C I D I A T

Curso: Conservación de Suelos

T E M A 2

REVISION DE CONCEPTOS Y RELACIONES FUNDAMENTALES PARA LA CONSERVACION DE SUELOS Y AGUAS

2.2. ANALISIS DE LOS DATOS DE PRECIPITACION

POR

GONZALO PEÑA

Curitiba, Brasil
Marzo, 1973

TEMA 2

REVISION DE CONCEPTOS Y RELACIONES FUNDAMENTALES PARA LA CONSERVACION DE SUELOS Y AGUAS

2.2. Análisis de los Datos de Precipitación. Intensidad, Duración y Frecuencia de Precipitación. Tiempo de Concentración. Infiltración, Evaporación, Transpiración. El Fenómeno de la Escorrentía. Métodos para Predecir la Escorrentía. Análisis de Frecuencia.

2.2.1. Análisis de los Datos de Precipitación

Los datos de precipitación son de interés tanto para una localidad específica como para áreas considerables. En vista de que los registros que se obtienen son de tipo puntual, es necesario hacer un análisis de la información para calcular la precipitación sobre todo el área. La precipitación media es de gran utilidad para diversos cálculos y establecimiento de relaciones en conservación de suelos; sin embargo, la intensidad, duración y frecuencia tienen mayor importancia por su vinculación directa con la erosión de los suelos y con el fenómeno torrencial.

Una de las características mas importantes de la precipitación es su intensidad, expresada usualmente en mm por hora. Las tormentas de alta intensidad no son, necesariamente, mas frecuentes en áreas que tienen una alta precipitación total anual. Estas tormentas son, generalmente de corta duración y cubren áreas pequeñas. La combinación poco frecuente de lluvias de alta intensidad y larga duración causa muchos daños de erosión y puede dar origen a grandes crecidas. La primera consideración al diseñar medidas de control es la probabilidad de recurrencia de tormentas de diferente intensidad y duración, así como también los aspectos económicos en relación al tamaño de las estructuras que deben ser construídas. Para la mayoría de los propósitos en manejo de cuencas no es factible proveer un sistema de estructuras que puedan detener los efectos de precipitaciones excepcionales, por lo que es mas económico proyectar para intensidades menores de precipitación (precipitaciones con un período de recurrencia de 50 años es lo mas usual). El período

de retorno de una tormenta, algunas veces llamado intervalo de recurrencia, se define como el período promedio de tiempo dentro del cual la magnitud de precipitación para una duración dada será igualada o excedida una vez.

Una expresión general para la intensidad de precipitación es la siguiente:

$$I = \frac{K\ T^{x}}{t^{n}}$$

donde,

I = Intensidad de precipitación en milímetros por hora
n, x y K = Constantes para una localidad geográfica dada
t = duración de la tormenta en minutos, y
T = Período de retorno en años

Este tipo de ecuación no ha sido ampliamente aceptado debido a la dificultad de evaluar las constantes regionales. Mapas típicos de frecuencia de precipitación para 1 y 24 horas de duración se muestran en las figuras 2.2.1 y 2.2.2. El procedimiento para determinar las intensidades de precipitación para otras duraciones y frecuencias se dan en el problema 2.2.1.

Problema 2.2.1. Determinar la intensidad de precipitación para una tormenta de 20 minutos y para otra de 6 horas, las cuales pueden ocurrir una vez en 50 años en Chicago, Illinois.

Solución: Se lee en las figuras 2.2.1 y 2.2.2., la profundidad de precipitación para 1 y 24 horas y para 2 y 100 años de períodos de retorno para Chicago.

Duración, Horas	2 Años	100 años
1	1,43 pulg.	2,75 pulg.
24	2,80 pulg.	5,70 pulg.

Se plotean estas cuatro profundidades en la figura 2.2.3., uniéndolas con líneas rectas. Sobre este gráfico obtenemos las profundidades

(a) = 2,5 y (b) = 5,1 para un período de retorno de 50 años.

