

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Programa hidrología de superficie: Hidros.
<i>Autor / Adscripción</i>	Carlos Gutiérrez Ojed Instituto Mexicano de Tecnología del Agua José Angel Raynal Villaseñor Facultad de Ingeniería, UNAM
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, (1): 53-58
<i>Fecha de publicación</i>	1989
<i>Resumen</i>	El programa HIDROS forma parte del paquete de programas del convenio IMTA-Conacyt-UNAM desarrollados en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, para el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Consiste en un conjunto de subprogramas que permiten apoyar las actividades de cálculo y diseño en el área de Hidrología Superficial.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1258

Programa hidrología de superficie: Hidros¹

Carlos Gutiérrez Ojeda²

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA.

José Angel Raynal Villaseñor

Facultad de Ingeniería, UNAM

El programa HIDROS forma parte del paquete de programas del convenio IMTA-Conacyt-UNAM desarrollados en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, para el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Consiste en un conjunto de subprogramas que permiten apoyar las actividades de cálculo y diseño en el área de Hidrología Superficial. La estructura del programa permite que su empleo sea interactivo y de fácil utilización.

HIDROS es un programa desarrollado en lenguaje GWBASIC, puede ser utilizado en la mayoría de las computadoras PC compatibles con IBM. Consiste en un programa principal y ocho subprogramas operativos, los cuales resuelven diversos problemas básicos de Hidrología de Superficie.

El programa principal proporciona al usuario acceso a las diversas opciones de cálculo, graficación e información de los programas operativos, los cuales se encuentran contenidos en el *Menú Principal*:

1. Información
2. Curvas I-D-TR
3. Evaporación
4. Hidrograma unitario
5. Análisis de frecuencias de gastos máximos
6. Tránsito por cauces
7. Tránsito por vasos
8. Salida del programa

Subprograma información

Está diseñado para proporcionar al usuario la información general del manejo y utilización del

programa, así como la estructura y características generales dentro de las que se encuentran:

- Un programa principal y ocho subprogramas operativos.
- El programa principal contiene el *menú principal* desde el cual se tiene acceso a los distintos subprogramas operativos.
- Cada subprograma operativo tiene un *submenú* con una serie de subrutinas de cálculo que pueden elegirse de manera independiente.
- En todos los subprogramas se incluye una opción denominada "*información*", en la cual se describen las principales características de cada subprograma operativo.
- Existe la opción de obtener los resultados en pantalla o en impresora, así como la graficación de algunos resultados.

Subprograma curvas I-D-TR

Estas curvas permiten conocer la variación de las características de la intensidad con respecto a su frecuencia de incidencia (periodo de retorno). Se utilizan en modelos de relación lluvia-escurrimiento y se obtienen ajustando los valores de las intensidades máximas anuales correspondientes

a todas las duraciones de interés, y para las tormentas más desfavorables se aplica una ecuación del siguiente tipo:

$$I = \frac{k TR^m}{D^n} \quad (1)$$

Los parámetros k , m y n se calculan mediante un ajuste de correlación lineal múltiple. El programa calcula también el coeficiente de correlación lineal múltiple y el error estándar de la estimación, los cuales indican qué tanto se ajustan los datos a la ecuación propuesta.

En esta subrutina de cálculo se tiene la opción de obtener las curvas HP-D-TR (altura de precipitación -duración- periodo de retorno), mediante la misma metodología planteada anteriormente, considerando la transformación:

$$HP = I * D \quad (2)$$

en la ecuación (1).

Subprograma evaporación

Este subprograma permite estimar la evaporación por medio de la fórmula de Penman para superficies de agua abiertas muy poco profundas (someras) y para vegetaciones de poco desarrollo de altura uniforme, como pastos, que se encuentren cubriendo completamente el suelo y que tengan un buen suministro de agua. La estimación de la evaporación se limita a regiones comprendidas entre los 20 y 40 grados de latitud norte, lo cual abarca totalmente la República Mexicana.

