

OBTENCION DEL TIEMPO DE RETARDO Y DEL TIEMPO DE CONCENTRACION PARA VARIAS CUENCAS DEL DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA

Daniel A. Ruíz C.*

Hernán Materón M.**

COMPENDIO

En este trabajo se encontraron expresiones matemáticas, a partir de cuatro características fisiográficas, que permitieron reproducir la respuesta hidrológica de las cuencas del centro y norte del Departamento del Valle del Cauca en términos de los tiempos de retardo y de concentración. Se consideraron diez áreas de drenaje cuyas corrientes son afluentes del río Cauca. Las áreas oscilan entre 11.63 a 317.5 km². Los resultados obtenidos a partir de métodos calibrados en cuencas extranjeras y con un estudio similar realizado en Antioquia, indicaron diferencias significativas entre estos resultados. Las diferencias fueron más altas en las cuencas de mayor extensión.

ABSTRACT

GETTING THE LAG TIME AND THE CONCENTRATION TIME FOR VARIOUS BASIN OF THE VALLE DEL CAUCA DEPARTMENT

In this work were found mathematical expresions, upon four physiografic characteristics that allow the hidrological response of the central and north basins of the Valle del Cauca in terms of the lag and concentration time. Ten areas of drainage which currents are affluents of the Cauca river were considered. The areas go from 11.63 to 317.5 km². The results obtained from the calibrated methods in basis of other countries and with a similar method made in Antioquia, Colombia, indicated significant differences between these results. The differences are higger in basins of more extension.

1. INTRODUCCION

En Colombia, los sistemas de drenaje natural, cuencas hidrográficas, y los sistemas de drenaje artificial, cuencas urbanas, se caracterizan por ser zonas con información hidrológica escasa. El Departamento del Valle del Cauca, a pesar de la red existente de estaciones hidrometeorológicas rurales y urbanas no escapa a esta situación, razón por la cual, se recurre a menudo a la utilización de técnicas de regionalización que permiten el dimensionamiento y operación de las obras hidráulicas para el control y aprovechamiento racional del recurso agua.

En el diseño de estructuras hidráulicas uno de los parámetros básicos es el caudal máximo que podría soportar la estructura para un período de retorno seleccionado, esto puede ocurrir a nivel de pequeños subsistemas de drenaje natural o artificial, áreas de afluencia, o a nivel de sistemas complejos de drenaje. Los métodos inherentes a las técnicas de regionalización que permiten su cálculo involucran los parámetros hidrológicos denominados tiempo de retardo (Tl) y tiempo de concentración (Tc). En Colombia, estos parámetros prácticamente no se han determinado, y en su ausencia, se han utilizado modelos matemáticos desarrollados principalmente en los

* Estudiante de pre-grado. Universidad Nacional de Colombia, Seccional Palmira y Universidad del Valle.

** Profesor Asistente. Universidad del Valle. A. A. 25360.

Estados Unidos, sin tener en cuenta que ellos han sido calibrados en cuencas con características fisiográficas e hidrológicas diferentes a la de nuestros ríos.

El presente trabajo desarrolla una metodología que conduce a la obtención de expresiones matemáticas que permiten el cálculo de los tiempos T_1 y T_c , a partir de cuatro características fisiográficas del área de drenaje considerada. Dicha metodología, se basa en la correlación existente entre el área de la zona de drenaje, la longitud del cauce principal y la longitud característica, prácticamente constantes, con las características hidrológicas de la zona de drenaje, tales como la estructura geológica, geográfica, cantidad y distribución de la precipitación, los efectos del viento, la temperatura y la humedad relativa, estas últimas presentan el carácter de aleatorias. Las características mencionadas están condensadas en el hidrograma de escurrimiento, por ser este una expresión integral de las características climáticas y fisiográficas que gobiernan la relación entre la lluvia y el escurrimiento superficial de una cuenca específica (Chow, 1).

La obtención de este tipo de expresiones involucrando las características propias de la zona, permite reproducir los valores para T_1 y T_c más aproximados a la realidad. Por tal razón, el manejo y conservación de los recursos hídricos estarán basados en datos más confiables. Por otra parte, al ser aplicada esta metodología con una frecuencia de cinco años, permitirá realizar una evaluación del impacto del grado de erosión, del uso del suelo y de los efectos de los procesos de urbanización de la cuenca sobre los escurrimientos. Por último, el dimensionamiento de estructuras hidráulicas, canales de riego y drenaje, etc., será más compatible con el comportamiento del área de drenaje.