Los valores (a) y (b) se plotean en la figura 2.2.4, leyendo la profundidad (c) para 6 horas; el valor obtenido es 3,8. Tenemos entonces:

$$I_6 = \frac{3,8}{6} = 0,63 \text{ pulgadas por hora}$$

Para duraciones menores de 1 hora, se lee el factor de corrección en la figura 2.2.5. y se multiplica por (a) 2,5 convirtiéndose en intensidad para 20 minutos:

$$I_{20} = \frac{2,5 * 0,66 * 60}{20} = 4,95 \text{ pulg/hora}$$

Con el nivel actual de conocimientos sobre las causas y procesos físicos envueltos en la precipitación, el método mas práctico de determinar la frecuencia de tormentas de diferentes intensidades es a través del estudio de los registros anteriores. Sin embargo, usualmente estos registros son de tan corta duración que se hacen completamente inadecuados para este propósito si la determinación de frecuencias se restringe al período actual de tiempo cubierto por los registros obtenidos en cualquier estación.

La frecuencia de tormentas está estrechamente relacionada con la frecuencia de crecidas. Por esta razón, el problema de determinar la máxima intensidad de tormenta que se espera que ocurra con una frecuencia dada en una cuenca, es de primordial importancia en todos los estudios de crecidas.

2.2.2. Tiempo de Concentración

Es un valor utilizado en el cálculo de la escorrentía crítica por el método de la fórmula racional, y es una aproximación del tiempo que tarda una gota de agua en recorrer el espacio entre el sitio mas apartado de la cuenca o parcela considerada y el sitio de desagüe. En base a esta definición podemos escribir la relación,

$$t_c = \frac{E}{V}$$

donde,

t_c es el tiempo de concentración en minutos

E es la distancia que separa al punto mas remoto del sitio de desagüe en metros, y

V es la velocidad con que fluye el agua, en metros por minuto.

La figura 2.2.6., basada en los trabajos de Ramser y Horton, permite hacer el cálculo en forma aproximada, tal como se puede apreciar en el problema 2.2.2. El cálculo directo del tiempo de concentración se puede hacer usando la figura 2.2.7. (Soil Conservation Service, 1947).

Problema 2.2.2. Calcular el tiempo de concentración para una vertiente de 300 metros de longitud, con una pendiente del 3% y cubierta con vegetación boscosa.

Solución: En la figura 2.2.6., obtenemos el valor de la velocidad con que fluye el agua sobre la vertiente (V = 0,30 m/seg.).

$$t_c = \frac{E}{V} = \frac{300 \text{ m}}{0.30 \text{ m/seg}} = 1000 \text{ seg.}$$

$$t_c = 16,6 \text{ minutos}$$

Uno de los métodos mas ampliamente aceptado para calcular el tiempo de concentración fue desarrollado por Kirpich (1940) y se expresa con la ecuación,

$$t_c = 0,0078E^{0.77}S^{-0.385}$$

donde,

t_c = Tiempo de concentración, en minutos

E = Máxima longitud de flujo en pies

S = Pendiente de la cuenca en pié por pies, o la diferencia de la elevación entre la salida y el punto más remoto, dividido por la longitud E.

Descripción de la Vertiente	% de Pendiente del Terreno					
	0 - 4	4-10	10-15	15-20	20-25	25-30
	Velocidad en Metros por Segundo					
Con Bosque	0.30	0.60	1.00	1.20	1.40	1.50
Con Potrero	0.45	0.90	1.20	1.50	1.60	1.80
Con Cultivo Limpio	0.60	1.20	1.50	1.70	1.80	1 90

Figura 2.2.6. Valores aproximados de la velocidad de escorrentía. Tomado de Suarez de Castro, 1965.

Diversas investigaciones han conducido a la elaboración de gráficos que permiten determinar la intensidad crítica de las lluvias para una región determinada, basándose especialmente en el concepto de tiempo de concentración. La figura 2.2.8., por ejemplo, permite el cálculo de las intensidades críticas de precipitación para diferentes valores del tiempo de concentración, según resultados obtenidos en la Estación de Chinchiná, Colombia.