La fórmula de Penman tiene muchas ventajas sobre otras ecuaciones disponibles, debido a que permite estimar la evaporación en diferentes climas y sus bases físicas. La fórmula de Penman para estimar la evaporación es:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left\{ Ra(1 - \phi)(0.25 + 0.5 \frac{n}{N}) - \sigma T^4(0.1 + 0.9 \frac{n}{N})(0.34 - 0.044\sqrt{e}) \right\} + \left(1 - \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) \left\{ 0.26(1.0 + \frac{u}{160})(e_s(T) - e) \right\} \quad (3)$$

Mediante regresiones múltiples de quinto y sexto orden se determinaron las relaciones que permiten

encontrar $e_s(T)$, Δ y σT^4 a partir de T , así como las relaciones para encontrar Ra y Na a partir de la latitud. Los coeficientes de correlación de las regresiones múltiples encontrados fueron superiores a 0.99 en todos los casos.

Subprograma hidrografa unitario

La técnica de los hidrografas unitarios se emplea para determinar la distribución temporal del escurrimiento superficial a la salida de la cuenca (o algún otro sitio de interés), cuando se presenta un patrón de distribución temporal de lluvia que cae uniformemente sobre la cuenca. El hidrografa unitario asociado a una duración d , se define como el hidrografa de escurrimiento directo que produce una precipitación efectiva unitaria distribuida uniformemente en la cuenca y en el tiempo d . Existen diversos tipos de hidrografas unitarios; en este trabajo se presentan tres de los más utilizados: Instantáneo, Triangular y Adimensional.

El hidrografa unitario instantáneo (HUI) se obtiene al hacer tender la duración de la lluvia a cero. El método empleado para identificar las ordenadas del HUI consiste en minimizar la suma de los errores al cuadrado (método de los mínimos cuadrados):

$$\min \left\{ y = \sum_{n=1}^N [e(n)]^2 \right\} \quad (4)$$

donde

$$e(n) = q(n) - \sum_{\nu=1}^n \delta(n - \nu + 1)r(\nu) \quad (5)$$

para $n = 1, 2, \dots, N$.

Cuando no se dispone de aforos de escurrimiento en la cuenca, no se puede obtener el HUI, por lo que se debe recurrir a los llamados Hidrografas Unitarios Sintéticos, los cuales se obtienen a partir de las características fisiográficas de la cuenca. Los Hidrografas Unitarios Triangulares (HUT) pertenecen a este tipo de hidrografas.

El HUT utilizado en este trabajo es el propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los EUA, dado que es uno de los más aceptados dentro del medio profesional hidrológico. Para su obtención se requiere calcular el tiempo pico y el gasto pico a partir de las ecuaciones propuestas por el SCS.

$$QP = 484 \left(\frac{A}{TP} \right) \quad (6)$$

$$TP = \left(\frac{D}{2} \right) + TL \quad (7)$$

$$TB = \left(\frac{8}{3} \right) TP \quad (8)$$

Los Hidrogramas Unitarios Adimensionales (HUA) se basan en análisis extensivos de datos medidos, al evaluar los HU para un gran número de cuencas y posteriormente hacerlos adimensionales, calculando el promedio de todos ellos. El HU utilizado en este trabajo es el propuesto por el SCS, pues permite definir con mayor detalle la forma del hidrograma. Para aplicar el método se necesita calcular el Gasto Pico (QP) y el Tiempo Pico (TP) mediante las mismas fórmulas propuestas para el HUT. Conocidos QP y TP , las ordenadas del HU (T, Q), se determinan al multiplicar las del HUA propuesto por el SCS ($T/TP, Q/QP$) por TP y QP , respectivamente. Una vez que se han identificado las ordenadas del HU en cualquiera de los tres casos anteriores, el programa permite cuantificar el escurrimiento directo producido por cualquier patrón de lluvia en exceso que ocurra en la cuenca, mediante la convolución de las ordenadas del HU correspondiente con las del hidrograma respectivo.

Subprograma análisis de frecuencias de gastos máximos

En hidrología uno de los problemas más frecuentes es la estimación de gastos de diseño a partir de muestras pequeñas. Si se tuviera una muestra lo suficientemente grande, como para cubrir el periodo de retorno del gasto de diseño buscado, dicho evento podría derivarse directamente de la muestra. Esto rara vez ocurre, por lo que a la muestra de datos se le ajusta una distribución de probabilidad y ésta proporciona, a su vez, los gastos de diseño con periodos de retorno más allá del más grande registrado.

