

Cálculo aproximado de la altura de inundación

Después de calcular el caudal de diseño para un periodo de retorno especificado, la última fase del trabajo consiste en calcular las áreas que resultarían inundadas con dicho caudal. Para un caudal determinado, esto dependerá fundamentalmente de la geometría del cauce.

La herramienta adecuada para resolver este problema es el programa HEC-RAS¹, pero con frecuencia es conveniente realizar un cálculo aproximado, que se desarrolla así:

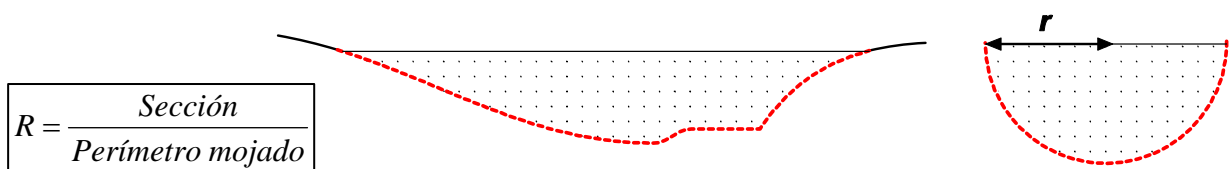
$$\text{Caudal} \rightarrow (\text{Fórmula}) \rightarrow \text{Velocidad} \rightarrow \frac{\text{Caudal}}{\text{Velocidad}} = \text{Sección} \rightarrow \frac{\text{Sección}}{\text{Ancho}} = \text{Altura}$$

Finalmente, a partir de la **altura** trataremos de evaluar el área inundable.

El paso más complejo es el primero: calcular la velocidad a partir del caudal. Depende de la **geometría del cauce** o canal, del **tipo de superficie** del mismo y de la **pendiente**. La geometría de la sección queda reflejada en el *radio hidráulico*.

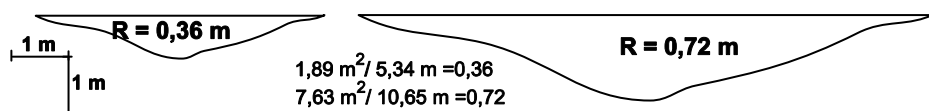
Radio Hidráulico

El radio hidráulico (R) es la relación entre la **sección** y el **perímetro mojado** (en los dibujos siguientes el perímetro mojado aparece en trazos rojos).



En un cauce natural (izquierda) presentará diversos valores, mientras que en un canal semicircular (dibujo derecha), el cálculo de sección/perímetro mojado se puede hacer fácilmente $((\pi r^2/2)/\pi r)$, obteniendo que el radio hidráulico (R) **no** es el radio del canal r , sino $r/2$.

El radio hidráulico depende de la **forma** del canal, pero principalmente, **del tamaño**. Si aumentamos al doble el dibujo de una sección, el radio hidráulico aumenta en la misma proporción (la sección aumentaría x4, el perímetro aumentaría x2, así que el cociente sección/perímetro aumentaría x2)



Para canales rectangulares de poca profundidad (anchura/profundidad >20) el radio hidráulico es aproximadamente la profundidad media del cauce o canal.

Cálculo de la velocidad en un canal: Fórmulas de Chézy y Manning

La **fórmula de Chézy** calcula la velocidad del agua en una sección de un cauce o canal. Fue desarrollada por el ingeniero francés Antoine de Chézy, y establece que:

$$v = C \sqrt{R * S} \quad (1)$$

donde:

v = velocidad media del agua (m/s)

¹ Programa gratuito, que puede descargarse aquí: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

R = radio hidráulico (m)
 S = pendiente de la línea de agua (m/m)
 C = coeficiente de Chézy

En la fórmula de Chezy aparece un **coeficiente C** que se ha calculado con diversas ecuaciones. Según qué fórmula se utilice para la evaluación de C , así se denomina la expresión de Chezy. La más usual es la **fórmula de Manning**. En ella el coeficiente C se calcula así:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (2)$$

donde:

- C = coeficiente de Manning para aplicar en la fórmula de Chézy
- n = parámetro de rugosidad de Manning
- R = radio hidráulico, en m

Sustituyendo el valor de la C según **Manning** (2) en la fórmula original de **Chezy** (1), resulta la denominada **fórmula de Manning**²:

$$v(m/seg) = \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{S} \quad (3)$$

n = parámetro de rugosidad de Manning
 R = radio hidráulico
 S = pendiente (m/m)

El **parámetro de rugosidad de Manning “ n ”** está tabulado, reproducimos al final de este documento la tabla que se encuentra en: <http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s06.htm>

Evaluación de la altura

Para evaluar la altura que alcanzará el agua, utilizamos la expresión:

$$Caudal = Sección * velocidad$$

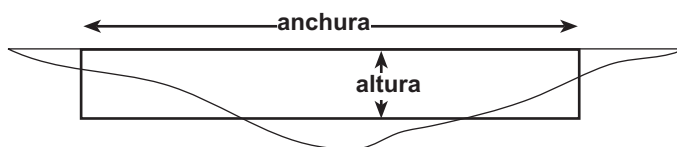
en la que aplicando la fórmula (3) de Manning, resulta:

$$Q = Sección * \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{S} \quad (4)$$