2.2.3. Infiltración, Evaporación y Transpiración

Tres fases del ciclo hidrológico de particular interés para la Ingeniería de Conservación de Suelos y Aguas, son, la infiltración, la evaporación y la transpiración. Infiltración es el paso del agua a través de la superficie del suelo y se distingue de la percolación en que ésta última se refiere al movimiento del agua a través del perfil del suelo. La evaporación es el proceso por medio del cual la humedad es regresada al aire desde un estado líquido a otro gaseoso. La transpiración es el proceso por medio del cual el agua en forma de vapor es transferida a la atmósfera por las plantas. Aunque hay amplias variaciones regionales, cerca de las tres cuartas partes de la precipitación total que cae sobre la superficie terrestre del mundo regresa directamente a la atmósfera por evaporación y transpiración. La mayor parte del resto regresa al océano como agua superfi-

cial o subterránea. Debido a la dificultad de separar la evaporación de la transpiración, a menudo se consideran bajo la denominación común de Evapotranspiración.

La infiltración tiene particular interés porque si el agua ha de ser conservada en el suelo y puesta a disposición de las plantas, primero tiene que pasar a través de la superficie del suelo. También, si se mantiene una tasa alta de infiltración, escurrirá menor cantidad de agua sobre la superficie del suelo y la erosión será reducida.

La tasa de infiltración se expresa dimensionalmente como un volúmen por unidad de tiempo por unidad de superficie. Estas unidades se pueden reducir a un valor de profundidad por unidad de tiempo, tal como milímetros por hora. La infiltración es la única fuente de humedad del suelo para el sostenimiento del crecimiento vegetal y para el suministro del agua subterránea. A través de la infiltración, la superficie del suelo divide la precipitación en flujo superficial, humedad del suelo y agua subterránea.

Los factores más importantes que influencian la tasa de infiltración están relacionados con las propiedades físicas de los suelos (textura, estructura, porosidad) y con su cobertura vegetal, pero otros factores tales como la humedad del suelo, temperatura y la intensidad de precipitación también están envueltos en el proceso.

La evaporación es la transferencia de agua desde la superficie del suelo o de un reservorio hasta la atmósfera. Su estudio adquiere gran interés en cualquier parte donde la conservación de la humedad sea un factor de consideración. Cuando la evaporación es reducida, mayor cantidad de humedad permanece disponible para el crecimiento vegetal; es también un factor importante en la determinación de los requerimientos de riego así como también en la predicción de la cantidad de agua que será aprovechable o que estará disponible en las lagunas o almacenamientos artificiales.

La transpiración es el proceso por medio del cual el vapor de agua pasa a la atmósfera a través de los tejidos vegetales; su importan

cia se basa en sus efectos sobre los requerimientos de humedad por los cultivos.

La cantidad de agua que pasa a través de las plantas por el proceso de transpiración es a menudo una porción sustancial del total de humedad disponible, la clase y densidad de cobertura vegetal, la cantidad de radiación (duración del día) y de la fertilidad y estructura del suelo.

Las tasas de evaporación y transpiración se incrementan al elevarse la temperatura de la superficie. El incremento del viento tiene igual acción, debido a que dispersa la humedad en la capa de aire.

2.2.4. El Fenómeno de la Escorrentía

La precipitación es el factor primordial que determina el caudal. La secuencia de los fenómenos es tal que la escorrentía va retrasada en relación con la precipitación que la produce, dependiendo la cantidad de retraso de las características del área de recepción.

La mayor parte de la lluvia caida al inicio de una tormenta queda retenida sobre la cubierta vegetal como interceptación y en los charcos superficiales como almacenamiento de depresión; posteriormente el agua comienza a discurrir cuesta abajo hacia un cauce superficial. En ruta hacia el cauce, el agua se llama escurrimiento superficial y, al entrar en un cauce, se convierte en escorrentía superficial. Aquella parte de la precipitación que no figura como infiltración ni como escorrentía superficial durante o inmediatamente después de la tormenta es la retención superficial. En otras palabras, la retención superficial incluye la interceptación, el almacenamiento de depresión y la evaporación durante la tormenta, pero no incluye el agua almacenada temporalmente en ruta hacia los cauces. (Linsley, 1968).