De la extensa variedad de distribuciones continuas de probabilidad disponibles para la modelación de muestras de datos en Hidrología, se han seleccionado las siguientes, por ser las de uso más común en el análisis de gastos máximos anuales:

- Distribución GVE – Tipo I *Gumbel*
- Distribución Log-Normal de tres parámetros

Se ha llamado Distribución General de Valores Extremos (GVE) a la solución general de la ecuación que debe satisfacer los extremos. La distribución GVE – Tipo I, conocida como *Gumbel*, se obtiene como el límite de la distribución GVE cuando el parámetro de forma tiende a cero, siendo su función de distribución de probabilidad:

$$F(x) = e^{-e^{-(x-\mu)/\alpha}} \quad (9)$$

En ocasiones, las variables hidrológicas exhiben un marcado sesgo hacia la derecha, en parte por la influencia de fenómenos naturales que tienen valores mayores que cero, o algún otro límite menor, y por ser no restringidas teóricamente en su rango superior. En tales casos, las frecuencias no siguen una distribución normal sino que, por fortuna, las variables casi siempre son funcionalmente normales y sus logaritmos siguen una distribución normal. La distribución Log-Normal es especialmente útil debido a que la transformación abre aún más el extenso campo de los usos teóricos y aplicados de la distribución normal. La función de densidad de la distribución Log-Normal es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(x-x_0)\sigma y} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x-x_0) - \mu y}{\sigma y} \right]^2 \right\} \quad (10)$$

El método de estimación de parámetros utilizados en ambas distribuciones es el llamado método de momentos, que consiste en igualar los momentos poblacionales con los de la muestra. Con el fin de tener un criterio del ajuste de los datos a la distribución deseada, se calcula el Error Estándar. El programa calcula también los gastos máximos anuales, a partir de los parámetros estimados, para los periodos de retorno deseados, y grafica los datos y la distribución, lo cual es recomendable para la comparación visual del ajuste obtenido.

Subprograma tránsito de avenidas por cauces

El tránsito de avenidas es un proceso mediante el cual se puede reducir y alargar (atenuar) en el tiempo la magnitud de una avenida, por medio del almacenamiento en el trayecto entre dos puntos. Se utiliza principalmente para evaluar las medidas de control de inundaciones, así como para pronosticar las variaciones temporales y espaciales de una onda de agua (avenida) cuando

atraviesa un almacenamiento o tramo de río. En este programa se emplea el método modificado de Muskingum, el cual tiene la ventaja sobre el de Muskingum tradicional, de permitir la estimación de los parámetros K y ϵ (calibración) en una forma numérica precisa. Las expresiones para el cálculo de los parámetros son:

$$K = \frac{\sum_{n=1}^N (n - \frac{1}{2})O(n) - \sum_{n=1}^N (n - \frac{1}{2})I(n)}{\sum_{n=1}^N I(n)} \quad (11)$$

$$(1 - \epsilon) = \frac{1}{2K^2 \sum_{n=1}^N I(n)} \left\{ \sum_{n=1}^N (n - 0.5)^2 O(n) - 2K \sum_{n=1}^N (n - 0.5)I(n) - \sum_{n=1}^N (n - 0.5)^2 I(n) \right\} - \frac{1}{24K^2} \quad (12)$$

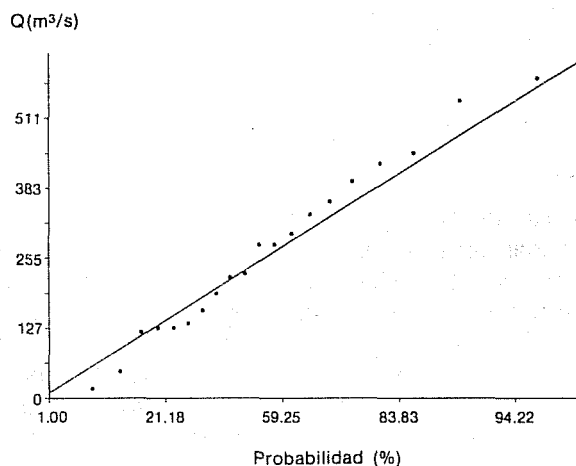
Una vez conocidos los parámetros se puede llevar a cabo el tránsito de cualquier avenida dentro del tramo de río considerado, dado que los parámetros permanecen constantes siempre y cuando no se alteren las condiciones físicas del cauce. Para realizar lo anterior, se obtienen las funciones núcleo del método de Muskingum a partir de los parámetros K y ϵ . Posteriormente, se convolucionan las ordenadas con los gastos de entrada promedio para obtener los gastos de salida en el tramo.

