

M

O

P



EL PAPEL DE LA INFILTRACION EN EL CALCULO
DE CRECIDAS

Trabajo publicado en la Revista de la
Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica
(Vol. II N° 1)

Publicación Interna SDEH 86/6

DGA

DEPARTAMENTO
DE HIDROLOGIA

SUB-DEPTO. ESTUDIOS
HIDROLOGICOS

EL PAPEL DE LA INFILTRACION EN EL CALCULO DE CRECIDAS

Trabajo publicado en la Revista de la Sociedad Chilena
de Ingeniería Hidráulica (Vol. II N° 1)

Publicación Interna SDEH 86/6

EL PAPEL DE LA INFILTRACION EN EL CALCULO DE CRECIDAS

Ing. Humberto Peña T. (*)

1. INTRODUCCION

En el presente artículo se pretende dar una visión sintética del papel de la infiltración en la generación de las crecidas, y de las distintas alternativas metodológicas que se tienen para considerarla en el cálculo de crecidas de diseño. También se desea destacar el interés que tiene realizar un mayor estudio del tema, en algunas zonas del país.

En el artículo se hace referencia frecuentemente a los conceptos de infiltración y capacidad de infiltración. Se designa por infiltración al paso del agua a través de la superficie del terreno al interior del suelo y por capacidad de infiltración a la intensidad máxima de penetración de agua en el suelo en un punto dado y en condiciones dadas. Sin embargo, en la Hidrología práctica, al trabajar al nivel de cuencas, junto a la infiltración propiamente tal se incluyen normalmente pérdidas diversas originadas en la intercepción por la vegetación, en el almacenamiento en las depresiones del terreno y en la evaporación durante las tormentas. En lo sucesivo, cuando se haga uso del término infiltración referido a una cuenca hidrográfica, se deberá entender en este segundo sentido.

2. LA INFILTRACION Y LA GENERACION DE LAS CRECIDAS

Los conceptos usualmente empleados en el cálculo de crecidas, fueron propuestos por Horton (1933), coincidiendo con la formulación de la teoría del hidrograma unitario de Sherman (1932), de modo que desde sus inicios

(*) Departamento de Hidrología
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
Morandé 59, 8° piso
Santiago-Chile

ellas se han complementado, constituyendo uno de los pilares de la Ingeniería Hidrológica. No obstante lo anterior, la aproximación teórica de ambas es muy distinta: mientras el Hidrograma Unitario es un modelo de caja negra; el modelo de Horton es de caja blanca, ya que pretende describir el proceso físico de la infiltración y de la generación de la escorrentía superficial. De acuerdo a Horton, la superficie del suelo actúa efectuando una partición del agua de lluvia en una fracción que se infiltra y una que escurre superficialmente (overland flow). La partición se realiza desviando hacia el flujo superficial el exceso de la intensidad de lluvia sobre la capacidad de infiltración. Las crecidas se producen entonces básicamente como resultado de esa lluvia en exceso.

Los conceptos anteriores no fueron cuestionados sino en la década del 60, cuando la investigación detallada en pequeñas cuencas representativas mostró que en algunas zonas - en especial las que tenían una importante cobertura vegetal - el modelo de Horton no era aplicable ya que las intensidades de lluvia nunca superaban la capacidad de infiltración del suelo. De esta forma, se propusieron nuevos esquemas teóricos para interpretar el proceso de generación de una crecida, los cuales ponían un mayor énfasis en el papel del flujo subsuperficial y en el aporte de la fracción de la cuenca que se encuentra saturada.

En relación al flujo subsuperficial, a pesar de su baja velocidad, las investigaciones demostraron que presenta un "efecto de pistón" que fuerza el agua almacenada hacia el cauce, pudiendo producirse de esa forma un incremento rápido del hidrograma. El papel de las áreas saturadas se observó que podía ser importante debido al escurrimiento superficial de la precipitación que cae directamente sobre dichas áreas y a la generación de un caudal de retorno desde el subsuelo. Este proceso es muy dinámico, de modo que las áreas aportantes al escurrimiento se modifican sensiblemente durante el desarrollo de las grandes tormentas. De igual modo, las condiciones antecedentes pueden alterar en forma sustancial la respuesta de la cuenca por esta causa.

