



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Herramienta para la determinación de la distancia óptima entre imbornales en medio urbano

Treball realitzat per:

Miquel Sàrrias Montón

Dirigit per:

Manuel Gómez Valentín

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 22 d'octubre de 2017

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima
i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Als que lluiten.

Tabla de contenido

1. Introducción	3
1.1. Motivación: La problemática del exceso de agua en las calles	3
1.2. Objetivo	3
1.3. Definición de conceptos utilizados.....	4
2. Metodología aplicada.....	5
2.1. Comportamiento hidráulico de los elementos de captación.....	5
2.2. Funcionamiento hidráulico de una calle	9
Calle sin imbornales	9
Calle con imbornales	9
2.3. Elección la lluvia de proyecto	10
Periodo de retorno.....	10
Lluvia de proyecto: Método de los bloques alternados.....	11
2.4. Criterios de peligrosidad para peatones	13
Criterios de calado máximo.....	13
Criterios de velocidad máxima	13
Conversión de los criterios a límites de caudales	14
2.5. Cálculo del espaciamiento óptimo entre imbornales	16
Enfoque 2D.....	16
Método racional.....	16
Enfoque 1D mediante la aproximación de la onda cinemática	19
3. Programa de cálculo.....	22
3.1. Entrada de datos	22
Geometría de la calle	23
Criterios de riesgo	24
Geometría de la reja del sumidero	25
Evento de lluvia	27
3.2. Motor de cálculo	29
Cálculo de los planos de escorrentía.....	29
Cálculo de caudales máximos	31
Cálculo del canal.....	31
Cálculo estabilidad	34
3.3. Ventana de resultados	34

Rainfall and flow.....	35
Flow limits	35
Spacing	35
Charts	35
4. Resultados. Ejemplo de aplicación.....	37
5. Conclusiones.....	41
Limitaciones del modelo utilizado.....	41
Limitaciones del programa.....	41
6. Bibliografía	43

1. Introducción

1.1. Motivación: La problemática del exceso de agua en las calles

El proceso de lluvia-escorrentía es extremadamente complejo, haciendo difícil un modelado preciso. En áreas de suelo natural, rural o de zonas urbanas poco desarrolladas, la escorrentía producida por episodios de lluvia, se ve afectada por multitud de factores como superficies de retención naturales, características de infiltración del terreno, capas de vegetación o la topografía.

Los procesos de urbanización tienen un gran impacto en la formación de la escorrentía. A medida que se urbaniza una zona, el suelo se convierte en impermeable, y los procesos de infiltración en el terreno natural se sustituyen por un conjunto de imbornales y tuberías. Este cambio implica mayores caudales de escorrentía, ya que ahora, toda gota de agua debe viajar por la calle, como mínimo, hasta el imbornal más próximo. Otras derivadas como la reducción de árboles, también ayudan a aumentar la escorrentía. Desgraciadamente, este aumento de caudales puede causar inundaciones o situaciones no deseables en el medio urbano cuando el sistema de drenaje superficial no es capaz de evacuar suficiente agua de la superficie.

Más allá de las situaciones desagradables o los contratiempos que un exceso de agua en la calle pueda ocasionar, debe entenderse que puede tratarse también de un riesgo. En calles de elevada pendiente, donde el agua fluye a gran velocidad, se ha comprobado que si el agua llega hasta el tobillo y circulando a gran velocidad, puede ocasionar la pérdida de equilibrio y la caída de una persona media. Si cuando la persona cae, ésta es arrastrada, puede impactar con multitud de apéndices de infraestructura o mobiliario urbano, hiriendo de cierta gravedad a dicha persona.

Éste, como cualquier otro riesgo a los que la ingeniería civil se enfrenta, es un riesgo que hay que conocer, entender, estudiar, e intentar acotar o controlar. No es posible diseñar un sistema de captación que no permita que haya nunca agua en las calles, y aun si fuera posible, no es aceptable desde el punto de vista coste-beneficio.

Para enfrentarse al problema hay que definir cuánta agua se puede aceptar en la calle y cada cuanto tiempo se permitirá que estos límites se sobrepasen. En una zona rural, sin infraestructura, puede ser aceptable que se produzca una inundación de medio metro una vez al año, pero en una gran ciudad nadie permitiría 15 centímetros de agua cada dos o tres años. Estos factores se traducen en unos límites de calados y velocidades, y a una lluvia con un periodo de retorno concreto. A lo largo del documento se tratarán todos estos aspectos.

Con el problema acotado, éste se resuelve ubicando los imbornales más o menos espaciados a lo largo de la calle, hasta encontrar la distancia óptima que hace que, por un lado, los límites marcados no se sobrepasen y por otro, que no se coloquen más imbornales de los necesarios.

1.2. Objetivo

El primer objetivo del presente trabajo es crear una herramienta informática de escritorio que permita resolver el problema planteado en función de las distintas casuísticas. El programa ha de ser fácil y sencillo de utilizar, lo más intuitivo posible. Para ello, constará de una interfaz gráfica donde el usuario podrá introducir los valores de entrada necesarios y ver los resultados del problema.

El segundo objetivo, que no deja de ser la continuación del anterior, es que el programa esté disponible para todos los usuarios en la red y que puedan descargarlo, utilizarlo y editarlo de forma libre.

El lenguaje de programación utilizado será Python, junto con el administrador de paquetes Anaconda, utilizado para crear aplicaciones de cálculo científico.

1.3. Definición de conceptos utilizados

- Elemento de captación: imbornal
- Elemento de drenaje: imbornal
- Imbornal: conjunto de elementos superficiales y enterrados (cuya parte más visible suele ser una reja metálica) destinados a la captación de agua de escorrentía superficial.
- Sistema de captación: suma de imbornales.
- Sistema de drenaje: suma del sistema de captación y red de alcantarillado.
- Sumidero: imbornal
- Red de alcantarillado: red de conducciones subterráneas utilizadas para dirigir el agua de lluvia hasta un punto de almacenamiento, saneamiento o vertido.

2. Metodología aplicada

2.1. Comportamiento hidráulico de los elementos de captación

Los elementos de captación son los elementos que se ubican en la calle y que permiten que el agua pase de desplazarse en superficie a hacerlo por la red de alcantarillado.

Éste es su principal cometido, pero es necesario entender que a menudo no son capaces de captar el cien por cien de la escorrentía generada. Tan solo una parte será recogida por el sistema de captación, y el resto seguirá en superficie.

Los sumideros deben ubicarse en las partes bajas de las secciones transversales de las calles, por las zonas donde tenderá a circular el agua, típicamente junto al bordillo. Cuando la cantidad de lluvia es reducida, y por extensión, la escorrentía generada también, todo el flujo viaja por estas zonas bajas (caudal frontal) y como consecuencia posiblemente todo el caudal será captado. Por otro lado, para mayores caudales, hay partes del flujo no pasan por encima del imbornal (caudal lateral), y por lo tanto sigue viajando aguas abajo. En la **Figura 1** se ilustra este efecto.

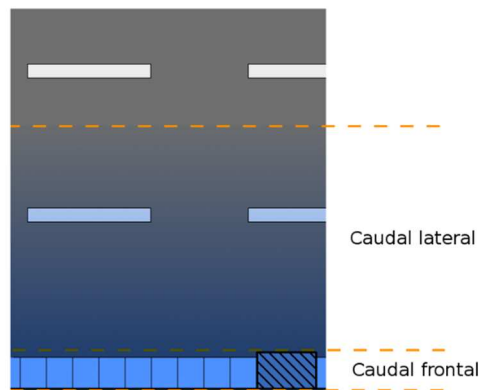


Figura 1: Definición de caudal lateral y frontal. (Fuente propia)

La capacidad de un sumidero para captar más o menos caudal, dependerá básicamente de las propiedades del caudal y de la reja instalada. Factores como el área de huecos, el número y la distribución de las barras, y sus dimensiones son los parámetros que dictan el comportamiento de una reja.

Esta capacidad del sumidero para captar caudal, se define como la eficiencia de captación. Matemáticamente puede escribirse como:

$$E = \frac{Q_{cap}}{Q_{calle}} \quad (1)$$

Donde:

E	Eficiencia de captación de la reja
Q_{cap}	Caudal captado por la reja
Q_{calle}	Caudal que circula en la sección inmediatamente anterior al sumidero

Se da la paradoja de que los fabricantes de rejillas diseñan estos elementos con acertados criterios mecánicos, e incluso estéticos, pero olvidan la parte hidráulica, que es precisamente la función

para la que son construidos. En los catálogos se ofrecen las capacidades estructurales de las rejjas, ya que han sido ensayadas en este campo, pero muy pocos añaden información para el rendimiento hidráulico o sobre la eficiencia de captación de sus rejjas.

Este hecho va acorde con el modo típico de proceder en la mayoría de ingenierías y administraciones, donde a la hora de proyectar una nueva vía pública, los imbornales juegan un papel secundario y no se hace ningún tipo de estudio sobre las distancias necesarias entre ellos. De la misma forma, nadie pide a los fabricantes unas eficiencias demostradas.

Desde el Departamento de Hidrología Urbana de la UPC y el Instituto de Recerca FLUMEN, se han llevado ensayos sobre una plataforma inclinable (**Figura 2**), tanto longitudinal como transversalmente, y sobre la que pueden circular distintos caudales. Sobre esta plataforma se han podido ubicar distintos tipos de rejjas, de modo que tomando caudales, se ha podido estudiar las eficiencias de captación de las distintas rejjas.



Figura 2: Plataforma de ensayo para rejjas e imbornales. (Fuente: Russo B., Gómez M., 2014)

Del análisis de los datos del ensayo se pueden obtener informaciones útiles en forma de ábacos o en forma de curvas de eficiencia en función de (Q/y) , parámetro que mejor representaría las condiciones de flujo circulando por la calle. La nube de puntos del ensayo y la curva obtenida pueden observarse en la **Figura 3**.

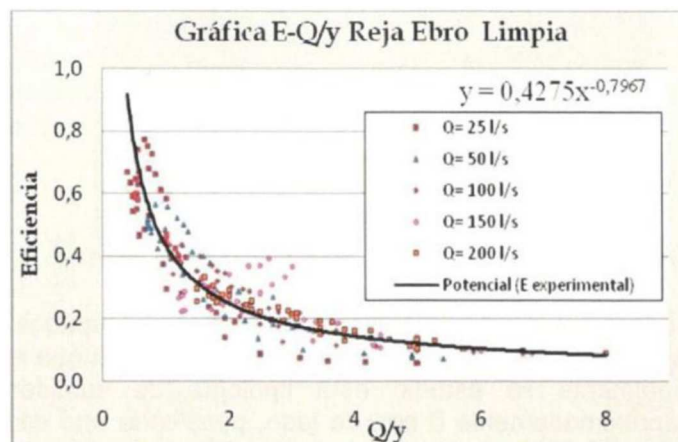


Figura 3: Relación de potencial entre Q/y y la eficiencia de captación. (Fuente: Russo B., Gómez M., 2014)

En total se ensayaron 11 tipos de rejillas, cada una de ellas ante multitud de condiciones de pendiente y flujo. Para cada una de ellas se formó una curva similar a la de la figura anterior. A la vista de los datos se propuso una relación de ajuste potencial del tipo:

$$E = A \left(\frac{Q}{y} \right)^{-B} \quad (2)$$

Donde:

E	Eficiencia de captación de la rejilla
Q	Caudal circulante (m ³ /s)
y	Calado de agua inmediatamente antes de la rejilla (m)
A, B	Parámetros de ajuste intrínsecos a la rejilla

Los resultados para una de las rejillas pueden verse en la **Figura 4**. En todos los casos el coeficiente de correlación se mantuvo por encima del 0.8.

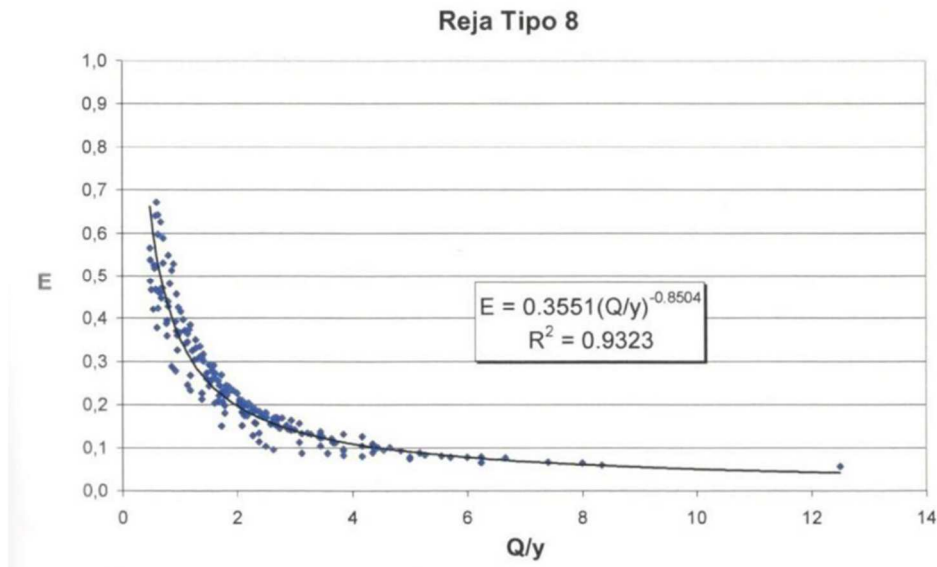


Figura 4: Ajuste potencial a partir de los datos experimentales de la rejilla nº8. (Fuente: Russo B., Gómez M., 2014)

En dicho estudio se buscó también una correlación entre los parámetros A y B, base del ajuste potencial, con algunas características geométricas importantes de las rejillas ensayadas. Aunque los mejores resultados se obtienen a partir de ensayos con la propia rejilla, es evidente que no siempre se puede disponer de datos experimentales. El resultado de este trabajo son las ecuaciones (3) y (4).

$$A = \frac{1.988 \cdot Ag^{0.403}}{\left(\frac{Ah}{Ag} \right)^{0.190} \cdot (n_t + 1)^{0.088} \cdot (n_l + 1)^{0.012} \cdot (n_d + 1)^{0.082}} \quad (3)$$

$$B = 1.346 \cdot \frac{L^{0.179}}{W^{0.394}} \quad (4)$$

Donde:

A_g	Área del mínimo rectángulo que engloba todos los huecos (m ²)
A_h	Área total de huecos (m ²)
n_t	Número de barras transversales al flujo
n_l	Número de barras longitudinales al flujo
n_d	Número de barras diagonales al flujo
L	Longitud de la reja (cm)
W	Anchura de la reja (cm)

El rango de validez para las ecuaciones anteriores es para longitudes de entre 59 y 100 cm, y anchos de entre 26 y 50 cm.

A la vista de los resultados, se extrajeron las siguientes generalidades. Las barras longitudinales o diagonales respecto a la dirección del flujo son las que muestran mayores eficiencias. En cambio, las barras transversales se comportan peor. Se llegó a dar el caso en que rejillas con menor área de huecos pero con barras inclinadas, mostraba una mayor eficiencia que otra con mayor área de huecos, pero con las barras transversales.

