frecuencia mediana, en mm

Las relaciones establecidas a partir de las alturas de frecuencia mediana permiten obtener una mejor precisión que aquella de las relaciones del acápite anterior (muestras sesgadas, auto-correlaciones), incluso cuando los valores de los coeficientes de correlación son inferiores. H y P están expresados en milímetros:

Zonas 1 y 2: $H_{0,5} = 0,092 P_{0,5} + 17$

Zona 3: $H_{0,5} = 0,062 P_{0,5} + 19$

ESTACIONES	VALORES CARACTERÍSTICOS				INTERVALOS DE CONFIANZA														
	N	H	σ	Cv	0,50	0,10	0,01	F = 0,50				F = 0,10				F = 0,01			
								0,95		0,8		0,95		0,8		0,95		0,8	
SALINAS	17	34,6	37,6	0,94	25	70		16,5	37,8	19,3	32,4	40,1	122,3	49,3	99,4				
MANTA	17	42,0	26,0	0,62	36	74		26,8	48,4	29,9	43,3	49,7	110,1	57,7	95,0				
PLAYAS	14	58,1	30,0	0,65	51	108		36,0	72,2	41,2	63,3	67,1	173,9	80,3	145,3				
MACHALA	6	43,5	34,6	0,80	34	84		17,3	66,8	22,7	51,0	33,6	209,7	48,6	145,3				
ZAPOTILLO	14	76,6	43,4	0,57	68	133		50,0	92,5	56,2	82,3	87,5	202,2	102,5	172,6				
MACARÁ	17	65,8	35,0	0,53	59	111		45,5	76,4	50,1	69,4	78,1	157,8	89,0	138,4				
BAHÍA	16	76,7	40,6	0,53	68	129		52,1	88,8	57,5	80,4	89,8	185,3	102,8	161,8				
ROCAFUERTE	15	53,4	30,3	0,57	48	93		35,7	64,5	39,9	57,7	62,1	139,3	72,3	119,7				
PORTOVIEJO	20	55,4	25,3	0,46	50	88	139	40,7	61,4	43,9	56,9	66,7	116,0	73,9	104,8	93,6	206,3	108,2	176,5
LA NARANJA	15	60,8	15,7	0,26	59	82		51,2	68,0	54,0	64,5	67,6	99,5	72,7	92,5				
GUAYAQUIL	38	90,7	40,3	0,44	83	143	220	72,5	95,0	76,0	90,6	119,1	171,7	126,9	161,1	169,9	284,4	185,8	260,4
PASAJE	14	63,8	26,5	0,42	59	98		46,8	74,4	51,1	68,2	71,7	133,9	80,7	191,1				
MARCABELLI	10	97,7	17,6	0,18	95	121		83,6	107,9	87,9	102,3	101,9	143,7	108,9	134,5				
SAN LORENZO	16	121,7	30,4	0,25	118	162	196	103,4	134,7	108,6	128,2	135,6	193,6	144,9	181,1	155,2	245,5	169,4	226,8
ESMERALDAS	30	70,2	30,3	0,43	65	110	165	56,1	75,4	59,0	71,6	90,0	134,4	96,5	125,4	124,7	218,3	135,4	198,1
LITA	16	90,3	28,1	0,27	90	121		77,1	102,1	81,9	98,1	103,5	138,5	110,1	132,0				
STO. DOMINGO	30	116,8	36,2	0,31	111	164	230	99,6	123,7	103,4	119,2	141,7	189,8	149,1	180,4	185,9	284,5	200,1	264,3
PUERTO ILA	16	105,9	25,0	0,22	105	135		92,6	117,4	97,3	112,7	118,3	151,7	124,6	145,5				
CHONE	16	86,6	29,6	0,34	80	124		66,9	95,7	71,5	89,5	97,8	157,3	106,8	143,9				
CALCETA	14	67,2	19,2	0,29	65	92		53,8	76,2	58,1	72,0	76,9	107,1	82,6	101,4				
ZAPOTE	12	98,1	32,5	0,33	93	141		75,9	114,3	81,9	105,6	106,9	186,1	118,8	167,4				
FICHILINGUE	20	119,4	24,4	0,20	119	151	180	107,5	130,5	111,7	126,3	135,5	166,5	141,2	160,8	157,9	202,2	166,0	194,0
CORAZÓN	12	99,4	31,1	0,31	99	140		79,2	118,8	86,7	111,3	113,3	166,8	123,5	156,6				
ISABEL MARÍA	37	115,0	39,0	0,34	109	166	237	98,0	121,2	101,7	116,9	143,8	191,6	151,2	182,3	192,8	291,4	207,1	271,3
MILAGRO	27	93,2	25,3	0,27	90	127	170	81,0	100,0	84,1	96,3	110,1	146,5	115,9	139,2	138,3	209,0	148,9	194,0
PORTOVELO	15	64,2	21,9	0,34	64	92		51,8	76,2	56,4	71,6	75,5	108,5	81,7	102,3				
CARIAMANGA	22	64,7	12,9	0,20	64	81		58,3	69,7	60,3	67,5	73,8	88,7	76,1	85,9	84,0	106,1	87,9	102,6
TULCÁN	45	42,4	14,5	0,34	40	61	89	36,3	44,1	37,5	42,6	53,6	69,5	56,0	66,4	73,5	107,8	78,5	100,9
EL ÁNGEL	19	44,2	12,4	0,42	41	68		33,8	49,8	36,3	46,3	52,4	88,3	57,7	80,2				
SAN GABRIEL	20	41,5	10,3	0,25	40	55	73	35,6	44,9	37,2	43,0	47,1	64,2	49,9	60,7	58,1	91,7	63,2	84,4
CAHUASQUÍ	16	39,1	11,8	0,30	37	54		31,6	43,4	33,5	40,9	43,1	66,8	47,3	61,7				
IBARRA	36	35,1	8,9	0,25	34	47	63	31,3	36,9	32,2	35,9	42,1	52,5	43,7	50,5	53,5	74,2	56,6	70,1
OTAVALO	12	36,1	13,0	0,36	34	53		27,2	42,5	29,6	39,0	39,3	71,5	44,1	63,8				
SAN PABLO	10	41,0	7,5	0,18	40	51		35,1	45,5	36,9	43,3	42,8	60,8	45,8	56,8				
QUITO-Observ.	85	39,6	9,2	0,23	39	52	68	37,1	41,0	37,8	40,3	48,7	55,6	49,8	54,3	6,6	75,0	63,8	72,5
ISOBAMBA	11	36,2	7,9	0,22	35	47		30,3	40,5	32,0	38,3	38,5	57,4	41,6	53,2				
COTOPAXI	32	30,9	9,8	0,32	30	44	55	26,9	33,4	28,0	32,2	38,0	50,9	40,0	48,4	45,6	66,3	48,7	62,2
LATACUNGA	21	29,2	7,1	0,24	28	38	51	25,1	31,2	26,1	30,0	32,9	43,9	34,7	41,7	40,9	63,5	44,4	58,6
CUSUBAMBA	16	24,7	5,6	0,23	24	32		21,3	27,1	22,3	25,9	27,2	37,6	28,9	35,4				
ANGAMARCA	16	30,3	11,8	0,39	28	46		22,9	34,3	24,7	31,8	34,9	60,6	38,7	54,6				
PÍLLARO	16	32,1	10,2	0,32	31	45		26,2	36,6	27,9	34,4	36,0	56,2	29,1	51,7				
AMBATO	53	27,8	7,8	0,28	27	38	47	25,1	29,1	25,7	28,3	34,4	42,0	35,6	40,6	4,2	53,6	43,2	51,2
PATATE	30	31,5	7,8	0,25	30	42	55	27,4	32,7	28,3	31,8	37,3	47,3	38,9	45,4	46,3	65,3	49,2	61,5
TISALEO	23	26,1	8,7	0,26	25	35	46	22,4	27,9	23,3	26,8	30,2	40,6	31,8	38,5	37,2	57,0	40,1	52,7
BAÑOS	54	53,4	14,7	0,27	51	73	97	47,5	54,8	48,7	53,5	66,2	80,5	68,5	77,8	84,3	111,6	88,5	106,3
URBINA	16	29,7	8,4	0,28	29	41		25,0	33,7	26,7	31,9	33,4	50,3	36,1	46,6				
L. HERRERÍAS	13	28,9	8,3	0,29	28	40		23,6	33,2	25,2	31,1	31,8	50,4	34,7	46,2				
SAN SIMÓN	14	40,0	16,5	0,41	37	62		29,4	46,6	32,1	42,7	45,3	84,8	51,0	75,3				
RIOBAMBA	30	23,3	4,9	0,21	23	30	37	21,3	24,8	21,9	24,2	27,1	33,2	28,1	32,1	32,1	42,7	33,7	40,6
GUASLÁN	14	28,2	7,9	0,28	27	38		23,0	31,7	24,4	29,8	30,8	47,0	33,3	43,7				
CAÑAR	16	21,5	5,3	0,25	21	28		18,4	23,9	19,4	22,8	23,6	33,2	25,2	31,2				
CUENCA	24	38,1	6,8	0,18	38	47	57	35,3	40,9	36,2	39,8	42,5	51,9	44,1	50,1	49,3	65,9	52,0	62,5
STA. ISABEL	15	28,7	6,9	0,24	28	38		24,5	31,9	25,8	30,4	31,8	45,4	34,0	42,5				
ÑÑA	15	29,2	10,0	0,34	28	42		23,3	33,7	24,9	31,4	32,8	53,9	36,0	49,1				
LA TOMA	18	39,1	14,7	0,38	37	58	77	30,8	44,4	33,0	41,5	45,4	74,1	49,7	67,7	55,9	106,1	62,9	94,2
LOJA	38	36,1	11,2	0,31	35	51	64	31,8	38,5	32,9	37,3	44,8	58,1	46,8	55,5	54,0	75,8	57,3	71,5
MALACATUS	15	40,8	10,8	0,26	39	55		33,7	45,1	35,6	42,7	45,2	66,9	48,7	62,1				
PUTUMAYO	9	118,3	45,7	0,39	111	178		83,7	147,2	93,4	131,8	121,6	260,6	141,0	224,6				
PAPALLACTA	15	55,6	22,5	0,41	52	85		41,8	64,6	45,4	59,6	63,4	114,0	70,8	102,1				
LIMONCOCHA	10	110,6	28,7	0,26	110	148		89,6	130,4	97,5	122,5	120,5	175,5	131,1	164,9				
TIPUTINI	17	100,4	33,5	0,33	95	144		80,3	112,4	85,4	105,6	114,9	180,5	125,0	165,9				
TENA	12	107,0	19,9	0,19	106	133		93,3	118,7	98,2	113,8	115,9	150,1	122,4	143,6				
PASTAZA	15	118,6	37,0	0,31	113	167		95,9	133,1	102,0	125,2	134,1	208,0	145,5	191,6				
PUYO	13	111,4	24,4	0,22	109	144		95,5	124,4	100,4	118,3	120,4	172,2	128,9	160,9				
ZAMORA	11	55,7	14,7	0,26	55	75		45,1	64,9	48,9	61,1	61,7	88,3	66,8	83,2				

* Estaciones situadas en el límite de dos zonas

Cuadro 7 - Alturas pluviométricas diarias (mm)