De acuerdo a lo anterior, el modelo de Horton representaría solo uno de los procesos que intervienen en la generación de las crecidas, presentándose en la naturaleza un continuo de posibilidades entre los esquemas que se ilustran en la Fig. 1. Inclusive la importancia de cada uno de ellos pudiera variar de una tormenta a otra. En términos generales, el esquema de Horton se estima más adecuado en zonas áridas y semi-áridas, o en zonas donde la cobertura vegetal ha sido destruída, mientras que los otros representan mejor las cuencas forestadas.

3. LA INFILTRACION EN UN PUNTO

Durante una lluvia, sobre la tasa de infiltración se pueden producir dos tipos de control: a) cuando la intensidad de la lluvia es menor que la capacidad de infiltración, lo que supone que en la superficie se observa

el terreno sin inundación o en una condición de pre-inundación (control de flujo) y b) cuando el control lo ejercer el perfil del suelo, generándose en la superficie una condición de inundación. En la Fig. 2 se ilustra la influencia de estos controles en la modificación de la tasa de infiltración durante una lluvia. Además se aprecia como en un suelo inundado, debido al avance del frente de humedad hacia el interior del terreno, existe una progresiva disminución de la capacidad de infiltración, lo que caracteriza la relación infiltración vs tiempo, llamada comúnmente curva de infiltración. Estas curvas en la naturaleza muestran un rango de variación extraordinariamente elevado, siendo los principales factores que influyen en sus características: el tipo de suelo (granulometría, estratigrafía, uso, etc.), el contenido inicial de humedad y la cobertura vegetal. La Fig. 3, muestra el significativo desplazamiento de la curva de infiltración de un suelo con el cambio de su contenido de humedad.

Para representar matemáticamente la curva de infiltración se han propuesto fórmulas empíricas, como la de Horton (ec. 1), o se han deducido las ecuaciones del transporte de humedad en un suelo no saturado, como sucede con la expresión de Philip (ec. 2) (Fig. 4):

$$\text{Horton: } f = (f_0 - f_c) e^{-at} + f_c \quad (1)$$

$$\text{Philip: } f = \frac{St^{-\frac{1}{2}}}{2} + M \quad (2)$$

donde:

f : capacidad de infiltración
t ; tiempo
f₀, f_c, a, S, M : parámetros

Para los propósitos de este artículo, interesa destacar las importantes limitaciones de éstas ecuaciones y otras del mismo tipo. Ellas son:

- i) Se aplican solo al caso del suelo inundado.
- ii) El problema está planteado en forma unidimensional, de modo que el efecto de las pendientes y en general los procesos de transporte horizontal, no se consideran.
- iii) Se supone que el suelo es un medio homogéneo y semi-infinito, por lo tanto se ignora el control que pueden ejercer los estratos inferiores, especialmente en: zonas con suelos delgados, como sucede en muchas regiones montañosas, o en áreas de nivel freático próximo a la superficie.
- iv) La humedad inicial del suelo se asume homogénea en la vertical.
- v) No se consideran otros efectos, tales como la alteración de las características del suelo en presencia de agua o la existencia de fenómenos de histéresis.

4. LA INFILTRACION A NIVEL DE CUENCA

Para estudiar la infiltración a nivel de cuenca, además de las severas limitaciones que restringen la aplicación de las expresiones matemáticas en un punto, señaladas en el párrafo anterior, es necesario agregar los problemas debidos a las fluctuaciones en el tiempo y heterogeneidad espacial de las variables y parámetros.

En relación al aspecto temporal, cabe destacar que la variación de la intensidad de lluvia genera en la práctica una infiltración controlada intermitente por la disponibilidad de humedad y por el perfil de suelo, de difícil análisis. Este hecho, por otra parte, otorga una gran importancia al paso de tiempo que se utiliza en el cálculo. Además, es necesario considerar la estacionalidad de algunas de las condiciones que definen la respuesta del suelo, tales como la cobertura vegetal y la humedad del suelo al inicio de la tormenta.