La escorrentía sólo puede ocurrir cuando la tasa de precipitación excede a la tasa de infiltración de agua en el suelo. Después que se satisface la tasa de infiltración, el agua comienza a rellenar las depresiones, grandes y pequeñas, de la superficie del suelo.

Factores que Afectan la Escorrentía.

Los factores que afectan la escorrentía pueden ser divididos en dos grupos; aquellos factores asociados con la precipitación y aquellos asociados con la cuenca.

La duración de la precipitación, intensidad y distribución superficial influencian la tasa y volúmen de escorrentía. La escorrentía para una tormenta está claramente relacionada con su duración para una intensidad dada. Debe notarse que la capacidad de infiltración puede decrecer con el tiempo en las fases iniciales de una tormenta. La intensidad de precipitación tiene influencia tanto sobre la tasa como sobre el volúmen de escorrentía. Una tormenta de alta intensidad excede la capacidad de infiltración por un margen muy superior al que lo hace una lluvia suave; por ello el volúmen total de escorrentía es mayor para una tormenta de alta intensidad que para dos lluvias que sumadas iguales a la cantidad de precipitación de aquella. La intensidad de precipitación puede también hacer disminuir la tasa de infiltración debido a su acción destructiva sobre la estructura del suelo superficial.

La tasa y volúmen de escorrentía para una cuenca dada están influenciados por la distribución de la precipitación y por la intensidad de precipitación sobre la cuenca. Generalmente, la tasa y volúmen máximo de escorrentía ocurre cuando la cuenca entera contribuye al proceso. Sin embargo, una tormenta intensa sobre una porción de la cuenca puede dar por resultado una escorrentía mayor que la que resulta para una tormenta moderada que cubra por completo a la cuenca.

Los factores de la cuenca que afectan la escorrentía son: tamaño, forma, orientación, topografía, geología y cubierta superficial. Tanto los volumenes como las tasas de escorrentía se incrementan al aumentar el tamaño de la cuenca. Por otra parte, las cuencas estrechas y alargadas tienen tasas de escorrentía mas bajas que las cuencas compactas (redondeadas) del mismo tamaño debido a que la escorrentía se concentra mas fácilmente en éstas últimas.

Cuando el eje longitudinal de una cuenca es paralelo a la dirección de la tormenta, y estas se mueven aguas arriba, originan un pico de escorrentía menor que cuando la tormenta se mueve aguas abajo. Las características topográficas, tales como la pendiente de las partes altas, el grado de desarrollo y pendiente de los cauces, y la extensión y número de depresiones, afectan las tasas y volumenes de escorrentía.

2.2.5. Métodos para Predecir la Escorrentía

El Ingeniero relacionado con el diseño de estructuras hidrológicas debe a menudo obtener estimaciones cuantitativas de las tasas de escorrentía, volumenes o gastos máximos y distribución en el tiempo. Como puede deducirse de las discusiones anteriores, la predicción exacta de la escorrentía es un problema de difícil solución. Los métodos de estimación de escorrentía necesariamente obvian algunos factores y hacen asunciones para simplificar el proceso considerando la influencia de otros elementos.

2.2.5.1. Estimación de la Escorrentía de Diseño (Escorrentía Crítica).

La capacidad de una estructura que deba transportar escorrentía debe ser determinada en base a la escorrentía crítica. Las estructuras y canales son planificados para transportar escorrentías que pueden ocurrir dentro de un período de retorno especificado.