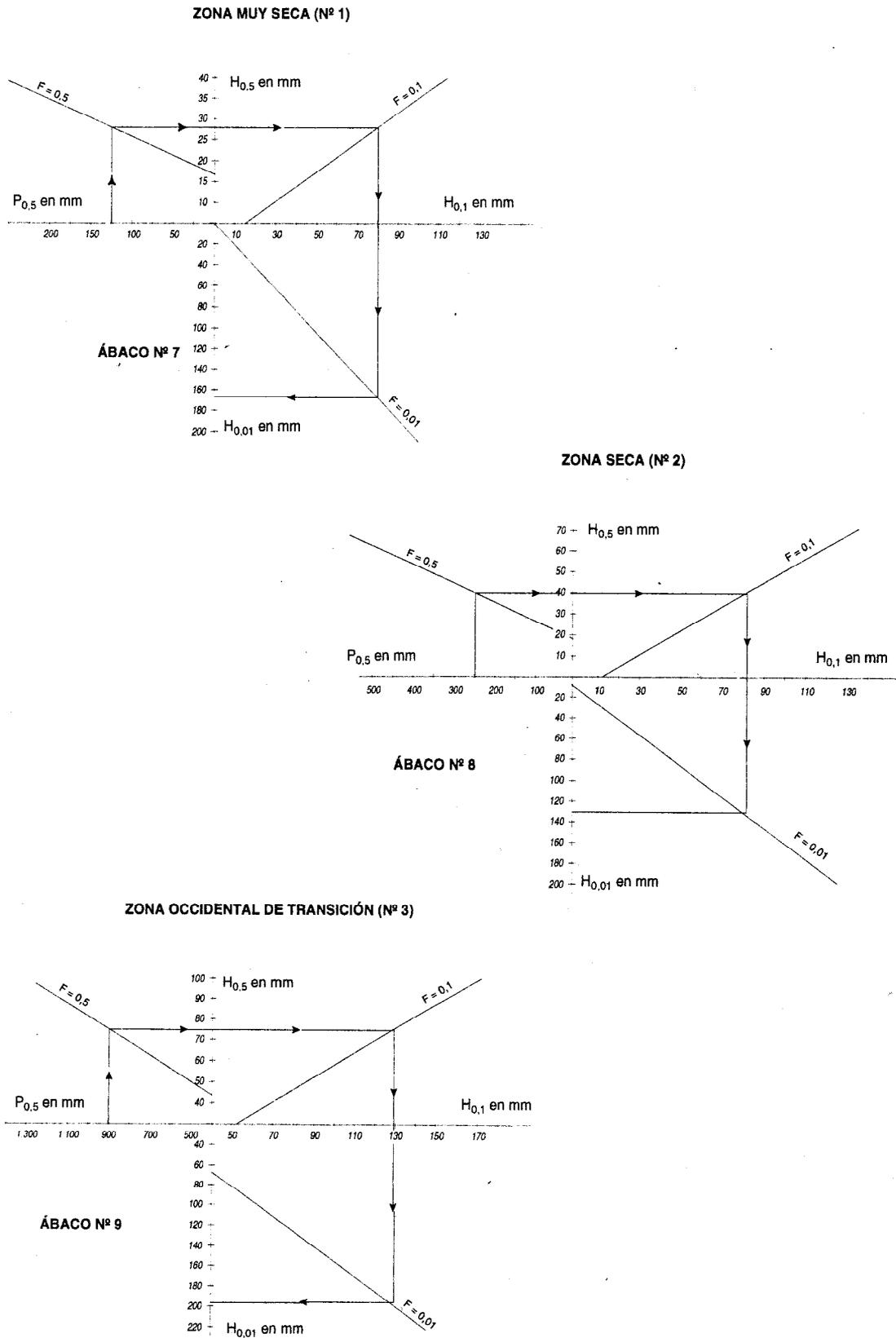


Fig. 6 - Alturas pluviométricas diarias (zonas nº 1, 2 y 3) — ábacos

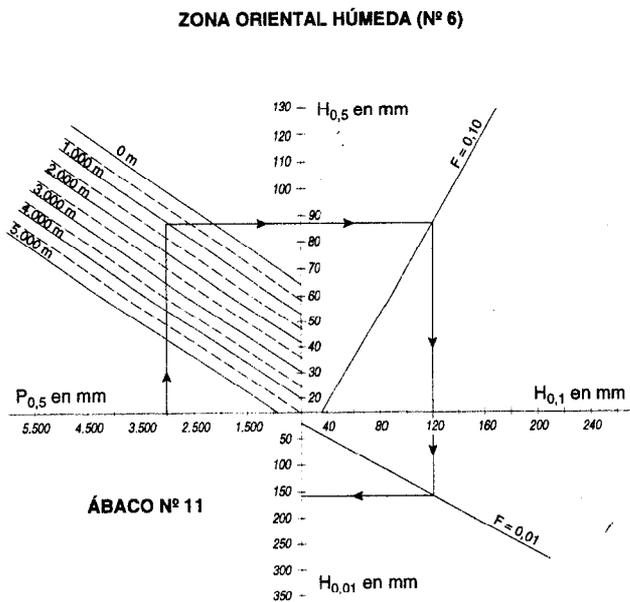
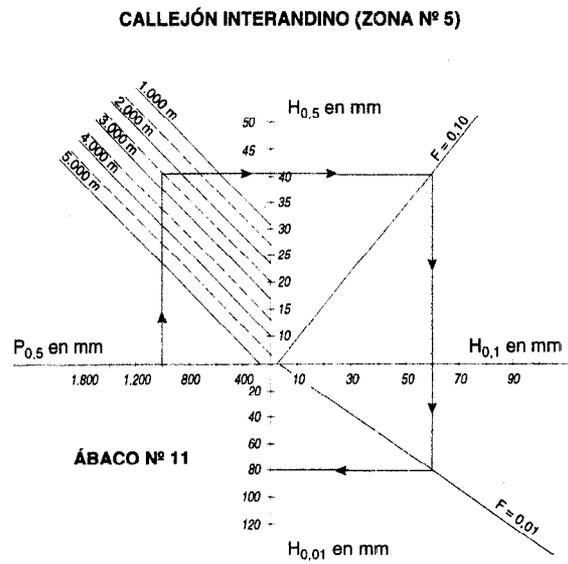
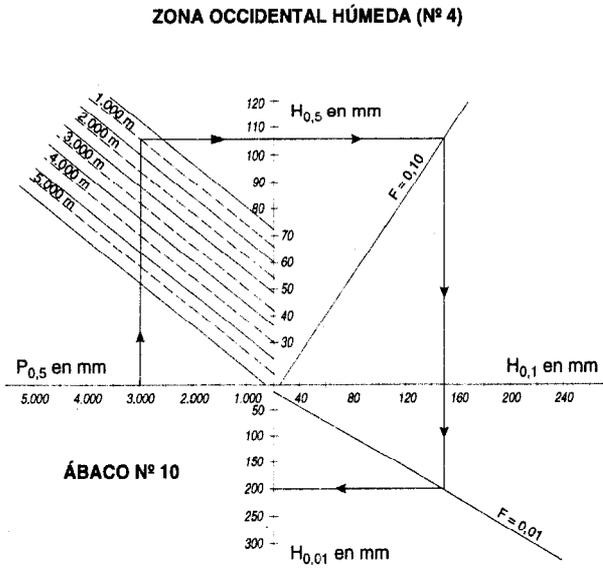


Fig. 7 - Alturas pluviométricas diarias (zonas nº 4, 5 y 6) — ábacos

Zona 4: $H_{0,5} = 0,016 P_{0,5} - 0,012 A + 64$

Zona 5: $H_{0,5} = 0,025 P_{0,5} - 0,007 A + 33$

Zona 6: $H_{0,5} = 0,014 P_{0,5} - 0,011 A + 57$

Se puede observar la similitud entre esta zona y la zona 4 húmeda occidental.

Una vez calculado $H_{0,5}$ utilizando las fórmulas anteriores y definido el parámetro de pendiente a (acápite 2.1), se pueden calcular fácilmente las alturas diarias máximas para cualquier frecuencia utilizando la fórmula extraída de la ley de Galton (ver igualmente el acápite 3.1):

$$H = 10 \left(\frac{u + a \log H_{0,5}}{a} \right)$$

Si se busca calcular únicamente las alturas relativas a las frecuencias decenales y centenales, se pueden aplicar también las relaciones presentadas a continuación, muy fáciles de utilizar:

Zona 1: $H_{0,1} = 2,80 H_{0,5}$

$H_{0,01} = 2,10 H_{0,1}$

Zona 2: $H_{0,1} = 1,745 H_{0,5} + 12$

$H_{0,01} = 1,49 H_{0,1} + 6$

Zona 3: $H_{0,1} = 1,71 H_{0,5}$

$H_{0,01} = 1,49 H_{0,1} + 6$

Zona 4: $H_{0,1} = 1,36 H_{0,5} + 4$

$H_{0,01} = 1,40 H_{0,1} - 10$

Zona 5: $H_{0,1} = 1,62 H_{0,5} - 6$

$H_{0,01} = 1,43 H_{0,1} - 3$

Zona 6: $H_{0,1} = 1,135 H_{0,5} + 20$

$H_{0,01} = 1,40 H_{0,1} - 10$

Los ábacos 7 a 12 permiten, a partir de la altura pluviométrica mediana anual a la que se agrega un factor correctivo de altitud para las zonas 4 a 6, estimar rápidamente, sin cálculo, las alturas pluviométricas diarias de frecuencia mediana, decenal o centenal.

Es particularmente interesante anotar que:

- se demuestra el papel de la altitud por las variaciones de las relaciones que vinculan las alturas pluviométricas anuales a los valores máximos diarios;
- los parámetros que caracterizan a la vez a las lluvias anuales y a las lluvias diarias siguen una misma tendencia cuando se pasa de una zona a otra.

3.3. Observaciones sobre la precisión de los resultados y la forma de las distribuciones

Todas las observaciones relativas a la precisión de los resultados presentadas en el acápite 2.5., son aplicables igualmente a las lluvias diarias.

Es raro obtener un buen ajuste con la ley normal y no se pueden utilizar sino fórmulas derivadas de la ley de Galton. En conjunto, todas las distribuciones son hipernormales y las zonas litorales se caracterizan por distorsiones más acusadas.

Ciertas estaciones parecen además presentar distribuciones plurimodales particularmente en las regiones secas en donde la variabilidad es importante. Se decidió sin embargo no tenerlas en cuenta pues esa característica no es sistemática en las estaciones de una misma zona; se la puede interpretar como proveniente de la existencia de dos categorías distintas de lluvia, correspondiendo las que son inferiores a un cierto umbral, a un tipo de aguacero diferente al de las lluvias superiores a ese umbral.

4. INTENSIDADES PLUVIOMÉTRICAS

En el Ecuador, en donde las pendientes del medio natural andino alcanzan valores elevados y la importante ocupación de los suelos está asociada a menudo a prácticas agrarias tradicionales particularmente inadaptadas, la erosión hídrica constituye una de las principales limitaciones a la valorización agrícola puesto que la degradación específica puede alcanzar 600 toneladas/ha/año en parcelas cultivadas con maíz, de 50 m² de superficie y de pendiente del 30 por ciento. Se comprende entonces el interés que reviste una estimación aceptable de las intensidades máximas cuyas implicaciones directas en los fenómenos erosivos son bien conocidas.

4.1. Método empleado

Se utilizaron 24 estaciones equipadas con registradores. Desgraciadamente, el puesto de Guayaquil debió excluirse pues la serie es de calidad extremadamente dudosa aunque de larga duración. Por otro lado, la falta de estaciones representativas con series de duración suficiente no permitió desarrollar el estudio en las zonas más secas, 1 y 2.

El estudio sigue la misma lógica metodológica utilizada para las lluvias anuales y diarias. En la gran mayoría de los casos, el mejor ajuste de las intensidades está dado por las leyes de Galton y Pearson III; dada la mayor facilidad de cálculo del parámetro de posición X_0 , se utilizó sistemáticamente la segunda.

El análisis estadístico trata de las intensidades máximas I , expresadas en mm/h, relativas a períodos de 5, 10, 15, 20, 30, 60 minutos y 24 horas. En los cuadros 8-1 a 8-8 se presentan, para las estaciones más representativas de las cuatro zonas homogéneas estudiadas, las intensidades I y las alturas de lluvia h de intervalos de tiempo t que varían de 5 minutos a 24 horas, para las frecuencias $F = 0,5, 0,1, 0,02$ y $0,01$ (es decir los períodos de retorno $T = 2, 10, 50$ y 100 años).

Para cada una de las estaciones, se trazaron luego dos gráficos en coordenadas logarítmicas:

- para cada intervalo de tiempo t , la intensidad I en función del período de retorno T ;
- para cada período de retorno T , la intensidad I en función del intervalo de tiempo t .

Se debe señalar que fue necesario verificar que los intervalos de tiempo escogidos dieran la precisión suficiente como para estudiar la relación $I = \Phi(t)$. Este trabajo se realizó en la estación de Quito-Observatorio (51 años de registros de buena calidad) para duraciones de 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 minutos y 1, 2, 6, 12 y 24 horas. En el gráfico 13 (figura 8), se puede constatar que, sea cual sea el intervalo, la relación $I = f(T)$ puede considerarse como lineal aunque con una discontinuidad para el período de retorno de 10 años. Las ecuaciones que corresponden a los dos grupos de rectas así definidas son de forma:

$$\log I = \log I_1 + \alpha \log T \text{ es decir } I = I_1 \cdot T^\alpha$$

en donde I_1 es el valor de I para $T = 1$ año.

Para cada valor de t escogido, con $T = 1$ año y $T = 10$ años:

$$\alpha = \log(I_{10}/I_1)$$

De la misma manera, las curvas de intensidad-duración en función de los períodos de retorno pueden asimilarse a haces de rectas (gráfico 14, figura 8). Allí también se observa una discontinuidad situada hacia $t = 1$ hora pero que puede variar entre 45 y 90 minutos. A veces, puede aparecer una segunda discontinuidad en las inmediaciones de $t = 15$ ó 20 minutos; es el caso en Puyo y Tiputini en la cuenca amazónica, Tulcán y Quito en la región andina y Milagro en la zona litoral. No se ha encontrado explicación satisfactoria alguna para este fenómeno.

Cada recta puede definirse mediante la siguiente ecuación:

$$\log I = \log I_2 + a \log t \text{ es decir } I = I_2 \cdot t^a$$

Tomando la intensidad I_0 que corresponde a $t = 1$ hora y $T = 1$ año (logaritmos nulos), se tiene:

$$I = I_0 \cdot t^a \cdot T^\alpha$$

Para el cálculo de los parámetros de las rectas, una vez definido $I = I(t, T)$, se siguió el método indicado por J. Guiscafré y F. Moniod (*Cahiers ORSTOM*, serie Hidrología, 1975):

$$I = I_0 \cdot t^a \cdot T^{b+c \log t} \quad (1)$$

Una estimación gráfica realizada a partir de las curvas $I = f(T)$ permite determinar los valores de las constantes de las porciones de recta (generalmente en número de dos salvo para las cinco estaciones ya citadas) para intervalos de tiempo superiores o inferiores a una hora y períodos de retorno superiores o inferiores a 10 años. Válidos para las fórmulas en donde t está expresado en horas y T en años, tales resultados están reunidos en el cuadro 9.

Se observará que en ciertos casos, como el de Quito, las rectas $I = \Phi(t)$ son paralelas sea cual sea el valor de T . Se tiene entonces la ecuación simplificada:

$$I = I_0 \cdot t^a \cdot T^b \quad (2)$$

Nótese también que el cambio de pendiente de la relación $I = \Phi(t)$ no es un fenómeno específico al Ecuador, que ya se ha observado en lugares en donde los regímenes climáticos son muy diferentes: Antillas, Africa del Norte, Brasil, e incluso en Europa.

Se debe anotar también que partiendo de las fórmulas (1) y (2), se pueden estimar las alturas pluviométricas h durante un intervalo t y un período de retorno T dado:

$$h = I_0 \cdot t^{(a+1)} \cdot T^{(b+c \log t)} \quad (3)$$

y cuando $c = 0$, $h = I_0 \cdot t^{(a+1)} \cdot T^b \quad (4)$

Todas las relaciones que unen a las intensidades máximas y las alturas pluviométricas diarias se establecen utilizando la fórmula general (1). Empleando el índice i para todos los parámetros de las fórmulas que permiten el cálculo de I para $t \geq 1$ horas y el índice j cuando $t < 1$ hora, y si H es la altura pluviométrica diaria correspondiente al período de retorno T , se tiene:

- si $t \geq 1$ hora: $I_{24} = I_{(0,i)} \cdot 24^{ai} \cdot T^{(bi+ci \log 24)}$
y $H = I_{(0,i)} \cdot 24^{(ai+1)} \cdot T^{(bi+ci \log 24)}$
es decir, cuando $c = 0$, $I = 24^{-(ai+1)} \cdot t^{ai} \cdot H$

- si $t < 1$ hora:
 $I = I_{(0,j)} \cdot t^{aj} [H / (I_{(0,i)} \cdot 24^{(ai+1)})]^{(bj+ci \log t) / (bi+ci)}$
es decir, cuando $c = 0$,
 $I_{(0,j)} \cdot t^{aj} [H / I_{(0,i)} \cdot 24^{(ai+1)}]^{(bj/bi)}$

En el caso general, cuando $c \neq 0$, la fórmula es compleja:

$$I = I_{(0,j)} \cdot t^a \cdot [H / I_{(0,i)}]^{(m+p \log t)} \cdot 24^{(q+r \log t)}$$

Para $t \geq 1$ hora: $I_{(0,j)} = I_{(0,i)}$
 $m = bi / (bi + ci \log 24)$
 $p = ci / (bi + ci \log 24)$
 $q = -m(a+1)$
 $r = -p(a+1)$

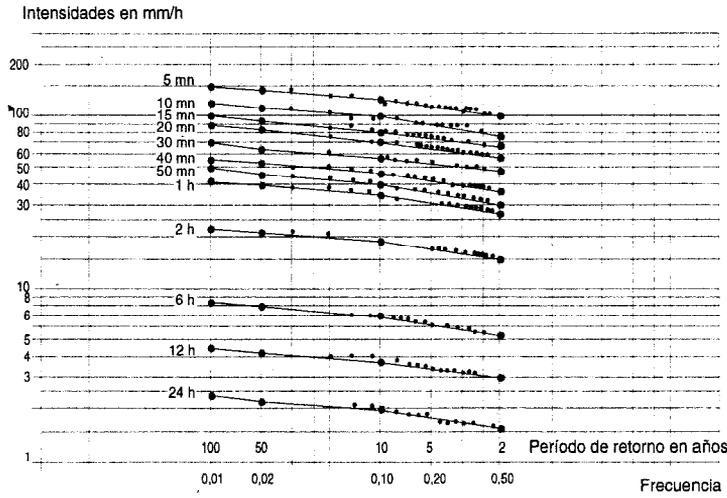
Para $t < 1$ hora: $I(0,j) \neq I(0,i)$
 $m = bj / (bi + ci \log 24)$
 $p = cj / (bi + ci \log 24)$
 $q = -m(a+1)$
 $r = -p(a+1)$

Sin embargo, la gran desproporción existente entre la complejidad del cálculo de las constantes, por una parte, y el reducido número de muestras observadas disponibles en cada una de las zonas pluviométricas, por otra, justifica la utilización de dos hipótesis simplificadoras. Estas consisten en considerar, primeramente que la relación $I = \Phi(t)$ no está formada sino de dos semi-rectas comunes al punto $t = 1$ hora, y en segundo término, que el parámetro c es nulo. Se llega entonces a fórmulas del tipo:

$$I = K \cdot t^a \cdot H^n \quad (5)$$

Para $t \geq 1$ hora:	Para $t < 1$ hora:
$a = ai$	$a = aj$
$n = 1$	$n = bj / bi$
$K = 24^{-(ai+1)}$	$K = I_{(0,j)} [I_{(0,i)} \cdot 24^{(ai+1)}]^{(bj/bi)}$

Todos estos parámetros pueden calcularse a partir de las constantes del cuadro 9.