2. METODOLOGIA

La zona de estudio se encuentra localizada en el Departamento del Valle del Cauca, entre

los $3^{\circ} 00'$ a $4^{\circ} 30'$ de latitud norte. Como base topográfica, se utilizaron planos del IGAC, con escalas adecuadas para la óptima ubicación de las estaciones hidrométricas y meteorológicas existentes en el área de interés. Para el conjunto de las catorce cuencas hidrográficas originalmente seleccionadas, se recopilaron de los archivos de la CVC, los pluviogramas y limnigramas asociados con los eventos característicos de precipitación-caudal ocurridos en los últimos 10 años de registro. Para el procesamiento de la información, se utilizó un microcomputador IBM serie 50.

La determinación de las características fisiográficas consistió en la ubicación de estaciones hidrométricas, trazado de las líneas parteaguas, identificación de áreas receptoras, y medición de la extensión de cada una de las áreas mediante el uso del planímetro. Se determinaron la longitud del cauce principal, longitud característica y pendiente del cauce principal.

La determinación de las características hidrológicas se indicó con la selección de períodos de registro. El análisis de cada evento requirió el registro del limnógrafo y mínimo un registro de pluviógrafo correspondiente a una estación ubicada dentro del área de drenaje considerada.

Inicialmente se consideraron catorce áreas de drenaje cuyos cauces son afluentes del río Cauca. Cuatro de ellas se descartaron porque no eran lo suficientemente compatibles con los eventos registrados por el limnógrafo. Las cuencas descartadas pertenecen a los ríos Tulúa, Palo, Ovejas y Timba. Las diez áreas de drenaje analizadas corresponden a los ríos Melendez, Aguacatal, Cali, Cañavalejo, Jamundí, La Paila, Guadalajara, Lili, Obando y quebrada Los Micos. Las diez áreas seleccionadas presentan cierta homogeneidad principalmente en los siguientes aspectos: tamaño, orientación con respecto al sol, elevación media y tipo de suelo.

Como criterios de selección de eventos, se optó por el análisis de limnigramas aislados,

esto facilitó la identificación de la precipitación que originó la respectiva crecien- te. También, se consideró la humedad precedente del suelo.

Ubicado el evento en el limnigrama, se tomaron lecturas del nivel del agua con intervalos pequeños, 15 o 30 minutos, en el inicio de la curva de ascenso y en la cresta, y de una hora en la curva de descenso. A partir de la curva de calibración de la sección de aforos (Q, H), se transformaron limnigramas (H, t) en hidrogramas (Q, t). Luego se graficaron en papel semilogaritmico los hidrogramas, se separaron el caudal base del escurrimiento directo, también se calcularon los volúmenes de excesos y las precipitaciones efectivas. Las determinaciones se procesaron según metodología sugerida por Chow (1).

A partir de los valores registrados en las diferentes estaciones pluviométricas y pluviográficas, situadas dentro y fuera de la cuenca, se determinaron los hietogramas medios de las cuencas (I, t). En forma complementaria, se generaron los hietogramas de excesos mediante el uso de la técnica de los índices de infiltración (θ), según metodología descrita por Linsley et al (2).

Para la medición del tiempo de retardo (T1), se adoptó la definición citada por Ramachandra (3), entonces se midieron los tiempos desde el centro de masas de las lluvias de excesos a los picos de los hidrogramas de escurrimiento directo. Para la medición del tiempo de concentración (Tc) se estableció como el tiempo transcurrido entre el final del hietograma de excesos y el final del escurrimiento directo. Se adoptó esta definición ya que es práctica su medición y aparece reseñada en la literatura con mayor frecuencia.

A fin de conformar la matriz de datos, se procedió a seleccionar los valores T1 y Tc para cada cuenca. De cada evento de precipitación-caudal se obtuvo una pareja de valores T1 y Tc. Para incluir el único valor de estos

parámetros en la matriz de datos, se conformó un histograma de frecuencias, eliminando los resultados más dispersos con relación a la tendencia central, el centroide de cada histograma se consideró como valor representativo para el área analizada.

La matriz de datos (Cuadro 1) estuvo conformada por las características fisiográficas de cada área de drenaje, y por los valores medios de T1 y Tc, extraídos de los histogramas de frecuencia.

El análisis de la información condensada en la matriz de datos se llevó a cabo, utilizando un programa de regresión múltiple, Software facilitado por la CVC. Para evaluar el efecto en la regresión múltiple, tanto del número de características fisiográficas consideradas como de el número de cuencas, se consideró un total de 88 posibilidades para cada uno de los tiempos T1 y Tc. La distribución consta de 8 registros y 11 selecciones.

Con los registros se buscó analizar la incidencia de las áreas de drenaje correspondientes a los ríos Aguacatal, Cañaveralejo y Quebrada Los Micos, por presentar mayor dispersión en los valores de T1 y Tc medidos con respecto a las otras 7 áreas de drenaje.