Respecto a la variabilidad espacial, es necesario considerar los cambios en la magnitud de la lluvia de un punto a otro de la cuenca, la heterogeneidad de los suelos, de la vegetación y de las condiciones iniciales de humedad.

De acuerdo a lo anterior, a nivel de cuenca, los métodos que puede utilizar el hidrólogo necesariamente deben integrar en forma empírica procesos y situaciones muy diversas, en forma extraordinariamente simplificada. Esto explica la amplia variedad de métodos que se usan a nivel mundial, los cuales con frecuencia tienen una difusión solamente en un ámbito nacional, y la vigencia de métodos en gran medida intuitivos.

Considerando que la escorrentía directa corresponde a la diferencia entre la precipitación y la infiltración (pérdidas), desde el punto de vista del cálculo de crecidas las limitaciones indicadas tienden a tener una menor importancia práctica a medida que aumenta la precipitación de diseño, ya sea por las características climáticas de la zona o por tratarse de un evento de un mayor período de retorno. De igual forma, los métodos de cálculo resultan más confiables en cuencas pequeñas y homogéneas.

Para los fines del cálculo de crecidas en cuencas controladas, es posible ya sea definir empíricamente las curvas de infiltración o calibrar los parámetros de ecuaciones generales propuestas. En cuencas sin registro, sólo es posible transponer alguna curva de infiltración deducida para una cuenca de características similares o utilizar una función de infiltración general, seleccionando el valor de los parámetros de acuerdo a las recomendaciones de estudios hechos en otras zonas. A este respecto, cabe advertir que con frecuencia, además de los conceptos relativos a los suelos y cobertura vegetal de las cuencas que normalmente se utilizan para definir dichos parámetros, existen implícitamente restricciones de orden climático para su uso. Por ejemplo, la calibración del método del S.C.S. (curva número) en las condiciones de España entregó parámetros más del doble de los recomendados en U.S.A.

Considerando la finalidad del presente artículo, se ha intentado clasificar las funciones de infiltración en base a las variables independientes que utilizan, preparándose para tal efecto el Cuadro 1.

En las figuras 5 a 7 se ilustran algunas de las funciones de infiltración citadas. De estos antecedentes se pueden hacer los siguientes comentarios:

- i) Por su misma simplicidad, las funciones usadas a nivel de cuenca entregan una importante dispersión cuando se comprueban sus resultados en cuencas controladas. A modo de ejemplo se entrega el ajuste de la recta $I_a = 0.2S$, recomendada por el método S.C.S. (curva número) según la publicación original (Ver Fig. 8).
- ii) Las expresiones en función del tiempo o de la precipitación, no consideran el hecho de que durante las tormentas existen períodos durante los cuales la capacidad de infiltración es mayor que la intensidad de la lluvia. De este modo, en la definición de la función de infiltración de una cuenca controlada, el hidrólogo se ve obligado a elegir, de acuerdo a su criterio, aquellos eventos en los que ese problema se minimice. Por esta razón, resulta especialmente atractivo para este problema el uso de funciones que consideran la infiltración acumulada o la humedad del suelo, esto último a través de cálculos paso a paso como los empleados en los modelos de simulación.
- iii) Resulta interesante destacar el uso de la intensidad de la lluvia como variable explicativa, a pesar de que no se incluye en las ecuaciones que entregan la infiltración en un punto (por ejemplo en las ecs. 1 y 2). Sin embargo, ello resulta comprensible al recordar la diversidad de situaciones que se presentan en cada instante en los distintos puntos de la cuenca.
- iv) Los conceptos de heterogeneidad espacial y área aportante variable han sido poco usados en los métodos de cálculo de crecidas. En este sentido, resulta atractivo por su simplicidad el procedimiento propuesto por Linsley y Crawford, el que supone que la capacidad de infiltración presenta una distribución de frecuencias lineal, la cual queda definida por la capacidad de infiltración media de la cuenca (\bar{f}). De este modo, el área que contribuye a la escorrentía directa en un instante dado es variable y depende de la intensidad de la lluvia y de las condiciones antecedentes (Fig.9).

