



Diagnóstico, Análisis de Alternativas y Definición de Medidas de Actuación para Reducir el Riesgo de Inundación en el Municipio de Valdepeñas (Ciudad Real)

ANEXO 4: ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA URBANA (DIAGNÓSTICO Y NECESIDADES DE DRENAJE)

ANEXO 4: ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA URBANA (DIAGNÓSTICO Y NECESIDADES DE DRENAJE)



Índice

1.- Delimitación de subcuencas urbanas _____	3
2.- Modelización del flujo en calles mediante SWMM. _____	5
3.- Características del software. Modelo conceptual adaptado al proyecto. _____	7
3.1.- Módulos de cálculo. _____	7
3.2.- Método de cálculo de la escorrentía superficial en cuencas. _____	8
3.3.- Método de cálculo hidráulico. Método de la onda dinámica. _____	8
4.- Elementos utilizados para el desarrollo de los distintos modelos. Parámetros de cada elemento. _____	10
4.1.- Pluviómetros. _____	10
4.2.- Nudos. _____	11
4.3.-Subcuencas _____	13
4.4.- Conexiones entre nudos. _____	17
5- Criterios de peligrosidad del flujo en calles en función del calado y la velocidad. ____	21
5.1.- Caracterización de la peligrosidad en calles. _____	21
5.2.- Criterios para valorar la peligrosidad _____	22
5.3.- Elección de criterios. _____	28
5.4.- Desarrollo de mapas de peligrosidad. _____	29



Índice de figuras

<i>Figura 1. Modelo Digital del Elevaciones del municipio de Valdepeñas.</i>	4
<i>Figura 2. Distribución de la intensidad mediante el método de los bloques alternos.</i>	11
<i>Figura 3. Discretización en subcuencas para la subcuenca norte.</i>	15
<i>Figura 4. Representación del modelo de cuenca utilizado por SWMM para el cálculo de las subcuencas.</i>	16
<i>Figura 5. Discretización en nodos y conexiones para la subcuenca norte.</i>	18
<i>Figura 6. Sección tipo de calle con igual a 12.5 metros.</i>	20
<i>Figura 7. Trazado seguido por los marcos utilizados.</i>	21
<i>Figura 8. Gráfica de los criterios de zonas de inundación según Témez.</i>	24
<i>Figura 9. Fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, en el caso de estar sometida a la acción de la escorrentía. Fuente: Nanía (1999), “Metodología numérico-experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles”.</i>	25
<i>Figura 10. Criterio propuesto para la delimitación de la zona de inundación peligrosa considerando la estabilidad al deslizamiento.</i>	27
<i>Figura 11. Esquema de las fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, para evaluar su estabilidad al vuelco producido por la acción de la escorrentía. Fuente: SIHH, UPC.</i>	28



1.- Delimitación de subcuencas urbanas

El primer paso a realizar para caracterizar el comportamiento hidrológico es la delimitación de las sub-cuencas urbanas existentes en el municipio de Valdepeñas. Para ello, se realizó un modelo digital de elevaciones (MDE) mediante ArcGIS, observándose las áreas vertientes de cada una de ellas, así como una serie de zonas con problemas de evacuación de las aguas pluviales. Este modelos se pueden observar a continuación:

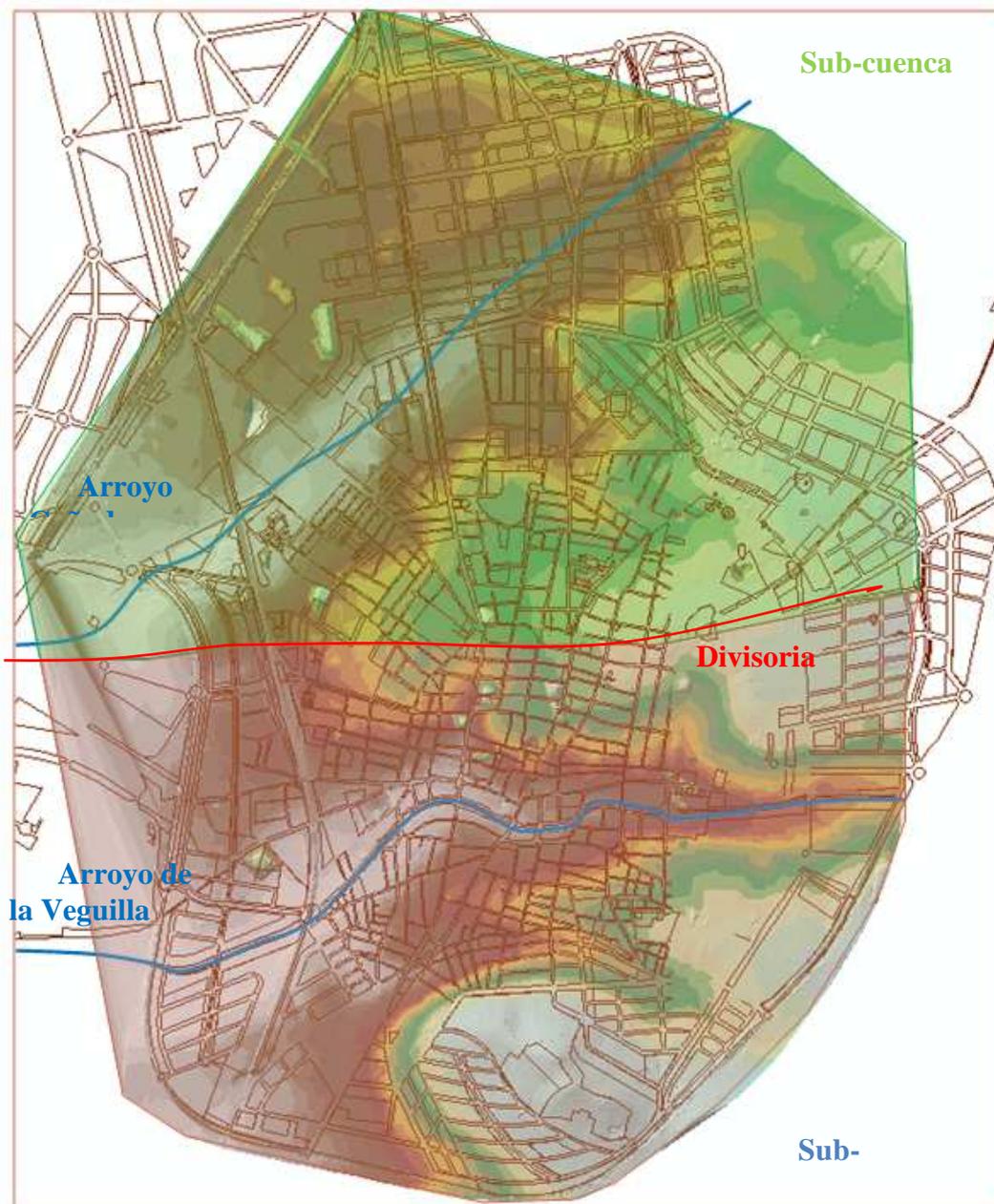


Figura 1. Modelo Digital del Elevaciones del municipio de Valdepeñas.