Los registros se desglosaron en la siguiente forma:

1. Considera todas las áreas de drenaje;
2. Excluye Aguacatal;
3. Excluye Quebrada Los Micos;
4. Excluye Cañaveralejo;
5. Excluye Aguacatal y Quebrada Los Micos;
6. Excluye Aguacatal y Cañaveralejo;
7. Excluye Quebrada Los Micos y Cañaveralejo;
8. Excluye Aguacatal, Quebrada Los Micos y Cañaveralejo.

Con las selecciones se plantearon todas las posibilidades de combinación de las cuatro características fisiográficas: área de drenaje (A); longitud del cauce principal (L); pendiente del cauce principal (S); longitud sobre el cauce principal medido desde la estación de aforos hasta el centroide de la cuenca (Lc). Las selecciones fueron: 0. Incluye A, L, S y Lc; 1. Ex-

Cuadro 1
Matriz de datos

Cuenca	Area (km ²)	Long (km)	Pend (o/o)	Long - carac (km)	T ₁ obs (hor)	Tc obs (hor)
Meléndez	39.21	17.04	9.74	12.56	1.67	9.25
Guadalajara	114.53	13.55	10.72	8.45	1.33	11.82
Lilí	18.11	11.10	6.61	6.10	2.23	7.59
O. Obando	35.68	16.18	2.76	9.22	3.00	12.50
La Paila	317.55	34.75	2.60	17.00	6.67	20.33
Q. Micos	32.68	9.38	0.93	4.70	9.63	19.50
Jamundí	60.30	25.37	5.92	18.17	1.83	12.00
Calí	124.70	26.30	5.71	13.40	2.50	13.00
Cañaveralejo	11.63	4.20	15.78	2.13	1.01	6.00

Cuadro 2
Ejemplo de resultados

Regresión múltiple							
Variables Ind. No.	Media	Desviación estandar	Correlación X vs. Y	Coefficiente regresión	Error Coef. regres.	Valor T calculado	Nombre variable
1	3.945228	1.029371	0.3523628	8.567184 E-02	0.1647561	0.5199919	A
2	2.706406	0.6384651	0.3315312	0.7059525	0.9041709	0.7807733	L
3	1.634934	0.8714416	- 0.9578231	- 0.7280563	0.1147042	- 6.347251	S
4	2.147364	0.6891897	0.1968818	- 0.6684683	0.7048936	- 0.9483249	Lc
Dependiente 5	0.9324084	0.7336163					T ₁

Intercepto = 1.309589
Correlación múltiple = 0.9750737
Error de estimación = 0.2301996

Análisis de la varianza para la regresión

Fuente de variación	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrados	Valor F
Atribuible para regres.	4	4.093575	1.023394	19.31228
Desviación de regresión	5	0.2119675	5.299187 E-02	
Total	8	4.305542		

Numero de selección = 1

Tabla de residuos

Observación No.	Valor de Y	Estimación de Y	Residuo
1	0.5128236	0.2768833	0.2359403
2	0.2851789	0.4020764	- 0.1168974
3	0.8020016	0.6731438	0.1288579
4	1.098612	1.35698	- 0.2583673
5	1.89762	1.718379	0.1792408
6	2.264883	2.206976	5.790758 E-02
7	0.604316	0.7103957	- 0.1060797
8	0.9162907	1.027914	- 0.1116232
9	9.950254 E-03	1.892883 E-02	- 8.978572 E-03

cluye A; 2. Excluye L; 3. Excluye S; 4. Excluye Lc; 5. Incluye S y Lc; 6. Incluye L y Lc; 7. Incluye L y S; 8. Incluye A y Lc; 9. Incluye A y S; 10. Incluye A y L.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Tiempo de retardo T1

De la matriz de datos surgieron 176 posibilidades por considerar en el análisis de regresión múltiple, de los cuales sólo se adjunta la que representó el mayor coeficiente de regresión múltiple para T1 (Cuadro 2). En los Cuadros 2, 3, 4 y 5 se colocó una cifra debajo de cada coeficiente de correlación múltiple, la cual indica la posición de dicho coeficiente dentro del registro o selección que se esté considerando. El número 4 corresponde al mayor valor y en orden decreciente hasta el número 1 que indica el cuarto lugar del coeficiente dentro del registro o selección considerado.

Los coeficientes de regresión múltiple más altos se presentaron en el registro 2, con un valor máximo de 0.9750742 correspondiente a la selección 0; lo cual permitió identificar a la cuenca del río Aguacatal como la de mayor dispersión en los valores medidos (Cuadro 3).

