



MERCEDES

Un modelo de pronóstico de avenidas para cuencas heterogéneas

Ramón Domínguez Mora¹
Christophe Bouvier²
Guadalupe Fuentes Mariles³

Se denomina **MERCEDES** (Malla de elementos regulares cuadrados para el estudio de los escurrimientos superficiales) a un modelo hidrológico que permite hacer el pronóstico de avenidas a partir de la subdivisión de la cuenca en una malla de cuadrados regulares.

Esta forma de subdividir la cuenca facilita que, al simular la transformación de lluvias en escurrimientos, se tome en cuenta la variabilidad espacial de los factores climáticos y geográficos (precipitaciones, relieve, tipos y usos del suelo, etc.) que condicionan las características de las avenidas.

El modelo MERCEDES logra mayor precisión que los modelos de parámetros concentrados, sobre todo en las cuencas en donde es difícil encontrar las condiciones de homogeneidad espacial que requieren estos modelos (por ejemplo en las cuencas grandes, en las montañosas o en las semiurbanizadas).

Las posibilidades de aplicación del modelo MERCEDES abarcan los siguientes campos:

- El pronóstico de las avenidas en tiempo real

(si existe una red de medición de lluvias por control remoto).

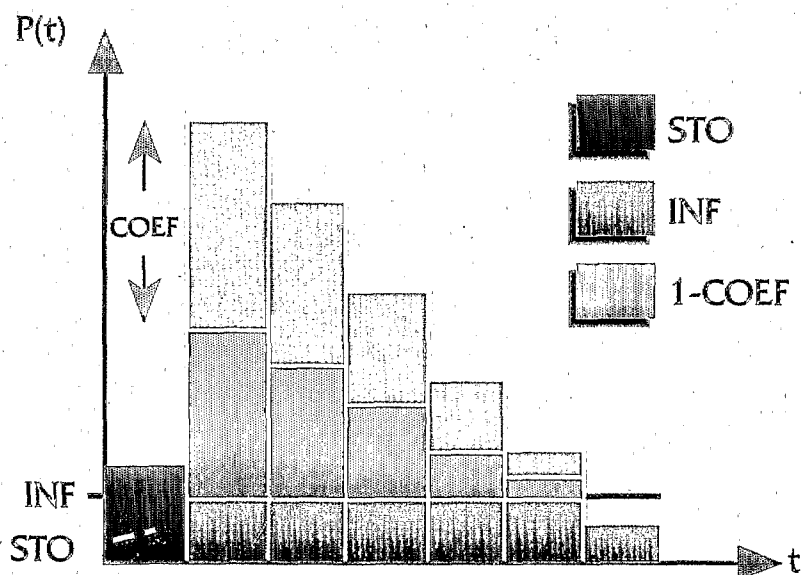
- El diseño y diagnóstico de las obras hidráulicas para el drenaje y control de las avenidas.
- La simulación de los efectos del cambio de uso del suelo en los escurrimientos.
- La caracterización del riego de inundación.

I. Etapas para el desarrollo del modelo MERCEDES

Los conceptos generales que se utilizan en el modelo se pueden resumir en las siguientes etapas:

1. Se divide la cuenca en una malla de cuadros regulares.
2. Se calcula, para cada intervalo de tiempo t , la lluvia que recibe cada cuadro de la malla, a partir de las precipitaciones puntuales medidas en los pluviómetros. El cálculo se puede realizar de dos formas:
 - a) La lluvia en la malla m se considera igual a la del pluviógrafo más cercano
 - b) La lluvia en la malla m se interpola de acuerdo con las distancias de la malla m a los pluviómetros de referencia.
3. Se calcula la lluvia efectiva en la malla m , para el tiempo t , considerando una combinación de:
 - pérdidas por almacenamiento inicial (parámetro STO)
 - pérdidas por infiltración constante (parámetro INF)
 - pérdidas proporcionales a la intensidad de la tormenta (parámetro 1-COEF) (Figura 1).
4. Para cada malla m , se define la trayectoria a la malla adyacente escogiendo una de las ocho posibilidades determinadas por ángulos de 45° . De esta forma se determina la trayectoria total desde cada malla hasta la salida de la cuenca. Adicionalmente, para cada tramo de la trayectoria se determina la pendiente P_i y la longitud l_i (Figura 2).