2.- Modelización del flujo en calles mediante SWMM.

Para el estudio del comportamiento hidrológico e hidráulico que caracterice el movimiento de la escorrentía superficial proveniente de precipitaciones, se opta por el uso del software SWMM (*Stormwater Management Model* -- modelo de gestión de aguas pluviales) por la combinación que hace de ambos grupos de procesos. Mediante la introducción de las características propias de la red de calles a utilizar, se hallan los parámetros de calado y velocidad que sirven para caracterizar la peligrosidad existente según una serie de criterios contrastados.

El *software SWMM* es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, especialmente en alcantarillados urbanos y calles. El *módulo de escorrentía o hidrológico* de SWMM funciona con una serie de cuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía. El *módulo de transporte o hidráulico* de SWMM analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por conductos, canales, calles y distintos dispositivos de almacenamiento tratamiento y regulación.

Asimismo, SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y la calidad del agua de escorrentía de cada cuenca, así como el caudal, el nivel de agua en los pozos o la calidad del agua en cada tubería y canal durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo.

SWMM considera distintos procesos hidrológicos que se producen en la salida de las aguas urbanas. Entre éstos, los utilizados para la modelización llevada a cabo son:

- Precipitaciones variables en el tiempo
- Intercepción de precipitaciones por almacenamiento en depresiones



- Infiltración de las precipitaciones en capas del suelo no saturadas

La variabilidad espacial en todos estos procesos se alcanza dividiendo una determinada área de estudio en áreas de captación de agua más pequeñas y homogéneas (concepto similar al de cuencas). Cada una de éstas contiene su propia fracción de subáreas permeables e impermeables. El flujo superficial puede producirse entre las distintas subáreas, entre las distintas cuencas o entre los puntos de entrada al sistema de drenaje.

Junto a esto, SWMM contiene un conjunto flexible de herramientas de modelación de características hidráulicas utilizado para analizar el flujo debido a la escorrentía superficial y los aportes externos de caudal. Estas herramientas incluyen la capacidad de:

- Manejar redes de tamaño ilimitado
- Utilizar una amplia variedad de geometrías para las conducciones, tanto abiertas como cerradas, así como los canales naturales o calles (caso de nuestro estudio).
- Modelar elementos especiales como unidades de almacenamiento y tratamiento, divisores de flujo, bombas, vertederos y orificios.
- Aplicar caudales externos y concentraciones para determinar la calidad del agua de las aguas superficiales (muy importante en el estudio de la red de saneamiento para bajos periodos de retorno), intercambio de caudales con los acuíferos, caudales de infiltración en los colectores dependientes de la precipitación, caudales sanitarios en tiempo seco y aportes externos definidos por el usuario.
- Realizar el análisis hidráulico por distintos métodos como el flujo uniforme, la onda cinemática o la modelación completa por onda dinámica.



- Modelar distintos regímenes de flujo, como pueden ser remanso, entrada en carga, flujo inverso y acumulación en superficie. De esta forma se puede evaluar un comportamiento global, valorando la combinación posible entre entrada en carga de los puentes sobre el canal y el caudal desbordado hacia las calles laterales en dicha situación.

3.- Características del software. Modelo conceptual adaptado al proyecto.

3.1.- Módulos de cálculo.

SWMM representa el comportamiento de un sistema de drenaje mediante una serie de flujos de agua y materia entre los principales módulos que componen un análisis medioambiental. Los módulos utilizados en SWMM que se utilizarán de este proyecto son:

El **Módulo Atmosférico**, desde la cual se analiza la lluvia caída, estudiada posteriormente en el Módulo de Superficie del Suelo. SWMM utiliza el objeto **pluviómetro** para representar las entradas de lluvia en el sistema.

El **Módulo de Superficie del Suelo**, que se representa a través de uno o más objetos tipo **cuenca**. Estos objetos reciben la precipitación del Módulo Atmosférico en forma de lluvia, y generan flujos de salida en forma de escorrentía superficial para el Módulo de Transporte.

El **Módulo de Transporte** contiene una red con elementos de transporte (canal de la Veguilla, calles y marcos en la zona norte) que transportan el agua hacia los nudos de vertido. Los flujos de entrada de este módulo pueden provenir de la escorrentía superficial, de los caudales de rebose del sistema de alcantarillado (no se tendrá en cuenta al trabajar con altos periodos de retorno), o de hidrogramas de entrada, como es el caso del aporte realizado por la cuenca previa del arroyo de la Veguilla. Los componentes del Módulo de Transporte se modelan con los objetos **nudos y líneas**.



3.2.- Método de cálculo de la escorrentía superficial en cuencas.

Cada una de las cuencas se trata como un depósito no lineal. Los aportes de caudal provienen de la precipitación. Existen diferentes caudales de salida tales como la infiltración y la escorrentía superficial. La capacidad de este “depósito” es el valor máximo de un parámetro denominado almacenamiento en depresión, que corresponde con el máximo almacenamiento en superficie debido a la inundación del terreno, el mojado superficial de la superficie del suelo y los caudales interceptados en la escorrentía superficial por las irregularidades del terreno.

La escorrentía superficial por unidad de área, Q , se produce únicamente cuando la profundidad del agua en este “depósito” excede el valor del máximo almacenamiento en depresión, dp , en cuyo caso el caudal de salida se obtiene por aplicación de la ecuación de Manning. La profundidad o calado de agua en la cuenca se actualiza continuamente en cada uno de los instantes de cálculo mediante la resolución numérica del balance de caudales en la cuenca.

3.3.- Método de cálculo hidráulico. Método de la onda dinámica.

SWMM ofrece tres modalidades distintas de cálculo:

Régimen permanente: en este caso, en cada conducto se traslada el hidrograma calculado desde aguas arriba hacia aguas abajo, sin modificarlo y sin generar decalaje temporal. Esta opción solo puede aplicarse a redes arborescente, en las que en cada nudo hay un único colector de salida.

Método de la onda cinemática: este método resuelve una aproximación de las ecuaciones de Saint-Venant, considerando la ecuación de equilibrio de fuerzas solo con las componentes de gravedad y fricción. Los inconvenientes que presenta es que no permite atenuar puntas de caudal, no modela la entrada en carga, ni tampoco los efectos de reflujos (condición de contorno desde aguas abajo). Se puede aplicar a todo tipo de redes arborescentes en las que las condiciones de tramos posteriores no tengan influencia.



Método de la onda dinámica: esta es la opción más aproximada a la realidad ya que realiza el cálculo completo de las ecuaciones de Saint-Venant, considerando todas las fuerzas actuantes: gravedad, fricción, presión e inercia, permitiendo además simular los efectos de la laminación, reflujos y condiciones de contorno de aguas abajo.

