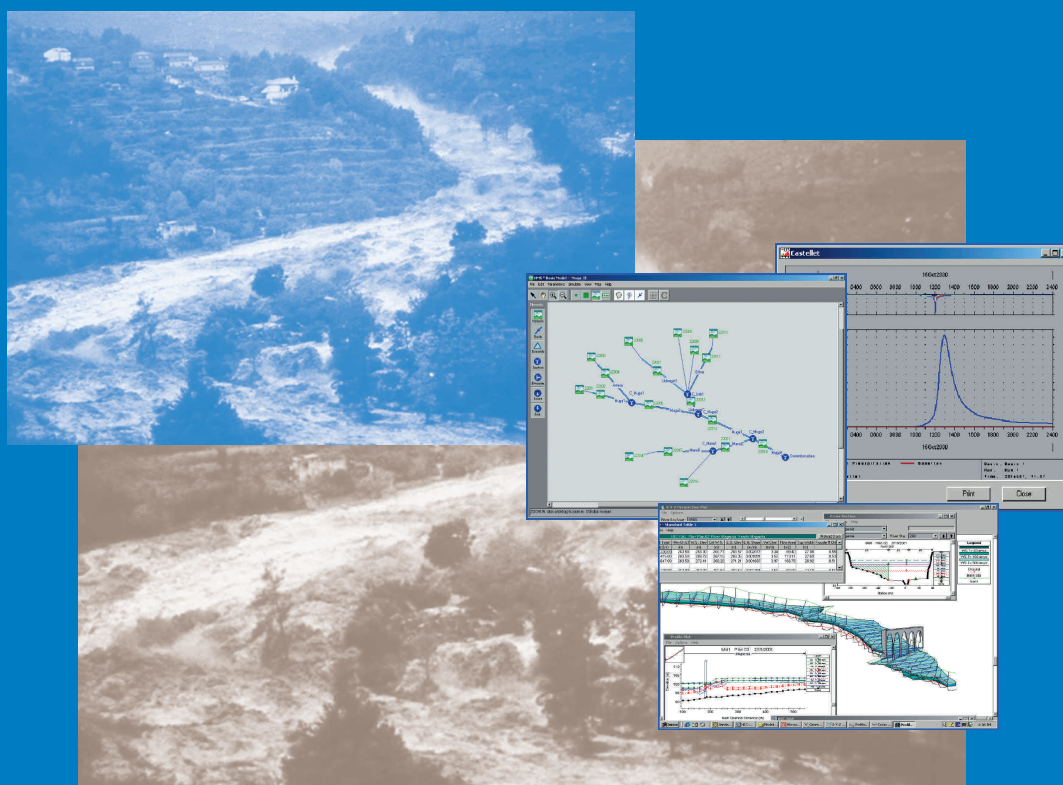


GUIA TÈCNICA

Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local





**Agència Catalana
de l'Aigua**

GUIA TÈCNICA

Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local

Març 2003



Generalitat de Catalunya
Departament de Medi Ambient

Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local :
guia tècnica. - (Documents tècnics ; 1)
I. Montalbán i Comas, Frederic II. Agència Catalana de l'Aigua III. Col·lecció:
Documents tècnics ; 1
1. Inundacions - Control 2. Conques hidrogràfiques - Models matemàtics
3. Cabal (Hidrologia) - Mesurament - Models matemàtics 4. Models hidrològics
556.166.06

© Generalitat de Catalunya, 2003
Departament de Medi Ambient
Agència Catalana de l'Aigua

<http://www.gencat.net/aca>

Març de 2003

Tiratge: 500 exemplars

Disseny i producció gràfica: Fotogravats Barcino

DL: B-11770-2003

Aquesta publicació ha estat realitzada amb paper ecològic 100% (lliure de clor)
estucat mat de 135 g i les cobertes en paper ecològic (lliure de clor) estucat mat de 250 g.

RECONEIXEMENTS

Aquesta guia ha estat realitzada per l'equip tècnic de l'Agència Catalana de l'Aigua.

Equip de redacció

Frederic Montalbán Comas
Andreu Manzano Rojas
Lorenzo Correa Lloreda
Jordi Cabot Ple
Lluís X. Godé Lanao

A més, s'ha rebut l'assessorament dels experts següents:

Josep Dolz Ripollés
Manuel Gómez Valentín
Juan Bautista Marco Segura
Sergio Moyano García
José Ramón Témez Peláez

Notació

<i>A</i>	àrea mullada per l'aigua en la secció transversal considerada, expressada en m ² .	<i>n</i>	nombre de Manning. A l'efecte pràctic es considera adimensional, encara que en realitat no ho és (Chow, 1982).
<i>B</i>	mirall d'aigua, que és l'amplada de la superfície de l'aigua en la secció transversal considerada, expressat en m.	<i>n_s</i>	nombre de Manning equivalent o de rugositat "de gra"; es pot considerar adimensional.
<i>c</i>	celeritat de l'ona de gravetat, expressada en m/s.	<i>NC</i>	nombre de corba que correspon al llinar d'escorrentiu <i>P₀</i> , sense aplicar el factor regional <i>r</i> . És adimensional.
<i>C</i>	coeficient d'escorrentiu; és adimensional.	<i>NC'</i>	nombre de corba que correspon al llinar d'escorrentiu <i>P'₀</i> . És adimensional.
<i>D</i>	durada de la pluja neta <i>E</i> , és a dir, temps en què ha caigut aquest volum d'aigua. La durada s'expressa en hores.	<i>O_t</i>	cabal que surt del tram de riu considerat en l'instant <i>t</i> , expressat en m ³ /s.
<i>D₅₀, D₉₀</i>	diàmetres dels sediments "que passen" en un 50 i 90 % respectivament segons la seva corba granulomètrica, expressats en mm.	<i>O_{t-1}</i>	cabal que surt del tram de riu considerat en l'instant <i>t-1</i> , expressat en m ³ /s.
<i>E</i>	volum de precipitació neta, expressat en mm.	<i>P</i>	volum de precipitació, expressat en mm.
<i>F</i>	forces actuant sobre un volum de control de longitud <i>L</i> , expressades en N.	<i>P_d</i>	volum de precipitació diària pel període de retorn considerat obtingut del mapa d'isomàximes de precipitació corresponent, expressat en mm.
<i>F_f</i>	forces de fricció en un volum de control de longitud <i>L</i> , expressades en N.	<i>P'_d</i>	volum de precipitació diària corregit amb el coeficient d'uniformitat <i>K_A</i> , expressat en mm.
<i>F_r</i>	nombre de Froude; és adimensional.	<i>P₀</i>	llindar d'escorrentiu sense aplicar el factor regional <i>r</i> , expressat en mm.
<i>g</i>	acceleració de la gravetat, expressada en m/s ² .	<i>P'₀</i>	llindar d'escorrentiu, expressat en mm.
<i>H</i>	altura d'energia, expressada en m.	<i>P_n</i>	empenta hidrostàtica del flux en una secció, expressada en N.
<i>h_f</i>	pèrdua d'energia, expressada en m.	<i>P_m</i>	perímetre mullat de la llera en la secció transversal considerada, expressat en m.
<i>I</i>	intensitat de precipitació <i>P</i> , expressada en mm/h.	<i>PQ</i>	punt quilomètric.
<i>I₁</i>	intensitat horària, és a dir, intensitat de precipitació per a una durada efectiva de la pluja d'1 hora, expressada en mm/h.	<i>Q</i>	cabal, expressat en m ³ /s.
<i>I_d</i>	intensitat mitjana diària, és a dir, la intensitat de precipitació per a una durada efectiva de la pluja de 24 hores, expressada en mm/h.	<i>q_i</i>	cabal d'entrada al volum de control que no prové del flux principal del riu, és a dir, que no està englobat en <i>Q</i> . S'expressa en m ³ /s per m de longitud del riu.
<i>I_t</i>	cabal que entra en el tram de riu considerat en l'instant <i>t</i> , expressat en m ³ /s.	<i>Q_P</i>	cabal punta, expressat en m ³ /s.
<i>I_{t-1}</i>	cabal que entra en el tram de riu considerat en l'instant <i>t-1</i> , expressat en m ³ /s.	<i>Q_T</i>	cabal màxim anual corresponent al període de retorn <i>T</i> en la sèrie històrica de cabals màxims anuals, expressat en m ³ /s.
<i>j</i>	pendent mitjà del curs principal expressat en tant per u, m/m.	<i>r</i>	factor regional de correcció de <i>P₀</i> , és adimensional
<i>K</i>	coeficient d'uniformitat del Mètode racional; és adimensional.	<i>R</i>	radi hidràulic, expressat en m. Es calcula mitjançant l'expressió següent:
<i>K</i>	coeficient de proporcionalitat de Muskingum, expressat en s.		$R = \frac{A}{P_m}$
<i>K_A</i>	Coeficient de simultaneïtat de precipitació, és adimensional	<i>R_e</i>	nombre de Reynolds, definit com:
<i>K_t</i>	transport (en anglès <i>conveyance</i>), expressat en m ³ /s. Es calcula mitjançant:		$R_e = \frac{v \cdot R}{\nu}$
	$K_t = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3}$	<i>S₀</i>	pendent del llit, expressat en m/m.
<i>L</i>	longitud d'un tram de riu definit per dues seccions transversals consecutives, expressada en m.	<i>S_f</i>	pendent de la línia d'energia, expressat en m/m.
<i>L</i>	longitud del curs principal, expressada en km.	<i>T</i>	període de retorn, expressat en anys.
<i>m</i>	massa d'un volum de control de longitud <i>L</i> , expressada en kg.	<i>T_b</i>	temps base, durada de l'hidrograma, expressada en h.
		<i>T_{bs}</i>	durada de l'hidrograma, expressada en s.
		<i>T_c</i>	temps de concentració expressat en h.

T_{gp}	temps de retard, expressat en h. A la literatura anglosaxona se'l sol anomenar T_{lag} .
T_p	temps que triga a arribar el cabal punta Q_p , expressat en h.
T_R	temps de recessió entre el pic de cabal i el final de l'hidrograma, expressat en h.
v	velocitat mitjana de la secció, expressada en m/s.
v_0	velocitat mitjana del flux, expressada en m/s.
v_w	velocitat de l'ona d'avinguda, expressada en m/s.
W_x	component longitudinal del pes del flux en un volum de control de longitud L , expressat en N.
X	factor de ponderació; és adimensional.
y	calat, expressat en m.
y_0	calat mitjà en el tram, expressat en m.
y_c	calat crític, expressat en m.
y_n	calat normal, expressat en m.
z	cota del llit del riu respecte de l'eix de coordenades arbitràriament establert, expressada en m.
ϵ	intensitat de pluja neta, expressada en m/s, generada per la pluja neta E .
Δt	interval de temps considerat, que és la diferència entre t i $t-1$, expressat en s.
Δx	longitud del tram, expressada en m.
ΣE	pluja neta generada per ΣP , expressada en mm.
ΣP	precipitació acumulada des del començament de la pluja fins a l'instant considerat, expressada en mm.
α	coeficient de Coriolis; és adimensional.
β	coeficient de Boussinesq; és adimensional.
γ	pes específic, expressat en N/m^3 .
λ	coeficient de pèrdues en contracció o expansió del flux; és adimensional
μ	difusivitat hidràulica, expressada en m^2/s .
μ	grau d'urbanització de la conca, expressat en tant per u, km^2/km^2 .
ν	viscositat cinemàtica, expressada en m^2/s .
ρ	densitat, expressada en kg/m^3 .

Sumari

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. Presentació	1
1.2. Condicions d'aplicabilitat	1
1.3. Organització de la guia	2
1.4. Models de simulació numèrica	2
1.5. Treballs de camp	2
2. CONCEPTES BÀSICS D'HIDROLOGIA	5
2.1. El cicle hidrològic	5
2.2. Cabals d'avinguda	8
2.3. Sistema hidrològic. Conca	8
2.4. Càlcul d'avingudes utilitzant dades de cabals	10
2.5. Funcionament d'un sistema hidrològic	12
2.6. Temps de concentració	15
2.7. Llímit d'escorrentiu	16
2.8. Definició de la pluja de projecte	17
2.8.1. Generalitats	17
2.8.2. Càlcul de la P_d	18
2.8.3. Determinació de l'hietograma	19
2.9. Divisió d'una conca	23
2.10. Modelització de conques compostes	24
2.11. Perfil de cabals	25
3. MÈTODES DE TRANSFORMACIÓ PLUJA-ESCORRENTIU	27
3.1. Generalitats	27
3.2. Mètode racional	28
3.3. Transformació pluja-escorrentiu d'una pluja	29
3.3.1. Hidrograma unitari	29
3.3.2. Hidrogrames unitaris sintètics	30
3.3.3. Hidrograma adimensional de l'SCS	31
3.3.4. Aplicació de l'hidrograma unitari	34
3.4. Relació del mètode racional amb l'hidrograma en el punt de desguàs	36
4. INTRODUCCIÓ A LA HIDRÀULICA FLUVIAL	41
4.1. Introducció	41
4.2. Tipus de mètodes d'anàlisi de la hidràulica fluvia	41
4.3. Morfologia fluvial	42
4.4. Dimensionalitat del flux	42
4.5. Tipus de fluxos	43
4.6. Classificació dels fluxos segons l'efecte de la gravetat	43
4.7. Classificació dels fluxos segons la variació de la velocitat	47
4.8. Equació de l'energia	47

4.9. Equacions de Saint Venant	49
4.9.1. Hipòtesis considerades	49
4.9.2. Equació de continuïtat	49
4.9.3. Equació del <i>momentum</i>	50
4.9.4. Aplicació de les equacions de Saint Venant	51
4.9.5. Simplificació de les equacions de Saint Venant	51
5. MÈTODES DE PROPAGACIÓ D'AVINGUDES	53
5.1. Mètodes de propagació d'avingudes	53
5.2. Mètode de Puls	54
5.3. Mètode de Muskingum	54
5.4. Mètode de Muskingum-Cunge	56
5.5. Mètode de l'ona cinemàtica	58
5.6. Aplicabilitat de les diferents tècniques de propagació	58
5.7. Models de simulació comercials	60
6. CÀLCUL DE NIVELLS D'AIGUA	63
6.1. Règim gradualment varia	63
6.2. Recomanacions per als treballs amb models hidràulics	64
6.2.1. Introducció	64
6.2.2. Recomanacions sobre la geometria i la mateixa modelització	64
6.2.2.1. L'escala de la topografia i l'àmbit de simulació	64
6.2.2.2. Disposició de les seccions	64
6.2.2.3. Definició de les seccions	65
6.2.2.4. Coeficients de rugositat	66
6.2.2.5. Estructures hidràuliques	67
6.2.2.6. Condicions de contorn	67
6.2.2.7. Opcions i paràmetres de càlcul	68
6.2.3. Recomanacions sobre els resultats de la modelització	68
6.2.3.1. Sumari d'avisos i errors	68
6.2.3.2. Opcions de visualització i presentació de resultats	69
7. RESUM METODOLÒGIC	71
7.1. Introducció	71
7.2. Mètode racional	71
7.3. Mètode de conques compostes amb l'hidrograma de l'SCS	72
7.4. Generalitats sobre el càlcul de les zones inundables	73
7.5. Simulació hidràulica	73
REFERÈNCIES	75
ANNEX 1. Càlcul del llindar d'escorrentiu P_0	77
A1.1. Introducció	77
A1.2. Model SCS	77
A1.3. Grup del sòl	77

A1.4. Ús del sòl.....	78
A1.5. Càlcul del pendent	79
A1.6. Característiques hidrològiques	80
A1.7. Exemple d'aplicació	80
A1.8. Model digital de la conca	80

ANNEX 2. Mètode racional85

A2.1. Introducció.....	85
A2.2. Resum del mètode racional.....	85

ADDENDA.....87

Ad.1. Introducció.....	87
Ad.2. Zona fluvial (ZF).....	87
Ad.3. Sistema hídic (SH).....	87
Ad.4. Zona inundable (ZI).....	87
Ad.5. Zona d'inundació perillosa (ZIP).....	87
Ad.6. Via d'intens desguàs (VID).....	87
Ad.7. Zona d'inundació greu	89
Ad.8. Zona d'inundació moderada	89

1. Introducció

1.1 Presentació

(1) En aquesta Guia Tècnica es presenten una sèrie de tècniques i procediments per a la determinació de les zones inundables per cursos fluvials en trams de petita longitud que compleixin els condicionants indicats en l'apartat 1.2.

(2) La determinació de zones inundables en trams de riu d'àmbit local consta bàsicament de les activitats següents:

- (a) Estimació de les avingudes de projecte.
- (b) Càlcul de les zones inundades per aquestes avingudes de projecte.

(3) L'estimació de les avingudes de projecte requereix primer la identificació dels processos naturals que les generen, per quantificar-los a continuació i calcular aquestes avingudes.

El càlcul d'aquestes avingudes normalment l'ha estudiat la hidrologia, ciència que estudia l'aigua, la distribució i la circulació en superfícies terrestres, les propietats químiques i físiques i la relació amb el medi ambient, incloent els éssers vius (Chow, 1994).

En els capítols 2 i 3 es desenvoluparan aquests conceptes i s'exposaran diferents mètodes per estimar les avingudes que cal considerar en la determinació de zones inundables.

(4) Per al càlcul de les zones inundables per aquestes avingudes de projecte en un tram de petita longitud es necessita, primer, identificar el comportament fluvial del riu que es vol estudiar i, després, calcular aquestes superfícies d'inundació.

En aquesta segona fase conflueixen dues ciències, la hidrològica, ja definida, i la hidràulica fluvial, que estudia el comportament dels rius, entesos com el conjunt format per l'aigua i el mitjà que flueix.

Fins fa poc, era costum considerar únicament els rius com a masses d'aigua que circulaven per una superfície fixa i inamovible. Aquesta concepció dels rius és clarament errònia, encara que a vegades s'acabi calculant el comportament hidràulic dels rius sota aquesta hipòtesi per la dificultat, o fins i tot impossibilitat, de fer-ho d'una altra manera. Però això no és obstacle per no analitzar-ne la validesa i tenir en compte la fiabilitat dels resultats numèrics obtinguts.

(5) Encara que tradicionalment s'ha considerat implícitament una separació entre aquestes dues ciències, la hidrologia i la hidràulica fluvial, com es podrà apreciar en aquesta guia tenen uns límits difusos, per la qual cosa, darrerament, els models matemàtics formulats per al càlcul d'avingudes i la determinació de les superfícies inundades per aquestes avingudes es comencen a denominar H&H.

1.2 Condicions d'aplicabilitat

(1) Les tècniques i els procediments per a la determinació de les zones inundables per cursos fluvials que es presenten en aquesta guia són aplicables als trams de riu que compleixin els condicionants següents:

- (a) Que la conca no sigui totalment o majoritàriament urbana.
- (b) Que la superfície de la conca S no superi els 1.000 km² ni el temps de concentració T_c superi les 24 hores.
- (c) Que la longitud del tram no sigui superior a 4 km (apartat 6.2.2.1).
- (d) Que el flux discorri en làmina lliure en tota la seva longitud, a excepció d'obres de drenatge d'infraestructures que creuin la llera. Per tant, queden exclosos de l'aplicació d'aquesta guia els trams de riu que funcionin en càrrega per cobriments, soterraments, etc.
- (e) Que sigui vàlida la hipòtesi de flux unidimensional (apartat 4.4).
- (f) Que sigui vàlida la hipòtesi que el llit és fix, és a dir que els canvis que aquest llit pateixi pel pas de l'avinguda de projecte no siguin tan grans que quedin invalidats els resultats obtinguts de la consideració que el llit és fix.

Per tant, el rang d'aplicabilitat d'aquesta Guia Tècnica cobreix la major part dels estudis de zones inundables que es redacten en l'àmbit de Catalunya.

Algunes de les tècniques exposades en aquesta guia també són aplicables en altres casos, però l'aplicabilitat en aquestes situacions s'haurà d'avaluar cas per cas.

(2) En els trams de riu que hagin estat ja objecte de planificació mitjançant la corresponent Planificació de l'espai fluvial (PEF), s'hauran de considerar les zones inundables que es defineixen en aquesta planificació.

(3) La metodologia exposada en aquesta guia s'ha basat en l'experiència dels tècnics de l'Agència en l'estudi de les conques de Catalunya. Com que es tracta d'unes recomanacions, la metodologia pot ser modificada pel tècnic redactor d'un estudi de zones inundables, sempre que justifiqui detalladament els canvis introduïts, perquè puguin ser avaluats adequadament.

En darrer lloc, cal destacar que, a causa de l'enorme variabilitat que presenta el comportament dels rius, els tècnics de l'Agència tenen la capacitat per decidir, en cada cas concret, si es compleixen les condicions d'aplicabilitat d'aquestes recomanacions.

1.3 Organització de la guia

(1) Aquesta guia s'ha organitzat en set capítols i dos annexos, més un apartat per glossar la notació utilitzada i un altre per referenciar la bibliografia ressenyada.

(2) En el capítol 2 es presenten els conceptes bàsics hidrològics, amb l'objectiu que el lector entengui el procés de generació d'avingudes i les simplificacions que del mateix procés es consideren en el seu càlcul numèric.

(3) En el capítol 3 s'exposen qualitativament diferents mètodes de transformació pluja-escorrentiu i es desenvolupen detalladament i fins i tot amb exemples resolts els que es considerin més apropiats per al tipus d'estudis en què és aplicable aquesta guia.

(4) En el capítol 4 es presenta una introducció a la hidràulica fluvial, en què s'exposen els conceptes bàsics de morfologia i comportament fluvial.

(5) En el capítol 5 es descriuen qualitativament diferents mètodes de propagació d'avingudes, tant agregats com distribuïts, i es desenvolupa detalladament el de Muskingum-Cunge.

(6) En el capítol 6 es formulen una sèrie de recomanacions pràctiques per a la modelització hidràulica mitjançant el càlcul de nivells d'aigua considerant que el flux és gradualment variat.

(7) En el capítol 7 es fa un resum dels mètodes proposats en aquesta guia per a la redacció d'estudis de zones inundables d'àmbit local. Si el lector està familiaritzat amb aquest tipus d'estudis i només vol consultar aquesta guia per fer-ne una utilització ràpida, es recomana anar directament a aquest capítol.

(8) En l'annex 1 s'exposa la metodologia per calcular el llindar d'escorrentiu P_0 .

(9) En l'annex 2 es presenta un resum del mètode racional per facilitar la seva aplicació.

(10) En una addenda es facilita una còpia de les definicions de les diferents zones que componen l'espai fluvial de les lleres catalanes, aprovades pel Consell d'Administració de l'Agència el 28 de juny de 2001, i d'altres pendents d'aprovació, amb la finalitat d'unificar la terminologia emprada en els diferents estudis de zones inundables redactats en l'àmbit de Catalunya.

Es vol assenyalar que la validesa d'aquestes definicions està condicionada a la inexistència de Planificació de l'espai fluvial (PEF), ja que, en cas contrari, seran aplicables les que en figurin en aquesta planificació.

1.4 Models de simulació numèrica

(1) Amb l'objectiu de facilitar l'avaluació dels diferents estudis de zones inundables presentats a l'Agència per avaluar-los, es recomana amb caràcter general l'ús dels models de simulació numèrica, tant hidrològics com hidràulics, programats per l'Hydrological Engineering Center (HEC) i pel Danish Hydraulic Institute (DHI).

(2) La major part dels models programats per l'HEC són de difusió gratuïta i es poden descarregar per Internet des de la pàgina web de l'HEC:

www.hec.usace.army.mil/software/softwareistrib/index.html

Els models programats pel DHI tenen propietaris i se'n pot obtenir informació a la pàgina web del DHI:

www.dhisoftware.com

1.5 Treballs de camp

(1) Com és norma general en qualsevol estudi de simulació d'un fenomen físic, no cal oblidar que l'objectiu és precisament això, la modelització del comportament del sistema hidrològic real de la conca que es vol analitzar.

És precisament per aquest fet que la fase de treball de camp és fonamental, ja que únicament si s'obté informació del comportament del curs fluvial que es vol analitzar es podrà simular amb una certa aproximació.

La fase inicial de treballs de camp es barreja amb la fase d'anàlisi prèvies, ja que els resultats d'aquestes darreres anàlisis serveixen per a un contrast ràpid de les dades recopilades.

Encara que no es coneixen regles fixes pel desenvolupament del treball de camp, es volen assenyalar diverses fases que convé efectuar:

- (a) Recopilació de la informació disponible: estudis anteriors, INUNCAT, plànols d'usos del sòl i publicacions especialitzades.
- (b) Primera visita de camp, tant del tram de riu que es vol estudiar com de la seva conca. En aquesta visita s'han d'intentar veure els possibles problemes que es poden plantejar en la simulació H&H, contrastar la informació recopilada i fer una comprovació preliminar de si concorden els cabals obtinguts en la fase de recopilació i la morfologia de la llera.
- (c) Entrevistes amb els veïns, els tècnics i els inspectors de l'Agència i les autoritats locals per recollir informació quant als nivells assolits en avingudes i dates en què aquestes van ocórrer, comportaments hidràulics d'interès, fenòmens erosius o de sedimentació, etc.

- (d) Visita al camp per fer un primer encaix estimatiu de tota la informació recopilada.

- (e) Estudi geomorfològic que serveixi tant per a la caracterització de la morfologia de la llera com d'ajuda en l'anàlisi dels nivells assolits per l'aigua. De les conclusions d'aquest estudi es deduirà el compliment de la condició exposada en el punt 1.2.1.c.

2. Conceptes bàsics d'hidrologia

2.1 El cicle hidrològic

(1) El conjunt de tots els processos de transformació de l'aigua a la Terra s'anomena cicle hidrològic (vegeu la figura 2.1).

Els fenòmens hidrològics són extremadament complexos i no del tot coneguts, per la qual cosa a la lògica incertesa inherent a la seva aleatorietat s'hi afegeix la generada pel coneixement limitat que es té del seu comportament precís.

(2) És il·lustratiu tractar el cicle hidrològic com a un sistema de diferents processos interconnectats, tal com es presenta en la figura 2.2.

L'aigua de precipitació, si cau en quantitat suficient, es reparteix en els processos hidrològics següents:

- (a) Intercepció (vegetació, bassals i construccions)
- (b) Emmagatzematge en forma de glaç o neu
- (c) Flux superficial sobre el sòl
- (d) Infiltració en el sòl

Si la precipitació és d'escassa quantia, l'aigua és interceptada sense que infiltri ni formi escorrentiu superficial.

El flux d'aigua terrestre discorre en tres tipus de flux: superficial, subsuperficial i subterrani, interconnectats entre si. Aquesta connexió es deu al fet que hi poden haver transferències d'aigua entre ells depenent de les característiques de l'al·luvial.

El flux subsuperficial circula per la zona no saturada i el flux subterrani ho fa dins de la capa freàtica. Ambdós s'alimenten de l'aigua infiltrada.

És important adonar-se que les velocitats dels diferents fluxos són diferents, ja que l'aigua que escola superficialment circula ràpidament, la del flux subsuperficial bastant més lentament (excepte en al·luvials molt permeables) i la del flux subterrani amb molta més lentitud.

És interessant relacionar les figures 2.1 i 2.2 per a una millor identificació de cada procés.

(3) En l'escorrentiu superficial es poden distingir dos components segons el seu origen:

- (a) *Escorrentiu base*. Prové del flux subterrani i del flux subsuperficial. Com que les velocitats d'aquests fluxos són petites, l'escorrentiu base es pot continuar produint quan no hi ha pluges i sol presentar una evolució suau en el temps, tal com es pot apreciar en la figura 2.3.

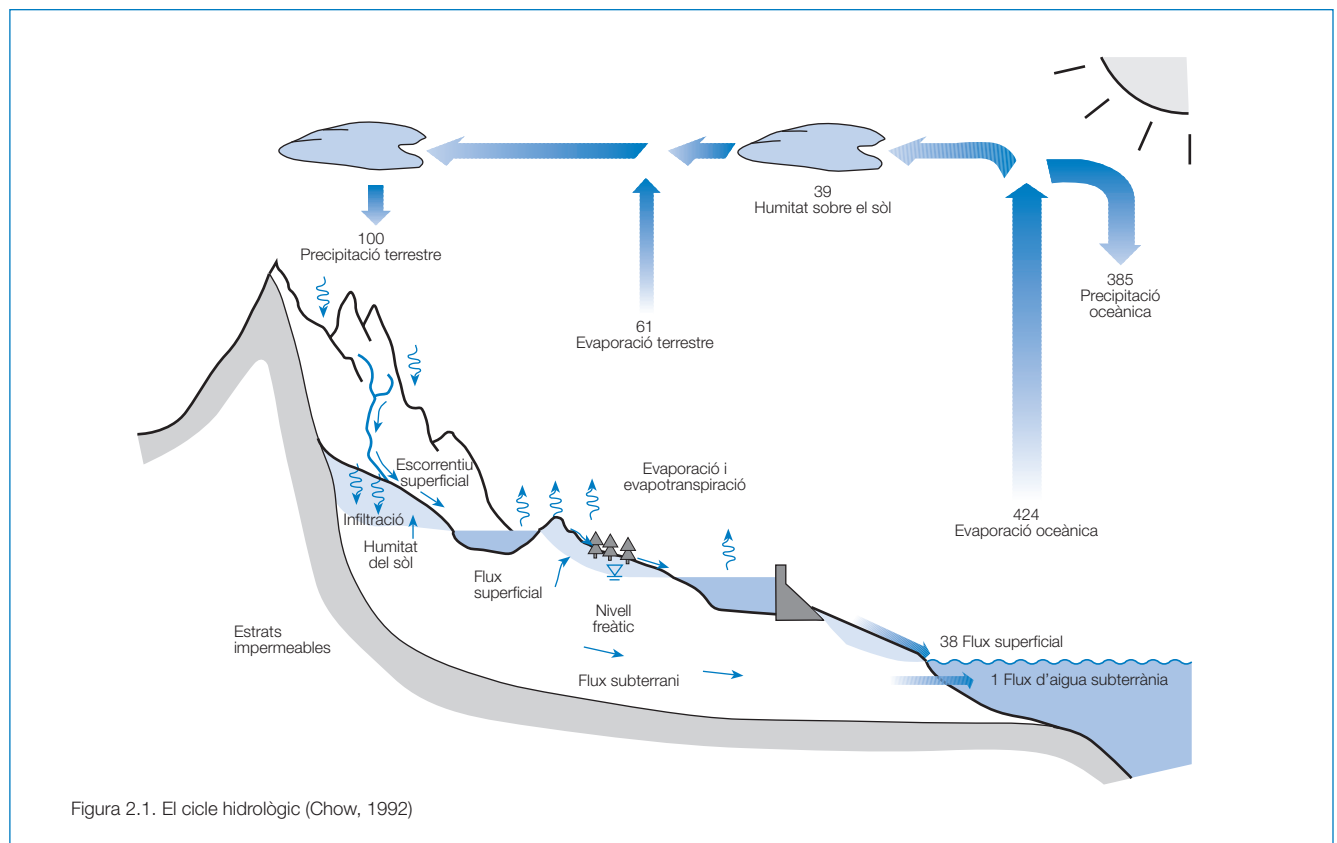


Figura 2.1. El cicle hidrològic (Chow, 1992)

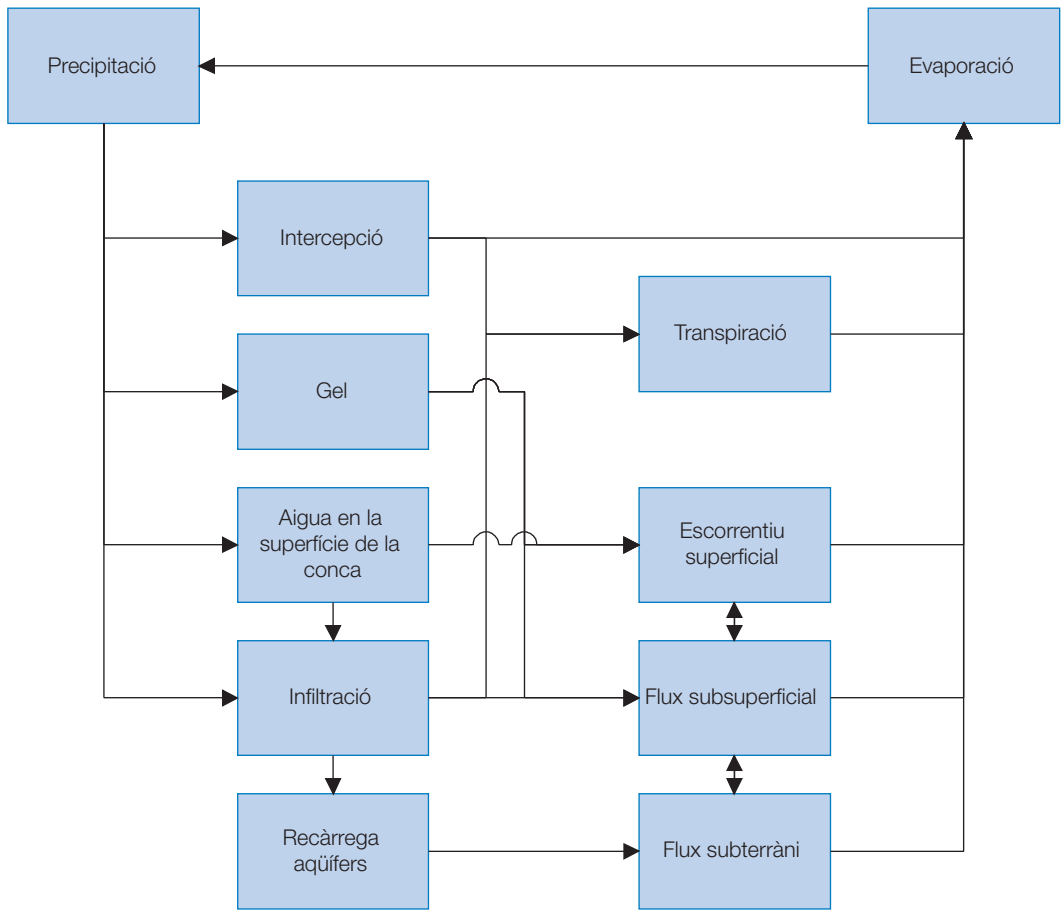


Figura 2.2. Processos hidrològics del cicle hidrològic.

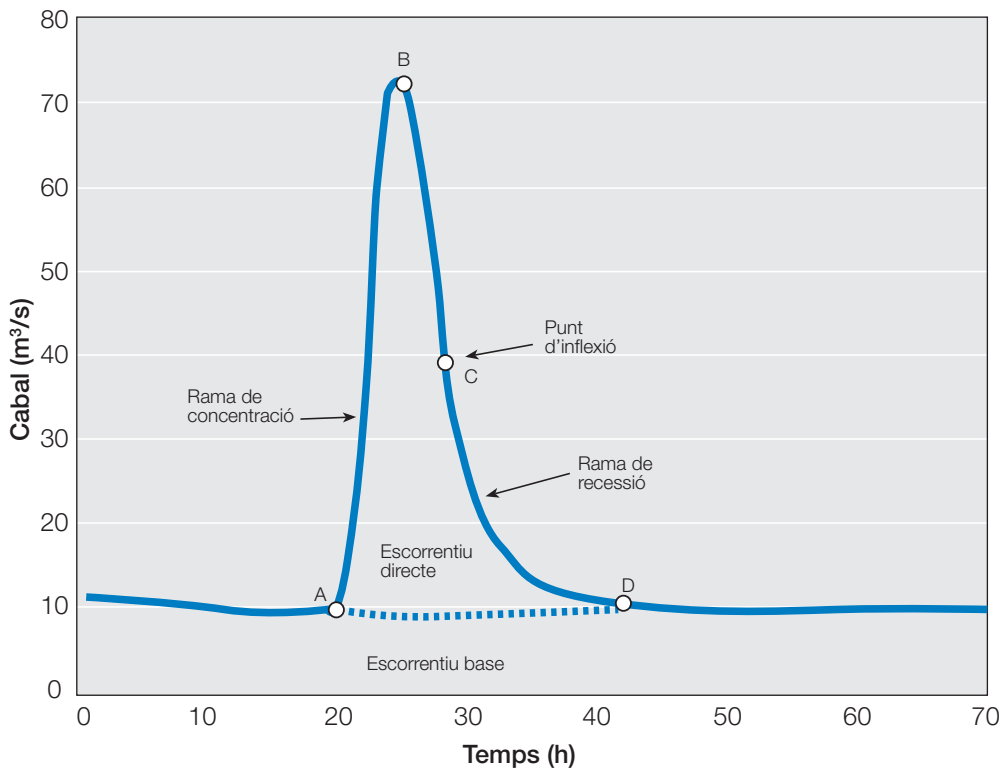


Figura 2.3. Hidrograma en què es distingeix l'escorrentiu base de l'escorrentiu directe.

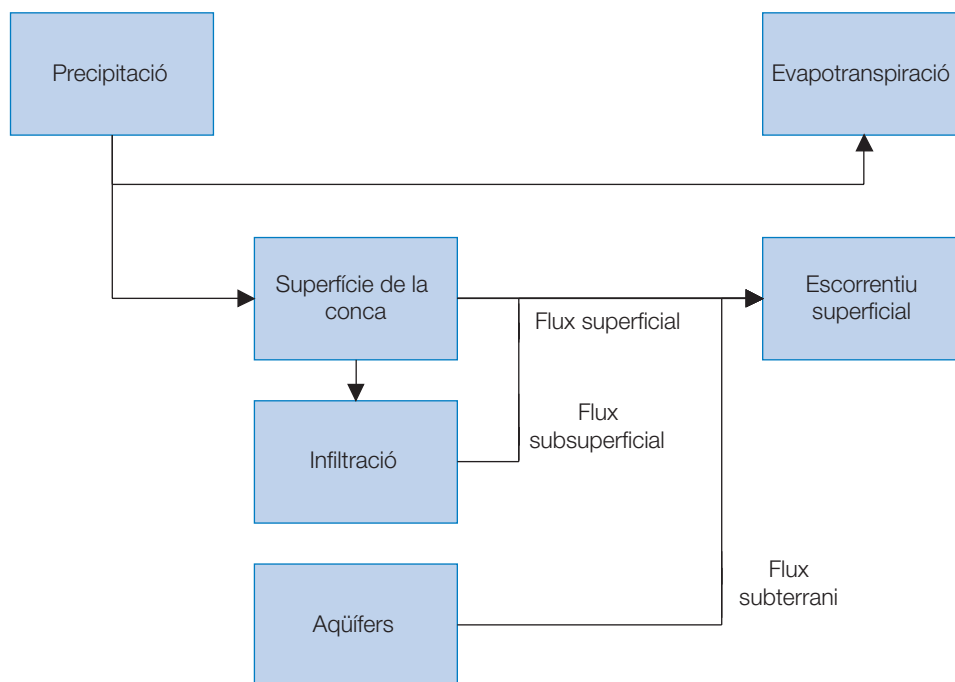


Figura 2.4. Processos hidrològics que es tindran en compte en el càlcul d'avingudes.

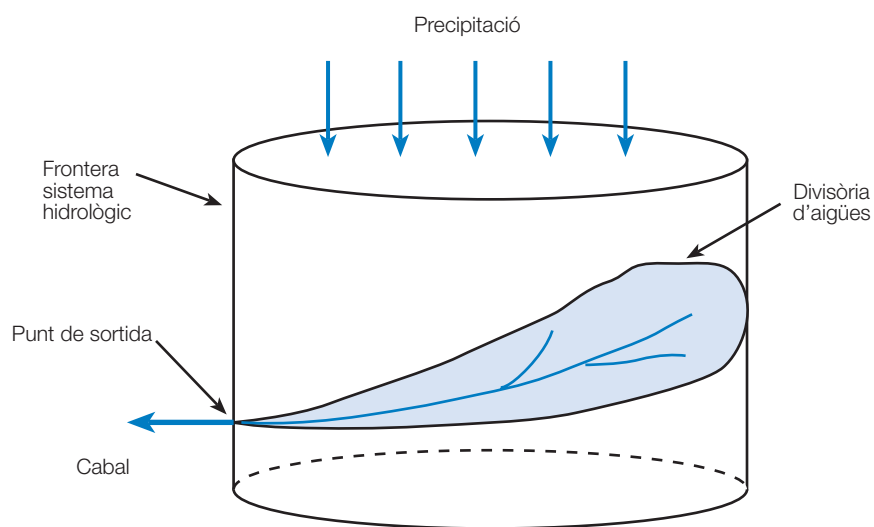


Figura 2.5. Sistema hidrològic o conca (Chow, 1992).

(b) *Escorrentiu directe*. Prové principalment de la precipitació que no ha infiltrat, també anomenada *pluja neta* o *excés de pluja*, i presenta una variació en el temps molt més acusada, lligada a l'existència de pluges. A aquesta pluja neta cal afegir l'aigua provinent del desglaç, que també es considera part de l'escorrentiu directe.

Quan es considera només l'escorrentiu directe, íntimament lligat a una precipitació, el balanç hídric que es fa en el càlcul d'avingudes és un pèl diferent al que s'indica en la figura 2.2, atès que en aquest s'efectua a llarg termini, i més aviat s'assembla al que es presenta en la figura 2.4, fet a curt termini.

(4) En el càlcul de les avingudes a Catalunya només cal tenir present l'escorrentiu directe. Es remet el lector a la bibliografia especialitzada per al càlcul tant de l'escorrentiu base com del cabal de desglaç.

2.2 Cabals d'avinguda

(1) A causa del caràcter estocàstic dels cabals d'avinguda, es considera que són una variable aleatòria. S'ha de tenir present que aquests cabals d'avinguda s'entenen com a màxims anuals.

La magnitud d'una avinguda es mesura comparant el seu pic de cabal amb uns determinats cabals de referència Q_T .

Aquests cabals de referència Q_T s'associen a uns períodes de retorn T , també anomenats períodes de recurrència.