En los registros donde se excluyó la cuenca del río Aguacatal (5, 6 y 8), aparecieron los valores más altos del coeficiente de regresión múltiple, r . La eliminación de las cuencas de los ríos Cañaveralejo y Quebrada Los Micos, redujo el valor de r , por tanto los tiempos de retardo medidos son confiables.

En cuanto a la incidencia de las características fisiográficas, la selección 0 presentó los mayores valores de r para todos los registros, aunque en forma aislada L, Lc y A no tuvieron mayor peso en la regresión.

El seguimiento de los valores de r en cada registro, permitió visualizar la importancia del gradiente hidráulico (S) dentro del cálculo

de T1. En aquellas selecciones donde se suprimió, la dispersión se hizo mayor resultando valores de r entre 0.269 y 0.884.

El área de drenaje no tuvo mayor incidencia en la regresión, al suprimir dicho parámetro, selección 1, el valor mínimo registrado de r fue igual a 0.8898.

La tendencia de L es similar a la presentada por A, esto indica que no es indispensable su presencia en la regresión en forma aislada, ya que éste interviene en el cálculo de S. El comportamiento de la longitud, Lc, fue semejante al de L y A (Cuadro 4).

La expresión final obtenida para el cálculo del tiempo de retardo fue:

$$T1 = 3.7046 A^{0.08567} L^{0.7059} S^{-0.728} Lc^{-0.66847}$$

donde: T1 en horas, A en km², L en km., S en o/o y Lc en km.

Esta expresión presentó un error de estimación igual a 0.23019 (Figura 2).

3.2. Tiempo de concentración Tc

En el Cuadro 5 se aprecia la incidencia de las cuencas de los ríos Aguacatal y Quebrada Los Micos. Para el registro 5, en donde fueron excluidas, aparecieron los valores más altos del coeficiente de regresión múltiple, por tanto los valores medidos de Tc, presentaron mayor dispersión con respecto a los valores obtenidos para las demás cuencas. En el registro 8, aparte de excluir las anteriores, se suprimió la del río Cañaveralejo, y es aquí donde se presentó el máximo valor para r (0.998611) correspondiente a la selección 0.

Al ser excluidas estas cuencas en forma individual, registros 2 y 3, aumentó el grado de correlación, pero disminuyó al excluir la cuenca del río Cañaveralejo, lo que implica mayor confiabilidad en los valores medidos de Tc para dicha cuenca.

Cuadro 3

Tiempo de retardo. Efecto de las cuencas

		R REGISTRO							
Selección		1	2	3	4	5	6	7	8
	Todas las cuencas	Excluye Aguacatal	Excluye Q. Micos	Excluye Cañaveralejo	Excl. Agua y Q. Micos y Cañaveral.	Excl. Agua y Cañaveral.	Excl. Q. Micos y Cañaveral.	Exc. Agua, Q. Micos y Cañaveral.	
0	A L S Lc r Peso	0.941796	0.9750742 ‡	0.9091343	0.9315049	0.958621 2	0.967984 3	0.889979	0.9417896 1
1	L S Lc r Peso	0.9399876	0.9733659 ‡	0.9090545	0.9293266	0.9584119 2	0.9656818 3	0.889838	0.9415094 1
2	A S Lc r Peso	0.9327948 1	0.9712191 ‡	0.8756543	0.9229033	0.9456087 2	0.9629778 3	0.8524	0.9236247
3	A L Lc r Peso	0.69555	0.67447	0.8841142 3	0.74599	0.9068282 4	0.74334	0.856521 1	0.8701079 2
4	A L S r Peso	0.9283216 1	0.9693816 ‡	0.8677	0.921794	0.9421439 2	0.9616632 3	0.85478	0.9216942
5	S Lc r Peso	0.9115164 1	0.9590709 ‡	0.83423	0.9028	0.9221893 2	0.9485598 3	0.81428	0.89308
6	L Lc r Peso	0.68718	0.66272	0.872455 3	0.74407	0.8910631 4	0.74045	0.842198 1	0.8507524
7	L S r Peso	0.9141533 1	0.9611876 ‡	0.84405	0.911437	0.9275134 2	0.9533561 3	0.84248	0.90809
8	A Lc r Peso	0.3976	0.36903	0.6424396 3	0.484423	0.6698724 4	0.48532	0.532488 2	0.4924802 1
9	A S r Peso	0.9239851 1	0.9676351 ‡	0.86307	0.92179	0.94048 2	0.961468 3	0.8521	0.92167
10	A L r Peso	0.364397	0.35889	0.6988035 3	0.26946	0.7391669 4	0.246988	0.64953 2	0.6201203 1