Por las características de las redes con las que se está trabajando, se considera que el **método más aproximado es el de onda dinámica**, que aún invirtiendo más tiempo en el cálculo debido a la mayor complejidad, los resultados obtenidos se ajustan mejor a la realidad. Las ecuaciones de Saint-Venant a resolver son:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial y}{\partial x} - g \cdot A \cdot (I_o - I_f) = 0 \quad (2)$$

Siendo: Q es el caudal;

A el área del flujo;

q un caudal lateral de entrada uniformemente distribuido;

V la velocidad media del flujo;

y el calado;

I_o la pendiente de la solera;

I_f la pendiente de fricción o motriz;

g la aceleración de la gravedad;

x y t, el espacio y el tiempo.



4.- Elementos utilizados para el desarrollo de los distintos modelos. Parámetros de cada elemento.

A continuación se exponen las características y los procedimientos de cálculo e interacción entre los distintos módulos a través de los elementos presentes en cada uno de ellos.

4.1.- Pluviómetros.

Los pluviómetros suministran los datos de entrada de las precipitaciones que ocurren sobre una o varias de las cuencas definidas en el área de estudio. Los datos de lluvia pueden ser definidos por el usuario mediante series temporales de datos o provenir de un archivo externo al programa.

Los parámetros principales de entrada de un pluviómetro son:

- Tipo de datos de lluvia (por ejemplo, intensidad de lluvia, volumen o volumen acumulado).
- Intervalo de tiempo de los datos (por ejemplo, cada hora, cada 15 minutos, etc.).
- Origen de los datos de lluvia: pueden ser introducidos directamente en el programa o a través de referencia a algún archivo externo.

Los datos de lluvia a utilizar en los modelos se corresponden con los calculados para la cuenca exterior, considerando una precipitación diaria (P_d) de 133 mm para distintos periodos de retorno (25, 50, 100 y 500 años). El factor de reducción areal que se aplica es igual 0.95 (factor de reducción areal propuesto por Témez – Área igual a 5.17 km²).

$$K_d = \frac{P_A}{P_p} = 1 - \frac{\log A}{15} \Rightarrow 1 < A < 3000 \text{ km}^2 \quad (3)$$

A partir del dato de precipitación diaria, se obtiene la intensidad según la fórmula propuesta por Témez:



$$\frac{I}{I_{24h}} = \left(\frac{I_1}{I_{24h}}\right) \frac{28^{0.1-D^{0.1}}}{28^{0.1-1}} \quad (4)$$

Y se distribuye mediante el método de los bloques alternos, para un periodo de duración de tormenta igual a 6 horas, con $T_d=3.5$ horas.

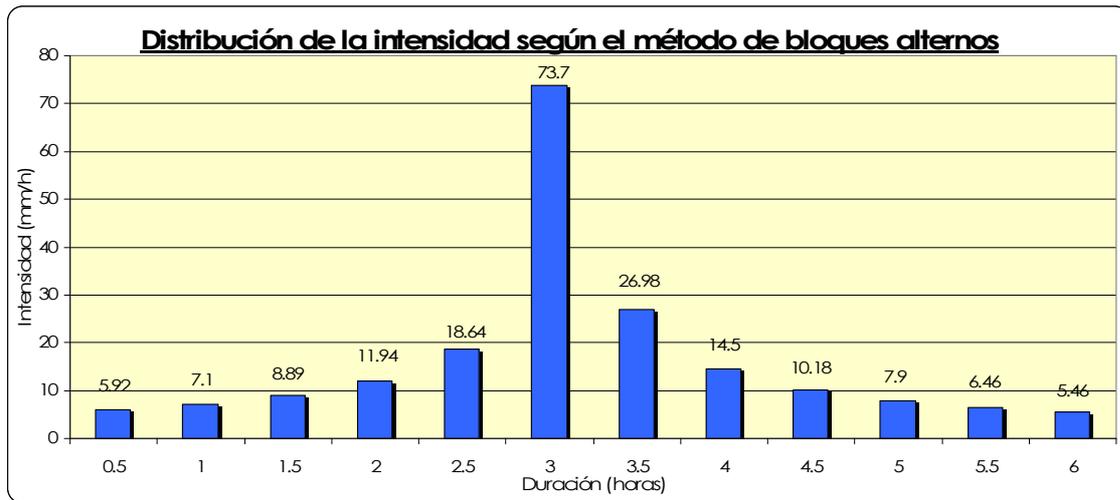


Figura 2. Distribución de la intensidad mediante el método de los bloques alternos.

4.2.- Nudos.

4.2.1.- Nudos de conexión.

El primer paso a realizar para el desarrollo del modelo es el posicionamiento de los nudos implicados en la red, puesto que representan los puntos de descarga de las subcuencas, así como su limitación espacial, y sirven como puntos de partida y llegada de cada tipo de conducto. Para su distribución se ha valorado el grado de detalle que se quería obtener en cada momento, así en puntos de especial interés por su facilidad para la inundación, se ha disminuido el distanciamiento entre ellos.

Las conexiones son nudos del sistema de drenaje donde se conectan diferentes líneas entre sí. En nuestro caso, físicamente representan la confluencia de 2 tramos de calles o de marcos. Los aportes externos de caudal entran en el sistema a través de las conexiones, siendo las conexiones situadas al este las que reciban el caudal de las respectivas cuencas exteriores. El



exceso de agua en un nudo de los marcos se traduce en un flujo hacia las calles situadas encima de los mismos.

Los parámetros principales de entrada de una conexión son:

- Cota de fondo o fondo del pozo que puede encontrarse en la conexión. Se obtiene a partir de la cartografía existente y del MDE realizado.
- Profundidad del pozo. Depende de si es un pozo por el que no pasa ningún marco (profundidad 0) o si pasa por el algún marco (profundidad igual a la distancia entre la solera del marco y la superficie en ese punto)
- Área superficial del área estancada cuando se produce un fenómeno de inundación. Es un parámetro opcional de entrada y se considera como nulo al estimar que todo el flujo se distribuye por las conducciones tributarias a tal nudo.
- Datos de aportes externos de caudal. Al analizar la situación límite, se considera como valor constante de entrada el caudal punta generado por las cuencas exteriores, por si ocurriera la circunstancia de que coincidieran los valores picos en algún momento.

4.2.2.- Nudos de vertido.

Los nudos de vertido son nudos terminales del sistema de drenaje utilizados para definir las condiciones de contorno finales aguas abajo del sistema en el caso de utilizar el modelo de flujo de la Onda Dinámica. Para otros tipos de flujo, los nudos de vertido se comportan como conexiones. Una restricción del modelo es que solo es posible conectar una línea con un nudo de vertido.



Las condiciones de contorno en los nudos de vertido pueden describirse mediante diversas formas, escogiendo en este caso el establecimiento un tipo de descarga sin ninguna condición de contorno.

Los parámetros de entrada principales son:

- La cota de fondo.
- La descripción del tipo y estado de la condición de contorno. En nuestro caso la condición es sin restricciones.
- La presencia de una válvula de compuerta para prevenir el flujo inverso desde el nudo de vertido, aunque no sería necesario fijarla ya que al no haber restricción de vertido el flujo nunca retrocederá.