5. CONSIDERACIONES EN RELACION A LA ESTIMACION DE LA INFILTRACION EN CHILE

En nuestro país, los estudios que abordan específicamente este tema son prácticamente inexistentes. Los únicos antecedentes que se han podido recolectar para el presente artículo, corresponden a varias curvas de infiltración de cuencas comprendidas entre las regiones III y VII, deducidas por el

Ing. A. Benítez para el cálculo de crecidas de elevado período de retorno (Fig. 5). Es conveniente destacar de esa información la convergencia de las curvas hacia valores bastante pequeños (1-2 mm/hr), lo que además resulta concordante con las tasas de infiltración estimadas para algunas de las últimas crecidas de importancia en la zona central (1982, 1984). Al sur de la VII región no se dispone de antecedentes, sin embargo es posible esperar que la capacidad de infiltración tienda a valores mayores debido a la vegetación.

No obstante esta despreocupación por el problema, el papel de la determinación de la infiltración en el cálculo de crecidas es de mucha importancia, en especial en las zonas norte y central del país, debido a los siguientes factores:

- i) Las condiciones climáticas de aridez y semi-aridez prevalecientes que mantienen el terreno durante gran parte del tiempo con escasa humedad, aumentando considerablemente su capacidad de infiltración.
- ii) Las pequeñas intensidades de lluvia en la zona, que permiten que la fracción de lluvia que se infiltra represente un elevado porcentaje de la precipitación total (como ejemplo, baste recordar que las crecidas del río Mapocho en 1982 y 1986 se produjeron con intensidades máximas de 6 y 10 mm/hr respectivamente).

Para ilustrar la situación recién descrita, se puede señalar que del análisis de 150 crecidas medidas en ríos de la IV región, los mayores coeficientes de escorrentía observados fueron del orden del 10% y la escorrentía directa solo en una crecida (1984) representó más de 20 mm. Además, del estudio de las crecidas del Mapocho se deduce que el 70% de las tormentas de más de 60 mm generan una escorrentía directa que no alcanza a los 25 mm.

Desde otra perspectiva, estas características de la zona central y norte, conducen a que las respuestas de las cuencas - frente a una misma tormenta - pueden ser muy variables, situación que debiera ser considerada en el cálculo de crecidas en el momento de asignar el período de retorno al evento, a través de un enfoque probabilístico de la función de infiltración. El desconocimiento de estas circunstancias en la práctica, hace dudar de la realidad de muchos cálculos de crecidas en el país, en especial para cuencas pequeñas y un bajo período de retorno.

En el país no se han realizado estudios que recomienden cierto tipo de función de infiltración. Sin embargo, si se considera que las lluvias frecuentemente presentan una elevada intermitencia, es probable que el uso de expresiones en base a la infiltración acumulada sea más adecuado para aprovechar los registros estadísticos existentes, que el uso de las tradicionales curvas de infiltración en función del tiempo. Tampoco se han efectuado estudios de calibración a las condiciones locales de las expresiones propuestas en otros países.