Finalmente, queda solo por considerar un último factor en este apartado, que es el factor de la colmatación. Los sumideros ubicados en las calles no funcionan de la misma manera que los que se ensayan en el laboratorio. Lo que ocurre es que en la calle, los sumideros están expuestos a no solo agua, sino también materiales sólidos que pueden taponar parte de la reja o coches aparcados encima de éstas (**Figura 5**). En algunos casos puede llegar a verse una repavimentación que ha dejado el sumidero prácticamente inutilizable.



Figura 5: Imágenes de colmatación de sumideros. (Fuente: Russo B., Gómez M., 2014)

Por todo ello, se recomienda penalizar la capacidad de captación mediante un coeficiente de colmatación c_o que tenga en cuenta estos efectos.

$$c_o = \frac{E_{clean} - E_{clo}}{E_{clean}} \quad (5)$$

Donde:

c_o	Factor de colmatación
E_{clean}	Eficiencia de captación de la reja limpia
E_{clo}	Eficiencia de captación de la reja parcialmente colmatada

Este coeficiente se define según la ecuación (5). Como puede observarse es necesario ensayar las rejillas colmatadas para poder obtener un valor. Durante el estudio se definieron los patrones de colmatación más frecuentes y se sometieron a ensayo, obteniendo valores de c_o de entre 0.265 y 0.672, siendo el valor 0.5 habitual para patrones de colmatación intermedios. Es recomendable por lo tanto, tomar este valor cuando no sea posible obtener información específica.

2.2. Funcionamiento hidráulico de una calle

Calle sin imbornales

Para una calle cualquiera, que no esté equipada con sistema de drenaje, y ante una lluvia uniforme y constante, el caudal a lo largo de la calle seguirá el comportamiento que se muestra en la **Figura 6**.

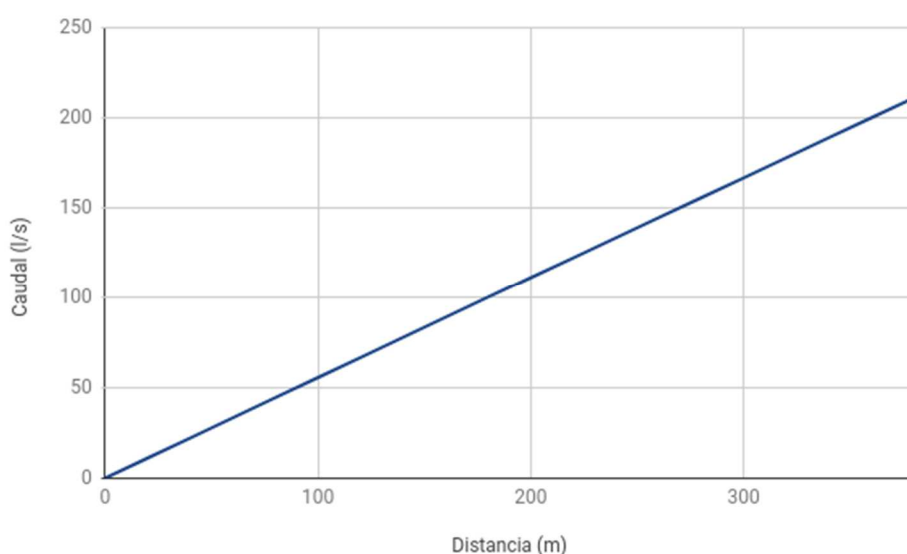


Figura 6: Evolución del caudal de escorrentía en una calle sin imbornales. (Fuente: propia)

Es fácil de deducir que cuanto más larga sea la calle, más escorrentía se irá acumulando, pudiendo llegar a provocar situaciones de peligro extremo.

Calle con imbornales

Bajo las mismas simplificaciones que en el caso anterior, pero ahora añadiendo elementos de drenaje, el comportamiento hidráulico de la calle se modifica sustancialmente (**Figura 7**).

Ahora, para el ejemplo propuesto, al colocar sumideros cada 20 metros, el caudal superficial queda acotado a unos 35 litros por segundo. El mecanismo por el que esto ocurre no deja de ser curioso.

Lo que ocurre es que a medida que el caudal de la calle aumenta, las rejillas de los imbornales son menos eficientes, pero captan más agua. Una eficiencia del 90% cuando circulan 10 l/s por la calzada, hace que 9 l/s sean capturados. Sin embargo una eficiencia del 15% mientras circulan 200 l/s implica que ahora 30 l/s son desviados.

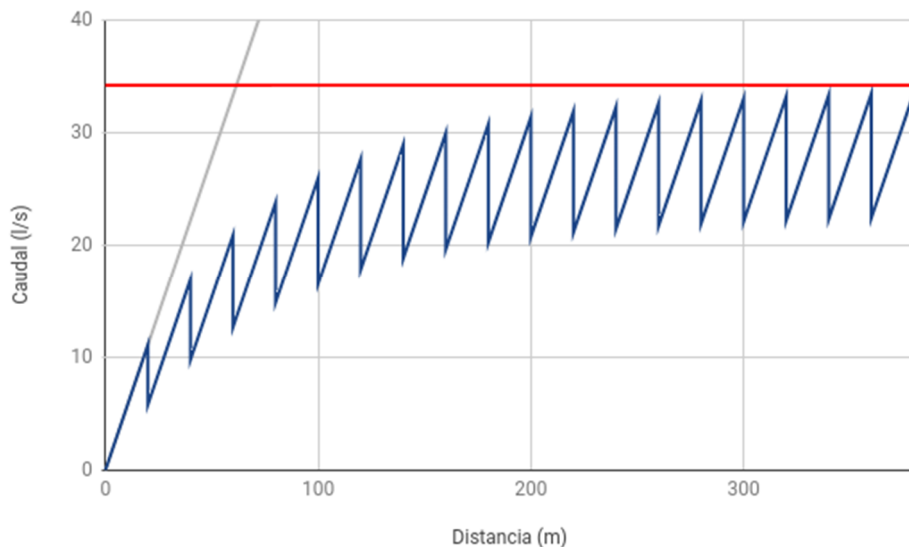


Figura 7: Evolución del caudal de escorrentía en una calle con imbornales La línea gris corresponde a la situación equivalente sin imbornales. (Fuente: propia)

Con una lluvia constante, el caudal que circula por la calle queda acotado cuando el caudal que es capaz de recoger el imbornal, es el caudal que ha aportado la lluvia entre un sumidero y el anterior.

Este es el mecanismo que permite acotar el caudal que estamos dispuestos a permitir en las calles. No es viable eliminar la escorrentía completamente, pero sí mantener sus máximos acotados.

2.3. Elección la lluvia de proyecto

Si hasta ahora se ha dicho que el máximo caudal de escorrentía que se produce en las calles se puede acotar, es pertinente preguntarse cuál es esta cota. Para responderla, lo primero es definir para qué episodio de lluvia desea diseñarse el sistema de captación. La respuesta lógica es elegir la misma que la utilizada para el diseño de la red de alcantarillado.

El sistema de captación hace que el agua de escorrentía pase de circular por la calle a hacerlo por el alcantarillado. Si el episodio de lluvia utilizado para el diseño del sistema de captación fuera de menor volumen que el utilizado para la red de alcantarillado, los imbornales no serían capaces de introducir en el alcantarillado todo el volumen de agua para el que ha sido diseñado, resultando en una infrutilización del sistema. En el caso contrario, si se utilizara un episodio mayor de lluvia para el sistema de captación que para la red de alcantarillado, estas quedarían colapsadas al no poder trabajar con los caudales subministrados por los sumideros.

El parámetro utilizado para definir la lluvia de proyecto es su periodo de retorno (T). El periodo de retorno se define como el número de años que han de pasar en promedio para que un episodio de lluvia con una intensidad concreta o mayor se produzca. Este periodo de retorno está íntimamente ligado con el nivel de riesgo que se desea aceptar. A menores periodos de retorno, menos costoso es el sistema, pero más a menudo las condiciones de lluvia sobrepasaran sus capacidades.

Periodo de retorno

En las ciudades de España y de la mayoría de países, el valor estándar para el periodo de retorno suele ser de 10 años ($T=10$). En los Estados Unidos, la práctica habitual consiste en tomar estos

10 años como periodo de retorno, pero además, evaluar qué es lo que ocurre cuando se produce un episodio de lluvia de por ejemplo $T=100$. Esta práctica puede no repercutir directamente sobre el diseño del sistema, pero permite comprobar cuáles serían los efectos si el sistema no fuera capaz de mantener los límites establecidos. Mediante dicha comprobación, si se observan puntos negros que no se detectaban con el episodio $T=10$, permitiría corregir de forma sencilla un grave problema que de otro modo no sería posible detectar hasta ser demasiado tarde.

El método más extendido para obtener la lluvia de proyecto es a partir de la curva Intensidad - duración - frecuencia (IDF). Estas curvas contienen la información de cuál es el comportamiento pluviométrico en una zona geográfica concreta. La construcción de la curva se lleva a cabo ordenando las intensidades de lluvia con su duración y asignando su periodo de retorno. El resultado se obtiene en forma de curva, pudiéndose ajustar mediante alguna expresión analítica.

A menudo no se dispone de todos los datos históricos necesarios para construir una curva IDF. En estos casos existen procedimientos alternativos, como en descrito en la Instrucción de Carreteras 5.2.IC. En esta instrucción se puede construir una curva IDF sintética a partir de los datos de lluvia en 24 horas, del periodo de retorno deseado, y de un factor regional.

Lluvia de proyecto: Método de los bloques alternados

Las curvas IDF, tal y como su nombre indica, relacionan periodos de tiempo con intensidad y periodo de retorno. Estas curvas no permiten leer directamente un episodio de lluvia, para ello existen métodos como el de los bloques alternados, que convierten la curva IDF en un hietograma.

Durante un episodio de lluvia, la intensidad varía a lo largo del tiempo. Si se extrae un gráfico de la intensidad en función del tiempo se obtiene un hietograma. El hietograma puede representarse como una curva continua (**Figura 8, a**) o en forma de hietograma discreto (**Figura 8, b**).

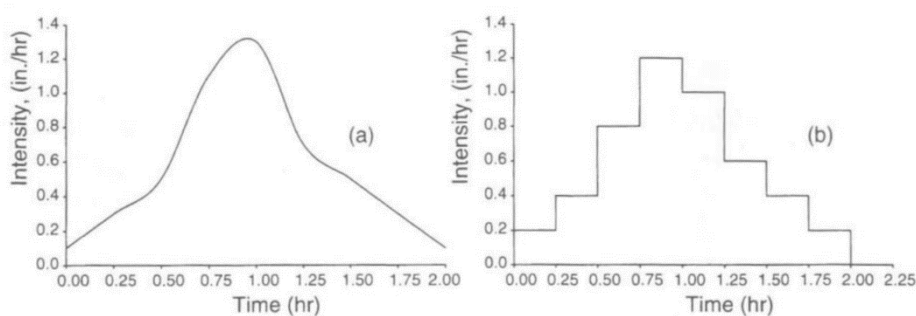


Figura 8: Distintos tipos de hietograma. (Fuente: Osman Akan A., Houghtalen R. J., 2003)

El método de los bloques alternados permite pasar de una curva IDF a un hietograma discreto. El hietograma producido mediante este procedimiento, especifica la precipitación en un número n de intervalos de tiempo Δt , para una lluvia de duración total $D = n \cdot \Delta t$.

El procedimiento es sencillo. Se trata de obtener las intensidades para las duraciones Δt , $2 \Delta t$, $3 \Delta t$, ..., $n \Delta t$, de la curva IDF y el volumen de lluvia correspondiente a cada duración (multiplicando la intensidad por su duración). El primer bloque es directamente el calculado, y equivale a los peores minutos posibles para ese periodo de retorno. Para el bloque $2 \Delta t$, la cantidad de lluvia corresponde a la peor lluvia uniforme posible para esa duración y periodo de retorno, pero como

dentro de esa duración ya se han contado los primeros minutos mediante el primer bloque, se le resta el volumen precipitado en el primer bloque. Para $3 \Delta t$, al volumen de lluvia precipitado según la curva IDF, se le restará el volumen ya precipitado en los primeros dos bloques, y así sucesivamente hasta llegar al último bloque.

Estos bloques de lluvia se van distribuyendo alrededor del bloque de lluvia de mayor intensidad, es decir, de forma alternada. Es recomendable que se le dé la forma correspondiente al aspecto de las tormentas de la zona, siempre que se disponga de esa información.

A continuación se presenta un ejemplo de la obtención del hietograma.

IDF con fórmula de ajuste:

$$I = \frac{4477.44}{19.03 + D} \quad (6)$$

Donde:

- I Intensidad de lluvia (mm/h)
- D Duración del evento (min)

Esta curva tipo Talbot corresponde a la curva IDF de Barcelona para un periodo de retorno de 10 años. Se extraerá el hietograma para un episodio de media hora con intervalos de 5 minutos (Tabla 1).

	I(mm/h)	Volumen (l)	Volumen intervalo (l)	Intensidad intervalo (mm/l)	
5	186,33	931,64	931,64	186,33	Bloque 1
10	154,23	1542,35	610,71	122,14	Bloque 2
15	131,57	1973,60	431,25	86,25	Bloque 3
20	114,72	2294,36	320,76	64,15	Bloque 4
25	101,69	2542,27	247,91	49,58	Bloque 5
30	91,32	2739,61	197,35	39,47	Bloque 6

Tabla 1: Proceso de cálculo de los bloques del hietograma. (Fuente: propia)

Finalmente, se distribuyen los bloques de forma alternada, ubicando el bloque mayor en el centro si no se tiene información sobre la distribución típica de la zona. El resultado para este ejemplo en concreto, puede verse en la Figura 9.

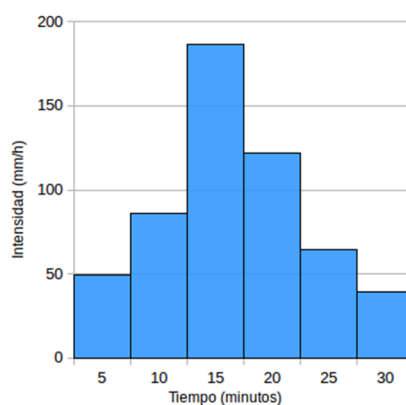


Figura 9: Hietograma obtenido. (Fuente: propia)

2.4. Criterios de peligrosidad para peatones

Como se ha dicho anteriormente, debemos asumir que es imposible captar el 100% de la escorrentía superficial. Una parte será captada por los imbornales e introducida en la red, mientras que otra seguirá circulando por la calle. Esta fracción que sigue por la calle debe ser tal que no suponga un peligro para los ciudadanos ni los bienes de la ciudad.

Estos límites deben ser elegidos a la hora de diseñar el sistema de drenaje. Equivalen en cierta medida a un "estándar de calidad". Los criterios tomados deben reflejar las necesidades de protección de la ciudad, de modo que los calados no permitan que el agua entre en las casas o que las velocidades provoquen que los peatones resbalen o sean arrastrados.

Existen ciudades en el mundo, especialmente en países subdesarrollados o en vías de desarrollo, donde no disponen de sistemas de drenaje urbano y por tanto toda la escorrentía circula por la calle. Estas poblaciones pueden asumir escorrentías más elevadas, ya que al no disponer de un sistema de drenaje como tal, se han adaptado al hecho de tener agua en la calle cuando llueve mediante canalizaciones en la calle, bordillos elevados, escalones en las puertas de las casas, o incluso personas que se ofrecen a ayudar a cruzar las calles-río a cambio de una pequeña recompensa económica.

