

Batista Silva, J. L. (1991): Cálculo del escurrimiento medio anual sin observaciones hidrométricas. Revista Voluntad Hidráulica No.85, ISSN 0505-9461, pp. 2-7.

## **CÁLCULO DEL ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL SIN OBSERVACIONES HIDROMÉTRICAS**

### **Resumen:**

La metodología para el cálculo del escurrimiento medio anual, elaborada por el autor hace más de una década (1980) presenta limitaciones de aplicación ante determinados valores de lluvia y altura media de la cuenca. Por esta razón, este trabajo trata sobre una nueva metodología para el cálculo del escurrimiento mediante la utilización de una serie homogénea de registros hidrométricos (25 años), mejor fundamentada técnicamente y con mayor precisión de los resultados.

En los últimos 20 años el cálculo del escurrimiento medio anual para un período largo de tiempo se ha efectuado utilizando datos de observaciones hidrométricas cuando éstas existen, y –en los casos de no disponer de la información necesaria– mediante la conocida ecuación del balance hídrico adaptada a las condiciones de Cuba, así como por fórmulas y ecuaciones deducidas a partir de los datos hidrológicos.

Los nomogramas de Matakiev (1973), elaborados con datos de 17 estaciones hidrométricas y con 2-3 años de observaciones, permiten determinar la lámina de escurrimiento conociendo la lluvia media anual y la altura media de la cuenca. Se sabe que dada la poca información hidrométrica recopilada por el citado autor y el procedimiento técnico utilizado al sustituir la temperatura media del aire –en la fórmula de Turc– por la altura media de la cuenca, se obtenían resultados aceptables pero requerían la ulterior revisión de los nomogramas propuestos.

Más adelante, el autor (1980), elaboró un sistema de ecuaciones para determinar la lámina de escurrimiento medio anual ( $Y$ ) en función de las precipitaciones ( $P$ ) y la altura media de la cuenca ( $H_m$ ). Para deducir las ecuaciones de cálculo se emplearon los escurrimientos de 58 estaciones hidrométricas calculadas por las relaciones lluvia-escurrimiento.

La lluvia promedio de cada cuenca para un período largo de tiempo se obtuvo utilizando datos de registros pluviométricos y empleando los métodos de Thiessen e isoyético y su comparación con el mapa isoyético de 42 años (1975).

Es conocido que las relaciones lluvia-escurrimiento generalmente son complicadas y están determinadas en lo fundamental por la cantidad, intensidad y distribución de las lluvias en la cuenca, así como por otra serie de factores tales como las condiciones de humedad antecedente, la alimentación subterránea y las extracciones de agua que contribuyen a indefiniciones no explicables.

La metodología elaborada (1980) tiene limitaciones de aplicación para algunos valores extremos de lluvias y alturas medias de las cuencas y, además de esto, fue hecha hace más de una década.

La recopilación sistemática de información hidrológica permite actualmente adecuar a un período común los datos de las cuencas con observaciones directas. De esta forma se han recopilado los gastos líquidos de 58 estaciones hidrométricas para un período común de 25 años, comprendidos entre los años 1964 y 1988. Debe señalarse que el completamiento de algunos años faltantes se realizó por relaciones entre los escurrimientos de cuencas análogas en su mayoría. Sólo en unos pocos casos se emplearon relaciones lluvia-escurrimiento para la restitución de los gastos correspondientes.

Por otra parte, el período 1964-1988 es suficiente para la deducción de un sistema de ecuaciones para el cálculo del escurrimiento medio anual, ya que dentro de estos años han ocurrido años secos, medios y húmedos y, además, los valores a obtener serán más confiables que los resultantes de las relaciones lluvia-escurrimiento. Los valores de lluvia media anual para cada cuenca se tomaron de los cálculos pluviométricos, utilizando los métodos arriba mencionados y empleando la información de los pluviómetros situados en las cuencas y los trabajos realizados durante el proceso de elaboración de la Sección de clima del Nuevo Atlas Nacional de Cuba (1989). En la Tabla 1 puede verse los datos de 58 cuencas estudiadas y utilizadas en el presente trabajo.