El cabal Q_T associat a un període de retorn de T anys es defineix com el cabal que té una probabilitat de ser superat pel cabal màxim anual Q corresponent a qualsevol any igual a:

$$P(Q \geq Q_T) = \frac{1}{T}$$

És evident que, pel fet que es tracta de cabals d'avinguda màxims anuals, la definició no té sentit per a T igual a 1.

(2) És il·lustratiu veure que la probabilitat de superar aquest cabal Q_T en un període de t anys és:

$$P(Q \geq Q_T) = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^t$$

Per exemple, si es considera el cabal Q_{500} , la probabilitat que es produeixi una avinguda que el superi en un període de 5 anys és de l'1 %, en 50 anys és del 10 %, en 100 anys és del 18 % i en 500 anys és del 63 %, i no del 100 %, com a primera vista es podria pensar.

2.3 Sistema hidrològic. Conca

(1) A l'efecte pràctic se sol considerar l'anomenat sistema hidrològic. Amb les limitacions assenyalades en l'apartat 2.1(4), es defineix com a sistema hidrològic una estructura o volum a l'espai envoltada per una frontera que accepta aigua de precipitació i/o subterrània i que transforma part d'aquesta aigua en escorrentiu superficial. En la figura 2.5 es representa gràficament un sistema hidrològic.

La superfície d'aquest sistema hidrològic s'anomena conca, i el seu perímetre, divisòria de la conca.

(2) En aquesta guia únicament es considera com a entrada l'aigua de precipitació. Aquesta aigua arriba al sistema hidrològic distribuïda tant temporalment com espacialment.

(3) L'estructura temporal de la precipitació es representa mitjançant l'*hietograma*, en el qual s'indica el volum de pluja que entra (cau) en el sistema al llarg del temps.

La precipitació se sol expressar en mm (*litres/m²*) i correspon a l'alçada de precipitació caiguda per unitat de superfície, per la qual cosa representa en realitat un volum de precipitació equivalent a $mm \cdot m^2$ (*litres*).

Se sol representar en un diagrama de columnes en el qual se subdivideix la durada de la tempesta en intervals iguals de temps. A cada interval se li assigna el volum de precipitació que li correspon en una columna fins a obtenir un diagrama com el de la figura 2.6, que presenta una pluja amb una durada de 24 hores.

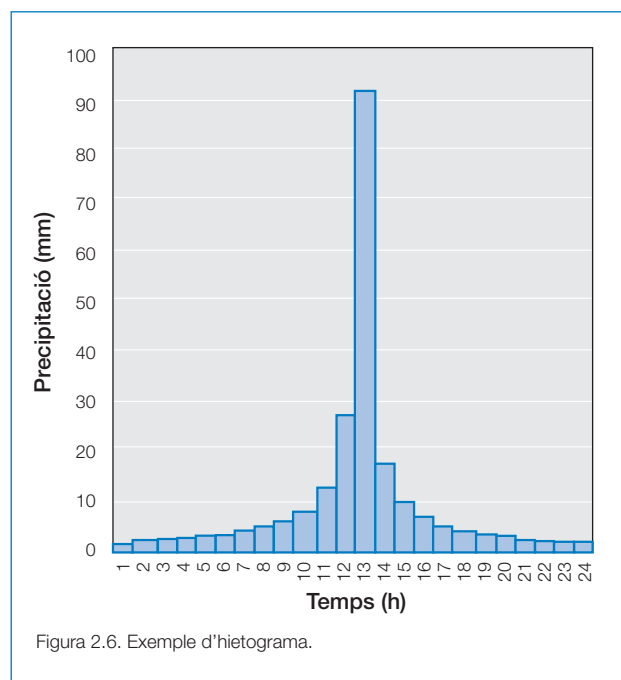


Figura 2.6. Exemple d'hietograma.

(4) La precipitació caiguda en un dia s'anomena P_d , i aquest valor és comunament disponible a l'efecte pràctic, per ser el que s'obté de la immensa majoria de les estacions pluviomètriques, ja que n'hi ha poques que disposin de pluviògraf.

És evident que sumant la precipitació de les diferents columnes de l'hietograma d'una pluja que cobreixi les 24 hores del dia s'obté directament P_d .

(5) En els mètodes habituals de simulació hidrològica, la distribució espacial de la precipitació es representa subdividint la superfície de la conca, de manera que a cada àrea resultant li correspongui un hietograma diferent.

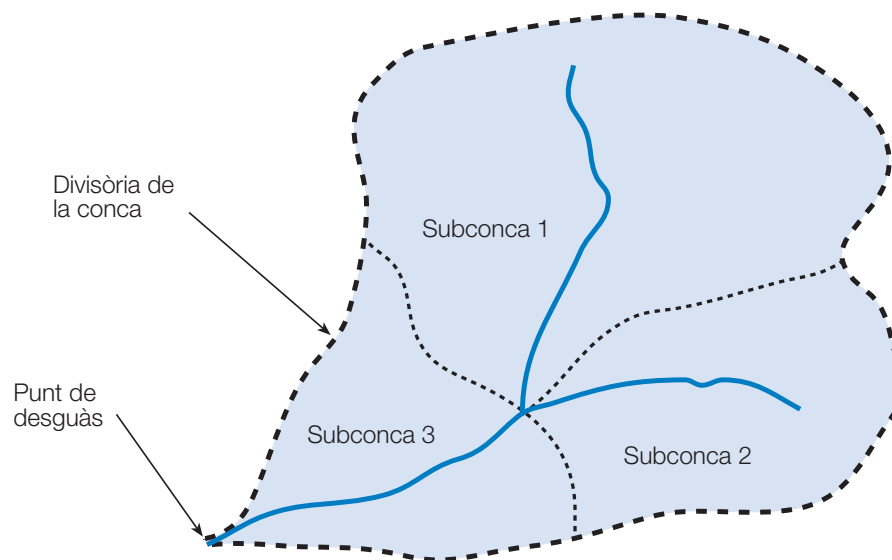


Figura 2.7. Exemple de subdivisió d'una conca en diferents subconques.

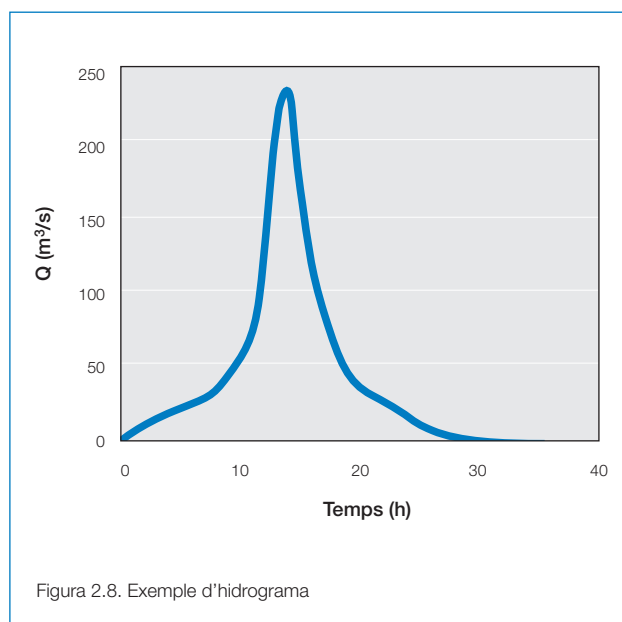


Figura 2.8. Exemple d'hidrograma

En la figura 2.7 es presenta un exemple de divisió d'una conca en subconques. A més a més, aquesta partició cal fer-la tenint en compte diversos aspectes que s'exposaran en l'apartat 2.9.

(6) Una altra variable molt utilitzada és l'anomenada *intensitat de precipitació* I , definida com el volum de pluja caigut per unitat de temps. Dins de la variable anterior, coexisteixen el concepte d'intensitat de precipitació instantània i el d'intensitat de precipitació mitjana, que és el que es fa servir habitualment a l'efecte pràctic. D'ara en endavant, sempre que es faci referència a la intensitat de precipitació cal entendre que es parla de la intensitat de precipitació mitjana en l'interval de

temps de pluja considerat. Aquesta intensitat de precipitació mitjana es calcula com:

$$I = \frac{P}{D} \quad (2.1)$$

On:

- I intensitat de la precipitació P , expressada en mm/h
- P volum de precipitació caigut durant l'interval de temps D per al qual es vol calcular la intensitat, expressat en mm
- D durada de l'interval de temps per al qual es produeix la precipitació P , és a dir, temps en què ha caigut aquest volum de pluja, expressat en hores

Aquesta durada D pot correspondre a un interval qualsevol de la pluja o la durada total.

(7) De la fórmula 2.1 es dedueixen fàcilment els conceptes següents:

- (a) Intensitat horària I_1 , que és la intensitat de precipitació per a una durada efectiva de pluja d'una hora.
- (b) Intensitat diària I_d , que és la intensitat de precipitació per a una durada efectiva de pluja de 24 hores, expressada en mm/h. És evident que es compleix:

$$I_d = \frac{P_d}{24} \quad (2.2)$$

On P_d és la precipitació diària expressada en mm.

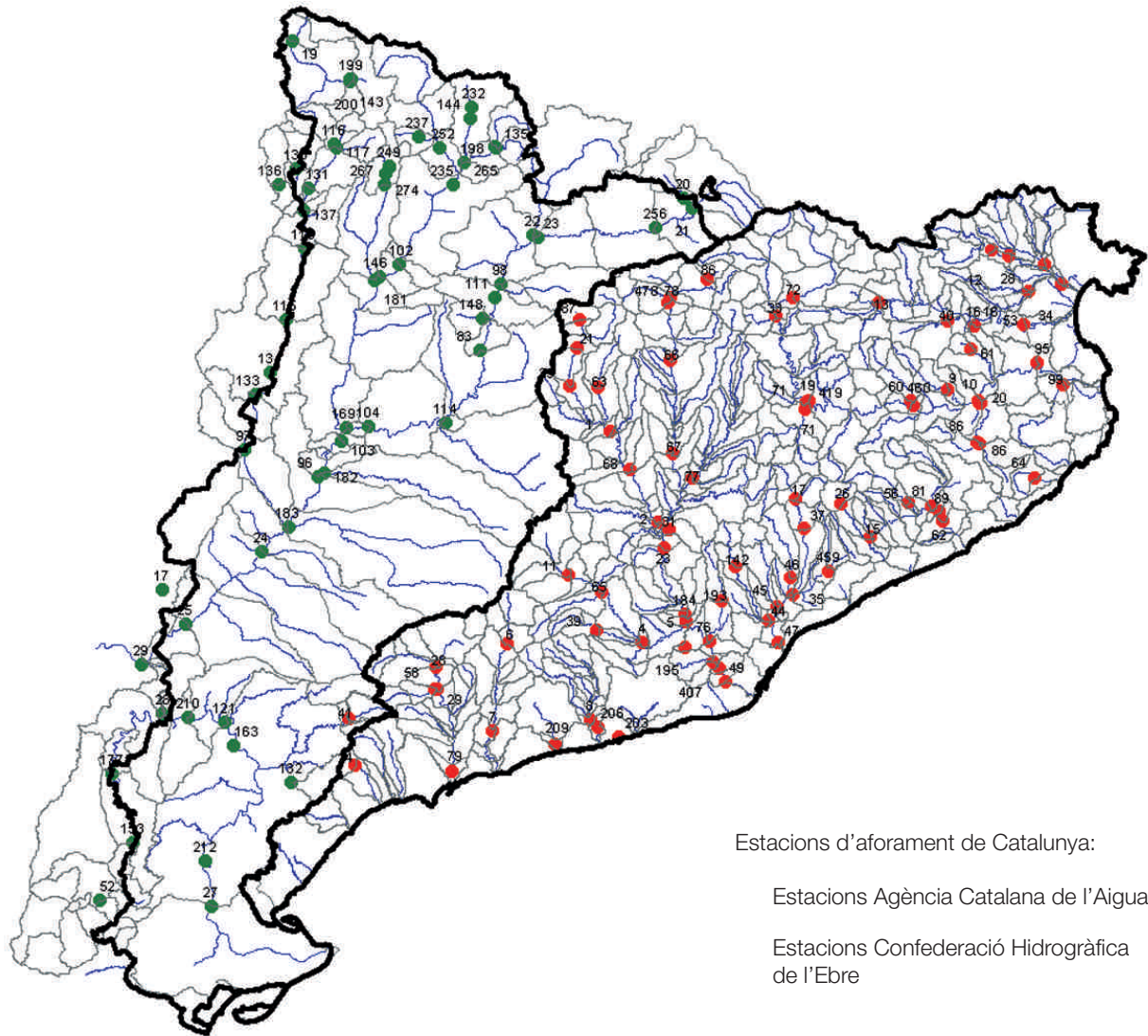


Figura 2.9. Mapa amb les estacions d'aforament de Catalunya.

(8) A vegades també es fan servir hietogrames d'intensitat de pluja, que es construeixen de manera anàloga als de precipitació, però canviant els valors de precipitació pels d'intensitat.

(9) La distribució temporal del cabal d'avinguda en el *punt de sortida*, també anomenat *punt de desguàs* del sistema hidrològic, es denomina *hidrograma*. En l'hidrograma s'indica el cabal que surt del sistema al llarg del temps. El cabal se sol expressar en m^3/s , i el temps, en *hores*. En la figura 2.8 se'n presenta un a tall d'exemple.

(10) A vegades també s'utilitzen *limnigrames*, en els quals es representa la variació del calat al llarg del temps en un determinat punt; els calats s'expressen habitualment en *m*, i el temps, en *hores*.

2.4 Càlcul d'avingudes utilitzant dades de cabals

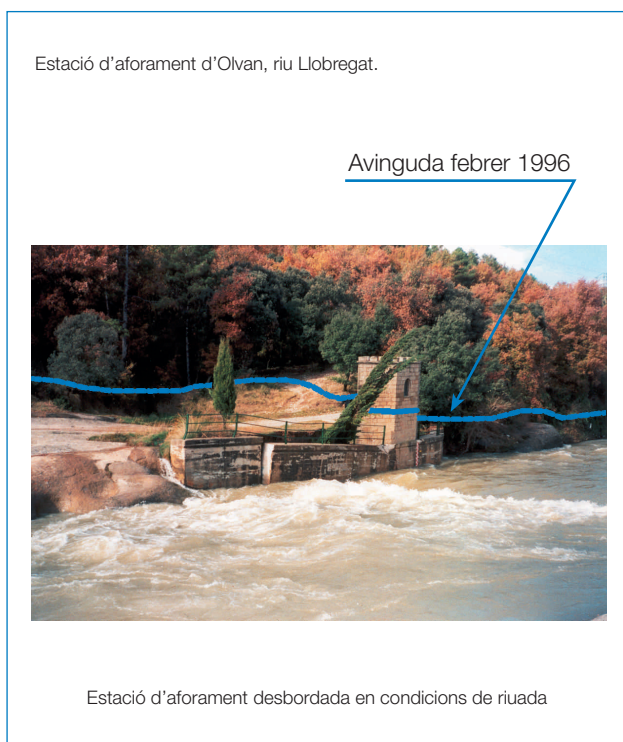
(1) Els cabals d'avinguda es podrien calcular partint de dades de cabals històrics en els curs fluvial objecte d'aquest estudi. Aquestes dades s'obtenen en estacions d'aforament. En la figura 2.9 es presenta un mapa amb la situació de les estacions d'aforament en servei dins de Catalunya. En la taula 2.1 es relacionen totes aquestes estacions, tant les d'aforament que pertanyen a la banda de la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre (CHE) com les que pertanyen a la banda de l'Agència.

Estacions d'aforament de l'Agència	
Codi	Nom
184	ABRERA
63	AIGUA D'ORA
11	ANOIA – JORBA
56	ARBÚCIES - HOSTALRIC
17	AVENCÓ – AIGUAFREDA
47	BESÒS – SANTA COLOMA
45	CALDES – SANTA PERPÈTUA
478	CANAL DE BERGA
407	CANAL DE LA DRETA
21	CARDENER – AIGÜES JUNTES
1	CARDENER – CARDONA
25	CARDENER – OLIUS
68	CARDENER – SÚRIA
23	CASTELLBELL
419	CENTRAL PORTABELLA
8	COLA EMBASSAMENT DE FOIX
87	COMA
37	CONGOST – LA GARRIGA
99	DARÓ SERRA
203	FINAL CANAL FOIX
16	FLUVIÀ – ESPONELLÀ
16	FLUVIÀ – ESPONELLÀ
53	FLUVIÀ – LES GARRIGUES
13	FLUVIÀ – OLOT
6	GAIÀ – QUEROL
7	GAIÀ – VILABELLA
77	GAVARRESA – ARTÉS
86	GOTARRA – RIUDELLOTS
71	GURRI – LES MASIES DE RODA
9	LLÉMENA - GINESTAR
78	LLOBREGAT - GUARDIOLA
66	LLOBREGAT - OLVÁN
88	LLOBREGAT - PERALADA
196	LLOBREGAT – SANT VICENÇ
34	MANOL – EL FAR
2	MANRESA
5	MARTORELL
35	MOGENT – MONTORNÈS
28	MONTBLANC
12	MUGA – BOADELLA
52	MUGA – CASTELLÓ
28	MUGA – PONT DE MOLINS
20	ONYAR – GIRONA
86	ONYAR – RIUDELLOTS
195	EL PAPIOL
86	LA POBLA
31	PONT DE VILOMARA
206	PRESA DEL CANAL DE FOIX
58	LA RIBA (BRUGENT)
29	LA RIBA (FRANCOLÍ)
64	RIDAURA – SANTA CRISTINA
209	RIERA DE LA BISBAL
193	RIERA DE LES ARENES
65	RIERA DEL CARMÉ
142	RIPOLL – CASTELLAR
44	RIPOLL – MONTCADA
14	RIUDECANYES – DUESAIGÜES
76	RUBÍ – EL PAPIOL
67	SALLENT
49	SANT JOAN DESPÍ
39	SANT QUINTÍ DE MEDIONA
4	SANT SADURNÍ D'ANOIA
410	SÈQUIA MONAR
460	SÈQUIA PARDINA
40	SERINYÀ
41	SIURANA - CORNUDELLA
79	TARRAGONA
46	TENES – LLIÇÀ
95	TER – COLOMERS
71	TER – LES MASIES DE RODA
60	TER – PASTERAL

10	TER – EL PONT DE LA BARCA GIRONA
33	TER – RIPOLL
19	TER – RODA DE TER
72	TER – SANT JOAN
61	TERRI – BANYOLES
62	TORDERA – FOGARS
89	TORDERA – FOGARS
26	TORDERA – LA LLAVINA
15	TORDERA – SANT CELONI
81	TORDERA – SANTA COLOMA
459	TRANSVASAMENT TER – CARDEDEU

Estacions d'aforament de la Confederació	
Codi	Nom
198	ALINS E.A
135	ALINS E.A.
104	ALÒS DE BALAGUER E.A. 104
200	ARTIES
199	ARTIES BAIX
143	ARTIES E.A.
163	ASCÓ COCA
96	BALAGUER COCA E.A. 96
182	BALAGUER E.A.
177	BATEA E.A. 177
52	BESEIT E.A. 52
19	BOSSÒST E.A.
116	CALDES DE BÓI E.A.
103	CAMARASA
133	CANELLES
267	CAPDELLA
148	COLL DE NARGÓ E.A.
102	COLLEGATS
134	CORÇÀ
83	E. D'OLIANA E.A. 83
169	E. DE CAMARASA COCA 169
252	ESCARO
249	ESPOS LAGO
248	ESPOS TREN
237	ESPOT
28	FAIÓ
121	FLIX E.A.
17	FRAGA E.A. 17
130	GINASTE E.A. 130
132	ELS GUIAMETS
153	L'HORTA DE SANT JOAN E.A. 153
256	ISÒVOL
144	LLADORRE E.A.
24	LLEIDA E.A. 24
131	LLESP E.A.
29	MEQUINENSA COCA
235	MOLETA DE RONI
98	MONESTIR
136	NOALES E.A.
111	ORGANYÀ E.A. 111
117	PALANCA DE SANT NICOLAU E.A.
97	PINYANA E.A. 97
181	LA POBLA DE SEGUR E.A.
146	LA POBLA DE SEGUR E.A. 146
114	PONS COCA
115	EL PONT DE MONTANYANA E.A. 115
137	EL PONT DE SUERT E.A. 137
20	PUIGCERDÀ E.A.
21	PUIGCERDÀ E.A. 21
210	RIBA-ROJA COCA
274	SALLENT-PP
25	SERÒS E.A. 25
22	LA SEU D'URGELL E.A. 22
23	LA SEU D'URGELL E.A. 23
119	SOPEIRA
232	TAVASCAN-PP
265	TÍRVIA
27	TORTOSA COCA 27
183	VILANOVA DE LA BARCA E.A. 183
212	XERTA

Taula 2.1. Relació d'estacions d'aforament de Catalunya



Un problema important d'aquests mètodes és la dificultat en el mesurament dels cabals, per la qual cosa a l'efecte pràctic les dades històriques tenen una fiabilitat limitada, llevat d'excepcions. A més a més, cal tenir en compte que normalment de la seva aplicació només es pot obtenir el cabal punta i, per això, si es vol avaluar l'hidrograma d'avinguda, serà necessària la correlació amb hidrogrames històrics representatius o emprar determinats models basats en dades de pluja que s'exposaran en els apartats següents.

A més a més, en els punts de la conca on no hi ha estacions d'aforament, els mètodes existents per estimar avingudes a partir d'aforaments obtinguts en altres punts ofereixen una exactitud inferior a la que s'obté amb els mètodes basats en dades de pluja (Ferrer, 1992).

(2) Dins d'aquesta categoria de mètodes es poden distingir tres tipus:

- (a) *Mètodes històrics*. Es basen en la consideració de les avingudes històricament referenciades a la conca. També se'ls coneix com a mètodes directes.
- (b) *Mètodes empírics i corbes envelopants*. Es calculen els cabals d'avinguda a partir de fórmules o gràfiques obtingudes empíricament.
- (c) *Mètodes estadístics*. Es considera que el cabal és una variable aleatòria, per la qual cosa està subjecta a l'anàlisi freqüencial de la sèrie històrica de cabals disponible.

(3) Les dades de partida dels mètodes històrics normalment són nivells absoluts per l'aigua en avingudes extremes. No es consideren adequades per a l'estimació de cabals d'avinguda, però és absolutament fonamental la recopilació de les dades d'avingudes històriques, ja que si aquesta informació és mitjanament fiable, constitueix una referència inestimable per a una primera calibració de qualsevol mètode que es faci servir.

Per a aquesta tasca de calibració és molt convenient estendre la recopilació de dades a avingudes més freqüents.

(4) Els mètodes empírics i les corbes envelopants presenten l'avantatge de la seva senzillesa, per la qual cosa s'han fet servir en el passat amb bastanta profusió. No obstant això, aquesta senzillesa ha donat lloc a una utilització abusiva i inadequada en conques amb característiques molt diferents de les de les conques per a les quals foren deduïdes.

A Catalunya no es coneixen fórmules empíriques i/o corbes envelopants prou precises, per la qual cosa l'extrapolació de les recomanades per a altres conques només s'ha de fer com a referència ràpida i contrast dels resultats recopilats, però mai com a resultat de l'estudi de detall.

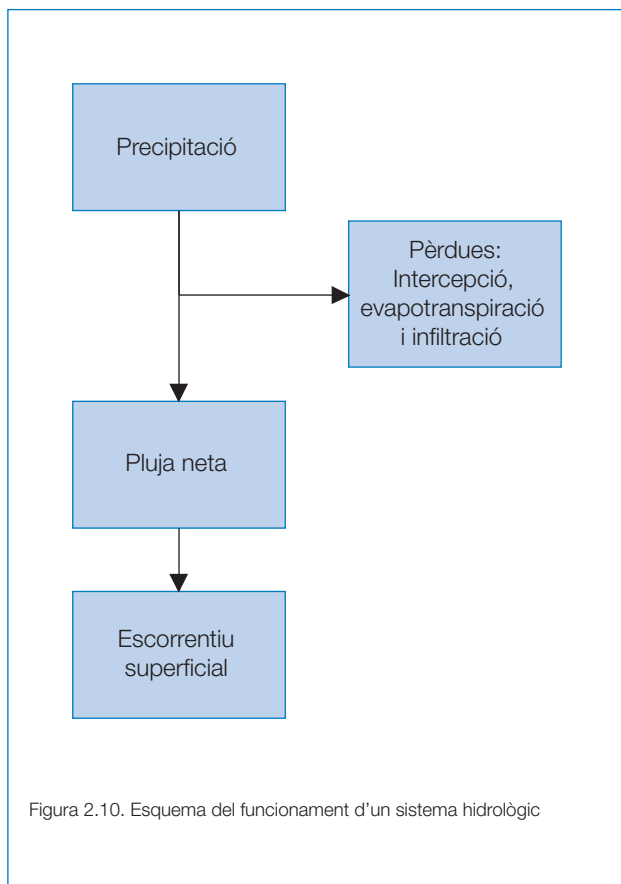
(5) Per les limitacions exposades en el punt (1), l'aplicació dels mètodes de càlcul d'avingudes basats en dades de cabals a Catalunya no és freqüent, per la qual cosa no es recomana en aquesta guia. Si el lector està interessat a aprofundir en aquest tema, es pot adreçar a publicacions especialitzades com ara Ferrer (1992) i CNEGP (1997), entre altres.

2.5 Funcionament d'un sistema hidrològic

(1) En l'apartat 2.3, en definir el que és un sistema hidrològic, ja s'ha descrit el seu funcionament: transformar part de la precipitació que li arriba en escorrentiu directe.

En la figura 2.10 es presenta un esquema del funcionament d'un sistema hidrològic, en el qual s'aprecia que de la precipitació es treu l'aigua que es perd per interceptació, evapotranspiració i infiltració, de manera que queda la pluja neta que després transforma en escorrentiu superficial.

(2) En la figura 2.11 es presenta una conca en la qual es distingeix el curs principal dels cursos fluvials tributaris. El curs fluvial principal passa pel punt de desguàs de la conca que es vol estudiar i és aquell que genera un cabal punta més gran. La resta dels cursos fluvials es consideren tributaris i, com és evident, moriran en el curs fluvial principal.



Es vol advertir que no sempre és fàcil de distingir el curs fluvial principal dels tributaris, ja que per la seva mateixa definició es pot donar el cas que una conca tingui diversos cursos fluvials que generin cabals d'escorrentiu semblants. De totes maneres, aquesta distinció no té una rellevància especial en el càlcul d'avingudes.

(3) Aquesta transformació de precipitació en escorrentiu superficial s'anomena *transformació pluja-escorrentiu* i en el capítol 3 es presentaran diversos mètodes per dur-la a terme.

(4) El funcionament hidroclògic d'una conca, és a dir, el grau de resposta que tindrà en rebre una pluja, es caracteritza per una sèrie de paràmetres que bàsicament són els següents:

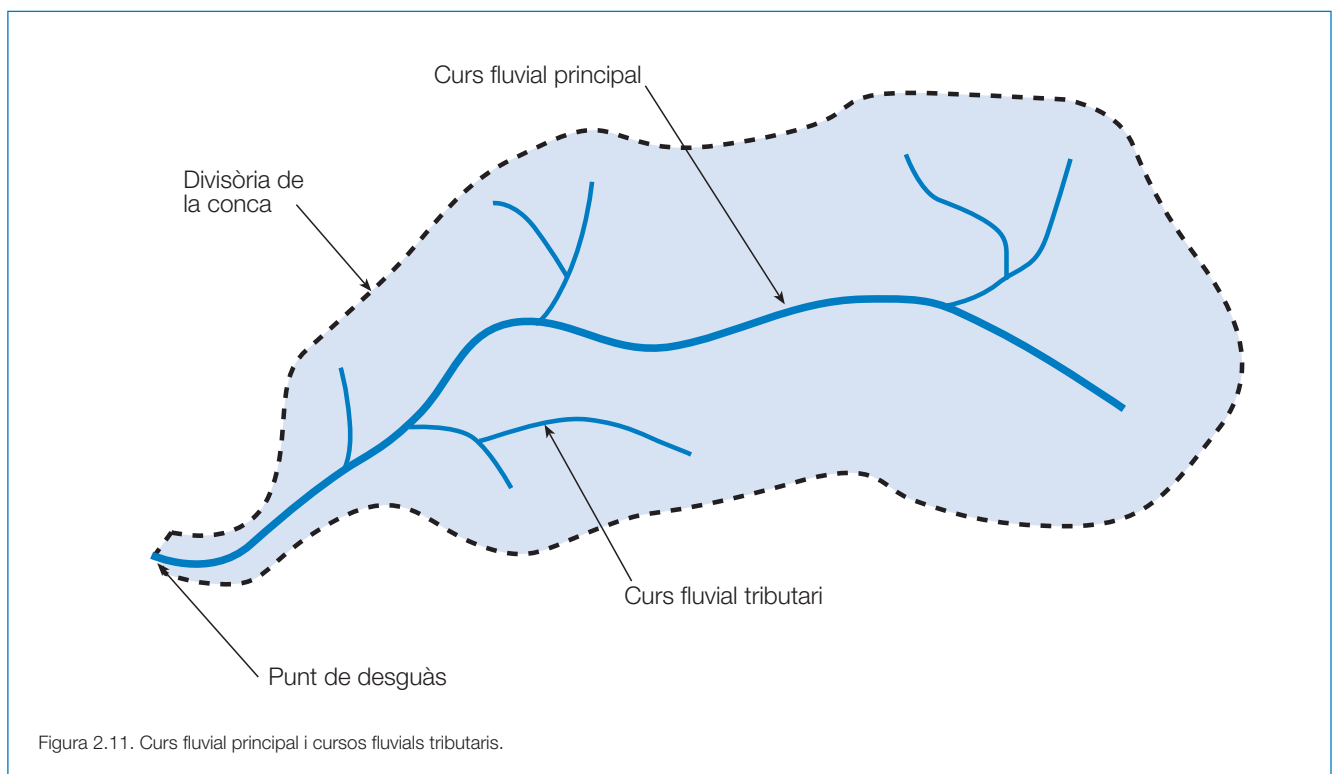
- (a) Paràmetres hidromorfomètrics (àrea, longitud de la llera principal i pendent mitjà de la llera principal)
- (b) Temps de concentració
- (c) Llinar d'escorrentiu

(5) El conjunt de paràmetres geomètrics bàsics d'una conca s'anomenen *hidromorfomètrics*. Aquests paràmetres són els que es presenten a continuació i s'il·lustren en la figura 2.12:

- (a) Àrea de la conca S , normalment expressada en km^2
- (b) Longitud del curs principal L , habitualment expressada en km
- (c) Pendent mitjà del curs principal j , normalment expressat en tant per u, m/m

(6) El pendent real del curs principal d'una conca varia al llarg de la llera, per la qual cosa a l'efecte pràctic es fa servir un pendent mitjà.

Existeixen diversos mètodes per al seu càlcul, d'entre els quals es descriuen els dos següents:



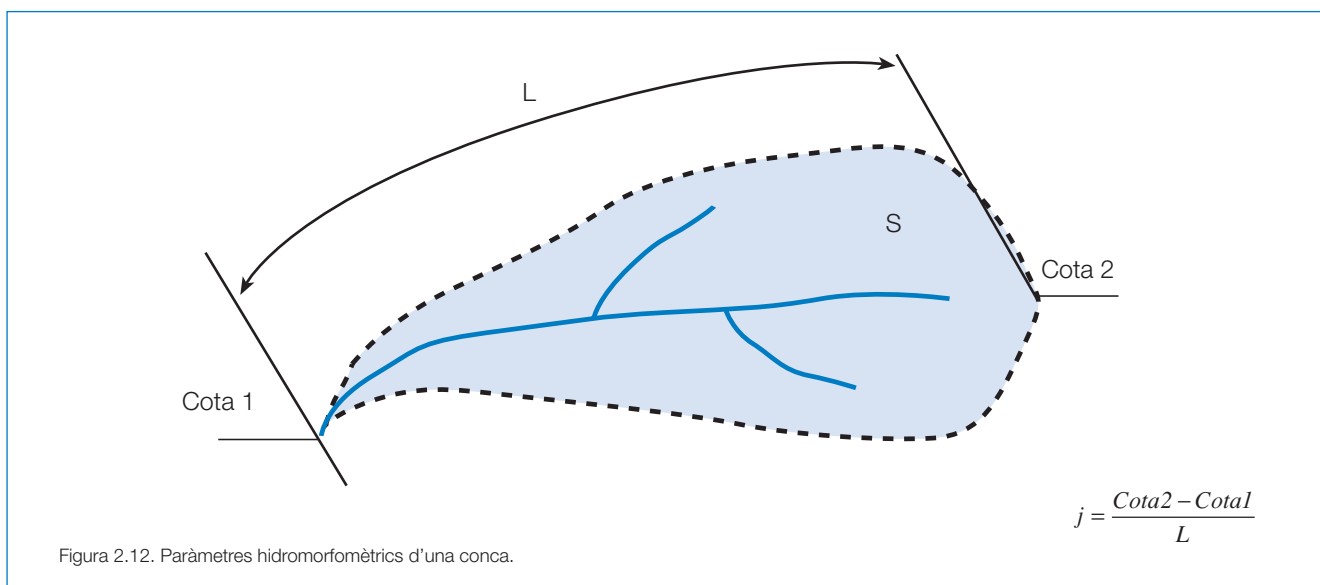


Figura 2.12. Paràmetres hidromorfomètrics d'una conca.

- (a) Es calcula el pendent mitjà dividint el desnivell entre els extrems del curs principal per la seva longitud en planta. D'acord amb la figura 2.12, aquest pendent s'obté de l'expressió següent:

$$j = \frac{Cota2 - Cota1}{L}$$

- (b) Es considera que el pendent mitjà és el de la línia que, passant per l'extrem aigües avall del curs, fa que les àrees entre el perfil i aquesta línia imaginària siguin iguals (vegeu la figura 2.13).

A la pràctica, només s'utilitza el primer mètode, ja que el segon requereix l'obtenció del perfil longitudinal de la llera del curs principal. El segon mètode es descriu només per fer notar que, si el pendent del curs té variacions importants, el primer mètode no representa el pendent mitjà de manera adequada. En aquest cas convé dividir la conca en diverses subconques.

(7) El *temps de concentració* T_c és el temps que transcorre entre la finalització de la precipitació i la sortida de la darrera gota d'escorrentiu superficial.

En la figura 2.14 es mostra un hietograma i l'hidrograma produït per aquesta precipitació. S'aprecia que el temps de concentració és el temps que separa la caiguda de l'última gota a la conca, en el lloc que triga més a arribar al punt de sortida, de l'instant en què aquesta gota surt pel punt de desguàs.

A l'efecte pràctic, el temps de concentració T_c s'agafa com el temps que triga una gota de pluja neta caiguda a l'extrem superior del curs principal a sortir pel punt de sortida, per la qual cosa en el seu càlcul es consideren la longitud L definida en la figura 2.12 i el pendent j definit en l'apartat 2.5 (5).

(8) Un altre paràmetre bàsic que descriu el funcionament hidrològic d'una conca és el P_0 , anomenat *llindar d'escorrentiu*. Aquest paràmetre depèn del tipus i l'ús del sòl i permet calcular la pluja neta a partir de la precipitació.

El llindar d'escorrentiu P_0 és el valor de precipitació a partir del qual es produeix escorrentiu superficial. Per a valors inferiors no es produeix escorrentiu superficial, ja que tota l'aigua caiguda es perd per intercepció, infiltració o evapotranspiració.

(9) En l'hidrograma representat en la figura 2.3 s'han marcat quatre punts:

A. *Punt d'aixecament*. En aquest punt, l'aigua procedent de la pluja comença a arribar al punt de desguàs. Es pot donar immediatament després d'iniciada la pluja, durant la pluja o fins i tot quan ja ha transcorregut un cert temps després que va deixar de ploure, segons la grandària de la conca, el sistema de drenatge, el sòl, la intensitat i la durada de la pluja, etc.

B. *Punt del cabal pic*. Correspon a l'instant en què es produeix el cabal màxim d'escorrentiu superficial.

C. *Punt d'inflexió*. Correspon al punt en el que termina el flux en la superfície del terreny a causa de la pluja caiguda i ja tota l'aigua ha arribat a lleres ben definides. A partir d'aquest punt, tota l'aigua discorre com a escorrentiu superficial per lleres o com a flux subsuperficial i subterrani. Aquest punt correspon al punt d'inflexió de la corba de l'hidrograma.

D. *Fi de l'escorrimet directe*. A partir d'aquest punt tot l'escorrentiu prové del flux subterrani i del flux subsuperficial.

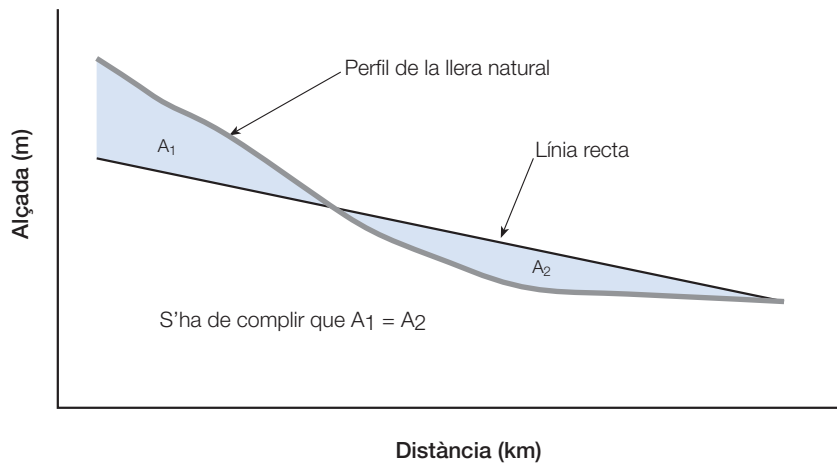


Figura 2.13. Mètode del pendent compensat per al càlcul del pendent mitjà d'una conca.

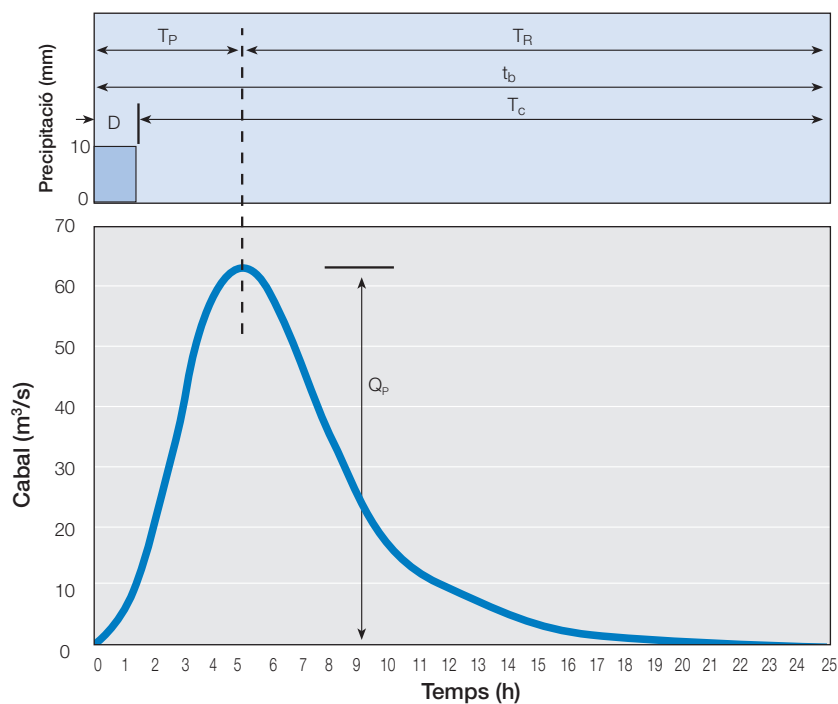


Figura 2.14. Il·lustració del concepte de temps de concentració T_c .

(10) Dins de l'hidrograma d'escorrentiu directe, representat en la figura 2.3 amb un traç més gruixut, per diferenciar-lo de l'escorrentiu base, es poden distingir dues parts:

- (a) *Branca de concentració*. És la part de l'hidrograma d'escorrentiu directe que va des del punt d'aixecament (A) fins al punt d'inflexió (C).
- (b) *Branca de recessió*. És la part de l'hidrograma d'escorrentiu directe que va des del punt d'inflexió (C) fins a la fi de l'escorrentiu directe (D).

2.6 Temps de concentració

(1) En el punt 2.5 (7) s'ha definit el temps de concentració T_c com el temps transcorregut des del final de la pluja fins al final de l'hidrograma.

(2) Diversos organismes i investigadors han proposat fórmules per calcular-lo. No obstant això, no existeix cap expressió amb validesa universal, ja que aquestes fórmules depenen en gran manera de la semblança de la conca que es vol analitzar amb les conques utilitzades per la seva deducció.

(3) A Catalunya s'ha comprovat que la fórmula proposada per J.R. Temez dona bons resultats. Aquesta expressió es completa amb un coeficient reductor que distingeix les conques urbanes de les no urbanes i, al seu torn, diferencia les no urbanes entre les rurals i les urbanitzades.

- (a) *Conques rurals*, amb un grau d'urbanització no superior al 4 % de l'àrea de la conca.

$$T_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{j^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (2.3)$$

- (b) *Conques urbanitzades*, amb un grau d'urbanització superior al 4 % de l'àrea de la conca i amb urbanitzacions independents que tinguin un clavegueram de pluvials no unificat o complet. Curs principal no revestit amb material impermeable i de petita rugositat com el formigó.

$$T_c = \frac{1}{1 + \sqrt{\mu(2 - \mu)}} \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{L}{j^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (2.4)$$

- (c) *Conques urbanes*, amb un grau d'urbanització superior al 4 % de l'àrea de la conca amb clavegueram complet i/o curs principal canalitzat, impermeable i de petita rugositat.

$$T_c = \frac{1}{1 + 3\sqrt{\mu(2 - \mu)}} \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{L}{j^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (2.5)$$

On:

- T_c temps de concentració expressat en h
- L longitud del curs principal expressada en km
- j pendent mitjà del curs principal expressat en tant per u, m/m
- μ grau d'urbanització de la conca expressat en tant per u, km²/km²

(4) Hi ha una altra definició de temps de concentració T_c , utilitzada bàsicament en l'àmbit anglosaxó, que el defineix com el temps que transcorre entre la finalització de la precipitació neta i el punt d'inflexió de l'hidrograma, que separa la rama de concentració de la de recessió.