El nivel de seguridad en las calles durante un episodio de lluvia con un determinado periodo de retorno, suele definirse mediante dos parámetros del flujo o la combinación de estos:

- Calado máximo (y_{max})
- Velocidad máxima (v_{max})

Criterios de calado máximo

En muchos casos, el valor máximo del calado coincide con aquel valor que no permite el ingreso del agua pluvial en los comercios o viviendas particulares. Algunos estudios han tenido como foco las situaciones de inundación en cuencas naturales, el tránsito de avenidas en cauces o desbordamientos de ríos en las llanuras de inundación.

Los primeros ponen el límite en los 0.30 m (Nanía, 1999; CCRFCD, 1999). Los segundos limitan los calados alrededor de 1 m (Témez, 1992; Belleudy, 2004). Para el caso urbano también se han utilizado los 0.45 metros con la justificación de que para este calado los vehículos empiezan a perder adherencia y a flotar en el agua (Wright-McLaughlin, 1969). También en entorno urbano se ha llegado a poner el límite en los 1.20-1.50 m, alegando que es en estos calados cuando el individuo pierde estabilidad y que se pueden producir elevados daños (ARMC, 2000). Finalmente, CLABSA definió su criterio en un límite de 0.06 m para una lluvia de retorno 10 años, alegando que este calado equivalía a tener los dos carriles laterales inundados y el resto libre de agua (CLABSA, 2007).

Criterios de velocidad máxima

En el estado del arte actual, existen muy pocas referencias respecto a velocidades máximas con independencia del calado. Existe algún estudio como el de Témez (Témez, 1992) que propone una velocidad máxima de 1 m/s, alegando que es la velocidad límite para que una persona pueda vencer a nado al flujo. Lógicamente, esto está pensado para contextos rurales, y no puede trasladarse al medio urbano con pequeños calados, donde además, en caso de grandes sucesos de lluvia y calles con gran pendiente, pueden alcanzarse velocidades del orden de más de 3 m/s. Otro estudio sostiene que 1.5 m/s es la velocidad límite para que un individuo no pierda capacidad de caminar por el agua en caso de pequeños calados (ARMC, 2000). Este valor resulta

de aplicar estimaciones de los grados de riesgo para diferentes calados y velocidades en zonas inundadas, y carecen de una comprobación experimental.

Por ello, y en el marco de un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia Español, y apoyado por la Fundación Agbar y el Grupo de Investigación FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña, se construyó una plataforma de ensayo para hallar criterios de estabilidad de individuos en condiciones de velocidades de flujo límites (**Figura 10**).



Figura 10: Individuo durante un ensayo con un caudal de circulación de 300 l/s y una pendiente longitudinal del 6%. (Fuente: Russo B., Gómez M., 2014)

Después de 834 ensayos se propusieron los siguientes valores:

Nivel de peligrosidad	Valores de velocidad
Alto	$V \geq 1.88$ m/s
Moderado	$1.51 \leq v < 1.88$ m/s
Bajo	$V < 1.51$ m/s

Tabla 2: Velocidades para calados entre 9 y 16 centímetros. (Fuente: Russo B., Gómez M., 2014)

Los niveles de peligrosidad utilizados en la **Tabla 2** se corresponden a:

- Nivel de peligrosidad alto: El individuo presenta clara pérdida de maniobrabilidad (el individuo no podía acabar el recorrido por la plataforma o era arrastrado por el flujo).
- Nivel de peligrosidad moderado: El individuo presenta pérdida significativa de maniobrabilidad (el individuo mostraba evidentes dificultades para acabar el ensayo).
- Nivel de peligrosidad bajo: El individuo muestra pequeños problemas de estabilidad al circular por el agua.

A la vista de los datos experimentales obtenidos, velocidades máximas entre 1.8 y 1.9 m/s serían aceptables.

Conversión de los criterios a límites de caudales

Resulta útil pasar los límites en calado y velocidad (y combinaciones entre ambos) a límites de caudales. Esto tiene una doble función.

- Poder comparar directamente los distintos criterios para poder elegir el más restrictivo, el que supone un menor calado. La geometría de la calle dicta cual es la condición más restrictiva.
- Agilizar el proceso de cálculo de la distancia entre imbornales, ya que de este modo no hay que computar calados y velocidades, solo caudales, que es la salida natural del proceso de cálculo.

La conversión se lleva a cabo mediante la fórmula de Izzard:

$$Q = \frac{cf \cdot \sqrt{so}}{n1 \cdot sx1} \cdot y^{8/3} \quad (7)$$

Donde:

Q	Caudal (m ³ /s)
cf	Igual a 0.376
so	Pendiente longitudinal de la calle
$sx1$	Pendiente transversal de la calzada
$n1$	Coefficiente de rugosidad de Manning
y	Calado (m)

Por otro lado, si $v=Q/A$, puede decirse que:

$$v = \frac{2 \cdot Q \cdot sx1}{y^2} \quad (8)$$

Uniendo y adaptando las ecuaciones (7) y (8), se obtienen los caudales límite para las distintas condiciones planteadas:

$$Q(v) = \frac{v^4 \cdot n1^3}{16 \cdot sx1 \cdot cf^3 \cdot so^{3/2}} \quad (9)$$

$$Q(y) = \frac{cf \cdot so^{1/2} \cdot y^{8/3}}{n1 \cdot sx1} \quad (10)$$

$$Q(vy) = \frac{(vy)^{8/5} \cdot n1^{3/5}}{2^{8/5} \cdot sx1 \cdot cf^{3/5} \cdot so^{3/10}} \quad (11)$$

$$Q(vy^2) = \frac{vy^2}{2 \cdot sx1} \quad (12)$$

2.5. Cálculo del espaciamiento óptimo entre imbornales

Los puntos tratados anteriormente, más la geometría de la calle, son datos necesarios para el problema de las distancias óptimas entre imbornales.

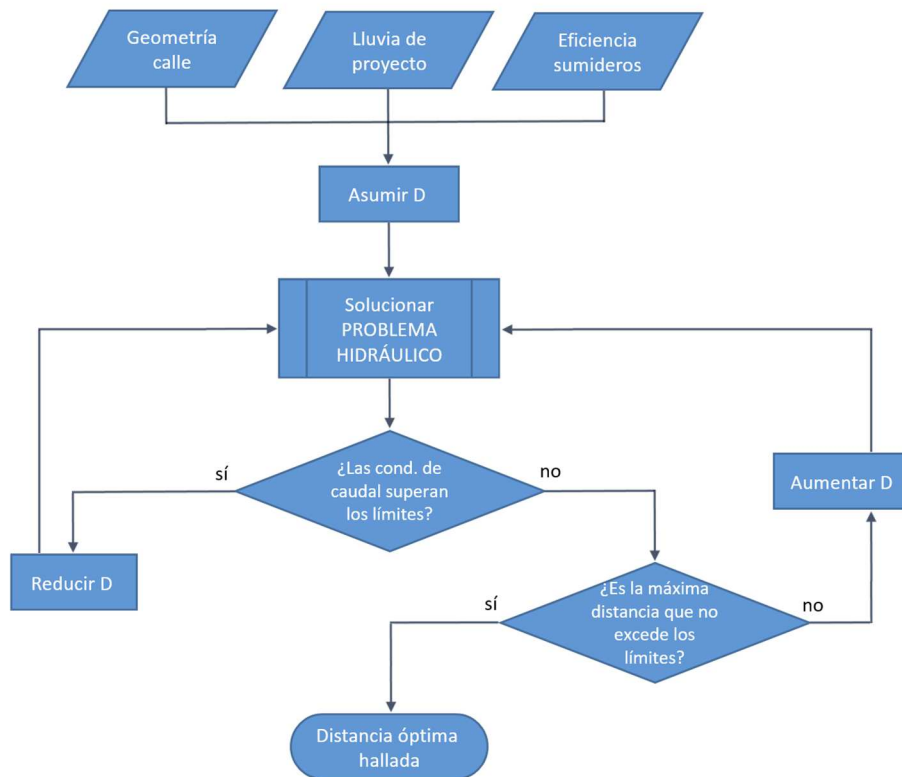


Figura 11: Diagrama de flujo simplificado del proceso de cálculo de los espaciamientos óptimos. (Fuente: propia)

La **Figura 11** muestra cómo se resuelve el problema hidráulico mediante un proceso iterativo de prueba y error de distancias entre imbornale. El corazón del problema, pues, radica en resolver el problema hidráulico.

Enfoque 2D

Existen diversas opciones para resolver el problema. La más precisa de ellas sería sin duda llevar a cabo una modelización del terreno y enfocar el problema en 2D. Esto es necesario si por ejemplo, quiere calcularse el comportamiento de la escorrentía superficial en plazas, zonas ajardinadas, calles sin pendientes o zonas llanas de párquing. En todos estos casos, no existe una dirección preferencial de flujo. Si esto ocurre posiblemente habrá que tratar cada sumidero individualmente y no se podrá generalizar en cuanto a distancia o ubicación. Por otro lado, este enfoque requiere que la información del terreno sea muy precisa, a la vez que todo el proceso consume mucho tiempo y requiere experiencia.

Método racional

En el otro extremo existe el llamado método racional. Éste necesita que el planteamiento del problema sea uniforme tanto espacial (distancia entre imbornales, geometría de la calle) como temporalmente (intensidad de lluvia constante). El método se basa en que el máximo caudal que circula por la calle queda acotado cuando el caudal captado por el sumidero es igual al caudal precipitado entre dos imbornales consecutivos (**Figura 12**).

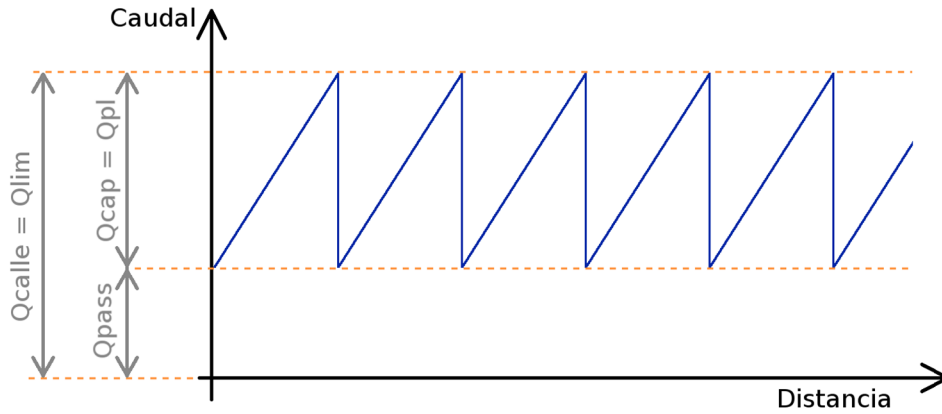


Figura 12: Condición de caudales para que se produzca una estabilización del caudal de escorrentía superficial. (Fuente: propia)

Donde:

Q_{calle}	Caudal que circula por la calle justo antes de un sumidero
Q_{lim}	Límite de caudal establecido según los criterios de seguridad
Q_{pass}	Caudal que pasa la sección del imbornal sin ser captado y sigue por la calle
Q_{cap}	Caudal captado por el imbornal
Q_{pl}	Caudal aportado por la lluvia entre dos imbornales

Este hecho, junto con la definición de la eficiencia (ecuación (1)), fija las relaciones:

$$Q_{cap} = Q_{pl} \quad (13)$$

$$Q_{cap} = E \cdot Q_{calle} = E \cdot Q_{lim} \quad (14)$$

Por lo tanto:

$$Q_{pl} = E \cdot Q_{lim} \quad (15)$$

El caudal aportado por la lluvia entre dos imbornales puede escribirse como:

$$Q_{pl} = \frac{I \cdot W \cdot D}{3\,600\,000} \quad (16)$$

Donde:

I	Intensidad de la lluvia (mm/h)
W	Ancho de la calle, contando la acera si se precisa (m)
D	Distancia entre imbornales (m)

Así pues:

$$D = \frac{E \cdot Q_{lim} \cdot 3\,600\,000}{I \cdot W} \quad (17)$$

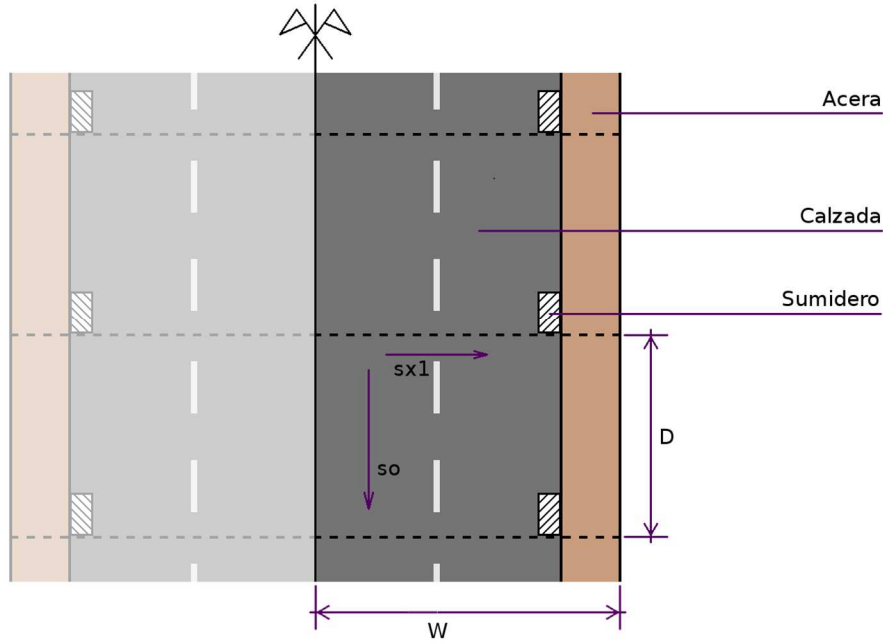


Figura 13: Ilustración con los parámetros utilizados. (Fuente: propia)

En la ecuación (17), Q_{lim} puede calcularse a partir de los criterios de seguridad y las ecuaciones (9), (10), (11) y (12).

La eficiencia puede calcularse a partir de la ecuación (2), ahora adaptada para Q_{lim} :

$$E = A \left(\frac{Q_{lim}}{y} \right)^{-B} \quad (18)$$

El calado y puede escribirse en función de Q_{lim} a partir de la fórmula de Izzard (7). Aislando el calado:

$$y = \left(\frac{Q_{lim} \cdot n_1 \cdot sx_1}{cf \cdot \sqrt{so}} \right)^{3/8} \quad (19)$$

Finalmente, la eficiencia puede escribirse solo en función de la geometría de la calle, los parámetros A y B (en función de la geometría de la rejilla) y del caudal límite.

$$E = A \cdot \left(Q_{lim}^{5/8} \cdot \left(\frac{cf \cdot \sqrt{so}}{n_1 \cdot sx_1} \right)^{3/8} \right)^{-B} \quad (20)$$

Hay que precisar que la eficiencia no puede ser mayor que la unidad, aunque la fórmula utilizada para su cálculo puede superar este valor. Por ello, si el resultado de la fórmula anterior es mayor que 1, debe substituirse el resultado por la unidad.

Teniendo esto en cuenta, ya se tienen todos los parámetros para utilizar la ecuación (17) y obtener la distancia óptima entre imbornales.