Los controles vegetativos y estructuras temporales se diseñan usualmente para escorrentías que se espera que ocurran una vez en 10 años; estructuras permanentes, mas costosas deben ser diseñadas para escorrentías esperadas sólo una vez en 50 ó 100 años. La selección del período de retorno de diseño, también llamado intervalo de recurrencia, depende del balance económico entre el costo de mantenimiento periódico, y el costo de proveer capacidad adicional para reducir la frecuencia de reparación. En algunas ocasiones la posibilidad de daños aguas abajo debido a la falla de las estructuras puede determinar la frecuencia de diseño.

2.2.5.1.a. Método Racional

El método racional para la predicción de la escorrentía de diseño se expresa mediante la ecuación,

$$Q = \frac{C\ I\ A}{360}$$

donde,

Q = Escorrentía crítica en m^3/seg.

C = Coeficiente de escorrentía. Representa el porcentaje de precipitación que aparece en el flujo superficial (Figura 2.2.9.)

I = Intensidad de precipitación en mm/h para el período de retorno del diseño y para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, y

A = Area de la cuenca, en Has.

Problema 2.2.3. Calcular la escorrentía crítica para un período de diseño de 5 años (tiempo de retorno), con el objeto de construir un canal de desviación sobre el que influirá una pequeña vertiente de 4,5 Has. La distancia entre el punto mas remoto y el desagüe es de 500 metros.

El área de influencia sobre el canal tiene pendientes y usos variables, tal como se especifica en la tabla siguiente:

Superficie (Has.)	Pendiente(%)	Uso
2,25	20 - 30	Pastos
2,25	10 - 20	Maíz
4,50		

Solución: (1) Calculamos el valor de C (Figura 2.2.9.)

Pastos con 20-30% de pendiente, $C_1 = 0,42$ (Valor Parcial)

Cultivo limpio con 10-20% de pendiente, $C_2 = 0,72$ (Valor Parcial)

Como cada tipo de uso representa el 50% de la superficie total,

$$50 * 0,42 = 21$$
$$50 * 0,72 = \underline{36}$$
$$57$$

Cultivo limpio con 10-20% de pendiente, $C_2 = 0,72$ (Valor Parcial)

Como cada tipo de uso representa el 50% de la superficie total,

$$50 * 0,42 = 21$$
$$50 * 0,72 = \underline{36}$$
$$57$$

$$C = \frac{57}{100} = 0,57 \text{ (Valor Definitivo)}$$

CLASE DE VERTIENTE	VALOR DE C
a. Ondulada (5-10% de pendiente)	
Con cultivo limpio	0.60
Con pastos	0.36
Con bosques	0.18
b. Montañosa (10-30% de pendiente)	
Con cultivo limpio	0.72
Con pastos	0,42
Con bosques	0.21

Figura 2.2.9. Coeficiente de Escorrentía para diferentes condiciones

(2)Calculamos la intensidad de precipitación

Tiempo de recurrencia = 5 años

t_c = 300 seg. = 5 minutos (figura 2.2.7.)

I = 138 mm/h (figura 2.2.8.)

(3)Calculamos el valor de la escorrentía crítica (Q)

$$Q = \frac{C\ I\ A}{360}$$

$$Q = \frac{0,57 * 138 * 4,5}{360} \text{ m}^3\text{/seg.}$$

$$Q = 0,983 \text{ m}^3\text{/seg.}$$

$$Q = 983 \text{ lts./seg.}$$

2.2.5.1.b. Fórmulas Empíricas

Diversas fórmulas empíricas han sido desarrolladas para calcular la magnitud de flujos extremos. Esas fórmulas tienen la forma general,

$$Q = CA^n$$

donde,

Q = Escorrentía crítica

C = Coeficiente regional que depende de varias características de la cuenca

A = Area de la cuenca

n = Valor constante (pendiente de la recta resultante al graficar la ecuación inicial -$Q = CA^n$- en su forma logaritmica. Escorrentía en el eje de las ordenadas y Area en el eje de las abscisas).