El sentit físic d'aquesta definició és que el temps de concentració T_c és el temps que triga l'escorrentiu directe a anar des del punt més allunyat hidràulicament de la conca fins al punt de desguàs.

Aquesta definició ha donat lloc, entre altres, a la coneguda fórmula de Califòrnia. Aquesta formulació, en basar-se en una altra concepció de la magnitud T_c , no és coherent amb la metodologia proposada en aquesta guia, raó per la qual es recomana no emprar-la en aquests càlculs. A MOPU (1987) hi ha una comparació molt il·lustrativa d'aquestes diferències.

2.7 Llindar d'escorrentiu

(1) El llindar d'escorrentiu és el paràmetre que permet calcular la pluja neta a partir d'una determinada precipitació, per la qual cosa engloba la intercepció per vegetació, l'emmagatzematge en petites depressions de la superfície del terreny i la infiltració.

(2) El mètode de càlcul de la pluja neta ΣE a partir de la precipitació ΣP que es proposa en aquesta guia és el desenvolupat pel Soil Conservation Service (SCS), que calcula la pluja neta amb l'expressió següent:

$$\Sigma E = 0 \quad \text{si } \Sigma P \leq P_0$$

$$\Sigma E = \frac{(\Sigma P - P_0)^2}{\Sigma P + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } \Sigma P > P_0$$

On:

- ΣP precipitació acumulada des del començament del xàfec fins a l'instant considerat
- ΣE pluja neta generada per ΣP
- P_0 llindar d'escorrentiu

En la figura 2.15 es presenta la família de corbes de transformació precipitació-pluja neta que resulten del model de l'SCS, i en la figura 2.16 es presenta el pluviograma que resulta de l'aplicació d'aquest model a l'hietograma de la figura 2.6 considerant un llindar d'escorrentiu P_0 de 30 mm.

(3) Per estandarditzar l'aplicació d'aquest model, l'SCS va definir un nombre adimensional NC anomenat nombre de corba, de manera que a cada NC li correspongués un llindar d'escorrentiu P_0 . Aquest nombre pot variar entre 0 i 100 i s'estableix que l' $NC=100$ correspon a una superfície totalment impermeable, és a dir, amb P_0 nul.

L'SCS va tabular els NC segons l'ús del sòl, el pendent, les característiques hidrològiques i el grup de sòl. En l'annex 1 s'explica l'aplicació pràctica d'aquest mètode.

(4) De l'anàlisi dels resultats obtinguts en moltes conques es va concloure que era convenient fer més gran el llindar d'escorrentiu P_0 amb un coeficient r , anomenat *factor regional*, que reflecteix la variació regional d'humitat habitual en el sòl al començament de les pluges significatives.

A la «Instrucció 5.2-1.C: drenatge superficial» es presenta un mapa d'isolinies del factor regional, que a Catalunya fixa un valor mitjà de 2,5. De l'anàlisi dels resultats obtinguts de l'aplicació d'aquest coeficient s'ha vist que aquest valor és excessiu si el valor del llindar d'escorrentiu es calcula segons que s'ha exposat en l'annex 1.

És per això que es recomana adoptar un factor regional d'1,3.

Per tant, el llinard d'escorrentiu que caldrà fer servir en el càlcul de la pluja neta és el valor de P_0' , calculat com:

$$P_0' = r \cdot P_0 = 1,3 \cdot P_0$$

(5) Per això, en el càlcul de la pluja neta ΣE , s'haurà d'emprar la formulació següent:

$$\Sigma E = 0 \quad \text{si } \Sigma P \leq P_0'$$

$$\Sigma E = \frac{(\Sigma P - P_0')}{\Sigma P + 4 \cdot P_0'} \quad \text{si } \Sigma P > P_0' \quad (2.6)$$

2.8 Definició de la pluja de projecte

2.8.1 Generalitats

(1) Les pluges, com els cabals d'avinguda, tenen caràcter estocàstic per la qual cosa es poden tractar com una variable aleatòria.

Per tant, si es considera el valor de la precipitació diària P_d , la precipitació diària $(P_d)_T$ associada a un període de retorn de T anys es defineix com la precipitació diària que té una probabilitat d'ésser superada per la precipitació diària màxima anual P_d en any qualsevol de:

$$P(P_d \geq (P_d)_T) = \frac{1}{T}$$

(2) La *pluja de projecte* és una de les dades de pertinença del càlcul d'avingudes, per la qual cosa és evident que és imprescindible conèixer-la amb la màxima exactitud.

(3) L'única manera d'obtenir informació quant a les pluges que poden caure en una determinada conca és l'anàlisi de tempestes que ja s'hagin produït a la zona. Malauradament, la informació enregistrada de precipitacions és limitada i només es disposen de sèries de dades històriques de pocs anys en comparació dels períodes de retorn habituals. A més a més, sovint aquestes dades tenen fiabilitat limitada, sobretot per a grans tempestes.

És per aquesta raó que cal ser molt prudent amb el tractament estadístic de les sèries de pluges històriques i convé fer-ho dins d'un context regional, tenint en compte l'orografia de la zona i complementant-lo amb estudis meteorològics.

(4) Hi ha diverses possibilitats a l'hora de definir l'hietograma d'una pluja:

(a) Conèixer el volum total de precipitació de la pluja (la suma de la precipitació de les diferents columnes de l'hidrograma) i construir l'hietograma fent servir tècniques desenvolupades amb aquesta finalitat.

(b) Conèixer registres reals (*pluviogrames*) de pluviògrafs que puguin considerar-se prou significatius. Aquesta opció no es considerarà en aquesta guia, ja que només es disposa d'aquesta informació molt poques vegades.

Per tant, en aquesta guia únicament s'exposarà la metodologia per construir l'hietograma a partir de la precipitació total. Com s'ha comentat en l'apartat 2.3, la dada de precipitació normalment disponible és la precipitació diària P_d , per la qual cosa serà a partir d'aquesta dada que es construirà l'hietograma de la pluja de projecte.

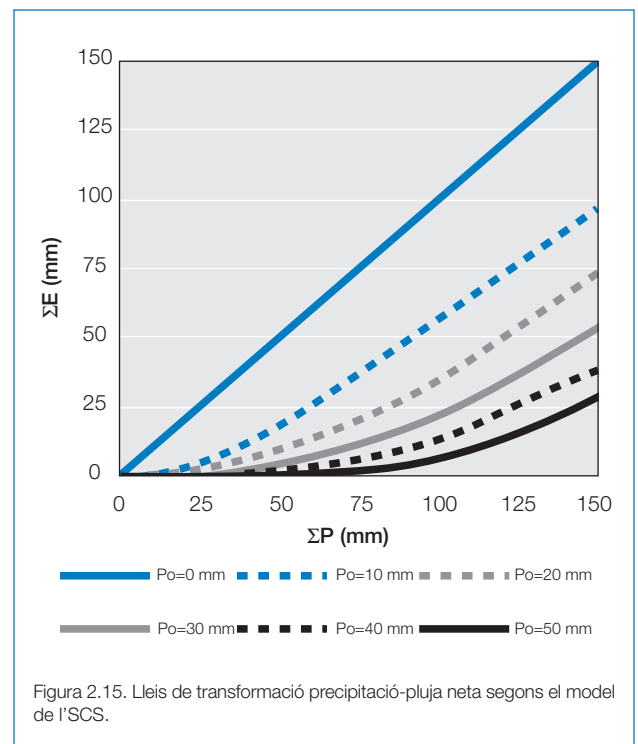


Figura 2.15. Lleis de transformació precipitació-pluja neta segons el model de l'SCS.

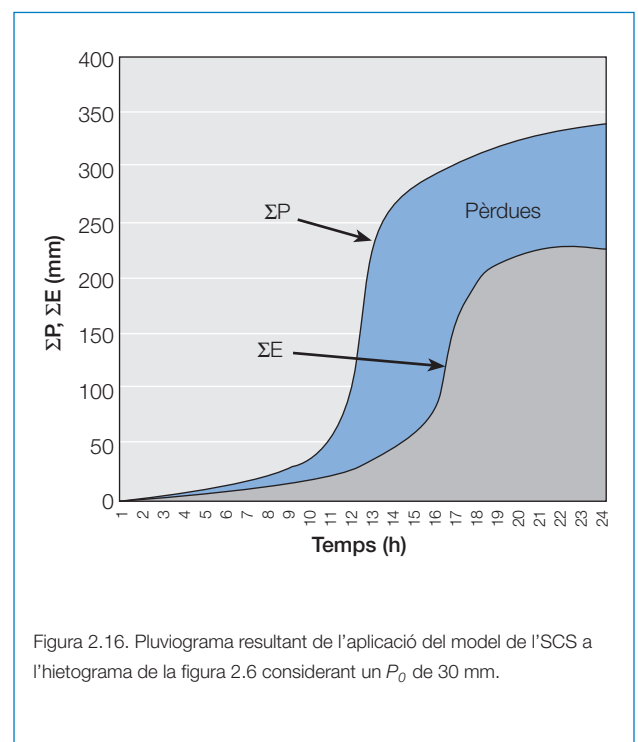


Figura 2.16. Pluviograma resultant de l'aplicació del model de l'SCS a l'hietograma de la figura 2.6 considerant un P_0 de 30 mm.

(5) En estar limitada l'aplicació d'aquesta guia a conques amb una superfície S no superior als 1.000 km² i un temps de concentració T_c no superior a les 24 hores, la consideració d'una pluja efectiva de 24 hores és bastant conservadora.

A la pràctica, aquesta durada efectiva D es fa servir com a paràmetre de calibració del model de simulació numèrica del comportament de la conca. Si en les etapes de recopilació d'avingudes històriques i investigació de camp no s'obtinguessin dades prou fiables per calibrar, si més no contrastar, els resultats obtinguts del model, és convenient considerar una durada efectiva D de 24 hores.

En conques amb temps de concentració T_c petits, aquesta durada de 24 hores pot resultar excessivament conservadora, aspecte que es comentarà en l'apartat 2.10.

2.8.2 Càlcul de la P_d

(1) Ja s'ha comentat el risc de cometre errors significatius en el càlcul de la precipitació diària P_d a partir del tractament estadístic de les sèries de pluges històriques obtingudes dels registres de les estacions meteorològiques properes a la conca que s'està estudiant.

Conscient d'aquest problema, és voluntat de l'Agència posar a la disposició del públic la informació més avançada sobre els mapes d'isomàximes de precipitació P_d corresponents als períodes de retorn de 10, 25, 50, 100, 200 i 500 anys. En l'actualitat, aquesta informació es basa en els mapes editats pel Ministeri de Foment (DGC, 1999) i s'anirà perfeccionant a mesura que es disposi de noves dades i estudis d'escala local.

Informació sobre els avanços en aquest i altres temes d'aquesta guia s'editarà puntualment al web de l'Agència: www.gencat.net/aca.

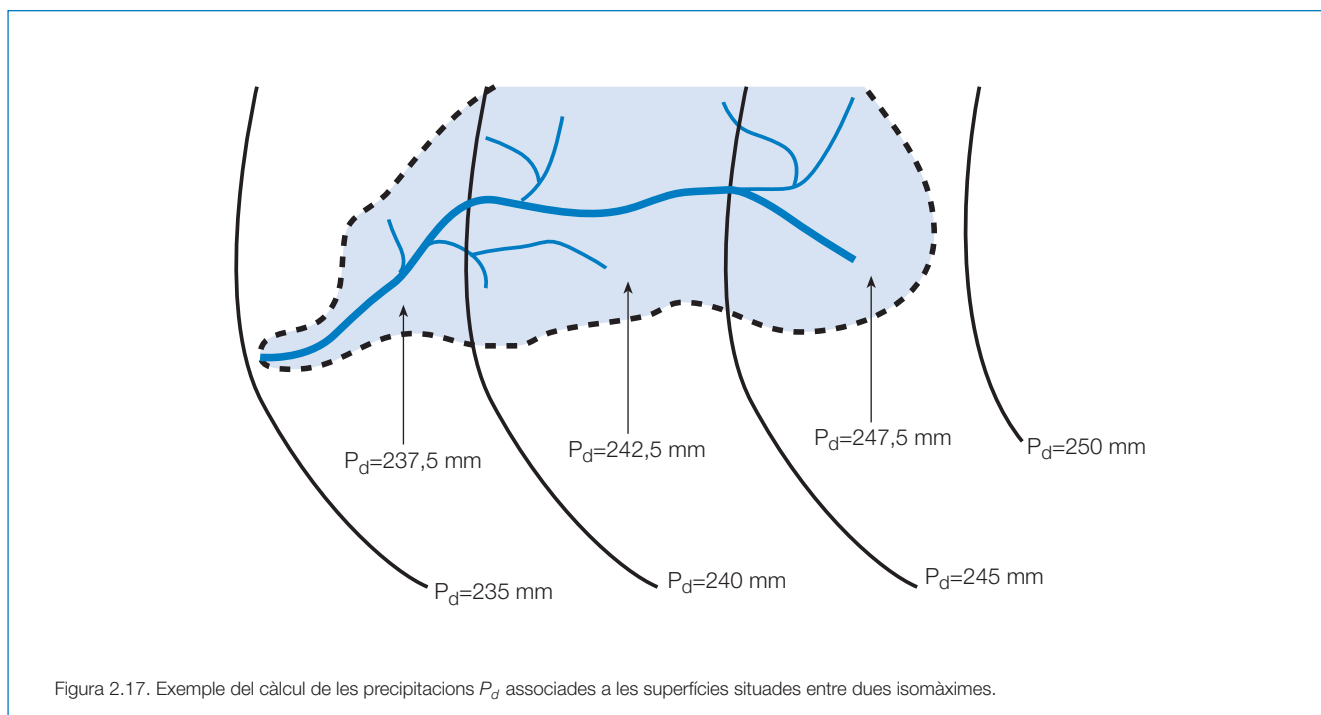
(2) Per tant, en els estudis de zones inundables realitzats en l'àmbit de Catalunya és recomanable fer servir els valors de precipitació diària P_d obtinguts dels mapes d'isomàximes publicats per l'Agència, esmentant la versió dels mapes utilitzats, que hauria de ser la darrera disponible en la data de redacció de l'estudi.

La metodologia de càlcul de la P_d d'una determinada conca és senzilla. Primer es representa la divisòria de la conca que s'està estudiant, seguidament s'obtenen les àrees que quedin tancades entre isomàximes de precipitació i finalment es calcula el valor de P_d i es fa la mitjana dels valors dels P_d per a cadascuna d'aquestes isomàximes ponderades per les àrees corresponents:

$$P_d = \sum_i \frac{S_i \cdot (P_d)_i}{A} \text{ essent } \sum_i S_i = S$$

On:

- P_d precipitació diària mitjana de la conca, expressada en mm
- S superfície de la conca, expressada en km²
- $(P_d)_i$ precipitació diària mitjana de l'àrea tancada entre dues isomàximes de precipitació. Es calcula com la mitjana de les precipitacions mitjanes corresponents a les dues isomàximes. S'expressa en mm
- S_i superfície tancada per les isomàximes de precipitació, expressada en km²



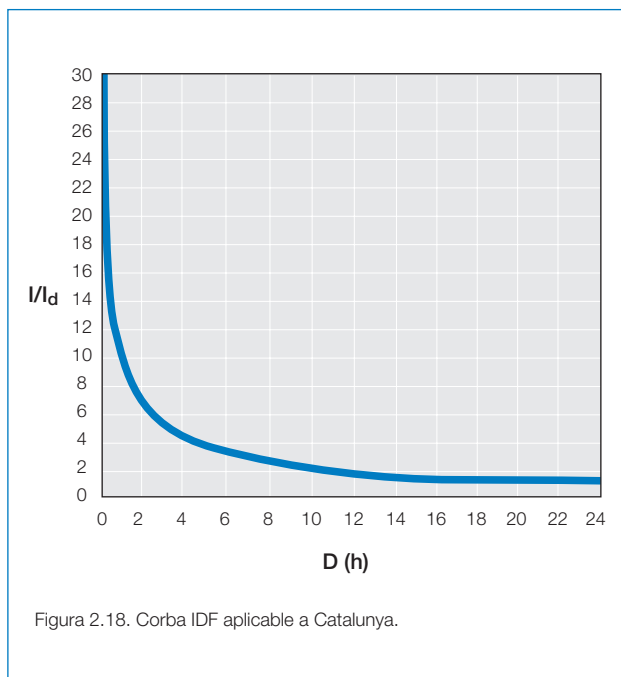


Figura 2.18. Corba IDF aplicable a Catalunya.

(3) A l'efecte pràctic, la materialització de la metodologia exposada en el punt anterior per la determinació del valor de la P_d associada a una determinada conca es podrà realitzar seguint diferents metodologies, que depenen fonamentalment de les aplicacions informàtiques que s'utilitzin:

(a) Amb eines de SIG, per al tractament de malla (grids) es recomana considerar la malla $1.000 \cdot 1.000$ m present en els mapes d'isomàximes facilitats per l'Agència (inicialment generats pel CEDEX) i obtenir la precipitació diària P_d com a mitjana dels valors de les cel·les de la malla.

(b) Amb eines sota l'entorn CAD, s'hauran de superficialitzar les àrees compreses entre les diferents isomàximes dels mapes facilitats per l'Agència i associar cadascuna a la mitjana de les precipitacions P_d de les isomàximes que la defineixen, tal com es presenta en l'exemple de la figura 2.17.

(4) Una vegada obtinguda la precipitació diària P_d , caldrà reduir el seu valor aplicant el coeficient K_A , anomenat coeficient de simultaneïtat, mitjançant l'expressió:

$$K_A = 1 \quad \text{si } S \leq 1 \text{ km}^2$$

$$K_A = 1 - \frac{\log S}{15} \quad \text{si } S > 1 \text{ km}^2 \quad (2.7)$$

On:

- K_A coeficient adimensional minorador de la precipitació diària P_d
- S superfície de la conca, expressada en km^2

L'aplicació d'aquest coeficient de simultaneïtat està motivada perquè els valors de precipitació diària utilitzats en la construcció

dels mapes d'isomàximes, o en el tractament estadístic de les seves sèries històriques, són obtinguts per a punts concrets (estacions meteorològiques) en comptes d'àrees extenses, que és el que es considera en els càlculs. Amb aquest coeficient es té en compte el fet que aquestes estacions algunes vegades són a prop del centre del xàfec, altres vegades a prop de les vores exteriors i altres vegades en posicions intermèdies.

Per tant, el valor de la precipitació diària que caldrà utilitzar en la construcció de l'hietograma és el valor de P_d' calculat com:

$$P_d' = K_A \cdot P_d \quad (2.8)$$

2.8.3 Determinació de l'hietograma

(1) Una vegada coneguda la precipitació diària P_d' , el mètode més utilitzat per a la construcció d'un hietograma de precipitació que sigui raonable és el que es basa en les corbes *intensitat - durada - freqüència*, també anomenades *corbes IDF*.

(2) S'anomenen *corbes IDF* les que resulten d'unir punts representatius de la intensitat mitjana en intervals de diferent durada i corresponents tots ells a una mateixa freqüència o període de retorn.

La seva obtenció només és possible a partir de l'anàlisi de tempestes enregistrades amb pluviògrafs i a la Península se solen utilitzar les corbes proposades per Témez, que va deduir la relació següent:

$$\frac{I}{I_d} = \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{(28^{0.1-D^{0.1}})}{(28^{0.1}-1)}} \quad (2.9)$$

On:

- I intensitat de precipitació per a una durada efectiva de la pluja de D hores corresponent al període de retorn considerat, expressada en mm/h
- I_1 intensitat horària per al període de retorn considerat, que és la intensitat de precipitació per a una durada efectiva de la pluja d'una hora, expressada en mm/h
- I_d intensitat mitjana diària per al període de retorn considerat, que és la intensitat de precipitació per a una durada efectiva de la pluja d'un dia, expressada en mm/h . Es vol assenyalar que I_d no és exactament igual a I_{24} , com més endavant es veurà
- D durada efectiva de la pluja per la qual es vol calcular la intensitat I . Aquesta durada efectiva D s'expressa en hores

El quocient I_1/I_d és característic de la zona d'estudi i a Catalunya es pot considerar un valor mitjà d'11, d'acord amb MOPU (1990), i això dona com a resultat la corba de la figura 2.18.

Si es considera la fórmula 2.2, la intensitat de precipitació I_D per a una durada D de la pluja que correspon a un període de retorn T_c tal que la seva precipitació sigui P_d' es pot calcular com:

$$I_D = \frac{P_d'}{24} \cdot \left(11\right)^{\left(\frac{28^{0,1} - D^{0,1}}{28^{0,1} - 1}\right)} \quad (2.10)$$

(3) El càlcul de l'hietograma de precipitació, un cop coneguda la P_d' i la corba IDF aplicable se sol realitzar amb el mètode conegut com dels *blocs alternats*.

L'aplicació d'aquest mètode és senzilla i s'entén fàcilment veient un exemple, com el que es presenta en la figura 2.19. Les passes que cal seguir per a la construcció d'un hietograma pel mètode dels blocs alternats són les següents:

- (a) Decidir quina serà la durada de la tempesta per la qual es vol generar l'hietograma de precipitació. En el punt 2.8.1 (5) s'ha fixat que en cas de dubte caldrà considerar una pluja amb una durada efectiva de 24 hores. Se suposa que:

$$D = 24 \text{ h}$$

Seguidament, cal decidir quin serà el període de temps Δt en què es dividirà la durada efectiva D en la construcció de l'hietograma, és a dir, la durada que correspon a cada columna de l'hietograma. El valor de Δt depèn bàsicament del model de transformació pluja-escorrentiu i de les característiques hidrològiques de la conca. En el capítol 3 s'especificarà com s'ha de calcular.

Per il·lustrar la seva aplicació es considera per exemple una hora, per la qual cosa:

$$\Delta t = 1 \text{ h}$$

Evidentment, es complirà que:

$$D = 24 \cdot \Delta t = 24 \text{ h}$$

- (b) Obtenir la precipitació diària P_d corresponent al període de retorn considerat del mapa d'isomàximes de precipitació editat pel Departament de Medi Ambient.

Aplicar el coeficient reductor K_A per obtenir el valor de la precipitació diària corregida:

$$P_d' = K_A \cdot P_d$$

(c) Calcular les intensitats de pluja per als intervals de temps Δt , $2 \cdot \Delta t$, $3 \cdot \Delta t$, ..., $24 \cdot \Delta t$ utilitzant la corba IDF que correspongui. A l'àmbit de Catalunya l'expressió analítica ve donada per la fórmula 2.10. Evidentment, es complirà que:

$$I_{\Delta t} > I_{2 \cdot \Delta t} > I_{3 \cdot \Delta t} > \dots > I_{24 \cdot \Delta t}$$

(d) Generar un pluviograma de precipitació, és a dir, la suma de precipitació ΣP corresponent a cadascuna de les intensitats calculades, mitjançant la fórmula:

$$\Sigma P_{n \cdot \Delta t} = n \cdot \Delta t \cdot I_{n \cdot \Delta t} \quad \text{essent } n \in [2, 24]$$

(e) Calcular el pluviograma de pluja neta ΣE utilitzant el model de l'SCS exposat en l'apartat 2.7.

(f) Obtenir la pluja neta que correspon a cadascun dels intervals $n \cdot \Delta t$, amb $n \in [1, 24]$, que constituïran els anomenats *blocs de pluja neta*:

$$E_{1 \cdot \Delta t} = \Sigma E_{1 \cdot \Delta t}$$

$$E_{n \cdot \Delta t} = \Sigma E_{n \cdot \Delta t} - \Sigma E_{(n-1) \cdot \Delta t} \quad \text{on: } n \in [2, 24]$$

(g) Finalment, l'hietograma es construeix col·locant el bloc $E' \Delta t$ en el punt mitjà de la durada efectiva, el bloc $E'_{2 \cdot \Delta t}$ en l'interval anterior, el següent en l'interval posterior, i així successivament.

És interessant veure que la P_d' obtinguda de l'aplicació de la corba IDF no és exactament la mateixa que la considerada com a dada de partença, ja que la primera assoleix els 234,835 mm i la segona és de 204 mm.

Aquesta discordança resulta de l'expressió analítica considerada per la corba IDF (fórmula 2.10), ja que el coeficient que multiplica el quocient $P_d'/24$ no és 1 sinó:

$$\left(11\right)^{\left(\frac{28^{0,1} - 24^{0,1}}{28^{0,1} - 1}\right)} = 1,1385$$

Aquesta diferència entre I_d i I_{24} s'explica perquè en el traçat de la corba IDF s'ha considerat l'interval de 24 hores més desfavorable, sense haver de començar necessàriament a una hora determinada, perquè P_d' s'obté considerant sempre el mateix interval horari, que és el de recollida de les dades. Per tant, I_{24} és més gran que I_d , igual que P_{24} respecte de P_d .

(4) Es vol recordar que si s'hagués escollit una durada efectiva D inferior a 24 hores, en el mètode exposat en el punt 2.8.3 (3) s'hauria de considerar la durada efectiva D escollida en el càlcul de la intensitat I_D (fórmula 2.10).

Dades de partença

$$S = 50 \text{ km}^2$$

$$P_d = 230 \text{ mm}$$

$$K_A = \min\left(1, 1 - \frac{\log S}{15}\right) = 0,89$$

$$P_d' = K_A \cdot P_d = 204 \text{ mm}$$

$$NC = 80$$

$$P_0 = \frac{5000}{NC} - 50 = 13 \text{ mm}$$

$$P_0' = 1,3 \cdot P_0 = 16 \text{ mm}$$

$$\frac{I_1}{I_d} = 11$$

Fórmules emprades

$$I = \frac{P_d'}{24} \cdot \left[1 + \frac{(8^{0,1} - D^{0,1})}{(8^{0,1} - 1)}\right]$$

$$\Sigma P_{n-\Delta t} = n \cdot \Delta t \cdot I_{n-\Delta t} \text{ on : } n \in [2, 24]$$

$$\Sigma E = 0 \quad \text{si } \Sigma P \leq P_0$$

$$\Sigma E = \frac{(\Sigma P - P_0)^2}{\Sigma P + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } \Sigma P > P_0$$

$$E_{l-\Delta t} = \Sigma E_{l-\Delta t}$$

$$E_{n-\Delta t} = \Sigma E_{n-\Delta t} - \Sigma E_{(n-1)\Delta t} \text{ on : } n \in [2, 24]$$

Càlcul de l'hietograma de pluja neta

Temps (h)	I (mm/h)	ΣP (mm)	ΣE (mm)	E (mm)	Hietograma E (mm)
1	93,48	93,477	37,633	37,633	1,535
2	60,49	120,983	58,979	21,346	1,721
3	46,23	138,684	73,595	14,616	1,945
4	37,94	151,768	84,723	11,128	2,218
5	32,42	162,118	93,685	8,962	2,560
6	28,44	170,647	101,162	7,477	2,999
7	25,41	177,873	107,554	6,392	3,579
8	23,01	184,118	113,118	5,564	4,382
9	21,07	189,599	118,029	4,911	5,564
10	19,45	194,468	122,411	4,382	7,477
11	18,08	198,835	126,356	3,946	11,128
12	16,90	202,783	129,935	3,579	21,346
13	15,88	206,376	133,202	3,267	37,633
14	14,98	209,666	136,201	2,999	14,616
15	14,18	212,694	138,967	2,765	8,962
16	13,47	215,491	141,527	2,560	6,392
17	12,83	218,087	143,906	2,379	4,911
18	12,25	220,502	146,125	2,218	3,946
19	11,72	222,758	148,199	2,074	3,267
20	11,24	224,869	150,144	1,945	2,765
21	10,80	226,851	151,971	1,827	2,379
22	10,40	228,715	153,691	1,721	2,074
23	10,02	230,473	155,315	1,623	1,827
24	9,67	232,132	156,849	1,535	1,623

Hietograma de pluja neta

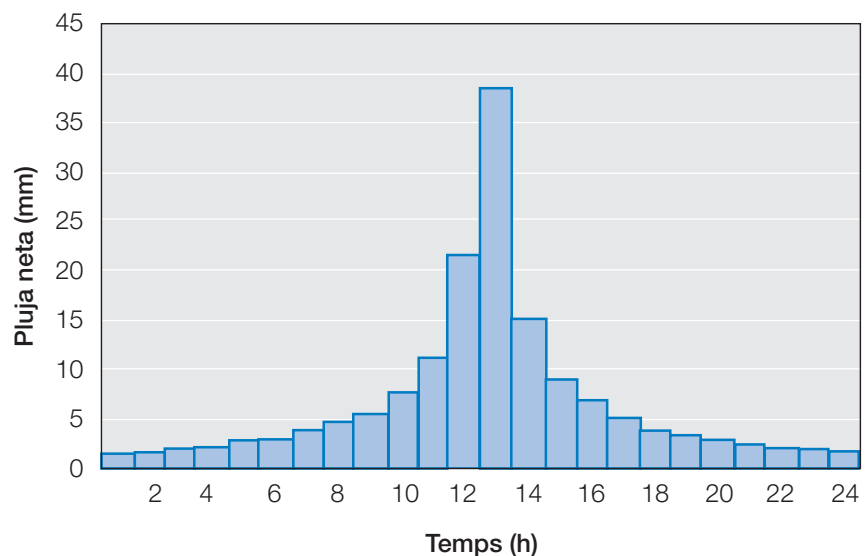


Figura 2.19. Càlcul d'un hietograma de pluja neta pel mètode dels blocs alternats.

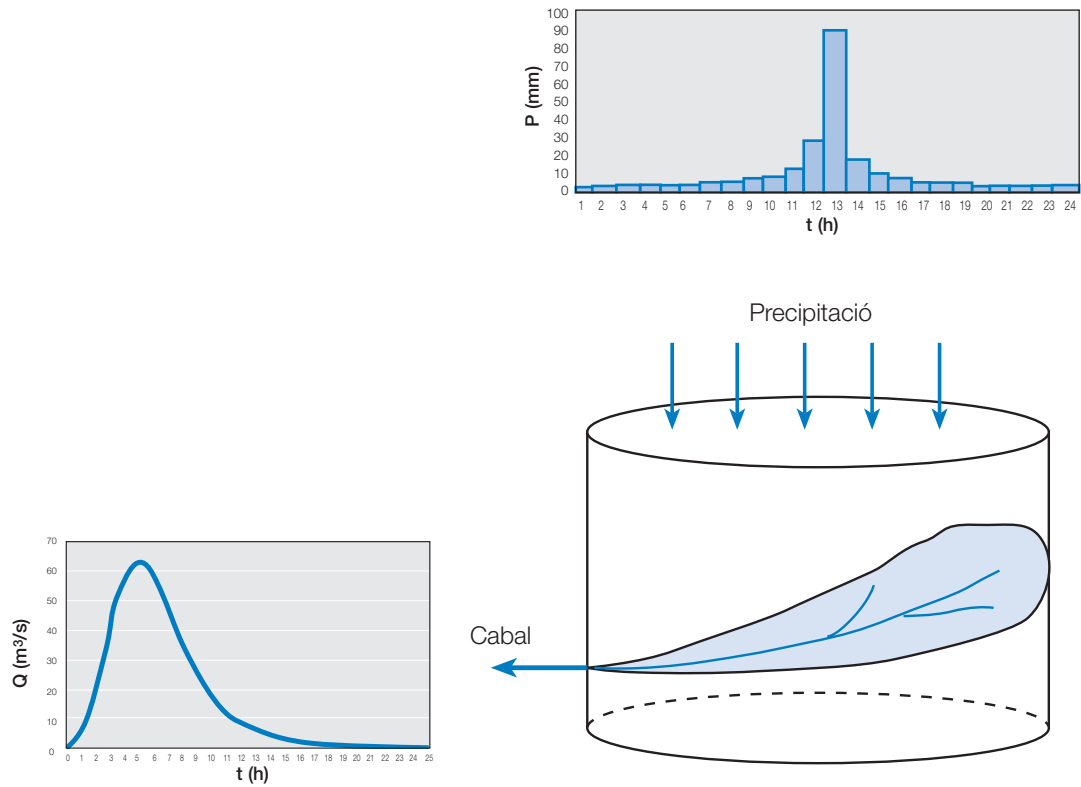


Figura 2.20. Transformació pluja-escorrentiu en un sistema hidrològic format per una conca única.

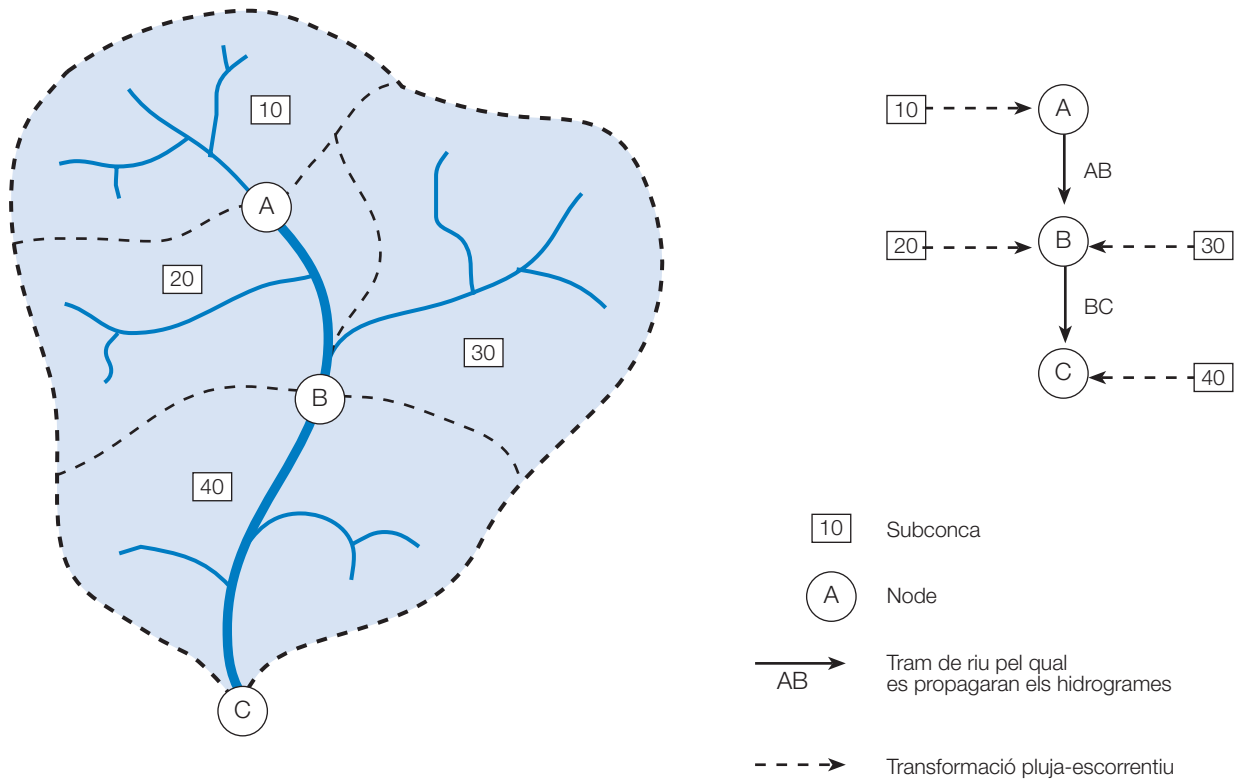


Figura 2.21. Divisió d'una conca en subconques i esquema hidrològic de la partició efectuada.

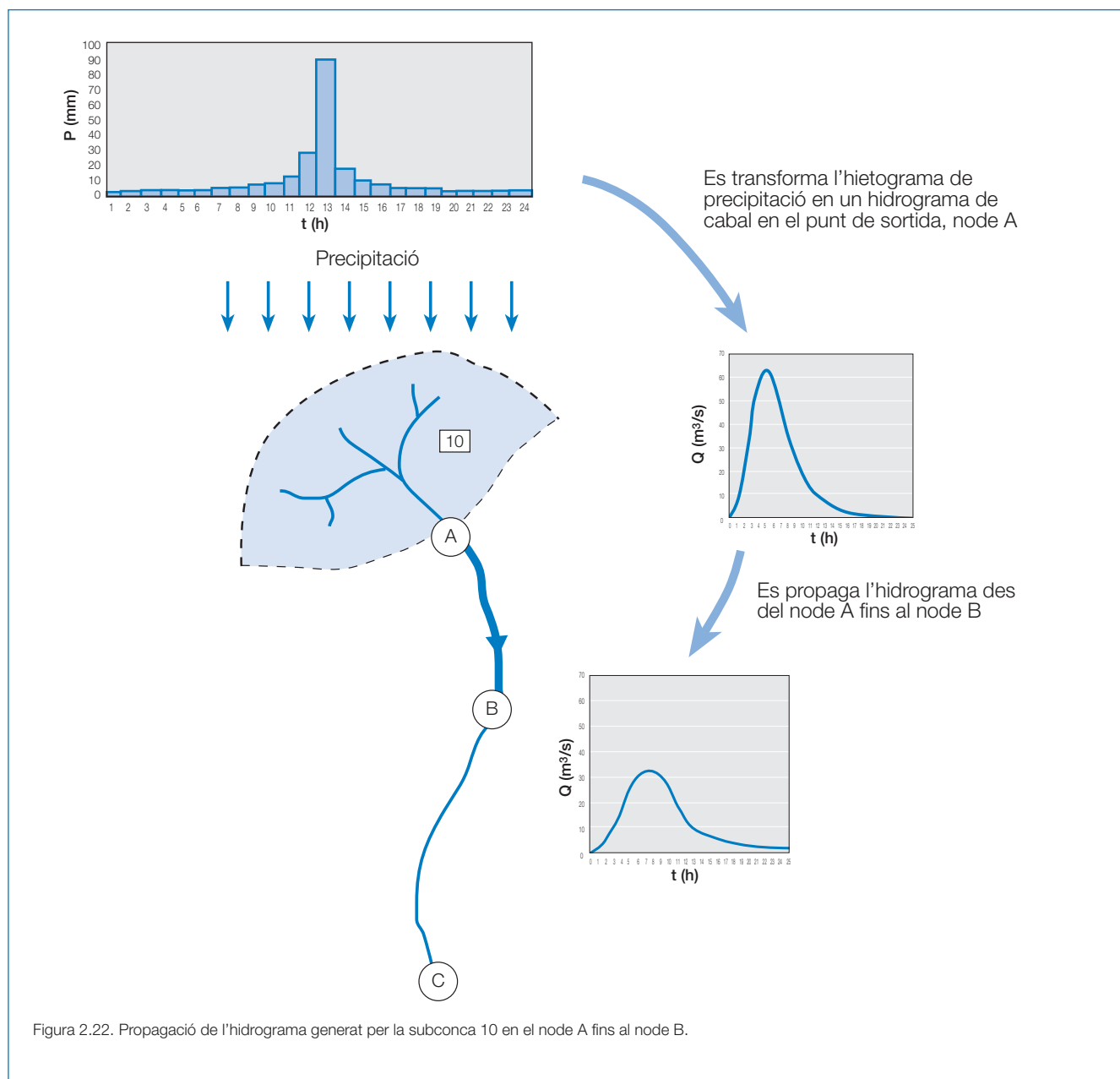


Figura 2.22. Propagació de l'hidrograma generat per la subconca 10 en el node A fins al node B.

2.9 Divisió d'una conca

(1) En la figura 2.20 es presenta esquemàticament la transformació pluja-escorrentiu en un sistema hidrològic. Es pot apreciar que cau un determinat hietograma de precipitació i la conca el transforma en un hidrograma al punt de desguàs.

(2) Al llarg d'aquest capítol s'han esmentat diverses raons per les quals a vegades és convenient dividir una conca en diferents subconques. Entre aquestes raons cal destacar:

- (a) La modelització de pluges amb hietogrames diferents en distintes àrees de la conca, punt 2.3 (5).
- (b) Aconseguir una representació adequada del seu comportament hidrològic a partir dels seus paràmetres hidromorfomètrics, punt 2.5 (6). Cal recordar que el temps de concentració es calcula fent servir la longitud del curs fluvial principal i el pendent mitjà d'aquest curs (apartat 2.6).

A aquestes raons cal afegir-ne altres, com ara les limitacions pròpies dels mètodes de transformació pluja-escorrentiu, que s'especificaran oportunament quan es descriguin en el capítol 3.

A tots aquests avantatges s'hi anteposa un clar inconvenient que és la complexitat en la seva modelització, com oportunament es farà palès en el capítol 3. En general, la modelització d'una conca composta ha d'ésser supervisada per un hidròleg expert.

(3) En la figura 2.7 s'ha presentat una divisió d'una conca en subconques. En aquesta figura s'aprecia que la longitud del riu en les subconques 1 i 2 és clarament diferent. També difereix l'amplada de cada subconca però es pot intuir que els cabals d'escorrentiu superficial generats per les subconques 1 i 2 seran del mateix ordre de magnitud.

Qualitativament, sembla clar que ambdues subconques no transformaran la pluja en escorrentiu de la mateixa manera. Per exemple, si es vol calcular el temps de concentració de

la conca, quin seria el curs fluvial principal que cal considerar?

(4) No és fàcil de donar criteris senzills per saber quan cal dividir una conca en subconques, per la qual cosa s'intentarà il·lustrar aquest concepte mitjançant unes indicacions generals i es deixarà per a l'experiència del tècnic la decisió final sobre el camí que s'ha de seguir.