Figura 1





5. Para simular el tránsito de la lluvia efectiva desde cada malla m hasta la salida de la cuenca, se calcula una velocidad v_i , en cada tramo de la trayectoria, en función de su pendiente P_i y de dos parámetros V_o y alfa, mediante la expresión:

$$V_i = V_o P_i^{\text{alfa}} \quad (1)$$

De esta forma, el tiempo de paso por el tramo i de la trayectoria resulta $t_i = l_i/V_i$.

La lluvia efectiva de la malla m en el tiempo t_j se convierte en hidrograma a la salida de la cuenca al considerar los siguientes factores:

- el tiempo de propagación T_m que equivale a la suma de los tiempos parciales empleados en cada tramo de la trayectoria.
- el factor de amortización K_m , que le confiere al escurrimiento una distribución en el tiempo después de la fecha T_m .

El modelo MERCEDES permite utilizar dos tipos de amortización (Figura 3), cada uno referido al parámetro K_o :

Una relación lineal entre K_m y T_m :

$$K_m = K_o T_m \quad (2)$$

Una relación logarítmica:

$$K_m = K_o \ln(T_m) \quad (3)$$

Las ecuaciones relativas al hidrograma elemental que produce cada malla m en un tiempo t_j , son entonces:

$$Q_m(t) = 0 \quad \text{si } t < t_j + T_m \quad (4)$$

$$Q_m(t) = V_r * 1/K_m * \exp(-(t-(t_j + T_m))/K_m) \quad \text{si } t \geq t_j + T_m \quad (5)$$

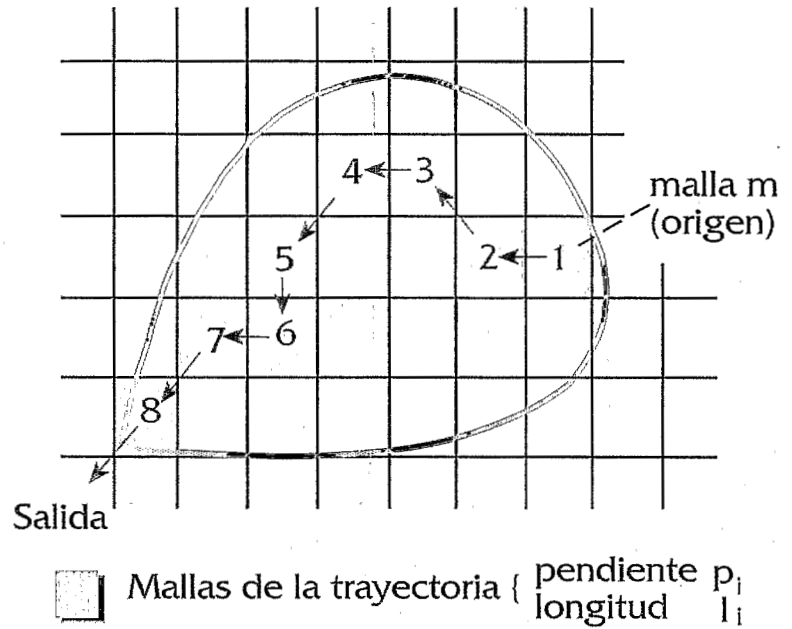
6. El hidrograma completo de la avenida se determina al sumar las contribuciones de todas las mallas para todos los intervalos de tiempo de la lluvia.

En resumen, MERCEDES utiliza conceptos bastante sencillos para definir las pérdidas y para el tránsito del escurrimiento, lo que permite aplicarlos a una estructura distribuida que toma en cuenta la variabilidad espacial de los factores que condicionan las avenidas, con lo que se logra reducir la principal limitante de los modelos de parámetros concentrados.

II. Datos que requiere el modelo MERCEDES

Para utilizar el modelo se requiere de tres tipos de datos: los relativos a las precipitaciones, los que se refieren a la geografía de la cuenca y los parámetros numéricos del modelo.