Cuadro 4

Tiempo de retardo. Efecto de las características fisiográficas

Selección	REGISTRO								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	Todas las cuencas	Excluye Aguacatal	Excluye Q. Micos	Excluye Cañaveralejo	Excl. Agua y Q. Micos	Excl. Agua y Cañaver. y Cañaver.	Excl. Q. Mic. y Cañaver.	Excl. Agua, Q. Mic. y Cañaver.	
A									
0	L r S Lc	0.9417964 4	0.9750742 4	0.9091343 4	0.9315049 4	0.9586209 4	0.9678842 4	0.8899792 4	0.9417896 4
1	L r S Lc	0.9399876 3	0.9733659 3	0.9090545 3	0.9293266 3	0.9584119 3	0.9636818 3	0.8898382 3	0.9415094 3
2	A r S Lc	0.9327948 2	0.9712191 2	0.8756543 1	0.9229033 2	0.9436087 2	0.9629778 2	0.8524 2	0.9236247 2
3	A r L Lc	0.69335	0.67447	0.8841142 2	0.74599	0.90683	0.74334	0.8565206 2	0.8701079
4	A r L S	0.9283216 1	0.9693816 1	0.8677	0.921794 1	0.9421439 1	0.9616632 1	0.8547861 1	0.9216942 1
5	S r Lc	0.9115164	0.9590709	0.83423	0.9028	0.9221893	0.9483598	0.81428	0.89308
6	L r Lc	0.68718	0.66272	0.87246	0.74407	0.8910631	0.74043	0.8421978	0.8507524
7	L r S	0.914153	0.9611876	0.84405	0.911437	0.9275134	0.953356	0.84248	0.90809
8	A r Lc	0.3976	0.36903	0.64244	0.48423	0.6698724	0.48532	0.532488	0.4924802
9	A r S	0.923985	0.967635	0.86507	0.92179	0.94048	0.961468	0.8521	0.92167
10	A r L	0.364397	0.35889	0.69880	0.26946	0.7391669	0.246988	0.649533	0.620120

Cuadro 5
Tiempo de concentración. Efecto de las cuencas

Selección	REGISTRO							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Todas las cuencas	Excluye Aguacatal	Excluye Q. Micos	Excluye Cañaveralejo	Exc. Agua y Q. Micos	Exc. Agua y Cañaveralejo	Exc. Q. Micos y Cañaveralejo	Exc. Agua, Q. Micos y Cañaveralejo
0	A L r S Peso Lc	0.9663921 0.9973844 2	0.9612761	0.9559883	0.9973954 3	0.9972471 1	0.9498579	0.9986111 4
1	L r S Peso Lc	0.8939241 1 0.919634 3	0.9054278 2	0.84959	0.9274163 4	0.86650	0.868126	0.8772
2	A r S Peso Lc	0.9616672 0.9864092 2	0.9610904	0.9465795	0.9926322 4	0.9777548 1	0.9489179	0.9899826 3
3	A r L Peso Lc	0.7651 0.76255	0.9408619 3	0.74128	0.96063 4	0.731567	0.91387 1	0.93122 2
4	A r L Peso S	0.963578 0.988329 3	0.961078	0.9485412	0.9920002 4	0.9815013 1	0.947398	0.9863738 2
5	S r Lc Peso	0.869636 2 0.908396 4	0.836378	0.82659	0.88805 3	0.8523739 1	0.78937	0.81832
6	L r Lc Peso	0.732 0.727	0.904786 3	0.66905	0.923104 4	0.6367	0.86457 1	0.86602 2
7	L r S Peso	0.88422 2 0.91738 4	0.875014 1	0.84567	0.914177 3	0.86535	0.851078	0.8672
8	A r Lc Peso	0.715 0.72229	0.920727 3	0.68708	0.946492 4	0.68984	0.8831237 1	0.90599 2
9	A r S Peso	0.959057 0.9858652 2	0.9610776	0.946315	0.9919372 4	0.9773571 1	0.9450872	0.98609 3
10	A r L Peso	0.709 0.7208	0.929729 3	0.62812	0.95502 4	0.63163	0.90252 1	0.92236 2