Tabla 1. Datos de las cuencas estudiadas

Nº	Río – Estación hidrométrica	A (km <sup>2</sup> )	Hm (m)	P (mm)	Q <sub>o</sub> (m <sup>3</sup> /s)
1	Cuyaguaje - V Aniversario	145	178	1 720	3,93
2	Cuyaguaje - La Güira	279	184	1 680	6,80
3	Cuyaguaje - Portales	502	170	1 650	11,7
4	San Juan y Martínez - El Tabaco	62	177	1 700	1,71
5	Hondo - Pilotos	84	172	1 728	1,92
6	Guamá - Hoyo de Gumá	41	210	1 660	1,05
7	Paso Viejo - La Conchita	113	140	1 600	2,42
8	Mani Maní - El Hidrólogo	79	228	1 850	2,41
9	Caimito - El Central	40	198	1 794	1,19
10	San Diego -Los Gavilanes	157	165	1 660	2,87
11	Los Palacios -El Rosario	102	270	1 700	2,69
12	Bacunagua - Santo Domingo	55	296	1 824	1,73
13	San Cristóbal - La Campana	96	269	1 835	2,87
14	Santa Cruz - Santa Ana	27	367	1 980	1,23
15	Taco Taco - El Jardín	25	369	1 960	0,99
16	Jaruco - Las Cávilas	44	119	1 400	0,51
17	Canímar - Paso Las Piedras	252	116	1 390	2,75
18	Camajuani - Paso Ibarra	154	140	1 450	2,21
19	Sagua la Grande - Rodrigo	726	114	1 443	6,90
20	Damuji - Rodas	848	52	1 379	8,34
21	Jabacoa — Pte. Carretera	136	41	1 434	1,42
22	Caunao - San Fernando de Camarones	314	111	1 475	3,30
23	Agabama - Sopimpa	842	178	1 470	9,28
24	Zaza - Paso Ventura	848	159	1 450	9,35
25	Yayabo - B. Arias	70	206	1 600	1,05

Tabla 1. Datos de las cuencas estudiadas (continuación)

Nº	Río – Estación hidrométrica	A (km <sup>2</sup> )	Hm (m)	P (mm)	Q <sub>o</sub> (m <sup>3</sup> /s)
26	Jatibonico del Norte - El Rio	192	197	1 528	3,33
27	Chambas - Pte Carretera	187	139	1 540	3,32
28	Saramaguacán - Santa Rita	280	100	1 400	2,19
29	Cayojo - Cayojo	78	92	1 243	0,47
30	Jobabo - Jobabo	343	78	1 272	2,13
31	Sevilla -La Fortaleza	565	93	1 325	3,84
32	Aguas Blancas - Limones	124	88	1 270	0,81
33	Chaparra - El Roble	395	95	1 200	2,19
34	Gibara - El Jobo	84	163	1 340	0,71
35	Sagua de Tánamo - El Infierno	325	401	1 620	5,20
36	Mayarí - Río Arriba	1 060	350	1 510	10,01
37	Camazán - Limoncito	54	210	1127	0,23
38	Yareyal - Yareyal	23	132	1 250	0,15
39	La Rioja - Moscones	175	110	1 100	0,61
40	Jaguaní - Arroyo Prieto	182	601	2 709	9,91
41	Cauto - Salto Travesía	2 272	237	1 270	11,2
42	Cauto - Cauto Cristo	4 684	188	1 150	15,4
43	Salado - San Carlos	2 140	77	1 032	4,58
44	Bayamo - La Bayamesa	540	481	1 680	6,65
45	Cautillo - La Fuente	92	466	1 607	1,37
46	Buey - San Miguel	73	611	2 159	2,66
47	Jibacoa - Praga	42	308	1 936	0,96
48	Guá - Buenavista	56	260	1 796	0,98
49	Bayamo - La Virgen	143	700	2 238	4,61
50	Baconao -Trucucú	167	491	1 500	1,78
51	Jaibo - Marianal	163	245	1 340	1,36
52	Bano - Santa Rosa	128	325	1 600	1,64
53	Guaso - Caguairanes	63	463	1 670	1,17
54	Toa - El Toro	326	580	1 972	6,64
55	Toa - Aguacate	753	562	2 482	31,0
56	Yateras - Palenquito	144	598	1 423	1,74
57	Yateras - Yuraguana	478	456	1 275	3,66
58	Guantánamo - Santa Sofía	506	207	1 300	2,48

A, Hm - área y altura media de la cuenca, respectivamente; P-precipitación media anual;  
Q- gasto medio anual

Partiendo de los escurrimientos correspondientes al período 1964-1988 (Tabla 1) en cada cuenca fluvial se han analizado cuáles son los factores que influyen en la formación del escurrimiento fluvial de los ríos de Cuba, y cuál es la forma de relación entre ellos.