Desventajas de este método:

a. No dá información de frecuencia

b. No dá información sobre la influencia de la cantidad de precipitación

c. Sólo toma en cuenta una variable, el área de la cuenca

2.2.5.1.c. Fórmula de Meyer

$$Q = 10^4 p\sqrt{A}$$

donde,

p = Relación entre el flujo máximo registro y el máximo teórico de precipitación

2.2.5.1.d. Fórmula de Talbot

$$a = CA^{0.75}$$

donde,

a = Area de la sección de la alcantarilla, en pié^2

C = Coeficiente que resume las características del sitio

A = Area de la cuenca que drena hacia la alcantarilla

2.2.5.2. Análisis de Frecuencia

Se refiere al cálculo del período de tiempo que transcurrirá entre dos crecidas de la misma magnitud (tiempo de retorno). Existen dos métodos: método california y método del Servicio Metereológico de USA (USGS):

Método California

$$T_r = \frac{n}{m}$$

Método del Servicio Metereológico de USA

$$T_r = \frac{n + 1}{m}$$

donde,

T_r = tiempo de retorno

n = número de años del registro

m = posición (rango del gasto que nos interesa)

donde,

T_r = tiempo de retorno

n = número de años del registro

m = posición (rango) del gasto que nos interesa

Problema 2.2.4. Calcular el período de retorno en un gasto de 50 m^3/seg., dado el siguiente registro:

Q. m^3/seg.
40
50
15
22
10
12
9
30
25
32

Calcular también el período de retorno para un gasto de 30 m^3/seg. En ambos casos, calcular la probabilidad de que el evento suceda cada año.

Solución: Aplicando el Método California

(1) Ordenamos de mayor a menor el registro de caudales:

Q en m^3/seg.	Rango
50	1
40	2
32	3
30	4
25	5
22	6
15	7
12	8
10	9
9	10

(2) Calculamos el tiempo de retorno:

$$T_r = \frac{n}{m} = \frac{10}{1} = 10 \text{ años (para 50 } m^3\text{/seg.)}$$

$$T_r = \frac{n}{m} = \frac{10}{4} = 2,5 \text{ años (para 30 } m^3\text{/seg.)}$$

Probabilidad para 50 m^3/seg. de que ocurra cada año = $1/T_r = 0,1$

Probabilidad para 30 m^3/seg. = $1/T_r = 0,4$

2.2.6. Estimación del Rendimiento de Agua

Cuando la escorrentía superficial debe ser almacenada en pozos o reservorios, el volúmen total de escorrentía para un período de varios meses, usualmente el volúmen anual, adquiere mayor interés que la escorrentía proveniente de una tormenta de diseño. La escorrentía proveniente de una tormenta de diseño. La escorrentía anual es a menudo designada con el nombre de rendimiento anual de agua. Brakensiek (1959) ha demostrado que la selección de los datos de escorrentía de un "año hídrico" ó "año metereológico" aumenta la exactitud de los resultados, sucediendo lo contrario cuando los datos son seleccionados del "año calendario". La fecha para comenzar el año hídrico varía con la localización geográfica, pero en general coincide con el período de máxima escorrentía. Debido a la escasez de registros de rendimientos de agua, los resultados de un área deben a menudo ser extendidos a otras áreas de condiciones hidrológicas similares.

2.2.8. Bibliografía

SCHWAB, GLENN.O. et. al. Soil and water conservation engineering. The Ferguson Foundation Agricultural Engineering Series. Segunda Edición. John Wiley & Sons, INC. New York. 1966. 683 págs.

SUAREZ DE CASTRO, FERNANDO. Conservación de Suelos. Segunda Edición. Salvat Editores. Barcelona, España. 1965. 319 págs.

LINSLEY, RAY K. et. al. Hidrología para Ingenieros. Traducción del Inglés por Miguel Fe Serra y Francisco Dominguez A. Mc Graw-Hill. Madrid, España. 1967. 349 págs.

TELLER, LEO. Principios de Manejo de Cuencas; Apuntes de Clases. Sin publicar. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida. Venezuela. 1971.

WISLER, C.O. y BRATER, E.F. Hydrology. Quinta impresión. John Wiley & Sons, Inc. 1957. New York. 419 págs.