Cuadro 6

Tiempo de concentración. Efecto de las características fisiográficas

Selección	REGISTRO							
	1 Todas las cuencas	2 Excluye Aguacatal	3 Excluye Q. Micos	4 Excluye Cañaveralejo	5 Excl. Agua y Q. Micos	6 Excl. Agua y Cañaveral.	7 Exc. Q. Micos y Cañaveral.	8 Exc. Agua, Q. Micos y Cañaveral.
0	A L S Lc r Peso 0.9663921 4	0.9973844 4	0.9612761 4	0.9559883 4	0.9975954 4	0.9972471 4	0.9498579 4	0.9986111 4
1	L S Lc r Peso 0.893924	0.9196	0.9054278	0.84989	0.927416	0.86650	0.868126	0.8772
2	A S Lc r Peso 0.9616672 2	0.9864092 2	0.9610904 3	0.9465795 2	0.9926322 3	0.9777548 2	0.9489179 3	0.9889826 3
3	A L Lc r Peso 0.7651	0.76255	0.94086	0.74128	0.96063	0.731567	0.91387	0.93122
4	A L S r Peso 0.9635782 3	0.9883292 3	0.9610778 2	0.9485412 3	0.9920002 2	0.9815013 3	0.9473198 2	0.9863738 2
5	S Lc r Peso 0.869656	0.908396	0.836378	0.82659	0.88805	0.8523739	0.78937	0.81832
6	L Lc r Peso 0.732	0.727	0.904786	0.66905	0.923104	0.6367	0.86457	0.8660218
7	L S r Peso 0.8842199	0.91738	0.8750	0.84567	0.914177	0.86535	0.851078	0.8672
8	A Lc r Peso 0.715	0.72229	0.920726	0.68708	0.94640	0.68984	0.8831237	0.90599
9	A S r Peso 0.9590572 1	0.9858652 1	0.9610776 1	0.946315 1	0.9919372 1	0.9773571 1	0.9450872 1	0.9860899 1
10	A L r Peso 0.709	0.7208	0.929729	0.62812	0.95502	0.63163	0.90252	0.9223

Cuadro 7
Comparación de resultados Tc en horas

Cuenca	T ₀	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₉	T ₁₀	T ₁₀ [^]	T ₁₁	T ₁₂	T ₁₃	T ₁₄	T ₂₀	T ₂₁
Melendez	9.37	3.89	1.59	1.44	3.01	2.82	4.88	4.99		0.80	1.33	1.44	1.52	6.52	5.46	
Guadalajara	11.73	3.22	1.33	1.16	4.90	2.33	3.87		4.60	1.41	1.48	1.08	1.17	1.23	5.50	8.01
Lili	7.70	3.04	1.37	1.20	2.48	2.19	3.23			0.57	1.11	1.21	1.27	5.22	4.26	
Q. Obando	12.30	4.74	2.30	2.25	5.39	3.45	4.87	5.74		1.11	2.08	2.25	2.38	7.78	5.89	
La Paila	20.75	8.51	3.83	4.15	15.68	6.23	10.49	10.10	17.95	5.62	4.14	3.82	4.16	4.38	13.12	13.14
Q. Micos	16.89	3.87	2.30	2.25	8.89	2.80	2.95	6.57		1.45	2.08	2.25	2.38	6.48	6.27	
Jamundí	11.93	5.76	2.41	2.37	4.79	2.94	7.41	4.24	6.16	1.89	1.21	2.18	2.38	2.51	9.26	6.67
Cali	12.74	5.96	2.49	2.47	7.01	3.03	7.70	5.66	8.08	2.49	1.88	2.28	2.48	2.61	9.54	8.73
Cañaveralajo	5.33	1.24	0.56	0.41	1.29	0.75	1.18	0.00		0.34	0.38	0.41	0.43	2.35	3.36	
Aguacatal	10.17	3.69	1.63	1.48	3.65	2.67	4.15	4.68		0.89	1.37	1.49	1.57	6.22	5.57	

Relación de fórmulas para el cálculo del tiempo de concentración

Giandotti	$T_1 = [4 \times A^{-0.5} (km^2) + 1.5 \times L(km)] / [0.8 \times H^{-0.5} (m)]$	Ramser	$T_9 = 0.00013 [L(pie) / S^{-0.5} (dec)]^{-0.77}$
Temez	Restricción: $L/3600 > T_1 (3600 \times 1.5)$	Passini	$T_{10} = 0.13 [A(km^2) \times L(km)]^{-0.33} / S^{-0.5} (dec)$
Ven Te Chow	$T_2 = 0.3 [L(km) / S(dec)]^{0.25} / 0.75$	Passini	$T_{10} = 0.04 [A(km^2) \times L(km)]^{0.33} / S^{-0.5} (dec)$
Kirpich	$T_3 = 0.123 \times [L(km) / S^{0.5} (dec)]^{0.64}$	Guairé	$T_{11} = 0.355 \times A^{-0.595} (km^2) \times S^{-0.298} (m/km)$
Ventura Heras	$T_4 = 1.2 \times L^{-0.75} (m) \times S^{-0.4} (dec)$	Bureau of Reclamation	$T_{12} = 0.886 \times L^{-1.15} (km) \times H^{-0.385} (m)$
Cuervo Ing Usa	$T_5 = a \times [A(km^2) / S(dec)]^{0.5}$	Kirpich	$T_{13} = 3.25 \times 10^{-4} \times L^{-0.77} (m) / 5^{-0.385} (dec)$
Ribeiro	Restricción: $0.03 < a < 0.15$ Valor medio $a = 0.06$	Califormia	$T_{14} = [L^{-3} (km) / H(m)]^{0.385}$
Snyder	$T_6 = 0.21 [L(km) / S^{0.25} (dec)]^{-0.76}$	Carber	$T_{15} = 1.7 \times L^{-0.6} (milla) / S^{-0.3} (pie/milla)$
	$T_7 = 0.3137 \times L(km) / S^{0.04} (o/o)$	Kirpich (Pa)	$T_{16} = 0.0002167 \times L^{-0.77} (pie) / S^{-0.5} (dec)$
	$T_8 = [CT/0.6] \times [L(km) \times LCA]^{-0.3}$	Zuluaga	$T_{20} = 0.658 \times L^{-0.671} (km) / S^{-0.168} (dec)$
	Restricción: $1.35 < CT < 1.65$	Zuluaga	$T_{31} = 1.169 \times A^{-0.365} (km^2) / S^{-0.087}$
	$T_n = 9.86677 \times A^{0.29165} \times L^{-0.539} \times S^{-0.3266} \times Lc^{0.45476}$		