Las correlaciones múltiples de escurrimiento, lluvia, área de la cuenca y altura media, resultan aceptables y presentan buenos coeficientes de correlación, pero las diferencias entre los datos observados con los calculados son considerables. Por esta razón, se ha estudiado la distribución físico-geográfica de las cuencas y el análisis de sus elementos principales (área de la cuenca, precipitación y altura media de la cuenca), llegando a los siguientes resultados:

1. *Existe una buena correlación entre el módulo de escurrimiento medio anual (Mo) y las precipitaciones (P), pero ésta no es lineal, sino de tipo parabólico.*

En la Fig.1 puede observarse que, a pesar de existir cierta dispersión de los puntos, la correlación es aceptable ( $r=0.87$ ). Partiendo de este gráfico –con el objetivo de lograr

mayor precisión en los cálculos— y, teniendo en cuenta que en el trabajo anterior elaborado por el autor (1980) existía, en forma muy marcada, una diferenciación entre la región oriental y el resto del territorio cubano, se ha aplicado este mismo esquema para delimitar los puntos del gráfico y ver su agrupación geográfica, por tanto:

2. *La correlación entre el módulo de escurrimiento medio anual ( $M_o$ ) y las precipitaciones ( $P$ ) para los ríos de las regiones Occidental y Central (Fig. 2) es más precisa que la obtenida para todo el territorio (Fig. 1).*
3. *En la región Oriental deben considerarse dos relaciones  $M_o=f(P)$ , que se nombrarán: Oriental 1 y 2, la primera para  $P<1500$  mm y  $H_m<250$  m.s.n.m., (Fig.3). La segunda (Oriental 2) acotada en  $P>1500$  mm y/o  $H_m>250$  m.s.n.m., (Fig. 4).*

En el mapa de la Fig. 5 puede verse la situación de las 58 estaciones empleadas en este trabajo y la representación aproximada de las regiones hidrológicas.

4. Se propone un sistema de ecuaciones de tipo parabólico para calcular el escurrimiento medio anual cuando no existan observaciones hidrométricas.

I. Para los ríos de las regiones Occidental y Central:

$$M_o = 1.15P^{4.74} * 10^{-14} \quad r=0.91 \quad (1)$$

II. Para los ríos de la región Oriental 1:

Si  $P<1500$  y  $H_m<250$  m.s.n.m.,

$$M_o = 0.258P^{3.65} * 10^{-10} \quad r=0.95 \quad (2)$$

III. Para los ríos de la región Oriental 2:

Si  $P>1500$  mm y/o  $H_m>250$  m.s.n.m. (Se cumplen ambas condiciones o una de ellas)

$$M_o = 2.53P^{2.72} * 10^{-8} \quad r=0.92 \quad (3)$$

El resultado de la aplicación de estas ecuaciones y su comparación con los escurrimientos observados, así como los errores mínimos, máximos y sistemáticos para las distintas regiones pueden verse en las tablas 2, 3 y 4.

Si el río se seca durante 5 meses (diciembre a abril) teniendo en cuenta las mismas condiciones planteadas sobre lluvia y altura media se recomienda aplicar las ecuaciones siguientes:

Iª. Para las regiones Occidental y Central:

$$M_o = 0.805P^{4.74} * 10^{-14} \quad (4)$$

II<sup>a</sup>. Para la región Oriental 1:

$$M_o = 0.178P^{3.65} * 10^{-10} \quad (5)$$

III<sup>a</sup>. Para la región Oriental 2:

$$M_o = 1.75P^{2.72} * 10^{-8} \quad (6)$$

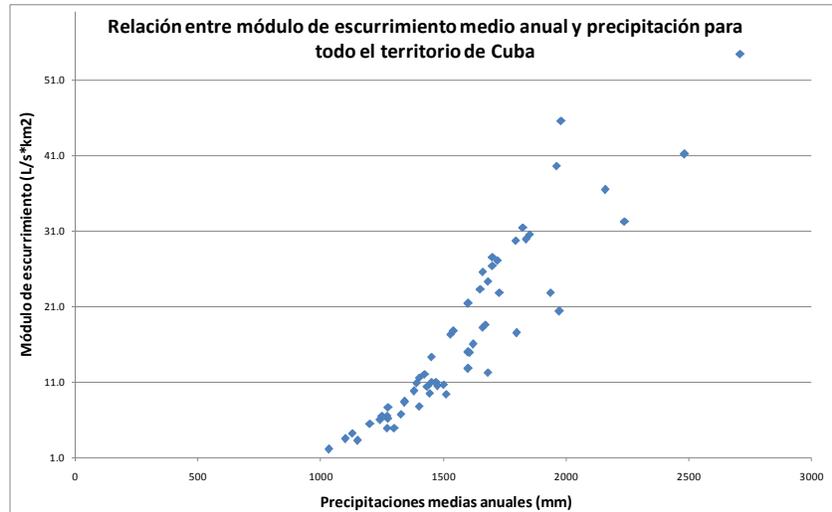


Figura 1. Relación entre módulo de escurrimiento medio anual y precipitaciones para todo el territorio de Cuba

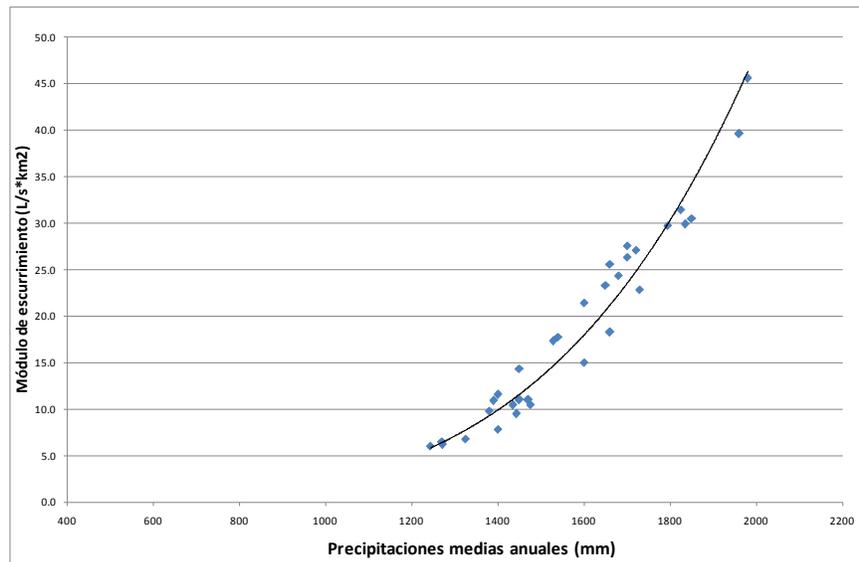


Figura 2. Relación entre el módulo de escurrimiento medio anual ( $M_o$ ) y la precipitación ( $P$ ) en las regiones Occidental y Central

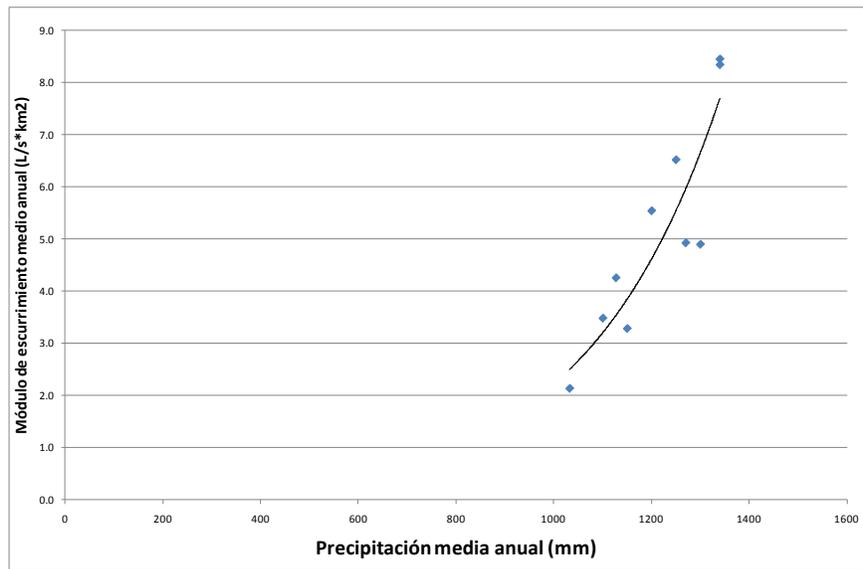


Figura 3. Relación entre el módulo de escurrimiento medio anual (Mo) y la precipitación (P) en la región Oriental 1