4.3.-Subcuencas

Las subcuencas son unidades hidrológicas de terreno cuya topografía y elementos del sistema de drenaje conducen la escorrentía directamente hacia un punto de descarga. La división del área de estudio en subcuencas se realiza a partir del posicionamiento de los nudos que se consideren necesarios, y se asocia a ese nudo el área que va a verter caudal al mismo, siendo dichas áreas las subcuencas a analizar. La fragmentación de cada una de las cuencas consideradas será detallada en el estudio de las características de las mismas.

Las subcuencas se dividen en subáreas permeables y subáreas impermeables. La escorrentía superficial puede infiltrarse en la parte superior del terreno de las subáreas permeables, pero no a través de las subáreas impermeables. Las áreas impermeables pueden dividirse a su vez en dos subáreas: una que contiene el almacenamiento en depresión y otra que no lo contempla. El flujo de escorrentía desde un subárea de la cuenca puede fluir hacia otra



subárea o por el contrario dos subáreas pueden drenar directamente hacia la salida de la cuenca.

La infiltración de lluvia de las zonas permeables de una determinada cuenca sobre la parte superior del suelo no saturado puede describirse utilizando tres modelos diferentes:

El **modelo de infiltración de Horton**. Este método se basa en observaciones empíricas y propone que la infiltración decrece exponencialmente desde un valor inicial máximo hasta un cierto valor mínimo a lo largo del evento de lluvia. Los parámetros de entrada necesarios para este modelo son los valores de infiltración máxima y mínima, el coeficiente de decaimiento que describe lo rápido que se produce la disminución de la infiltración a lo largo del tiempo, y el tiempo necesario para saturar completamente un suelo que inicialmente estaba completamente seco.

El **modelo de infiltración de Green-Ampt**. Para modelar el fenómeno de la infiltración este método asume la existencia de un frente húmedo brusco en el suelo que separa el suelo con un determinado contenido inicial de humedad del suelo completamente saturado de la parte superior. Los parámetros necesarios son el valor del déficit inicial de humedad del suelo, la conductividad hidráulica del suelo y la altura de succión en el frente húmedo.

El **modelo de infiltración basado en el Número de Curva del SCS**. Se asume así que la capacidad total de infiltración del suelo puede encontrarse en una tabla de números de Curva tabulados. Durante un evento de lluvia esta capacidad se representa como una función de la lluvia acumulada y de la capacidad de infiltración restante. Los parámetros de entrada para este método son el número de curva, la conductividad hidráulica del suelo (utilizada para estimar un tiempo de separación mínimo entre los distintos eventos de lluvia) y el tiempo que tarda el suelo en saturarse completamente cuando inicialmente era un suelo completamente seco.

En este caso, se ha elegido como método de infiltración el basado en número de curva del SCS.



El resto de los parámetros principales de entrada de una cuenca son:

- El área de cada sub-cuenca. Se determina a partir de la cartografía existente.



Figura 3. Discretización en subcuencas para la subcuenca norte.

- El pluviómetro asignado. Sólo se considera la existencia de uno con las características anteriormente descritas
- El nudo o la cuenca donde descarga la cuenca representada. La descarga de cada cuenca va asociada al nudo al que vierte.
- El porcentaje de impermeabilidad. Se calcula como la proporción del terreno de cada sub-cuenca que no presenta zonas donde no puede haber infiltración, es decir, todo lo que no son los parques, zonas verdes, y terrenos no asfaltados ni pavimentados.
- La pendiente de la cuenca. Se determina a partir de una valoración de la pendiente media de todas las cuencas, y se fija para todos los casos en 0.5 %. La estimación de este valor se realiza en base a un análisis de todas las cuencas En el Anexo 4



cálculo se tuvo en cuenta no sólo la pendiente de la calle principal que atraviesa cada subcuenca, sino también las calles laterales incluidas en la misma.

- La anchura característica del flujo en superficie. Se hizo un estudio similar al anterior y se fijó en 150 metros. Para dicho estudio se compara en cada una de las sub-cuencas el área de la misma con la longitud que existe desde el punto más alejado y el punto final de vertido.
- Valor del coeficiente de Manning n para el flujo superficial tanto para áreas permeables como para áreas impermeables. Los valores utilizados son 0.04 para áreas permeables y 0.015 para impermeables.
- El almacenamiento en depresión tanto para áreas permeables como áreas impermeables. Se fijan los valores de 2 mm en áreas impermeables y 4 mm en áreas permeables
- El porcentaje de suelo impermeable carente de almacenamiento en depresión. Al presentar las zonas impermeables la tipología de calles con pendiente, es difícil la existencia de zonas de almacenamiento, por lo que se ha dejado un 10 % del área impermeable con capacidad de almacenamiento para esos casos puntuales.

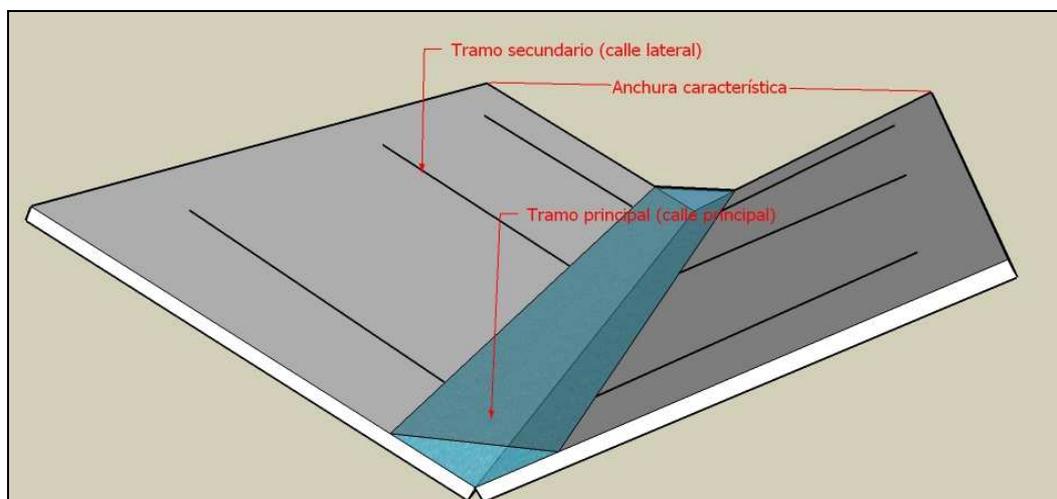


Figura 4. Representación del modelo de cuenca utilizado por SWMM para el cálculo de las subcuencas.



- Rutina para el cómputo de flujo dentro de la sub-cuenca. Se ha considerado que todo el flujo generado tanto en las áreas impermeables como permeables tiene como destino el punto de vertido, no considerándose por tanto flujo desde zonas permeables a impermeables o viceversa.
- Parámetros del modelo de infiltración (modelo del SCS). El número de curva se ha fijado en 80, con una conductividad hidráulica igual a 0.15 mm/hr y un tiempo de secado igual a 7 días.
- Se han despreciado las posibles conexiones con las capas freáticas inferiores y los posibles aportes por fusión de nieve.