Con relación a las características fisiográficas se presentó la misma tendencia registrada para el tiempo de respuesta. Los mayores grados de correlación aparecieron en la selección 0. La variable S, también fue fundamental en la correlación, ya que los valores de r más bajos figuraron en las selecciones que la excluyen, selecciones 3, 6, 8 y 10. Al excluir el área de la cuenca, selección 1, los coeficientes r disminuyeron pero en proporción menor a la registrada al suprimir la variable S, por tanto su incidencia no fue notoria en la regresión (Cuadro 6).

La influencia tanto de L como de Lc fue muy leve, ya que al suprimir cada una, tanto en forma individual como simultánea, selecciones 2, 4 y 9, los grados de correlación siguieron siendo altos. El mínimo valor de r para éstas tres selecciones fue igual a 0.94658.

La expresión final para el cálculo del tiempo de concentración fue:

$$T_c = 986677 A^{0.29165} L^{-0.539} S^{-0.3266} L_c^{0.45476}$$

donde: Tc en horas, A en km², L en km., S en o/o y Lc en km.

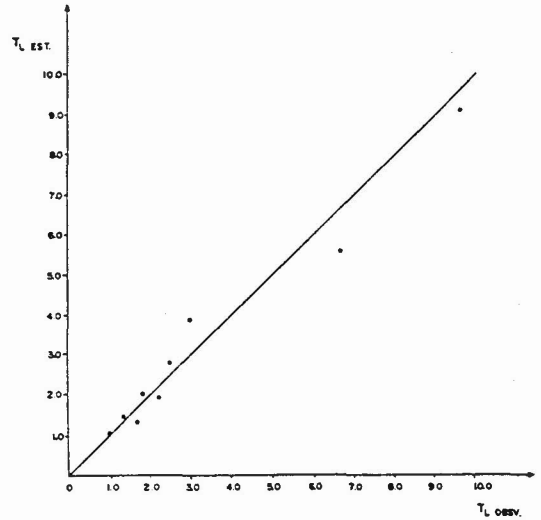
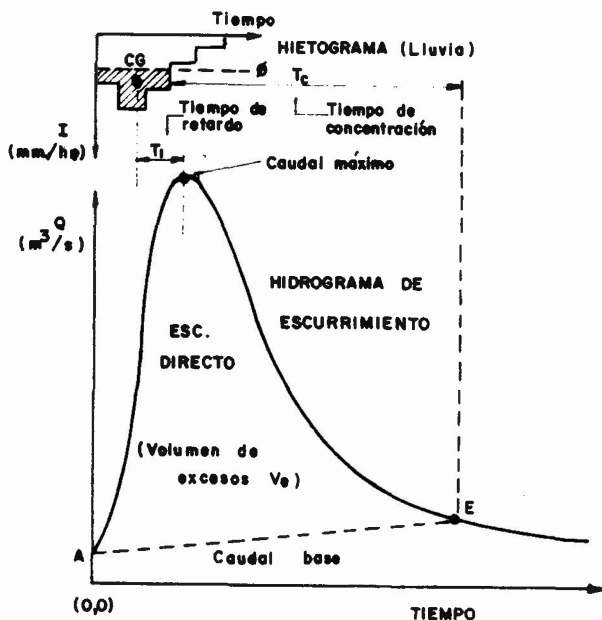


Figura 2. Correlación entre los valores observados y los valores estimados para el tiempo de retardo.