Enfoque 1D mediante la aproximación de la onda cinemática

El método racional puede ser perfectamente válido para calcular espaciamientos en algunos casos, y su planteamiento lógico es incuestionable. Ahora bien, la limitación de lluvia constante convierte el método en demasiado simplista. En climas mediterráneos como el nuestro, donde los eventos de lluvia se caracterizan por ser muy intensos durante un corto plazo de tiempo, la asunción de una lluvia constante es completamente inadecuada.

Para poder contemplar episodios de lluvia variable puede utilizarse la onda cinemática. La onda cinemática es una aproximación de la onda dinámica en la que solo se contemplan los términos de gravedad y fricción, despreciando la presión.

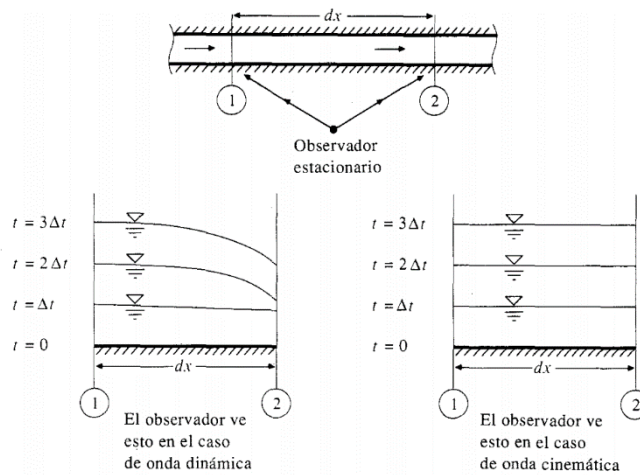


Figura 14: Ondas cinemática y dinámica en un tramo corto de un canal vistas por un observador estacionario. (Fuente: Chow Ven Te, 1988)

En una onda cinemática, las fuerzas de gravedad y de fricción están balanceadas de tal manera que el flujo no se acelera apreciablemente. La Figura 14 ilustra la diferencia entre el movimiento de la onda cinemática y la dinámica en un elemento diferencial desde el punto de vista de un observador estacionario en la banca del río. Para una onda cinemática, la línea de energía total es paralela al fondo del canal, y el flujo es uniforme y permanente dentro de la longitud diferencial, mientras que para una onda dinámica la línea de energía total y la elevación de la superficie de agua, no son paralelas al lecho aun para un elemento diferencial.

La onda dinámica requiere solucionar las ecuaciones de Saint Venant completas, y el esfuerzo necesario para hacerlo solo tiene sentido cuando tanto las fuerzas inerciales y de presión son importantes, como en ríos de pendiente baja y cuando los efectos de remanso de las perturbaciones aguas abajo no son despreciables.

Al asumir la uniformidad espacial, y teniendo en cuenta que se está tratando con calados del orden de pocos centímetros, parece razonable acoger las simplificaciones que propone la onda cinemática.

Utilizando la onda cinemática, la ecuación que resuelve el caudal para un punto $i+1, j+1$ es:

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha\beta Q_{i+1}^j \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right)}{\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha\beta \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1}} \quad (21)$$

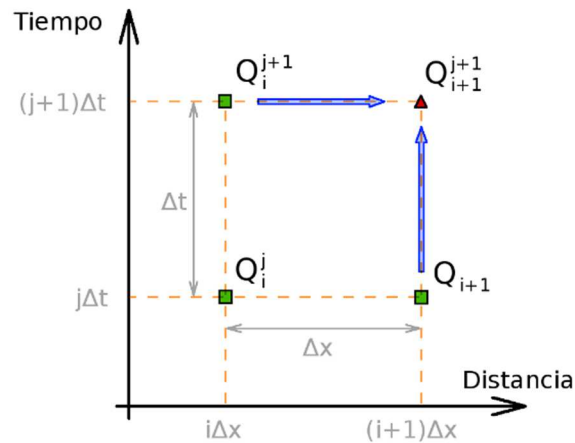


Figura 15: Representación explicativa de la discretización espacial y temporal del problema.
(Fuente: propia)

Donde q es el caudal lateral (en este caso la lluvia), y α y β parámetros extraídos de la ecuación de Manning:

$$\alpha = \left(\frac{n \cdot P^{2/3}}{\sqrt{s}} \right)^{3/5} \quad (22)$$

$$\beta = 3/5 \quad (23)$$

Donde:

- n Coeficiente de rugosidad de Manning. Según el plano que se esté calculando puede ser $n1$ (calzada) o $n2$ (acera).
- P Perímetro mojado (m).
- s Pendiente del plano. Según plano al que pertenezca puede ser $sx1$ (calzada), $sx2$ (acera) o so (canal cuneta).

Al utilizar la onda cinemática es necesario definir todas las pendientes y las rugosidades de las superficies de escorrentía (acera, calzada y cuneta). La onda cinemática permite conocer cómo van incorporándose al canal formado en la cuneta el agua de escorrentía que se forma a cada instante en los planos adyacentes (**Figura 16**). La misma aproximación de la onda cinemática se puede utilizar para propagar los caudales de la cuneta, que será el caudal principal circulante por la calle, el que hay que limitar.

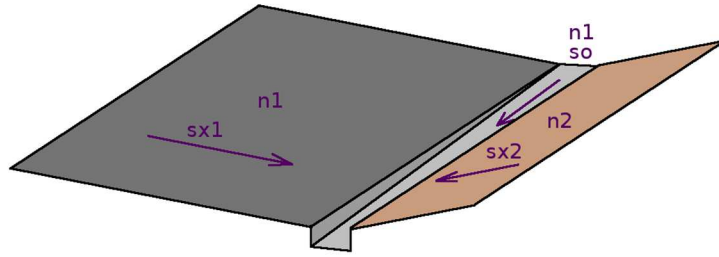


Figura 16: Planos a calcular y propiedades necesarias para hallar α y β . Según la geometría de la calle, la disposición de los planos y su número, puede variar. (Fuente: propia)

Como puede verse en la ecuación (21) y en la **Figura 15**, es necesario disponer de condiciones de contorno en $x=0$ y en $t=0$ para iniciar el cálculo. En ambos casos el caudal es 0 (**Figura 17**).

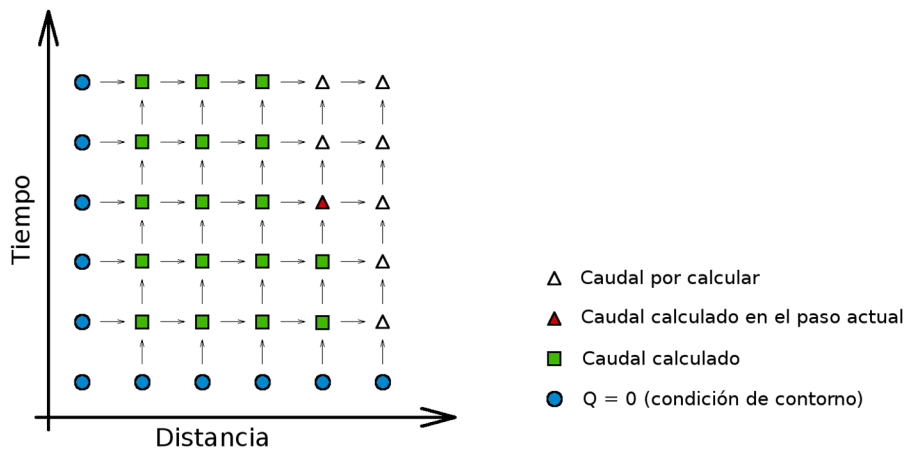


Figura 17: Esquema del proceso de cálculo. (Fuente: propia)

En cuanto a la elección de los intervalos de tiempo y espacio, Δt y Δx , hay que decir que al estar trabajando con esquemas implícitos no es necesario cumplir la condición de estabilidad de Courant.

3. Programa de cálculo

Se ha programado una aplicación de escritorio con interfaz gráfica utilizando el paquete Anaconda y mediante el lenguaje de programación Python (versión 3.5.2). El GUI utilizado para la escritura el código ha sido el software Spyder.

El programa consta de dos subprogramas integrados. El primero lanza la ventana de introducción de datos. Cuando el usuario llena los campos, el programa trata algunos datos para convertirlos en datos de entrada para el cálculo (por ejemplo, transformar la curva IDF en hietograma). Posteriormente los escribe las variables necesarias para el cálculo en un fichero .txt y lanza el segundo programa.

Este segundo programa lee el fichero .txt y extrae las variables que utilizará para el cálculo. Instantáneamente inicia el cálculo. Todo el proceso puede durar hasta unos 15 segundos (eventos de lluvia de unas 2 horas y calles de unos 4000 metros). Cuando finaliza el cálculo lanza la ventana de resultados, donde el usuario accede a los datos de interés.

3.1. Entrada de datos

La ventana de entrada de datos se divide en 4 pestañas (parte superior de la (Figura 18)) que agrupan las distintas categorías de datos. Es importante rellenarlas por orden, ya que algunas requieren la información que se introduce en pestañas anteriores para poder realizar cálculos iniciales.

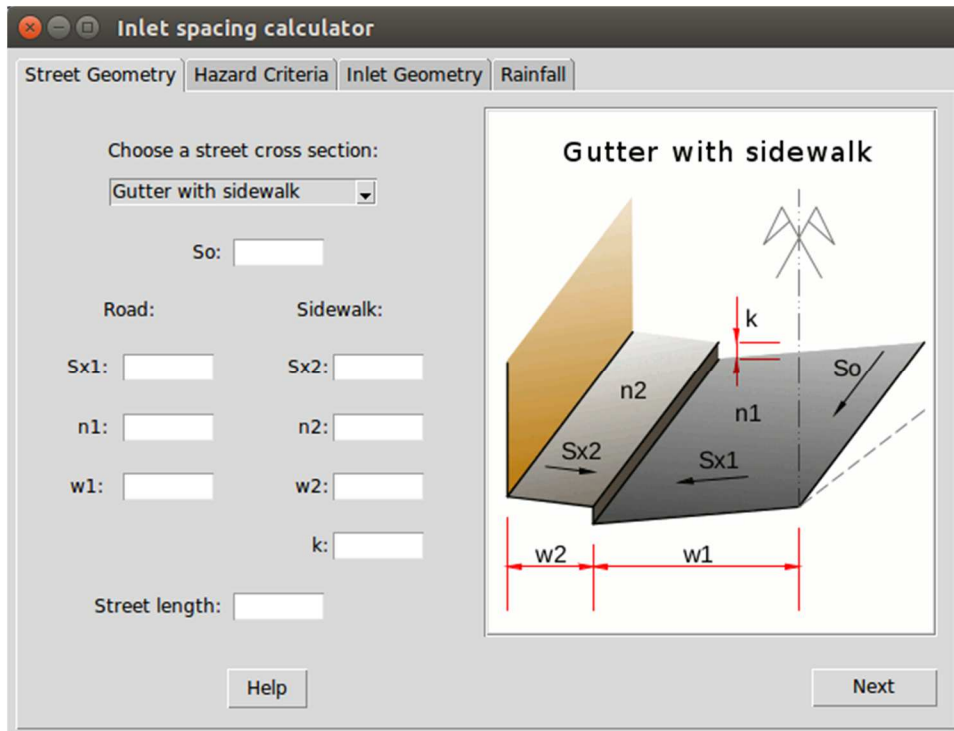


Figura 18: Ventana de introducción de datos, pestaña Geometría de calle. (Fuente: propia)

Geometría de la calle

La **Figura 18** es la primera imagen que ve el usuario al ejecutar el programa. En ella se ven las 4 pestañas, y puede verse directamente la primera. Esta primera pestaña, corresponde a la de definiciones de parámetros de geometría de la calle.

Lo primero que debe hacerse es elegir el tipo de sección transversal de la calle que quiere estudiarse. Puede elegirse entre 4 opciones:

- Gutter: Calle con bombeo transversal sin acera. Sumideros a ubicar en cada cuneta. (**Figura 19 a**)
- Gutter with sidewalk: Calle con bombeo central con acera. Sumideros a ubicar en cada cuneta. (**Figura 19 b**)
- V-section: Calle en V sin acera. Sumideros a ubicar en el centro de la calzada. (**Figura 19 c**)
- V-section with sidewalk: Calle en V con acera. Sumideros a ubicar en el centro de la calzada. (**Figura 19 d**)

En la **Figura 19** pueden observarse los esquemas que aparecen en el marco derecho cuando se selecciona el tipo de sección transversal de la calle.

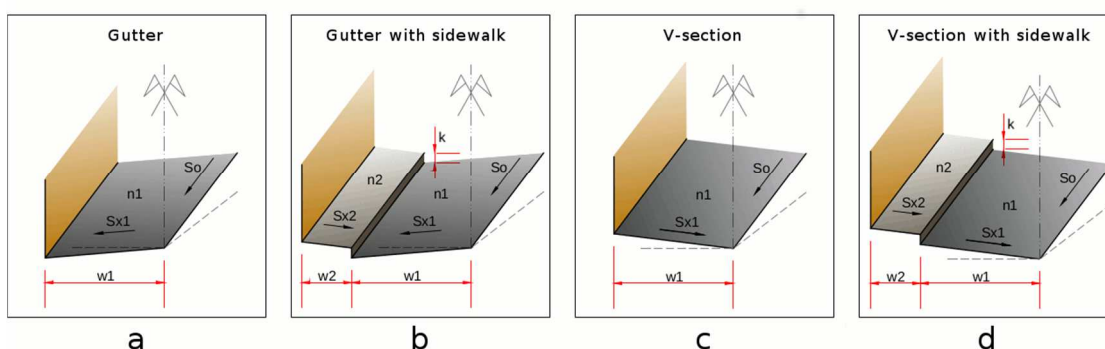


Figura 19: Clases de secciones transversales contempladas. (Fuente: propia)

Una vez se ha seleccionado el tipo de calle (o si se desea continuar con la opción preestablecida *Gutter with sidewalk*) pueden introducirse los valores que se solicitan bajo el cajón desplegable. Los campos a rellenar son:

S_o	Pendiente longitudinal de la calle
S_{x1}	Pendiente transversal de la calzada
n_1	Coefficiente de rugosidad de Manning de la calzada
w_1	Ancho de la calzada (m)
S_{x2}	Pendiente transversal de la acera
n_2	Coefficiente de rugosidad de Manning de la acera
w_2	Ancho de la acera (m)
k	Altura del bordillo (m)
<i>Street length</i>	Longitud de la calle (m)

Cuando el tipo de sección seleccionado no contempla la existencia de la acera, los parámetros relacionados con ella (S_{x2} , n_2 , w_2 y k) se desactivan y dejan de ser rellenables.

Si los parámetros exigidos no son introducidos por el usuario el programa no podrá calcular.

Criterios de riesgo

La segunda pestaña a rellenar (**Figura 20**) contiene los distintos criterios de riesgo que pueden utilizarse para establecer los límites de seguridad.