QUITO OBSERVATORIO
CURVAS: ALTURA - FRECUENCIA
(51 años de observaciones)

Gráfico nº 13

QUITO OBSERVATORIO
ALTURA - DURACIÓN - FRECUENCIA
(51 años de observaciones)

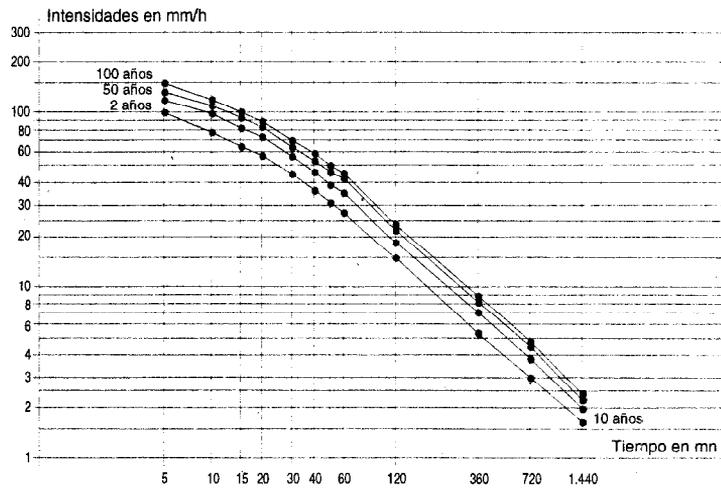
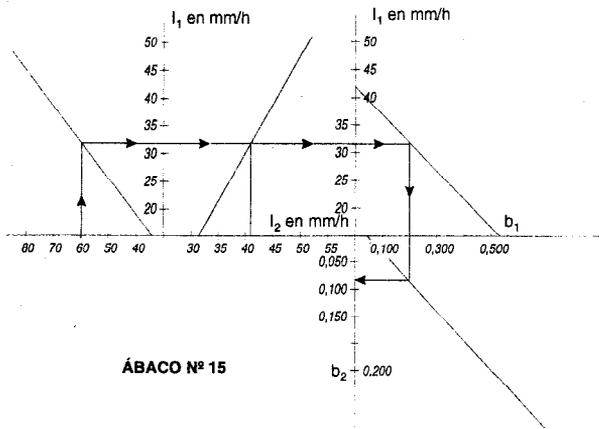


Gráfico nº 14



ÁBACO Nº 15

ZONA OCCIDENTAL DE TRANSICIÓN (Nº 3)
ESTIMACIÓN DE LAS CONSTANTES DE LAS
FÓRMULAS QUE PERMITEN EL CÁLCULO
DE LAS INTENSIDADES

- $a_1 = -0.410$
- $a_2 = -0.800$
- $i_3 = i_1$
- $i_4 = i_2$
- $b_3 = b_1$
- $b_4 = b_2$

Fig. 8

Estación pluviográfica San Lorenzo

años de observación: 12

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	127,8	10,7	184,2	15,4	231,2	19,3	250,5	20,9
10 min.	91,0	15,2	141,7	23,6	179,8	30,0	194,7	32,5
15 min.	79,6	19,9	127,1	31,8	163,1	40,8	177,3	44,3
20 min.	71,1	23,7	113,0	37,7	144,7	48,2	157,2	52,4
30 min.	58,8	29,4	94,1	47,1	120,9	60,5	131,5	65,8
60 min.	43,4	43,4	71,4	71,4	93,1	93,1	101,7	101,7
120 min.	30,0	60,0	57,1	114,2	80,1	160,2	89,5	179,0
24 horas	4,97	119,3	6,76	162,2	8,02	192,5	8,50	204,0

Estación pluviográfica Puerto Ila

años de observación: 14

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	113,1	9,4	151,4	12,6	178,2	14,9	188,4	15,7
10 min.	92,5	15,4	129,7	21,6	156,3	26,1	166,6	27,8
15 min.	81,6	20,4	118,0	29,5	144,4	36,1	154,6	38,7
20 min.	74,3	24,8	104,3	34,8	125,8	41,9	134,0	44,7
30 min.	64,2	32,1	88,6	44,3	106,0	53,0	112,7	56,4
60 min.	44,8	44,8	69,0	69,0	88,4	88,4	96,2	96,2
120 min.	34,0	68,0	51,8	103,6	65,2	130,4	70,4	140,8
24 horas	4,34	104,2	5,67	136,1	6,59	158,2	6,94	166,6

Estación pluviográfica Pichilingue

años de observación: 15

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	105,8	8,8	148,2	12,4	180,8	15,1	193,6	16,1
10 min.	90,4	15,1	123,5	20,6	146,9	24,5	155,8	26,0
15 min.	82,1	20,5	108,8	27,2	127,5	31,9	134,5	33,6
20 min.	77,0	25,7	103,8	34,6	122,7	40,9	129,8	43,3
30 min.	70,7	35,4	91,2	45,6	105,3	52,7	110,6	55,3
60 min.	55,5	55,5	73,6	73,6	86,1	86,1	90,9	90,9
120 min.	38,2	76,4	51,30	102,6	60,4	120,8	63,8	127,6
24 horas	4,90	117,6	6,35	152,4	7,35	176,5	7,73	185,5

Cuadro 8 - 1

Estación pluviográfica Portoviejo

años de observación: 18

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	94,6	7,9	149,7	12,5	191,5	16,0	207,9	17,3
10 min.	67,5	11,3	116,5	19,4	155,6	25,9	171,3	26,6
15 min.	58,9	14,7	100,3	25,1	132,7	33,2	145,6	36,4
20 min.	52,3	17,4	90,6	30,2	120,8	40,3	132,9	44,3
30 min.	42,1	21,1	73,2	36,6	97,7	48,9	107,6	53,8
60 min.	28,1	28,1	47,8	47,8	63,2	63,2	69,3	69,3
120 min.	18,2	36,4	32,4	64,8	43,7	87,4	48,3	96,6
24 horas	2,17	52,1	3,63	87,1	4,77	114,5	5,28	125,5

Estación pluviográfica Pasaje

años de observación: 14

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	92,6	7,7	121,2	10,1	141,0	11,8	148,4	12,4
10 min.	65,8	11,0	90,1	15,0	107,2	17,9	113,8	19,0
15 min.	55,0	13,8	81,0	20,3	100,0	25,0	107,4	26,9
20 min.	49,8	16,6	76,2	25,4	95,8	31,9	103,5	34,5
30 min.	41,7	20,9	68,0	34,0	88,4	44,2	96,3	48,2
60 min.	33,2	33,2	51,8	51,8	65,8	65,8	71,3	71,3
120 min.	20,3	40,6	29,1	58,2	35,4	70,8	37,8	75,6
24 horas	2,50	60,0	4,14	99,4	5,39	129,4	5,90	141,6

Estación pluviográfica La Naranja

años de observación: 14

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	119,8	10,0	163,1	13,6	193,7	16,1	205,3	17,1
10 min.	92,8	15,5	120,6	20,1	139,8	23,3	147,1	24,5
15 min.	81,9	20,5	101,5	25,4	114,6	28,7	119,5	29,9
20 min.	73,5	24,5	93,6	31,2	107,4	35,8	112,5	37,5
30 min.	63,8	31,9	82,2	41,1	94,8	47,4	99,5	49,8
60 min.	42,6	42,6	55,9	55,9	65,0	65,0	68,5	68,5
120 min.	25,2	50,4	33,2	66,4	38,9	77,8	41,1	82,2
24 horas	2,48	59,5	3,38	81,1	4,01	96,2	4,25	102,0

Cuadro 8 - 2

Estación pluviográfica Isabel María

años de observación: 17

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	123,2	10,3	168,2	14,0	200,0	16,7	212,1	17,7
10 min.	98,7	16,5	133,3	22,2	157,6	26,3	166,8	27,8
15 min.	89,1	22,3	121,3	30,3	144,0	36,0	152,5	38,1
20 min.	78,2	26,1	110,5	36,8	135,5	45,2	145,5	48,5
30 min.	65,3	32,7	96,4	48,2	120,8	60,4	130,6	65,3
60 min.	47,3	47,3	73,3	73,3	97,3	97,3	107,5	107,5
120 min.	30,9	61,8	50,9	101,8	66,4	132,8	72,5	145,0
24 horas	4,58	109,9	6,96	167,0	8,79	211,0	9,51	228,2

Estación pluviográfica Milagro

años de observación: 15

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	125,5	10,5	158,2	13,2	180,4	15,0	188,7	15,7
10 min.	100,5	16,8	139,9	23,3	168,2	28,0	179,0	29,8
15 min.	82,2	20,6	124,4	31,1	158,7	39,7	172,6	43,2
20 min.	75,3	25,1	107,6	35,9	131,0	43,7	140,0	46,7
30 min.	61,5	30,8	93,4	46,7	119,2	59,6	129,6	64,8
60 min.	44,5	44,5	61,9	61,9	74,6	74,6	79,5	79,5
120 min.	27,5	55,0	42,0	84,0	54,2	108,4	59,2	118,4
24 horas	3,77	90,5	5,29	127,0	6,41	153,8	6,85	164,4

Estación pluviográfica Santo Domingo de los Colorados

años de observación: 12

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	121,5	10,1	168,5	14,0	201,9	16,8	214,7	17,9
10 min.	98,7	16,5	140,2	23,4	170,0	28,3	181,4	30,2
15 min.	87,0	21,8	120,9	30,2	145,1	36,3	154,4	38,6
20 min.	85,2	28,4	119,5	39,8	144,0	48,0	153,4	51,1
30 min.	77,9	39,0	114,4	57,2	141,1	70,6	151,4	75,7
60 min.	57,8	57,8	86,4	86,4	107,5	107,5	115,7	115,7
120 min.	36,9	73,8	51,9	103,8	62,6	125,2	66,7	133,4
24 horas	4,74	113,8	6,66	159,8	8,04	193,0	8,56	205,4

Cuadro 8 - 3

Estación pluviográfica Tulcán

años de observación: 16

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	85,1	7,1	119,6	10,0	144,2	12,0	153,7	12,8
10 min.	66,4	11,1	102,0	17,0	128,6	21,4	139,0	23,2
15 min.	57,2	14,3	92,8	23,2	120,1	30,0	130,9	32,7
20 min.	50,2	16,7	81,0	27,0	103,9	34,6	112,8	37,6
30 min.	39,7	19,9	67,7	33,9	90,8	45,4	100,1	50,1
60 min.	25,1	25,1	41,0	41,0	53,2	53,2	58,0	58,0
120 min.	15,8	31,6	25,4	50,8	32,6	65,2	35,5	71,0
24 horas	1,71	41,0	2,52	60,5	3,12	74,9	3,35	80,4

Estación pluviográfica Ibarra

años de observación: 20

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	73,9	6,2	104,3	8,7	125,7	10,5	133,8	11,2
10 min.	48,1	8,0	67,3	11,2	80,9	13,5	86,2	14,4
15 min.	39,2	9,8	55,6	13,9	67,4	16,9	72,0	18,0
20 min.	33,0	11,0	47,4	15,8	57,9	19,3	61,9	20,6
30 min.	26,6	13,3	36,0	18,0	42,7	21,4	45,3	22,7
60 min.	16,8	16,8	22,3	22,3	26,1	26,1	27,5	27,5
120 min.	10,2	20,4	13,8	27,6	16,4	32,8	17,3	34,6
24 horas	1,40	33,6	1,95	46,8	2,42	58,1	2,60	62,4

Estación pluviográfica Lago San Pablo

años de observación: 10

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	80,4	6,7	110,0	9,2	130,5	10,9	138,3	11,5
10 min.	56,4	9,4	73,4	12,2	84,9	14,2	89,2	14,9
15 min.	45,9	11,5	62,4	15,6	73,9	18,5	78,3	19,6
20 min.	41,5	13,8	55,7	18,6	65,6	21,9	69,4	23,1
30 min.	32,6	16,3	44,4	22,2	52,6	26,3	55,8	27,9
60 min.	20,9	20,9	28,4	28,4	33,7	33,7	35,7	35,7
120 min.	13,0	26,0	19,5	39,0	23,9	47,8	25,6	51,2
24 horas	1,69	40,6	2,10	50,4	2,37	56,9	2,47	59,3

Cuadro 8 - 4

Estación pluviográfica Isobamba

años de observación: 16

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	105,5	8,8	122,6	10,2	133,7	11,1	137,8	11,5
10 min.	65,0	10,8	79,3	13,2	88,9	14,8	92,4	15,4
15 min.	54,4	13,6	68,8	17,2	78,6	19,7	82,3	20,6
20 min.	48,3	16,1	61,1	20,4	69,8	23,3	73,1	24,4
30 min.	39,9	20,0	51,4	25,7	59,3	29,7	62,3	31,2
60 min.	25,1	25,1	34,4	34,4	40,9	40,9	43,5	43,5
120 min.	14,7	29,4	20,2	40,4	24,0	48,0	25,5	51,0
24 horas	1,49	35,8	1,89	45,4	2,17	52,1	2,28	54,7

Estación pluviográfica Latacunga

años de observación: 20

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	71,8	6,0	110,5	9,2	139,4	11,6	150,7	12,6
10 min.	57,8	9,6	81,2	13,5	98,1	16,4	104,5	17,4
15 min.	49,3	12,3	70,8	17,7	86,3	21,6	92,3	23,1
20 min.	41,5	13,8	61,6	20,5	76,4	25,5	82,1	27,4
30 min.	32,0	16,0	49,2	24,6	61,5	30,8	66,3	33,2
60 min.	19,1	19,1	32,1	32,1	40,3	40,3	43,9	43,9
120 min.	10,5	21,0	16,4	32,8	20,8	41,6	22,5	45,0
24 horas	1,20	28,8	1,58	37,9	1,83	43,9	1,93	46,3

