

CÁLCULO DE GASTO O CAUDAL

I. ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

La estimación de indicadores de escurrimiento superficial en condiciones naturales es demasiado compleja, debido a que intervienen diversos factores como son: tipos de suelos y rocas, relieve, pendientes, vegetación, área de captación o cuenca, longitud del cauce principal, precipitación-tiempo, condiciones y dimensiones del cauce, que por tratarse de condiciones naturales estos factores presentan variaciones a lo largo de éste, entre otras variabilidades.

Es por ello que para el cálculo de los diversos indicadores se debe hacer una planeación del escurrimiento por analizar y determinarlos en algunos de los casos, agrupando secciones que reúnan un cierto comportamiento en común.

Este documento tiene como objetivo dar los conocimientos básicos para el cálculo de caudales y las variables más importantes que afectan los escurrimientos superficiales como el coeficiente de escurrimiento, el tiempo de concentración y la intensidad promedio de la lluvia.

II. DETERMINACIÓN DE CAUDALES.

Para determinar el gasto o caudal que llega al punto "a", bajo la lluvia máxima que se presenta con una frecuencia dada, apreciaremos lo siguiente:



Durante los primeros minutos de la lluvia, la intensidad de ésta es muy alta, pero como el tiempo es corto, no se ha alcanzado a drenar toda la cuenca, por lo que el gasto que pasa por el punto "a" no es muy grande.

A medida que transcurre el tiempo, la cuenca comienza a aportar más agua por efecto de que es mayor el área que se drena, pero por otro lado la intensidad de la lluvia va disminuyendo poco a poco.

El valor numérico del gasto o caudal se determina mediante el método racional:¹

Ecuación 1

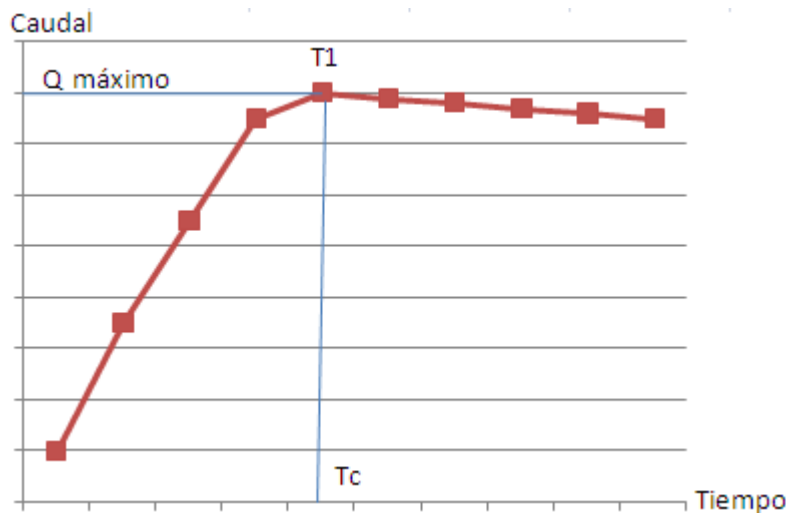
$$Q = \frac{CIA}{360}$$

Donde:

Q: es el caudal en metros cúbicos por segundo,
I : es la intensidad en milímetros por hora,
A : es la superficie de la cuenca en hectáreas,
C : es un coeficiente de escorrentía sin dimensiones.

Tiempo de concentración (Tc)²

Si graficamos el gasto que pasa por el punto "a" en función del tiempo de duración de la lluvia, obtendremos una figura de la siguiente naturaleza:

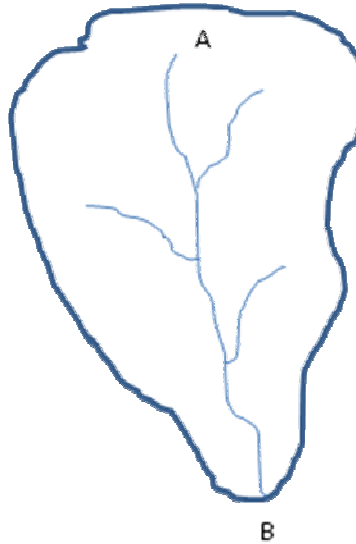


El tiempo T1, corresponde al caudal máximo y es el tiempo mínimo en el cual se drena toda la cuenca. Valor que coincide con el tiempo de concentración Tc.