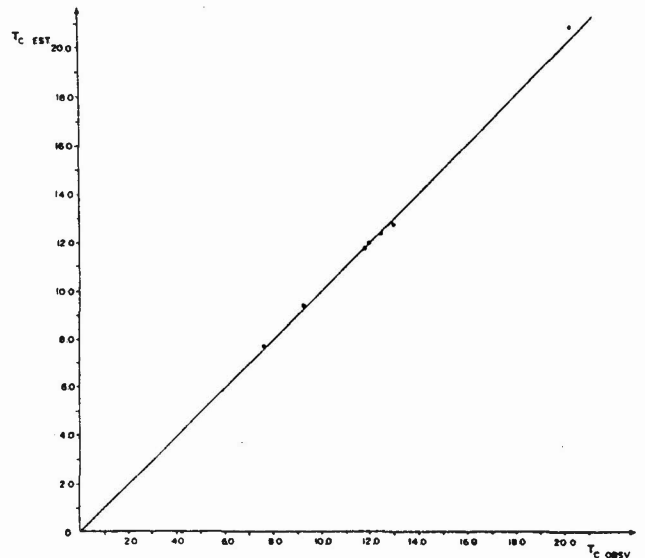


Figura 3. Correlación entre los valores observados y los valores estimados para el tiempo de concentración

El error de estimación fue de 2.794851×10^{-2} (Figura 3).

En el Cuadro 7 aparecen los resultados correspondientes a las fórmulas más utilizadas para el cálculo del tiempo de concentración. El modelo obtenido proporcionó valores muy altos para Tc con respecto a los resultados suministrados por los modelos foráneos.

El modelo desarrollado por Passini (T 10) reprodujo los mayores valores de Tc. Para la cuenca del río La Paila que es la de mayor área, se presentó la mínima diferencia (2.8 horas), a medida que el área disminuyó la diferencia tendió a ser mayor.

Se observó similitud entre los Tc obtenidos a partir de las fórmulas propuestas por Chow (T3) y Kirpich (T4). Al comparar los resultados con el modelo obtenido, se presentó una diferencia mínima del orden de 4.8 horas para el sector del río Cañaveralejo, siendo ésta la más pequeña área de drenaje, y una diferencia máxima de 17 horas para la cuenca del río La Paila, que es la de mayor tamaño.

El modelo obtenido por Zuluaga, en Antioquia, proporciona valores del tiempo de concentración (T20 y T21) inferiores a los obtenidos en este proyecto. Las mayores diferencias se registraron en la cuenca de la Quebrada Los Micos, en ella se presentó la menor pendiente del cauce principal (0.93 o/o), para las demás áreas de drenaje, se presentaron menores diferencias a medida que disminuyó el área.

Los modelos propuestos por Ventura Heras y Ribeiro (T 5 y T 7), proporcionaron valores similares de Tc. Se observa que estos valores presentaron una diferencia que tiende a aumentar para las áreas de drenaje de menor extensión con respecto a los Tc obtenidos con el modelo encontrado.

4. CONCLUSIONES

- 4.1. La literatura consultada mostró la variedad de patrones de medición para el tiempo de retardo T1 y para el tiempo de concentración Tc.
- 4.2. Resultó difícil comparar los resultados entre fórmulas foráneas y el modelo obtenido, cuando se aplican a una misma área de drenaje, ya que los autores consultados no especificaron los crite-

rios o rangos de medición considerados en el desarrollo de su metodología.

- 4.3. Los resultados obtenidos, sumado a los factores mencionados, indicaron la importancia de acoger metodologías que involucren factores propios de cada región.
- 4.4. Por el mayor efecto ponderado que ejerció en la regresión múltiple la pendiente del cauce principal (S), se recomienda incluir éste parámetro en el desarrollo de fórmulas empíricas que permitan el cálculo de T1 y Tc.
- 4.5. Como las expresiones encontradas fueron de carácter regional, se recomienda su aplicación para áreas de drenaje con una extensión inferior a 320 km² ubicadas en las zonas central y norte del Valle del Cauca.
- 4.6. Los coeficientes de las expresiones encontradas no se pueden considerar constantes, se recomienda su evaluación con una frecuencia de cinco años.

5. BIBLIOGRAFIA

1. CHOW, V. T. Runoff . In: Handbook of Applied Hydrology. New York, McGraw-Hill, 1964.
2. LINSLEY, R. K. ; KOHLER, M. A. and PAULUS, J. L. Hydrology for Engineers. New York, McGraw - Hill, 1958. p.224-225.
3. RAMACHANDRA A, RAO and DELLEUR, J. W. Instantaneous unit Hydrographs, Peak discharges and time lags in urban basins. Hydrological Sciences Bulletin. Vol. 19, n. 2. p. 185 - 198. June 1974.