4.4.- Conexiones entre nudos.

Los conductos son tuberías o canales por los que se desplaza el agua desde un nudo a otro del sistema de transporte. Es posible seleccionar la sección transversal las distintas variedades de geometrías abiertas y cerradas definidas en el programa. Asimismo el programa permite también definir áreas de sección transversal irregular permitiendo representar con ello la sección de una calle que será utilizada para el flujo superficial. SWMM emplea la ecuación de Manning para establecer la relación entre el caudal que circula por el conducto (Q), la sección del mismo (A), su radio hidráulico (Rh) y la pendiente (S) tanto para canales abiertos como para conductos cerrados parcialmente llenos.

En el caso de emplear el modelo de la onda dinámica, la pendiente (s) se interpreta como la pendiente hidráulica del flujo (es decir, la pérdida por unidad de longitud). Los principales parámetros de entrada para las conducciones son:

- Nombres de los nudos de entrada y salida.



- Alturas del conducto respecto de la cota de fondo de los nudos inicial y final. Consideramos que el vertido se refiere a la misma cota que a la que se sitúan los nudos
- Longitud del conducto. Medida a través de la cartografía existente.
- Coeficiente de Manning. Será diferente en función de si la sección transversal utilizada es un marco o canal (valor constante), o una calle (distinto coeficiente en función de si es la calzada o la acera, debido a los obstáculos existentes).
- Geometría de la sección transversal del conducto. Varía según la tipología de la conexión: puede ser tipo calle o tipo marco
- Coeficiente de pérdidas tanto para la entrada como para la salida del conducto. No se consideran pérdidas localizadas para no limitar el reparto de caudal en los nudos

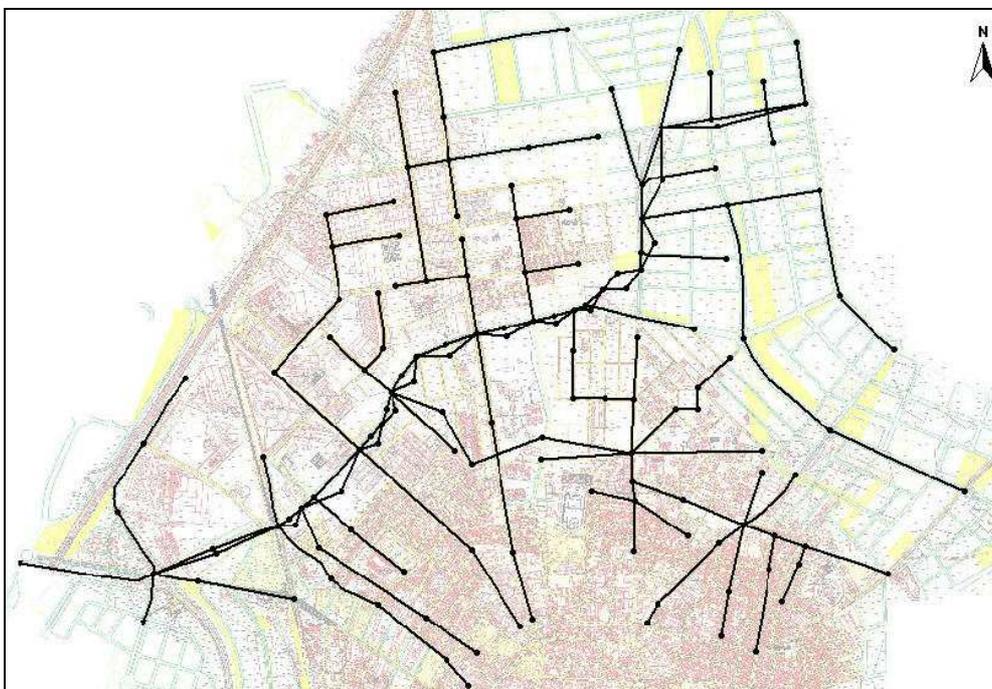


Figura 5. Discretización en nodos y conexiones para la subcuenca norte.



4.4.1.- Conexión tipo calle.

Para la caracterización del flujo superficial, se supone que la sección de los conductos debe ser la típica de una calle. La geometría a disponer se obtiene de análisis de los anchos existentes, a los cuales se les ha restado por término medio 1 metro si el anchura máxima es inferior a 10 metros y 1.5 metros si la anchura es superior. Los anchos elegidos finalmente han sido:

- 7 metros (ancho real 8 metros)
- 9 metros (ancho real 10 metros)
- 12.5 metros (ancho real 14 metros)
- 14.5 metros (ancho real 16 metros)
- 18.5 metros (ancho real 20 metros)
- 20.5 metros (ancho real 22 metros)

En la calzada sea considerado una pendiente lateral igual al 2 %. La extensión de la acera a disponer varía en función del ancho total, tomando valores entre 1.5 metros y 3 metros.

Los coeficientes de rozamientos fijados han sido 0.016 para la calzada y 0.030 para las aceras, para tener en cuenta las posibles irregularidades superficiales.

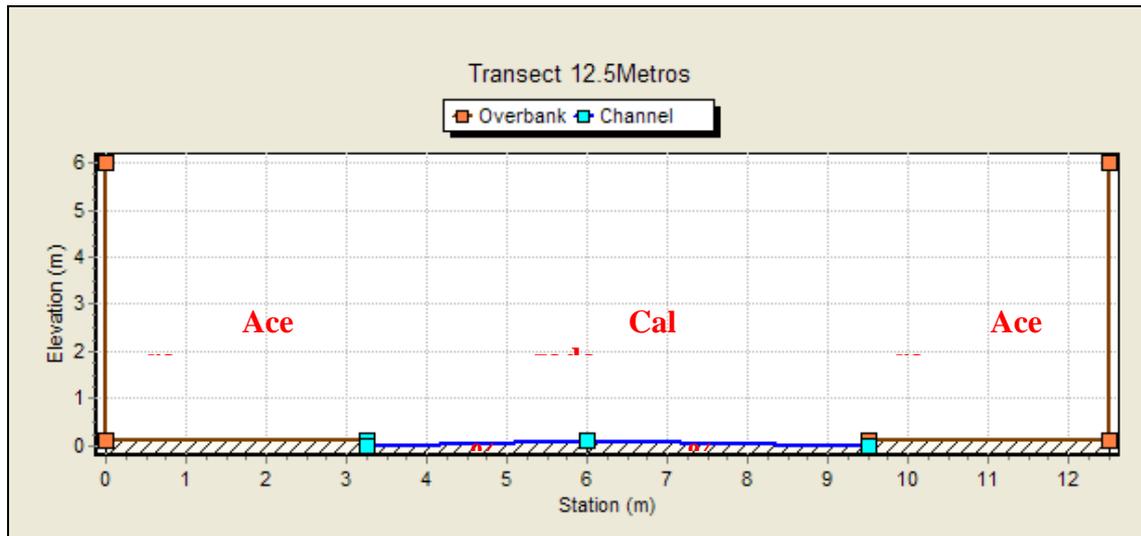


Figura 6. Sección tipo de calle con igual a 12.5 metros.