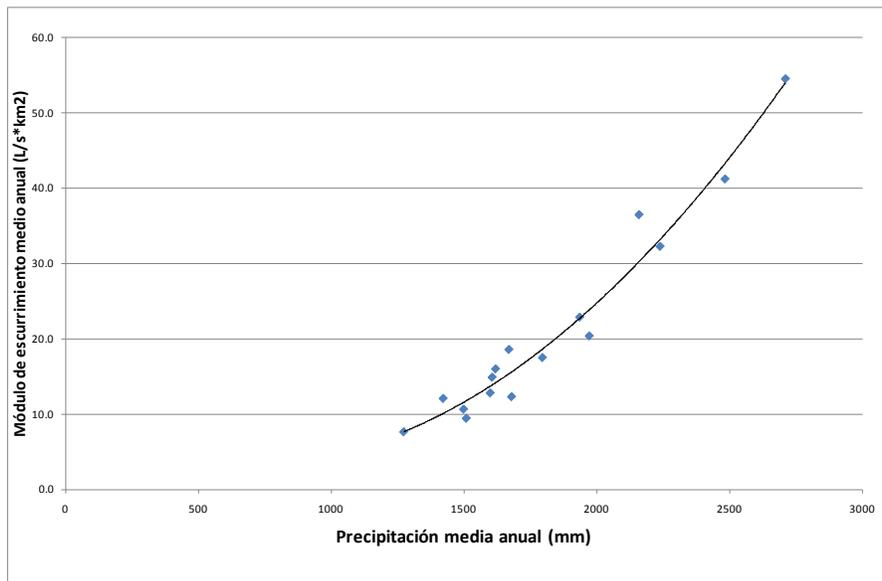


Figura 4. Relación entre el módulo de escurrimiento medio anual (Mo) y la precipitación (P) en la región Oriental 2

Tabla 2. Comparación entre el módulo de escurrimiento medio anual calculado por observaciones directas (Mo) y el obtenido por la ecuación (1) para las regiones Occidental y Central (Mo\*)

<b>N°</b>	<b>A</b>	<b>Mo</b>	<b>Mo*</b>	<b>%</b>
1	145	27,1	24,95	-8
2	279	24,37	22,32	-8
3	502	23,31	20,49	-12
4	62	27,58	23,61	-14
5	84	22,86	25,51	12
6	41	25,61	21,09	-18
7	113	21,42	17,21	-17
8	79	30,51	35,24	16
9	40	29,75	30,47	2
10	157	18,28	21,09	15
11	102	26,37	23,61	-10
12	55	31,45	32,96	5
13	96	29,9	33,91	13
14	27	46,07	48,63	6
15	25	39,6	46,34	17
16	44	11,59	9,40	-19
17	252	10,91	9,09	-17
18	154	14,35	11,11	-23
19	726	9,50	10,85	14
20	848	9,83	8,75	-11
21	136	10,44	10,54	1
22	314	10,51	12,04	15
23	842	11,02	11,85	8
24	848	11,03	11,11	1
25	70	15,0	17,71	18
26	192	17,34	14,24	-18
27	187	17,75	14,78	-17
28	280	7,82	9,40	20
29	78	6,03	5,35	-11
30	343	6,21	5,97	-4
31	565	6,80	7,24	7
32	124	6,53	5,92	-9

**Error**

Promedio .....	12
Sistemático .....	-1,4
Máximo .....	23
Mínimo .....	1

Tabla 3.Comparación entre el módulo de escurrimiento medio anual calculado por observaciones directas (Mo) y el obtenido por la ecuación (2) para la región Oriental 1 (Mo\*)

Nº	A	Mo	Mo*	%
33	395	5,54	4,47	19
34	84	8,45	6,69	21
37	54	4,26	3,56	16
38	23	6,67	5,19	22
39	175	3,49	3,26	7
41	2 272	4,93	5,50	-12
42	4 684	3,29	3,83	-16
43	2 140	2,14	2,58	-21
51	163	8,34	6,69	20
58	506	4,90	5,99	-22

Error

Promedio ..... 16  
 Sistemático ..... +3,5  
 Máximo ..... 22  
 Mínimo ..... 7

Tabla 4.Comparación entre el módulo de escurrimiento medio anual calculado por observaciones directas (Mo) y el obtenido por la ecuación (3) para la región Oriental 2 (Mo\*)