En cuanto a las precipitaciones, el usuario debe definir el intervalo de tiempo para los cálculos, la ubicación de los pluviógrafos y las



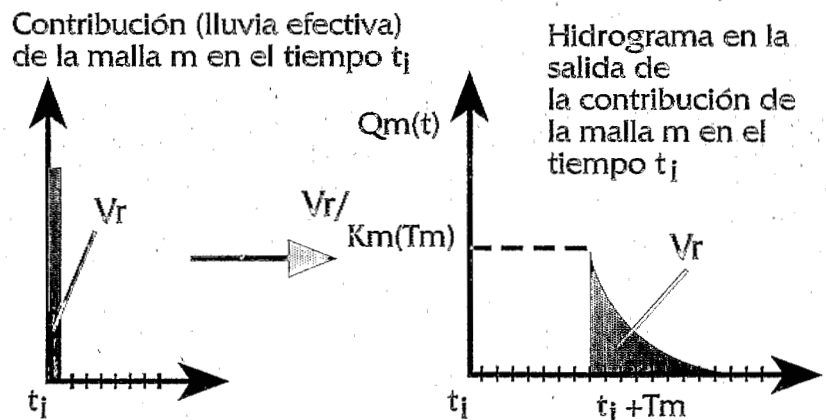
precipitaciones medidas en cada uno de estos aparatos. Para preparar los datos pueden utilizarse paquetes de manejo de información como "Pluviom" e "Hydrom".

Figura 2

Los datos geográficos (topografía, pendientes, edafología, uso del suelo, etc.) deben proporcionarse para cada cuadro de la malla, por lo que es necesario utilizar herramientas computacionales modernas tales como los modelos numéricos de terreno (MNE) y los sistemas de información geográfica (SIG) con los que se pueden manejar imágenes de satélite y en general datos cartográficos.

En el caso de los parámetros numéricos, el usuario debe proporcionar los valores adecuados de los tres parámetros de pérdidas: STO, INF y COEF y de los tres parámetros de tránsito: V_o , alfa y K_o . Para determinarlos se

Figura 3



puede recurrir a la literatura técnica, especialmente en el caso de los parámetros de pérdidas, pero de preferencia se recomienda calibrarlos con una muestra de datos observados. El modelo MERCEDES contiene un método de optimización no lineal para estimar los valores convenientes de los parámetros. Como ejemplo se describen a continuación los parámetros regionales de la cuenca del Valle de México, obtenidos después de calibrar el modelo.

De acuerdo con el uso del suelo se distinguen cuatro tipos de mallas, para los que los parámetros de pérdidas resultaron:

Bosques:

STO = 15 mm, INF = 25 mm/h, COEF = 100%

Suelos agrícolas, pastizales:

STO = 10 mm, INF = 15 mm/h, COEF = 100%

Suelos semiurbanos:

STO = 5 mm, INF = 10 mm/h, COEF = 100%

Suelos urbanos:

STO = 2 mm, INF = 5 mm/h, COEF = 100%

Los parámetros de tránsito son aplicables a todos los cuadros de la malla; sus valores resultaron:

$V_o = 2.0$ m/s $\alpha = 0.1$ $K_o = 2.5$

III. Ejemplos de aplicación del modelo

Se describen en seguida dos ejemplos mediante los cuales se muestra la influencia de la distribución no uniforme de la lluvia y de las características geográficas, respectivamente.

1. Efectos de la localización de la tormenta en el escurrimiento.

Se simulan los hidrogramas producidos por dos configuraciones espaciales de las tormentas; en ambas el hietograma promedio de la lluvia es el que se muestra en la figura 4, pero en la primera lluvia se centra en la parte baja de la cuenca (malla A) y en la segunda en un sitio alto (malla B).

El modelo MERCEDES proporciona dos hidrogramas distintos, de acuerdo con la localización de la tormenta. En la figura 5 puede observarse cómo cuando se aleja el centro de la tormenta, disminuye el gasto de pico, aumenta el tiempo de respuesta de la cuenca y el tiempo de ascenso del hidrograma.

Estas variaciones en el hidrograma debidas a las diferencias en la localización de la tormenta no podrían simularse con un modelo de parámetros concentrados (Figura 6).

2. Efectos del cambio de uso del suelo en las cuencas.

Aquí se simulan los hidrogramas resultantes de distintas configuraciones de uso del suelo en la cuenca; en todos los casos bajo una tormenta uniforme.