4.4.2.- Conexión tipo marco.

En la zona norte se supone la implantación de unos marcos para canalizar los excesos de escorrentía, así como para dar salida a una zona endorreica existente. El dimensionamiento se realiza en función del caudal máximo en cada ramal al que pertenece, con un coeficiente de rozamiento igual 0.015. Los trazados seguidos son el de un arroyo existente (marco principal), y de la búsqueda de facilidad de conexión entre el marco anterior y una zona endorreica (marco secundario).

Las secciones utilizadas han sido tipo rectangular de dimensiones variables entre 2 x 2 metros hasta 2.5 x 5.5 metros para el marco principal y 2 x 2 en el marco secundario. Se fijó como calado máximo 2 metros debido a que la poca pendiente existente limitaría mucho la conexión aguas abajo.



Figura 7. Trazado seguido por los marcos utilizados.

5- Criterios de peligrosidad del flujo en calles en función del calado y la velocidad.

5.1.- Caracterización de la peligrosidad en calles.

La principal función del sistema de drenaje de una ciudad es proporcionar la seguridad suficiente como para no interrumpir las actividades ciudades en sucesos de lluvia. Debido a que las calles son el medio inicial por el que discurre la escorrentía antes de incorporarse a la red, es muy importante conocer dicho movimiento superficial. El problema se ocasiona en sucesos de gran magnitud en los cuales las aceras y calzadas deben cumplir las funciones de transporte, complementando la capacidad de la red de evacuación existente, con el consiguiente riesgo para los usuarios de las mismas ya que éstas no se encuentran diseñadas con tales fines. De forma conjunta, los distintos inmuebles situados en las plantas bajas de las edificaciones se verán afectados por inundaciones.

Para el estudio del riesgo asociado al movimiento en las calles, es necesario analizar tanto los niveles alcanzados en las mismas como las velocidades máximas registradas. Con el fin de

Anexo 4



estimar estos valores, es necesaria la modelización del flujo en calles, realizada en el apartado anterior.

5.2.- Criterios para valorar la peligrosidad

El flujo circulante por calles y aceras debería ser tal que los parámetros hidráulicos de las mismas: calados, velocidades o combinaciones de los mismos, se mantuvieran por debajo de ciertos valores límites aconsejables. Los criterios de seguridad a evaluar son:

1.- Criterios basados en un calado máximo admisible del flujo:

- Criterio de Témez (Témez, 1992)
- Criterio de Denver (Wright-McLaughlin, 1969)
- Criterio de Mendoza (Nanía, 1999)

2.- Criterios basados una velocidad máxima admisible del flujo:

- Criterio de Témez (Témez, 1992)

3.- Criterios basados en la consideración conjunta de los calados y velocidades del flujo.

- Criterio de Abt, pérdida de estabilidad (1989)
- Criterio de Témez (1992)
- Criterio de Estabilidad al Deslizamiento (Nanía, 1999)
- Criterio de Estabilidad al Vuelco (SIHH, UPC, 2001).

5.2.1.- Criterios basados en un calado máximo admisible del flujo

Para la definición del calado máximo permitido o admisible se valoran los daños materiales ocasionados por la escorrentía en viviendas y establecimientos situados al nivel de la calle, y se fija su valor no permitiendo afecciones a los mismos. Este parámetro es un valor muy utilizado para la cuantificación del grado de afección de las inundaciones.

Criterio de Témez (Témez, 1992): El límite de calados propuesto por Témez, de 1 metro, podría resultar adecuado en su caso para el análisis de vías de intenso desagüe (calles

Anexo 4



principales) y para evaluar el riesgo de pérdida de vidas, pero este calado límite parece ser excesivo en zonas densamente pobladas, en las que un calado de esa magnitud, sin tener en cuenta la velocidad, ocasionaría posiblemente no pérdida de vidas pero sí cuantiosos daños materiales. También se propone 0.5 metros como indicador de riesgo moderado.

Criterio de Denver (Wright-McLaughlin,1969): en el Manual de Drenaje de Denver, Colorado, se establece como límite máximo aquel que no produce inundaciones en la planta baja de edificios residenciales, públicos, comerciales e industriales y después de analizar las afecciones se fijan como máximo 45 cms sobre el nivel mínimo de la calle (cota de la calzada). Para las calles de mayor importancia, la restricción es aun mayor ya que se considera que por ellas circularán los servicios de emergencia en casos críticos y deberían estar lo menos limitadas posible.

Criterio de Mendoza (Nanía, 1999): En la ciudad de Mendoza (Argentina), dadas las características de la urbanización y siguiendo el criterio de Denver, el calado máximo admisible en la calle que no produciría la entrada del agua en edificios públicos o privados se considera de 30 cms. Este criterio ha sido utilizado como parámetro para analizar la peligrosidad del flujo en las calles de esa ciudad (Nanía, 1999). El bajo valor de este criterio está justificado en base a la tipología de las calles de esta ciudad, en la que los accesos se sitúan al mismo nivel que la acera, estando éstas solo 10 centímetros por encima de la calzada. Lo que se busca es la minimización de las pérdidas materiales en los locales afectados.

5.2.2.- Criterios basados en una velocidad máxima admisible del flujo

Criterio de Témez (Témez, 1992): Se establece como velocidad límite para afecciones graves 1 m/s, y 0.5 m/s para moderadas. Es el único criterio que se ha encontrado que limita en algún momento la velocidad con independencia del calado.



5.2.3.- Criterios basados en la consideración conjunta de los calados y velocidades del flujo

Criterio de Abt, pérdida de estabilidad (1989): a partir del estudio de calados entre 0.49 y 1.2 metros, y velocidades entre 0.36 y 3 m/s, Abt et al. hallaron que las personas perdían la estabilidad para valores del producto de velocidad por calado de 0.7 a 2.12 m²/s, dependiendo de la altura y peso de cada individuo. Se tomó como criterio 0.5 m²/s de valor límite con el fin proporcionar unos márgenes de seguridad variable de 1.4 a 4.2.