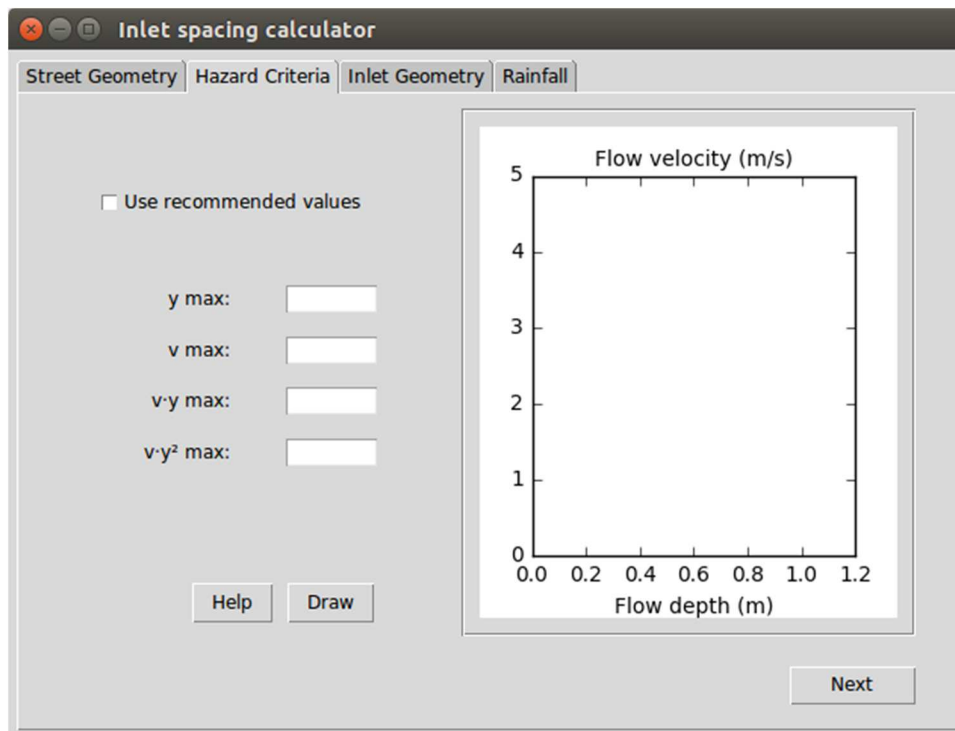


Figura 20: Ventana de introducción de datos, pestaña Criterios de Riesgo. (Fuente: propia)

Los parámetros a introducir son:

<i>y max</i>	Máximo calado admisible (m). Solo valores entre 0 y 1.
<i>v max</i>	Máxima velocidad admisible (m/s). Solo valores entre 0 y 5.
<i>v·y max</i>	Máximo producto admisible entre velocidades y calados (m^2/s)
<i>v·y² max</i>	Máximo producto admisible entre velocidades y calados al cuadrado (m^3/s)

Al introducir los datos, debe clicarse siempre sobre el botón *Draw*. Al hacer esto, se dibujarán a la derecha los límites en un gráfico calado – velocidad. A su vez se sombreadá el área que queda recluida por las 4 líneas, marcando la zona de condiciones de flujo aceptables (**Figura 21**).

Se recomienda utilizar la casilla *Use recommended values*. Al hacer esto se rellenan automáticamente los campos con los valores recomendados según Russo B. y Gómez M.. Al clicar la casilla es igualmente necesario clicar sobre el botón *Draw*. El botón tiene la función de dibujar la gráfica, pero también la de introducir en el programa los valores escritos.

Añadir finalmente que es necesario rellenar todos los campos. Si no se desea utilizar algún criterio, puede introducirse un valor que no tenga relevancia. Para ello puede ser de ayuda la gráfica de la derecha.

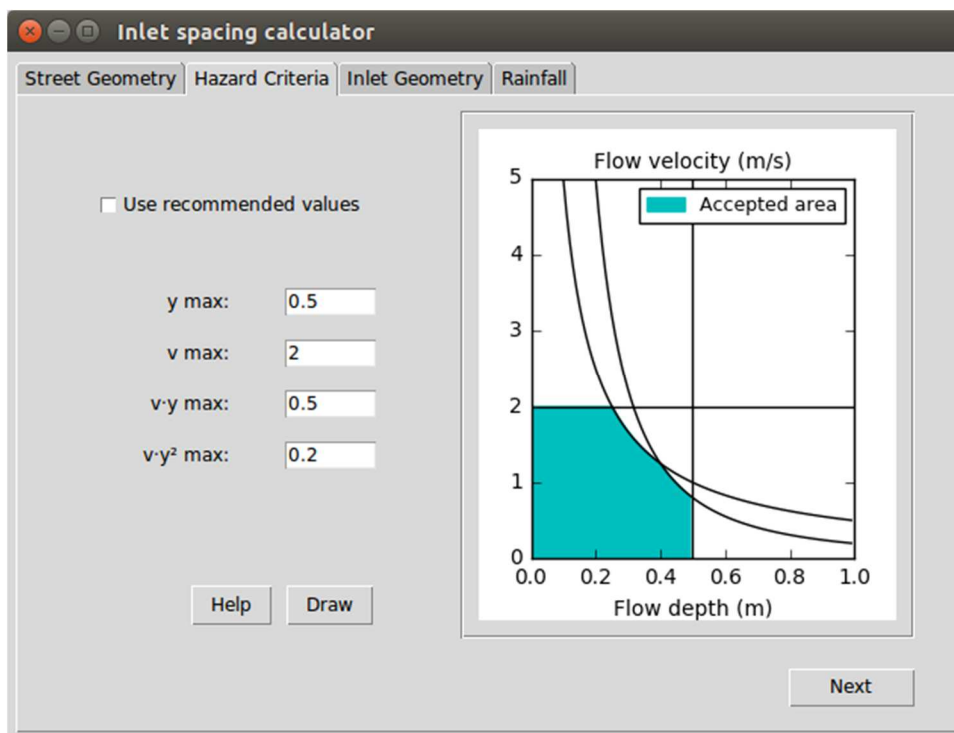


Figura 21: Ventana rellena de introducción de datos, pestaña Geometría de calle. (Fuente: propia)

Geometría de la reja del sumidero

Mediante la tercera pestaña se introducen los datos referentes a la eficiencia de la reja del sumidero. Puede hacerse mediante dos caminos. El procedimiento debe elegirse desplegando el cajón. Las opciones son:

- *Parameters A and B known*: Es la opción a seleccionar cuando la reja ha sido ensayada hidráulicamente en el laboratorio. Es necesario conocer los parámetros *A* y *B* de la reja.
- *Geometry known*: Cuando la reja no ha sido ensayada puede aproximarse su eficiencia mediante las ecuaciones (3) y (4). Mediante esta opción solo es necesario conocer la geometría de la reja.

Al seleccionar la primera opción (Figura 22) aparecen siguientes los campos a rellenar.

<i>A</i>	Parámetro de eficiencia hidráulica. Ver apartado 2.1.
<i>B</i>	Parámetro de eficiencia hidráulica. Ver apartado 2.1.
<i>Clogging coefficient</i>	Factor de colmatación del sumidero. Si se desconoce el valor exacto utilizar el valor recomendado de 0.5

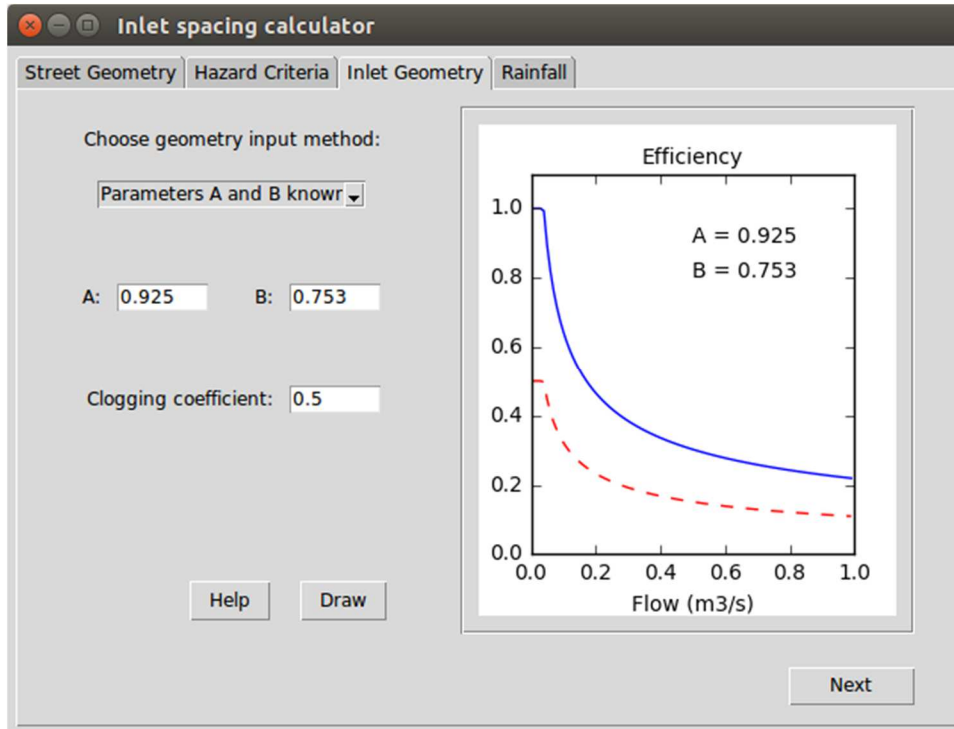


Figura 22: Ventana de introducción de datos rellena, pestaña Geometría Sumidero. Opción 1. (Fuente: propia)

Si se opta por la segunda alternativa, se visualizará la siguiente imagen (Figura 23).

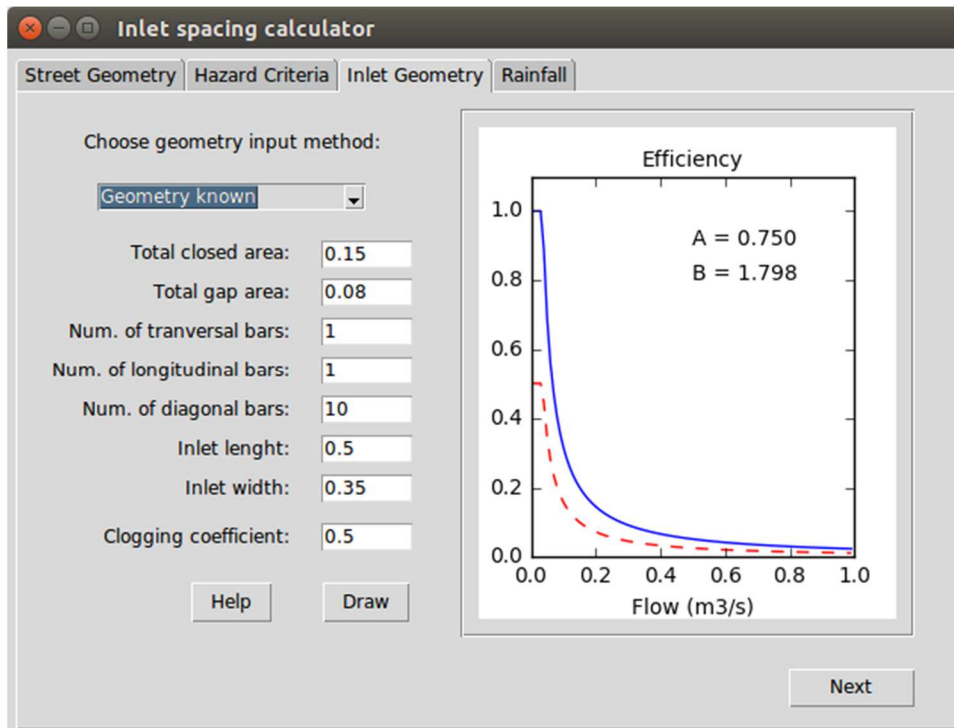


Figura 23: Ventana de introducción de datos rellena, pestaña Geometría Sumidero. Opción 2. (Fuente: propia)

En este caso la información a introducir es:

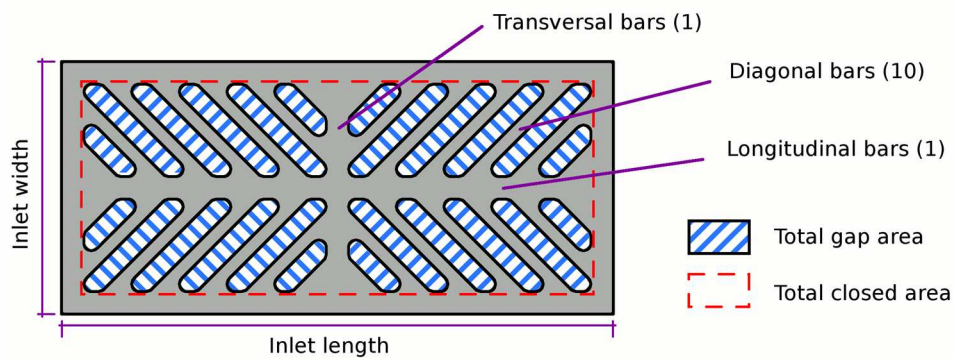


Figura 24: Referencias gráficas de los datos de entrada. (Fuente: propia)

<i>Total closed area</i>	Área del mínimo rectángulo que engloba todos los huecos (m ²)
<i>Total gap area</i>	Área total de huecos (m ²)
<i>Num. of transversal bars</i>	Número de barras transversales
<i>Num. of longitudinal bars</i>	Número de barras longitudinales
<i>Num. of diagonal bars</i>	Número de barras diagonales
<i>Inlet length</i>	Longitud de la reja (cm)
<i>Inlet width</i>	Anchura de la reja (cm)
<i>Clogging coefficient</i>	Factor de colmatación del sumidero. Si se desconoce el valor exacto utilizar el valor recomendado de 0.5

No hay que olvidarse de clicar el botón *Draw* una vez se hallan introducido los datos. Como anteriormente, esto permitirá dibujar la gráfica de eficiencia, que a su vez mostrará los valores calculados de *A* y *B*. Además, es el modo de que el programa incorpore los datos como variables del problema.

Decir, para cerrar este apartado, que antes de rellenar los campos de esta pestaña es necesario haber introducido previamente la información sobre la geometría de la calle, ya que la eficiencia del sumidero depende de la pendiente y la rugosidad de la calle.

Evento de lluvia

La cuarta y última pestaña está dedicada a la definición del evento de lluvia de diseño. Como en el caso anterior, debe empezarse desplegando un cajón y eligiendo el método de entrada deseado.

Las dos opciones son:

- T=10 Barcelona
- IDF general equation

La primera (**Figura 25**) no requiere introducir más datos, se selecciona automáticamente el hietograma de la lluvia de 1 hora con periodo de retorno de 10 años a intervalos de 5 minutos.