Despejando la sección:

$$Sección = \frac{Q}{\frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{S}} \quad (5)$$

Finalmente, conociendo la sección, debemos **evaluar la altura del agua** (=profundidad), dependiendo de la forma del cauce. A veces se supone la sección rectangular, calculando la altura del agua a partir de:



$$Sección = anchura media \cdot altura media \quad (6)$$

² En realidad ésta es la fórmula de Chézy con el coeficiente de Manning. En algunos textos no se denomina “fórmula de Manning” a la expresión (3), sino a la fórmula (2) que expresa el coeficiente C .

Ejemplo

Se ha calculado que el caudal de un cauce con un periodo de retorno de 100 años es de 12,8 m³/seg, y se desea evaluar el área inundable.

Datos:

Radio hidráulico : 0,8

Coefficiente de rugosidad de Manning: 0,0225

Pendiente: 0,003

Anchura aproximada en ese tramo: 7 metros

Solución:

Aplicando la fórmula (5):

$$Sección = \frac{12,8}{\frac{1}{0,0225} \sqrt{0,8^{4/3} * 0,003}} = 6,10 \text{ m}^2$$

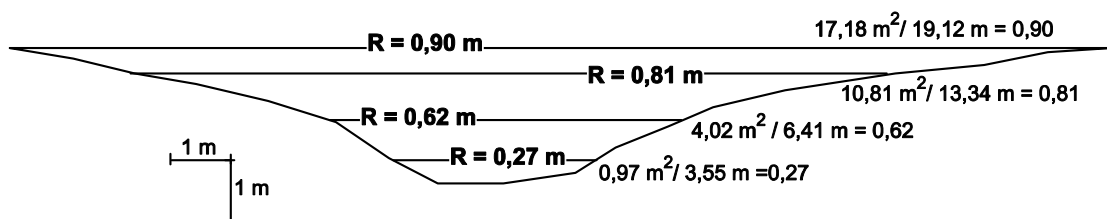
Finalmente, aplicando la relación (6), evaluamos la altura que alcanzará la lámina de agua:

$$Altura = 6,10 / 7 = \mathbf{0,87 \text{ metros}}$$

El problema de este sencillo proceso es que **la solución obtenida hace variar los datos del problema**: El radio hidráulico varía a medida que el nivel sube.

Si en el ejemplo anterior, habíamos evaluado el radio hidráulico (dato del problema: R=0,8) y a partir de este dato hemos calculado una sección de 6,1 m², habría que reconsiderar el radio hidráulico, repetir el cálculo con el nuevo R, hasta que la sección proporcionada por la expresión (5) sea similar a la sección que tuvimos en cuenta al evaluar el radio hidráulico

Otro ejemplo: En un mismo perfil, a medida que sube el nivel, aumenta el radio hidráulico, ya que a un cierto aumento del *perímetro mojado* corresponde un aumento mayor de la *sección*:



Si al comenzar el cálculo hubiéramos supuesto un radio hidráulico (R) de 0,6 y al finalizar el proceso obtenemos que la altura del agua corresponde al nivel más elevado del dibujo (R= 0,90), habría que rehacer el cálculo con este nuevo valor de R, lo cual nos proporcionaría un nuevo y diferente resultado para la altura de la lámina de agua (!)

Valores del coeficiente n de rugosidad de Manning

<http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s06.htm>

a) Canales sin vegetación	
Sección transversal uniforme, alineación regular sin guijarros ni vegetación, en suelos sedimentarios finos	0,016
Sección transversal uniforme, alineación regular, sin guijarros ni vegetación, con suelos de arcilla duros u horizontes endurecidos	0,018
Sección transversal uniforme, alineación regular, con pocos guijarros, escasa vegetación, en tierra franca arcillosa	0,020
Pequeñas variaciones en la sección transversal, alineación bastante regular, pocas piedras, hierba fina en las orillas, en suelos arenosos y arcillosos, y también en canales recién limpiados y rastrillados	0,0225
Alineación irregular, con ondulaciones en el fondo, en suelo de grava o esquistos arcillosos, con orillas irregulares o vegetación	0,025
Sección transversal y alineación irregulares, rocas dispersas y grava suelta en el fondo, o con considerable vegetación en los márgenes inclinados, o en un material de grava de hasta 150 mm de diámetro	0,030
Canales irregulares erosionados, o canales abiertos en la roca	0,030
(b) Canales con vegetación	
Gramíneas cortas (50-150 mm)	0,030-0,060
Gramíneas medias (150-250 mm)	0,030-0,085
Gramíneas largas (250-600 mm)	0,040-0,150
(c) Canales de corriente natural	
Limpios y rectos	0,025-0,030
Sinuosos, con embalses y bajos	0,033-0,040
Con muchas hierbas altas, sinuosos	0,075-0,150