¹ Fórmula expuesta en el documento "Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía" – Boletín de Suelos de la FAO -68, Autor.- N.W. Hudson Silsoe Associates.

² Manual para Diseño de Redes de Drenaje Pluvial - Ing. Raúl Cadena Cepeda 1998

Este parámetro se refiere al tiempo que tarda el agua en su recorrido entre dos puntos determinados, los cuales son: el extremo superior de la cuenca y el punto donde se mide el gasto pluvial. Si consideramos la cuenca que muestra la siguiente figura:



El tiempo de concentración se refiere al lapso que transcurre para que el agua de lluvia, transite desde el punto A al punto B.

Para el caso de escurrimiento superficial, se obtiene mediante la fórmula de Kirpich.³

Ecuación 2

$$t_c = 0.0663 \left[\frac{L}{\sqrt{S_c}} \right]^{0.77}$$

Válida para $t_c < 40$ horas, donde:

t_c : Tiempo de concentración en horas.

L : Longitud del cauce principal, definido como el de mayor recorrido, en kilómetros (km).

S_c : Pendiente de la cuenca adimensional, e igual al cociente H/L .

H : Diferencia de elevaciones entre el punto más remoto de la cuenca y su salida (medida sobre el cauce principal), en kilómetros (km).

³ Fórmula expuesta en el libro "Introducción a la Hidrología Superficial" del Dr. Sergio Ignacio Martínez Mtz.

Intensidad de lluvia promedio ⁴

Si nos paramos un momento bajo la lluvia, y ponemos una probeta frente a nosotros, notaremos que ésta se llena de agua. La cantidad que se almacena en ella, depende del tiempo que la tengamos bajo la lluvia.

Si el recipiente tiene una entrada de un centímetro cuadrado, el volumen recolectado es $V = \text{cm}^3 / \text{cm}^2$, lo que nos proporciona unidades de **cm**.

El segundo parámetro que nos interesa, es el volumen llovido por unidad de tiempo, en **cm/ hora**. A este parámetro se le denomina. Intensidad de la lluvia.

Ahora bien, si medimos la cantidad de lluvia que se obtiene en un tiempo **tn**, y obtenemos la relación volumen / tn, tendremos la información de intensidad de lluvia, para el tiempo tn.

Este valor se denomina: Intensidad de lluvia promedio, para el tiempo tn.

Cuando se haga mención en este documento, de la intensidad de la lluvia, o de la intensidad de lluvia máxima, nos referimos a los valores promedios de las mismas, y nunca a los valores instantáneos.

Si obtenemos los valores de los volúmenes llovidos, para tiempos de cero a una hora, en intervalos de cinco minutos. Y calculamos la intensidad (promedio) de la lluvia, tendremos la información básica para dibujar la gráfica: Intensidad- tiempo de duración, de la lluvia.

Si colocamos un embudo bajo la lluvia, notaremos que el caudal que sale de él, es proporcional a la intensidad instantánea de la lluvia. Si el embudo tiene una entrada de un cm^2 , el gasto de salida será exactamente igual al valor de la intensidad instantánea de la lluvia, en cm^3/seg .

A primera vista parece que para obtener el caudal que escurre en una cuenca, requeriremos los valores de la intensidad instantánea de la lluvia. Pero no es así.

Consideremos ahora una cuenca totalmente impermeable, de dimensiones, 500 metros de largo por 100 metros de ancho.

Supongamos que en el parte aguas se encuentra el punto A y en la parte más baja, el punto B.