Subprograma tránsito de avenidas por vasos

El tránsito por vasos es un procedimiento para conocer el comportamiento hidrológico del embalse cuando se presenta una avenida. Este análisis es importante, ya que permite conocer la evolución de los niveles en el almacenamiento, los cuales son necesarios para establecer las políticas de operación de las obras de toma y excedencias, medidas que se implantan a fin de no poner en peligro vidas o bienes, aguas abajo del almacenamiento. Se utiliza también para determinar el hidrograma de salida del almacenamiento, dimensionar las obras de excedencias, de desvío y alturas de ataguías, así como para fijar la altura de la cortina.

Existen diversos procedimientos para llevar a cabo el tránsito de avenidas en vasos. Dentro

1. Análisis de frecuencias de gastos máximos distribución GVE-1 (Gumbel)



de éstos, los numéricos tienen la ventaja de ser más rápidos y precisos cuando se dispone de una computadora. El método empleado en este subprograma pertenece a los llamados métodos numéricos del tipo predictor-corrector.

Subprograma salida del paquete

Este subprograma permite salirse del programa una vez concluida la sesión, con lo cual se tiene acceso al sistema operativo de la computadora.

Ejemplo 1

Realizar el análisis de frecuencias de los gastos máximos anuales de la estación San Pedro (véase cuadro 1) por medio de la Distribución GVE-Tipo I Gumbel, y calcular los gastos máximos para los periodos de retorno de 2,5,10,20,25,50,100,500,1000 y 10000 años.

1. Gastos máximos anuales estación San Pedro

año	Q(m³/s)	año	Q(m³/s)
1950	133.5	1960	125.5
1951	356.2	1961	13.01
1952	427.0	1962	581.5
1953	217.3	1963	156.6
1954	278.6	1964	227.3
1955	298.6	1965	334.8
1956	279.0	1966	117.4
1957	190.1	1967	125.9
1958	45.42	1968	539.9
1959	394.3	1969	446.7

Resultados

Distribución general de valores extremos tipo I: (Gumbel)

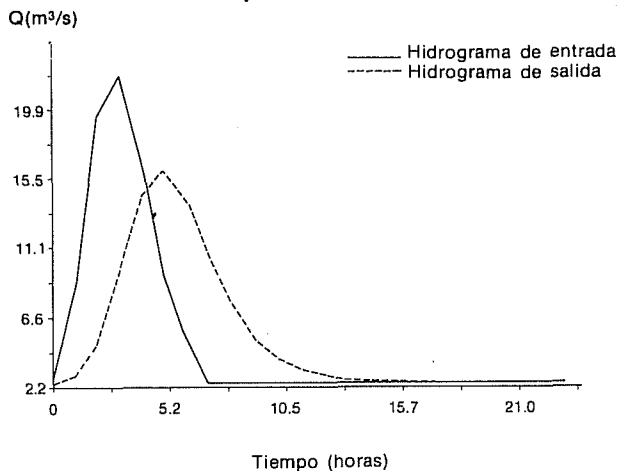
Parámetros no sesgados obtenidos por el método de momentos:

parámetro de ubicación = 193.1253
 parámetro de escala = 123.5494
 error estándar de ajuste = 30.74089

2. Gastos máximos anuales calculados $Q(I)$ obtenidos de la distribución general de valores extremos tipo-1 (Gumbel)

I	$Q(I)$ (m^3/S)	$Tr(I)$ (AÑOS)	$Pr(I)$
1	238.4078	2	0.5
2	378.442	5	0.8
3	471.1567	10	0.9
4	560.0911	20	0.95
5	675.2073	50	0.98
6	761.4706	100	0.99
7	847.4194	200	0.995
8	897.6176	300	0.9966667
9	933.2105	400	0.9974999
10	960.8102	500	0.998
11	4046.509	1000	0.9989999