Criterio de Témez (Témez, 1992): Basándose en las investigaciones realizadas por Abt et al., plantea la definición de zonas de inundación peligrosa o grave, definida como aquellas donde existe un serio riesgo de pérdida de vidas humanas o graves daños personales. De forma similar, se determinan las zonas de inundación moderada como los tramos donde se puede ver comprometida la estabilidad de las personas. Las condiciones a cumplir en ambos casos se pueden observar en la gráfica siguiente:

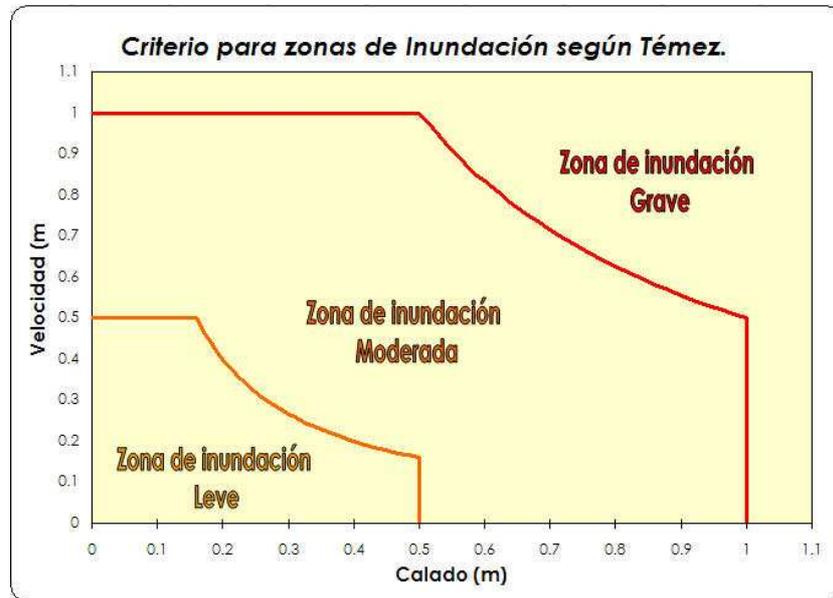


Figura 8. Gráfica de los criterios de zonas de inundación según Témez.

Criterio de Estabilidad al Deslizamiento (Nanía, 1999): este criterio se basa en la fuerza de arrastre que ejerce el flujo de agua sobre una persona. Cuando es necesario cruzar una calle en la cual el flujo posee una velocidad y un calado determinados, se tiene la incertidumbre de si



el agua podrá ser capaz de arrastrarnos o no. Para establecer dicho criterio, se plantea que la fuerza que ejerce el agua sobre una persona sea tal que no provoque su deslizamiento y/o caída.

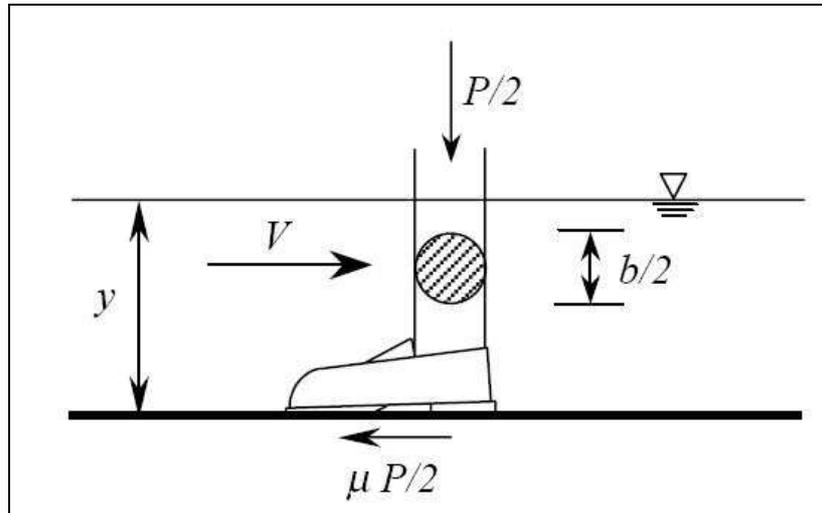


Figura 9. Fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, en el caso de estar sometida a la acción de la escorrentía. Fuente: Nanía (1999), “Metodología numérico-experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles”.

La fuerza de arrastre se evalúa como:

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (5)$$

C_d : es el coeficiente de arrastre, que depende de la forma de la superficie contra la cual choca el fluido

ρ : la densidad del fluido.

A : la proyección frontal del área en donde actúa la fuerza del agua que es igual a $y \cdot b$, el calado por el ancho de la persona, en este caso de las piernas.

v : la velocidad del fluido.

Por otro lado, suponiendo que la persona en cuestión pueda ser capaz de mantenerse en pie, la fuerza que debe equilibrarla es la de fricción del calzado sobre el suelo y que sería igual a:

$$F = \mu \cdot P \quad (6)$$

μ : coeficiente de fricción, que depende de los materiales del calzado y del suelo y del estado de ambos.

P : el peso de la persona



No se tiene en cuenta el empuje vertical hacia arriba generado por el volumen líquido desalojado por la parte sumergida del cuerpo.

Considerando que el coeficiente de arrastre para un cilindro de altura infinita es igual a 1,2 (Streeter y Wylie, 1979), la densidad del agua es de 1000 kg/m³, el ancho de las piernas $b = 0.1 \text{ m} \times 2 = 0.2 \text{ m}$, el peso de la persona de 60 kg y el coeficiente de fricción entre caucho y hormigón húmedos es igual a 0.50 (Gieck, 1981), con un coeficiente de seguridad de 2, para incluir el efecto del empuje y la posible variación de los parámetros considerados, la condición de estabilidad vendría dada por la siguiente desigualdad:

$$v^2 \cdot y \leq \frac{2 \cdot \mu \cdot P}{C_d \cdot \rho \cdot b \cdot 2} = 1.23 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} \quad (7)$$

El coeficiente de seguridad puede interpretarse aplicado al coeficiente de fricción, dada su incertidumbre por los distintos materiales y estados en los que pueden estar tanto el suelo como el calzado, o también al peso o ancho del peatón, ya que puede darse el caso de que el peso sea menor o el ancho de sus piernas mayor o que exista una combinación desfavorable de los tres factores. La versatilidad de este criterio es que permite adaptar el límite si se decide cambiar la tipología de persona, o probar la fricción de otros materiales.