Nosotros deseamos saber el caudal en el punto B, por efecto de una lluvia.

Supongamos además que el agua que escurre por el terreno tarda 30 minutos en recorrer toda la cuenca, desde A, hasta B.

Debemos saber también que las lluvias comienzan con una intensidad alta y a medida que el tiempo pasa van disminuyendo de intensidad.

Consideremos que el agua que pasa por B, está en proporción de la intensidad de la lluvia y el área drenada.

Ahora bien, en el tiempo cero no existe gasto que pase por el punto B.

⁴ Tema extraído del Manual para Diseño de Redes de Drenaje Pluvial - Ing. Raúl Cadena Cepeda 1998

A los cinco minutos de haber comenzado la lluvia, la intensidad es muy alta, pero se está drenando una parte muy pequeña de la cuenca. Pues el agua que cayó en A, y en la mayor parte de la cuenca viene aún en tránsito y no ha pasado por B. La cuenca está aportando en ese caso una fracción muy pequeña de su área de captación.

El momento más desfavorable es exactamente a los 30 minutos de haber comenzado la lluvia, pues en ese instante, toda la cuenca está aportando agua al punto B. Y a partir de ese momento, la intensidad sigue bajando y ya no puede haber mayor aportación por efecto de área drenada.

La solución parece sencilla. El gasto debería ser el producto del área drenada, por la intensidad instantánea de la lluvia, en el tiempo $T_2 = 30$ minutos.

Sin embargo, si consideramos lo que sucede en el punto B, a los treinta minutos de haber comenzado la lluvia, es algo más complicado. Pues el área inmediata al punto B, aporta agua con una intensidad del tiempo T_2 , pero el agua que recorrió el terreno desde el punto A, está llegando retrasada y corresponde a la lluvia de intensidad en tiempo $T_0 = 0$ segundos.

Para determinar el caudal, tendremos que hacer una suma de cada segmento de la cuenca, multiplicado por la intensidad instantánea, en función del tiempo que se tarda el agua en llegar desde ese segmento, al punto B. Y esto es muy laborioso.

Es por ello que optamos por un método más sencillo, al que se le denomina **Racional**. En este método se emplean los valores de las intensidades promedio de la lluvia, y el área drenada total y sin sectorizar.

Supongamos que hemos medido los valores de intensidad promedio, para la lluvia máxima que se presenta cada 20 años.

Para $dt = 5$ minutos = $1/12$ hora.

Tiempo	min	T					T2
		5	10	15	20	25	30
Volumen medido	cm	2.83	4.17	5.15	6	6.79	7.5
Diferencial de Vol.	cm	2.83	1.34	0.98	0.85	0.79	0.71
Dv / dt	cm /hr	33.96	16.08	11.76	10.2	9.48	8.52
Vol / tiempo.tot. = Intensidad media	cm /hr	33.96	25.02	20.6	18	16.3	15

D= distancia entre el punto A y B = 500 metros

Dv= diferencial del volumen

Dt= diferencial del tiempo = 5 minutos = $1/12$ hora = 0.0833333333

I= intensidad de la lluvia (cm/hora)

Si consideramos que en el ejemplo anterior, el valor de los caudales aportados por el punto A, corresponden al tiempo $t_0=0$, con un valor de $dv/dt= 34$ cm/hr.

Y los del punto B, para $T_2= 30$ min, con $dv/dt = 8.52$ cm/hr. Podríamos suponer que el valor promedio en la cuenca, es el que corresponde a $T= 15$ minutos.

Sin embargo, la mayoría de la cuencas tiene un área mayor del lado del parte aguas que de la descarga, por lo que será más cercano a la realidad, suponer que el valor real del promedio es cuando se tiene un $t = 40\%$ de T_2 .

Que en nuestro caso será de 12 minutos, y que nos proporcionará una intensidad instantánea (dv/dt) de 15 cm/hr. (Interpolando en la tabla)

Ahora bien, si en lugar de lo anterior, utilizamos la intensidad media de la lluvia para $T_2= 30$ minutos, tendremos un valor de $I= 15$ cm/hr. Que es idéntico al anteriormente descrito.