En general, la divisió d'una conca en subconques s'ha de fer quan se sospiti que la transformació pluja-escorrentiu serà clarament heterogènia en diversos cursos fluvials presents a la conca i que els volums d'escorrentiu superficial generats per aquests cursos sigui del mateix ordre de magnitud.

(5) Un altre aspecte que s'ha de tenir en compte és que a cada subconca cal considerar un únic hietograma, per la qual cosa, si es vol variar espacialment la definició d'una pluja, cal dividir la conca en tantes àrees com hietogrames diferents es tinguin.

(6) Per acabar, convé recordar que els diferents mètodes de transformació pluja-escorrentiu en una conca única tenen límits d'aplicació que s'exposaran oportunament més endavant en aquesta guia.

En molts casos, aquests límits estableixen fites per a la superfície de la conca o per al temps de concentració. Per això, si la conca supera algun d'aquests límits caldrà subdividir obligatòriament la conca en diferents subconques.

2.10 Modelització de conques compostes

(1) En la figura 2.21 es presenta la subdivisió d'una conca en quatre subconques (10, 20, 30 i 40). Conceptualment, es pot aplicar tot el que s'ha vist fins ara quant a la construcció de l'hietograma de projecte i la seva transformació en escorrentiu (figura 2.20) per a cadascuna d'aquestes conques. Per tant, la subconca 10 generarà el seu hidrograma d'escorrentiu superficial en el node A, les subconques 20 i 30 en el node B i la subconca 40 en el node C. L'objectiu del càlcul hidrològic que s'està fent és obtenir l'hidrograma d'escorrentiu superficial en el punt de desguàs de la conca, és a dir, en el node C (vegeu la figura 2.21), per la qual cosa caldrà «transportar» els hidrogames generats per les subconques 10, 20 i 30 al node C. L'hidrograma de la subconca 40 ja s'obté de la transformació pluja-escorrentiu directament en el node C (vegeu la figura 2.22).

Aquest «transport» rep el nom de *propagació d'avingudes* o també *propagació d'hidrogames*, *trànsit d'avingudes* o *trànsit d'hidrogames*. En la figura 2.22 s'il·lustra el concepte de propagació de l'hidrograma d'escorrentiu superficial generat per la subconca 10 en el node A fins al node B.

En el node B es disposa dels hidrogames generats per les subconques 20 i 30 i aplicant la transformació pluja-escorrentiu corresponent, per la qual cosa l'hidrograma en el node B s'obté a partir dels hidrogames següents:

(a) Hidrograma generat per la subconca 10 a A degudament transat fins al node B.

(b) Hidrograma generat per la subconca 20.

(c) Hidrograma generat per la subconca 30.

En el capítol 3 es veurà com s'obté aquest hidrograma en el node B a partir dels tres que hi arriben.

Es procedirà de manera anàloga per obtenir l'hidrograma en el punt de desguàs de la conca, node C, que és l'hidrograma que realment es vol obtenir.

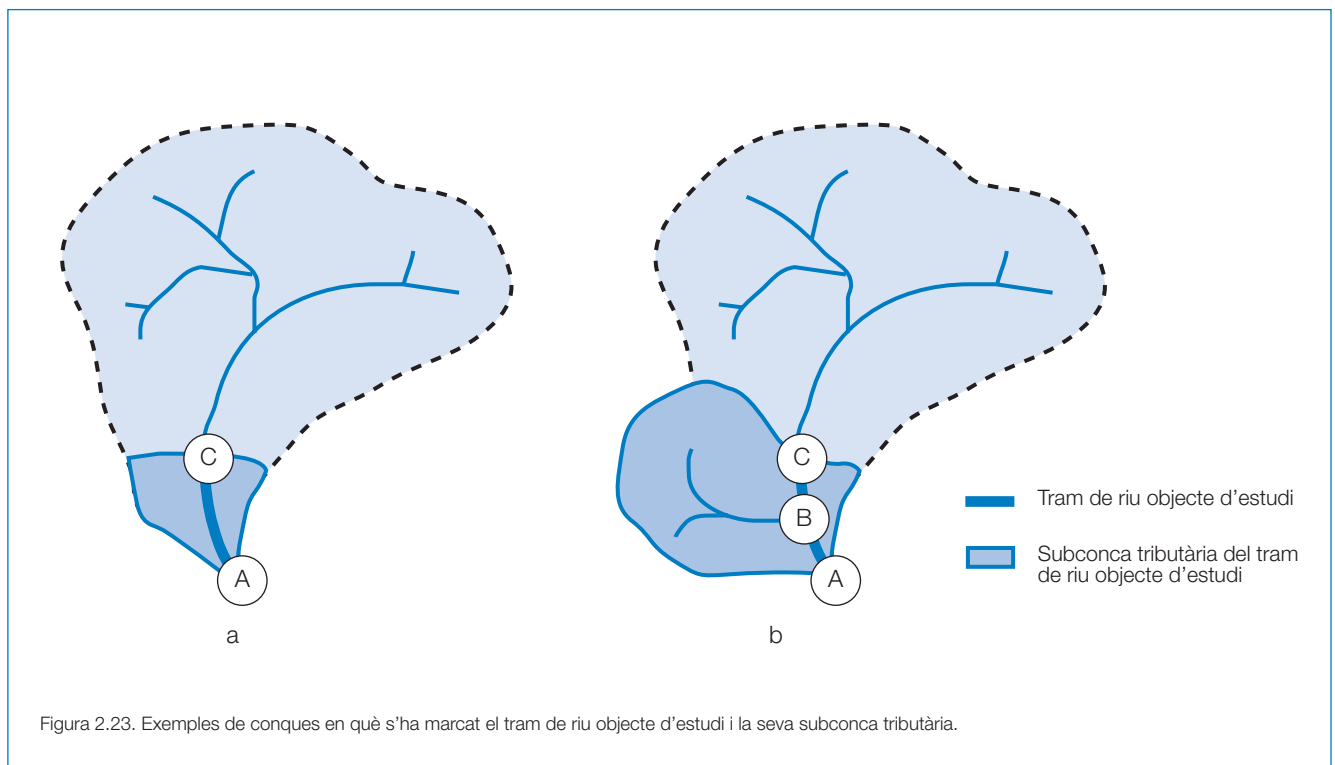
L'hidrograma en el node C s'obté a partir de l'hidrograma generat per la subconca 40 i del l'hidrograma en el node B transat pel tram de riu comprès entre B i C.

(2) L'objectiu de la *propagació d'hidrogames* és l'obtenció de l'hidrograma de cabal en un determinat punt del riu a partir de l'hidrograma de cabal en un altre punt del riu i de la caracterització del tram de riu entre tots dos punts.

És a dir, que l'hidrograma generat per la subconca 10 en el node A s'haurà de propagar fins al node B, coneixent el tram de riu entre A i B, per obtenir l'hidrograma generat per la subconca 10 en B. És per això que es partirà de l'hidrograma generat per la subconca 10 en el node A (relació de cabals enfront de temps) i es transitarà pel tram comprès entre A i B per obtenir l'hidrograma en el node B.

En el capítol 4 s'exposaran detalladament els diferents mètodes de propagació d'hidrogames.

(3) Un altre aspecte interessant de destacar és la transformació pluja-escorrentiu de la subconca 20. Com es pot apreciar en la figura 2.20, part del curs fluvial que la genera passa pel mateix curs principal, per la qual cosa en la caracterització d'aquesta subconca s'haurà de considerar com a curs fluvial la suma de la llera tributària més la part del curs principal situada entre la desembocadura del curs tributari i el node B.



(4) En l'apartat 2.8.1 s'ha dit que considerar que la durada efectiva D de la pluja sigui de 24 hores podria ser excessivament conservador si la conca es modelitza com una conca composta.

És evident que, tal com s'ha definit l'hietograma de projecte, a partir d'una corba IDF, el valor de les columnes amb més precipitacions és independent de la durada efectiva D (vegeu l'apartat 2.8.3). Per tant, considerar una durada efectiva més gran només servirà per allargar l'hietograma sense augmentar la punta de cabal, tal com es veurà en el capítol 3.

Per tant, una durada efectiva més gran de la pluja de projecte implica que els hidrogrames generats per cada subconca tindran volums més elevats d'aigua, per la qual cosa en el punt de desguàs s'uniran hidrogrames amb més volum amb el consegüent augment de la punta de cabal en aquest punt, excepte en el cas hipotètic que en aquest punt coincidissin en un mateix instant les puntes dels hidrogrames generats per les diferents subconques.

A la pràctica, aquesta durada efectiva D és un dels paràmetres de calibració dels quals es disposa perquè els resultats de la simulació numèrica que s'està fent coincideixi sensiblement amb les dades obtingudes de la recopilació d'avingudes històriques i la investigació de camp.

Si no es disposa de cap dada per calibrar o ni tan sols contrastar l'hietograma obtingut en el punt de sortida de la conca, caldrà considerar una durada efectiva de 24 hores.

2.11 Perfil de cabals

(1) Fins ara s'ha considerat que l'objectiu era obtenir l'hietograma d'escorrentiu superficial en el punt de desguàs de la conca estudiada per poder calcular seguidament els calats assolits amb el pas d'aquests cabals i, d'aquesta manera, poder determinar la superfície inundada pels cabals esmentats.

Es vol assenyalar que el que s'ha descrit en el paràgraf anterior no és del tot exacte, ja que en principi el que es vol obtenir és la superfície inundada per l'escorrentiu superficial generat per una precipitació determinada. D'altra banda, el càlcul rigorós de calats a cada secció del riu s'hauria de fer amb el cabal que realment hi passa i no amb el cabal que passa al final del tram objecte de l'estudi.

En la figura 2.23 es presenten dos exemples de conques. En les dues s'ha remarcat el tram de riu objecte d'estudi i les subconques tributàries d'aquest tram. S'aprecia clarament que l'error comès a la conca *a* calculant els calats amb el cabal d'escorrentiu obtingut en el punt de desguàs de la conca (node A) és gairebé menyspreable.

En canvi, a la conca *b* aquest error ja és important, per la qual cosa caldrà obtenir necessàriament el perfil de cabals, és a dir, els cabals en cada secció per estudiar. La manera de procedir podria ser establint un nou node B i calcular el tram CB amb l'hietograma de cabals obtingut en C, i el tram BA, amb l'hietograma obtingut en B.

3. Mètodes de transformació pluja-escorrentiu

3.1 Generalitats

(1) No és l'objectiu d'aquesta guia descriure detalladament tots i cadascun dels mètodes disponibles per a la transformació pluja-escorrentiu, sinó més aviat fer una síntesi dels que es consideren més adequats, com també indicar al lector la bibliografia especialitzada on es troben convenientment desenvolupats i explicar detalladament els que s'utilitzen més sovint.

En aquest capítol es pretén exposar els avantatges i els inconvenients de cada mètode, incidint en els seus límits d'aplicació, i donar unes recomanacions per al seu ús en l'estimació d'avingudes.

(2) Els mètodes hidrometeorològics permeten estudiar el comportament hidrològic d'una conca única com a resposta a l'acció d'una precipitació, tenint en compte l'estat en què es troba la mateixa conca (humitat, vegetació, presència de neu, aigües artesianes, etc.).

L'objectiu dels mètodes hidrometeorològics és el càlcul de l'hidrograma d'avinguda o del cabal punta, si es fan servir mètodes simplificats. El gran avantatge, i al mateix temps la gran dificultat, de l'anàlisi hidrometeorològica consisteix en la coordinació de tota la informació hidrològica, meteorològica i de l'estat de la conca.

(3) Aquests mètodes permeten abordar l'estudi de conques no aforades per extrapolaració dels paràmetres hidrològics regionalitzats, obtinguts de l'anàlisi de conques aforades que disposen de sèries de cabals suficientment fiables.

A partir d'aquests estudis, diversos organismes i investigadors han publicat taules i gràfics en què se suggereixen valors estimatius dels diferents paràmetres hidrològics segons l'estat de la conca.

No obstant això, la varietat de dades disponibles i la dificultat d'avaluar i representar d'una manera senzilla els mecanismes amb influència en la resposta hidrològica, dona lloc també a certes incerteses en els cabals d'avinguda que, unides a les incerteses de tipus estadístic en el cas d'avingudes d'alt període de recurrència, fa que aquests mètodes només siguin aproximats.

Per això, és molt convenient fer-ne la calibració i, en la mesura que sigui possible, considerar tant el registre d'avingudes històriques com els resultats del tractament estadístic de les sèries d'aforaments en aquelles seccions en les quals es disposi de dades adequades.

(4) En la figura 2.20 es representa gràficament el procés de transformació pluja-escorrentiu en un sistema hidrològic format per una única conca.

Des d'un punt de vista general, aquesta transformació es pot fer amb *mètodes distribuïts* o *agregats*.

Els *models distribuïts* divideixen la superfície de la conca en cel·les, distribueixen la precipitació entre les pèrdues i els diferents tipus de fluxos (superficial, subsuperficial i subterrani) i calculen la circulació d'aquests fluxos per la conca. Aquest tipus de models està actualment en procés de desenvolupament i no s'exposaran en aquesta guia.

Els *models agregats* són els que implícitament s'han explicat en el capítol 2. En aquest tipus de models es considera que la transformació pluja-escorrentiu a la conca es fa en tota la conca d'una manera unitària. A partir d'ara, tot el que es desenvoluparà de la transformació pluja-escorrentiu serà fet servir models agregats.

Aquesta transformació es pot fer bàsicament amb tres metodologies:

(a) *Transformació pluja-escorrentiu amb un model de circulació contínua*. Aquest tipus de models calculen en continu el balanç d'aigua en els diferents processos hidrològics (vegeu la figura 2.2).

(b) *Transformació pluja-escorrentiu d'un xàfec*. Són models que simulen la transformació d'un hietograma de precipitació en un hidrograma d'escorrentiu superficial en el punt de sortida de la conca.

(c) *Mètodes simplificats*. Són models que calculen el cabal punta de l'hidrograma, és a dir, el cabal màxim d'escorrentiu superficial suposant una precipitació d'intensitat constant tant espacialment com temporalment en tota la conca.

(5) Els models de circulació contínua necessiten programes informàtics potents de simulació numèrica i un esforç considerable de calibració dels nombrosos paràmetres per modelitzar els diferents processos hidrològics (evapotranspiració, evaporació en llacs i embassaments, flux subsuperficial, intercepció, etc.).

Aquests models permeten la modelització tant de conques úniques com de conques compostes, ja que transformen hietogrames de precipitació en hidrogrames en el punt de sortida. En l'apartat 2.1 ja s'ha dit que en aquesta guia no es desenvoluparien detalladament i es remet el lector a la bibliografia especialitzada.

(6) El mètode de transformació pluja-escorrentiu d'una pluja més estès és el que utilitza el concepte d'hidrograma unitari, proposat per primer cop per Sherman (1932), i és l'únic que s'exposarà detalladament en aquesta guia. Aquest mètode permet l'anàlisi hidrològica transformant l'hidrograma de pluja neta en un hidrograma en el punt de desguàs de la conca.

El concepte d'hidrograma unitari habitualment no dóna bons resultats quan s'aplica a conques predominantment urbanes. En aquest tipus de conques és convenient fer servir un mètode alternatiu, anomenat *mètode de l'ona cinemàtica*, que considera la conca d'una manera molt detallada i es pot discriminar, si es vol, carrer per carrer.

(7) El mètode simplificat d'ús més estès és el *mètode racional*, i serà l'únic d'aquest tipus que es desenvoluparà en aquesta guia. Es va deduir al segle XIX i encara es continua utilitzant per la seva facilitat d'ús i els bons resultats que proporciona si es verifiquen les hipòtesis en què es basa la seva formulació.

3.2 Mètode racional

(1) El mètode racional calcula el cabal màxim Q_p d'escorrentiu superficial d'una pluja d'intensitat I que cau sobre una conca amb una superfície S , que comença de manera instantània i és constant durant un temps mínim igual al temps de concentració de la conca T_c .

Si la pluja neta fos igual a la precipitació (que equival a dir que el llindar d'escorrentiu és nul), el cabal Q_p seria $I \cdot S$, en unitats coherents.

La detracció d'aigua per evapotranspiració i infiltració (vegeu la figura 2.10) es realitza mitjançant el coeficient d'escorrentiu C , que és la relació entre el cabal punta Q_p i el cabal $I \cdot S$.

Per tant, la fórmula bàsica del mètode racional és:

$$Q_p = C \cdot I \cdot S \quad (3.1)$$

On:

Q_p cabal punta (m^3/s)
 C coeficient d'escorrentiu (adimensional)
 I intensitat de pluja (m/s)
 S superfície de la conca (m^2)

Les unitats en què estan expressades les diferents variables a la fórmula 3.1 no són d'ús comú en aquest tipus d'estudis, per la qual cosa és convenient fer un canvi d'unitats:

$$Q_p = \frac{C \cdot I \cdot S}{3,6} \quad (3.2)$$

On:

Q_p cabal punta (m^3/s)
 C coeficient d'escorrentiu (adimensional)
 I intensitat de pluja (mm/h)
 S superfície de la conca (km^2)

La hipòtesi d'intensitat de pluja neta constant no és real i a la pràctica existeixen variacions en la seva distribució temporal que augmenten els cabals punta. Per tant, és necessari aplicar a la fórmula 3.2 un coeficient de majoració K del cabal punta calculat per corregir l'error esmentat. Aquest coeficient s'anomena *coeficient d'uniformitat*.

De l'anàlisi de moltes pluges en nombroses conques, Téméz va deduir la fórmula següent per al càlcul del coeficient d'uniformitat:

$$K = 1 + \frac{T_c^{1,25}}{T_c^{1,25} + 14} \quad (3.3)$$

On:

K coeficient d'uniformitat (adimensional)
 T_c temps de concentració, expressat en hores

Per tant, amb l'aplicació d'aquest coeficient d'uniformitat, la fórmula del mètode racional s'expressa com:

$$Q_p = K \cdot \frac{C \cdot I \cdot S}{3,6} \quad (3.4)$$

On:

Q_p cabal punta (m^3/s)
 C coeficient d'escorrentiu (adimensional)
 I intensitat de precipitació (mm/h) corresponent a una durada efectiva de la pluja D igual al temps de concentració T_c de la conca
 S superfície de la conca (km^2)

A la Península s'acostuma a calcular el coeficient d'escorrentiu amb la fórmula deduïda per Téméz a partir del mètode de l'SCS, la qual, a més a més, va ser adoptada per la instrucció de carreteres (MOPU, 1990):

$$C = \frac{(P'_d - P'_0) \cdot (P'_d + 23 \cdot P'_0)}{(P'_d + 11 \cdot P'_0)^2} \quad (3.5)$$

On:

C coeficient d'escorrentiu (adimensional)
 P'_d volum de precipitació diària (mm)
 P'_0 llindar d'escorrentiu (mm)

De l'anàlisi dels resultats obtinguts en moltes conques utilitzant el mètode racional tal com s'ha exposat, s'ha conclòs que era convenient la reducció del valor de precipitació diària P_d amb un coeficient K_A , anomenat *coeficient de simultaneïtat* (punt 2.8.2 (4)), i la majoració del llindar d'escorrentiu amb un coeficient r , anomenat *factor regional*, que reflecteix la variació regional de la humitat habitual en el sòl al començament de les pluges significatives (punt 2.7 (4)).

La intensitat de precipitació I que cal fer servir en l'aplicació d'aquest mètode s'haurà de calcular mitjançant la fórmula 2.10, considerant una durada efectiva de la pluja igual al temps de concentració T_c de la conca, calculat segons que s'ha exposat en l'apartat 2.6.

(2) El límit de validesa del mètode racional ha anat canviant a mesura que s'hi han introduït millores, com ara el coeficient de simultaneïtat. No hi ha coincidència d'opinions sobre quins han de ser els límits d'aplicabilitat del mètode, tal com s'ha exposat en aquesta guia.

Alguns investigadors (Témez, 1978; Ferrer, 1993; JA, 1994) han proposat que els resultats són vàlids per conques predominantment rurals la superfície de les quals no superi els 3.000 km² i amb un temps de concentració comprès entre les 0,25 i les 24 hores.

Recentment, altres investigadors han manifestat els seus dubtes respecte a l'aplicació de mètodes de conca única més enllà de la superfície afectada per les pluges associades al període de retorn considerat, que en l'àmbit mediterrani es pot estimar entre 400 i 600 km².

A l'Agència s'ha estudiat a bastament aquest aspecte i s'ha conclòs que a Catalunya es pot fixar com a límit d'aplicabilitat del mètode racional el següent:

- (a) La superfície de la conca S no ha de superar els 1.000 km².
- (b) La conca ha de ser predominantment rural.
- (c) El temps de concentració T_c no ha de ser inferior a les 0,25 hores ni superior a les 24 hores.

A aquests límits cal afegir els que s'especifiquen en l'apartat 2.8, propis dels mètodes de conca única.

3.3 Transformació pluja-escorrentiu d'una pluja

3.3.1 Hidrograma unitari

(1) *L'hydrograma unitari* és l'hydrograma d'escorrentiu directe en el punt de desguàs d'una conca generat per la pluja neta d'1 cm uniforme en tota la conca durant un temps D ,

anomenat durada efectiva. En la figura 2.14 es mostra un exemple d'hydrograma unitari. A la durada de l'hydrograma t_b se l'anomena temps base i tal com s'ha vist en l'apartat 2.5, per a la mateixa definició del temps de concentració, es compleix que:

$$t_b = D + T_c \quad (3.6)$$

On:

- t_b temps base, és a dir, durada de l'hydrograma d'escorrentiu directe
- D durada efectiva, és a dir, durada de la pluja neta
- T_c temps de concentració

Tots aquests valors estan expressats en unitats coherents.

(2) La durada efectiva D de la pluja neta està condicionada pel temps base t_b , que depèn del mètode utilitzat per separar l'escorrentiu superficial, i en realitat moltes vegades és incert. Atès l'àmbit d'aplicació d'aquesta guia, no s'exposaran les relacions entre aquests conceptes, sinó que s'especificarà una metodologia per calcular-los tot considerant que l'escorrentiu directe únicament prové de la pluja neta.

Qualitativament es pot veure que el temps base serà més curt si es considera que l'escorrentiu directe només inclou l'escorrentiu superficial i més llarg si a l'escorrentiu directe s'hi inclou l'escorrentiu subsuperficial.

(3) Les hipòtesis considerades a l'aplicació de l'hydrograma unitari són les següents:

La pluja neta té una intensitat constant durant un temps mínim igual a la durada efectiva D .

La pluja neta està uniformement distribuïda en tota la conca. A la pràctica es fa servir el coeficient de simultaneïtat K_A , exposat en la fórmula 2.7 per corregir aquesta rigidesa quant al càlcul del valor punta.

(a) *Temps base constant*. Per a una conca donada, el temps base t_b és el mateix per a qualsevol pluja que tingui una durada determinada (superior a la durada efectiva D), independentment del volum total de pluja neta.

(b) *Linealitat*, que comprèn la *proporcionalitat* i l'*additivitat* d'hydrogrames.

La *proporcionalitat* d'hydrogrames consisteix en el fet que les ordenades de tots els hydrogrames d'escorrentiu superficial amb el mateix temps base són directament proporcionals al volum total de pluja neta. Per tant, les ordenades d'aquests hydrogrames són proporcionals entre si, com s'il·lustra en la figura 3.2.

L'additivitat d'hidrogrames consisteix en el fet que es poden superposar els hidrogrames generats per diferents pluges netes. Per tant, l'hidrograma que resulta d'un període de pluja donat es pot superposar a hidrogrames resultants de períodes plujosos precedents (vegeu la figura 3.3). L'hidrograma total serà l'obtingut de la superposició i la suma de tots i cadascun dels hidrogrames corresponents a cadascuna de les columnes d'un hietograma donat.

Aquesta propietat de la linealitat facilita enormement l'aplicació d'aquest mètode, ja que, donat un hietograma de precipitació com el de la figura 2.19, l'hidrograma d'escorrentiu superficial en el punt de sortida s'obindrà de la superposició de cadascun dels hidrogrames generats per cadascuna de les columnes de pluja neta de l'hietograma.

(4) Les hipòtesis *a* i *b* limiten la superfície màxima a la qual és aplicable aquest mètode. A aquesta limitació s'hi afegeix la poca flexibilitat en la determinació de la forma de l'hidrograma unitari, per la qual cosa la superfície màxima de la conca a la qual es pot aplicar l'hidrograma unitari es fixa en 50 km². Per tant, si la conca té una àrea superior caldrà dividir la conca en diferents subconques. Excepcionalment, és admissible que alguna conca superi aquest valor, però sense arribar mai als 80 km² i sempre que es compleixi que la suma de les subconques amb més de 50 km² no suposin més del 20 % de la superfície total de la conca.

Evidentment, aquesta divisió també s'haurà d'efectuar si es donen algunes de les circumstàncies exposades en l'apartat 2.8, encara que la superfície de la conca sigui inferior als 50 km².

(5) Es vol assenyalar expressament que si no es vol obtenir l'hidrograma d'escorrentiu superficial en el punt de desguàs i només cal calcular el cabal punta, els resultats obtinguts pel mètode racional solen ser molt més precisos que els obtinguts de l'aplicació del mètode de l'hidrograma unitari, sempre que no es doni alguna de les circumstàncies que limiten l'aplicabilitat d'un mètode de conca única exposades en l'apartat 2.8.

(6) En principi, per obtenir l'hidrograma unitari d'una determinada conca es necessiten hietogrames i hidrogrames reals, obtinguts d'un pluviògraf i un limnigraf, respectivament. L'hidrograma resultant només és aplicable en el punt on està instal·lat el limnigraf i, a causa que no és estrictament certa la hipòtesi de linealitat, només per a xàfecs similars al que es considera en la seva deducció.

Per trobar hidrogrames unitaris per a altres punts de la conca o per a conques en les quals no es disposi de pluviògrafs ni limnigrafs s'han desenvolupat diversos mètodes:

(a) *Hidrogrames unitaris sintètics*, que permeten construir hidrogrames unitaris a partir d'hidrogrames tipus. Aquesta metodologia és la que s'aplica habitualment a la pràctica i és la que s'exposarà detalladament en l'apartat següent. Una de les seves limitacions apareix quan el comportament hidrològic de la conca està molt condicionat per l'existència d'embassaments, cas en el qual caldrà sospesar la possibilitat d'aplicar algun dels mètodes que s'esmenten a continuació.

(b) *Mètode de l'embassament lineal*, que calcula l'hidrograma unitari generat per un flux d'aigua que passa per un embassament que té una corba *volum d'aigua emmagatzemada enfront de cabal de sortida de l'embassament lineal*.

(c) *Model de Nash*, que calcula l'hidrograma unitari generat per una sèrie d'embassaments idèntics que tenen una corba *volum d'aigua emmagatzemada enfront de cabal de sortida de l'embassament lineal*. Constitueix una extensió del mètode de l'embassament lineal.

Els mètodes *b* i *c* no es desenvoluparan en aquesta guia, ni tampoc els mètodes per generar hidrogrames unitaris a partir dels hietogrames i els hidrogrames reals, per la qual cosa es convida el lector interessat en aquest tema a consultar les referències bibliogràfiques següents: HEC (2000) i Chow (1994).

3.3.2 Hidrogrames unitaris sintètics

(1) La dificultat pràctica de disposar d'hietogrames i hidrogrames en el punt de desguàs de cada sistema hidrològic que es vulgui analitzar ha motivat que diversos organismes i investigadors hagin desenvolupat tècniques per generar hidrogrames unitaris a partir únicament de les característiques hidrològiques de la conca.

La metodologia que s'ha seguit és la deducció d'hidrogrames unitaris sintètics obtinguts de l'anàlisi del comportament de moltes altres conques, oportunament adaptats a la conca per estudiar utilitzant paràmetres característics de la mateixa conca.

(2) Els hidrogrames unitaris sintètics s'utilitzen per generar hidrogrames unitaris d'una determinada conca quan no es disposa d'hietogrames i hidrogrames reals en el seu punt de desguàs.

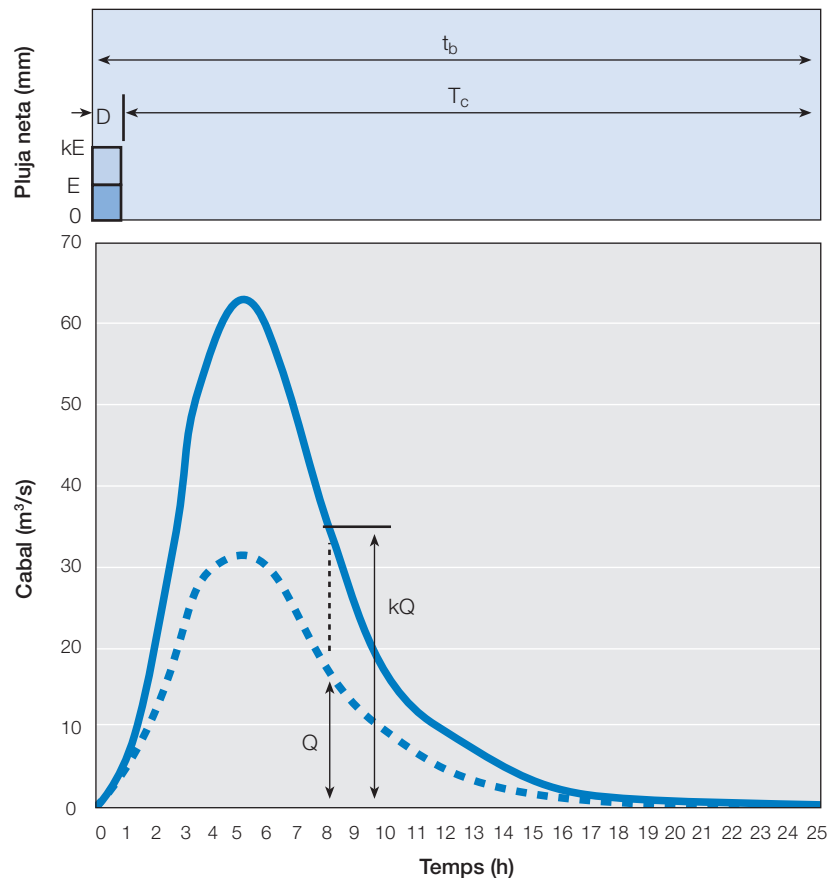


Figura 3.2 Il·lustració de la hipòtesi de proporcionalitat dels hidrogrames unitaris.

(3) Existeixen tres tipus d'hydrogrames sintètics:

- (a) Els que relacionen les característiques de l'hydrograma amb les característiques de la conca (Snyder, 1938; Gray, 1961; Témez, 1978).
- (b) Els que es basen en hydrogrames adimensionals (SCS, 1972).
- (c) Els que es basen en models d'emmagatzematge de conca (Clark, 1943).

En aquesta guia únicament es desenvoluparà detalladament l'hydrograma unitari sintètic de l'SCS, per la seva facilitat d'ús i els bons resultats que proporciona. La descripció detallada de la resta es pot consultar a Chow (1994), CNEGP (1997) i MOPU (1987).

3.3.3 Hidrograma adimensional de l'SCS

(1) L'SCS va deduir un hydrograma adimensional basat en l'estudi del comportament de nombroses conques petites, predominantment rurals, dels Estats Units.

En la figura 3.4 es presenta l'hydrograma adimensional de l'SCS, en el qual s'expressa la relació del cabal Q respecte

al cabal punta Q_p enfront de la relació entre el temps t i el temps de pic, T_p .

Cal adonar-se que l'hydrograma representat en la figura 3.4 no és un hydrograma unitari pròpiament dit, sinó un hydrograma adimensional que es farà servir per generar l'hydrograma unitari de la conca que es vol estudiar un cop coneguts Q_p i T_p .

(2) Els valors de Q_p i T_p es poden estimar utilitzant el model simplificat d'un hydrograma unitari triangular com el que es mostra en la figura 3.5.

De l'anàlisi d'un gran nombre d'hydrogrames unitaris, l'SCS va obtenir que el temps de recessió T_R , el temps entre el pic de cabal i el final de l'hydrograma (vegeu la figura 2.14) variava entre $1,15 \cdot T_p$ i $3,30 \cdot T_p$ i van concloure que el valor de T_R d' $1,67 \cdot T_p$ era el més adequat per a un gran nombre de conques. Es vol advertir que si es volgués canviar aquesta relació caldria construir un nou hydrograma adimensional.

Com que l'àrea sota l'hydrograma unitari hauria de ser igual a un escorrentiu de 10 mm, en el qual s'igualés:

$$\text{Volum pluja neta} = \text{Volum escorrentiu}$$

$$0,01 \cdot S = \frac{1}{2} \cdot Q_p \cdot (2,67 \cdot T_p)$$

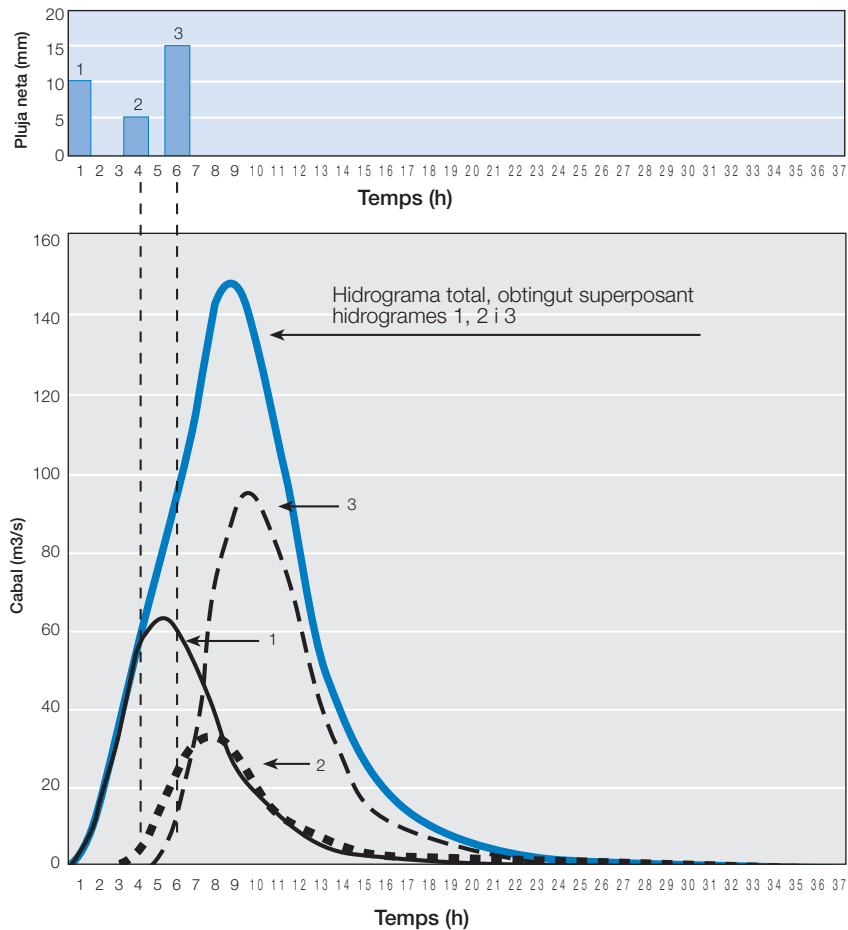


Figura 3.3. Il·lustració de la superposició d'hidrogrames. Els hidrogrames generats per les pluges netes 1, 2 i 3 se superposen per generar l'hidrograma total.

On:

$$T_P = \frac{D}{2} + t_{gp} \quad (3.8)$$

S superfície de la conca, expressada en m^2

Q_P cabal punta, expressat en m^3/s

T_P temps de pic, expressat en s

I canviant les unitats s'obté que el cabal punta Q_P es calcula amb l'expressió següent:

$$Q_P = \frac{2,08 \cdot S}{T_P} \quad (3.7)$$

On:

S superfície de la conca, expressada en km^2

Q_P cabal punta, expressat en m^3/s

T_P temps de pic, expressat en hores

De la figura 3.5 també es dedueix que el temps de pic T_P es pot obtenir com:

On:

T_P temps que triga a arribar el cabal punta

D durada efectiva

t_{gp} temps de retard. A la literatura anglosaxona se'l sol anomenar T_{lag}

Tots aquests valors estan expressats en unitats coherents.

L'SCS va deduir de l'estudi dels hidrogrames unitaris de moltes conques rurals grans i petites que es complia la relació següent:

$$t_{gp} \approx 0,6 \cdot T_c \quad (3.9)$$

El problema d'aquesta relació és que depèn de la fórmula emprada en l'estimació del temps de concentració T_c .

Hidrograma adimensional de l'SCS	
t/T_p	Q/Q_p
0,0	0,000
0,1	0,030
0,2	0,100
0,3	0,190
0,4	0,310
0,5	0,470
0,6	0,660
0,7	0,820
0,8	0,930
0,9	0,990
1,0	1,000
1,1	0,990
1,2	0,930
1,3	0,860
1,4	0,780
1,5	0,680
1,6	0,560
1,7	0,460
1,8	0,390
1,9	0,330
2,0	0,280
2,2	0,207
2,4	0,147
2,6	0,107
2,8	0,077
3,0	0,055
3,2	0,040
3,4	0,029
3,6	0,021
3,8	0,015
4,0	0,011
4,5	0,005
5,0	0,000

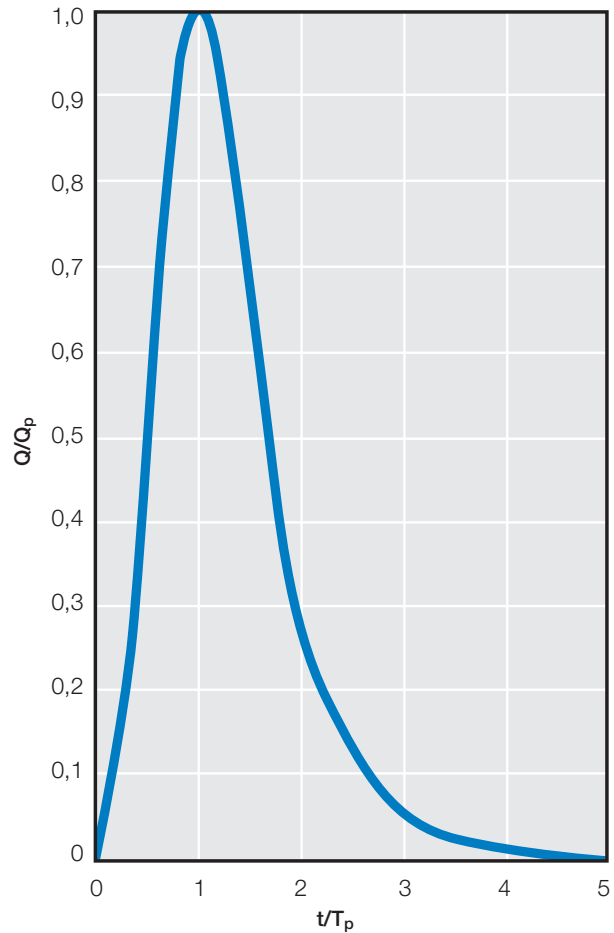


Figura 3.4. Hidrograma adimensional de l'SCS.

En l'apartat 2.6 (4) ja s'ha comentat l'existència de diferents definicions del càlcul del temps de concentració T_c . L'expressió 3.9 s'ha deduït amb la definició exposada en el punt 2.6 (4), que és diferent de la utilitzada en la deducció de les expressions analítiques presentades en l'apartat 2.8. A causa d'aquesta divergència, el CEDEX ha fet diverses calibracions i ha obtingut que, fent servir les fórmules 2.3, 2.4 i 2.5, segons s'escaigui, per al càlcul de T_c , es compleix la relació següent:

$$t_{gp} \approx 0,31 \cdot T_c \quad (3.10)$$

Per la qual cosa, el temps de pic T_p es pot calcular amb l'expressió següent:

$$T_p = \frac{D}{2} + 0,31 \cdot T_c \quad (3.11)$$

On:

- T_p temps que triga a arribar al cabal punta
- D durada efectiva
- T_c temps de concentració, calculat segons el que s'indica en l'apartat 2

Tots aquests valors estan expressats en unitats coherents. Es vol tornar a recalcar que les expressions 3.10 i 3.11 són vàlides si es calcula el temps de concentració T_c segons el que s'indica en l'apartat 2.8.

(3) Per a una modelització adequada del pic de l'hidrograma convé que es compleixi la relació següent:

$$D \leq 0,29 \cdot t_{gp} \quad (3.12)$$

On:

- D durada efectiva
- t_{gp} temps de retard

Tots aquests valors estan expressats en unitats coherents.

Tenint en compte l'estimació de t_{gp} indicada a la fórmula 3.10, la relació 3.12 és equivalent a:

$$D \leq 0,09 \cdot T_c \quad (3.13)$$

On:

D durada efectiva

T_c temps de concentració, calculat segons el que s'indica en l'apartat 2.8

Tots aquests valors estan expressats en unitats coherents.

(4) Aquesta durada efectiva D és l'interval de discretització de l'hietograma de pluja neta, és a dir, l'interval de temps que correspon a cada columna.

(5) En la figura 3.6 es presenta l'aplicació de l'hidrograma unitari a la conca considerada en la determinació de l'hietograma de pluja neta presentat en la figura 2.16, en la qual s'ha fixat una durada efectiva D d'1 hora.

El càlcul dels parells de punts (t, Q) s'obtenen de multiplicar els valors de l'hidrograma unitari adimensional presentat en la figura 3.4 per T_P i Q_P , respectivament.

3.3.4 Aplicació de l'hidrograma unitari

Per il·lustrar l'aplicació de l'hidrograma unitari es calcularà l'hidrograma resultant de la transformació pluja-escorrentiu de la precipitació definida per l'hietograma de la figura 2.16 en una conca caracteritzada per una superfície S de 172 km², una longitud L de 32 km, un pendent mitjà j del 0,003 i un grau d'urbanització μ del 0 %.