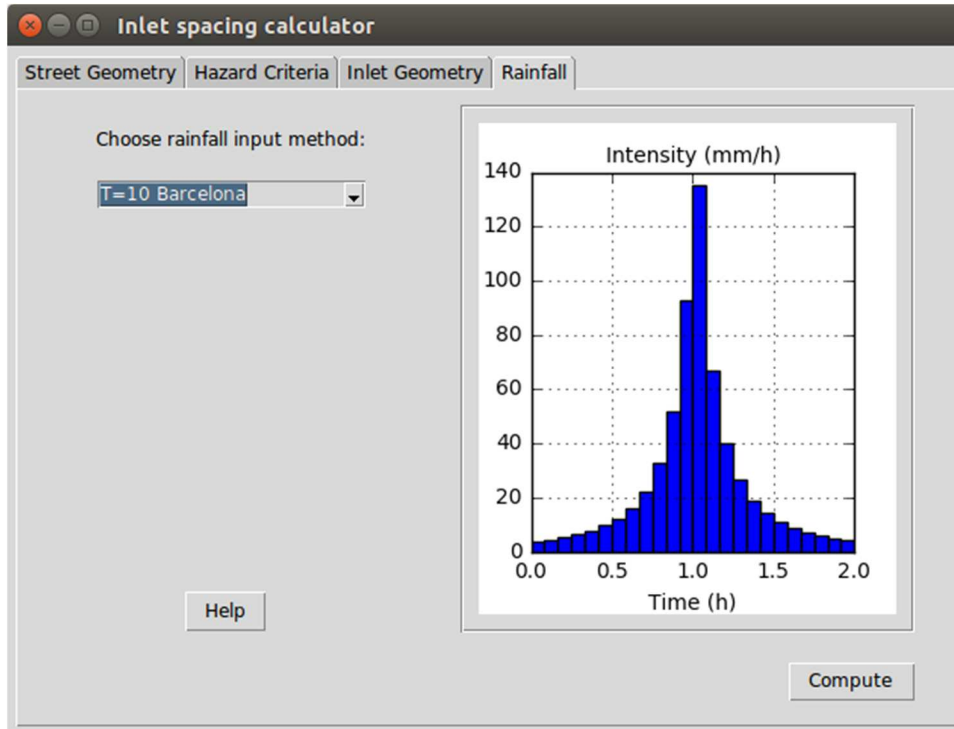


Figura 25: Ventana de introducción de datos, pestaña Lluvia. Opción 1. (Fuente: propia)

La segunda (Figura 26) permite obtener un hietograma de cualquier curva IDF si se tiene la ecuación de ésta.

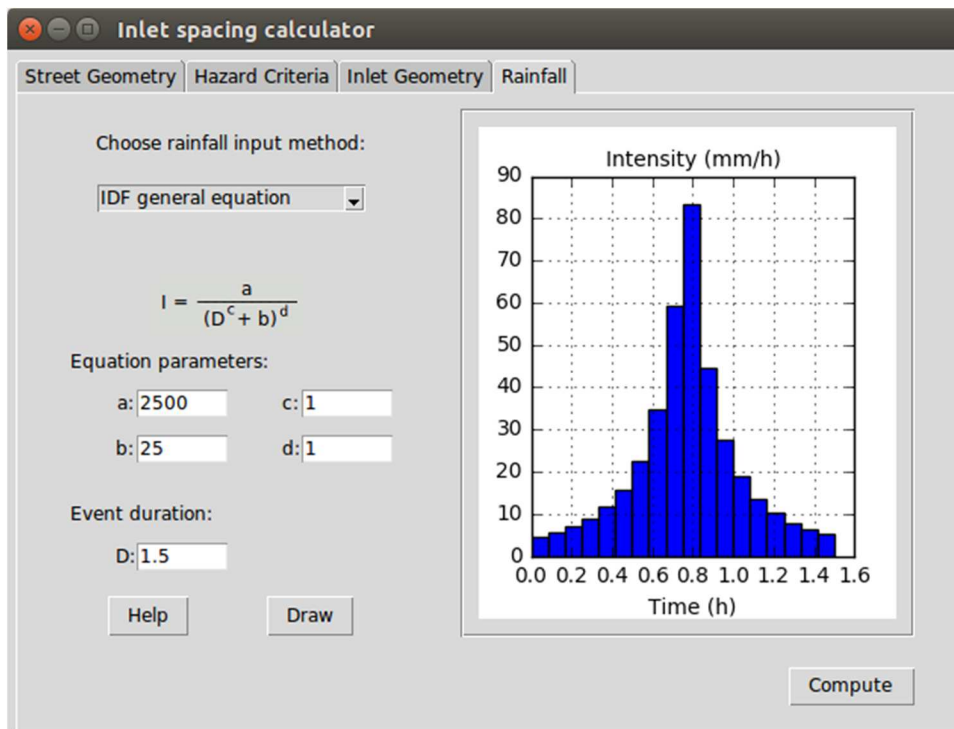


Figura 26: Ventana de introducción de datos rellenada, pestaña Lluvia. Opción 2. (Fuente: propia)

Igual que en las pestañas anteriores, una vez se han escrito las distintas variables debe clicarse el botón *Draw* para que el programa calcule y dibuje el hietograma. Si no se clica, el programa

actuará como si no se hubiera introducido ningún valor y no calculará. Por defecto, se toma 5 minutos como intervalo de tiempo.

Finalmente, decir que, en cada pestaña existe un botón *Help*, que tiene la función de guiar al usuario en cada paso. Al clicarlo se despliega una ventana con información parecida a la que se ha mostrado a lo largo de este apartado, con definiciones de parámetros o unidades a utilizar.

3.2. Motor de cálculo

Todo el proceso de cálculo se encuentra en la segunda parte del código, y se inicia justo después de leer las variables introducidas mediante la ventana de entrada de datos.

El cálculo se lleva a cabo mediante distintas fases:

- Cálculo de los planos de escorrentía
- Cálculo de los caudales límite
- Cálculo del canal
- Cálculo de estabilidad

A continuación se describe cada paso.

Cálculo de los planos de escorrentía

El cálculo de la onda cinemática en calzada y acera (cuando es el caso), se inicia con 4 condicionales que tienen la función de diferenciar entre las distintas opciones de sección transversal (**Figura 27**).

- Caso 1: Gutter
- Caso 2: Gutter with sidewalk
- Caso 3: V-section
- Caso 4: V-section with sidewalk

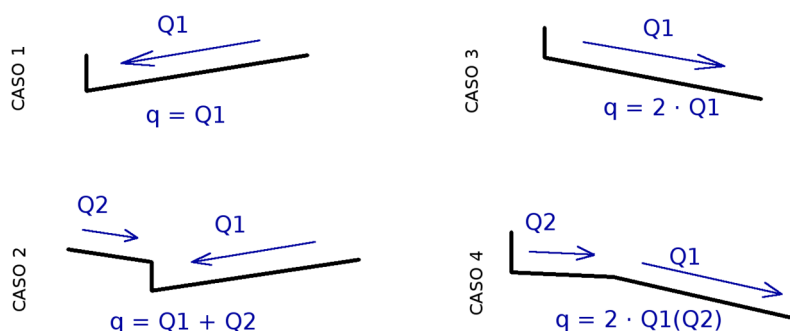


Figura 27: Esquema de los distintos planos a calcular y obtención del caudal de entrada lateral para el canal formado en la cuneta q . (Fuente: propia)

En el caso 1 (*gutter*), se calcula la onda cinemática sobre la calzada. El flujo saliente (Q_1) es directamente el flujo de entrada lateral (q) para el cálculo de la onda cinemática del flujo de escorrentía en la cuneta.

En el caso 2 (*gutter with sidewalk*), se calcula de la misma forma la onda cinemática sobre la calzada y se añade el cálculo de la onda cinemática sobre la acera. La suma de los caudales

salientes ($Q1 + Q2$) equivale al caudal de entrada lateral (q) para el cálculo de la onda cinemática del flujo de escorrentía en la cuneta.

A continuación, en la **Figura 28** y a modo de ejemplo, se incluyen las líneas de código comentadas referentes al cálculo de este caso.

```

177
178 #----- Caso (2): Gutter with sidewalk >> dos planos (calzada y acera)
179
180 if sg == 2: # sg = tipo de sección transversal
181
182     alpha1 = np.power(n1/np.sqrt(sx1),beta)
183     alpha2 = np.power(n2/np.sqrt(sx2),beta)
184
185     x1=[] #crear vector espacial (dividir ancho calzada en tramos de 0.5m)
186     d=w1
187     while d >= 0:
188         x1.append(w1-d)
189         d=d-Ax
190     if x1[-1] != w1:
191         x1.append(w1)
192     print('x1 =', x1,'\n') #control de ejecución en consola
193
194     Q1=np.zeros((len(x1), len(rfall))) #definición matriz flujo plano 1
195                                     #dimensiones espaciales y temporales
196     Q1[1][0]=0.0000000001 #Definir primer flujo no nulo (inestabilidades)
197
198     for i in range (1, len(x1)): #cálculo onda cinemática plano 1
199         for j in range (1, len(rfall)):
200             Ax=x1[i]-x1[i-1]
201             term1 = alpha1 * beta * np.power(( Q1[i][j-1] + Q1[i-1][j]) / 2, beta-1)
202             term2 = (rfall[j-1] + rfall[j]) / 2
203             Q1[i][j] = (At/Ax*Q1[i-1][j] + Q1[i][j-1]*term1 + At*term2) / (At/Ax + term1)
204
205     x2=[] #crear vector espacial plano 2 (dividir ancho acera en tramos de 0.5m)
206     d=w2
207     while d >= 0:
208         x2.append(w2-d)
209         d=d-Ax
210     if x2[-1] != w2:
211         x2.append(w2)
212     print('x2 =', x2,'\n') #control de ejecución en consola
213
214     Q2=np.zeros((len(x2), len(rfall))) #definición matriz flujo plano 2
215                                     #dimensiones espaciales y temporales
216     Q2[1][0]=0.0000000001 #Definir primer flujo no nulo (inestabilidades)
217
218     for i in range (1, len(x2)): #cálculo onda cinemática plano 2
219         for j in range (1, len(rfall)):
220             Ax=x2[i]-x2[i-1]
221             term1 = alpha2 * beta * np.power(( Q2[i][j-1] + Q2[i-1][j]) / 2, beta-1)
222             term2 = (rfall[j-1] + rfall[j]) / 2
223             Q2[i][j] = (At/Ax*Q2[i-1][j] + Q2[i][j-1]*term1 + At*term2) / (At/Ax + term1)
224
225     print('Q1in ',np.sum(rfall)*At*w1) #control de ejecución en consola
226     print('Q1out',np.sum(Q1[-1])*300)
227     print('>>',np.abs((np.sum(rfall)*At*w1-np.sum(Q1[-1])*300))/(np.sum(Q1[-1])*300/100), '%')
228
229     print('Q2in ',np.sum(rfall)*At*w2)
230     print('Q2out',np.sum(Q2[-1])*300)
231     print('>>',np.abs((np.sum(rfall)*At*w2-np.sum(Q2[-1])*300))/(np.sum(Q2[-1])*300/100), '%')
232
233     q=[sum(x) for x in zip(Q1[-1],Q2[-1])] #suma del flujo que abandona los dos planos
234                                     #(flujo de entrada para el cálculo del canal
235                                     #de escorrentía)
236
237     Qin=np.sum(rfall)*At*w1+np.sum(rfall)*At*w2
238     Qout=np.sum(Q1[-1])*300+np.sum(Q2[-1])*300 #control de volúmenes y errores
239

```

Figura 28: Código para el cálculo de la onda cinemática de cuneta y acera. (Fuente: propia)

En el caso 3 (*v-section*), mismo escenario que en el caso 1. $Q1$ se multiplica por dos, ya que por simetría, al canal central también llega la otra mitad de la calzada.

En el caso 4 (*v-section with sidewalk*), se produce un escenario aparentemente similar al caso 2, con la diferencia de que ahora, $Q1$ no es entrada de q , sino entrada de $Q2$, ya que la escorrentía

del plano 2 (acera) desemboca en el plano 1 (calzada). Por ello $Q1$ se calcula en función de $Q2$, utilizando éste como condición de contorno aguas arriba. La salida del plano 1, $Q1$, se multiplica por dos, ya que por simetría, al canal central también llega la otra mitad de la calzada y la acera del otro extremo.

Finalmente, se añaden las variables Q_{in} y Q_{out} , que equivalen a los volúmenes de entrada (obtenido directamente a partir de la lluvia y el área) y a los volúmenes de salida calculados.

Todo el cálculo se realiza para un metro lineal de ancho, ya que a lo largo de la calle, el comportamiento hidráulico de los planos de escorrentía se considera totalmente uniforme.

Los intervalos de tiempo Δt para el cálculo son 300 segundos, o 5 minutos (el mismo que el del hietograma), y el intervalo espacial Δx es 0.5 metros en todos los casos. Si el ancho de los planos no es múltiple de esta distancia, el último tramo discretizado se adapta a la medida necesaria.

Cálculo de caudales máximos

El siguiente paso consiste en convertir los límites de seguridad establecidos en la ventana de entrada de datos a caudales límite. Esto, como se decía en el apartado 2.4, tiene la función de permitir comparar los distintos criterios y elegir el más restrictivo, a la vez que permite ser comparado directamente con los caudales resultantes del cálculo de la onda cinemática.

En la **Figura 29** se muestran las líneas de código correspondientes a este cálculo.

```

331
332 #----- Cálculo caudales máximos
333
334 Qlimv = np.power(vmax,4)*np.power(n1,3)/16/sx1/np.power(0.376,3)/np.power(so,3/2)
335 Qlimy = 0.376*np.sqrt(so)*np.power(ymax,8/3)/n1/sx1
336 Qlimvy = np.power(vymax,8/5)*np.power(n1,3/5)/np.power(2,8/5)/sx1/np.power(0.376,3/5) \
337         /np.power(so,3/10)
338 Qlimvy2 = vy2max/2/sx1
339
340 print('Lims:',Qlimv,Qlimy,Qlimvy,Qlimvy2) # control de ejecución en consola
341
342 Qlim = min(Qlimv,Qlimy,Qlimvy,Qlimvy2)
343
344 print('Qlim:',Qlim,'\n') # control de ejecución en consola
345

```

Figura 29: Código para el cálculo de caudales límite. (Fuente: propia)

Las conversiones se realizan mediante las ecuaciones (9), (10), (11), y (12).