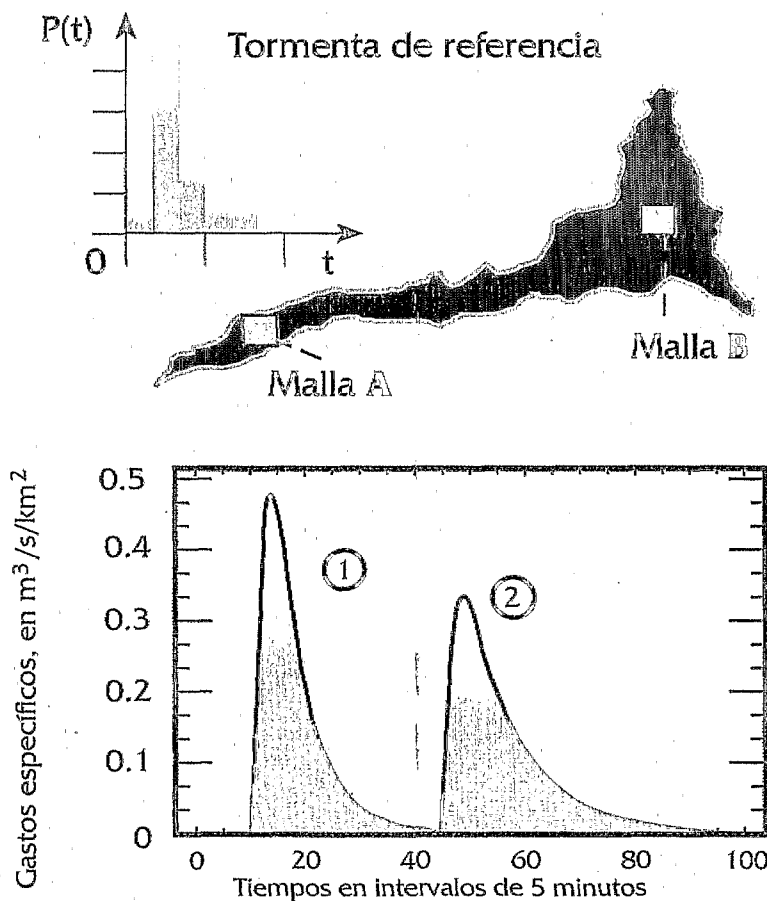
- En la configuración inicial, la cuenca presenta dos tipos de uso del suelo: agrícola en la parte baja y bosques en la alta. Se utilizan valores del coeficiente de escurrimiento (COEF) del 20% para suelos agrícolas y del 5% para bosques. Para los parámetros de tránsito se utiliza:

$V_o = 2.0$ m/s $\alpha = 0.1$ $K_o = 2.5$

- En una segunda fase (de deforestación) se supone que los suelos de la zona B se convierten en agrícolas, por lo que se utiliza el valor de COEF = 20 %.

- En la tercera etapa (de urbanización) se urbaniza la parte alta de la cuenca, que en sus inicios era un conjunto de bosques. Se cambia a 50% el valor de COEF en la zona B y permanecen iguales los parámetros de tránsito.

Figuras 4 y 5





En los hidrogramas correspondientes a las tres etapas de uso del suelo (Figura 7), se notan claramente los efectos de la deforestación y de la urbanización. En estos ejemplos, la estructura distribuida del modelo MERCEDES, al integrar la variación espacial de las características geográficas, proporciona una determinación de los hidrogramas que no pueden alcanzar los modelos de parámetros concentrados. En general, permite simular situaciones más complejas con base en las características geográficas de una cuenca y en relación con cualquier tipo de evento pluviométrico. Y, además de servir para diagnosticar la situación presente en una cuenca, se debe considerar este modelo como una herramienta de planificación y ayuda a la hora de la toma de decisiones pues permite simular el efecto de proyectos futuros o perspectivas de evolución del uso del suelo en las cuencas.

Conclusiones

Por su estructura de espacios, el modelo MERCEDES es más preciso en la determinación de los hidrogramas que los modelos de parámetros concentrados. Este modelo toma en cuenta la variabilidad espacial de los factores que determinan el escurrimiento, tales como las precipitaciones, los tipos y usos del suelo y el relieve. Por ello se recomienda emplearlo cuando sea difícil encontrar tormentas uniformes y/o en cuencas geográficamente heterogéneas (es el caso de cuencas muy grandes, montañosas o semiurbanas).