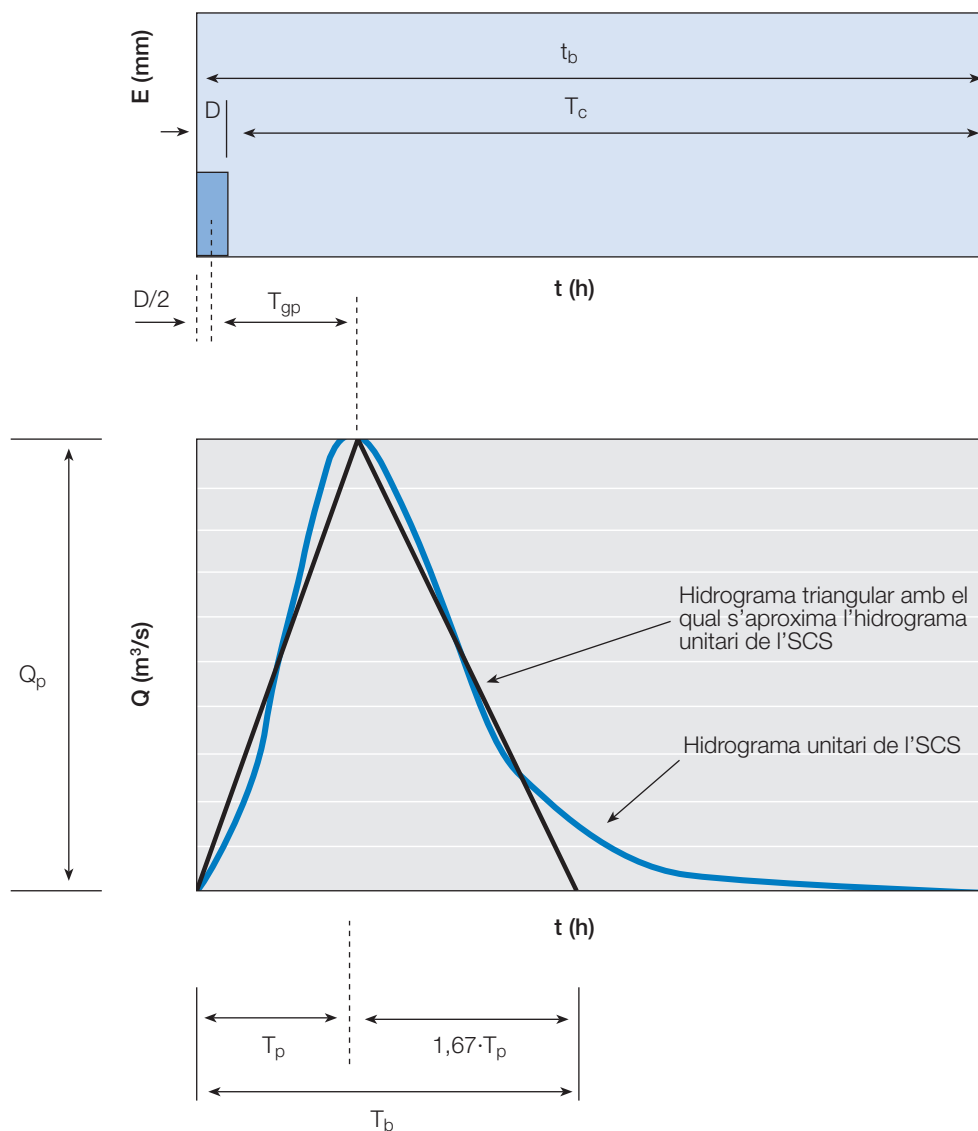


Figura 3.5. Model simplificat d'un hidrograma unitari triangular.

Dades de partença

$$S = 50 \text{ km}^2$$

$$L = 20,00 \text{ km}$$

$$j = 0,008$$

$$\mu = 0$$

$$T_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{j^{0,25}} \right)^{0,76} = 11,323 \text{ h}$$

$$D = 1h ; D \leq 0,09 \cdot T_c = 1,019 \text{ h}$$

$$T_p = \frac{D}{2} + 0,31 \cdot T_c = 4,013 \text{ h}$$

$$Q_p = \frac{2,08 \cdot S}{T_p} = 25,916 \text{ m}^3/\text{s} \text{ per } 10 \text{ mm de pluja neta}$$

Hidrograma unitari construït a partir de l'hidrograma adimensional de l'SCS

Hidrograma adimensional		Hidrograma unitari	
t/T _p	Q/Q _p	t (h)	Q (m ³ /s)
0,0	0,000	0,000	0,000
0,1	0,030	0,401	0,777
0,2	0,100	0,803	2,592
0,3	0,190	1,204	4,924
0,4	0,310	1,605	8,034
0,5	0,470	2,007	12,180
0,6	0,660	2,408	17,104
0,7	0,820	2,809	21,251
0,8	0,930	3,210	24,102
0,9	0,990	3,612	25,657
1,0	1,000	4,013	25,916
1,1	0,990	4,414	25,657
1,2	0,930	4,816	24,102
1,3	0,860	5,217	22,288
1,4	0,780	5,618	20,214
1,5	0,680	6,020	17,623
1,6	0,560	6,421	14,513
1,7	0,460	6,822	11,921
1,8	0,390	7,223	10,107
1,9	0,330	7,625	8,552
2,0	0,280	8,026	7,256
2,2	0,207	8,829	5,365
2,4	0,147	9,631	3,810
2,6	0,107	10,434	2,773
2,8	0,077	11,236	1,996
3,0	0,055	12,039	1,425
3,2	0,040	12,842	1,037
3,4	0,029	13,644	0,752
3,6	0,021	14,447	0,544
3,8	0,015	15,249	0,389
4,0	0,011	16,052	0,285
4,5	0,005	18,059	0,130
5,0	0,000	20,065	0,000

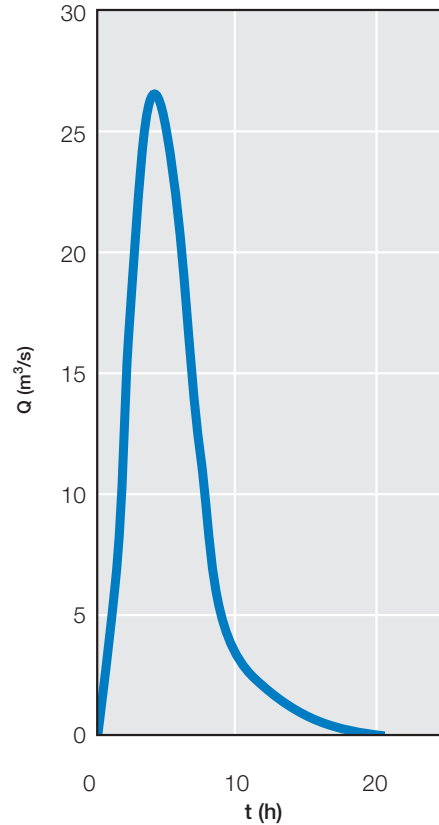


Figura 3.6. Càlcul de l'hidrograma unitari a partir de l'hidrograma unitari adimensional de l'SCS.

En primer lloc s'ha de calcular l'hidrograma unitari de la conca a partir de l'hidrograma adimensional de l'SCS. Aquest càlcul es farà segons el que s'ha explicat en l'apartat 3.3.3 i s'obtidrà un conjunt de punts $(t_i, Q_i)_{unitari}$ que donen l'escorrentiu superficial que correspon a 10 mm de pluja neta:

$$(t_i, Q_i)_{unitari} = \left(T_p \cdot \left(\frac{t_i}{T_p} \right)_{SCS}, Q_p \cdot \left(\frac{Q_i}{Q_p} \right)_{SCS} \right)$$

Seguidament s'ha de calcular l'hidrograma que correspon a la pluja neta de cadascuna de les columnes de l'hidrograma pel qual es vol calcular l'hidrograma.

L'hidrograma per a cada columna es calcula basant-se en la propietat de linealitat dels hidrogrames unitaris. Per a la propietat de proporcionalitat es multipliquen les ordenades de l'hidrograma unitari pel factor de proporcionalitat K_p :

$$K_p = \frac{E}{10} \quad (3.14)$$

On:

K_p factor de proporcionalitat; és adimensional
 E pluja neta de la columna que correspongui de l'hidrograma, expressada en mm

En l'expressió 3.14 apareix el denominador 10 perquè, per a la mateixa definició de l'hidrograma unitari, les seves ordenades de cabal s'han calculat per 10 mm de pluja neta.

Per tant, l'hidrograma per a cada columna de l'hietograma estarà format pel conjunt de punts definits per:

$$(t_i, Q_i) = \left(T_p \cdot \left(\frac{t_i}{T_p} \right)_{SCS}, K_p \cdot Q_p \cdot \left(\frac{Q_i}{Q_p} \right)_{SCS} \right)$$

Seguidament, per a la propietat d'additivitat se sumen les ordenades dels hidrogrames resultants de l'aplicació de la propietat de proporcionalitat. Aquesta additivitat es duu a terme un cop s'han situat els hidrogrames en la seva abscissa de temps. És a dir, que el punt inicial de l'hidrograma serà aquell en què també s'inicia la pluja neta que el genera.

Per simplificar la presentació dels resultats s'ha considerat que l'hidrograma unitari calculat en la figura 3.6 està definit pels parells de punts $(t_i, Q_i)_{unitari}$ que s'indiquen en la taula 3.1, suficients per il·lustrar aquest exemple.

En la taula 3.2 es presenta el càlcul de l'hidrograma resultant de la superposició dels 24 hidrogrames generats per les 24 columnes de l'hietograma construït en la figura 2.19. En la figura 3.9 es presenta la gràfica de l'hidrograma esmentat.

t_i (h)	Q_i (m ³ /s)
0	0,000
1	3,758
2	12,180
3	22,676
4	25,916
5	23,195
6	17,623
7	11,014
8	7,256
9	4,142
10	3,291
11	2,544
12	1,425
13	0,808
14	0,648
15	0,496
16	0,285
17	0,203
18	0,130
19	0,061
20	0,000

Taula 3.1. Definició de l'hidrograma unitari utilitzat en l'exemple presentat en la figura 3.6.

3.4 Relació del mètode racional amb l'hidrograma en el punt de desguàs

(1) Per ser summament il·lustratiu de les hipòtesis en què es basen tots dos mètodes, en aquest apartat es relaciona el mètode racional amb l'hidrograma generat per la precipitació considerada en aquest mètode.

(2) Per tal que l'explicació sigui senzilla i clara, es considerarà un hidrograma teòric que no correspon realment a cap conca real. A MOPU (1987) es mostra la deducció del mètode racional a partir de l'hidrograma unitari proposat per Témez, hidrograma que va obtenir de l'estudi de nombroses conques de la Península.

(3) En l'apartat 3.2 (1) s'ha especificat que el mètode racional calcula el cabal màxim Q_p d'escorrentiu superficial generat per una pluja d'intensitat I que cau sobre una conca amb una superfície S , que comença de manera instantània i és constant durant un temps mínim igual al temps de concentració T_c de la conca.

Per tant, l'hietograma de pluja neta que se suposa és el que es presenta en la figura 3.7. És un hietograma amb una alçada neta E constant i una durada efectiva D com a mínim igual al temps de concentració T_c .

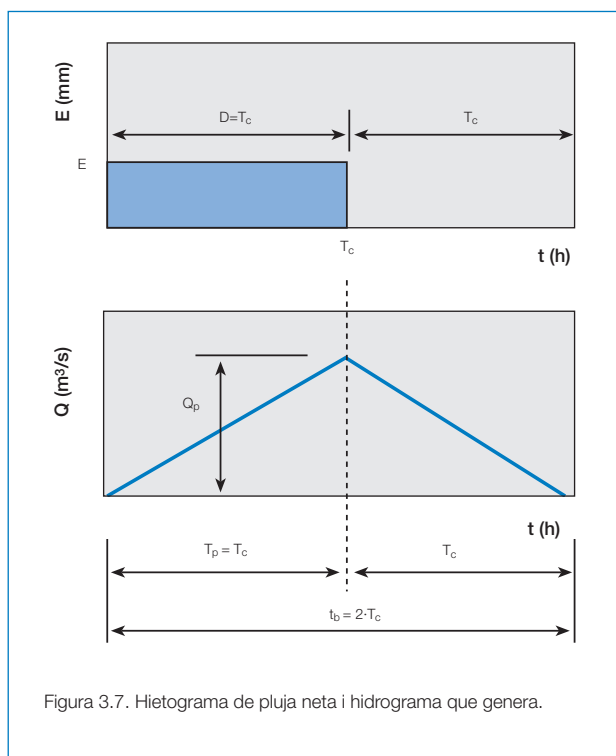


Figura 3.7. Hietograma de pluja neta i hidrograma que genera.

(4) Se suposa que l'hidrograma que aquesta pluja genera és triangular i simètric. El cabal punta Q_p s'assoleix en un temps pic T_p igual al temps de concentració T_c , com es pot veure en la figura 3.7.

$$E \cdot S = Q_p \cdot T_c$$

Com que l'àrea sota l'hidrograma ha de ser igual al volum de pluja neta caiguda sobre la superfície de la conca, S:

Volum pluja neta = volum escorrentiu

$$E \cdot S = \frac{1}{2} \cdot Q_p \cdot (2 \cdot T_p)$$

On:

E pluja neta, expressada en m
 S superfície de la conca, expressada en m^2
 Q_p cabal punta, expressat en m^3/s
 T_p temps de pic, expressat en s
 T_c temps de concentració, expressat en s

D'aquí es dedueix que el cabal punta Q_p és:

$$Q_p = \frac{E \cdot S}{T_c} \quad (3.15)$$

De la mateixa definició del coeficient d'escorrentiu C , presentat en l'apartat 3.2 (1), es dedueix que:

$$C = \frac{Q_p}{I \cdot S} \quad (3.16)$$

On:

C coeficient d'escorrentiu; és adimensional
 Q_p cabal punta, expressat en m^3/s , generat per la pluja neta E
 I intensitat de pluja, expressada en m/s , generada per la precipitació P
 S superfície de la conca (m^2)

Considerant les fórmules 3.14 i 3.15 s'obté que:

$$C = \frac{E}{P} \quad (3.17)$$

On:

C coeficient d'escorrentiu; és adimensional
 E volum de pluja neta generada per una pluja d'intensitat I constant, expressat en m^3
 P volum de precipitació d'una pluja d'intensitat I constant, expressat en m^3

Per la qual cosa el coeficient d'escorrentiu representa la taxa de pèrdues de precipitació, que se suposa constant durant tota la pluja.

És interessant adonar-se que, si la durada efectiva D de la pluja fos major que el temps de concentració T_c , la forma de l'hidrograma en el punt de sortida seria trapezoïdal, com mostra la figura 3.8.

(4) Si es considera una pluja d'intensitat constant i durada indefinida arribarà un moment en què s'assolirà un equilibri entre l'aigua que cau (entra en el sistema hidrològic) i l'aigua d'escorrentiu superficial pel punt de desguàs (surt del sistema). Aquest instant és el moment en què el temps transcorregut des del començament del xàfec és igual al temps de concentració T_c .

Considerant la intensitat de pluja neta ϵ , definida com la pluja neta E que cau per unitat de temps, a partir del temps de concentració T_c es complirà:

$$Q_p = \epsilon \cdot S \quad (3.18)$$

On:

Q_p cabal punta, expressat en m^3/s , generat per la pluja neta E
 ϵ intensitat de pluja neta, expressada en m/s , generada per la pluja neta E , és a dir:

$$\epsilon = \frac{E}{T_c} \quad (3.19)$$

T_c temps de concentració, expressat en s
 S superfície de la conca (m^2)

Combinant adequadament les fórmules 3.16 i 3.17 s'obté la relació 3.15.

(5) De tot el que s'ha exposat en aquest apartat s'entén que en la formulació del mètode racional es faci servir la intensitat de precipitació I i no pas la de pluja neta ϵ , ja que per al pas entre totes dues es disposa del coeficient d'escorrentiu C , de manera que es compleix:

$$C = \frac{\epsilon}{I}$$

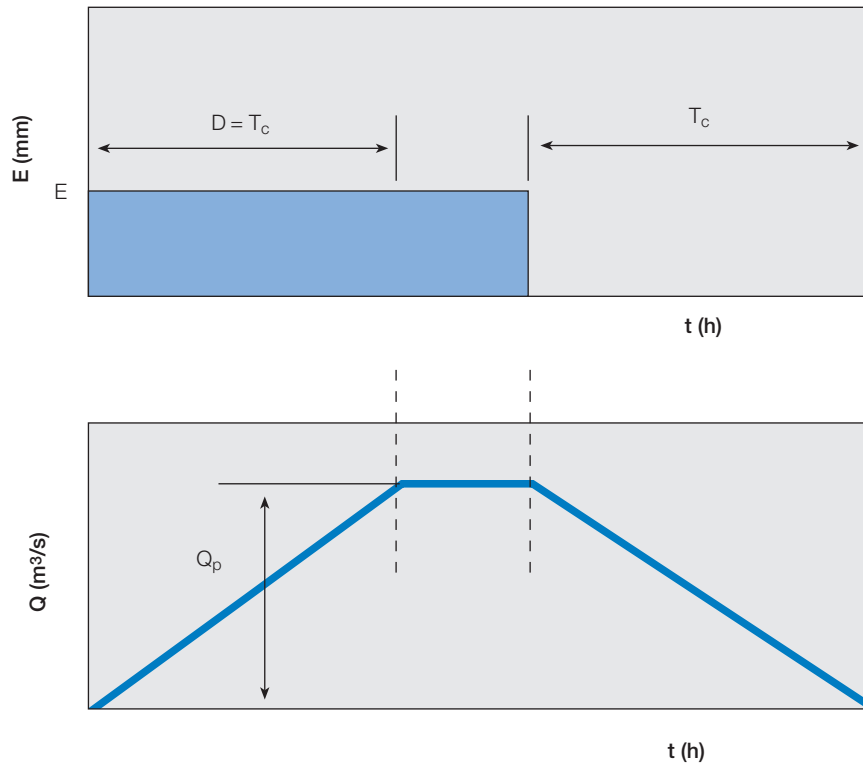


Figura 3.8. Hidrograma en el punt de desguàs obtingut quan la durada efectiva de la pluja neta és superior al temps de concentració T_c .

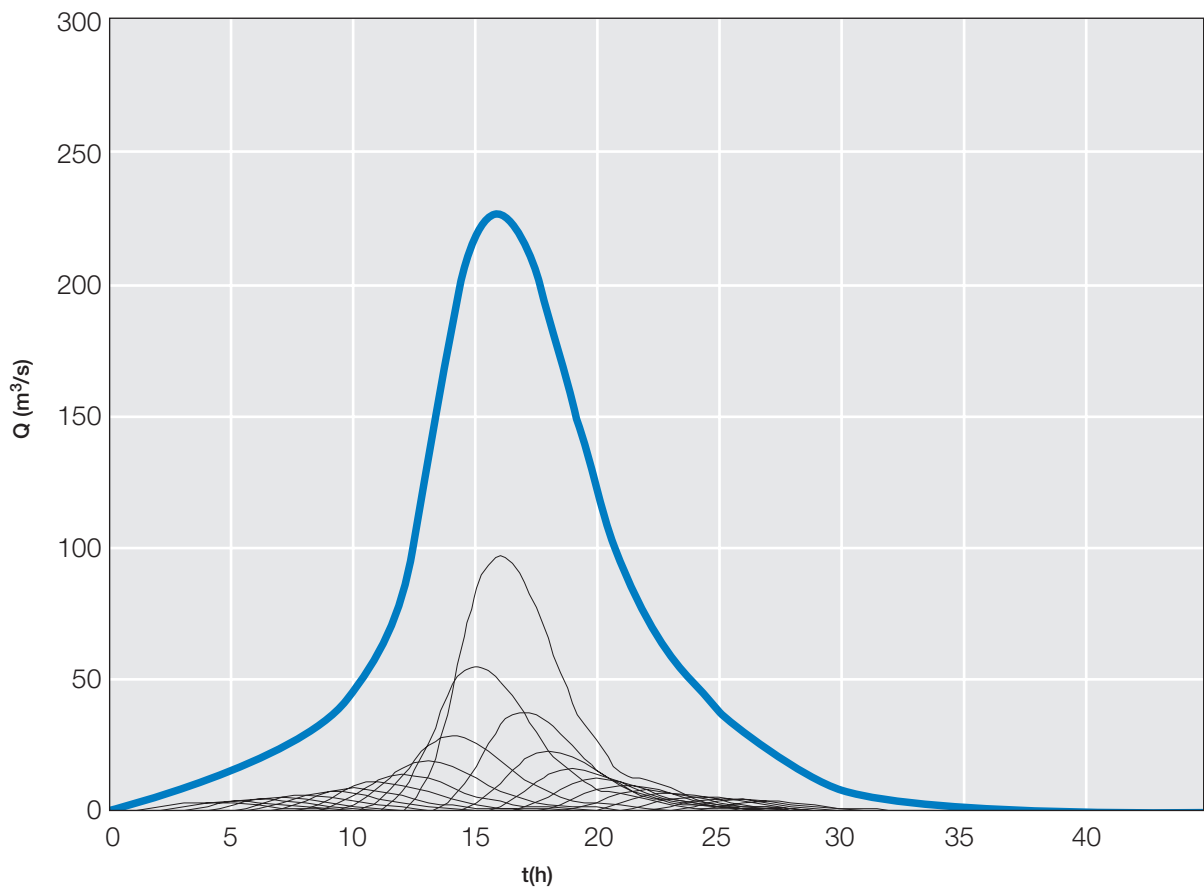


Figura 3.9. Hidrograma en el punt de desguàs obtingut de la superposició dels hidrogrames generats per les diferents columnes de pluja neta de l'hietograma de la figura 2.19.

4. Introducció a la hidràulica fluvial

4.1 Introducció

(1) En aquest capítol es pretenen presentar d'una manera concisa i clara els conceptes bàsics de la hidràulica fluvial, que és una ciència complexa i que actualment es troba en ple procés de desenvolupament.

(2) El comportament d'un riu és complex i no del tot conegut i cal desterrar absolutament la concepció errònia que és un canal de contorns fixos per on passa un fluid límpid.

La realitat dista molt d'aquesta suposició. Els rius poden presentar un comportament irregular, circulen sobre lleres canviants, tant en planta com en secció transversal, i per aquestes lleres flueix una mescla d'aigua, sediments i flotants.

(3) La seva complexitat és tal que cada cas és diferent, ja que els rius poden ajustar la rugositat, la velocitat, el pendent, el calat, l'amplada i la forma en planta segons la geologia, la vegetació i l'acció humana.

Aquests ajustaments poden ser ràpids o lents depenent de molts factors, bona part dels quals només es coneixen qualitativament.

A més a més, quan un riu és modificat localment, aquesta modificació pot generar canvis en el seu comportament que es poden propagar tant aigües amunt com aigües avall, i fins i tot, a corrents tributàries. I aquests canvis poden assolir grans distàncies.

(4) És evident que la fiabilitat dels resultats obtinguts dels estudis hidràulics que es portin a terme dependrà de l'habilitat del tècnic redactor a comprendre el comportament real del riu que es vol estudiar. Per aquest motiu, en aquest capítol es tornarà a incidir en la necessitat ineludible dels treballs de camp i es preguntarà als veïns, les autoritats locals, els tècnics i els inspectors de l'Agència sobre el comportament del riu en els períodes de crescudes, l'evolució en el temps del seu llit i la repercussió de les obres, els endegaments i els ponts construïts.

(5) En aquesta guia se suposa que el lector disposa del coneixement de les lleis fonamentals de la mecànica de fluids, per la qual cosa si no és així se li recomana que complementi el que aquí s'ha descrit amb textos d'hidràulica com ara Chow (1982), Henderson (1966), French (1985), Chaudry (1993), Naudascher (2000) i Martín Vide (2002).

4.2 Tipus de mètodes d'anàlisi de la hidràulica fluvial

(1) Rouse (1959) va establir tres tipus d'anàlisi en la hidràulica fluvial:

(a) Experiència de camp

(b) Models físics a escala reduïda

(c) Models de simulació numèrica

(2) L'*experiència de camp* és extremadament valuosa per poder analitzar el comportament d'un riu, encara que per si mateixa no es considera suficient per a la realització d'estudis i projectes d'hidràulica fluvial, ja que no permet fer prediccions del comportament d'un riu quan es produeixen episodis com ara la pluja de projecte definit en l'apartat 2.8.

Però això no és obstacle perquè sigui recomanable que en tots els estudis de determinació de zones inundables es faci una investigació exhaustiva del comportament real del riu, a través de la recopilació de l'experiència dels veïns, les autoritats locals i els tècnics i els inspectors de l'Agència, com a pas previ a la utilització de la resta dels mètodes.

(3) L'aplicació de *models físics a escala reduïda* en laboratoris especialitzats constitueix una eina formidable en la modelització del comportament d'un riu i, en molts casos, és l'únic mètode fiable per fer alguna predicció sobre aquest comportament.

El problema que comporta la seva aplicació és el cost econòmic i el temps necessari per a la construcció, que sol ser també elevat. Per això, la seva utilització es redueix a l'estudi de problemes complexos i/o de significació especial, en general associats a sobreeixidors i desguassos de preses, desviaments i endegaments singulars.

(4) Els *models de simulació numèrica* són els que s'apliquen habitualment perquè tenen un cost raonable i, si es fan servir adequadament, són capaços de modelitzar amb prou exactitud el comportament de bona part dels rius del nostre entorn.

Es vol remarcar expressament que per la seva utilització és *imprescindible* que es combini amb l'experiència de camp, amb l'objectiu de procedir a la calibració o el contrast.

(5) Recentment, s'està generalitzant per als problemes fluvials importants l'ús de la combinació dels tres tipus de mètodes, pels bons resultats que s'han aconseguit de la seva aplicació. Aquesta metodologia s'ha batejat com a *modelització híbrida*.

(6) En aquesta guia únicament es desenvoluparan amb algun detall els models de simulació numèrica, encara que en comentar alguns exemples es farà alguna referència a la conveniència de fer servir models híbrids.

4.3 Morfologia fluvial

(1) En el punt 4.1 (2) ja s'ha exposat que un riu no és un canal de contorns fixos pel qual circula únicament aigua. Els rius circulen sobre lleres que en determinats trams es poden erosionar, de manera que aquest sediment és transportat aigües avall, i en altres trams es sedimentarà.

Aquests canvis poden ocórrer tant en planta com en la seva secció transversal i el seu perfil longitudinal. A més a més, aquests canvis moltes vegades els pateix la pràctica totalitat del traçat del riu.

No es pretén exposar en aquesta guia un complet tractat de morfologia fluvial, sinó cridar l'atenció quant a la problemàtica associada als diferents tipus morfològics fluvials i donar unes pautes generals sobre la manera com s'han de considerar en els estudis de zones inundables. A les referències Martín Vide (2002) o Simons (1976), entre altres, es desenvolupa amb més profunditat aquest tema.

La identificació de la morfologia fluvial d'un determinat tram d'un riu no és senzilla, per la qual cosa en general es considera necessari el concurs d'un especialista, llevat dels casos que no ofereixin cap mena de dubte.

(2) D'una manera simplista, una conca fluvial es pot dividir en tres trams: una zona superior productora de sediment, una zona intermèdia, en què es produeixen tant fenòmens erosius com de sedimentació, i una zona inferior en què es produeix bàsicament sedimentació.

El problema és que la realitat sol ser molt més complexa que aquesta senzilla tramificació, ja que l'existència de circumstàncies geològiques, construccions humanes, vegetació, etc., pot generar zones localitzades de sedimentació en trams predominantment erosius i zones localitzades erosives en trams predominantment sedimentaris.

(3) Des d'un punt de vista global, l'evolució del perfil longitudinal d'un riu tendeix a uniformitzar el seu pendent. Aquest procés sol ser lent, però si s'altera l'equilibri natural de la llera, aquests canvis es poden accelerar notablement. A més a més, hi ha alguns tipus de rius, com ara les rambles, en què aquests canvis poden ser bruscs, coincidint amb avingudes importants.

(4) A més a més, els rius circulen sobre terrenys molt heterogenis i moltes vegades hi ha vegetació de ribera que contribueix a estabilitzar la llera, augmenta la resistència al pas del flux i aporta flotants (fulles, branques i, en determinades circumstàncies, troncs i, fins i tot, arbres sencers).

(5) El comportament morfològic d'un riu l'estudia la *geomorfologia*, ciència que analitza l'evolució de la morfologia del paisatge al llarg del temps. Les eines bàsiques per a aquesta anàlisi són:

- (a) Estudi de fotos aèries, imatges de satèl·lit, cartografia i aixecaments topogràfics
- (b) Reconeixement aeri i de camp
- (c) Recopilació de dades històriques recollides i/o recordades pels veïns, les autoritats locals, els tècnics i els inspectors de l'Agència
- (d) Modelització numèrica del comportament de la llera
- (e) Investigació de camp, tant geològica com geotècnica

En tots els estudis de zones inundables convé identificar geomorfològicament el tram que es vol estudiar, amb la finalitat de tenir en compte l'estabilitat de la llera actual, i tenir-ho en compte en la delimitació d'aquestes zones.

És evident que la consideració de la inestabilitat de la llera té un cert grau d'incertesa, ja que no existeixen mitjans analítics per precisar-la amb exactitud, per la qual cosa serà necessari estudiar detingudament el comportament històric del riu i portar a terme una anàlisi geomorfològica profunda d'aquest comportament si se sospita que la llera no ha assolit el seu perfil d'equilibri, tant en planta com en alçat.

4.4 Dimensionalitat del flux

(1) En la figura 4.1 es presenta una secció d'un riu en què es representa gràficament el significat de la notació utilitzada en aquesta guia.

(2) És evident que el flux dels rius és tridimensional a la realitat. El problema és que la simulació numèrica d'un flux tridimensional és extremadament complexa i, a la pràctica, rarament es fa servir fora dels entorns de recerca i desenvolupament.

(3) Per tant, davant de la simulació numèrica del comportament d'un riu normalment queda el dilema de si n'hi ha prou de fer un model unidimensional o cal acudir a un model bidimensional.

A la pràctica, la utilització de models de simulació numèrica bidimensionals és laboriosa i difícil. A més a més, els models disponibles no estan suficientment contrastats, per la qual cosa el seu ús queda únicament restringit a problemes molt especials i moltes vegades forma part de models híbrids.

(4) Del paràgraf anterior es desprèn que, davant d'un problema de simulació numèrica d'hidràulica fluvial, primer caldrà analitzar acuradament si és possible fer servir només models unidimensionals. Si la resposta és negativa s'haurà d'acudir a un model bidimensional.

(5) Els *models de simulació numèrica unidimensionals* consideren que la velocitat és paral·lela a la direcció del flux, direcció que evidentment pot canviar de secció a secció. Aquesta simplificació es pot fer moltes vegades, encara que no sempre.

(6) No és possible establir amb precisió quan és necessària la simulació amb models bidimensionals. Es coneixen algunes regles pràctiques per estimar quan pot ser convenient considerar un flux bidimensional, com, per exemple, quan la longitud del tram és inferior a 20 vegades la seva amplada o quan l'amplada és més de 50 vegades el calat; regles a les quals s'ha d'afegir que, a més a més, no interressi conèixer les variacions transversals del cabal i del calat.

En tot cas, aquestes regles aritmètiques únicament tenen alguna validesa quan el riu circula per amples planes d'inundació o en zones deltaïques. En canvi, hi ha moltes altres circumstàncies, algunes d'enorme importància, en les quals és imprescindible la consideració de models bidimensionals, com per exemple:

- (a) Quan les velocitats en les planes d'inundació són molt menors que la velocitat en la llera principal (figura 4.2a). En aquests casos, els calats obtinguts en els models unidimensionals seran menors que els que s'assoleixin a la realitat.
- (b) Quan el riu circula per una corba amb una velocitat prou important per mobilitzar el llit significativament (figura 4.2b). En aquests casos, l'erosió del llit computada a partir de la velocitat mitjana de la secció serà inferior a la que realment es produirà. En aquest exemple, a més a més, serà convenient fer servir un model una mica més complex, que consideri tant el flux bidimensional com el llit mòbil.
- (c) Quan hi hagi separacions del flux en trams en els quals el flux no circuli en línia recta. Aquesta separació es pot produir per la presència d'illes (figura 4.2c), derivacions importants, ponts amb molts ulls, alguns dels quals gairebé inefectius, per estar situats en sobreambles de la llera i en corbes (figura 4.2d), etc.

(d) Quan l'amplada del flux és important, com ara en els deltes dels rius.

(7) Afortunadament, s'han desenvolupat models de simulació unidimensionals que tenen en compte d'una manera raonablement bona la no-uniformitat en la distribució transversal de velocitats longitudinals i rugositats d'un riu i distingeixen, en la secció transversal, el canal principal de les planes d'inundació. El problema assenyalat en la figura 4.2a únicament ocorre quan la diferència de velocitats entre el canal principal i les planes d'inundació és molt gran.

(8) En aquesta guia no es desenvoluparà detalladament la simulació del flux bidimensional. Si el lector vol aprofundir en aquest tema pot consultar Chaudry (1993) i Mahmood (1975), entre altres. Tot el que s'exposa en la resta d'aquesta guia, si no s'indica el contrari, es referirà al flux unidimensional.

4.5 Tipus de fluxos

(1) Els fluxos es poden classificar segons diversos conceptes, com per exemple:

- (a) *Confinament del flux*. Els fluxos poden ser a pressió o en làmina lliure (Chaudry, 1993).
- (b) *Viscositat*. En primer lloc es poden distingir els fluids newtonians dels no newtonians. Un cop es consideri que la viscositat segueix una llei newtoniana, es pot distingir entre flux laminar, turbulent o de transició (Streeter, 2000).
- (c) *Efecte de la gravetat*. Segons la relació entre les forces gravitacionals i les inercials, es poden distingir fluxos subcrítics, crítics i supercrítics, com es veurà en l'apartat 4.6.
- (d) *Variació de la velocitat*. Segons la variació de la velocitat, tant espacialment com temporalment, es poden distingir diversos tipus de fluxos, tal com es veurà en l'apartat 4.7.

(2) Queden fora de l'abast d'aquesta guia les classificacions especificades en els punts a i b. Si el lector vol aprofundir més en aquest tema pot consultar Chow (1982), Henderson (1966) i Streeter (2000).

4.6 Classificació dels fluxos segons l'efecte de la gravetat

(1) El quocient entre les forces inercials, les degudes a l'energia cinètica o de velocitat i les forces gravitacionals és una mesura molt important de l'estat del flux en làmina lliure i es representa pel nombre de Froude F_r :

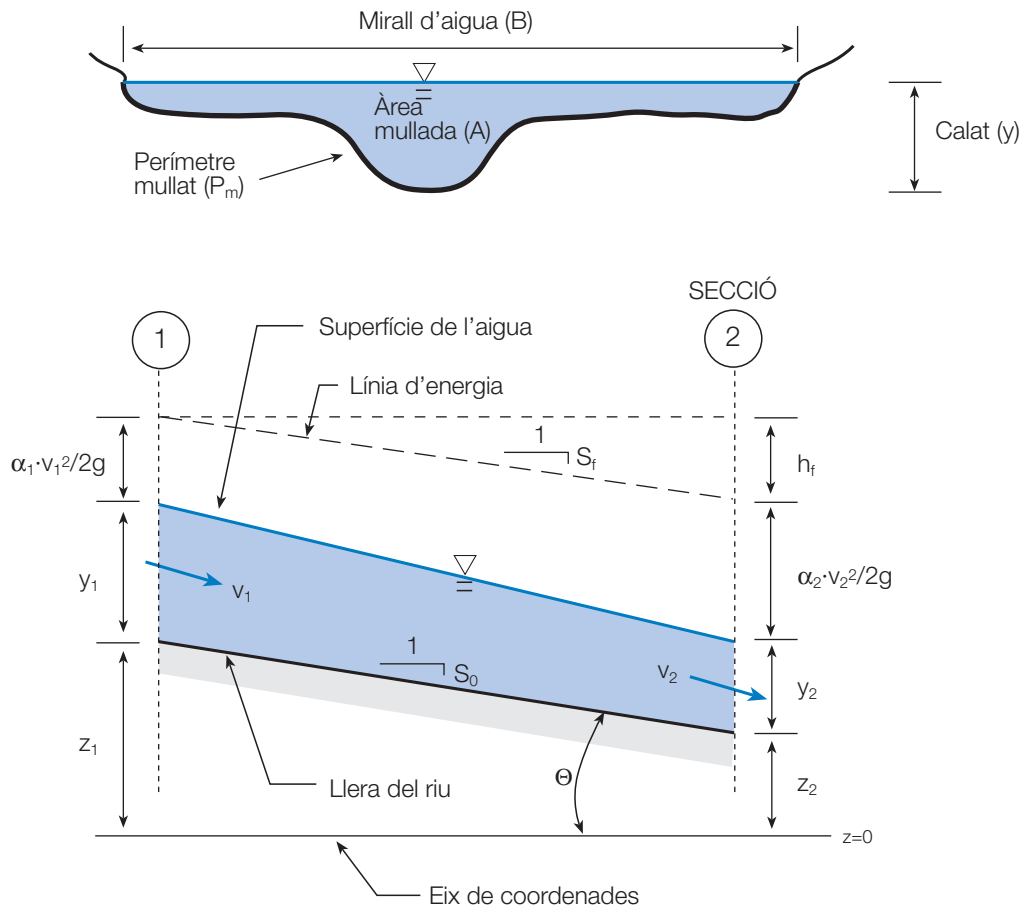


Figura 4.1. Significat de la notació utilitzada

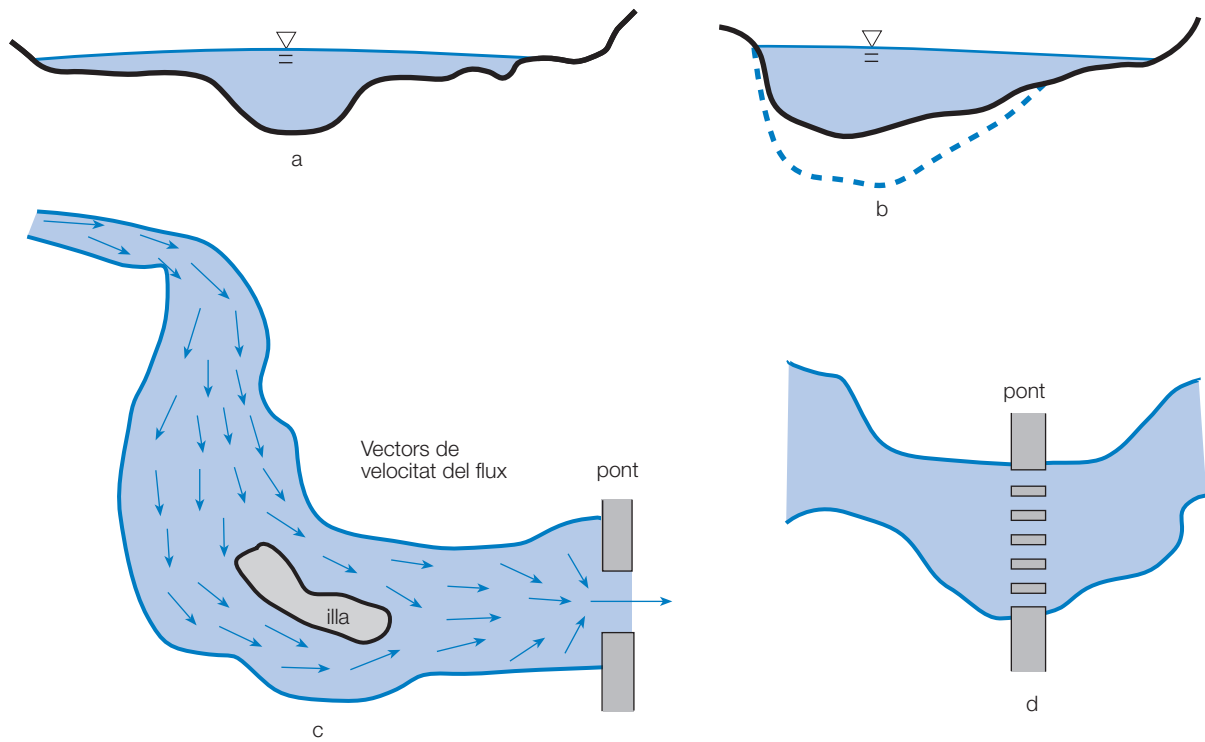


Figura 4.2. Casos en què és necessària la modelització bidimensional del flux.

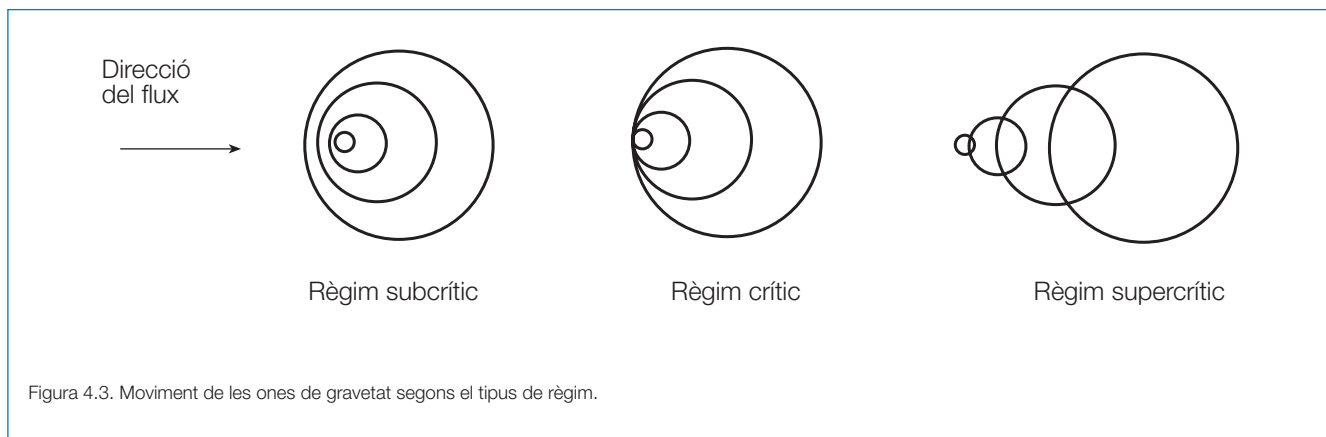


Figura 4.3. Moviment de les ones de gravetat segons el tipus de règim.