Estación pluviográfica Quito - Observatorio

años de observación: 51

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	100,0	8,3	126,9	10,6	143,9	12,0	150,1	12,5
10 min.	76,0	12,7	99,7	16,6	116,0	19,3	122,1	20,4
15 min.	65,0	16,3	83,7	20,9*	96,1	24,0	100,6	25,2
20 min.	57,6	19,2	74,9	25,0	86,6	28,9	91,0	30,3
30 min.	46,3	23,2	58,5	29,3	66,4	33,2	69,2	34,6
40 min.	37,4	24,9	47,4	31,6	54,1	36,1	56,5	37,7
50 min.	31,4	26,2	40,9	34,1	47,6	39,7	50,1	41,8
1 hora	27,4	27,4	35,1	35,1	40,3	40,3	42,3	42,3
2 horas	14,9	29,8	18,9	37,8	21,5	43,0	22,5	45,0
6 horas	5,48	32,9	6,96	41,8	8,03	48,2	8,45	50,7
12 horas	2,99	35,9	3,76	45,1	4,31	51,7	4,52	54,2
24 horas	1,55	37,2	1,98	47,5	2,29	55,0	2,41	57,8

Cuadro 8 - 5

Estación pluviográfica Ambato

años de observación: 14

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	35,1	2,9	70,1	5,8	101,9	8,5	115,4	9,6
10 min.	29,4	4,9	53,8	9,0	75,3	12,3	81,5	13,6
15 min.	23,9	6,0	42,4	10,6	57,0	14,3	63,0	15,8
20 min.	20,7	6,9	35,1	11,7	46,4	15,5	50,9	17,0
30 min.	15,7	7,9	26,2	13,1	34,4	17,2	37,6	18,8
60 min.	11,1	11,1	17,0	17,0	21,4	21,4	23,1	23,1
120 min.	7,1	14,2	10,3	26,0	12,7	25,4	13,6	27,2
24 horas	1,13	27,1	1,59	38,2	1,92	46,1	2,04	49,0

Estación pluviográfica Riobamba

años de observación: 14

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	60,0	5,0	96,6	80,1	125,1	10,4	136,4	11,4
10 min.	43,0	7,2	61,0	10,2	73,9	12,3	78,9	13,2
15 min.	33,4	8,4	50,4	12,6	63,9	16,0	69,3	17,3
20 min.	28,0	9,3	41,8	13,9	52,1	17,4	56,0	18,7
30 min.	21,0	10,5	30,7	15,4	37,9	19,0	40,8	20,4
60 min.	12,9	12,9	17,8	17,8	21,4	21,4	22,8	22,8
120 min.	7,9	15,8	10,2	20,4	11,9	23,8	12,6	25,2
24 horas	0,95	22,8	1,24	29,8	1,45	34,8	1,52	36,5

Estación pluviográfica Baños

años de observación: 16

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	35,4	3,0	49,6	4,1	59,8	5,0	63,7	5,3
10 min.	24,6	4,1	36,2	6,0	45,4	7,6	49,0	8,2
15 min.	21,1	5,3	30,4	7,6	37,8	9,5	40,7	10,2
20 min.	19,1	6,4	26,3	8,8	31,4	10,5	33,3	11,1
30 min.	15,4	7,7	20,9	10,5	24,7	12,4	26,2	13,1
60 min.	11,1	11,1	16,0	16,0	19,9	19,9	21,5	21,5
120 min.	8,5	17,0	12,4	24,8	15,4	30,8	16,6	33,2
24 horas	2,17	52,1	3,01	72,2	3,60	86,4	3,83	91,9

Cuadro 8 - 6

Estación pluviográfica Cañar

años de observación: 20

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	40,0	3,3	78,8	6,6	111,5	9,3	124,9	10,4
10 min.	29,3	4,9	58,3	9,7	83,7	14,0	94,3	15,7
15 min.	23,7	5,9	44,9	11,2	63,5	15,9	71,3	17,8
20 min.	20,7	6,9	38,3	12,8	53,5	17,8	59,8	19,9
30 min.	16,8	8,4	28,3	14,2	37,2	18,6	40,7	20,4
60 min.	10,0	10,0	16,7	16,7	22,4	22,4	24,7	24,7
120 min.	6,4	12,8	9,7	19,4	12,1	24,2	13,0	26,0
24 horas	0,88	21,1	1,18	28,3	1,39	33,4	1,47	35,3

Estación pluviográfica Cuenca

años de observación: 13

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	94,6	7,9	128,4	10,7	152,1	12,7	161,2	13,4
10 min.	69,6	11,6	97,8	16,3	118,0	19,7	125,8	21,0
15 min.	55,7	13,9	76,5	19,1	91,2	22,8	96,8	24,2
20 min.	47,6	15,9	66,7	22,2	80,3	26,8	85,5	28,5
30 min.	35,5	17,8	50,2	25,1	60,8	30,4	64,8	32,4
60 min.	22,4	22,4	31,9	31,9	38,9	38,9	41,6	41,6
120 min.	12,6	25,2	17,8	35,6	21,5	43,0	23,0	46,0
24 horas	1,57	37,7	1,96	47,0	2,24	53,8	2,34	56,2

Estación pluviográfica Santa Isabel

años de observación: 14

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	51,4	4,3	93,1	7,8	127,0	10,6	140,7	11,7
10 min.	36,9	6,2	62,5	10,4	82,6	13,8	90,5	15,1
15 min.	29,0	7,3	46,1	11,5	59,1	14,8	64,2	16,1
20 min.	24,6	8,2	37,0	12,3	46,2	15,4	49,8	16,6
30 min.	19,0	9,5	29,2	14,6	37,3	18,7	40,5	20,3
60 min.	12,0	12,0	18,5	18,5	23,4	23,4	25,3	25,3
120 min.	8,3	16,6	11,6	23,2	14,0	28,0	15,0	30,0
24 horas	1,16	27,8	1,58	37,9	1,90	45,6	2,02	48,5

Cuadro 8 - 7

Estación pluviográfica Loja en Argelia

años de observación: 10

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	75,5	6,3	106,8	8,9	129,2	10,8	137,8	11,5
10 min.	47,6	7,9	64,8	10,8	77,0	12,8	81,6	13,6
15 min.	37,8	9,5	51,0	12,8	60,3	15,1	63,8	16,0
20 min.	32,8	10,9	44,3	14,8	52,3	17,4	55,4	18,5
30 min.	26,3	13,2	34,8	17,4	41,1	20,6	43,5	21,8
60 min.	18,6	18,6	26,2	26,2	32,0	32,0	34,3	34,3
120 min.	11,5	23,0	15,6	31,2	18,5	37,0	19,7	39,4
24 horas	1,45	34,8	2,12	50,9	2,60	62,4	2,79	67,0

Estación pluviográfica Tiputini

años de observación: 14

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	146,0	12,2	188,3	15,7	217,0	18,1	227,7	19,0
10 min.	118,4	19,7	155,7	26,0	181,5	30,3	191,3	31,9
15 min.	106,1	26,5	136,0	34,0	155,6	38,9	162,8	40,7
20 min.	93,7	31,2	116,3	38,8	131,5	43,8	137,2	45,7
30 min.	77,1	38,6	100,5	50,3	116,3	58,2	122,2	61,1
60 min.	50,1	50,1	67,7	67,7	79,8	79,8	84,4	84,4
120 min.	29,7	59,4	41,0	82,0	49,0	98,0	52,1	104,2
24 horas	3,90	93,6	6,04	145,0	7,91	189,8	8,69	208,6

Estación pluviográfica Puyo

años de observación: 12

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	136,9	11,4	183,6	15,3	219,3	18,3	233,5	19,5
10 min.	111,7	18,6	133,4	22,2	147,7	24,6	153,0	25,5
15 min.	100,8	25,2	126,5	31,6	144,0	36,0	150,5	37,6
20 min.	89,2	29,7	113,9	38,0	130,7	43,6	137,0	45,7
30 min.	72,7	36,4	90,5	45,3	102,5	51,3	107,0	53,5
60 min.	50,9	50,9	63,6	63,6	72,1	72,1	75,3	75,3
120 min.	32,2	64,4	41,0	82,0	47,0	94,0	49,2	98,4
24 horas	4,57	109,7	5,99	143,8	6,97	167,3	7,35	176,4

Cuadro 8 - 8

4.2. Síntesis de los resultados del estudio de las intensidades

El método expuesto en el acápite anterior permite presentar, a nivel regional, reglas de estimación relativamente simples, puesto que, para el cálculo de los diferentes parámetros que entran en la fórmula (5), la única variable utilizada es la pluviometría diaria de frecuencia mediana $H_{0,5}$.

A continuación se presenta una definición de los parámetros e índices utilizados:

I_1 es el valor de I_0 , es decir $I_{(0,t)}$ para $t < 1$ hora y $0,1 \leq F < 1$

I_2 es el valor de I_0 , es decir $I_{(0,t)}$ para $t < 1$ hora y $0,01 \leq F < 0,1$

I_3 es el valor de I_0 , es decir $I_{(0,t)}$ para $t \geq 1$ hora y $0,1 \leq F < 1$

I_4 es el valor de I_0 , es decir $I_{(0,t)}$ para $t \geq 1$ hora y $0,01 \leq F < 0,1$

a_1 es el exponente de t para $t < 1$ hora

a_2 es el exponente de t para $t \geq 1$ hora

b_1 es el exponente de T para $t < 1$ hora y $0,1 \leq F < 1$

b_2 es el exponente de T para $t < 1$ hora y $0,01 \leq F < 0,1$

b_3 es el exponente de T para $t \geq 1$ hora y $0,1 \leq F < 1$

b_4 es el exponente de T para $t \geq 1$ hora y $0,01 \leq F < 0,1$

Zonas 1 y 2: no es posible estimación alguna.

Zona 3: zona occidental de transición

- para $t < 1$ hora: $I_1 = 0,64 H_{0,5} - 7$

$$I_2 = 0,59 I_1 + 22$$

es decir: $a_1 = -0,410$

$$b_1 = -0,020 I_1 + 0,823$$

$$b_2 = 0,585 b_1 - 0,027$$

- para $t \geq 1$ hora: $I_3 = I_1$

$$I_4 = I_2$$

es decir $a_2 = 0,800$

$$b_3 = b_1$$

$$b_4 = b_2$$

Zona 4: zona húmeda occidental

- para $t < 1$ hora: $I_1 = 0,74 H_{0,5} - 32$

$$I_2 = 1,13 I_1 + 5$$

es decir: $a_1 = 0,0091 I_1 - 0,738$

$$b_1 = 0,0034 I_1 + 0,373$$

$$b_2 = 0,328 b_1 + 0,046$$

- para $t \geq 1$ hora: $I_3 = 0,72 H_{0,5} - 29$

$$I_4 = 0,87 I_3 + 20$$

es decir: $a_2 = -0,0027 I_3 - 0,657$

$$b_3 = -0,0039 I_3 + 0,428$$

$$b_4 = 0,246 b_3 + 0,072$$

Zona 5: callejón interandino

- para $t < 1$ hora: $I_1 = 0,61 H_{0,5} - 3$

$$I_2 = I_1 + 4$$

es decir: $a_1 = 0,0085 I_1 - 0,726$

$$b_1 = -0,005 I_1 + 0,281$$

$$b_2 = 0,508 b_1 + 0,001$$

- para $t \geq 1$ hora: $I_3 = 0,695 H_{0,5} - 6$

$$I_4 = 1,21 I_3 + 1$$

es decir: $a_2 = -0,009 I_3 - 0,673$

$$b_3 = -0,006 I_3 + 0,310$$

$$b_4 = 0,440 b_3 + 0,017$$

Zona 6: zona húmeda oriental

Se debió tener en cuenta la discontinuidad de la relación $I = \Phi(t)$ para $t = 15$ minutos.

- para $t < 15$ minutos: $I'_1 = 0,66 H_{0,5}$
 $I'_2 = I'_1 + 7$

con $a'_1 = -0,250$

$$b'_1 = 0,105$$

$$b'_2 = 0,060$$

- para $15 \text{ minutos} \leq t < 1$ hora: $I_1 = 0,50 H_{0,5}$

$$I_2 = I_1 + 7$$

con $a_1 = -0,490$

$$b_1 = 0,110$$

$$b_2 = 0,055$$

- para $t \geq 1$ hora: $I_3 = 0,47 H_{0,5}$

$$I_4 = I_3 + 7$$

con $a_2 = -0,750$

$$b_3 = 0,120$$

$$b_4 = 0,060$$

A pesar de una relativa imprecisión, estas fórmulas son bastante homogéneas en cada una de las zonas. Los ábacos 15 a 18 facilitan el cálculo de los parámetros necesarios para utilizar la ecuación (5).

Si bien se trata de realizar rápidas estimaciones a nivel nacional, se puede incluso aumentar la simplificación y utilizar un solo grupo de fórmulas en las cuatro zonas consideradas:

$$I_1 = 0,69 H_{0,5} - 6$$

$$I_2 = 1,16 H_{0,5} + 2$$

Para el exponente de t :

$$\text{Zona 3: } a_1 = -0,410 \quad a_2 = -0,800$$

$$\text{Zona 4: } a_1 = -0,350 \quad a_2 = -0,790$$

$$\text{Zona 5: } a_1 = -0,600 \quad a_2 = -0,850$$

$$\text{Zona 6: } a_1 = -0,490 \quad a_2 = -0,750$$

$$b_1 = -0,0056 I_1 \quad b_2 = 0,48 b_1 + 0,008$$

El campo de aplicación de estas fórmulas, establecidas para intervalos de tiempo que varían entre 5 minutos y 24 horas, no debería ser extendido a más de dos días.