Cálculo del canal

El cálculo de la onda cinemática a lo largo del canal se lleva a cabo a lo largo de las líneas presentadas en la **Figura 30**.

```

345
346 #----- Cálculo canal
347
348 dist_total=s1
349 Ax=1 # Resolución espacial de cálculo
350
351 xc=np.arange(0,dist_total,Ax) # Vector discretización espacial
352
353 def calc(Dist, xc, rfall, alpha1, beta, q, At, # definición función cálculo
354         Ax, A, B, n1, sx1, so, cc):
355
356     Qc=np.zeros((len(xc), len(rfall))) # Definición matriz canal
357     Qc[1][0]=0.000001 # Definir primer flujo no nulo (inestabilidades)
358     Qcap_t=0 # Contador caudal captado
359
360
361     for i in range (1, len(xc)): # Cálculo recurrente matriz canal
362
363         for j in range (1, len(rfall)):
364             term1 = alpha1 * beta * np.power( (Qc[i][j-1] + Qc[i-1][j]) / 2, beta-1)
365             term2 = (q[j-1] + q[j]) / 2
366             Qc[i][j] = (At/Ax*Qc[i-1][j] + Qc[i][j-1]*term1 + At*term2) / (At/Ax + term1)
367
368             if i*Ax % Dist == 0 and Qc[i][j]>0.005: # Condición para cálculo sumidero
369                 # caudal mínimo para estabilidad
370                 E=(1-cc)*A*np.power(np.power(Qc[i][j],5/8)*np.power(0.376/n1/sx1,3/8)* \
371                                     np.power(so,3/16),-B) # Cálculo eficiencia
372                 if E>1:
373                     E=1
374                     Qcap=Qc[i][j]*E # Cálculo caudal captado
375                     Qc[i][j]=Qc[i][j]-Qcap # Cálculo caudal que pasa
376                     Qcap_t=Qcap_t+Qcap # Actualización caudal captado acumulado
377
378     return(Qc, Qcap_t)
379
380 # Cálculo de la onda cinemática si no se incluye el uso de sumideros:
381 (Qc,Qcap_t)=calc(dist_total, xc, rfall, alpha1, beta, q, At, Ax, A, B, n1, sx1, so, cc)
382 print('El Qmaxdist_total es',Qc.max()) # Control de ejecución en consola
383
384 if Qc.max() < Qlim: # Si no se superan los límites de seguridad:
385     print('no al posar reixes') # Control de ejecución en consola
386     situation=1 # No es necesario utilizar drenaje superficial
387 else:
388     # Cálculo de la onda cinemática con imbornales cada 3 metros:
389     (Qc,Qcap_t)=calc(3*Ax, xc, rfall, alpha1, beta, q, At, Ax, A, B, n1, sx1, so, cc)
390     print('El QmaxAx es',Qc.max())
391     if Qc.max() > Qlim: # Si no se consigue rebajar los caudales máximos por debajo los límites:
392         print('No es pot assolir objectiu') # Control de ejecución en consola
393         situation=2 # No es posible alcanzar el objetivo
394     else:
395         situation=3 # Situación para el cálculo del espaciamiento óptimo
396         DistA=At # Se define una distancia A (inferior a la dist. óptima)
397         DistB=dist_total # Y una distancia B (superior a la dist. óptima)
398         dist=((DistA+DistB)/2)//Ax*Ax # Y la distancia media entre las dos
399         print(dist) # Control de ejecución en consola
400
401
402
403 if situation == 3: # Se procede al cálculo del espaciamiento óptimo
404
405     c=0## # Contador de iteraciones para control interno
406     while dist != DistA: # Algoritmo para hallar el espaciamiento óptimo
407         (Qc,Qcap_t)=calc(dist, xc, rfall, alpha1, beta, q, At, Ax, A, B, n1, sx1, so, cc)
408         if Qc.max() > Qlim: # Ajuste de las distancias A i B según si los caudales
409             DistB=dist # máximos producidos se encuentran por arriba o por
410             # debajo del límite establecido.
411         else: # Cuando la nueva distancia propuesta es la misma que
412             DistA=dist # la distancia A, significa que ya no se puede ajustar
413             # más y que esa es la mayor distancia entre sumideros
414             # que no sobrepasa el límite.
415
416         print('iteració',c,'distància',dist) # Control de ejecución en consola
417         print('A:',DistA,'B:',DistB)
418         print('Qmax:',Qc.max(),'\n')
419         dist=((DistA+DistB)/2)//Ax*Ax # Actualización de la distancia de cálculo
420         c+=1##
421
422     print('>>>> La distància optima és',DistA) # Control de ejecución en consola
423
424     # Calculo final con la distancia calculada como óptima:
425     (Qc,Qcap_t)=calc(DistA, xc, rfall, alpha1, beta, q, At, Ax, A, B, n1, sx1, so, cc)
426
427     QcTmax=np.where(Qc == Qc.max()) # Obtención de coordenadas de la matriz donde se produce el
428     # mayor caudal.
429

```

Figura 30: Código para el cálculo de la onda cinemática del canal de la cuneta. (Fuente: propia)

Las líneas de la **Figura 30** empiezan definiendo el intervalo espacial de cálculo Δx (1 metro) y un vector espacial. Posteriormente se define la función de cálculo de la onda cinemática, contemplando la ubicación de imbornales cada cierta distancia (en el código según la variable *dist*).

Posteriormente, se calculan los caudales máximos de escorrentía superficial bajo dos premisas:

Calle sin imbornales: Podría ocurrir que aun sin colocar sumideros, los límites de caudales no se vean sobrepasados. Esto puede pasar si la calle es muy corta o la lluvia muy débil. Si se da esta situación, se obtiene la solución del problema en este mismo paso.

Calle con imbornales muy juntos: Se ha programado como "muy junto" tres veces el intervalo espacial de cálculo, es decir 3 metros. Se entiende que no tiene sentido que se tengan que ubicar sumideros a ésta o una distancia menor. Si se da esta situación, el programa dará como respuesta que no es posible solucionar el problema. Esto puede darse en casos de calles extremadamente anchas, una lluvia muy intensa o sumideros muy poco eficientes.

Cuando no se da ni una situación ni otra (lo normal), el programa procede a buscar aquella máxima distancia entre imbornales que no implica sobrepasar el límite establecido en el apartado anterior.

Para hacerlo se aplica una especie de Teorema de Bolzano adaptado a problemas discretos. Se definen dos variables que van cambiando a lo largo del algoritmo. La primera es *DistA*, la última distancia entre imbornales calculada cuyos caudales quedan por debajo del límite. La segunda es *DistB*, la última distancia entre imbornales calculada cuyos caudales sobrepasan el límite marcado.

A cada iteración, se computa la onda cinemática para la distancia entre imbornales media entre *DistA* y *DistB*. En caso de conflicto entre dos valores posibles, se elige la menor distancia. Cuando la distancia de cálculo *dist*, es igual a *DistA*, se ha encontrado la distancia óptima con una resolución 1 metro, y se paran las iteraciones **Figura 31**.

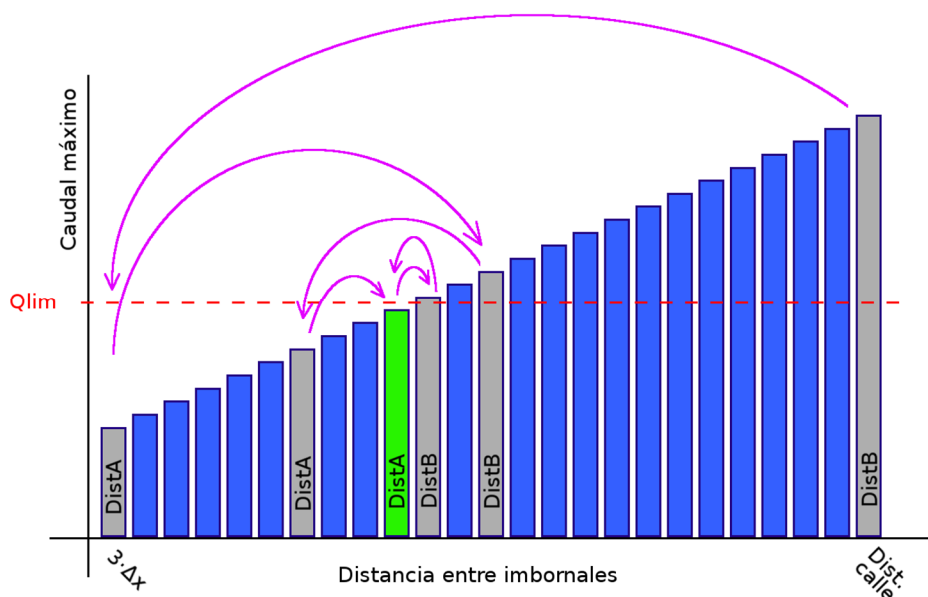


Figura 31: Algoritmo iterativo aplicado para encontrar la mayor distancia que no sobrepasa un límite de caudales, en el esquema, la columna verde. (Fuente: propia)

Cálculo estabilidad

Finalmente, cuando se ha llevado a cabo el algoritmo de identificación de la distancia óptima, quiere saberse también si el flujo superficial de escorrentía llega a estabilizarse (**Figura 7** y **Figura 12**), y de hacerlo, en qué punto se produce dicha estabilización.

Se considera que el flujo se ha estabilizado cuando las diferencias entre los caudales inmediatamente anteriores a los últimos sumideros son menores a un 1%.

```

436
437 #----- Cálculo de estabilidad
438
439 if situation == 3:
440     graf = Qc[:,QcTmax[1][0]]
441     vect=[]
442
443     i=1
444     while i*DistA < sl:
445         vect.append(graf[i*DistA/Ax-1])
446         i+=1
447     print(vect)
448
449     vect = sorted(vect, reverse=True)
450     vect = [ (vect[0]-x)/vect[0]*100 for x in vect]
451     print(vect)
452
453     steady=0
454     while vect[steady]<1:
455         steady+=1
456     print(steady)
457

```

Figura 32: Código para el cálculo de estabilidad del flujo de escorrentía. (Fuente: propia)

Después de todo el proceso, ya se cuenta con los datos necesarios para mostrar resultados.

3.3. Ventana de resultados

En la **Figura 33** puede verse la ventana que aparece en ventana una vez el cálculo ha finalizado. En ella se ordena la información de salida en 4 zonas distintas.

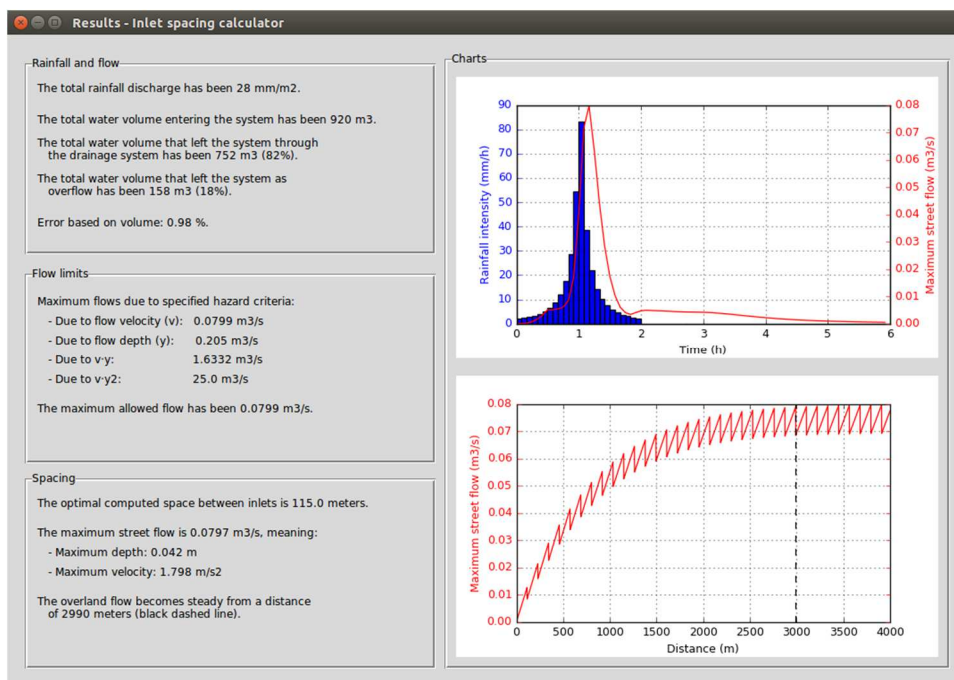


Figura 33: Ejemplo de ventana de resultados. (Fuente: propia)

Cada zona agrupa información referente a un contexto específico:

Rainfall and flow

Se analiza el balance de volúmenes de entrada y salida del sistema. Primero se explicita a corte informativo la lluvia total acumulada. A continuación, el volumen de agua que ha entrado en el sistema a causa de la lluvia. Después, el volumen de agua que ha salido del sistema (tanto el que lo ha hecho en superficie como el que ha sido captado por los imbornales y la relación entre éstos). Finalmente, se añade la relación entre el volumen de entrada y el de salida a modo de porcentaje. Este valor es útil para conocer la precisión de los cálculos realizados. Valores superiores al 5% implicarían que hay que revisar el modelo. Utilizar calles muy largas hace que este error aumente, ya que el cálculo finaliza cuando aún hay flujo desplazándose por la calle.

Flow limits

Se muestran los límites introducidos en la ventana de entrada de datos convertidos a caudales. El menor de ellos ha sido el utilizado como caudal límite.

Spacing

En esta caja se encuentran los resultados referentes al espaciamiento entre imbornales. Aquí se dice si el escenario propuesto no tiene solución, si no es necesaria la aplicación de imbornales o si puede solucionarse mediante su uso. De ser la última opción, se dice cuál es la distancia óptima y si el flujo se estabiliza a lo largo de la calle, y de nuevo, de ser así, se dice también a que distancia aguas abajo se estabiliza.

Independientemente de la situación que se produzca, se dice cuál es el máximo flujo que se produce en la calle y el calado y velocidad que se le corresponden.

Charts

En la última caja se muestran dos gráficas.

La primera muestra y relaciona el episodio de lluvia (azul) con la escorrentía superficial en el punto anterior a la última reja de sumidero (rojo). El eje de abscisas tiene el tiempo como variable (en horas). La línea roja se corresponde por lo tanto a ubicarse en el punto de máximo caudal superficial y dejar correr el tiempo.

En la segunda, se dibuja también el caudal de escorrentía superficial, pero ahora en lugar de fijar el lugar y colocar el tiempo en las abscisas, se hace al revés. Se fija el tiempo (también en el momento de mayor caudal), y se grafica el caudal en función del espacio. Equivale a tomar una fotografía de todo el sistema en el momento de mayores caudales.

Esta segunda grafica es la que tiene un mayor interés, ya que es donde se aprecia mejor el efecto de los sumideros. Se puede observar de forma fácil como progresan los caudales de escorrentía a lo largo de la calle, así como el número de sumideros que hay que colocar, o cómo se estabiliza el flujo superficial. Si no se estabiliza, puede verse igualmente si está lejos o no de hacerlo. Si se estabiliza, se marca con una línea vertical discontinua y de color negro el punto en que lo hace.

Estas dos gráficas (excepto la subgráfica referente a la lluvia), salen directamente de la matriz de cálculo de la onda cinemática. De hecho, si se colorea la matriz se obtiene la **Figura 34**.

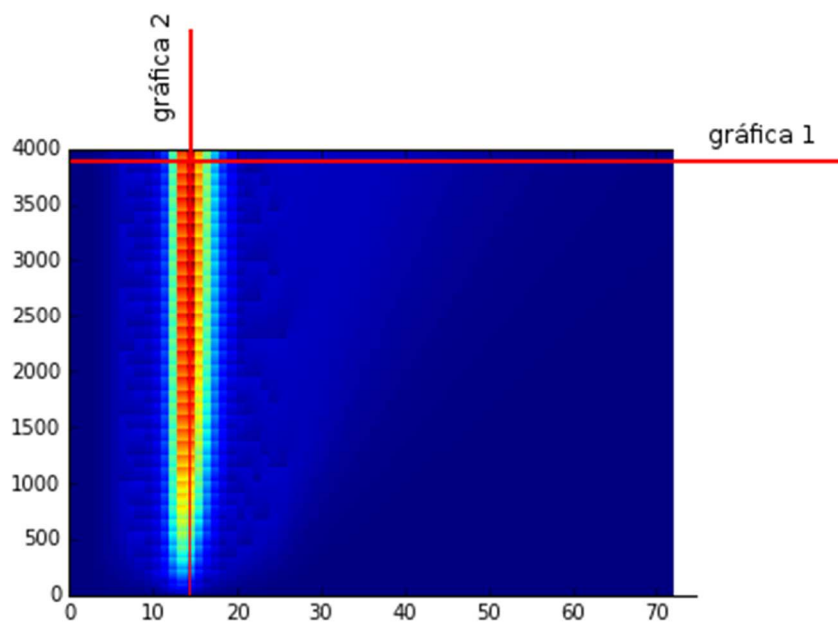


Figura 34: Matriz de salida del cálculo de la onda cinemática coloreada en función del valor de sus elementos (caudales). En el eje de abscisas intervalos de tiempo de 5 minutos transcurridos y en el de ordenadas, distancia en metros. (Fuente: propia)

En la **Figura 34** se dibujan los caudales de escorrentía superficial a lo largo del tiempo y el espacio. Ambas gráficas tienen en común el punto de máximo caudal.