De este ejemplo deducimos que la intensidad de la lluvia promedio puede usarse en conjunto con la superficie drenada total, y el tiempo que tarda toda la cuenca en ser drenada, para obtener el gasto máximo existente. Por lo tanto, el tiempo de concentración de la lluvia (t_c) es el valor que se emplea como (t) en la siguiente ecuación para la obtención de la intensidad promedio de la lluvia de MÁXIMA intensidad.

Ecuación 3

$$I = \frac{P}{t_c}$$

I : Intensidad de la lluvia mm/h

P : Precipitación en milímetros.

t_c : Tiempo de concentración en horas.

La siguiente ecuación de intensidad de lluvia fue determinada por el Ing. Raúl Cadena Cepeda, mediante el análisis de todas las lluvias ocurridas entre 1926 y 1966 y se acepta como válida en las revisiones oficiales por la SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO DEL ESTADO DE N.L.

Conociendo el valor de frecuencia de diseño (F), se despeja el valor de la intensidad promedio para la lluvia MÁXIMA (I).

Ecuación 4

$$I = \frac{16 \sqrt{F}}{(t)^{0.46}}$$

Donde

I = Intensidad promedio de la lluvia máxima en cm/hora.

F = Frecuencia de presentación de la lluvia máxima en años

t = Tiempo de duración de la lluvia, en minutos.

Tabla 2

INTENSIDADES MEDIAS PARA LLUVIAS MÁXIMAS
I = intensidad de la lluvia (cm/hora)

minutos	Frecuencia de lluvia (años)			
	2	5	10	20
5	10.79	17.06	24.13	34.13
6	9.92	15.69	22.19	31.38
7	9.24	14.62	20.67	29.23
8	8.69	13.75	19.44	27.49
9	8.24	13.02	18.41	26.04
10	7.85	12.41	17.54	24.81
11	7.51	11.87	16.79	23.75
12	7.21	11.41	16.13	22.81
13	6.95	10.99	15.55	21.99
14	6.72	10.63	15.03	21.25
15	6.51	10.29	14.56	20.59
16	6.32	9.99	14.13	19.99
17	6.15	9.72	13.74	19.44
18	5.99	9.47	13.39	18.93
19	5.84	9.23	13.06	18.47
20	5.7	9.02	12.75	18.04
21	5.58	8.82	12.47	17.64
22	5.46	8.63	12.21	17.26
23	5.35	8.46	11.96	16.91
24	5.24	8.29	11.73	16.59
25	5.15	8.14	11.51	16.28
26	5.06	7.99	11.3	15.99
27	4.97	7.86	11.11	15.71
28	4.89	7.73	10.93	15.45
29	4.81	7.6	10.75	15.2
30	4.73	7.48	10.58	14.97
32	4.59	7.27	10.27	14.53
34	4.47	7.07	9.99	14.13
36	4.35	6.88	9.73	13.76
38	4.25	6.71	9.49	13.43
40	4.15	6.56	9.27	13.11
45	3.93	6.21	8.78	12.42
50	3.74	5.92	8.37	11.83
60	3.44	5.44	7.69	10.88
70	3.21	5.07	7.17	10.14
80	3.01	4.77	6.74	9.53
90	2.86	4.51	6.39	9.03
100	2.72	4.3	6.08	8.6

La frecuencia de presentación de la lluvia de máxima intensidad, es un parámetro importante, a emplearse para la determinación de los caudales.

A continuación los valores recomendados para diferentes proyectos:

Valores de frecuencia de presentación de la lluvia de máxima intensidad, a emplearse en:

USO DEL SUELO.....FRECUENCIA F, EN AÑOS

Zonas sin urbanizar	5 años
Zonas suburbanas	10 años
Zonas residenciales	20 años
Centros de ciudades	25 años
Plantas industriales	20 años
Azoteas de edificios	20 años
Bajantes pluviales	20 años

Nota: debido al cambio climatológico mundial, esta tabla fue modificada en enero del 2,000.