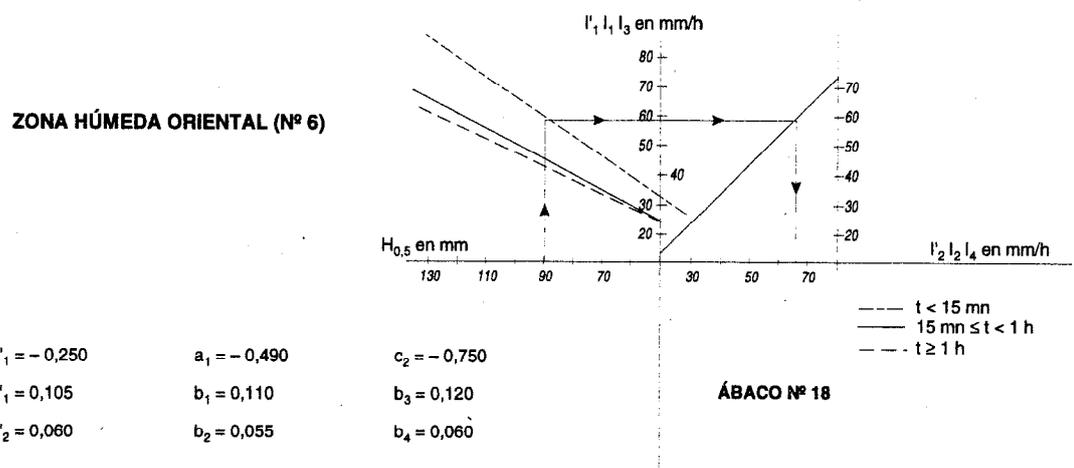
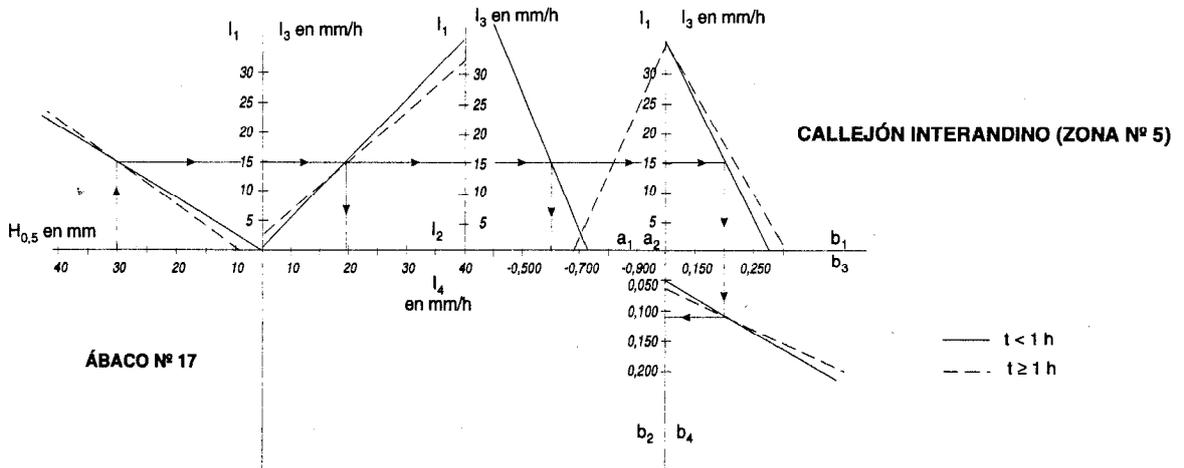
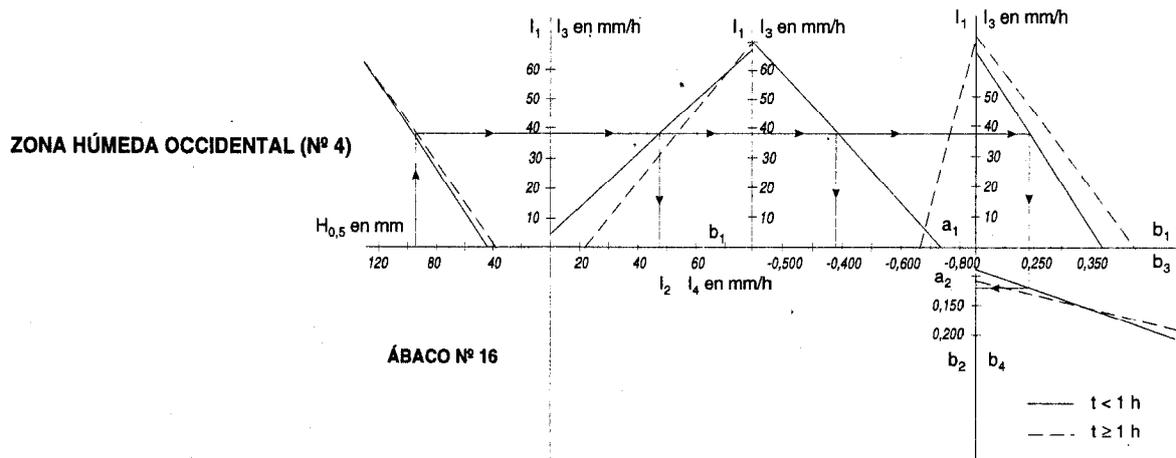


Fig. 9 - Estimación de las constantes de las fórmulas que permiten el cálculo de las intensidades (zonas nº 4, 5 y 6) — ábacos

II. Regionalización mensual de las precipitaciones en el Norte ecuatoriano

1. PROBLEMÁTICA

1.1. Marco general del estudio

Desde 1987, el Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos (INERHI) y el ORSTOM vienen estudiando el funcionamiento del riego tradicional andino con el fin de establecer recomendaciones para la elaboración de un Plan Nacional de Riego.

Los sistemas de riego tradicionales existieron tal vez en la época preincaica, pero se desarrollaron sobre todo con la colonización española. Están compuestos, en su mayoría, de pequeños perímetros (menos de 100 ha) dispersos en el espacio y que ocupan los tres pisos climáticos del callejón interandino.

Están alimentados por infraestructuras complejas (canales cavados directamente en el suelo) que captan el agua de los ríos por medio de tomas rústicas, sin obra de regulación alguna. El caudal derivado está entonces sujeto a las fluctuaciones de los recursos hídricos de la red hidrográfica.

El proyecto está dividido en 7 grandes temas de estudio (análisis del paisaje, trabajos pluridisciplinarios en terrenos representativos, inventario, análisis hidroclimático, observatorio agro-socio-económico, suelos, investigación histórica) cuyos resultados son integrados en un análisis global (tema nº 8) con base en el cual se elaboran diagnósticos y se establecen recomendaciones en una perspectiva a corto, mediano y largo plazo.

La repartición del agua es uno de los aspectos fundamentales del estudio para el diagnóstico de la situación y la validez de las recomendaciones.

1.2. La equidad hidrológica y su importancia

El buen funcionamiento de un sistema de riego depende en gran medida de la equitativa repartición del agua a todos los usuarios al interior de un mismo perímetro (distribución), entre perímetros de un mismo sistema complejo (repartición) y entre los diferentes sistemas repartidos a lo largo de la red hidrográfica (dotación global). Sin embargo, en este último caso, la desigualdad es patente.

Para necesidades climáticas poco diferentes (un mismo piso altitudinal y sistemas de cultivo similares), las dotaciones concedidas varían de 0,1 a 0,4 l/s/ha en el piso frío, de 0,2 a 0,7 l/s/ha en el piso templado y de 0,3 a 1,0 l/s/ha en el piso subtropical, es decir en promedio una relación de 1 a 3.

Tales diferencias suscitaron conflictos mayores que obligaron al Estado a intervenir en el manejo del agua hasta el punto de nacionalizar todos los recursos hídricos en 1972. Son igualmente esas diferencias las que

han modelado el trazado de los canales en el paisaje andino, evidenciando las diferencias de estructura y de poder. En general, las grandes haciendas de los fondos de valle van a buscar el agua a gran altura, aguas arriba de las demás tomas, a fin de evitar compartir el déficit de agua de los ríos cuando se producen estiajes pronunciados, incluso si ello las obliga a construir y mantener infraestructuras de transporte largas y sinuosas.

Está claro una situación como esta no favorece la coexistencia armoniosa de los diferentes grupos de usuarios.

El Estado ha tratado efectivamente de corregir esta herencia del pasado, pero le ha faltado ya sea la voluntad necesaria o datos precisos para establecer una repartición aguas arriba - aguas abajo más equitativa, con un ordenamiento racional y económico de los canales y las tomas.

Ciertamente, el problema es complejo y asocia estrechamente las consideraciones hidrológicas y sus consecuencias agro-socio-económicas.

En este contexto, el proyecto INERHI-ORSTOM se comprometió a proporcionar a las instituciones competentes una base científica y técnica que justifique y oriente la aplicación de una política de ese tipo.

1.3. Regionalización climática preliminar (necesidad y objetivos)

Para responder parcialmente a tal objetivo, el procedimiento que adopta el hidrólogo consiste en comparar las necesidades y los recursos, no sólo a nivel de las tomas actuales sino a todo lo largo de la red hidrográfica, a fin de prever las diferentes condiciones de evolución (reordenamiento, incorporación de nuevos perímetros al riego).

Con ese fin, el espacio es dividido inicialmente en zonas de recursos (microcuencas) y en zonas de análisis y de recomendaciones (ZARI).

Las microcuencas son cuencas vertientes de 50 Km² aproximadamente en las que los factores condicionantes del flujo (pendiente, permeabilidad, características y ocupación del suelo) son más o menos homogéneos. En cada una de ellas, se calibra un modelo lluvia-caudal.

Las ZARI presentan toda la cadena de movilización, transporte, distribución y utilización del agua. Sus límites son trazados en función de los accidentes del terreno y de las infraestructuras existentes. Son ideales para estudiar la evolución de los sistemas de producción.

La estimación de los recursos requiere un buen conocimiento regional de la lluvia y de la ETP (estimación de los valores promedio en cada microcuenca) mientras que la evaluación de las necesidades depende en gran parte de una correcta estimación puntual de los mismos parámetros a nivel de cada perímetro.

Consecuentemente, es indispensable un estudio climático preliminar que permita una estimación precisa de la lluvia y de la ETP en todo punto del espacio estudiado.

Si además no nos contentamos con valores promedio interanuales, sino que por el contrario deseamos introducir la noción de riesgo, es necesario razonar a nivel de series cronológicas.

Desde el punto de vista agronómico, el quinquenio o el decenio es un intervalo adecuado. Teniendo en cuenta los datos disponibles (en estado solo de manuscritos), el volumen de información y el marco de planificación en el que se desarrolla el proyecto, la elección de un período mensual es razonable.

La regionalización climática tiene entonces como objetivo generar en todo punto del espacio series cronológicas mensuales, estadísticamente probables, de lluvia y de ETP. Dicho trabajo ha avanzado considerablemente en lo que respecta al callejón interandino, la región costera y las islas Galápagos. Será realizado más tarde en la región amazónica. Actualmente, concierne algo menos de 900 estaciones pluviométricas y climáticas.

2. METODOLOGÍA

2.1. Estudios anteriores y red

Numerosos estudios ya realizados sobre el tema son sumamente someros y conciernen sitios bastante restringidos. Por otro lado, la información correspondiente es difícil de obtener.

A nivel nacional, el ORSTOM emprendió, en el marco de su cooperación con el Ministerio de Agricultura y Ganadería para el Programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG), y con la colaboración del INAMHI y el INERHI, un análisis serio de la red climática. El capítulo I de este artículo es ilustración de ello, al igual que los numerosos informes de E. Cadier, J.-F. Nouvelot, P. Pourrut y sus contrapartes nacionales, que constituyen una importante base de conocimiento.

Sin embargo, tal análisis es insuficiente para alcanzar los objetivos planteados, debido a la falta de medios informáticos y a la insuficiencia de la información disponible en esa época.

En efecto, la red, reciente en su conjunto (numerosas estaciones fueron instaladas alrededor de 1965), es manejada por más de 30 organismos públicos o privados, cada uno con sus preocupaciones, lo que explica en parte la deficiente repartición de las estaciones, desde el punto de vista tanto espacial como altitudinal.

Esta situación constituye un inconveniente considerable tratándose de un medio de relieve sumamente contrastado y sometido a diferentes fenómenos climáticos que provocan gradientes pluviométricos importantes en función de la exposición y de la situación general de las vertientes.

Por ello, la sola utilización de los datos de la red no es suficiente como para apreciar correctamente las variaciones espaciales de los parámetros investigados.

2.2. Zonas pseudo-proporcionales y vectores representativos

En un espacio sometido a los mismos fenómenos climáticos (planetarios, regionales y locales), los valores de los parámetros climáticos serán más o menos proporcionales a partir de un cierto intervalo de tiempo. Así, dentro de una zona climática homogénea, cada parámetro puede caracterizarse por una serie única, representativa de su organización cronológica interna. El espacio se restringe si se disminuye el intervalo (del año al mes por ejemplo) o si se exige una relación pseudo-proporcional mayor dentro de la zona.

Las definiciones anteriores constituyen la base teórica de los « vectores regionales » que son series cronológicas homogéneas creadas con base en las medidas observadas en las estaciones que pertenecen a la zona climática considerada, medidas a veces incompletas y que pueden presentar errores sistemáticos sin que ello influya en la elaboración del vector.

Actualmente, existen dos métodos (desarrollados en el ORSTOM): el vector regional de G. Hiez (1977) y el vector de los índices anuales de precipitación de Y. Brunet-Moret (1979). Sus fundamentos teóricos son expuestos en los artículos citados, por lo que no nos detendremos en ello.

2.3. Programa CLIMAN

CLIMAN es un programa desarrollado en el proyecto INERHI-ORSTOM con base en el algoritmo de cálculo de Brunet-Moret. Funciona con un intervalo mensual (análisis y correcciones) y permite tratar parámetros climáticos (temperatura, insolación, humedad relativa, viento, evaporación en tanque) así como los caudales medios.

Primeramente, posibilita la detección, la corrección o la supresión de los errores sistemáticos de las series cronológicas estudiadas (fase de homogeneización), y luego la búsqueda de los límites de las zonas climáticas homogéneas (fase de regionalización) para las cuales genera una serie cronológica representativa de índices mensuales y anuales.

• La pseudo-proporcionalidad de una zona es medida con el valor del coeficiente de correlación promedio entre estaciones y el vector correspondiente (en caso de estricta proporcionalidad, ese valor es igual a 1).

Luego de varias pruebas, se considera una zona como homogénea si los coeficientes de correlación mensuales y anuales son superiores o iguales a 0,9.

En realidad, se aceptan igualmente zonas en donde tales coeficientes son cercanos a 0,9 cuando la baja densidad de la red no permite reducir la zona.

En teoría, es posible agrupar la homogeneización y la regionalización. La visualización de las curvas de dobles masas entre estaciones y vector permite determinar

si una mala relación entre las dos (bajo coeficiente de correlación) proviene de errores sistemáticos o de la no pertenencia de la estación a la zona homogénea simbolizada por el vector.

Sin embargo, como el programa es manejado por otras instancias del INERHI y otras entidades ecuatorianas (Escuela Politécnica Nacional), se preconizan las dos fases de análisis para evitar los errores de diagnóstico.

En la fase de homogeneización, se restringen lo más posible los espacios estudiados para asegurarse de no tomar en cuenta sino las estaciones que pertenecen a la misma zona homogénea.

El cálculo de los vectores de ETP es un tanto más complicado. Primero, se homogeneizan los parámetros con CLIMAN, ya sea por el método del vector o por el análisis de las simples masas que en muchos casos es más que suficiente, en razón de su reducida variabilidad interanual.

Luego, en las pocas estaciones que poseen un tanque de evaporación de tipo A, la ETP se calcula según 7 fórmulas y los resultados obtenidos se comparan con las evaporaciones medidas. Esta última operación se efectúa a nivel de los valores absolutos y de las variaciones estacionales y permite destacar las fórmulas mejor adaptadas según las regiones estudiadas.

El desvío de ciertas fórmulas en función de la altitud (desvío ya estudiado en Colombia) que varía según el tipo de clima, hace necesaria esa operación.

Luego se calcula la ETP en cada estación climática según la fórmula adecuada y se puede entonces proceder, como anteriormente, a la fase de regionalización.

2.4. Clima y altitud

Los cálculos anteriores permiten delimitar zonas climáticas homogéneas representadas, para la lluvia y la ETP, por vectores de valores mensuales y anuales relativos, calibrados arbitrariamente en un valor interanual de 1.000 mm.

Queda por determinar los valores absolutos, lo cual se realiza mediante un estudio minucioso de las relaciones lluvia-altitud y ETP-altitud.

En una gran cuenca hidrográfica, esas relaciones están lejos de ser uniformes y dependen también de los mecanismos climáticos preponderantes. El conocimiento del clima es indispensable para identificar las zonas de validez de las relaciones encontradas que cubren en general algunas de las zonas homogéneas definidas en la fase de regionalización anterior.