4. Resultados. Ejemplo de aplicación.

Al no existir unos resultados como tal de este trabajo, pues su misión era desarrollar el programa de cálculo, se añade en este apartado un sencillo ejemplo de aplicación. De algún modo, el hecho de poder aplicar el programa, es el resultado de este trabajo.



Figura 35: Imagen de la calle de estudio tomada desde su extremo a mayor coto, el extremo superior de la calle en la **Figura 36**. (Fuente: propia)

La calle Poesia (**Figura 35**) se encuentra en el barrio de Montbau de Barcelona (**Figura 36**), en la falda de la sierra de Collserola. La calle, recta y de unos 350 metros de longitud, une la parte alta del barrio con la Ronda de Dalt, salvando un desnivel de 40 metros.

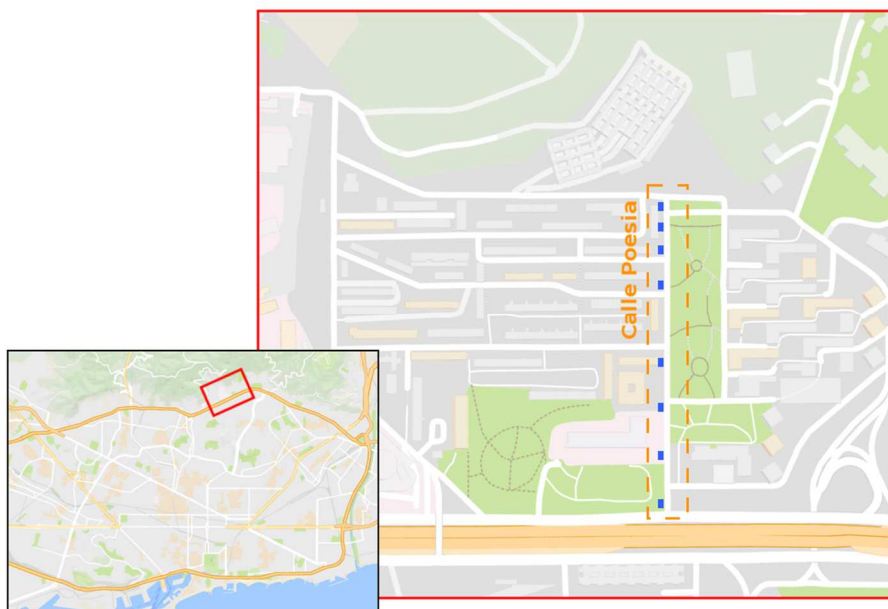


Figura 36: Mapa de ubicación de la calle de estudio. (Fuente de la cartografía: Google Maps. Editado)

Los datos geométricos de la calle son los siguientes:

- Cota máxima: 178.3 m
- Cota mínima: 141.1 m
- Longitud calle: 347.3 m
- Ancho media calzada: 6 m
- Ancho acera: 2 m
- Altura bordillo: 0.15 m

De los datos anteriores se obtiene la pendiente longitudinal, calculada en 0.107. Se trata de una pendiente media. La calle mantiene una pendiente uniforme, por lo tanto, no supone un inconveniente trabajar con la pendiente media.

Los demás datos utilizados son parámetros estándar:

- Pendiente transversal calzada: 0.020
- Pendiente longitudinal acera: 0.015
- Coeficiente de rugosidad de Manning para la calzada: 0.016
- Coeficiente de rugosidad de Manning para la acera: 0.020

Los criterios de riesgo se toman según las recomendaciones, es decir:

- v_{\max} : 1.80 m/s
- y_{\max} : 0.06 m

Para el cálculo, se eligen las rejas de sumidero que ya existen en la calle, que son unas de las ensayadas en el manual Diseño de sistemas de sumideros en medio urbano, de Russo B., Gómez M. (2014). Sus parámetros hidráulicos de eficiencia según ensayo son:

- A: 0.3551
- B: 0.8504



Figura 37: Rejas utilizadas a lo largo de la calle. Ubicaciones en la **Figura 36**. (Fuente: propia)

Al tratarse de una calle con elevada pendiente y no haber árboles de hoja caduca, los sumideros no suelen estar colmatados. Este hecho se confirma durante una inspección visual. Se establece el factor de colmatación ligeramente por debajo del valor recomendado.

- Factor de colmatación: 0.4

Finalmente se elige la lluvia de 10 años de periodo de retorno para Barcelona.

Con todos los valores introducidos puede iniciarse el cálculo. Los resultados se muestran en la **Figura 38**.

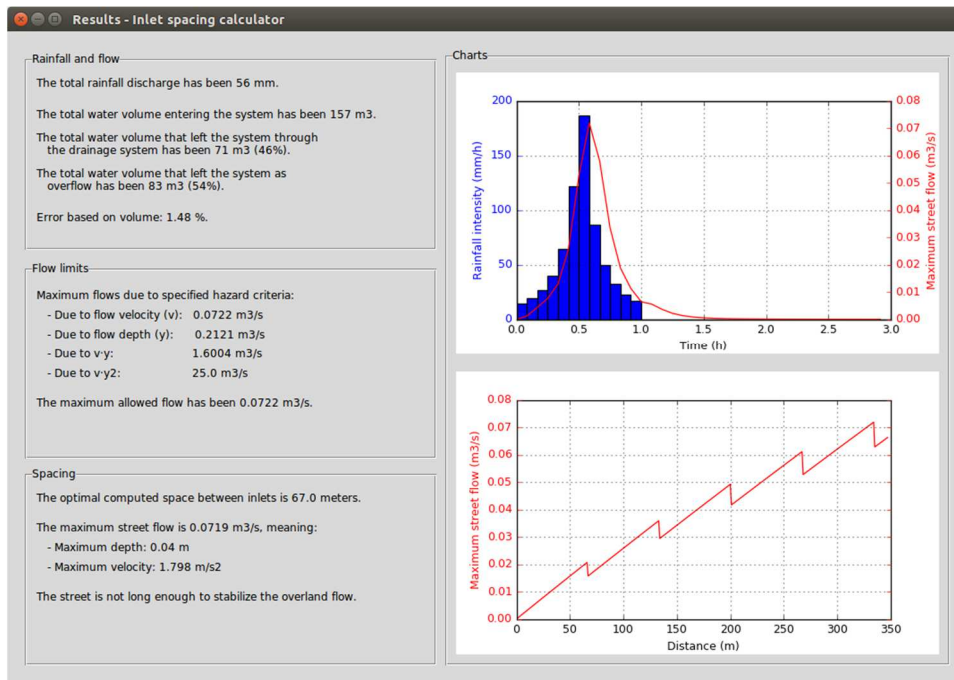


Figura 38: Ventana de resultados del ejemplo planteado. (Fuente propia)

Como cabía esperar por la elevada pendiente, el criterio de seguridad que limita los caudales es la velocidad máxima. La distancia óptima entre imbornales para no sobrepasar este límite es 67 metros. Aun así el flujo no llega a estabilizarse a lo largo de la calle.

En la **Figura 36** puede observarse la ubicación real de los sumideros. Para hacerse a la idea, los 4 primeros sumideros (aguas arriba, parte superior de la imagen) mantienen entre sí una distancia de 29 metros. Después de un espacio de 89 metros, hay otro grupo de 4 sumideros que mantienen una distancia entre ellos de unos 52 metros. Puede decirse entonces que el sistema de captación está aparentemente bien dimensionado, aunque el espaciamiento entre los dos grupos se encuentre ligeramente por encima de la distancia hallada.

Los cuatro primeros están a la mitad de la distancia propuesta, pero al no existir elementos de control de escorrentía aguas arriba (terreno natural), es posible que sea necesario ese acortamiento de la distancia.

Puede comprobarse cuál es la distancia a la cual el flujo se estabilizaría. Para ello solo hace falta volver a correr el programa introduciendo una longitud de calle mucho mayor. Por ejemplo, con 4000 metros de calle se alcanza de forma sobrada esa estabilidad (**Figura 39**).

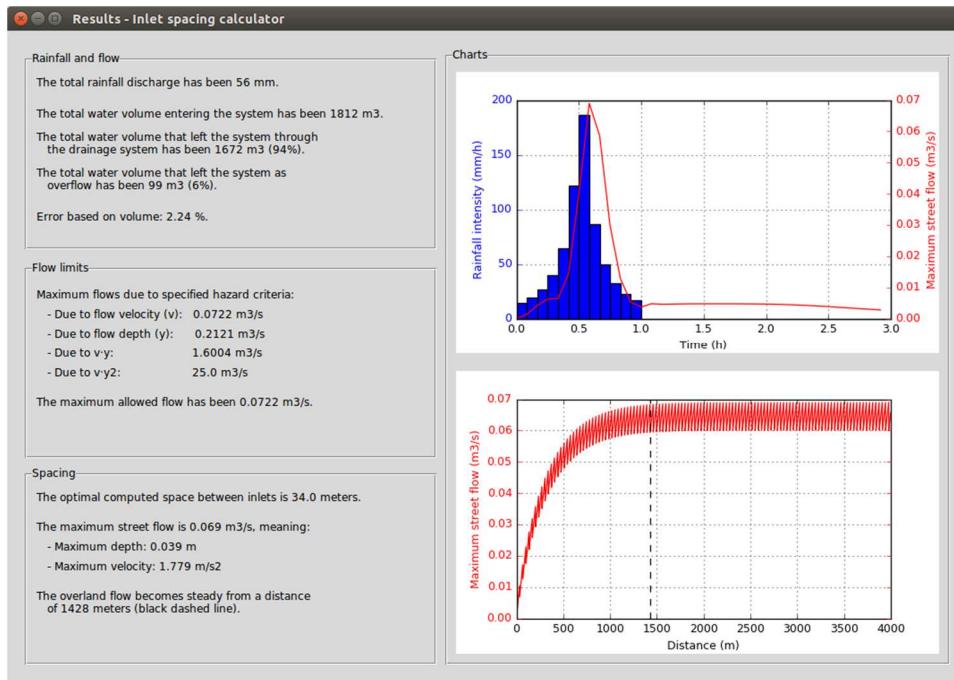


Figura 39: Ventana de resultados del ejemplo planteado, incrementando la longitud hasta 4000 metros. (Fuente propia)

La distancia entre imbornales necesaria para que el flujo se estabilice es de 32 metros. Este hecho apoya la decisión de reducir los espaciamentos en el primer grupo de sumideros, de modo que se facilite la captación del agua de escorrentía que pueda llegar del terreno natural.

5. Conclusiones

A continuación, y a modo de conclusión, se hace una crítica sobre las limitaciones del modelo y del programa.

Limitaciones del modelo utilizado

El modelo propuesto es una simplificación de la realidad y es necesario entender sus limitaciones. Solo así se le puede sacar provecho.

La simplificación más acusada es la que aísla la calle de estudio del resto del entorno. Muy difícilmente se encontrarán calles cuyo funcionamiento hidráulico no interaccione con la de las calles que cruza o no tenga ningún tipo de irregularidad que pueda causar aumentos puntuales de calados o velocidades.

El modelo podría mejorarse permitiendo que el usuario pudiera añadir condiciones de contorno aguas arriba (ahora no se permite y se toman como caudal cero). En la misma dirección, se representaría mejor la realidad si en ciertos puntos se permitiera incluir una divergencia o confluencia de flujo (cruce con otras calles).

El haber hecho esta simplificación, sin embargo, permite crear herramientas tan sencillas como la propuesta. Se trata de herramientas que no requieren gran cantidad de datos para funcionar, que no tienen apenas coste de computación y aun así proporcionan una información de calidad, que permite hacer una primera aproximación a la solución del problema y al comportamiento hidráulico de la zona estudiada.

Limitaciones del programa

El programa presentado ha sido hecho desde cero, y es una primera versión que admite muy posiblemente diversas mejoras.

- Intervalos de tiempo y espacio. Se utilizan intervalos de 5 minutos en todos los cálculos. El espacio se discretiza en tramos de 0.5 metros en los planos de escorrentía (acera y calzada) y 1 metro en el canal. Esto hace que la precisión del resultado sea mejorable, aunque no debería afectar a la exactitud.
- Optimización de procesos. Muy posiblemente la falta de conocimientos en programación ha hecho que algunos pasos o procesos tengan un coste de computación más elevado del que sería esperable. En programación, ocurre que hay muchos caminos posibles para llegar al mismo objetivo, todos funcionan, y posiblemente ninguno esté *mal*. No conocer todos esos caminos hace que no se pueda elegir el mejor.
- Presentación y organización del código. Es posible que las entrañas del programa vulneren algunas de las reglas de buenas prácticas del programador.
- No están todas las tipologías de secciones transversales de calles representadas. Podrían añadirse ramblas, paseos, bulevares, etc. De todos modos, las principales sí están incluidas.
- No existen funciones de salida de datos. El resultado del problema es sencillo, y los datos que se consideran de interés ya se muestran en la ventana de resultados. Sin embargo, sería interesante añadir opciones de salida de datos, de modo que el usuario pueda encontrar resultados que no aparecen en la ventana gráfica.
- Compilar. Python es un lenguaje interpretado, lo que significa que no es necesario compilar para ser ejecutado. Aun así, puede ser compilado para que cualquier máquina que no tenga instalado Python pueda ejecutarlo. Esto ha de hacerse en los próximos días, antes de ponerlo a disposición de los usuarios.

Más allá de estas limitaciones o críticas, la parte positiva es que el programa funciona, es robusto, fácil de utilizar, y lo mejor: en un futuro inmediato ha de estar disponible en la red para que todo aquél que lo desee pueda utilizarlo. El conocimiento, por humilde que sea, ha de tener el menor número de barreras posibles.

6. Bibliografía

Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMC) (2000). Floodplain Management in Australia. Best Practice Principles and Guidelines. SCARM Report 73, CSIRO Publishing.

Belleudy P. (2004). Risques Hydro-météorologiques, crues et inondations. DDS-TUE364/9.

Chow Ven Te, Maidment D.R., Mays L.W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill, Inc.

Clark County Regional Flood Control District (CCRFCD) (1999). Hydrological criteria and drainage design manual.

Clavaguera de Barcelona S.A. (CLABSA) (2007). PICBA07, Plan integral de alcantarillado de Barcelona 2007.

Gómez M. (2008). Curso de Hidrología urbana. Flumen, ETSECCPB, UPC.

Nanía L. (1999). Metodología nemérico experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentia pluvial en una red de calles. Tesis Doctoral, ETSECCPB, UPC.

Miller J. E. (1984). Basic Concepts of Kinematic-Wave Models. U.S. Geological Survey Professional Paper 1302.

Osman Akan A., Houghtalen R. J. (2003). Urban Hydrology, Hydraulics and Stormwater Quality. Engineering Applications and Comuter Modeling.

Témez Pelaez J. R. (1992). Control del desarrollo urbano en las zonas inundables. Inundaciones y Redes de dernaje urbano. CICCIP Monografías.

Russo B., Gómez M. (2014). Diseño de sistemas de sumideros en medio urbano. ETSECCPB, UPC, Flumen, CIMNE.

Wright-McLaughlin (1969). Urban Storm Drainage Criteria Manual. Urban Drainage and Flood Control District.