CUADRO N° 1. Clasificación de funciones de infiltración (f). Ejemplos

Variable explicativa	Función de infiltración. Ejemplo	Obs.
-	Indice : $f = \text{constante}$ (3)	-
Tiempo	Curvas de infiltración empíricas	Fig. 5
Precipitación	<p>Método Soil Conservation Service (SCS) (Curva número):</p> $Q = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \quad (4) \quad \text{Con } Ia = 0.2S \quad Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (5)$ <p>Q : escorrentía directa P : precipitación Ia : pérdida inicial (parámetro) S : máxima pérdida potencial (parámetro)</p>	Fig. 6
Infiltración acumulada o Humedad del suelo.	<p>Método de Holtan:</p> $f = GI \cdot A \cdot Sa^{1.4} + fc \quad (6)$ <p>Sa : Humedad disponible GI, A, fc: parámetros</p>	-
Infiltración acumulada + intensidad de lluvia	<p>Método Hydrologic Engineering Center (HEC) :</p> $f = Ki^E \quad (7) \quad K = K_0 C^{-F/10} + 0.2D (1-F/D)^2 \quad (8)$ <p style="text-align: center;">con F/D 1</p> <p>Si F/D 1 el 2° término se anula F : infiltración acumulada i : intensidad de la lluvia K₀, C, D, E : parámetros</p>	Fig. 7
Infiltración acumulada o Humedad del suelo + área variable	<p>Método de Linsley y Crawford:</p> $\bar{f}_t = \frac{INF}{(LZS/LZSN)^2} \quad (9) \quad \bar{f}_t : \text{capacidad de infiltración media de la cuenca en instante } t$ <p>LZS : contenido de humedad del suelo LZSN : capacidad de humedad del suelo (parámetro) INF : parámetro</p>	Fig. 9

Respecto a la forma de generación de las crecidas, probablemente del Mau le hacia el norte el modelo más adecuado sea, en general, el de Horton, en consideración a las características climáticas de la zona. Sin embargo hacia el sur no es posible aceptar su validez a priori, sin la correspondiente investigación.

Agradecimientos

El autor desea agradecer la ayuda del Ing. Sr. Andrés Benítez en la obtención de antecedentes para el presente trabajo y al Ing. Sr. Alejandro Grilli por la revisión del manuscrito.

Bibliografía

Benítez A. Diversos Informes Técnicos

Dirección General de Aguas. Diversos Informes Técnicos

Dunin Frank X. Infiltration: Its simulation for field conditions en Facets of Hydrology. J. Rodda (Ed.). J. Wileys Sons 1976

Hydrologic Engineering Center (HEC). Hydrograph Analysis. Corps of Engineers U.S. Army. 1973.

Kirkby M.J. (Ed.). Hillslope Hydrology J. Wileys Sons 1978.

La Houille Blanche. Numéro spécial 4-5/1980. Relations pluie-débit.

Morel-Seytoux H.J. Por une théorie modifiée de l'infiltration. Cah. ORSTOM. Ser. Hydrol. 1973, 1974, 1975 (5 artículos)

Sokolov, Rants y Roche. Floodflow Computation. Methods compiled from world Experience. Studies and Reports in Hydrology 22. UNESCO. 1976.

Temez José. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. MOPU. España. 1978

U.S. Soil Conservation Service. National Engineering Handbook. Hydrology. 1957.