En la práctica, un proceso interactivo se apoya en los dos análisis.

El producto final es un mapa de isoyetas (o isopletas) interanuales en el cual vienen a agregarse las zonas pluviométricas (o climáticas) homogéneas, estando cada una de ellas representada por un vector de índices mensuales y anuales. Permite así generar una serie cronológica mensual en cada punto del espacio estudiado.

Ejemplo: Si, según el mapa de isoyetas, un punto recibe 570 mm de lluvia anual y pertenece a la región climática n° 3, basta con multiplicar el vector pluviométrico de la región 3 por 0,570 para obtener una serie pluviométrica mensual probable del punto considerado.

Se procede de la misma manera en el caso de la ETP.

Para generar una serie promedio en una cuenca vertiente, se deberán considerar los porcentajes de superficie ocupados por los diferentes vectores así como la lluvia media correspondiente a las regiones climáticas involucradas.

3. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL MIRA

3.1. Características generales

El sistema hidrográfico del Mira ocupa parte del Sur de Colombia y parte del Norte del Ecuador.

Se seleccionó la parte superior de la cuenca, situada enteramente en el callejón interandino ecuatoriano (figura 10). En efecto, esa parte contiene todos los sistemas de riego y está, además, controlada por una estación hidrométrica cuyas observaciones son de buena calidad (FF CC Carchi).

La cuenca, con una superficie de 3.500 Km², se extiende entre los 1.500 y los 4.500 m.s.n.m. Se organiza en torno a los grandes valles principales bien dibujados (Chota, Ambi, Apaquí), a los cuales se agregan numerosos valles secundarios más o menos perpendiculares.

Está sometida a la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical, a aquella (bastante atenuada por la cordillera Occidental) de las masas de aire provenientes del Pacífico en cuya dirección está orientada, y a aquella (en parte bloqueada por la cordillera Oriental) de los alisios del Sudeste durante el verano.

La combinación de esos diferentes fenómenos más o menos alterados por el relieve, genera un régimen pluviométrico bimodal, al que se ajustan los ciclos de cultivo.

El riego es utilizado como complemento para asegurar la producción de una región de vocación agrícola que exporta buena parte de su producción hacia Colombia.

Desde 1987, se ha procedido a la recolección exhaustiva de los datos mensuales y anuales (manuscritos en su mayoría), en colaboración con el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y la Escuela Politécnica Nacional, ambos interesados en este estudio.

Los datos han sido luego ingresados en computadora en un formato propio de CLIMAN.

El caudal derivado (10) está destinado sólo al riego y no tiene en cuenta otros usos (agua potable, abrevaderos...) que representan únicamente un caudal de 1,3 m³/s.

Un sistema de riego típico o promedio se compone en general de un canal de tierra de 4 Km de longitud que transporta un caudal de 75 l/s para regar 180 ha en las que se encuentran los tres tipos de propiedades descritos en el cuadro 10.

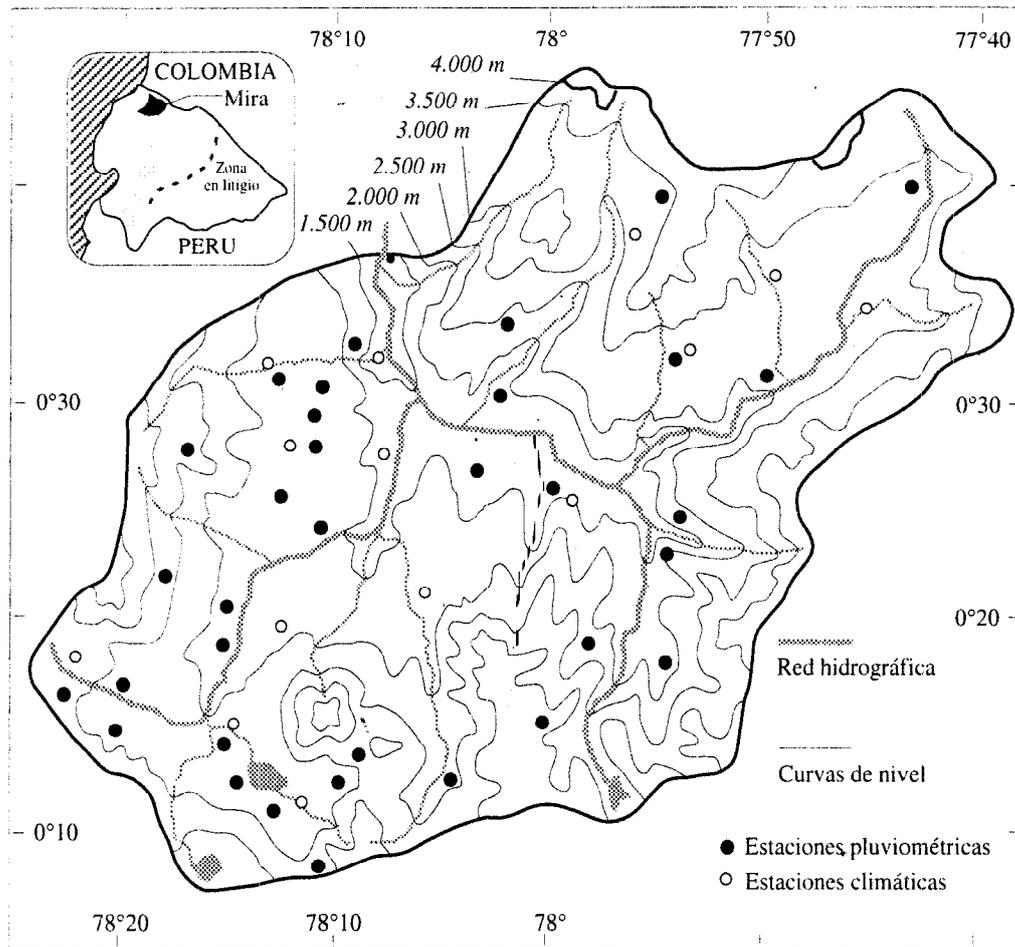


Fig. 10 - Cuenca del Mira - Oro-hidrografía - Estaciones pluviométricas y meteorológicas

Las haciendas predominan en los dos pisos extremos. En el piso frío, utilizan riego para mantener pastos de ganado y cultivar cebada y papa, mientras que en el piso subtropical, la caña de azúcar, la alfalfa y los cultivos de hortalizas ocupan las mayores superficies.

El piso templado está ocupado en su mayoría por los minifundios que practican un policultivo basado en la asociación maíz-fréjol.

3.2. Homogeneización de las series pluviométricas

En el caso del Mira, 76 estaciones presentan un interés para el análisis climático: 65 están situadas en la cuenca misma y otras 11 en cuencas vecinas, permitiendo aprehender mejor la influencia de los alisios del Sudeste y de las masas de aire provenientes del Pacífico.

En la práctica, se escogieron sólo 54 estaciones — las demás presentan demasiados vacíos en las observaciones — que totalizan 1.059 años completos, es decir un promedio de 20 años por estación (1966-1985).

Están agrupadas en función de sus períodos de observación y de su pertenencia a una misma zona homogénea.

El grupo puede ser modificado y restringido durante la fase de homogeneización si se presenta una duda sobre la pertenencia a esa zona.

Los errores sistemáticos se detectan a nivel de cada grupo (inicialmente en los valores anuales y luego en los mensuales), mediante el estudio de las dobles masas estaciones-vectores y el análisis de los parámetros de detección que ofrece CLIMAN.

• Dichos errores son entonces simplemente identificados (valores dudosos), corregidos (en casos de sustitución o desplazamiento de aparatos) o incluso suprimidos (valores incoherentes).

El diagnóstico se verifica mediante visitas al terreno, la lectura de fichas históricas de estaciones o entrevistas con los técnicos encargados del manejo de la red.

Una vez validado el diagnóstico, CLIMAN presenta en pantalla el aspecto de las dobles masas estación-vector antes y después de la corrección, en el formato que aparece en la figura 11.

De todas las estaciones, que comprenden 1.059 años de observación, se examinaron 11.599 valores

1	Superficie total de la cuenca	:	347.860 ha	
2	Superficie inferior a 3.600 m	:	298.055 ha	(86 % de 1)
3	Superficie cultivada	:	149.220 ha	(43 % de 1 ó 50 % de 2)
4	Superficie regada	:	50.340 ha	(34 % de 3) en 293 perímetros
	de la cual	:	19 % por encima de los 2.700 m.s.n.m.	(lluvia/ETP de 970/1.025 mm por año)
		:	45 % entre 3.300 y 2.700 m.s.n.m.	(lluvia/ETP de 795/1.165 mm por año)
		:	36 % por debajo de los 2.300 m.s.n.m.	(lluvia/ETP de 540/1.405 mm por año)
		:	46 % de grandes propiedades o haciendas	
		:	22 % de propiedades medianas o fincas	
		:	32 % de pequeñas propiedades o minifundios	
5	Riego tradicional	:	43.544 ha	(86 % de 4)
6	Riego estatal	:	4.600 ha	(9 % de 4)
7	Riego mixto	:	2.196 ha	(5 % de 4)
8	Nº de sistemas de riego	:	279	
9	Longitud total del los canales	:	1.164 km	
		:	9 % revestidos	
		:	91 % tradicionales, de tierra	
10	Caudal total derivado	:	26,2 m³/s	
11	Población de la cuenca en 1982	:	295.185 habitantes	
12	Población concernida por el riego	:	157.861 habitantes	(53 % de 11)

Cuadro 10 - Características del riego en el Mira

Fig. 11 - Homogeneización de series cronológicas

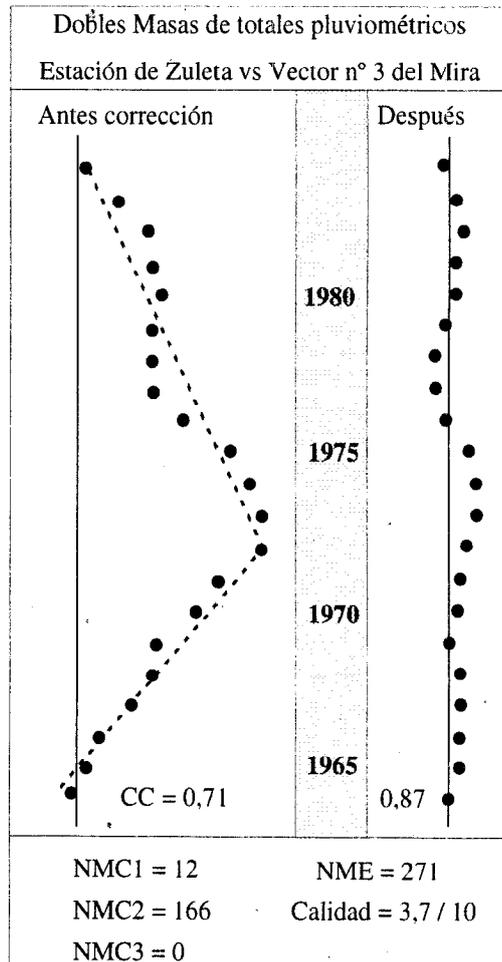
Ejemplo de homogeneización

La estación 316 de Zuleta presenta una ruptura muy clara en 1972 debida a una confusión entre probetas, hecho que es confirmado por un informe del inspector y una visita a la estación.

De los 271 meses examinados (NME), 166 son entonces corregidos (NMC2) pero quedan aún 12 meses dudosos (NMC1) repartidos en 2 años. No existen meses incoherentes (NMC3).

El coeficiente de correlación estación-vector (CC) pasa de 0,71 a 0,87 después de la corrección.

A pesar de su calidad bastante mediocre, esta estación sigue siendo importante por la extensión de su período de observación (años completos desde 1963) y su posición alejada del centro.



mensuales de lluvia, de los cuales 192 fueron identificados como dudosos, 1.443 corregidos y 666 eliminados por incoherencia.

En promedio, ello representa una estación de 20 años de observaciones que contiene 215 valores mensuales, de los cuales 4 son dudosos, 27 corregidos y 12 eliminados.

Las notas de calidad atribuidas a cada estación se reparten de la siguiente manera:

19 estaciones	tienen una nota de	10
8 estaciones	tienen una nota entre	9 y 10
6 estaciones	tienen una nota entre	8 y 9
6 estaciones	tienen una nota entre	7 y 8
2 estaciones	tienen una nota entre	6 y 7
2 estaciones	tienen una nota entre	5 y 6
11 estaciones	tienen una nota entre	0 y 5

Así, el 50 % de estaciones tienen una nota superior a 9. La corrección de períodos largos debida en gran parte al cambio de emplazamiento de las estaciones es la responsable de las menores notas, a excepción de las 2 más bajas que corresponden a valores globalmente incoherentes.

3.3. Relaciones lluvia-altitud

Durante la fase de homogeneización, el programa elaborado calcula nuevamente los valores interanuales de cada estación en función del período de determinación del vector. Esos datos son utilizados evidentemente para la elaboración de las curvas lluvia-altitud.

La altitud es considerada como el factor preponderante de las variaciones climáticas, lo cual ya fue demostrado y explicado en el estudio sobre el altiplano cundi-boyacense de Colombia.

Las relaciones lluvia-altitud estudian subiendo por los valles principales desde la parte baja de las cuencas. Posteriormente, el interés se centra en los valles secundarios.

Este análisis debe acompañarse de un buen conocimiento del clima local y de la dirección general de las masas de aire. Cuando la densidad de las estaciones es insuficiente o su distribución espacial inadecuada, se consideran las características de la vegetación natural.

En el caso del Mira (figuras 12a y 12b), se llega a dos tendencias principales que corresponden a los tres grandes valles señalados en la descripción general de la

cuenca hidrográfica, con variaciones de gradiente según los valles secundarios transversales.

La parte baja de la cuenca (valle del Chota) corresponde al mínimo pluviométrico (menos de 500 mm de lluvia por año). La parte este y norte de la cuenca (valle del Apaquí) contiene 4 curvas de igual tendencia pero desplazadas según los diferentes valles transversales (valles de El Ángel en el presente caso). La parte oeste y sudoeste (figura 12b), que corresponde al valle principal del Ambi y a un valle secundario bastante importante (Blanco), está más protegida, por lo que está sometida a gradientes menos importantes.

La parte inferior de la curva (común por cierto a las 2 figuras) representa el flanco occidental de la cordillera de los Andes y no se encuentra en la zona de estudio.

Corresponde al descenso del Mira a lo largo de la cordillera hasta el piedemonte.

Esa vertiente está muy expuesta a las masas de aire provenientes del Pacífico que generan gradientes pluviométricos importantes.