Hasta ahora, el modelo MERCEDES se ha probado con éxito en la región de la cuenca del Valle de México. En particular, se obtuvieron los valores de los parámetros que permitirán aplicarlo en cualquier subcuenca que rodee al Distrito Federal. Sin embargo, no se puede garantizar la adecuación de estos valores en otras áreas. En esos casos habrá que recurrir a la literatura para obtener los coeficientes de escurrimiento o calibrar el modelo MERCEDES con los datos observados. Cabe señalar que la calibración no requiere las condiciones de homogeneidad que sí resultan indispensables al emplear los modelos de parámetros concentrados y por eso se puede llevar a cabo más fácilmente. Además, se espera que haya una calibración más confiable para extrapolar fuera del campo de experimentación.

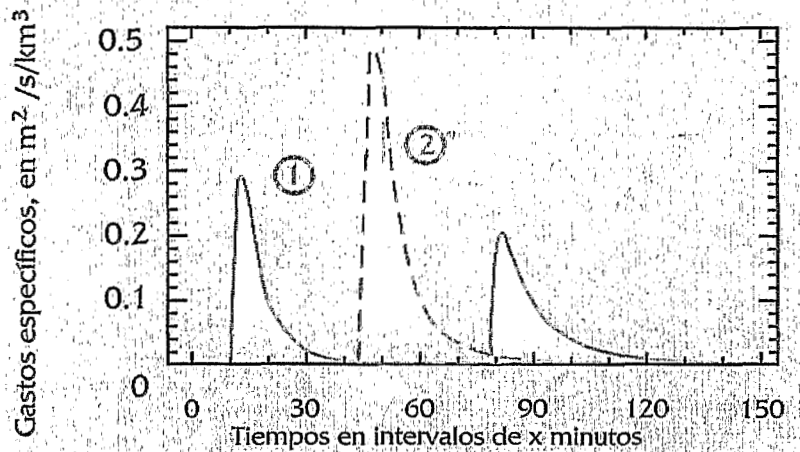


Figura 6

Por la sencillez de su programación, el modelo MERCEDES puede aplicarse a diversos campos, como el de pronóstico en tiempo real, el de impacto de cambio de uso de suelo o el de caracterización de riesgos de inundaciones. Este modelo es, también, una herramienta de diseño, diagnóstico de obras hidráulicas y simulación que, se espera, podrá integrarse a sistemas de mediciones hidrop pluviométricas en tiempo real, para crear sistemas de alerta contra las inundaciones.

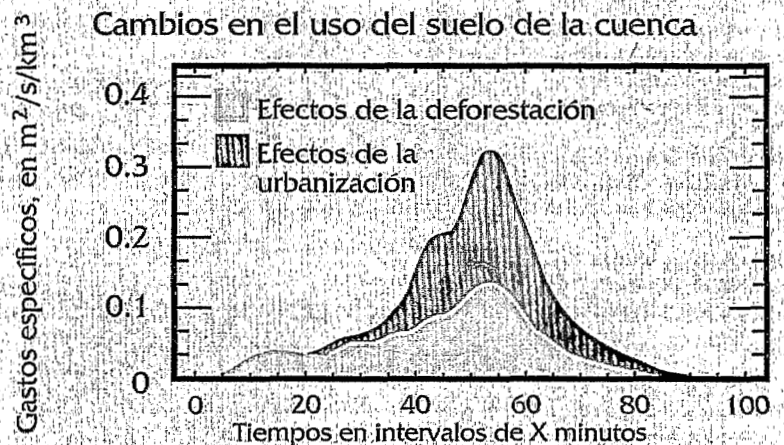


Figura 7

BIBLIOGRAFIA

Bouvier Ch., "MERCEDES", *Principes du modèle et notice d'utilisation*. Editions de l'Orstom, 1994, 40 pp. más anexos.

Bouvier Ch., Domínguez, R. y Fuentes, G., *Estudio hidrológico de las cuencas que rodean a la ciudad de México. Pronóstico de las avenidas*. Ed. Instituto de Ingeniería ORSTOM, en prensa.