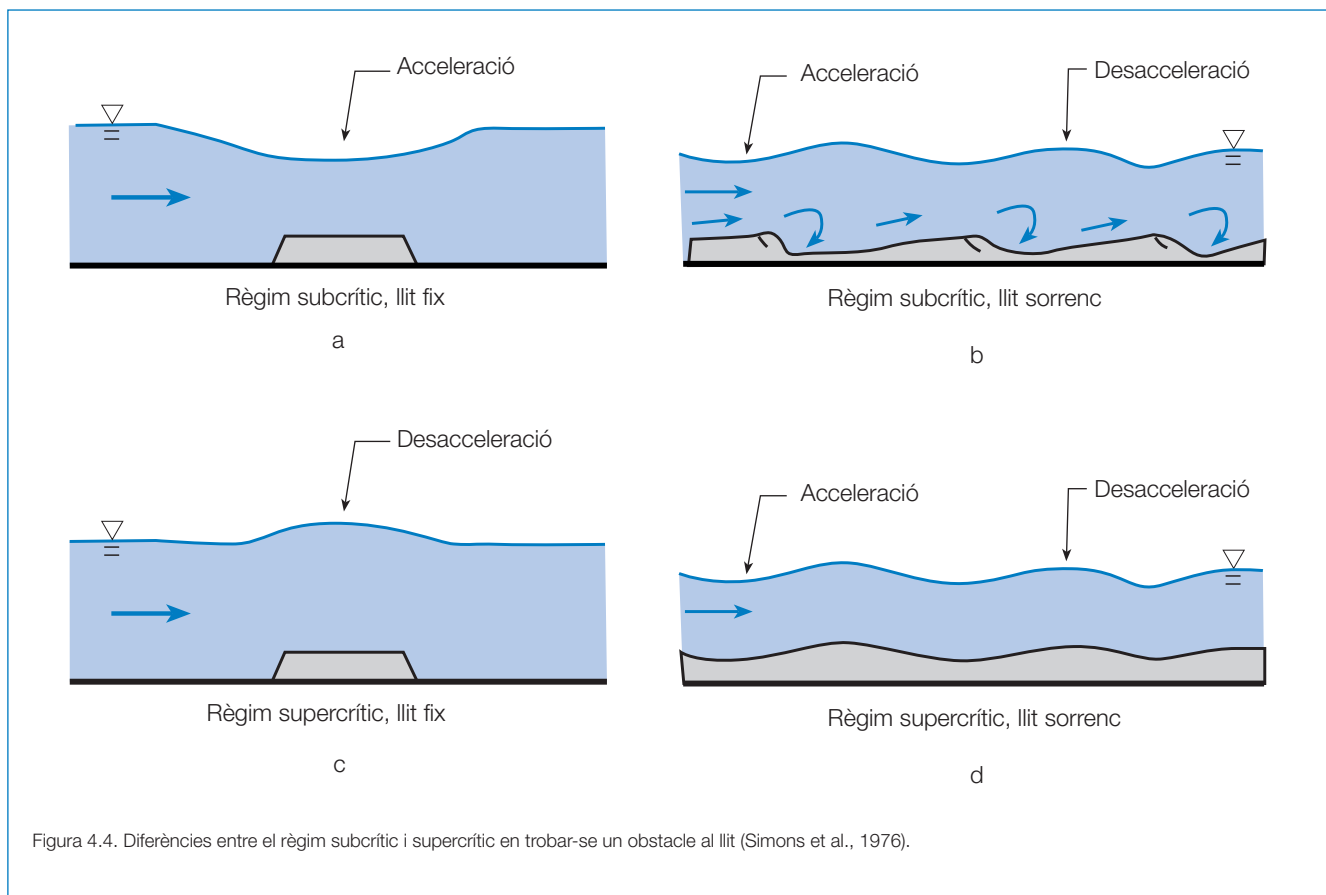


Figura 4.4. Diferències entre el règim subcrític i supercrític en trobar-se un obstacle al llit (Simons et al., 1976).

$$F_r \approx \frac{\text{Forces inercials}}{\text{Forces gravitacionals}}$$

Analíticament, el nombre de Froude F_r s'expressa com el quocient entre la velocitat mitjana de la secció transversal v i la celeritat de les ones de gravetat c , també anomenada celeritat dinàmica:

$$F_r = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{g \frac{A}{B}}} \quad (4.1)$$

On:

- F_r nombre de Froude; és adimensional
- v velocitat mitjana de la secció, expressada en m/s

- c celeritat de les ones de gravetat, expressada en m/s
- g acceleració de la gravetat, expressada en m/s²
- B mirall d'aigua, expressat en m
- A àrea mullada, expressada en m²

Les ones de gravetat són les ones petites superficials que es formen quan el flux troba un obstacle com una pila de pont o quan s'hi llança una pedra.

(2) Segons la magnitud del nombre de Froude F_r , el règim del flux serà *subcrític*, *crític* o *supercrític*.

(3) El flux circula en *règim subcrític* quan el nombre de Froude F_r és menor que 1, per la qual cosa els efectes gravitacionals seran majors que els de les forces inercials i, per tant,

la celeritat de les ones de gravetat serà major que la velocitat del fluid.

(4) El flux circula en règim supercrític quan el nombre de Froude F_r és major que 1, per la qual cosa els efectes de les forces gravitacionals seran menors que els efectes de les forces inercials; per tant, la celeritat de les ones de gravetat serà menor que la velocitat del fluid.

(5) Quan les forces inercials i gravitacionals són iguals al flux circula en règim crític, i el nombre de Froude F_r és igual a 1. En aquest tipus de flux, les ones de gravetat es mantenen aproximadament estacionàries respecte als marges del riu.

(6) Per comprovar el règim d'un flux es pot fer una prova senzilla llançant una pedra a l'aigua (figura 4.3). Si les ones generades (ones de gravetat) es mouen aigües amunt el règim serà subcrític. Per contra, si aquestes ones són transportades en la seva totalitat aigües avall, el règim serà supercrític. I si el front d'aigües amunt d'aquestes ones es manté estacionari respecte al marge del riu, el règim és crític.

Es vol remarcar que és possible que la velocitat del flux en un punt determinat sigui superior a la celeritat de les ones de gravetat, però que l'estat mitjà del flux sigui subcrític.

(7) El fet que en el règim subcrític ($F_r < 1$) la informació del que passa aigües avall es traslladi aigües amunt condiciona notablement el comportament d'aquest flux, com es veurà en el punt següent, quan es defineixin les condicions de contorn.

En canvi, en el règim supercrític ($F_r > 1$) la informació del que passa en un punt únicament es trasllada aigües avall.

(8) Abans de fer cap càlcul hidràulic cal determinar el règim del flux pel rang de cabals i calats que previsiblement s'obtidran. Quan el règim del flux és subcrític ($F_r < 1$), el perfil de calats és controlat per les característiques del riu en el seu extrem aigües avall.

Això és molt important, ja que, per exemple, en els càlculs en règim estacionari gradualment variat, la condició de contorn que cal establir ha d'estar situada en l'extrem aigües avall del tram que s'ha d'estudiar. El càlcul del calat es va efectuant d'aigües avall a aigües amunt:

Per contra, en el règim supercrític ($F_r > 1$), el perfil de calats és controlat per les característiques del riu en el seu extrem aigües amunt. Per tant, en els càlculs en règim estacionari gradualment variat, la condició de contorn que cal establir ha d'estar situada en l'extrem aigües amunt del tram que es vol estudiar. El càlcul del calat es va efectuant d'aigües amunt a aigües avall.

(9) Si el règim és subcrític i el llit del riu és fix, el flux accelerarà sobre els obstacles situats en el fons (figura 4.4a). Aquest fenomen s'aprecia molt bé en rius amb el llit sorrenc, com mostra la figura 4.4b, en què es produeix un augment de la turbulència, amb el consegüent augment en les pèrdues d'energia i de resistència al pas del flux.

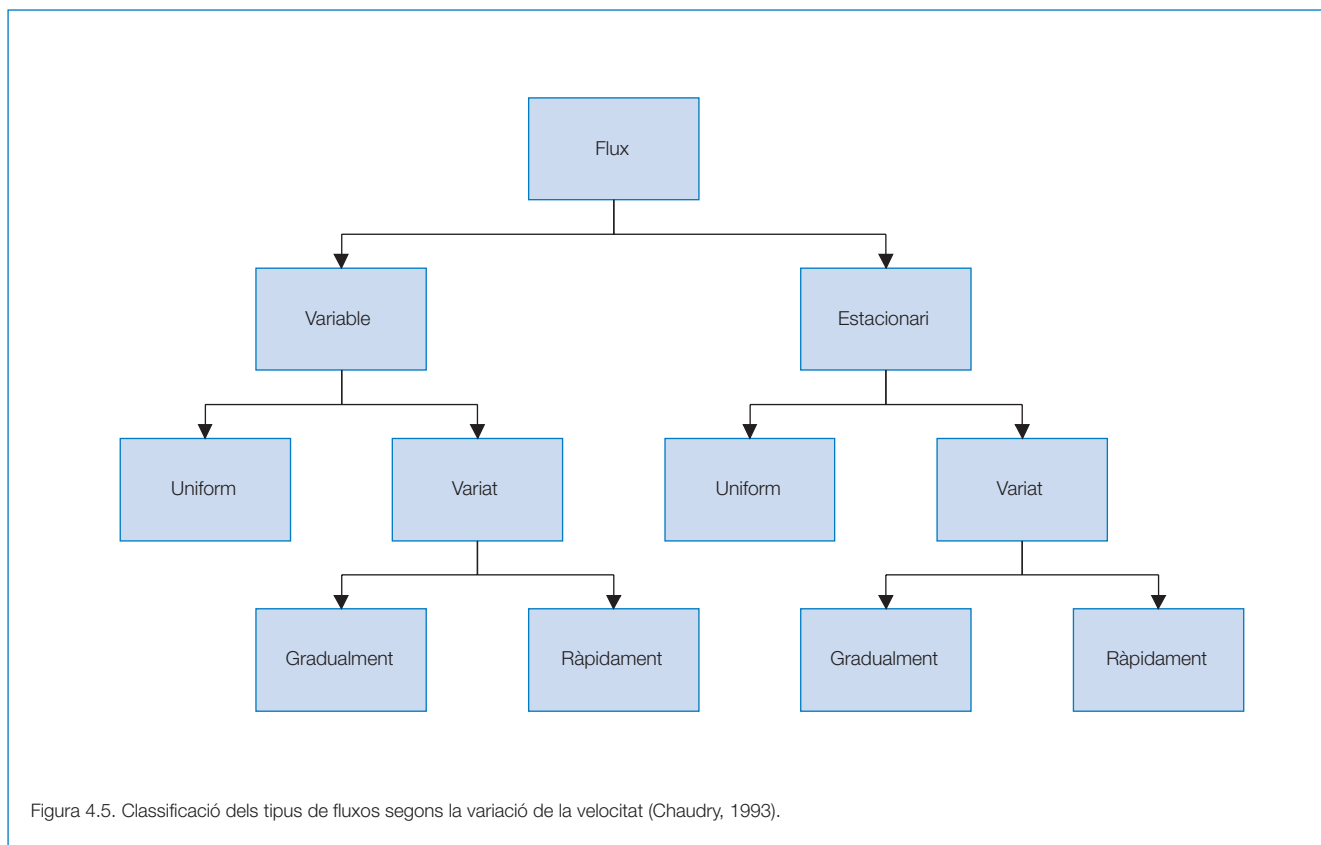


Figura 4.5. Classificació dels tipus de fluxos segons la variació de la velocitat (Chaudry, 1993).

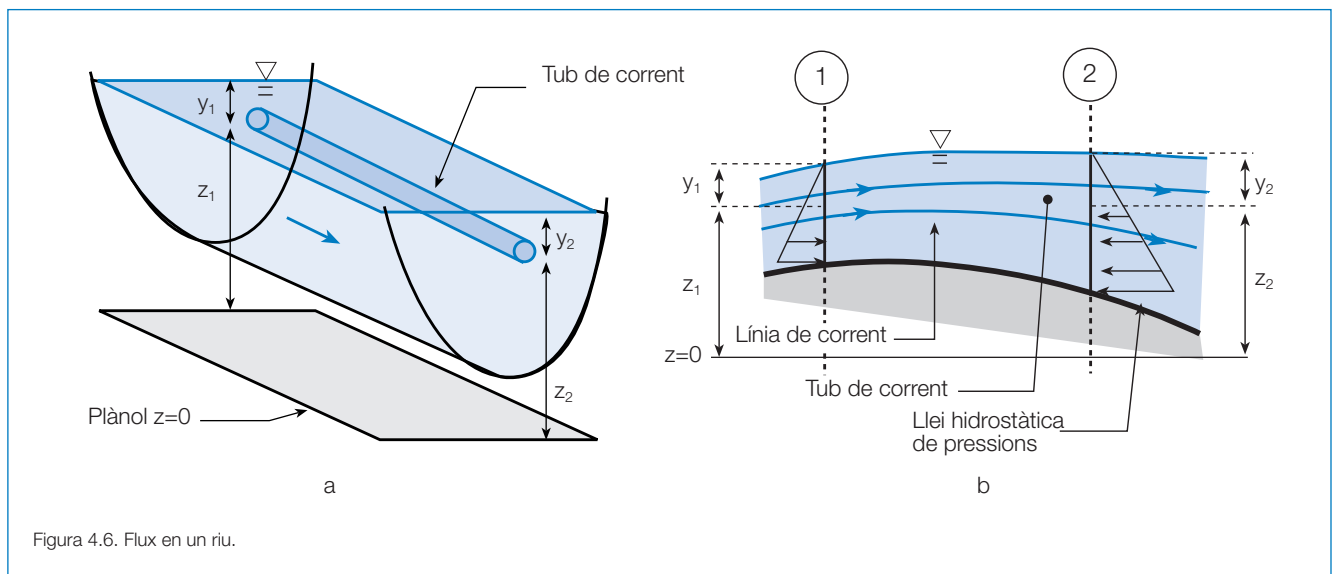


Figura 4.6. Flux en un riu.

(10) Per contra, si el règim és supercrític i el llit del riu és fix, el flux desaccelerarà sobre els obstacles situats al fons (figura 4.4c). Aquest fenomen també s'aprecia molt bé en rius amb el llit sorrenc, com s'il·lustra en la figura 4.4d.

4.7 Classificació dels fluxos segons la variació de la velocitat

(1) En la figura 4.5 es presenta un esquema dels fluxos unidimensionals segons la variació de la velocitat.

(2) *Flux estacionari*. Un flux és estacionari quan la velocitat en una determinada secció no canvia, ni el valor ni la direcció, amb el temps (menyspreant les fluctuacions turbulentes), per la qual cosa es compleix:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (4.2)$$

(3) *Flux variable o no estacionari* és un flux en el qual la velocitat en una determinada secció canvia amb el temps. Els mètodes per analitzar aquest tipus de flux han de considerar explícitament la variable temps, mentre que els que analitzen els fluxos estacionaris, no.

En determinades circumstàncies és possible transformar analíticament un flux variable en un flux estacionari, canviant únicament el sistema de coordenades. Aquesta simplificació analítica només és possible si la forma de l'ona no canvia mentre es propaga. En aquesta guia no es considerarà aquesta transformació, per la qual cosa tots els fluxos en què la velocitat canviï amb el temps es consideraran com a variables.

(4) *Flux uniforme*. Un flux uniforme es dóna quan el calat, l'àrea mullada, la velocitat i el cabal es mantenen invariables al llarg del riu. Aquest tipus de flux rarament es presenta en lleres naturals. En el flux uniforme, la línia d'energia, la superfície de l'aigua i el llit del riu són paral·lels, per la qual cosa:

$$S_f = S_0 \quad (4.3)$$

Al calat associat al flux uniforme se'l denomina *calat normal*. Encara que en teoria és possible que es donés el flux uniforme variable, a la pràctica només es dóna el flux uniforme estacionari (Chow, 1982).

(5) En el flux variat la velocitat canvia entre diferents seccions. Dins del flux variat es poden distingir:

(a) *Flux gradualment variat*. Es diu que un flux és gradualment variat si el calat canvia lentament d'una secció a l'altra. Com a regla pràctica, es diu que aquesta variació és lenta si no és discernible a l'ull humà. En un flux gradualment variat es pot suposar que és vàlid considerar que les acceleracions verticals són menyspreables i, per tant, es pot considerar que la pressió és hidrostàtica.

(b) *Flux ràpidament variat*. Es dóna quan el calat i/o la velocitat canvia ràpidament d'una secció a una altra. En aquest cas ja no és vàlid considerar que la distribució de pressions és hidrostàtica. Habitualment, el flux estacionari ràpidament variat només ocorre en trams relativament curts, com ara ressalts hidràulics, canvis de secció bruscos, entrades i sortides d'obres de drenatge transversal, piles de ponts, caigudes hidràuliques, etc.

4.8 Equació de l'energia

(1) Es considera *línia de corrent* les línies tangents als vectors velocitat, i *tub de corrent*, el volum tancat entre línies de corrent (vegeu la figura 4.6). Per definició, no hi pot haver flux d'aigua a través d'una línia de corrent.

(2) A partir de l'aplicació de la segona llei de Newton al fluid d'un tub de corrent (vegeu la figura 4.6) i considerant les hipòtesis següents:

- (a) Únicament actuen sobre el fluid les forces de pressió i de gravetat, per la qual cosa se suposa que la viscositat i la fricció de l'aigua amb el llit són nul·les. A la pràctica no existeixen fluids no viscosos, ja que tots els fluids resisteixen esforços tallants quan són sotmesos a una deformació angular encara que en l'aigua neta aquestes forces viscoses normalment són menyspreables. Evidentment, tampoc no existeixen fluids en moviment que no exerceixen cap fregament amb la llera (S_r nul·la).
- (b) El flux és estacionari, és a dir, que la velocitat del fluid només depèn de la seva posició en l'espai i no del temps. Per tant, s'ha de complir la relació 4.2.
- (c) El fluid és incompressible, per la qual cosa la densitat és constant.
- (d) La distribució de pressió en el fluid és hidrostàtica:

$$p = \gamma \cdot y \quad (4.4)$$

On:

- p pressió en el fluid del tub de corrent, expressada en N/m^2
- γ pes específic del fluid, expressat en N/m^3
- y calat del tub de corrent, expressat en m

Aquesta hipòtesi implica que es menyspreen les acceleracions verticals.

S'obté que al llarg d'un tub de corrent es manté constant l'energia total del tub.

$$H = z + y + \alpha \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = constant \quad (4.5)$$

On:

- H energia total en el tub de corrent, expressada en m
- z cota del tub de corrent, expressada en m
- y calat fins al tub de corrent, expressat en m
- α coeficient de Coriolis; és adimensional
- v velocitat mitjana, expressada en m/s
- g acceleració de la gravetat, expressada en m/s^2

Aquesta és la cèlebre *equació de Bernoulli*, que constitueix una poderosa eina en la mecànica de fluids. Es vol recordar que abans de la seva utilització cal tenir en compte les hipòtesis en què es basa la seva deducció, ja que, com tantes vegades s'ha comentat, és probable que aquesta sigui l'*equació de major ús i abús de la mecànica de fluids*.

La deducció de l'equació 4.5 es pot consultar a Naudascher (2000), Streeter (2000) i Munson (1999), entre altres.

(3) El coeficient de Coriolis α té per objecte la correcció de l'energia cinètica $v^2/2g$, on v és la velocitat mitjana de la secció. Aquesta correcció és deguda al fet que, en realitat, la distribució de velocitats en la secció del riu no és uniforme. El càlcul de α es pot consultar a Chow (1982).

(4) L'equació 4.5, tal com s'ha plantejat, té una utilitat molt limitada, ja que a la pràctica no existeixen fluids no viscosos ni tampoc que no pateixin un cert fregament amb el llit. S'ha vist que és possible estendre l'equació 4.5 al cas d'un fluid estacionari, incompressible i que tingui una distribució de pressions hidrostàtica que englobi totes les pèrdues d'energia per forces de fregament i viscoses en un sol terme, anomenat pèrdues d'energia h_f .

A la pràctica, se sol aplicar l'equació 4.5 entre seccions del riu, considerant que tot el riu és un tub de corrent, tal com es mostra en la figura 4.1. Aleshores, l'equació 4.5 s'estén a:

$$H_1 = H_2 + h_f \quad (4.6)$$

On:

- H_1 energia a la secció 1, expressada en m
- H_2 energia a la secció 2, expressada en m
- h_f pèrdues d'energia entre les seccions 1 i 2, expressades en m

El càlcul de l'energia de la secció d'un riu es fa aplicant convenientment l'equació 4.5:

$$H_i = z_i + y_i + \alpha_i \cdot \frac{v_i^2}{2 \cdot g} \quad (4.7)$$

On:

- H_i energia en la secció i, expressada en m
- z_i cota del llit del riu a la secció i, expressada en m
- y_i calat a la secció i, expressat en m
- α_i coeficient de Coriolis a la secció i; és adimensional
- v_i velocitat mitjana a la secció i, expressada en m/s
- g acceleració de la gravetat, expressada en m/s^2

La consideració del terme de pèrdues d'energia h_f s'efectua seguint els principis fonamentals de la termodinàmica, és a dir, que l'energia sempre disminueix en el sentit del moviment de l'aigua, tal com s'ha dibuixat en la figura 4.1.

Es vol recordar que l'aplicació de l'equació 4.5 únicament és possible quan es compleixen les hipòtesis utilitzades en la seva deducció:

- (a) Flux estacionari
- (b) Flux incompressible
- (c) Llei hidrostàtica de pressions

Per tant, únicament és possible la seva aplicació en fluxos estacionaris uniformes o gradualment variables.

(5) Els tres termes que componen l'energia total H (equació 4.7) s'interpreten de la manera següent:

z_i energia potencial a l'alçada del llit del riu

y_i energia de pressió a l'alçada del llit del riu

$\alpha \cdot v_i^2 / 2g$ energia cinètica mitjana o energia mitjana de velocitat

(6) Una magnitud que es fa servir sovint és l'anomenada energia específica E d'una secció de riu definida com:

$$E_i = y_i + \alpha_i \cdot \frac{v_i^2}{2 \cdot g} \quad (4.8)$$

Representa l'alçada de la línia d'energia (vegeu la figura 4.1) respecte al llit del riu. Aquesta equació s'acostuma a fer servir d'una manera gràfica a Chow (1982), French (1985) i Naudascher (2000), entre altres.

4.9 Equacions de Saint Venant

4.9.1 Hipòtesis considerades

(1) La modelització del flux variable gradualment variat unidimensional en un riu s'efectua amb les anomenades equacions de Saint Venant (1871). No s'ha d'oblidar que aquestes equacions només constitueixen un model matemàtic relativament simple que pretén simular el comportament d'un fenomen físic extremadament complex, ja que únicament té en compte els aspectes més importants i descarta la consideració precisa dels que se suposen de segon ordre, com ara les turbulències i l'efecte tallant per vent.

Les equacions de Saint Venant consten de dues equacions, anomenades equació de continuïtat i equació del *momentum*, que es descriuran en els apartats 4.9.2 i 4.9.3, respectivament.

(2) En la deducció de les equacions de Saint Venant es consideren les hipòtesis següents:

(a) El flux és unidimensional, per la qual cosa la velocitat és constant en els punts d'una secció transversal qualsevol del riu, i la superfície de l'aigua en una secció transversal qualsevol d'un riu és horitzontal.

(b) La curvatura de les línies de corrent és petita, per la qual cosa les acceleracions verticals es consideren menyspreables. Sota aquests supòsits, com ja s'ha exposat en el punt 4.8 (2), la distribució de pressions és la hidrostàtica.

(c) La densitat de l'aigua és constant (fluid incompressible).

(d) Els efectes del fregament de l'aigua amb el llit i les turbulències poden ser avaluats amb les lleis empíriques deduïdes per al flux estacionari.

(e) El llit del riu és fix.

(f) El pendent longitudinal del riu és petit, de manera que es pot considerar que el $\cos \Theta \approx 1$.

En aquestes hipòtesis no es restringeix explícitament la forma de la secció transversal del riu, encara que sí que es fa implícitament en considerar que el flux és unidimensional.

Tampoc no es limita explícitament com ha de ser la variació d'aquesta secció transversal, encara que implícitament també es fa en considerar que la curvatura de les línies de corrent és petita, per la qual cosa aquests canvis no poden ser bruscos.

4.9.2 Equació de continuïtat

(1) En mecànica de fluids es denomina equació de continuïtat la llei de conservació de la massa d'aigua entre dues seccions del riu.

La deducció de l'equació de continuïtat es pot fer aplicant el teorema del transport de Reynolds (Chaudhry, 1993; Munson, 1999; Streeter, 2000; Chow, 1994) o considerant directament (Cunge, 1980; Chow, 1982) que:

Volum d' aigua que entra en el volum de control = Volum d' aigua que surt del volum de control + Augment del volum d' aigua emmagatzemat dins del volum de control

Considerant com a *volum de control* el volum d' aigua tancat entre dues seccions del riu, com per exemple, les seccions 1 i 2 de la figura 4.7.

(2) L'equació de continuïtat, expressada en la seva forma conservativa o divergent, és:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (4.9)$$

On:

- A àrea mullada, expressada en m²
- Q cabal, expressat en m³/s
- t temps, expressat en s
- x distància en la direcció del flux, expressada en m
- q_l cabal d'entrada al volum de control que no prové del flux principal del riu, és a dir, que no està englobat en Q. S'expressa en m³/s

4.9.3 Equació del momentum

(1) Es defineix com a *momentum* la quantitat de moviment d'un fluid, és a dir, al producte de la massa del fluid per la seva velocitat, i es considera flux de *momentum* a través d'una secció determinada del riu:

$$\text{Flux de momentum} = \rho \cdot v \cdot A \times v = \rho \cdot v^2 \cdot A$$

On:

- ρ densitat del fluid, expressada en kg/m³
- v velocitat mitjana, expressada en m/s
- A àrea mullada, expressada en m²

Es denomina *equació del momentum* o *equació dinàmica* la conservació del flux de *momentum* en la direcció del flux que requereix que la suma de forces aplicades en un volum de control sigui igual a la suma de la taxa de canvi del *momentum* emmagatzemat dins del volum de control i el flux de *momentum* a través de la superfície del volum de control.

La deducció de l'equació del *momentum* es pot fer aplicant el teorema del transport de Reynolds (Chaudhry, 1993; Munson, 1999; Streeter, 2000; Chow, 1994) o considerant directament les forces aplicades i el *momentum* en un volum de control (Cunge, 1980; Chow, 1982).

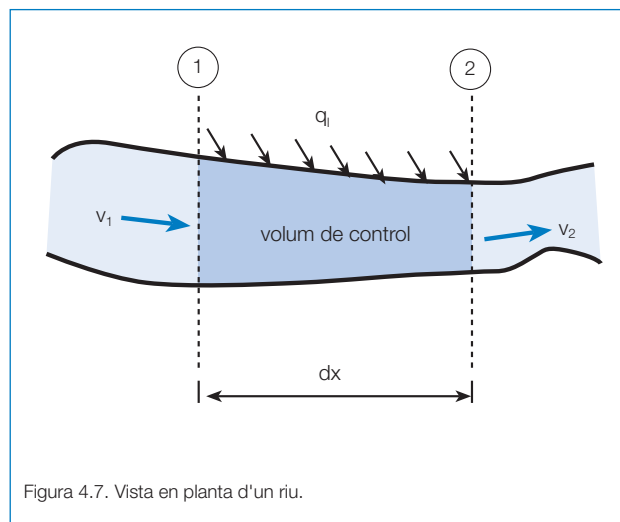


Figura 4.7. Vista en planta d'un riu.

(2) L'equació del momentum expressada en la seva forma conservativa o divergent és:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g S_f - g S_0 = q_l (v_l)_x \quad (4.10)$$

On:

- A àrea mullada, expressada en m²
- Q cabal, expressat en m³/s
- t temps, expressat en s
- x distància en la direcció del flux, expressada en m
- y calat fins al tub de corrent, expressat en m
- v velocitat mitjana, expressada en m/s
- g acceleració de la gravetat, expressada en m/s²
- S_f pendent de la línia d'energia, expressat en m/m. S'acostuma a calcular amb fórmules semiempíriques deduïdes per al flux estacionari (hipòtesi d' considerada en la deducció de les equacions de Saint Venant). En el nostre país normalment es fa servir la fórmula de Manning:

$$S_f = \frac{Q \cdot |Q| \cdot n^2}{A^2 \cdot R^{\frac{4}{3}}}$$

- S₀ pendent del llit del riu, expressat en m/m
- q_l cabal d'entrada al volum de control que no prové del flux principal del riu, és a dir, que no està englobat en Q. S'expressa en m³/s per m de longitud del riu
- (v_l)_x component x de la velocitat mitjana del flux q_l, expressat en m/s

(3) El significat físic de cadascun dels termes de l'equació 4.10, suposant per simplicitat que el cabal q_l és nul, és el següent:

$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}$	Terme d'acceleració local
$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$	Terme d'acceleració convectiva
$g \frac{\partial y}{\partial x}$	Terme de força de pressió
$-g S_f$	Terme de força de fregament
$-g S_0$	Terme de força gravitacional

Cadascun d'aquests termes té un significat físic clar. El terme d'acceleració local descriu el canvi de la velocitat amb el temps; el terme de l'acceleració convectiva descriu el canvi en el momentum a causa del canvi en la velocitat al llarg del canal; el terme de força de pressió és proporcional al canvi en el calat; el terme de força gravitacional és proporcional al pendent del llit del riu, i el terme de força de fregament és proporcional al pendent de la línia d'energia, a causa bàsicament de les forces de fricció del llit amb l'aigua (Chow, 1994).

4.9.4 Aplicació de les equacions de Saint Venant

(1) El flux en rius naturals gairebé sempre circula d'una manera no estacionària però, quan el canvi de cabal en el temps (hidrograma de cabal) presenta una variació molt lenta, se sol modelitzar com a flux estacionari per simplicitat.

(2) El flux variable gradualment variat unidimensional es regeix per les equacions de Saint Venant, que expressades diferencialment en la seva forma conservativa o divergent estan substituïdes per les equacions 4.9 i 4.10:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_t \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g S_f - g S_0 = q_t (v_t)_x \quad (4.10)$$

Aquestes equacions formen un sistema de dues equacions diferencials en derivades parcials de tipus hiperbòlic. Per tant, només existeix solució analítica en uns pocs casos extremadament simples, per la qual cosa, a l'efecte pràctic, la seva resolució s'ha d'efectuar numèricament.

(3) La resolució de les equacions de Saint Venant consisteix a calcular l'àrea mullada A i el cabal Q a cada secció del riu, especificada per la seva distància x a una determinada secció, i en cada temps t , comptant des d'un temps de referència.

4.9.5 Simplificació de les equacions de Saint Venant

(1) La resolució de les equacions de Saint Venant no és fàcil, encara que actualment, amb el desenvolupament dels ordinadors, hi ha una multitud de programes comercials que les resolen numèricament.

Per la dificultat que comporta la seva resolució, s'han desenvolupat models de simulació basats en simplificacions del sistema d'equacions citat. Aquestes simplificacions consideren completa l'equació de continuïtat (4.9) i simplifiquen l'equació del momentum (4.10).

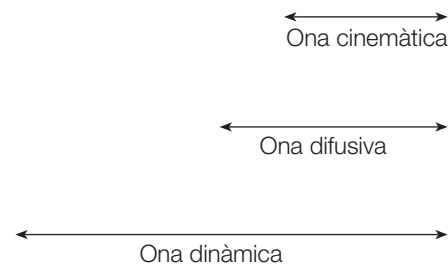
En els models simplificats de les equacions de Saint Venant, rarament s'ha considerat l'existència d'un flux q_t que no prové del flux principal. Si q_t és nul, aquestes equacions són les següents:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4.11)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g S_f - g S_0 = 0 \quad (4.12)$$

Atès que el moviment de l'aigua de manera no estacionària es pot interpretar com el moviment d'ones de gravetat que es desplacen, s'amplifiquen i s'atenuen al llarg del riu, històricament la nominació d'aquests mètodes ha rebut els noms següents:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g S_f - g S_0 = 0 \quad (4.13)$$



(2) El model més simple és el de l'ona cinemàtica, que menysprea les acceleracions locals i convectives i el terme de pressió.

Les ones cinemàtiques dominen el flux quan les forces de pressió no són importants. Això passa quan el pendent del llit S_0 no és petit i els canvis en els cabals Q són moderats.

Aquest model només es pot resoldre partint d'aigües amunt i solucionant el sistema d'equacions aigües avall, per la qual cosa no pot tenir en compte els efectes de rabeig. Aquesta circumstància la inhabilita per a llits amb pendents petits o en aquells que presenten estructures com ara assuts, rescloses, etc.

(3) El model difusiu menysprea les forces inercials i suposa que les acceleracions locals i convectives són de valor semblant i amb signe oposat. Numèricament, el model difusiu no suposa un avantatge clar respecte al model complet. El seu principal avantatge és que és més robust, ja que els termes corresponents a les acceleracions a vegades són font de problemes, sobretot en fluxos propers al crític i en règim supercrític.

Segons el model difusiu, tots els fluxos són subcrítics. El model difusiu no és capaç de simular alguns tipus de flux, encara que presenta un rang d'aplicabilitat més elevat que el model de l'ona cinemàtica.

El model difusiu complet rarament es fa servir, ja que existeix una aproximació a aquest model, expressada en diferències finites i anomenada Muskingum-Cunge, extraordinàriament estesa per la seva senzillesa i perquè els resultats que dona són raonablement bons, sempre que es compleixin els criteris que es presentaran en el capítol 5 (taula 5.2).

5. Mètodes de propagació d'avingudes

5.1 Mètodes de propagació d'avingudes

(1) Com ja s'ha exposat en l'apartat 2.10, quan es modelitza una conca dividint-la en subconques (mètode de la conca composta), és necessari propagar els hidrogrames d'avinguda obtinguts de la transformació pluja-esorrentiu en les subconques que no tinguin el seu punt de desguàs justament en el punt de sortida de la conca general.

Els efectes d'emmagatzematge i resistència al pas del flux que presenta la llera canvien la distribució temporal de l'hidrograma d'entrada, l'hidrograma que es vol propagar. En la figura 5.1 es presenta d'una manera esquemàtica un cas típic de propagació, referenciat en l'exemple que es mostra en la figura 2.22.

(2) Conceptualment hi ha dues maneres de propagar un hidrograma:

(a) *Propagació agregada o hidrològica*. En aquest tipus de propagació es fa servir únicament l'equació de continuïtat expressada de la manera següent:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (5.1)$$

On:

- S funció d'emmagatzematge d'aigua en el volum de control considerat, expressada en m³
- I(t) hidrograma d'entrada en el volum de control, expressat en m³/s
- O(t) hidrograma de sortida en el volum de control, expressat en m³/s

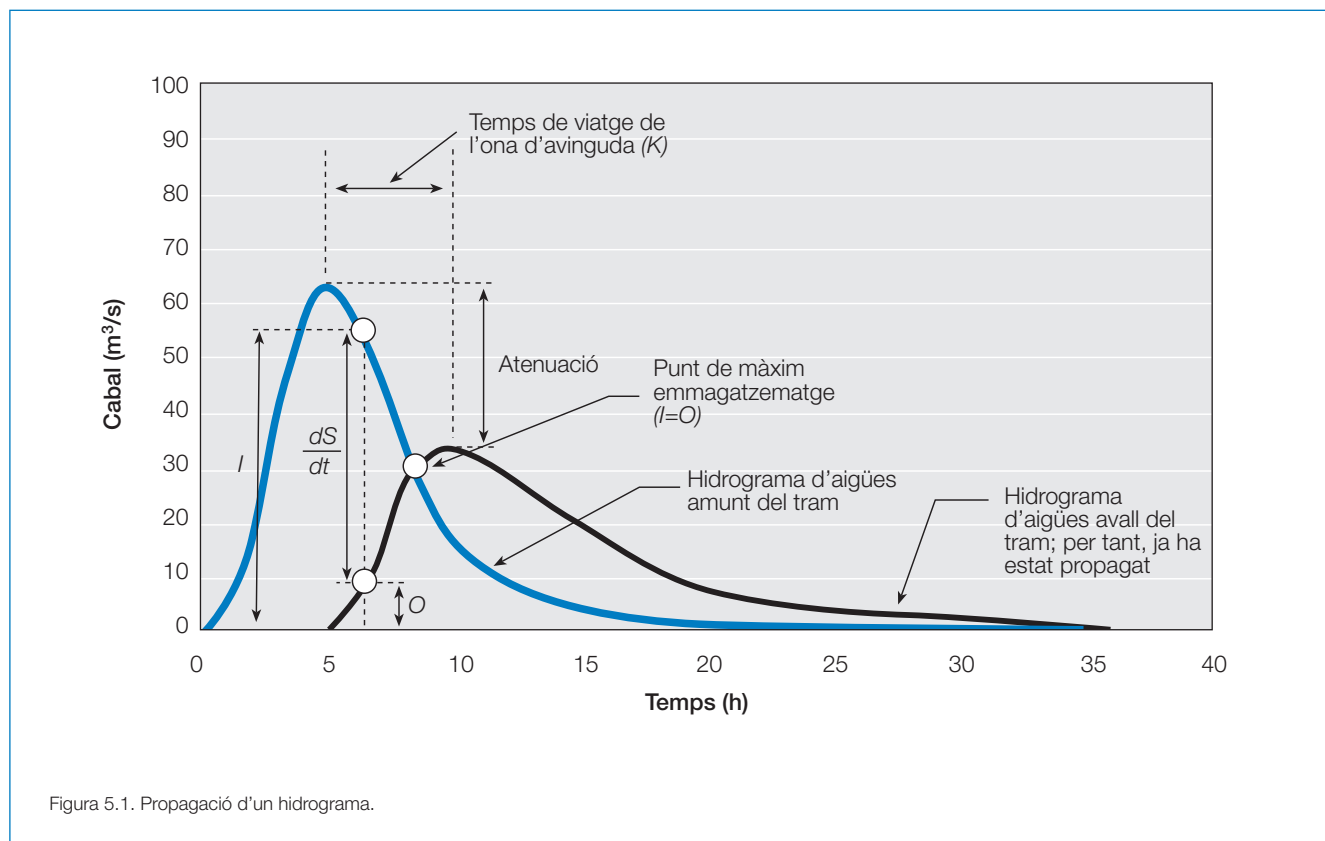
I es menysprea l'equació del momentum.

(b) *Propagació distribuïda o hidràulica*. En aquest tipus de propagació es fan servir les equacions de Saint Venant o alguna de les seves simplificacions (vegeu l'apartat 4.9.5).

(3) Dins dels models de propagació agregada es poden citar els següents:

- (a) Puls modificat
- (b) Muskingum
- (c) Muskingum-Cunge

(4) Quant als models de propagació distribuïda es poden diferenciar els models enunciats en l'apartat 4.9.5.



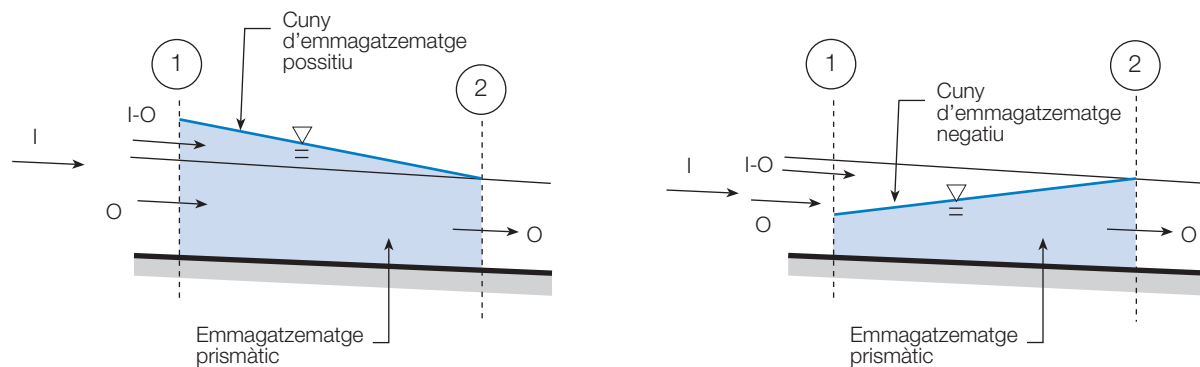


Figura 5.2. Concepte d'emmagatzematge prismàtic i en cuny segons el mètode de Muskingum.

(5) A Ferrer (1993), HEC (2000) i Chow (1994) es pot consultar la deducció i la manera d'aplicar-los. En els apartats següents es fa una exposició resumida d'aquests mètodes i la influència de la plana d'inundació en la propagació dels hidrogrames per aquests mètodes. En l'apartat 5.6 es donen criteris per la selecció del mètode més adequat per a cada cas.

(6) Atès que està notablement estès l'ús de la família de programes informàtics de l'HEC (vegeu l'apartat 1.4) i que la simulació numèrica de la propagació d'avingudes rarament es fa sense l'ajut de l'ordinador, en aquest capítol oportunament es farà referència a les seves capacitats.