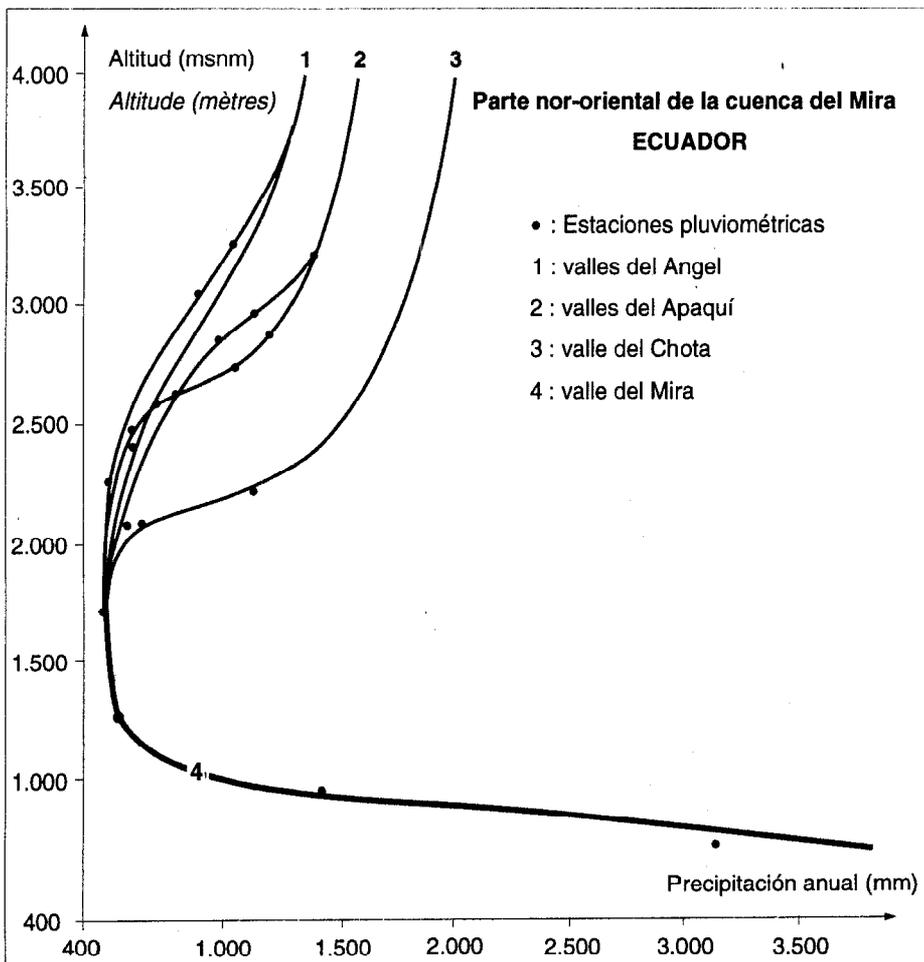


Fig. 12a - Cuenca del Mira, parte nor-este - Relaciones lluvia-altitud

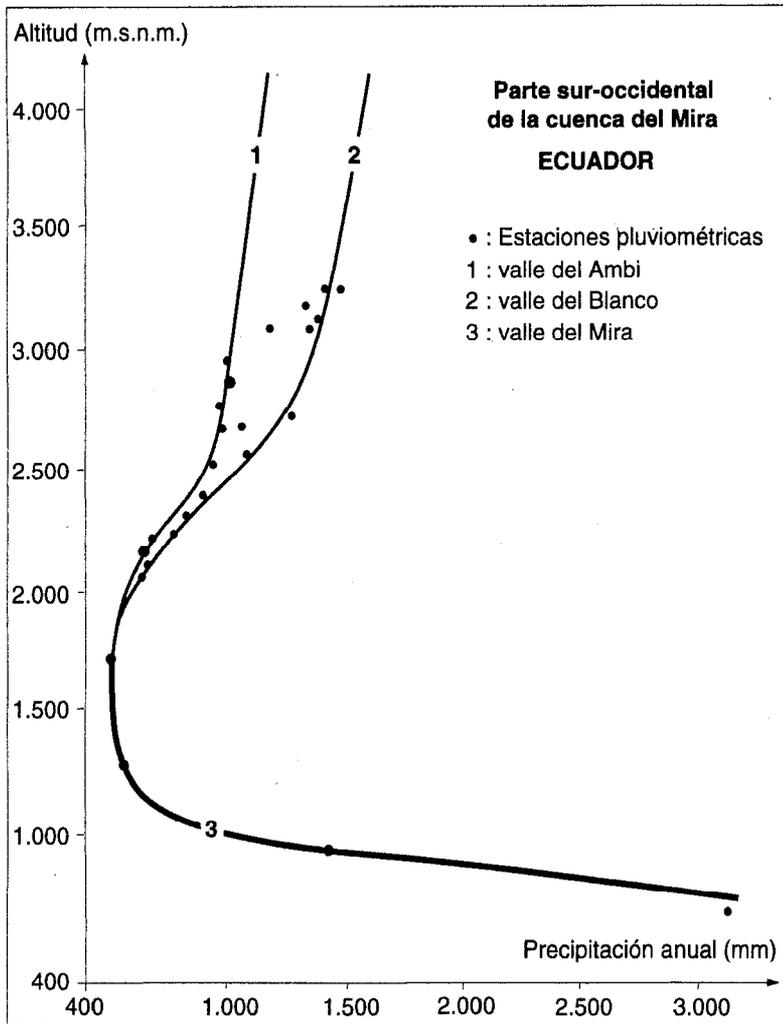


Fig. 12b - Cuenca del Mira, parte oeste y sureste
Relaciones lluvia-altitud

Ampliando el análisis a las estaciones costeras, se encuentra un máximo pluviométrico de 4.000 mm de lluvia anual alrededor de los 700 m.s.n.m.

En Colombia, ese máximo se sitúa entre los 1.200 y 1.800 m.s.n.m.

En los dos casos, se observará que, por encima de los 3.000 m.s.n.m., las curvas no son muy exactas en razón de la falta de estaciones. Fueron trazadas teniendo en cuenta curvas calculadas en cuencas vecinas y la vegetación natural con la colaboración del botánico C. Huttel.

La superficie situada por encima de los 3.000 m.s.n.m. ocupa alrededor del 30 % de la superficie total de la cuenca y recibe la mayor parte de la lluvia. Todo error en los totales pluviométricos de esta zona acarrearía entonces imprecisiones aún mayores en el cálculo de los recursos hídricos.

Se ve claramente el gran interés que presenta una redistribución de la red para obtener una mejor repartición altitudinal.

Estas curvas permiten trazar con precisión las isoyetas promedio anuales valle por valle (ver figura 13).

3.4. Regionalización

El módulo de regionalización de CLIMAN utiliza los archivos de datos corregidos. Luego de la fase de homogeneización, sólo quedan 48 estaciones cuya calidad se considera suficiente.

Estas son agrupadas según la proporcionalidad de sus respectivos valores (anuales y luego mensuales), tratando de constituir regiones climáticas en las cuales el coeficiente de correlación promedio entre estaciones y vector sea cercano o superior a 0,9.

En un primer análisis, se utilizan las curvas lluvia-altitud.

Una vez constituidos los grupos, se trazan los límites de zona teniendo en cuenta el relieve. En caso de que la baja densidad de las estaciones no permita un trazado exacto, se utilizan los factores del medio natural (vegetación por ejemplo) para definir un límite probable.

El tratamiento de las 48 estaciones restantes desemboca en la constitución de 8 grupos homogéneos y por lo tanto de 8 vectores.

El menor coeficiente de correlación promedio es de 0,87.

El grupo 1 obtiene los resultados más bajos. Sólo dos estaciones pertenecen a la cuenca propiamente dicha; las otras dos están situadas un tanto más arriba, en una cuenca vecina dividida por la frontera con Colombia y en una vertiente orientada hacia

el Norte. Las 4 estaciones están dispersas y son insuficientes como para definir un vector más representativo.

Para el grupo 3 se obtienen resultados medianos, pero el vector de esa región se calcula solamente con base en 3 estaciones (valor límite) bastante alejadas.

Se observará en cambio la buena homogeneidad del grupo 7, en el cual la mayoría de estaciones forman parte de un valle secundario (río Blanco) en el que el INAMHI maneja una gran cuenca vertiente experimental.

Las estaciones son más numerosas que en otras partes, bastante concentradas y mejor observadas puesto que 8 de ellas obtienen una nota de calidad de 10. En ese grupo, sólo dos estaciones presentan coeficientes inferiores a 0,9: la estación 323 (en correlación mensual) y la estación 875 (en correlación anual).

En la primera, 76 meses son corregidos y 12 meses eliminados, lo cual deja flotando una cierta duda en cuanto a la calidad de los datos; la segunda posee el período más corto de observación (6 años), lo que da poca

nº regiones	nº estaciones	coeficientes mensuales	coeficientes anuales	nº regiones	nº estaciones	coeficientes mensuales	coeficientes anuales	
nº 1	306	0,82	0,87	nº 6	021	0,92	0,92	
	305	0,89	0,84		053	0,89	0,90	
	0,87	059	0,91		0,89	317	0,90	0,92
	0,88	308	0,87		0,91	0,90	328	0,89
				0,91	525	0,89	0,86	
nº 2	084	0,91	0,94	nº 7	001	0,99	0,98	
	103	0,86	0,83		322	0,96	0,95	
	0,91	303	0,94		0,92	323	0,87	0,92
	0,91	102	0,89		0,94	329	0,96	0,94
nº 3	083	0,89	0,94		330	0,99	0,99	
	0,88	307	0,88	0,98	331	0,98	0,98	
	0,93	324	0,87	0,91	332	0,99	1,00	
					333	0,99	0,99	
nº 4	304	0,90	0,94	0,97	334	0,97	0,93	
	310	0,85	0,93	0,95	875	0,99	0,84	
	0,89	314	0,91	0,91	nº 8	085	0,87	0,93
	0,91	315	0,91	0,88		100	0,89	0,95
				104		0,89	0,94	
				301		0,88	0,93	
nº 5	105	0,86	0,89	302	0,86	0,91		
	110	0,93	0,95	311	0,93	0,95		
	316	0,89	0,84	312	0,94	0,93		
	319	0,91	0,91	313	0,91	0,97		
	320	0,94	0,92	0,89	571	0,92	0,93	
	321	0,89	0,91	0,93	603	0,83	0,86	
	0,91	526	0,94	0,94				
	0,90	604	0,90	0,87				

Cuadro 11 - Coeficientes de correlación estaciones-vectores

Coeficientes de correlación mensuales y anuales entre estaciones pluviométricas y vectores correspondientes. Los coeficientes promedio de cada grupo aparecen bajo el número de región.

significación al valor de su coeficiente de correlación. Finalmente, la estación 332 no tiene en realidad un coeficiente de 1 sino de 0,997.

De una manera general, se observa que los resultados obtenidos dentro de cada grupo son tanto más desiguales cuanto menor es el número de estaciones.

Las zonas menos homogéneas, en las que los fenómenos climáticos son más complejos, son también, desafortunadamente, las que menos estaciones poseen.

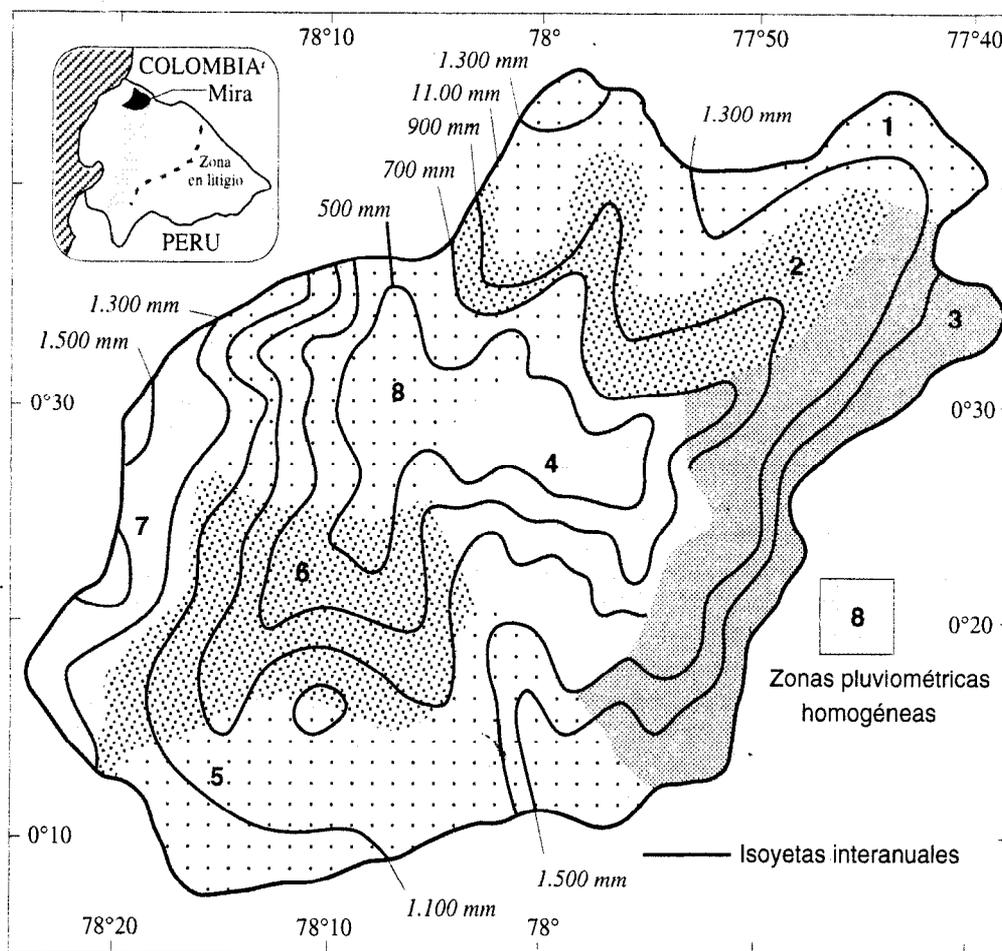
Los límites de las regiones pluviométricas pseudo-proporcionales representadas en la figura 13 están trazados en función de los grupos constituidos y teniendo en

cuenta los límites altitudinales y los accidentes de relieve que separan a los diferentes valles.

Las regiones 8, 4 y 6 corresponden a la parte baja de los tres valles principales (Chota, Apaquí y Ambi) separados por estrechamientos muy marcados (entre 8 y 4 y entre 8 y 6) o por líneas de cresta importantes (entre 4 y 6).

La región 5 corresponde a la parte superior del valle del Ambi separado de la cuenca inferior por el volcán Imbabura.

Estos accidentes de relieve modifican la circulación de las masas locales de aire y el impacto de los fenómenos climáticos continentales.



**Fig. 13 - Cuenca del Mira - Isoyetas promedio anuales
Zonas pluviométricas pseudo-proporcionales**

Las regiones 1, 2, 3 y 7 están separadas de sus regiones vecinas por un límite altitudinal.

Están muy expuestas a las precipitaciones provocadas por el ascenso de las masas locales de aire y pueden estar sometidas igualmente a la influencia de las cuencas vecinas (influencia amazónica en la región 3 por ejemplo).

Partiendo del análisis de las series mensuales representativas de cada región (vectores generados para el período 1965-1985), se constata que la organización cronológica de las lluvias anuales no difiere esencialmente de una región a otra. Se encuentran algunas constantes:

años de precipitaciones (**muy**) elevadas:

69, 70, 71, **74, 75**, 82, 84

años de precipitaciones (**muy**) escasas:

67, 73, **77, 78**, 79, 85

Se observará la poca influencia del Niño en la cuenca del Mira: el año 1983, que corresponde a un Niño excepcional, no presenta valores superiores al promedio sino solo en algunas estaciones.