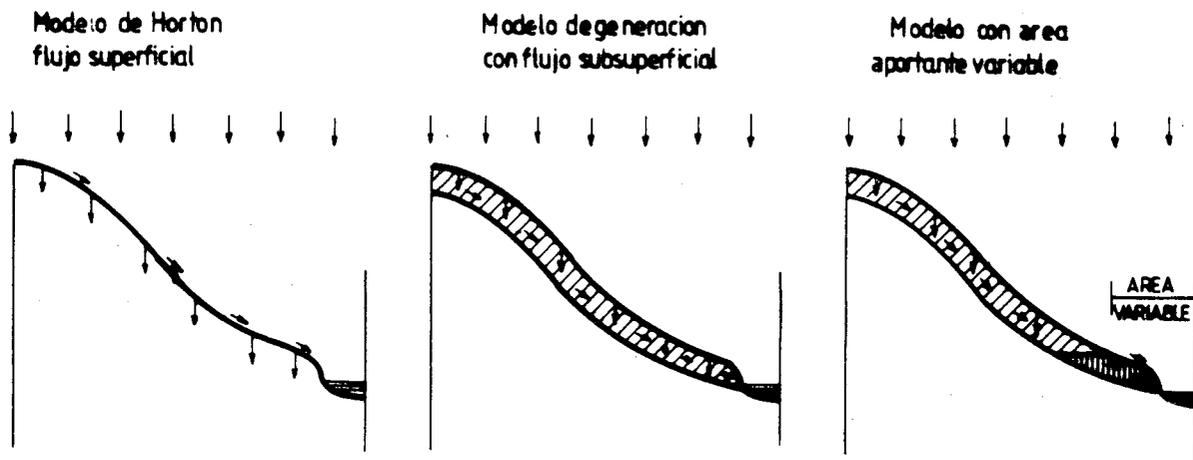


FIG. N° 1 MODELOS DE GENERACION DE CRECIDAS

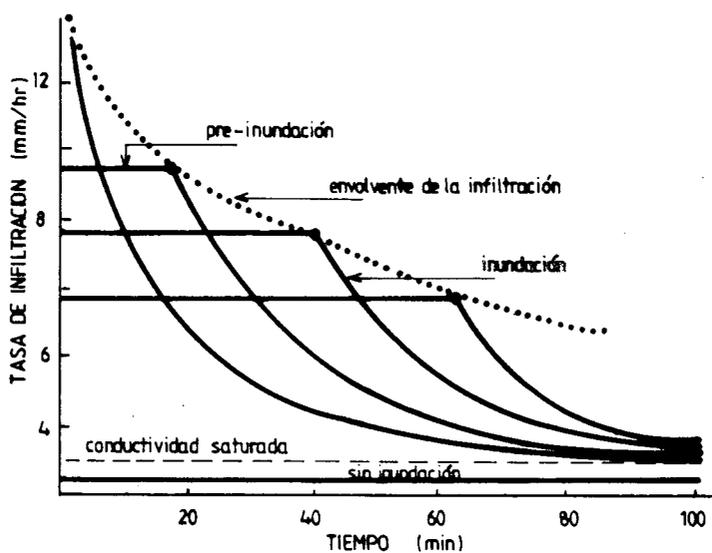


FIG. N° 2 EVOLUCION DE LA TASA DE INFILTRACION PARA DISTINTAS INTENSIDADES DE LLUVIA .:

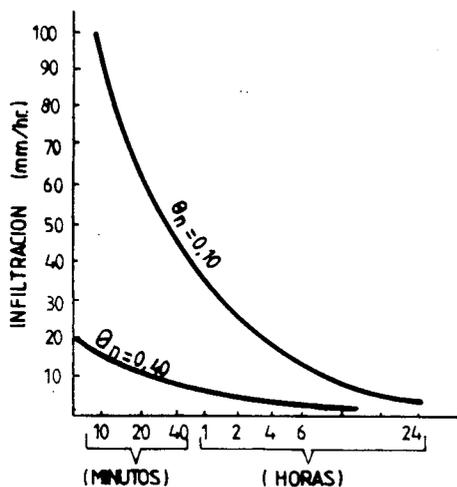


FIG. N° 3 CURVAS DE INFILTRACION DE UN SUELO CON DOS DIFERENTES CONTENIDOS INICIALES DE HUMEDAD (θ_n)

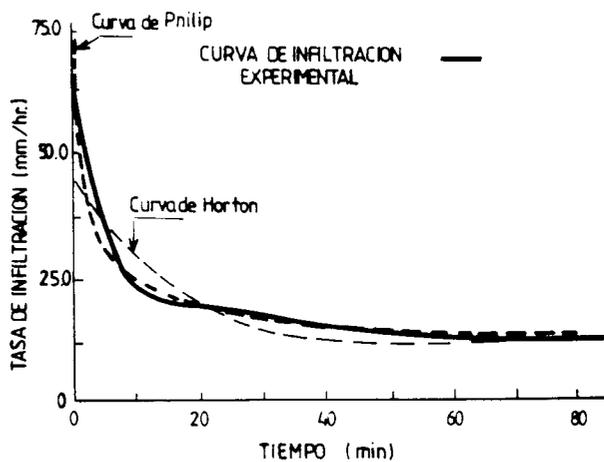


FIG. N° 4 AJUSTE DE LAS EXPRESIONES DE HORTON Y DE PHILIP A UNA CURVA DE INFILTRACION EXPERIMENTAL.