Para obtener el valor de la intensidad de la lluvia es necesario primero, determinar el tiempo de concentración (tc) según la ecuación 2, además de igualar ese valor con el del tiempo de duración de la lluvia. $t = t_c$

Coefficiente de escurrimiento (c)

Es la relación del caudal que fluye sobre el terreno, al caudal llovido. Este parámetro no debe confundirse con el coeficiente de infiltración, el cual no es empleado en nuestro estudio.

Los valores que se recomiendan para el coeficiente de escurrimiento son los siguientes:

Tabla 3 Coeficiente de escurrimiento:

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura del suelo		
	Gruesa	Media	Fina
Bosque			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Pastizales			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11-30% pendiente)	0.22	0.42	0.60
Terrenos cultivados			
Plano (0-5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (6-10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (11-30% pendiente)	0.52	0.72	0.82

Se obtiene el valor del coeficiente de escurrimiento (C), de acuerdo con los tipos de suelos, uso del suelo y pendiente. Cuando el área de drenaje presenta diferentes tipos de suelos, vegetación y pendiente media. El coeficiente de escurrimiento (C), se obtendrá para cada área parcial y posteriormente se calculará el promedio ponderado.

Otro medio para obtener el coeficiente de escurrimiento, es consultar la capa de unidades de escurrimiento del continuo de hidrología superficial escala 1:250,000 de INEGI que se incluye en el SIATL o bien en la carta hidrológica.

Determinación del área drenada

El área drenada se obtiene de los planos topográficos y se refiere a la superficie de la cuenca tributaria del punto "a".

Análisis numérico del caso de estudio

Una vez determinados los parámetros necesarios para calcular el gasto o caudal, así como la velocidad media de la corriente, procederemos a realizar el análisis numérico:

Determinación del gasto						
Datos conocidos:						
A	Área drenada =	10678	hectáreas			
L	Longitud de la cuenca a lo largo de la cañada mayor =	20751	metros			
	Elevación inicio	2560	metros			
	Elevación fin	1700	metros			
Datos de diseño						
F	Frecuencia de la lluvia	50	años			
Parámetros básicos						
C	Coeficiente de escurrimiento	0.125	Obtenido de unidades de escurrimiento			
P	Pendiente absoluta de la cañada mayor terreno:	0.04				
Tc	Tiempo de concentración	139.98	minutos			
I	Intensidad de la lluvia	11.65	cm/hr			
Q	Gasto	432.03	m ³ /seg			

Bibliografía

Cadena Raúl, 1998, *Manual para Diseño de Redes de Drenaje Pluvial*, Nuevo León: <http://www.rcadena.com/dp/index.html>

Hudson N.W., Silsoe Associates, *Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía*, Ampthill, Bedford, Reino Unido Reino Unido: (Boletín de Suelos de la FAO - 68).

Martínez Sergio, 2008 (Semestre Enero-Junio), *Introducción a la Hidrología Superficial*. Universidad Autónoma de Aguascalientes: Edición del autor.

Wikipedia- La enciclopedia libre

Elaboró

Departamento de Estructuración de Información Geoespacial

Subdirección de Desarrollo de Sistemas

Dirección de Soluciones Geomáticas

Dirección General Adjunta de Integración de Información Geoespacial

Dirección General de Geografía y Medio Ambiente

Instituto Nacional de Estadística y Geografía

Rubén David Carrasco Esparza

Jefe de Departamento

ruben.carrasco@inegi.org.mx

Edificio Sede, Oficinas Centrales

Av. Héroe de Nacozari Sur 2301

Jardines del Parque CP.20276

Aguascalientes, Ags., México

Puerta 8 acceso.

Tel.- (449) 9105300 ext. 5906 y 1759