Nº	A	Mo	Mo*	%
35	325	16,0	13,58	15
36	1 060	9,44	11,22	-19
40	182	54,45	55,0	-1
44	540	12,31	15,0	-22
45	92	14,89	13,29	11
46	73	36,44	29,67	19
47	42	22,86	23,64	-3
48	56	17,5	17,98	-3
49	143	32,24	32,71	-1
50	167	10,66	11,02	-3
52	128	12,81	13,13	-2
53	63	18,57	14,75	21
54	326	20,37	23,19	-14
55	753	41,17	43,35	-5
56	144	12,0	9,55	21
57	478	7,66	7,08	8

Error

Promedio ..... 10,5  
 Sistemático ..... +1,4  
 Máximo ..... 22  
 Mínimo ..... 1

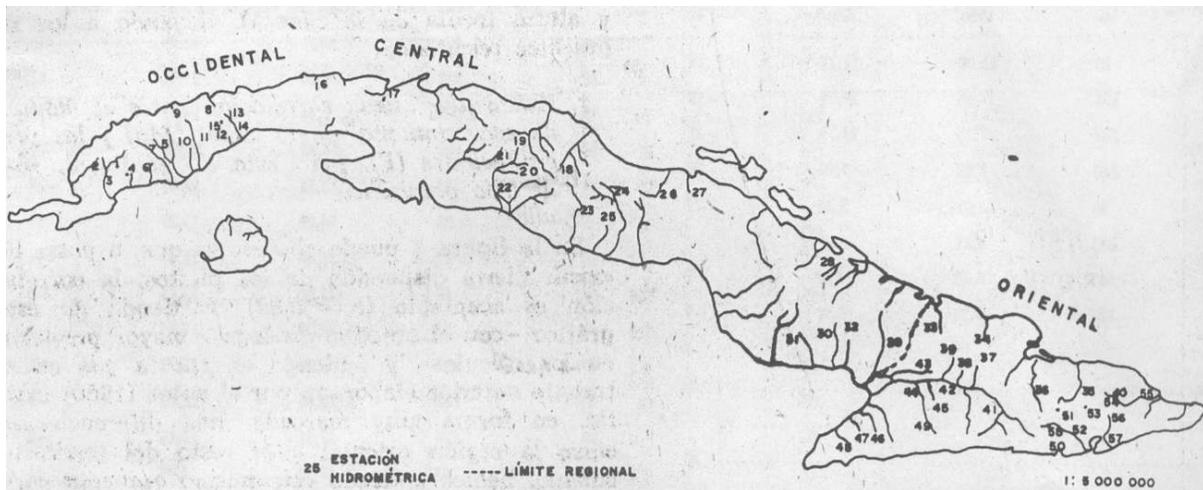


Figura 5. Distribución de estaciones hidrométricas por regiones hidrológicas

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El procedimiento de los datos hidrológicos disponibles en la actualidad posibilita utilizar una serie homogénea de 25 años de observaciones hidrométricas para deducir un esquema de cálculo del escurrimiento medio anual ante la inexistencia de datos de aforos.
2. La metodología para el cálculo del escurrimiento que se emplea en estos momentos fue elaborada hace más de 10 años y presenta limitaciones por acotamiento de lluvia media anual y altura media de la cuenca.
3. Se recomienda calcular el escurrimiento medio anual para un período largo de tiempo, según las ecuaciones 1 al 6, cuando no existan datos de observaciones hidrométricas para ríos con y sin escurrimiento permanente.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Batista, J. L. (1973): "División del territorio en regiones hidrológicas", Revista Voluntad Hidráulica Nos. 28 y 29.

Batista, J. L. (1980): "Esgurrimiento medio anual y su variabilidad", Revista Voluntad Hidráulica No. 58.

Datos hidrométricos e hidrometeorológicos del Archivo del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (1962-1989).

Gagua, G.; Zarembo, S.; Izquierdo, A. (1976): "Sobre el nuevo mapa isoyético" (tercera versión, período de 42 años. Revista Voluntad Hidráulica.

Instituto de Geografía (1989): Nuevo Atlas Nacional de Cuba.

Matakiev, D. (1973): "Esgurrimiento medio hiperanual de los ríos de Cuba", Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.