2. Tránsito de avenidas por cauces



Ejemplo 2

Realizar el tránsito de avenidas del hidrograma de entrada siguiente para un tramo de río cuyos parámetros son:

$$K = 2.742752 \quad \epsilon = 0.3696888$$

3. Hidrograma de entrada

t(horas)	$I(m^3/s)$
0	2.50
1	8.13
2	19.38
3	22.19
4	16.56
5	9.44
6	5.31
7	2.50

gasto base = 2.50 m^3/s

Resultados

4. Hidrograma de salida instantáneo

Tiempo (horas)	$Q(m^3/s)$	Tiempo	$Q(m^3/s)$
1	2.810564	13	2.780327
2	4.84172	14	2.6572
3	9.532259	15	2.588153
4	14.31922	16	2.549434
5	15.83654	17	2.527721
6	13.97008	18	2.515545
7	10.69051	19	2.508717
8	7.555121	20	2.504889
9	5.334773	21	2.502741
10	4.089662	22	2.501537
11	3.391439	23	2.500862
12	2.999894		

Volumen de entrada (m^3) = 237636
 Volumen de salida (m^3) = 237632

Nomenclatura

- I Intensidad de la lluvia.
- TR Periodo de retorno
- D Duración de la intensidad
- E Evaporación, en mm/día
- Δ Pendiente de la curva de presión de vapor saturado, en milibars/ $^{\circ}C$
- Ra Radiación solar en el límite superior de la atmósfera, en mm/día
- n Número actual de horas de luz de sol, en h
- N Número máximo posible de horas de luz de sol, en h
- σT^4 Radiación reflejada por la superficie a la temperatura T , en mm/día
- T Promedio de las temperaturas máximas y mínimas diarias, en $^{\circ}C$
- u Velocidad del viento en km/día
- e Presión de vapor de media mañana, en milibars
- $e_s(T)$ Presión de vapor saturado a la temperatura T , en milibars
- γ Constante psicométrica = 0.67 milibars/ $^{\circ}C$
- ϕ Coeficiente de reflexión de la superficie: 0.05 superficies de agua abiertas someras 0.25 vegetaciones de poco desarrollo
- $q(n)$ Escurrimiento directo en el tiempo n
- $\delta(\cdot)$ Ordenadas del H.U.I
- $r(\nu)$ Intensidades de lluvia media en exceso entre los tiempos $\nu - 1$ y ν .
- QP Gasto pico, en pies cúbicos/s
- A Area de la cuenca, millas²
- TP Tiempo Pico, en h

- D Duración de la lluvia, en h
 TL Tiempo de retraso, desde el centroide de la lluvia hasta el gasto de pico, en h
 TB Tiempo base, en h
 μ Parámetro de ubicación de la GVE – Tipo I Gumbel
 α Parámetro de escala de la GVE – Tipo I Gumbel
 x_0 Parámetro de Ubicación de la distribución Log–Normal de tres parámetros
 μy Parámetro de escala de la distribución Log–Normal de tres parámetros
 σy Parámetro de forma de la distribución Log–Normal de tres parámetros
 K Constante del tiempo de almacenamiento del tramo de río considerado
 ε Factor de peso ($0 \leq \varepsilon \leq 1$).
 $O(n)$ Gasto promedio de salida en el intervalo $(n-1, n)$
 $I(n)$ Gasto promedio de entrada en el intervalo $(n-1, n)$

Referencias

- Campos Aranda D.F. *Procesos del ciclo hidrológico*, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1984.
Instituto de Investigaciones Eléctricas. *Manual de Diseño de Obras Civiles*, CFE.
McCuen, Richard H. *A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods*, Prentice–Hall, Inc., 1982.
Raynal Villaseñor, José A. *Apuntes de Hidrología de Superficie*, DEPFI – UNAM.
Stewart, J.B., Roberts J.M. Estimation of Hydrological Variables, Course Note No. 9, Title: Evapotranspiration.
Warren Viessman, J.R. *Introduction to Hydrology*, Intext Educational Publishers, Nueva York.

¹ Los autores agradecen a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, al IMTA y a Conacyt las facilidades otorgadas para la realización del presente trabajo.

² Las personas interesadas en obtener el HIDROS y su manual de usuarios podrán comunicarse con el autor en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Mor. C.P. 62550