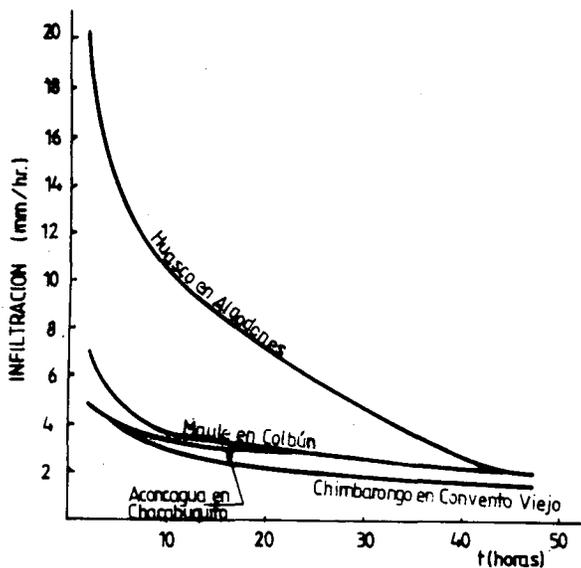


FIG. Nº 5 CURVAS DE INFILTRACION DE DIVERSAS CUENCAS CHILENAS (Sg. Ing. A. Benítez)

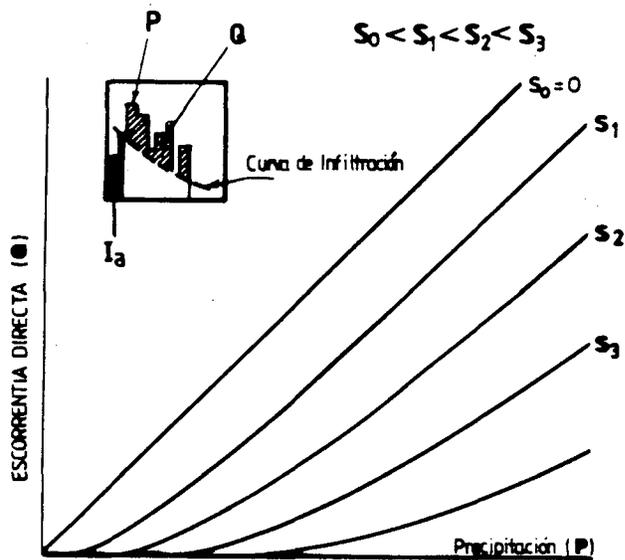


FIG. Nº 6 FUNCION DE ESCORRENTIA SEGUN METODO S. C. S (Curva número)

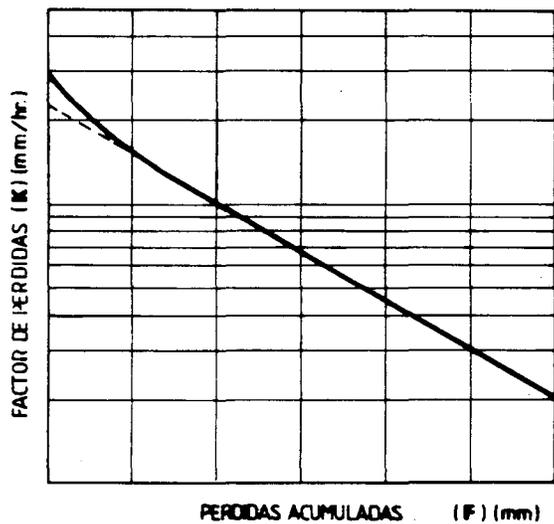


FIG. 7 FUNCION DEL FACTOR DE PERDIDAS (K). METODO HEC (Ver ecuación 8)