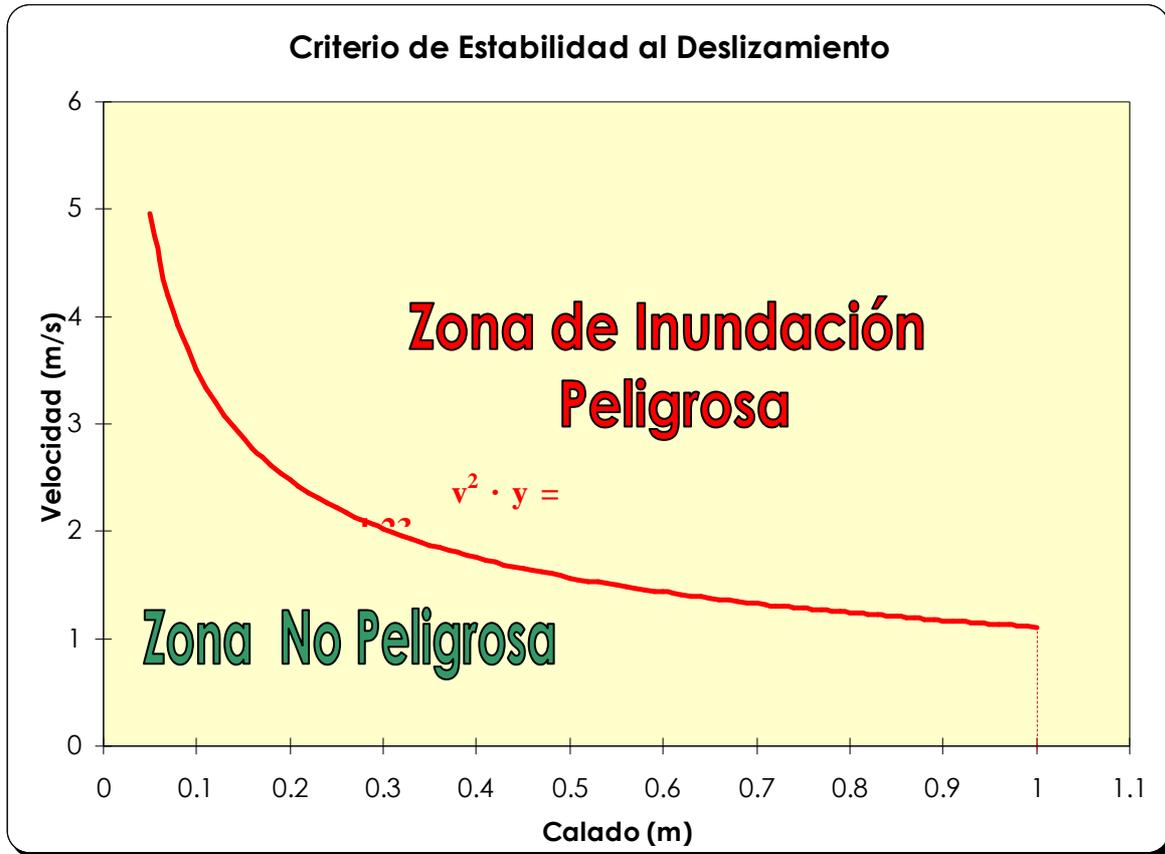


Figura 10. Criterio propuesto para la delimitación de la zona de inundación peligrosa considerando la estabilidad al deslizamiento.

Criterio de Estabilidad al Vuelco (SIHH, UPC, 2001): el análisis de la estabilidad al vuelco de una persona se realizó en la Sección de Ingeniería Hidráulica e Hidrológica de la Universidad Politécnica de Barcelona. Considerando al peatón como un sólido rígido, el momento volcador sería el provocado por la fuerza dinámica del flujo sobre el peatón, definida anteriormente como F_1 , aplicada a una altura de la mitad del calado.

$$M_v = F_1 \cdot \frac{y}{2} = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot \frac{y}{2} \quad (8)$$

El momento estabilizador estará formado por el peso de la persona aplicado en su centro de gravedad, por lo que tendrá un brazo de palanca igual a la mitad del diámetro de las piernas, es decir, $b/4$.

$$M_e = P \cdot \frac{b}{4} \quad (9)$$



Igualando ambas expresiones, y considerando un factor de seguridad de 2, se obtiene:

$$v^2 \cdot y^2 \geq \frac{P \cdot \frac{b}{4}}{C_d \cdot \rho \cdot b \cdot 2} = 0.25 \rightarrow v \cdot y = 0.5 \frac{m^2}{s} \quad (10)$$

Como se observa, el valor obtenido es similar al propuesto por Abt y Témez.

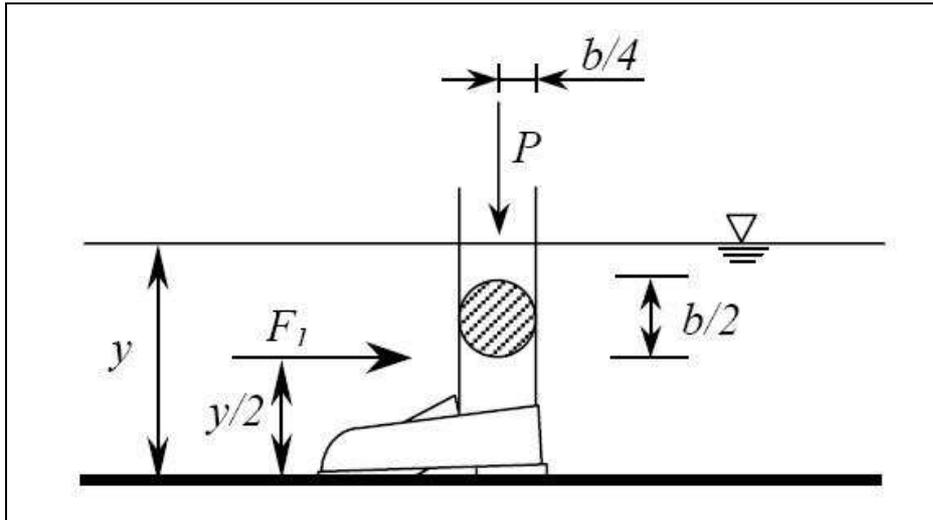


Figura 11. Esquema de las fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, para evaluar su estabilidad al vuelco producido por la acción de la escorrentía. Fuente: SIHH, UPC.

5.3.- Elección de criterios.

Una vez definidos los posibles criterios a comprobar, se realiza la selección de cuales serán aplicados en el estudio del riesgo de flujo en calles, los cuales se observan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Resumen de los criterios analizados y criterios elegidos (en azul)

Criterio	y (m)	v(m/s)	v · y (m ² /s)	v ² · y (m ³ /s ²)
Témez-Abt	1	1	0.5	
	0.5	0.5	0.08	
Denver	0.45			
Mendoza	0.3			
Estabilidad al Deslizamiento				1.23
Estabilidad al Vuelco			0.5	



5.4.- Desarrollo de mapas de peligrosidad.

El resultado final de la modelación a realizar, es la obtención de mapas de peligrosidad que representen los riesgos existentes para los periodos de retorno analizados (25 y 500 años). Para la síntesis de criterios, se ha decidido agruparlos para cada zona de la siguiente forma:

1.- Riesgo Elevado: $y > 1$ metro; $o v > 1$ m/s; $o y \cdot v > 0.5$ m²/s

Color: Rojo

2.- Riesgo Moderado: $y > 0.5$ metros; $o v > 0.5$ m/s; $o y \cdot v > 0.08$ m²/s

Color: Naranja

3.- Riesgo Leve: $y < 0.5$ metros; $y v < 0.5$ m/s; $y y \cdot v < 0.08$ m²/s

Color: Verde

4.- Riesgo Elevado y Deslizamiento: $y > 1$ metro; $o v > 1$ m/s; $o y \cdot v > 0.5$ m²/s + $y \cdot v^2 > 1.23$

Color: Morado

5.- Riesgo Moderado y Deslizamiento: $y > 0.5$ metros; $o v > 0.5$ m/s; $o y \cdot v > 0.08$ m²/s + $y \cdot v^2 > 1.23$

Color: Azul