5.2 Mètode de Puls

(1) Un dels mètodes més senzills per propagar avingudes és l'anàlisi d'una avinguda que passa per un embassament. Conegut l'hidrograma d'entrada, s'obté l'hidrograma de sortida a partir d'una relació única entre l'emmagatzematge i el cabal de sortida (Ferrer, 1993).

(2) El mètode de Puls suposa que cada tram del riu és un embassament en el qual hi ha una relació entre l'aigua que s'hi emmagatzema i el cabal que surt pel seu extrem d'aigües avall.

(3) L'equació que defineix la propagació de l'emmagatzematge, basada en l'equació 5.1, per un interval de temps Δt és:

$$\left(\frac{S_t}{\Delta t} + \frac{O_t}{2} \right) = \left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) + \left(\frac{S_{t-1}}{\Delta t} - \frac{O_{t-1}}{2} \right) \quad (5.2)$$

On:

- I_t cabal en l'instant t a l'entrada del tram, expressat en m^3/s
- O_t cabal en l'instant t a la sortida del tram, expressat en m^3/s
- Δt diferència entre t i $t-1$, expressat en s

En aquesta equació són coneguts l'hidrograma d'entrada i l'emmagatzematge i el cabal a l'inici de l'interval en el qual es fa la propagació.

(4) En el cas dels trams de riu, no obstant això, aquesta relació s'ha de calibrar empíricament mitjançant mesuraments de les dues magnituds per a diferents cabals (Ferrer, 1993). També es pot fer amb programes com ara l'HEC-RAS o l'HEC-2, fent passar diversos cabals.

Excepte en el cas dels embassaments, on és exacte, està considerat com un mètode treballós i fins i tot incorrecte.

(5) Hi ha una variant del mètode de Puls especial per calcular l'efecte dels embassaments en l'hidrograma (Ferrer, 1993). En aplicar-ho, es recomana suposar les condicions pèssimes possibles (embassament inicialment ple, etc.).

5.3 Mètode de Muskingum

(1) Probablement el mètode de Muskingum és el mètode de propagació agregada que es coneix millor i es fa servir més. Va ser desenvolupat pels US Army Corps of Engineers and McCarthy en el riu Muskingum (Ohio), l'any 1935 (McCarthy, 1940).

El mètode de Muskingum suposa que l'emmagatzematge en un tram de riu es descompon en dues parts (figura 5.2): un emmagatzematge prismàtic i un emmagatzematge en cuny. L'emmagatzematge prismàtic es realitza bàsicament segons el perfil de la superfície d'aigua en condicions estacionàries i l'emmagatzematge en cuny és la diferència d'aquest emmagatzematge respecte del real.

(2) El mètode de Muskingum defineix l'emmagatzematge en un tram de riu com una funció lineal dels cabals d'entrada i sortida adequadament ponderats:

$$S = \begin{array}{l} \text{Emmagatzematge} \\ \text{prismàtic} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Emmagatzematge} \\ \text{en cuny} \end{array}$$

$$S = K \cdot O + K \cdot X \cdot (I - O)$$

Reordenant resulta:

$$S = K \cdot (X \cdot I + (1 - X) \cdot O) \quad (5.3)$$

On:

- S volum d'aigua total en el tram de riu considerat, expressat en m³
- O cabal que surt del tram de riu considerat, expressat en m³/s
- I cabal que entra en el tram de riu considerat, expressat en m³/s
- K coeficient de proporcionalitat, que resulta ser el temps de viatge d'una ona d'avinguda en el tram de riu considerat, expressat en s
- X factor de ponderació adimensional. El seu valor es troba entre 0 i 0,5

Un valor de X és 0,5 indica que la ponderació respecte dels cabals d'entrada I i sortida O és la mateixa, que equival a una ona progressiva uniforme que no s'atenua.

(3) La propagació segons el mètode de Muskingum es fa combinant l'equació 5.3 amb l'equació de continuïtat expressada segons l'equació 5.2. Per a un tram i un interval de temps que va des de t-1 fins a t, s'obté:

$$O_t = C_1 \cdot I_t + C_2 \cdot I_{t-1} + C_3 \cdot O_{t-1} \quad (5.4)$$

On els coeficients C₁, C₂ i C₃ són:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (5.5)$$

$$C_3 = \frac{2 \cdot K \cdot (1 - X) - \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}$$

On:

- O_t cabal que surt del tram de riu considerat en l'instant t, expressat en m³/s
- I_t cabal que entra en el tram de riu considerat en l'instant t, expressat en m³/s
- O_{t-1} cabal que surt del tram de riu considerat en l'instant t-1, expressat en m³/s
- I_{t-1} cabal que entra en el tram de riu considerat en l'instant t-1, expressat en m³/s
- K coeficient de proporcionalitat, expressat en s
- X factor de ponderació; és adimensional
- Δt interval de temps considerat, que és la diferència entre t i t-1, expressat en s

(4) Quan es disposa d'hidrogrames a l'entrada i a la sortida del tram que es vol estudiar corresponents a una mateixa avinguda es poden obtenir els valors de K i X.

El temps de viatge d'una ona d'avinguda, K, es pot estimar com el temps entre punts equivalents entre els hidrogrames d'entrada i sortida, punts que habitualment són els pics dels hidrogrames. Aquest temps també es pot estimar calculant el temps entre els centroides de les àrees dels hidrogrames d'entrada i sortida.

Una vegada estimat el coeficient de proporcionalitat K, el valor de X s'obté provant diferents valors fins que el mètode és capaç d'obtenir l'hidrograma de sortida partint de l'hidrograma d'entrada i les característiques del tram de riu.

Moltes vegades, és convenient fer algun ajust fi del valor del coeficient de proporcionalitat K per acabar d'ajustar el mètode.

(5) Si no es disposa d'hidrogrames per a la calibració del mètode de Muskingum, sol ser més adequat utilitzar una variant d'aquest mètode, anomenada mètode de Muskingum-Cunge, que s'exposarà en l'apartat 5.4.

Malgrat tot, s'han desenvolupat mètodes de càlcul d'ambdós coeficients, K i X, directament, encara que amb aquests mètodes no és fàcil d'obtenir bons resultats.

L'estimació del coeficient de proporcionalitat K es pot fer a partir de la llei de Seddon, segons la qual la velocitat d'una ona d'avinguda, també anomenada velocitat de l'ona cinemàtica, és:

$$v_w = \frac{dQ}{dA} \approx \frac{1}{B} \cdot \frac{dQ}{dy} \quad (5.6)$$

I, per tant:

$$K = \frac{L}{v_w} \quad (5.7)$$

On:

- v_w velocitat de l'ona d'avinguda, expressada en m/s
- B mirall d'aigua, expressat en m
- Q cabal, expressat en m³/s
- y calat, expressat en m
- L longitud del tram de riu considerat, expressat en m
- K coeficient de proporcionalitat, que és el temps de viatge d'una ona d'avinguda en el tram de riu considerat, expressat en s

La velocitat de l'ona d'avinguda v_w és la de l'ona d'aigua i, si es disposa d'hidrogrames d'avinguda en dos punts d'un mateix riu, se sol determinar calculant la velocitat dels seus pics.

A la literatura tècnica se sol anomenar celeritat la velocitat de l'ona d'avinguda v_w . En aquesta guia no s'ha volgut fer servir aquest nom per evitar confusions amb la celeritat de les ones de gravetat, definida en l'apartat 4.6.

Conceptualment, la diferència entre la celeritat de les ones de gravetat c i la velocitat de l'ona d'avinguda v_w és que la primera es refereix a la velocitat amb la qual es propaguen les petites ones provocades per una pertorbació i la segona és la velocitat a la qual es trasllada l'ona d'aigua d'una avinguda.

El coeficient de proporcionalitat K també es pot estimar calculant la velocitat de l'aigua mitjana en el tram, v , i multiplicar-la per un coeficient adequat. En la taula 5.1 es presenten una sèrie de valors típics, dels quals el valor d'1,5 és el més utilitzat en seccions naturals de rius.

Forma del riu	v_w/v
Rectangular ample	1,67
Parabòlic ample	1,44
Triangular	1,33

Taula 5.1. Valors del quocient v_w/v típics.

Per estimar el valor del factor de ponderació X es pot fer servir una equació proposada per (Cunge, 1969) en el desenvolupament del mètode conegut com Muskingum-Cunge, que s'exposarà en l'apartat 5.4.

$$X = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{Q_0}{B \cdot S_0 \cdot v_w \cdot \Delta x} \right) \quad (5.8)$$

On:

- Q_0 cabal de referència obtingut de l'hidrograma d'entrada, expressat en m^3/s
- v_w velocitat de les ones d'avinguda, expressada en m/s
- S_0 pendent del fons de la llera, expressat en m/m
- B mirall d'aigua, expressat en m
- Δx longitud del tram, expressada en m
- X factor de ponderació; és adimensional

No és clar quin ha de ser el cabal de referència Q_0 . L'experiència ha mostrat que s'obtenen resultats acceptables considerant un cabal mitjà entre el cabal de pic i el cabal base de l'hidrograma entrant en el tram.

(6) Per aconseguir que el mètode de Muskingum sigui estable, s'ha de complir:

$$2 \cdot K \cdot X < \Delta t \leq K \quad (5.9)$$

On:

- K coeficient de proporcionalitat, expressat en s
- X factor de ponderació; és adimensional
- Δt interval de temps considerat, que és la diferència entre t i $t-1$, expressat en s

Idealment hauria d'ésser K igual a Δt . Per tant, un tram de riu convé dividir-lo en subtrams, de manera que el temps de viatge de l'ona d'avinguda sigui aproximadament igual a Δt , és a dir:

$$\text{Nombre de trams} = \frac{K}{\Delta t} \quad (5.10)$$

5.4 Mètode de Muskingum-Cunge

(1) Cunge va proposar un mètode de propagació basat en l'antic mètode de Muskingum (Cunge, 1969).

El mètode Muskingum-Cunge és una tècnica de propagació no lineal que considera la difusió d'un hidrograma basat en les propietats físiques de la llera i l'hidrograma d'aigües amunt. Els avantatges d'aquest mètode de propagació agregat sobre la resta de la mateixa família són que els seus paràmetres tenen significat físic, la solució és independent de l'interval de computació especificat per l'usuari i els resultats que proporciona són comparables als que dona la propagació per l'ona dinàmica en un ample ventall de casos.

Les principals limitacions són (NERC, 1975):

(a) Que no es tenen en compte els efectes de rabeig. Per tant, no és apte per simular rius en els quals siguin importants els efectes de pertorbacions propagats aigües amunt per assuts, embassaments, ponts de capacitat reduïda, etc.

(b) Que les solucions divergeixen de les obtingudes del trànsit per l'ona dinàmica quan la velocitat de l'ona d'avinguda v_w varia apreciablement dins del tram que s'està estudiant, com, per exemple, quan els hidrogrames d'aigües amunt varien ràpidament i les seccions transversals són més aviat amples i amb calats no gaire grans, o en casos d'avingudes en planes d'inundacions extenses.

(2) La formulació d'aquest mètode es deriva de les equacions de la propagació d'avingudes per l'ona de difusió 4.9, 4.10 i 4.13:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (4.9)$$

$$g \frac{\partial y}{\partial x} - g S_f - g S_0 = q_l (v_l)_x \quad (4.10)$$

Si es combinen adequadament i es *linealitzen* al voltant del punt des d'on s'està fent el càlcul, s'obté l'equació de la difusió convectiva (Miller, 1975):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + v_w \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \cdot \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + v_w \cdot q_l$$

On:

- Q cabal, expressat en m³/s
- t temps, expressat en s
- v_w velocitat de l'ona d'avinguda en la direcció x, expressada en m/s
- x distància al llarg de la llera, expressada en m
- μ difusivitat hidràulica, expressada en m²/s
- q_l cabal d'entrada al volum de control que no prové del flux principal del riu, és a dir, que no està englobat en Q. S'expressa en m³/s per m de longitud del riu

La difusivitat hidràulica μ es defineix com:

$$\mu = \frac{Q}{2 \cdot B \cdot S_0} \quad (5.11)$$

On:

- Q cabal, expressat en m³/s
- μ difusivitat hidràulica, expressada en m²/s
- B mirall d'aigua, expressat en m
- S₀ pendent del llit del riu, expressat en m/m

(3) En el mètode original de Muskingum, considerant el flux q_l, l'equació de continuïtat 4.9 es discretitzava en diferències finites en el plànol x-t (figura 5.3) com:

$$Q_{j-1}^{n-1} = C_1 \cdot Q_j^n + C_2 \cdot Q_j^{n-1} + C_3 \cdot Q_{j-1}^n + C_4 \cdot Q_l \quad (5.12)$$

Assumint que l'emmagatzematge és expressat segons l'expressió 5.3 i canviant la notació de l'equació 5.11, s'obté:

$$O_t = C_1 \cdot I_t + C_2 \cdot I_{t-1} + C_3 \cdot O_{t-1} + C_4 \cdot Q_l \quad (5.13)$$

On la definició dels coeficients C₁, C₂ i C₃ és la que s'indica en les fórmules 5.5. La definició dels coeficients C₄ i Q_l és la següent:

$$C_4 = \frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (5.14)$$

$$Q_l = q_l \cdot \Delta x \quad (5.15)$$

On:

- O_t cabal que surt del tram de riu considerat en l'instant t, expressat en m³/s

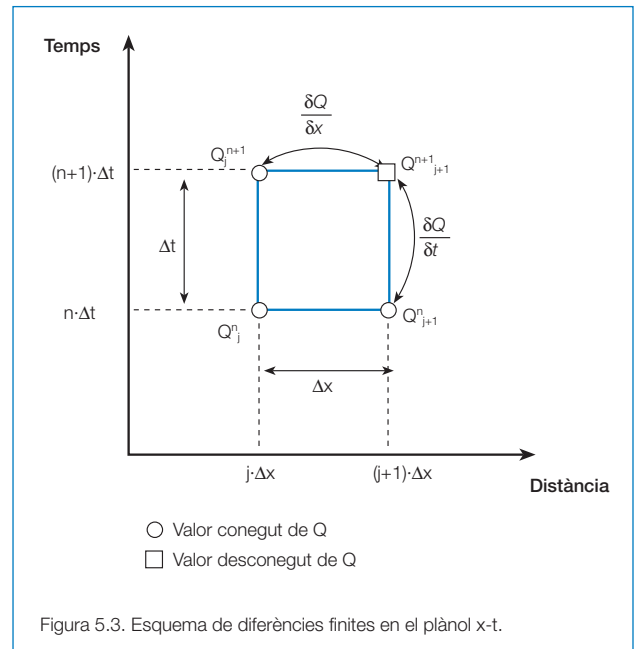


Figura 5.3. Esquema de diferències finites en el plànol x-t.

- I_t cabal que entra en el tram de riu considerat en l'instant t, expressat en m³/s
- O_{t-1} cabal que surt del tram de riu considerat en l'instant t-1, expressat en m³/s
- I_{t-1} cabal que entra en el tram de riu considerat en l'instant t-1, expressat en m³/s
- K coeficient de proporcionalitat, expressat en s
- X factor de ponderació; és adimensional
- Δt interval de temps considerat, que és la diferència entre t i t-1, expressat en s
- q_l cabal d'entrada al volum de control que no prové del flux principal del riu, és a dir, que no està englobat en Q. S'expressa en m³/s per m de longitud del riu
- Δx Longitud del tram, expressada en m

(4) En el mètode de Muskingum, la quantitat de difusió μ estava basada en el valor de X, que no estava directament relacionat amb les propietats físiques de la llera, ja que era més aviat una difusivitat numèrica que no pas una difusivitat hidràulica.

Cunge va obtenir analíticament que la difusió μ és:

$$\mu = v_w \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{1}{2} - X \right) \quad (5.16)$$

On:

- μ difusivitat hidràulica, expressada en m²/s
- X factor de ponderació, és adimensional
- Δx longitud del tram, expressada en m
- v_w velocitat de l'ona d'avinguda, expressada en m/s

Si es força que siguin iguals les difusivitats numèrica i hidràulica, igualant les equacions 5.11 i 5.16, s'obté que el mètode de Muskingum-Cunge és una aproximació a la propagació per l'ona de difusió. Fent això, els coeficients K i X són:

$$K = \frac{\Delta x}{v_w} \quad (5.17)$$

$$X = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{Q}{B \cdot S_0 \cdot v_w \cdot \Delta x} \right) \quad (5.18)$$

On:

- K coeficient de proporcionalitat, que és el temps de viatge d'una ona d'avinguda en el tram de riu considerat, expressat en s
- X factor de ponderació; és adimensional
- Δx longitud del tram, expressada en m
- v_w velocitat de l'ona d'avinguda, expressada en m/s
- Q cabal, expressat en m³/s
- B mirall d'aigua, expressat en m
- S_0 pendent del llit del riu, expressat en m/m

(5) Els coeficients de propagació C_1 , C_2 , C_3 i C_4 es calculen per a cada Δx i Δt . Els valors de les variables v_w , B i Q es resolen iterativament. Aquest procés de càlcul està descrit detalladament a Ponce (1983).

(6) Els valors de Δx i Δt s'han d'escollir de tal manera que assegurin l'estabilitat i l'exactitud del procés de càlcul, unes condicions que els programes comercials com ara l'HEC-HMS consideren automàticament.

5.5 Mètode de l'ona cinemàtica

(1) El mètode de l'ona cinemàtica és una tècnica de propagació distribuïda d'avingudes que considera l'equació de continuïtat i la simplificació següent de l'equació del *momentum* (segons que s'ha vist en l'equació 4.13):

$$S_f = S_0$$

On:

- S_f pendent de la línia d'energia, expressat en m/m
- S_0 pendent del llit del riu, expressat en m/m

La resolució d'aquest sistema de dues equacions se sol fer emprant algun esquema de diferències finites.

(2) Les equacions de l'ona cinemàtica no permeten la difusió d'hidrogrames, és a dir, no l'atenuen i, per tant, només els traslladen.

Per això, com ja s'ha comentat en l'apartat 3.1, és una tècnica adequada per a la modelització del comportament de conques urbanes i, en determinats casos, de lleres amb un pendent

longitudinal important. És una altra aplicació en la qual el mètode de l'ona cinemàtica dona bons resultats en la modelització del flux sobre planes d'inundació amb calats petits.

Es vol assenyalar que, per raó de les seves limitacions, és recomanable disposar d'una certa experiència i comprendre bé les hipòtesis en les quals es basa aquest mètode abans de fer-lo servir.

5.6 Aplicabilitat de les diferents tècniques de propagació

(1) En aquesta guia s'han presentat diversos mètodes per propagar hidrogrames i, en la literatura especialitzada, se'n poden trobar uns quants més. El problema inherent a aquesta varietat de tècniques és l'elecció de la tècnica per a la simulació del comportament d'una determinada conca, tenint en compte no solament la seva exactitud en termes absoluts, sinó també el balanç entre l'esforç que representa la utilització i l'exactitud dels resultats que proporciona.

(2) Les tècniques de propagació agregada o hidrològica es fan servir tram a tram des d'aigües amunt fins a aigües avall. Generalment, amb aquestes tècniques només es pretén obtenir l'hidrograma propagat en el punt de desguàs de la conca que es vol estudiar.

Com ja s'ha vist, en general, aquestes tècniques no permeten la simulació dels efectes dels rabeigs i, per tant, no poden propagar cap pertorbació aigües amunt. Malgrat aquesta limitació, aquest tipus de mètodes ofereix els avantatges de la simplicitat i l'eficiència computacional. A més a més, dins del seu rang d'utilització limiten els errors a valors acceptables.

En qualsevol cas, es vol recordar que abans d'emprar un d'aquests mètodes s'ha d'estimar el comportament de la conca que cal analitzar, per comprovar que es compleixen les condicions d'aplicabilitat de la tècnica escollida i que després, una vegada ja es disposin dels resultats, s'han de confirmar les condicions esmentades.

(3) Com ja s'ha dit, la propagació per l'ona dinàmica és capaç de simular correctament el comportament d'un flux que compleixi les hipòtesis indicades en l'apartat 4.9.1 (2), però amb l'inconvenient que és un mètode treballós i que no té una alta eficiència computacional.

La propagació distribuïda té uns fonaments hidràulics clars i es basa essencialment en la rugositat de la llera, que es modelitza amb el paràmetre de rugositat de Manning n , del qual es disposa d'abundant literatura i estudis per facilitar-ne l'estimació i la calibració.

(4) Hi ha diversos factors que s'han de tenir en compte en l'avaluació del mètode de propagació que s'empra en la simulació del comportament d'una conca determinada. Tot seguit se'n relacionen els principals:

(a) *Rabeigs*. Els efectes de rabeig provenen principalment de fluxos tributaris importants, embassaments, ponts i obres de desguàs, estretaments, fluctuacions de mareas, tant lunars com meteorològiques, etc. Una avinguda que estigui subjecta a la influència d'un rabeig serà atenuada i tindrà un retard en el temps.

Dels mètodes de propagació agregada només el de Puls modificat (HEC, 2000) és capaç de tenir-lo en compte, encara que dins de les seves pròpies limitacions. En canvi, únicament el mètode de l'ona cinemàtica no és capaç de simular l'efecte dels rabeigs dins de les tècniques de propagació distribuïda.

(b) *Planes d'inundació*. Quan l'avinguda excedeix la capacitat hidràulica de la llera, l'aigua envaeix els marges. Segons la morfologia d'aquestes planes d'inundació, l'ona d'avinguda pot patir una disminució de la seva velocitat v_w significativa, que és necessari tenir en compte.

La influència d'aquesta inundació dels marges sobre l'hidrograma d'una avinguda depèn principalment de l'amplada de la plana d'inundació, del seu pendent lateral i de la resistència al pas del flux per la plana que exerceix la vegetació.

Un altre aspecte important que s'ha de tenir en compte és l'anàlisi de la transició entre la llera i la plana d'inundació. El mètode de propagació emprat ha de considerar la variació del transport K_t entre la llera i la plana d'inundació, cosa que tots els mètodes exposats fan excepte el mètode de Muskingum, el de Puls i el de l'ona cinemàtica.

Es vol recordar que la consideració de flux unidimensional pot ser errònia per simular el comportament d'avingudes sobre planes d'inundació molt amples, com ja s'ha comentat en l'apartat 4.4.

(c) *Pendent de la llera i característiques de l'hidrograma*. El pendent de la llera no afecta només la velocitat de l'ona d'avinguda v_w , sinó també la quantitat d'atenuació que patirà l'hidrograma. Alts pendents generen ones d'avinguda d'elevada velocitat i pendents suaus donen lloc a ones d'avinguda més lentes i més atenuades.

Com ja s'ha comentat, només el mètode de l'ona dinàmica és capaç de simular la propagació d'avingudes per qualsevol pendent, dins del marc de les hipòtesis utilitzades per la seva deducció (apartat 4.4). Respecte de la resta de tècniques, com menor és el pendent,

pitjors resultats ofereixen, encara que els límits de la seva utilització varien per a cada mètode, tal com es veurà més endavant.

Per exemple, el mètode de l'ona cinemàtica no s'hauria d'emprar en pendents inferiors al 0,002. En canvi, el mètode de l'ona de difusió, en considerar el terme de pressió (apartat 4.9.3), pot simular el comportament de lleres amb pendents molt suaus si l'hidrograma no varia ràpidament, ja que menysprea els termes de les acceleracions.

(5) Ponce (1978) va proposar una sèrie de criteris d'aplicabilitat de les diferents tècniques de propagació que han estat comunament utilitzats des de llavors.

Ponce va estudiar l'error en el pic de l'hidrograma acumulat fent servir el mètode de l'ona cinemàtica. Si es limita aquest error al 5 %, es va trobar que s'havia de complir la relació següent:

$$\frac{T_{bs} \cdot S \cdot v_0}{y_0} \geq 171 \quad (5.19)$$

On:

T_{bs} durada de l'hidrograma, expressada en s
 S pendent de la línia d'energia o pendent de la llera, expressat en m/m
 v_0 velocitat mitjana del flux, expressada en m/s
 y_0 calat mitjà en el tram, expressat en m

Aquests valors mitjans s'han de considerar respecte de l'hidrograma que es vol propagar, és a dir, respecte de l'hidrograma d'entrada al tram.

També va estudiar el mètode de l'ona de difusió i va deduir que per limitar al 5 % l'error en el pic de l'hidrograma s'havia de complir la relació següent:

$$T_{bs} \cdot S \cdot \left(\frac{g}{y_0} \right)^{\frac{1}{2}} \geq 30 \quad (5.20)$$

On:

T_{bs} durada de l'hidrograma, expressada en s
 S pendent de la línia d'energia o pendent de la llera, expressat en m/m
 g acceleració de la gravetat, expressada en m/s²
 y_0 calat mitjà en el tram, expressat en m

Factors que cal considerar	Mètodes que poden ser adequats
No hi ha dades observades d'hidrogrames per a la calibració	Ona cinemàtica, Muskingum-Cunge
Rabeigs significatius influencien l'hidrograma de descarrega	Puls modificat
L'ona d'avinguda surt fora dels marges en la plana d'inundació	Puls modificat, Muskingum-Cunge amb vuit punts de secció transversal
Pendent de la llera $> 0,002$ i $\frac{T_{bs} S v_0}{y_0} \geq 171$	Qualsevol
Pendent de la llera entre $0,002$ i $0,0004$ i $\frac{T_{bs} S v_0}{y_0} \geq 171$	Muskingum-Cunge, Puls modificat, Muskingum
Pendent de la llera $< 0,0004$ i $T_{bs} S \left(\frac{g}{y_0}\right)^{\frac{1}{2}} \geq 30$	Muskingum-Cunge
Pendent de la llera $< 0,0004$ i $T_{bs} S \left(\frac{g}{y_0}\right)^{\frac{1}{2}} < 30$	Ona dinàmica

T_{bs} durada de l'hidrograma, expressada en s
 S pendent de la línia d'energia o pendent de la llera, expressat en m/m
 g acceleració de la gravetat, expressada en m/s²
 y_0 calat mitjà en el tram, expressat en m
 v_0 velocitat mitjana del flux, expressada en m/s
 Els valors mitjans s'han de considerar respecte de l'hidrograma que es vol propagar, és a dir, respecte de l'hidrograma d'entrada al tram.

Taula 5.2. Criteris d'aplicabilitat dels diferents mètodes de propagació d'hidrogrames (HEC, 2000).

(6) Dels diferents mètodes de propagació agregada, el de Muskingum-Cunge és el que té un rang d'aplicabilitat més ampli. Això és degut al fet que la resta de les tècniques d'aquesta família no consideren l'equació del *momentum*, encara que sigui de manera simplificada, com fa el mètode de Muskingum-Cunge.

L'experiència ha mostrat que els mètodes de propagació agregada no solen donar bons resultats en lleres amb pendents inferiors al 0,0004, llevat del de Muskingum-Cunge, encara que només en determinats casos.

(7) En general, quan no es disposa de dades per a la calibració de la propagació de l'hidrograma, és preferible l'ús de mètodes amb una clara fonamentació hidràulica, com ara els de propagació distribuïda o el de Muskingum-Cunge, perquè és més fàcil d'estimar els seus paràmetres, bàsicament el coeficient de rugositat de Manning n .

(8) En la taula 5.2 es presenta la taula resum de selecció del mètode adequat per a la propagació d'hidrogrames proposada a HEC (2000).

5.7 Models de simulació comercials

(1) Per tot el que s'ha explicat més amunt, es dedueix que la transformació pluja-escorrentiu d'una conca és un procés laboriós, per la qual cosa s'han desenvolupat diversos programes per portar-la a terme d'una manera còmoda i ràpida.

En l'apartat 1.4 s'ha exposat la conveniència de fer servir els models comercials programats per l'HEC i el DHI, per tal de facilitar l'anàlisi dels casos sotmesos a avaluació i perquè el codi està contrastat.

(2) El model HEC-HMS, programat per l'HEC, està concebut per utilitzar les tècniques hidrològiques que s'han descrit abans tant per a una conca única com per a una conca composta, introduint per separat les dades referents a les pluges i a les subconques.

Les pluges s'introdueixen per estacions d'observació separades i amb aquestes dades es construeix el denominat «model meteorològic», que té diverses alternatives, com ara la de «l'hidrograma definit per l'usuari», «el pes entre estacions donat per l'usuari» —que permet també definir, d'una banda, la distribució relativa de la pluja dins d'un interval de temps i , de l'altra, fixar la pluja total—, «el pes entre estacions inversament proporcional al quadrat de la distància» i altres.

D'altra banda, es defineixen les característiques de la conca que inclouen l'àrea, la llei per obtenir la pluja neta a partir de la pluja que inclou el nombre de corba de l'SCS (NC), relacionat amb el llindar d'escorrentiu, i altres, tant de més senzills com de més complexos. També s'inclou la transformació de la pluja en escorrentiu, com ara l'hidrograma unitari de l'SCS, el de Clark, el de Snyder i altres.

Una altra característica és el cabal base, independent de la pluja considerada, que pot ser constant mensualment amb una disminució exponencial o seguir la llei de l'embassament lineal. En aquesta guia s'ha suposat la hipòtesi que aquest cabal és nul.

Altres característiques poden ser les dels trams que uneixen les subconques, que poden ser diferents segons el mètode de propagació d'hidrogrames triat entre els que es resumeixen en l'apartat 5.6, dels quals cal destacar la variant de Muskingum-Cunge de vuit punts que, a més de permetre un grau de flexibilitat en la secció representativa del tram (amb rugositat diferent en marges i en llera), divideix el tram per intervals, de manera que el flux es recalcula en cada interval, com també es recalculen els valors de K , X i c .

Una altra opció que permet el model és la introducció d'embassaments, i se'n calcula l'efecte en l'hidrograma a partir de la relació volum – desguàs, alçada – volum – desguàs o alçada – àrea – desguàs.

També permet unions de lleres, divisions de lleres, fonts i, fins i tot, embornals o engolidors.

Calcula en cada element els hidrogrames d'entrada i sortida, el valor màxim de l'hidrograma de sortida i l'instant en què es produeix i dibuixa aquests hidrogrames.

L'HEC-HMS és l'evolució de l'HEC-1 en format Windows, encara que no disposa de totes les seves capacitats, com ara la definició per part de l'usuari de la corba temps-superfície en l'hidrograma sintètic de Clark o la consideració de la neu.

(3) El model MIKE 11, programat pel DHI, és un dels més coneguts en l'estudi del moviment de l'aigua en les lleres (model hidràulic) en règim variable i té un mòdul opcional anomenat RR (Rainfall-Runoff), que conté tres programes per estudiar la transformació de la pluja en cabals, és a dir tres models hidrometeorològics anomenats NAM, UHM i SMAP, a més d'altres models més complexos.

En la transformació de la pluja en escorrentiu, tant el model NAM com l'UHM es poden fer servir aïllats, o bé en combinació amb el MIKE 11 en l'estudi de conques úniques o de les subconques de les conques compostes que formen xarxes més o menys complexes. En aquest segons cas, per a la propagació i la combinació d'hidrogrames es fa imprescindible l'ús del MIKE 11.

D'altra banda, el model SMAP està destinat a simular dades mensuals de les conques o les subconques, per la qual cosa no és aplicable al càlcul de zones inundables per avingudes.

El model NAM és un model de transformació pluja-escorrentiu de circulació contínua (apartat 3.1). Consisteix a simular el moviment de l'aigua de pluja a partir de la seva caiguda al terra suposant que pot quedar detinguda en tres tipus de dipòsits: el de superfície (detenció), la zona a la qual arriben les arrels de les plantes i la zona de l'aigua subterrània o freàtica, a les quals l'aigua entra i surt regulada per fórmules físiques o semiempíriques. A més a més, opcionalment pot considerar l'emmagatzematge de la neu, l'efecte dels regadius i el de possibles bombaments.

Per poder-se aplicar requereix:

- (a) Els paràmetres del model. S'han d'estimar quinze paràmetres, quatre d'addicionals si es considera l'efecte de la neu i dos més per tenir en compte l'efecte dels regadius.
- (b) Les condicions inicials.
- (c) Les dades meteorològiques.

Dades de cabals per a la calibració i la validació del model, que té una importància especial atesa la complexitat del model.

El model NAM es pot fer servir per simular el procés hidrològic de manera contínua o bé successos aïllats com els de les avingudes.

El model calcula una única sèrie cronològica per a cada conca a partir de valors mitjans ponderats de la pluja.

Finalment, el model UHM simula l'hidrograma produït per tempestes amb l'ús de tècniques del mètode de l'hidrograma unitari. La pluja neta es pot estimar considerant les pèrdues com una pèrdua inicial i constant després, proporcional a la pluja total o pel mètode del nombre de corba de l'SCS.

El seu flux és simulat pels mètodes de l'hidrograma unitari, de manera que, a més de l'hidrograma adimensional de l'SCS, admet també el diagrama triangular de l'SCS o un hidrograma definit per l'usuari (que pot ser de tres tipus). Pot calcular diverses conques a la vegada i mostrar els resultats finals o incloure'ls en punts del model hidrodinàmic del MIKE 11 per simular la propagació dels hidrogrames.

6. Càlcul de nivells d'aigua

6.1 Règim gradualment variat

(1) Com ja s'ha esmentat en l'apartat 4.7, en el règim gradualment variat les variables que caracteritzen el flux es mantenen constants en el temps però poden canviar en l'espai. Està governat per la denominada equació de les corbes de rabeig, una particularització de l'equació de conservació de l'energia, de la manera següent:

(a) Per conductes prismàtics de secció constant:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2}$$

(b) Per conductes no prismàtics:

$$S_f = S_0 - (1 - Fr^2) \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{Q^2}{g \cdot A^3} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)_{geom}$$

(2) Els mètodes de resolució numèrica d'aquesta equació diferencial es basen en formulacions del règim uniforme per estimar S_f (equacions de Manning o Chezy) i acostumen a consistir en la seva integració pas a pas des d'un dels extrems (Step Method), per la qual cosa, a més de conèixer el cabal, calen condicions de contorn que depenen del tipus de règim que es desenvolupi: generalment, calats aigua avall (si el règim és lent) o aigua amunt (si el règim és ràpid). Aquesta equació no presenta problemes d'instabilitat importants (excepte en la proximitat del règim crític), de manera que la seva resolució és molt ràpida i robusta.

(3) En moltes circumstàncies, aquest tipus de flux, amb un cabal únic idèntic a tots els punts d'un riu, no es produeix mai (excepte, potser, en alguns trams de canals), però en algunes circumstàncies es pot aproximar bastant a règims baixos, molt constants, de molts rius o, sobretot, es pot fer servir per avaluar d'una manera adequada i senzilla les làmines d'aigua associades a determinats cabals (com ara el cabal punta d'un hidrograma), sempre que la situació estudiada sigui clarament unidimensional i els efectes de laminació petits. En particular, aquestes singularitats fan que aquest tipus de models sigui sovint utilitzat per estudiar trams relativament curts on el cabal pràcticament no canvia.

(4) Actualment, en la pràctica, aquest tipus de model és sense cap mena de dubte el més utilitzat, a causa bàsicament de l'accés gratuït i la versatilitat del model HEC-RAS (River Analysis System), desenvolupat per l'Hydrologic Engineering Center dels US Army Corps of Engineers, els fonaments del qual es descriuen tot seguit.

(5) L'HEC-RAS és un model desenvolupat a partir del model anterior HEC-2, àmpliament contrastat, per calcular perfils de la làmina d'aigua per fluxos permanents, gradualment variats, en canals prismàtics i no prismàtics. En general, es pot considerar que les bases teòriques no han canviat, però el nou model permet una interacció entre el tècnic i el model matemàtic molt més fluida gràcies a l'entorn visual WINDOWS que fa servir. Permet fer càlculs en règim subcrític (lent) i supercrític (ràpid), i amb les darreres versions s'ha incorporat la possibilitat del denominat càlcul mixt per a la consideració de l'alternança de trams ràpids i lents. Aquesta possibilitat permet la localització i el càlcul dels ressals hidràulics, que poden ser molt nombrosos en un tram extens de riu i tenir una gran importància local sobre el funcionament hidrodinàmic de les zones pròximes. A més a més, incorpora una gran quantitat d'opcions per considerar els efectes d'obstacles diversos com són ponts, conduccions o sobreexidors, la disposició de murs o motes d'endegament, la consideració de diferents rugositats als marges per tenir present, per exemple, la vegetació a les planes d'inundació, etc.

Com ja s'ha fet constar més amunt, el procediment de càlcul es basa en la solució de l'equació de balanç de l'energia expressada unidimensionalment (al llarg d'una línia de flux) i basada en la fórmula de Manning per a l'estimació de les pèrdues per fricció. Aquesta equació, en la seva forma original, correspon al conegut trinomi de Bernouilli:

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + h_{f\ 1-2} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

entre dues de les seccions dels trams en què es divideix un riu, però convenientment desenvolupada dona lloc a l'equació diferencial ordinària de les corbes de rabeig, amb les expressions i els mètodes de resolució que s'han esmentat més amunt.

Per avaluar les pèrdues, tant per fricció com per efecte d'expansions o contraccions del flux, es fa servir l'expressió següent:

$$h_{f\ 1-2} = L \cdot S_{f\ 1-2} + \lambda \cdot \left[\alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} - \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} \right]$$

On el primer terme correspon a les pèrdues per fricció al llarg del tram de longitud L entre les seccions 1 i 2, i λ és el coeficient de pèrdues per expansions o contraccions, que HEC-RAS pren per defecte amb els valors de 0,3 i 0,1, respectivament (transicions graduals).

Existeixen situacions del flux en les quals la metodologia anterior no és suficient perquè no es coneixen prou bé les pèrdues d'energia. Llavors el programa recorre a la utilització de l'equació del *momentum*, mitjançant la qual s'estableix l'equilibri de forces (segona llei de Newton) tant als ressalts hidràulics (tal com es fa amb la fórmula dels calats conjugats de Bélanger, Chow, 1982) com a les confluències de diferents rius o branques. La simplificació per règim permanent d'aquesta equació correspon a l'equilibri entre les forces de pressió hidrostàtica i les components de pes del fluid i de fricció als contorns del volum considerat, i és de la manera següent:

$$\sum F_i = m \cdot a \rightarrow P_{n2} - P_{n1} + W_x - F_f = \rho \cdot Q \cdot (v_2 - v_1)$$

(6) Des del punt de vista pràctic, el model HEC-RAS es divideix, bàsicament, en diversos mòduls de geometria (planta o traça del riu, seccions transversals, ponts i altres estructures hidràuliques, definició de rugositats, etc.), condicions de contorn, computació i paràmetres de càlcul, presentació de resultats gràfics i numèrics, i sumari d'errors i avisos. En els apartats següents, en els quals es recull una sèrie de recomanacions de caràcter general per a l'ús del model HEC-RAS als estudis d'inundabilitat, es comenten més detalladament les principals opcions d'aquests mòduls. En resum es pot dir que entre els resultats que aporta el programa hi ha el càlcul dels nivells d'aigua en les diferents seccions (per a diferents casos o escenaris amb diversos cabals), la velocitat mitjana de l'aigua (tant a la secció total com al canal central o als marges), l'estimació d'esforços sobre el llit i els talussos, el nombre de Froude, etc. Respecte a versions antigues s'ha millorat considerablement la sortida de resultats i els gràfics, la qual cosa permet resumir millor les dades que aporta el model a l'usuari, a la vegada que li facilita la detecció d'errors i millores possibles del model.

6.2 Recomanacions per als treballs amb models hidràulics

6.2.1 Introducció

En aquest capítol s'inclouen una sèrie de recomanacions i referències, presentades en forma de punts, que estan bàsicament adreçades a la utilització del programa HEC-RAS. Això no vol dir que aquestes recomanacions no es puguin fer extensives a la resta de models si es fa amb uns certs criteris i coneixements hidràulics.

No es pretén que aquest sigui un recull sistemàtic de recomanacions (que es presenten simplement amb l'ordre que millor ha facilitat la seva organització), però sí que es considera que poden ser-hi les més importants o amb una influència més gran sobre els resultats i la presentació dels estudis d'inundabilitat.

6.2.2 Recomanacions sobre la geometria i la mateixa modelització

6.2.2.1 L'escala de la topografia i l'àmbit de simulació

L'escala de la topografia que s'ha d'utilitzar per dur a terme una modelització hidràulica ha de tenir la precisió suficient per distingir correctament els elements del territori que poden influir substancialment sobre el flux. Segons el cabal, aquests elements poden tenir dimensions inferiors al metre. Treballs amb cartografia inferior a 1:1.000, o els seus models digitals del terreny (MDT) equivalents (amb pas de malla màxim de 5 x 5 m) tenen una fiabilitat escassa.

Cal indicar que l'àmbit dels estudis ha de ser de caràcter local per tal de considerar el fet que els cabals al tram estudiat, sota condicions de règim permanent, siguin pràcticament constants. Això vol dir que les longituds dels rius analitzats s'han de limitar per tal que els efectes de laminació o les aportacions laterals «difoses» siguin menyspreables.

Com a ordre de magnitud, es recomana que no es portin a terme estudis de zones inundables amb models permanents per a trams superiors a 4 km. Si el tram supera aquesta longitud s'hauria de fer una primera anàlisi en règim variable, refinant el càlcul en règim permanent en trams de menys de 4 km amb el cabal pic obtingut en règim variable per a cadascun dels trams.

6.2.2.2 Disposició de les seccions

(1) La geometria dels models, traça de la llera principal i seccions, es considera necessari que estigui correctament georeferenciada per facilitar la localització dels diferents elements i millorar la visualització en planta dels cursos d'aigua. De la mateixa manera, convé que les seccions s'identifiquin per un PQ creixent d'aigües avall a aigües amunt. Aquestes tasques es faciliten considerablement amb l'ús d'eines d'importació de geometria i exportació de resultats amb bases de GIS o CAD. El mateix HEC facilita gratuïtament un programa d'importació-exportació denominat HEC-GeoRAS.