Existe una cierta diferencia en los coeficientes de variación ($Cv = \text{desviación estándar/promedio}$) en función de la altitud.

Los menores Cv (de 0,15 a 0,17) se encuentran en las regiones más altas (nº 1, 2, 5 y 7) mientras que se elevan a 0,22 - 0,23 en los fondos de valle (regiones 4, 6 y 8). Presentan un valor mediano (0,20) en la región intermedia nº 2.

Esta diferencia es en cambio más marcada a nivel de la repartición estacional de las precipitaciones (regímenes pluviométricos).

Las vertientes expuestas al Sur-Sudeste (1, 2 y 8) tienen una pluviometría mayor durante la segunda estación de lluvias (octubre-noviembre, diciembre) cuando la Zona de Convergencia Intertropical vuelve a subir hacia el Norte.

Sucede exactamente lo contrario en el caso de las vertientes expuestas al Norte (4, 5, 6 y 7) que poseen una primera estación de lluvias (marzo-abril-mayo) más fuerte, cuando desciende la Zona de Convergencia Intertropical.

La región 3 muestra claramente la influencia de los alios del Sudesie que logran pasar la barrera que constituye la cordillera. Prácticamente no tiene estación seca y recibe más lluvia en el mes de julio que en el mes de noviembre.

Se puede llevar el análisis de los vectores mucho más lejos, y ello se realizará una vez analizadas completamente todas las cuencas (lluvia y ETP), pero por el momento ese no es el objetivo del proyecto.

4. LOS VECTORES Y SU UTILIZACIÓN EN EL PROYECTO INERHI-ORSTOM

4.1. Regionalización de la ETP

La regionalización de la ETP se realizó con la metodología antes descrita. Los datos climáticos de base fueron homogeneizados mediante los métodos del vector y de las simples masas. En el caso del Mira, el segundo método es a menudo suficiente como para detectar y corregir los errores sistemáticos.

Después de la comparación con las medidas de los tanques de evaporación en 7 estaciones, nuestra elección recayó en la fórmula de Penman cuyos coeficientes fueron modificados y adaptados según los resultados obtenidos en el altiplano colombiano.

Las relaciones entre ETP y altitud ponen en evidencia 3 curvas distintas, y la regionalización mediante el vector desemboca en 3 regiones pseudo-proporcionales. En los dos casos, los 3 grupos concuerdan con y corresponden a los 3 valles principales. Las correlaciones entre estaciones y vectores son en cambio inferiores a las encontradas en el análisis pluviométrico (coeficientes mensuales promedio de 0,88, 0,84 y 0,88 respectivamente). Sin embargo, la comparación entre los valores observados en las estaciones y los calculados mediante los vectores muestra diferencias mínimas.

4.2. Cálculo de las necesidades actuales

Superponiendo los mapas de regionalización climática

obtenidos (del tipo de la figura 13) y los mapas de delimitación de los perímetros regados, es sumamente fácil asociar a cada perímetro un valor promedio de lluvia o de ETP (isolíneas) y los vectores correspondientes.

Estas informaciones son llevadas al banco general de riego en donde figura una descripción exacta de la infraestructura de transporte y de distribución (longitud, pendientes, eficiencia, etc.) y de los perímetros (sistemas de producción, características hidrodinámicas de los suelos, superficies equipadas y regadas, etc.), establecida con base en las demás operaciones del proyecto.

A partir de ese banco de datos, se calculan las necesidades actuales por perímetro para cada mes del período para el que se han generado los vectores. Tales cálculos desembocan en la evaluación de las dotaciones necesarias en función de los riesgos que se está dispuesto a correr: satisfacción de las necesidades un año de 2, tres años de 4, etc.

Los resultados se comparan con las concesiones legales y los caudales realmente derivados (que pueden ser diferentes) para establecer un primer diagnóstico sobre la movilización del agua de uso agrícola.

4.3. Estimación de las necesidades futuras

En muchos casos, los sistemas de producción se han adaptado a los recursos hídricos disponibles (volumen y frecuencia de riego). Su evolución hacia sistemas más intensivos depende entonces en parte de una mejor distribución de tales recursos.

El proyecto procedió a la modelización de la economía agrícola en los espacios regados a fin de detectar los efectos de una rehabilitación de los sistemas de riego en la evolución de los sistemas de producción de las superficies regadas. Esa modelización, realizada mediante el programa GAMS del Banco Mundial, permite simular diversas situaciones plausibles de evolución según los objetivos perseguidos.

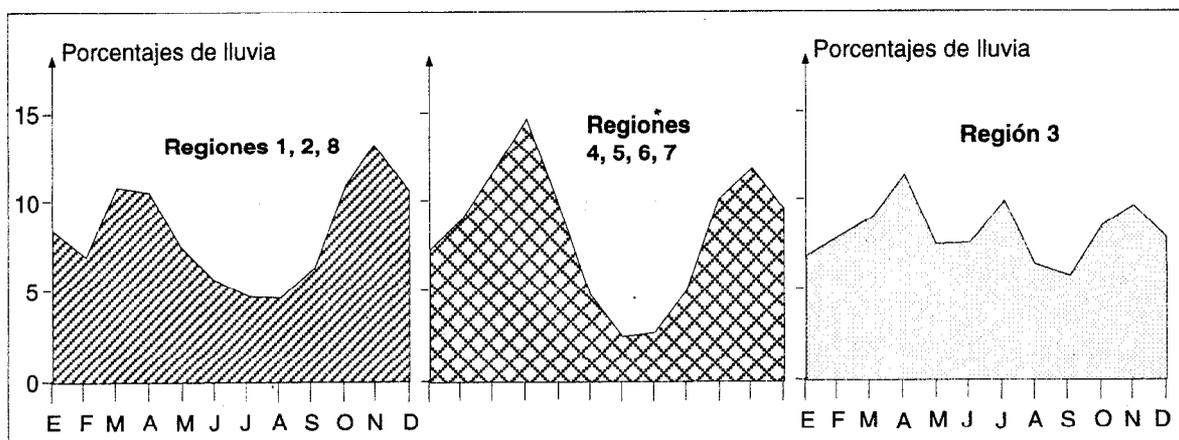


Fig. 14 - Cuenca del Mira. Repartición estacional de las precipitaciones en las 8 regiones pseudo-proporcionales

Por otro lado, se caracterizan también las superficies aún no regadas pero potencialmente regables, sobre todo desde el punto de vista climático (valores promedio anuales de lluvia y de ETP y vectores asociados).

Los resultados de la simulación agro-económica proporcionan esquemas de evolución en los perímetros regados y de incorporación al riego de superficies potenciales, que se introducen en el banco de datos globales a fin de evaluar las necesidades de agua futuras según los diversos esquemas escogidos.

4.4. Modelo lluvia-caudal

Los vectores y sus regiones se utilizan igualmente para calibrar un modelo de transformación lluvia-caudal en cuencas hidrológicamente homogéneas. Los límites de zonas deberían permitirnos aprehender mejor el impacto de los diferentes regímenes climáticos en el recurso agua a fin de calcular un vector promedio por cuenca que tenga en cuenta exactamente los diferentes impactos.

Se están efectuando pruebas en 3 cuencas vertientes controladas por estaciones hidrométricas y en las cuales influyen varias zonas climáticas, utilizando primeramente los datos observados en las estaciones siguiendo el método tradicional y haciendo luego intervenir los vectores con sus zonas de impacto.

Las mejores correlaciones entre climas (lluvia, ETP) y caudales mensuales se obtienen con los vectores, pero aún no son satisfactorias (alrededor de 0,6) en razón de la poca confiabilidad de los datos hidrométricos que requieren ser verificados y analizados críticamente.

4.5. Cálculo de los recursos disponibles en las tomas

A cada toma de agua corresponde una cuenca vertiente. Cada una de las tomas es identificada por su pertenencia a una cuenca hidrológicamente homogénea y por su posición en la red hidrográfica, gracias a una codificación lineal que permite determinar los caudales derivados aguas arriba y el impacto de dicha toma aguas abajo.

La cuenca vertiente se caracteriza por su superficie, sus valores promedio anuales de lluvia y de ETP y los vectores promedio correspondientes.

Una vez terminada la calibración definitiva del modelo de transformación lluvia-caudal, es posible estimar los caudales disponibles (mes por mes y año por año) a nivel de cada toma, y simular los cambios propuestos por la modelización agro-económica, a fin de apreciar su factibilidad.

5. OTRAS UTILIZACIONES POSIBLES

5.1. Diagnóstico de la red

La metodología adoptada en la cuenca del Mira permite analizar las estaciones de la red según 3 criterios: la calidad de la observación, la repartición altitudinal y la distribución espacial.

Las curvas lluvia-altitud muestran claramente la falta de estaciones por encima de los 3.000 m.s.n.m. Los grupos 1, 2 y 3 tienen muy poca consistencia por la inexistencia de estaciones; en ciertos casos, para elaborar el vector, fue necesario introducir puestos pluviométricos pertenecientes a cuencas vecinas. En el grupo 7, las estaciones están demasiado localizadas en la cuenca vertiente experimental, lo cual determina una falta de precisión en el trazado de los límites de la región.

En el fondo de valle (región 8 principalmente) en cambio, otros organismos (públicos o privados) han instalado estaciones climáticas para mejorar el manejo de los grandes perímetros de cultivo de caña de azúcar. En algunos casos, dichas estaciones cumplen la misma función que ciertas estaciones del INAMHI, por lo que este último podría retirar ciertos puestos pluviométricos recientes (107 y 902) o muy mal observados (603) para reequilibrar la red hacia las regiones señaladas.

Estas recomendaciones prácticas y precisas podrán completarse con criterios más elaborados de manejo de la red (densidad mínima según el tipo de región) cuando se disponga de datos más completos sobre las demás cuencas del callejón interandino. Se podrá entonces proponer una óptima red de observación.

5.2. Clasificación y caracterización climática

Casi siempre, la clasificación climática a nivel de un país está basada en el análisis de estaciones llamadas representativas; en efecto, es casi imposible tener en cuenta todas las estaciones dado su gran número y las variaciones puntuales que presentan. Desgraciadamente, pocas veces se demuestra la representatividad espacial de las estaciones escogidas. En la mayoría de los casos, la elección se realiza únicamente en función de la extensión de las series observadas.

La regionalización climática tiene la ventaja de delimitar espacios dentro de los cuales el vector generado proporciona una representatividad cifrada (correlaciones entre vector y estaciones). Es por ello un instrumento interesante para elaborar una clasificación climática precisa.

Si se estima que el número de vectores generados es aún demasiado elevado, es posible pasar al cálculo de vectores de segundo orden, de la misma manera que antes, para obtener una diferenciación más marcada. Se desembocará entonces en una clasificación menos fina, pero a menudo suficiente. Se puede igualmente repetir la operación varias veces para llegar a los grandes tipos de clima.

En el presente caso, se ha podido apreciar la importancia de un buen conocimiento preliminar de las principales características del clima (lluvia y ETP) para establecer diagnósticos a nivel de perímetros y de sistemas muy dispersos en el espacio. El método del vector regional permite responder a esa necesidad, incluso si se puede aún mejorarlo en especial a nivel de las relaciones

que caracterizan a una zona homogénea. En efecto, el coeficiente de correlación no es un indicador totalmente confiable de la pseudo-proporcionalidad de las series cronológicas dentro de una misma región, pues tiende a sobreestimar las relaciones entre vectores y estaciones en presencia de valores extremos muy marcados.

El algoritmo utilizado (vector de Y. Brunet-Moret) y el programa asociado (CLIMAN) son instrumentos prácticos y eficaces para homogeneizar las series cronológicas mensuales (casi todos los errores detectados fueron confirmados mediante encuestas y visitas de campo). Permiten igualmente delimitar zonas pseudo-proporcionales representadas por vectores que se utilizan luego para calcular necesidades y recursos en todo punto del espacio, lo cual corresponde a los objetivos fijados por el proyecto (a pesar de resultados interesantes que podrían tal vez generalizar su aplicación en el ámbito andino, un test realizado con el índice del programa MVR — vector propuesto por G. Hiez — ha mostrado igualmente que, por el momento, la distinción entre regiones pseudo-proporcionales requiere aún un cierto conocimiento del medio).

La prueba efectuada en el Mira permite agrupar las 8 regiones originales en 3 categorías:

- la primera comprende las regiones 1, 2 y 8 con coeficientes de correlación promedio de 0,94 a nivel mensual y 0,93 a nivel anual;
- la segunda reúne a las regiones 4, 5, 6 y 7 con coeficientes de 0,93 y 0,90;
- la región 3 permanece aislada.

Así, mediante el cálculo se encuentran nuevamente los grupos establecidos a nivel de los regímenes pluviométricos.

III. Conclusiones

Aunque el conocimiento de las lluvias en el Ecuador sigue siendo imperfecto, los elementos de evaluación de las pluviometrías aquí presentados permiten sin duda alguna realizar un análisis regional suficiente como para establecer, sin riesgo de gruesos errores, la pre-factibilidad de los proyectos de ordenamiento, incluso si luego se requieren estudios locales a fin de completar la información

necesaria para el cálculo definitivo de las obras.

Esto nos lleva a constatar que, por regla general, todos los métodos utilizados para estimar los valores de los parámetros pluviométricos de una región, incluso los más modernos, altamente eficaces a nivel del agrupamiento de las estaciones y de la división en zonas homogéneas, dependen de la calidad y la duración de las observaciones, sobre todo cuando se trata de estimaciones de las frecuencias elevadas de recurrencia.

Esta observación aboga evidentemente por la perennidad de las estaciones de observación pero, cuando la red es relativamente reciente, lo que es *el caso de buen número de países en vías de desarrollo*, no se debe perder de vista que se puede en cierta medida paliar la corta duración de las series de observación de las precipitaciones recurriendo a una « ampliación espacial » de la información (recogida en una zona pluviométrica homogénea) con miras a la utilización del método de estaciones-años.

Es así como, si una lluvia de frecuencia F , por ejemplo decenal, tiene puntualmente la probabilidad de ser observada en promedio un año cada diez en una estación dada, no ocurre lo mismo a nivel regional en donde ese evento de frecuencia decenal puede producirse en varios lugares durante un mismo año. Esto es particularmente cierto en la zona intertropical y en el Ecuador, en donde, a partir de masas de aire con ciertas características de temperatura y humedad (ver artículo III), los aguáceros excepcionales reflejan a menudo un aumento de la actividad convectiva que responde a condiciones estrictamente locales y por lo tanto bastante aleatorias.

Se observa que al multiplicarse el número de estaciones, es decir al aumentar la densidad de la red, aumentan las probabilidades de observar el evento.

Esta reflexión lleva a la siguiente constatación: cuando se trata de redes de reciente creación, se deben modular cuidadosamente los criterios de representatividad que se utilizan a menudo, a fin de conservar sólo una cobertura espacial mínima, y antes de cualquier supresión de estaciones que presumiblemente están repetidas se deberá realizar un estudio a profundidad. Tal acción de racionalización no se justifica realmente sino en el caso de redes suficientemente densas y antiguas.