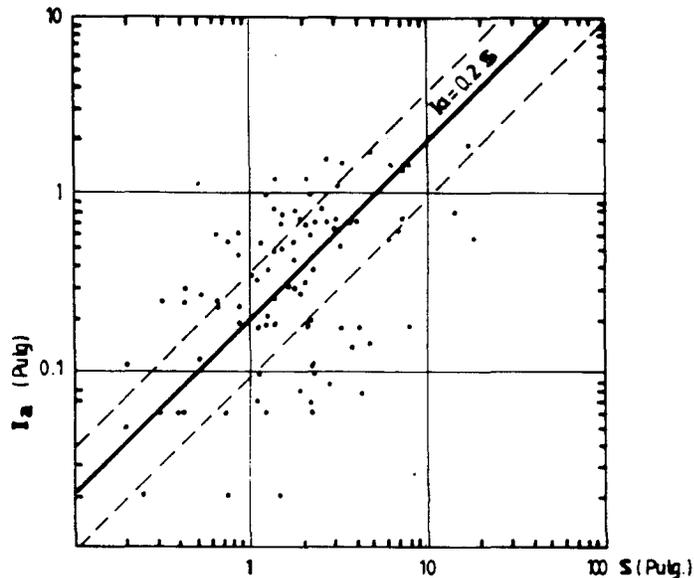


FIG. Nº 8 AJUSTE DE VALORES MEDIDOS A CURVA $I_a = 0.2 S$ Metodo S. C. S.

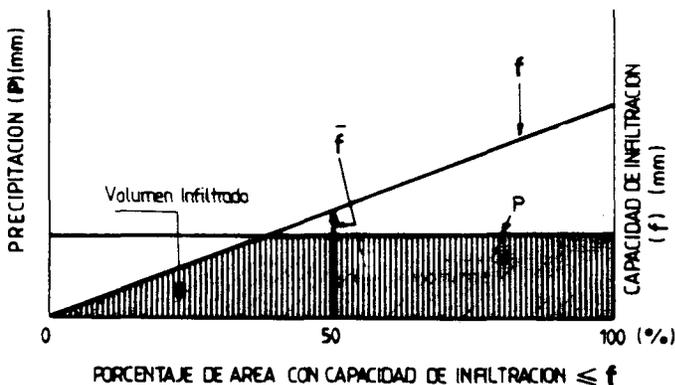


FIG. Nº 9 DETERMINACION DE LA INFILTRACION A NIVEL DE CUENCA. METODO LINSLEY Y CRAWFORD (Ver ecuación 9)

Comentarios y Preguntas

Ing. Sr. Pablo Isensee:

Con respecto a la consulta sobre el uso de estos métodos en pronósticos a corto plazo durante temporales, puedo señalar lo que sigue:

- En una memoria de ingeniero civil que guié durante 1985 construimos un modelo matemático que utilizaba el método de la curva número en forma incremental, el hidrograma unitario de una hora de duración y el flujo base como embalse lineal. Se probó en Convento Viejo para averiguar las posibilidades de usarlo como herramienta de pronóstico. Se pudo reproducir muy bien cada una de las siete crecidas analizadas, pero a costa de diferentes valores de los parámetros del modelo. Una vez elegido un conjunto de valores razonables de estos parámetros, se pudo constatar que la mayor parte de las diferencias entre valores observados y simulados eran atribuibles al desconocimiento de la variación espacial de la tormenta durante su desarrollo. Se concluyó entonces que es posible simular satisfactoriamente la crecida, siempre y cuando se tengan los datos de lluvia que permitan representar adecuadamente la magnitud y distribución espacial y temporal de la tormenta.

Ing. Sr. Ludwig Stowhas:

- Respecto al problema de la estimación de la infiltración deben distinguirse distintas situaciones. Para los propósitos de diagnóstico o análisis de situaciones históricas, una evaluación lo más precisa posible de las condiciones de infiltración resulta de gran importancia. Lo mismo podría decirse para el caso de diseño en zonas áridas o semi-áridas donde la magnitud de la infiltración resulta fundamental en la estimación de crecidas. Sin embargo, en zonas normales o húmedas, para el cálculo de crecidas de diseño de medio a alto período de retorno, el efecto de la infiltración y su distribución temporal suele resultar secundario frente a otras variables involucradas en el fenómeno. Es por ello, que resultaría del mayor interés, poder aplicar métodos simples tales como el Método de la Curva Número, de cuyo uso tengo buena experiencia. El esfuerzo en este campo podría orientarse a la determinación experimental de los valores de la Curva-Número en cuencas chilenas que permitan la aplicación más confiable del método.