(2) L'equidistància entre seccions determina la bondat dels resultats del model. Per a aspectes estrictament de càlcul, es poden proposar els valors següents:

$L \approx B$ per a rius molt irregulars

$L \approx 5 \cdot B$ per a rius molt regulars

Tipus de règim	Tipus de transició	Contracció	Expansió
Subcrític	Transicions graduals	0,1	0,3
	Seccions típiques de ponts	0,3	0,5
	Transicions brusques	0,6	0,8
Supercrític	Transicions graduals	0,05	0,1
	Transicions brusques	0,1	0,2

Taula 6.1. Coeficients de pèrdues localitzades típics (HEC, 2000).

A les proximitats del règim crític, L s'ha de reduir perquè allà augmenta la disparitat entre els pendents d'energia calculats a cada secció, la qual cosa pot dificultar el procés d'integració de l'*Step Method*. A més a més, el problema principal rau en el fet que B depèn del cabal i , per tant, del període de retorn estudiat en cada cas, i , a més a més, s'ha observat que per als casos de molts rius catalans aquesta equidistància no seria suficient per observar molts comportaments locals. Per tant, a la pràctica és preferible establir una equidistància màxima de 25 m, equivalent segons les expressions anteriors (menys exigents) a uns amplex de 5 a 25 m.

Amb aquests valors no hi hauria d'haver problemes de càlcul però, en tot cas, caldrà comprovar que efectivament al sumari d'avisos i errors que inclou el model no hi ha indicacions sobre la necessitat d'incrementar la densitat de seccions.

(3) Quan la variació de seccions sigui molt important i es produeixin estretaments o eixamplaments poc graduals, el valor del coeficient de pèrdues per expansions o contraccions λ , que l'HEC-RAS pren per defecte amb els valors de 0,3 i 0,1, respectivament, adequats per a transicions graduals, es podrà modificar si es disposa de dades més precises, obtingudes de la calibració del tram o d'informació bibliogràfica específica. En la taula 6.1 es presenta una proposta per als casos generals més típics.

(4) Finalment, hi ha l'opció de crear noves seccions a partir de les introduïdes mitjançant interpolació. No s'han de confondre amb les seccions realment estretes de la topografia, ja que aquestes seccions no aporten nova informació de caràcter geomètric o hidràulic, però poden ser útils per obtenir valors de nivells o velocitats en determinats punts d'interès.

6.2.2.3 Definició de les seccions

(1) Com a criteri general, l'amplada de la topografia a banda i banda de la llera principal convé que sigui tal que inclogui l'extensió del flux i no el confini, de manera que, quan en l'àmbit estudiat hi hagi delimitació d'una altra escala o procedent d'un mètode menys precís es farà servir aquesta com a ample mínim.

En aquest sentit es disposa de la delimitació a tot Catalunya de les zones inundables per a la redacció de l'INUNCAT. A zones on no hi hagi delimitació preliminar es pot recórrer a fer un precàlcul en règim uniforme a la secció més desfavorable.

Malgrat això, hi poden haver algunes seccions, generalment en zones molt planeres, on la làmina d'aigua desbordi la topografia perquè aquesta topografia s'hauria d'estendre centenars de metres o fins i tot quilòmetres. En aquests casos, l'HEC-RAS imposa un contorn vertical fictici i , per tant, la seva solució no ha de ser necessàriament la real, malgrat que sigui raonable pensar que en alguns casos s'hi aproximi molt. Quan es produeixin aquests problemes pot ser preferible completar la secció, encara que s'hagi de fer amb cartografia d'escala inferior.

(2) Per tal de reproduir correctament les característiques geomètriques de la secció cal que, en general, aquesta secció sigui definida per un mínim de vuit punts, que correspondrien a una secció tipus formada per un canal central i dues planes d'inundació. Evidentment, aquesta condició no serà necessària en seccions artificials com les dels endegaments.

Per tal que els punts seleccionats siguin representatius de la secció cal treballar amb topografia d'escala 1:1.000 o de major detall.

L'HEC-RAS permet, a més de la introducció de la secció natural com a tal, la consideració d'àrees inefectives o l'obstrucció de forats, perquè es consideri que el flux no es pot bifurcar cap a una determinada zona (edificacions, lleres paral·leles, ulls d'un pont, etc.), o els denominats *levees*, que són limitacions equivalents a les de les motes d'un endegament, de manera que fins que el nivell no arriba a la seva cota de coronació el flux no envaeix les àrees que es troben a l'altra banda a una cota inferior. Aquest tipus d'elements enriqueix la modelització, perquè dona lloc a comportaments més realistes, a la vegada que obliga a fer visites de camp que ajuden a entendre millor els fenòmens reals que es modelitzen.

Llit	Coefficient de rugositat de Manning n
Herba i prats	0,035
Camps de conreu i horts	0,040
Arbres espaiats (fruiters, parcs urbans)	0,050 – 0,060
Bosc de ribera i canyar	0,080
Zona urbana (segons l'obstrucció al flux)	> 0,100

Taula 6.2. Coeficients de rugositat de Manning típics (HEC, 2000).

(3) En general, és recomanable, quan el riu passa per una zona urbana, prescindir dels carrers (per exemple, aplicant l'opció d'àrees inefectives), la qual cosa donarà lloc a un resultat més conservador a la llera, on es concentra tot el flux, però permetrà garantir condicions unidimensionals. L'estudi de la inundació als carrers requeriria a *posteriori* una tasca d'interpretació a partir dels nivells a la llera.

6.2.2.4 Coeficients de rugositat

(1) En la caracterització de les seccions cal destacar com un punt fonamental l'adopció dels coeficients de rugositat, en aquest cas dels coeficients de Manning. En general, excepte per experts hidràulics amb experiència i casos de rius molt uniformes i nets, la seva estimació està envoltada de dubtes, ja que els seus valors fins i tot depenen del mateix cabal i, per tant, estrictament parlant, són variables per a diferents episodis. Per això, el que s'acostuma a fer és utilitzar un coeficient alt que deixi del costat de la seguretat, i a continuació es fa una anàlisi de sensibilitat per comprovar si els calats varien molt amb altres valors.

(2) Per a rius de llit arenós uniforme i recte es poden fer servir, com a primera aproximació, les expressions següents, que aproximen la denominada rugositat «de gra» a la de la rugositat del fons:

$$n_s = \frac{D_{50}^{1/6}}{21}$$

si no hi ha cuirassament al fons, amb materials poc uniformes.

$$n_s = \frac{D_{90}^{1/6}}{26}$$

si s'observa cuirassament del fons, amb materials de granulometria estesa.

Quan el llit no és arenós, o per a les planes d'inundació, es proposen els valors guia presentats en la taula 6.2. Aquests valors estan associats a la naturalesa del fons i corresponen a cursos d'aigua relativament uniformes i rectilinis. Com és lògic pensar, aquests valors estan afectats d'altres factors, per la qual cosa és recomanable incrementar-los, per tal de

Per exemple, investigacions sistemàtiques amb models reduïts i observacions de camp semblen demostrar que, sota condicions de grans avingudes en les quals el flux cobreix completament la vegetació baixa, en flexionar-la es redueix considerablement la seva resistència al flux. Una millor aproximació a aquests valors es pot consultar a DHI (2001).

Existeixen metodologies desenvolupades a partir d'investigacions sistemàtiques en universitats alemanyes que permeten calcular el valor de n amb arbrat a partir del valor sense arbrat, segons les seves característiques, com ara la densitat i la distribució, com també la grandària dels arbres (Martin Vide, 2002).

(3) En tot cas, es recomana no considerar valors de n inferiors a 0,025, ja que és raonable pensar que, amb el pas del temps, fins i tot els materials «hidràulics» amb menys resistència al flux, com ara els formigons (amb valors entorn de 0,020, o fins i tot lleugerament inferiors, quan són nous), es deteriorin i, d'aquesta manera, incrementin la seva rugositat.

(4) L'HEC-RAS permet incloure diferents valors de n en una mateixa secció per tal de considerar la seva heterogeneïtat (i en el seu manual, com en altres referències de la bibliografia, s'hi inclouen nombrosos valors guia similars als que s'han proposat anteriorment, però per a un conjunt de casos més extens). Malgrat això, habitualment és suficient treballar amb un valor per la llera o el canal central i un altre per a les planes d'inundació i, d'aquesta manera, se simplifica l'anàlisi de la rugositat, ja prou complicat per si mateixa.

(5) Si en lloc de treballar amb seccions compostes es vol treballar amb un valor mitjà per a tota la secció, es pot recórrer a les conegudes fotografies de referència que s'inclouen tant a Chow (1982) com en la pàgina web i les publicacions del Servei Geològic dels Estats Units (USGS).

(6) Finalment, es vol remarcar la necessitat d'incloure als estudis d'inundabilitat una anàlisi de sensibilitat sobre els coeficients de Manning finalment adoptats, per tal d'observar-ne la influència sobre els resultats del model.

(7) Si es disposa de nivells coneguts, encara que sigui per a cabals inferiors al que s'ha simulat, s'haurà de procedir a la calibració del model hidràulic mitjançant l'ajust del valor de n observat.

6.2.2.5 Estructures hidràuliques

(1) Els ponts són probablement els elements de drenatge transversal que en l'actualitat tenen més incidència sobre el funcionament hidrodinàmic dels rius, i condicionen localment (de vegades amb una gran extensió) el seu comportament. En la seva interacció amb els rius, i a causa de la seva falta de capacitat hidràulica, acostumen a actuar com a estretaments, sovint molt acusats, la qual cosa dóna lloc a una important sobrelevació de la làmina d'aigua amunt i a una acceleració del flux sota el pont i aigua avall, amb el consegüent risc d'erosions. Si, a més a més, el pont arriba a entrar en càrrega, l'obstrucció del flux pot ocasionar desbordaments descontrolats per sobre la seva rasant i, fins i tot, el col·lapse de la mateixa estructura i la generació d'una violenta ona que pot agreujar encara més les afeccions provocades per l'avinguda. Evidentment, però, els programes de simulació hidràulica no recullen l'opció de modelitzar trencaments de ponts.

(2) Tanmateix, hi ha altres estructures que també interfereixen el flux natural als cursos d'aigua i poden donar lloc a condicionants d'una gran importància en el funcionament hidràulic, local, d'aquests cursos. En són exemples les importants acceleracions del flux produïdes per les cobertures de les lleres o els passos transversals de grans dimensions, o el rabeig i el consegüent alentiment del flux a causa de la presència de preses, assuts o guals massa grans.

(3) Així doncs, l'HEC-RAS permet considerar aquests elements mitjançant les tipologies d'estructures hidràuliques de *bridges*, *culverts* i *weirs*. Aquests mòduls consisteixen bàsicament en l'estimació dels efectes locals corresponents (règim ràpidament variat) en termes de pèrdues d'energia, motivades per les contraccions i les expansions posteriors del flux, les consegüents depressions i aixecaments de la làmina d'aigua i la seva influència en el comportament global del curs estudiat.

(4) Com a criteris generals, en la pràctica es recomana fer servir les opcions de càlcul per defecte a l'hora d'aplicar coeficients de pèrdues, alternatives en les formulacions de les equacions de desguàs i tipologies de sobreexidors, etc.

A més, és necessari introduir les seccions que caracteritzen i determinen l'àmbit dels efectes locals d'aquestes estructures, i que són: les dues seccions o cares (aigua amunt i aigua avall) del tram ocupat per l'estructura (i que la defineixen com a tal), una secció aigua amunt que determina l'inici de la contracció del flux i una secció aigua avall que determina el final de l'expansió del flux. Com a primera aproximació, es pot considerar que la longitud del riu afectada per la contracció del flux produïda per l'estretament que ocasiona l'estructura és de l'ordre del mirall d'aigua *B* ocupat per les aigües a la zona no afectada. La longitud aigua avall associada a l'expansió es podrà estimar com el 15 % superior a l'anterior. Com és evident, si aquestes longituds són superiors a les distàncies

indicades en l'apartat 6.2.2.2 es prendran els valors d'aquestes últimes distàncies (equidistància màxima de 25 m).

(5) Quant a la introducció de les característiques de les diferents estructures a les dues seccions que s'han esmentat anteriorment (cares de l'estructura), hi ha diversos menús amb les possibilitats següents:

(a) Els ponts estan constituïts pel tauler (que pot ser de forma irregular, introduïda mitjançant coordenades de punts de les seves cares superior i inferior), les piles i els estreps laterals. Hi ha l'opció de considerar l'esbiaixament del pont respecte al riu, però també és possible (i més recomanable en tant que és lleugerament més desfavorable) prescindir d'aquesta opció i considerar directament en les dades introduïdes les magnituds «efectives» projectades i mesurades en el pla normal a la direcció del flux.

(b) Els *culverts*, o passos deprimits que poden entrar en càrrega com ara els tubs d'un gual, es defineixen mitjançant les característiques de diverses seccions regulars possibles (les formes irregulars es modelitzarien millor mitjançant el menú de ponts), la longitud i el desnivell, el tipus de material i altres paràmetres de càlcul més específics (i per als quals es recomana adoptar els valors per defecte o consultar la bibliografia).

(c) Els assuts i les preses (a les quals fins i tot és possible incloure comportes) s'introdueixen mitjançant els nivells i els amplexos corresponents dels llavis del sobreexidor, del qual cal indicar el tipus.

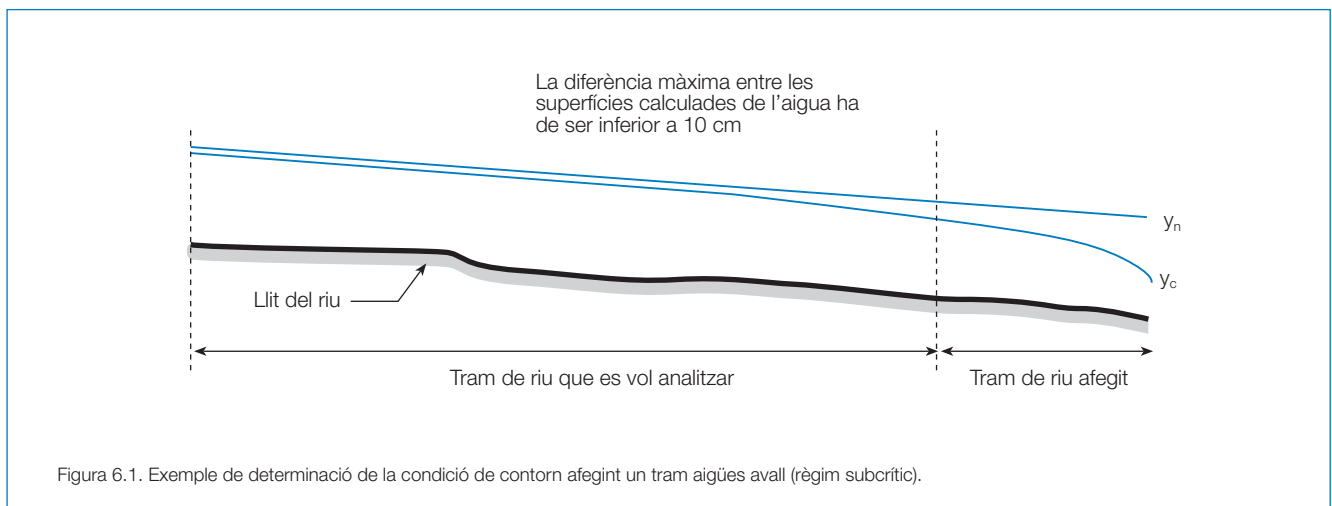
6.2.2.6 Condicions de contorn

Tal com indica la teoria d'hidràulica de canals per al règim gradualment variat, les condicions de contorn que cal utilitzar seran:

(a) Introducció del cabal a l'extrem aigua amunt de qualsevol riu o affluent.

A les confluències de dos o més rius caldrà identificar els trams convergents i el mateix programa imposarà internament la suma de cabals com a condició de contorn del tram aigua avall.

Com que l'objectiu últim és la determinació de les zones inundables, els cabals que cal introduir correspondran als valors punta calculats, segons que s'ha explicat en els capítols 3 i 5, als extrems més aigua avall de les zones estudiades, per tal de dur a terme una simulació amb cabals del costat de la seguretat.



(b) Imposició de nivells: aigua avall si el règim és lent, aigua amunt si és ràpid i a tots dos contorns si es preveu alternança de règims (i es fa servir l'opció de càlcul mixt).

Com a criteris generals, aigua amunt, només té sentit aplicar calat crític, corresponent a la localització d'una secció de control (caiguda lliure, estretament molt violent o vessament sobre una estructura tipus sobreexidor). Qualsevol altra opció està associada a un calat inferior al crític, ja sigui perquè és conegut (cas molt estrany) o perquè es produeix la sortida del flux sota comporta o un element similar.

Aigua avall, existeix l'opció d'aplicar el calat crític y_c (pels mateixos motius que aigua amunt), un calat de valor conegut (com succeeix amb els nivells aproximadament constants d'un rabeig), una corba nivells-cabals (si, per exemple, se simulen diferents escenaris per diferents cabals i es coneix la relació nivell-cabal com una estació d'aforament) o, finalment, el calat normal y_n donat directament per l'equació de Manning, si se sospita que hi ha un tram, aigua avall del contorn inferior, prou uniforme (en secció, pendent i rugositat) que permeti garantir en aquest extrem el desenvolupament d'un règim uniforme o normal.

En el cas de desembocadures s'ha de tenir en compte com a opció de condició de contorn el nivell del mar en plenamar més la marea meteorològica màxima esperable, sempre que no hi hagi cap altra condició de contorn més restrictiva.

Davant de la incertesa que existeix moltes vegades a l'hora d'aplicar les condicions de contorn, si no es garanteixen les condicions abans descrites, es farà una anàlisi de sensibilitat (en nivells, velocitats i superfícies inundades) de les condicions imposades, i es recomana l'ampliació de l'àmbit de la simulació hidràulica per tal de fer coincidir els seus extrems amb punts on es garanteixin les condicions que s'han descrit anteriorment

i, si això no és possible, aquesta ampliació es farà en una distància suficient per esmorteir el possible error en el nivell imposat al contorn, de manera que imposant diferents calats com a condicions de contorn, entre els quals hi ha el calat crític y_c i el calat normal y_n , la diferència entre els calats obtinguts per cada punt del tram del riu que es vol analitzar sigui inferior a 10 cm (figura 6.1).

En qualsevol cas, cal raonar sempre la justificació de l'adopció d'unes condicions de contorn o altres.

6.2.2.7 Opcions i paràmetres de càlcul

L'HEC-RAS permet ajustar diferents opcions que afecten internament els seus càlculs: les toleràncies a les resolucions iteratives, els mètodes de computació dels calats crítics o els mètodes de ponderació per l'estimació del pendent mitjà de l'energia. Tanmateix, si no es justifiquen adequadament altres alternatives, es recomana fer servir sempre les opcions per defecte.

6.2.3 Recomanacions sobre els resultats de la modelització

6.2.3.1 Sumari d'avisos i errors

Donat el fet que l'HEC-RAS facilita amb els seus resultats un sumari d'avisos o *warnings* sobre incidències del model, és útil disposar d'aquest sumari per analitzar els resultats dels càlculs, per la qual cosa es recomana presentar-lo com un annex de l'estudi.

Generalment, aquests avisos es refereixen a la necessitat de desenvolupar un càlcul més afinat, per la qual cosa, habitualment, és n'hi ha prou de suavitzar els canvis de geometria mitjançant l'ús de seccions interpolades en alguns trams molt locals que cal identificar (per exemple, al voltant de ressalts o de confluències). En tot cas, i de manera excepcional, la interdistància mínima entre seccions hauria de ser de 5 m.

En el mateix sumari es presenten també els comentaris dels errors, responsables de la interrupció del programa, que orienten l'usuari per fer les correccions necessàries. Com és obvi, per tal que el programa acabi correctament, en el sumari d'avisos presentat a l'estudi no hi poden haver errors.

6.2.3.2 Opcions de visualització i presentació de resultats

(1) La presentació dels resultats de la modelització hidràulica és un element fonamental dels treballs i la representació en planta de les zones inundables a l'àmbit d'estudi, com a mínim, per als cabals determinats segons els capítols 3 i 5 per als períodes de retorn de 10, 50, 100 i 500 anys. Complementàriament, és recomanable representar les figures del planejament definides en els criteris tècnics que es recullen en l'addenda a aquesta guia.

Per facilitar la representació de les superfícies inundables a partir dels resultats exportables de l'HEC-RAS, es pot fer ús del programa LAMINA, programat pel grup GITS de la UPC. Aquest programa es pot descarregar gratuïtament de la pàgina web <http://www-hidraulica.upc.es/gits/software.htm>

En tot cas, qualsevol d'aquestes representacions requereixen que s'acompanyin sempre de tota mena d'informació complementària que permeti facilitar la situació i la interpretació dels plànols, com ara carrers, edificis, vies de comunicació, estructures i altres referències topològiques (assenyalant els límits dels polígons industrials, etc.), amb els seus noms corresponents, per tal de facilitar la localització, i que es referènciïn clarament ambdós marges de la llera i la cota del terreny adjacent.

(2) Aquesta cartografia de zones inundables és preferible que estigui en format CAD o GIS convenientment georeferenciada i a escala 1:1.000. Si existeixen zones conflictives que no queden definides amb prou detall a aquesta escala, és convenient que la cartografia sigui a escala 1:500. D'altra banda, si l'ample de la zona inundable supera els 300-400 m, per tal de facilitar la impressió d'aquesta cartografia en format A3 es podria representar a escala 1:2.000.

(3) Són molt útils també els comentaris sobre la interpretació realitzada a l'hora de transposar els resultats del model hidràulic (nivells en seccions donades) sobre la cartografia (superfícies inundades), que pot ser especialment complexa en els trams més conflictius (ressalts importants, inundació de carrers laterals, etc.).

(4) És recomanable incloure també, per a cada període de retorn estudiat, els resultats següents del model:

(a) Perfils de la làmina d'aigua, amb les corresponents línia d'energia i línia de calats crítics, la localització dels possibles ponts, assuts i guals, i les unitats i les escales clarament definides.

(b) Seccions (no interpolades) amb les làmines d'aigua, els corresponents calat crític i línia d'energia, i les unitats i les escales clarament definides.

(c) Taules amb els valors, com a mínim, de les variables PQ , Q , y , A , v , R i F_r , a totes les seccions (no interpolades) amb les unitats clarament definides.

(5) Les anàlisis de sensibilitat per observar la influència al model de les rugositats, els cabals o les condicions de contorn són necessàries per a la valoració de l'alternativa triada. Per a una avaluació correcta cal que s'inclouin en els estudis els seus resultats convenientment resumits i les seves conclusions sobre els efectes observats en termes de nivells, velocitats de flux i superfícies inundades.

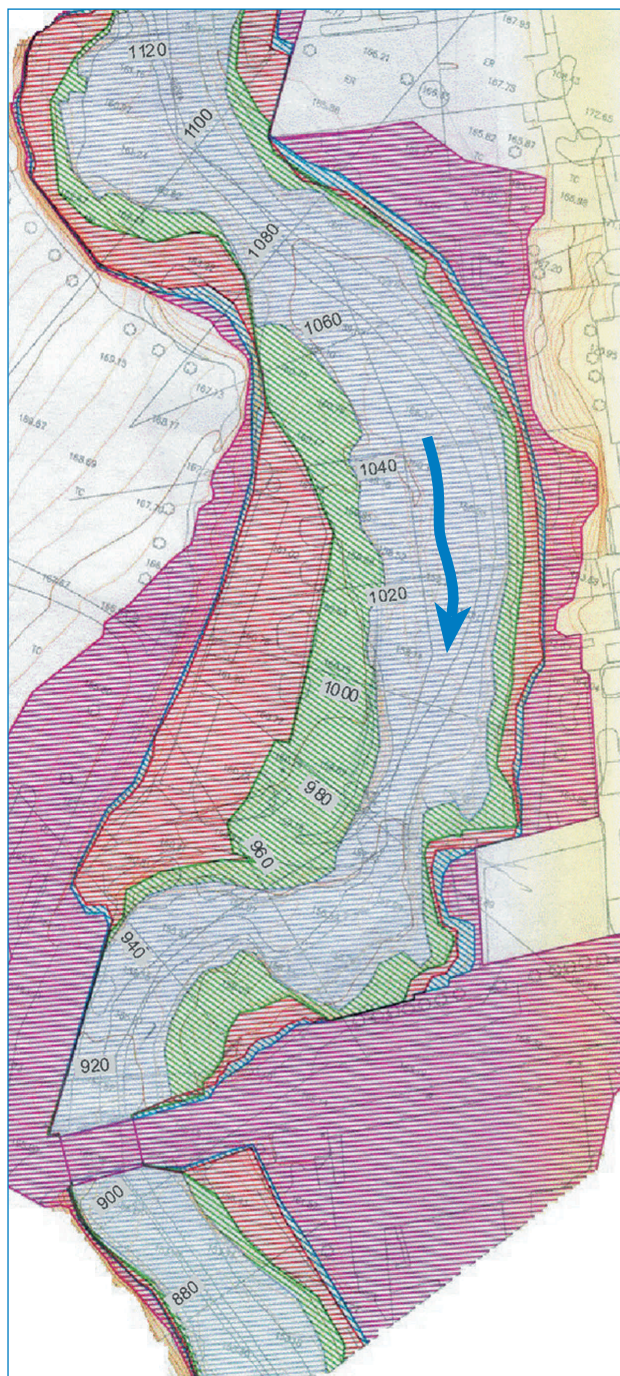


Figura 6.2. Exemple de plànol de zones inundables per diferents períodes de retorn.

7. Resum metodològic

7.1 Introducció

(1) En aquest capítol es presenta, de manera resumida, el mètode recomanat per aquesta guia per al càlcul de zones inundables. El text és molt breu amb la intenció de guanyar claredat, però inclou nombroses referències al cos del document per facilitar la consulta més detallada del mètode exposat.

(2) La notació per referir-se a un apartat del text en una cita és [1.2]; a un paràgraf de l'apartat 1.2 [1.2(1)]; a una fórmula, (3.5); a una figura, {3.7}, i a una taula, IA1.2I.

(3) Les condicions d'aplicabilitat d'aquestes recomanacions es presenten en [1.2]. El mètode recomanat pot ser també vàlid en altres casos, però les afirmacions que es fan corresponen a les condicions establertes.

(4) El procés per determinar la zona inundable d'un tram de riu, en general, es pot dividir en dues parts:

- (a) Estimació dels cabals màxims que passen pel tram amb un cert període de retorn [2] i [3] (hidrologia).
- (b) Determinació de l'extensió que cobriran aquests cabals en els terrenys pròxims, calats, velocitats, etc. [4], [5] i [6] (hidràulica).

(5) L'estimació dels cabals màxims es pot fer mitjançant càlcul a partir de les dades de pluges enregistrades, o emprant dades dels cabals enregistrats a les estacions d'aforament. Per les raons que s'exposen en [2.4], els mètodes recomanats en aquesta guia pertanyen a la primera classe.

(6) Dins dels mètodes basats en dades de pluges, per estudiar una conca determinada pot considerar-se com una conca única [2.3(1)] o com un conjunt de subconques independents unides per trams de lleres i confluències [2.3(5)] i [2.9].

En aquesta guia es recomanen dos mètodes: un mètode de conca única que solament estima el cabal màxim, el mètode racional; i un de conca composta, que calcula l'hidrograma de cada subconca pel mètode de l'hidrograma adimensional del Soil Conservation Service (SCS). En [2.9] es comenten diversos motius que poden arribar a imposar la utilització del segon mètode.

(7) Una vegada calculats els cabals segons que s'ha indicat, es procedeix a la segona part (b) dels treballs, que consisteix bàsicament en l'anàlisi hidràulica del tram estudiat per tal de determinar-ne l'abast de les zones inundables. Donada la complexitat dels càlculs necessaris, s'ha consolidat com a

metodologia bàsica la modelització per ordinador del riu en règim permanent gradualment variat i és, per tant, aquesta metodologia la que s'adopta en aquesta guia. Els càlculs hidràulics corresponen, doncs, al règim permanent associat als cabals punta que s'hagin calculat prèviament. Es recomana, però, completar i enriquir aquestes estimacions mitjançant estudis geomorfològics.

7.2 Mètode racional

(1) La informació que requereix és la següent:

- (a) Cartografia 1:5.000, Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)
- (b) Plànol geològic de Catalunya, Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)
- (c) Mapa d'usos del sòl de Catalunya, Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)
- (d) Mapa de pendents del terreny {A.1.1} o www.gencat.net/aca
- (e) Pluviometria diària del període de retorn desitjat, www.gencat.net/aca

(2) El mètode es descriu detalladament en [3.2]. Es tracta de calcular el cabal punta Q_p de l'avinguda mitjançant la fórmula següent:

$$Q_p = K \cdot \frac{C \cdot I \cdot S}{3,6} \quad (3.4)$$

(3) L'àrea de la conca S : es mesura a la cartografia.

(4) Per a l'estimació del temps de concentració T_c , es distingeixen tres tipus de conques [2.6]: rurals, urbanitzades i urbanes.

(5) La intensitat mitjana de precipitació I correspon a la segona variable de (3.4) i s'estima en [2.8.3] per (2.10), a partir de la pluja diària mitjana de la conca P_d , segons [2.8.2], afectada per la durada de la pluja, que el mètode considera igual al temps de concentració T_c , i multiplicada pel coeficient de simultaneïtat K_A (2.7).

(6) El llindar d'escorrentiu P'_o és la quantitat de pluja que cal que caigui abans que comenci a córrer l'aigua pel terra, segons [2.7]. Està relacionat amb el grau d'humitat existent en la conca a causa de pluges anteriors i varia d'unes regions a altres per aquest motiu. El CEDEX ha definit un grau d'humitat

denominat «mitjà» i ha tabulat, en [A1.2], els valors d'aquest P_0 depenent d'altres característiques del terreny que es valoren en l'annex 1: tipus de sòl IA1.3I-IA1.6I, ús del sòl IA1.7I, pendent IA1.1I i característica hidrològica de l'ús del sòl [A1.6].

El valor de P_0 (llindar d'escorrentiu de la conca amb el grau mitjà d'humitat) es pot obtenir fent la mitjana dels valors parcials obtinguts en les àrees parcials homogènies en què s'ha descompost la conca.

El coeficient regional r que relaciona P'_0 amb P_0 es pot estimar en 1, 3 a Catalunya [2.7].

(7) El coeficient d'escorrentiu C correspon a la primera variable de (3.4) i s'estima en [3.2] per (3.5).

(8) El coeficient d'uniformitat K es calcula per (3.3) de [3.2].

(9) En l'annex 2 es resumeixen les fórmules del mètode.

7.3 Mètode de conques compostes amb l'hidrograma de l'SCS

(1) La informació que requereix és la següent:

(a) Cartografia 1:5.000, Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)

(b) Plànol geològic de Catalunya, ICC

(c) Mapa d'usos del sòl de Catalunya, ICC

(d) Mapa de pendents del terreny {A.1.1} o www.gencat.net/aca

(e) Pluviometria diària del període de retorn desitjat, www.gencat.net/aca

(2) Hi ha diverses raons [2.9] que fan interessant dividir una conca en diferents subconques (unides per trams de llera i/o confluències): fer notar l'efecte de les diferències entre aquestes subconques en les seves pluges, les longituds de les lleres, els pendents, les pèrdues d'aigua en el recorregut o els límits de grandària de la conca en l'aplicació dels mètodes de conca única. En contrapartida, la modelització es fa més complexa i el nombre de paràmetres per estimar augmenta; aleshores, es requereix la supervisió d'un hidròleg expert.

(3) La dimensió de les subconques està limitada com s'indica en [3.3.1(4)].

(4) Es requereix l'estimació de l'hidrograma que surt de cada subconca. En [3.3.1] s'exposa el mètode general de l'hidrograma unitari.

(5) Entre els diversos hidrogrames sintètics que hi ha per simplificar els càlculs i la informació necessària, per deduir els hidrogrames es recomana per diverses raons l'hidrograma adimensional proposat per l'SCS, que s'exposa en [3.3.3].

(6) Aquest mètode es caracteritza per un hidrograma adimensional de forma fixa segons el cabal punta Q_p i el temps de pic T_p , que es defineix en [3.4], en [3.3.3].

(7) Multiplicant les coordenades de l'hidrograma adimensional pels valors punta respectius Q_p i T_p s'obté l'hidrograma unitari. En (3.7) i (3.11) es concreta la manera com es calculen els valors punta del cabal i del temps de l'hidrograma unitari.

(8) Atès que el volum dels càlculs es fa molt gran quan el nombre de subconques augmenta una mica, és recomanable i pràcticament imprescindible per raons de fiabilitat i agilitat del càlcul recórrer als models informàtics comercials creats amb aquesta finalitat. En particular, es recomana en aquesta guia el model HMS que es descriu en [5.7] i que és gratuït, com s'indica en [1.4]. El model UHM del mòdul RR del MIKE 11 admet també l'hidrograma de l'SCS, per a les subconques i dóna, per tant, resultats anàlegs.

És també molt recomanable tenir un coneixement profund del que fa el model informàtic, que sovint només mostra els resultats. Per això, es destaquen a continuació els punts sobre aquestes matèries que es tracten en aquestes recomanacions.

En [3.3.4] es detalla la deducció de l'hidrograma d'una conca caracteritzada pels paràmetres S , L , j i μ i un hietograma donat.

Per definir l'hidrograma total a partir de l'hidrograma unitari cal definir la pluja en estudi mitjançant un gràfic o una taula de la pluja neta (deduïdes les pèrdues com s'exposa en [2.8.2], [2.7] i [2.8.3]).

En [2.8.3] es pot consultar un exemple detallat.

Coneguts l'hidrograma unitari (dividit per deu) i l'hietograma net, el model calcula l'hidrograma total, segons [3.9] i [3.2], corresponent a l'apartat [3.3.4] com a convolució de totes dues funcions.

Els hidrogrames de les diferents subconques que els diferents rius considerats es van trobant en sentit descendent es van acumulant, com es mostra en [2.10] i [2.11].

El model calcula l'evolució de l'hidrograma a mesura que progressa a través de trams de canal situats aigües avall en subconques successives.

Els mètodes més coneguts per calcular aquesta evolució s'exposen en el capítol 5 (mètodes de Puls modificat, Muskingum, Muskingum-Cunge i ona cinemàtica). En [5.6] i

15.2] es donen orientacions per seleccionar el mètode més adequat segons la informació disponible i variables com ara el pendent de la llera.

En [5.7] i [1.4] es dona informació dels models informàtics comercials més coneguts.

7.4 Generalitats sobre el càlcul de les zones inundables

(1) Un cop determinats els cabals per als diferents períodes de retorn al punt o als punts d'interès segons el tram de riu objecte d'estudi, cal procedir a l'anàlisi geomorfològica i hidràulica del tram estudiat per tal de determinar les superfícies inundades per aquests cabals.

(2) En primer lloc es considera necessària l'avaluació, almenys de manera qualitativa, dels aspectes comentats en [4.1-4.7], referents a la morfologia fluvial i les característiques del flux, per tal de centrar adequadament el problema hidràulic i tenir presents les limitacions de la modelització que a continuació s'explica, alhora que l'anàlisi d'aquests aspectes completa i enriqueix aquesta modelització.

(3) Donada la transcendència de la informació sobre zones inundables, i per tal d'uniformitzar els criteris sobre la seva presentació, en [6.2.3] es recullen una sèrie de recomanacions sobre els resultats que s'han de presentar i la manera de fer-ho, una vegada s'ha desenvolupat el càlcul hidràulic segons que es descriu a continuació.

7.5 Simulació hidràulica

(1) En [4.8], [4.9] i [6.1] es donen una sèrie de nocions sobre els conceptes hidràulics que constitueixen les bases dels models hidràulics.

(2) En [6.2] es pot trobar un recull de criteris i recomanacions per al treball de modelització hidràulica, que en aquesta guia es recomana desenvolupar en règim gradualment variat. En concret, estan orientades bàsicament a l'ús del model recomanat HEC-RAS, d'àmplia difusió i acceptació per a aquest tipus de treballs.

(3) A l'hora de treballar amb el model hidràulic, el primer pas, segons [6.2.2.1], consisteix a definir acuradament l'àmbit d'estudi (limitat a una longitud màxima de 4 km) i adoptar-ne la topografia (de precisió 1:1.000 o superior). A continuació, basant-se en aquesta topografia, es procedeix a introduir la geometria del model: seccions del riu al llarg del tram estudiat, segons [6.2.2.2] i [6.2.2.3], i estructures hidràuliques com ara ponts o assuts que poden condicionar el flux, segons [6.2.2.5].

(4) El pas següent consisteix a caracteritzar de manera acurada les rugositats de la llera i els marges mitjançant els diferents coeficients de Manning, segons [6.2.2.4].

(5) Una vegada construït el model com a tal, cal identificar, justificar i imposar les condicions de contorn. La primera d'aquestes condicions requereix definir els cabals d'entrada als diferents punts d'interès (inici del tram estudiat i incorporacions d'afluents importants, si n'hi ha). Aquests cabals corresponen als valors (cabals punta) que s'han obtingut anteriorment, al càlcul hidrològic. La resta de condicions de contorn corresponen als nivells aigua amunt o aigua avall, segons les condicions del flux i la identificació dels contorns adequats, tal com s'indica en [6.2.2.6].

(6) Finalment, només queda fer el càlcul de la làmina d'aigua mitjançant el model informàtic, segons [6.2.2.7], i comprovar que no es produeixen errors o les incidències del model no són significatives, tal com s'indica en [6.2.3.1]. S'inclouen també a [6.2.3.2] un recull de recomanacions per la presentació dels resultats de la simulació hidràulica.

Referències

Agència 2001

Agència Catalana de l'Aigua. Departament de Medi Ambient 2001. *Delimitació de zones inundables de l'INUNCAT. Càlcul hidrològic i determinació dels cabals d'avingudes en les conques internes de Catalunya.*

Aparicio 1999

Aparicio, F. J. 1999. *Fundamentos de hidrología de superficie.* Editorial Limusa. Mèxic, D. F.

CNEGP 1997

Comité Nacional Español de Grandes Presas 1997. *Avenida de proyecto.* Madrid.

Chaudhry 1993

Chaudhry, M. H. 1993. *Open-Channel Flow.* Prentice-Hall. Nova Jersey.

Chow 1982

Chow, V. T. 1982. *Hidráulica de los canales abiertos.* Editorial Diana. Mèxic, D. F.

Chow 1994

Chow, V. T., Maidment, D. R. i Mays, L. W. 1994. *Hidrología aplicada.* McGraw-Hill. Santafé de Bogotá.

Clark 1945

Clark, C. O. 1945. «Storage and the Unit Hydrograph». *Transactions of the American Society of Civil Engineers.* Vol. 110, p. 1419-1446.

Cunge 1980

Cunge, J. A., Holly, F. M. i Verwey, A. 1980. *Practical Aspects of Computational River Hydraulics,* Pitman, Londres.

DGC 1999

DGC 1999. *Máximas lluviás en la España peninsular.*

DHI 2001

Danish Hydraulic Institute 2001. *MIKE 11. A Modelling System for Rivers and Channels. User Guide.* DHI.

Ferrer 1992

Ferrer, J. 1992. *Análisis estadístico de caudales de avenida.* CEDEX. Madrid.

Ferrer 1993

Ferrer, J. 1993. *Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas.* CEDEX. Madrid.

French 1985

French, R. H. 1985. *Open-Channel Hydraulics.* McGraw-Hill.

Gray 1961

Gray, D. M. 1961. *Synthetic unit hydrographs for small watersheds.* Journal Hydraulic Div. ASCE, vol. 87, núm. HY4, p. 33-54.

HEC 2000

Hydrologic Engineering Center 2000. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual.* HEC. Davis.

JA 1994

Junta d'Aigües 1994. *Recomanacions sobre mètodes d'estimació d'avingudes màximes.* Departament de Política Territorial i Obres Públiques. Barcelona.

Mahmood 1971

Mahmood, K. i Shen, H. W. 1971. «The Regime Concept of Sediment-Transporting Canals and Rivers». *River Mechanics.* H. W. Shen ed., vol. II. Fort Collins. CO.

Martín Vide 2002

Martín Vide, J.P. 2002 *Ingeniería de ríos.* Edicions UPC. Barcelona.

McCarthy 1940

McCarthy, G. T. 1940. *The unit hydrograph and flood routing.* U.S. Engineer School, Fort Belvoir, Virginia. [Presentat com a ponència el 1938 al Corps of Engineers]

Miller 1975

Miller, W. A. i Cunge, J. A. 1975. «Simplified Equations of Unsteady Flow», *Unsteady Flow in Open Channels*, vol. I, K. Mahmood i V. Yevjevich, ed., p. 183-249. Fort Collins, CO.

MOPU 1987

MOPU 1987. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales.* MOPU. Madrid.

MOPU 1990

MOPU 1990. *Instrucción 5.2-IC Drenaje superficial.* MOPU. Madrid.

Munson 1999

Munson, B. R., Young, R. F. i Okishi, T. H. 1999. *Fundamentos de mecánica de fluidos.* Editorial Limusa. Mèxic, D. F.

Naudascher 2000

Naudascher, A. 2000. *Hidráulica de Canales.* Editorial Limusa. Mèxic, D. F.

NERC 1975

Natural Environment Research Council 1975. *Flood Studies Report, Vol III, Flood Routing Studies.* Institute of Hydrology. Wallingford. Anglaterra.

Ponce 1978

Ponce, V. M. i Yevjevich, V. 1978. «Muskingum-Cunge Method with Variable Parameters». *Journal Hydraulics Division*. American Society of Civil Engineers. Vol. 104, núm. HY12, p. 1663-1667.

Ponce 1983

Ponce, V. M. 1983. *Development of Physically Based Coefficients for the Diffusion Method of Flood Routing*, Final Report to the USDA, Soil Conservation Service. Lanham, MD.

Rouse 1959

Rouse, H. 1959. *Engineering Hydraulics*. John Wiley and Sons.

SCS 1972

Soil Conservation Service 1972. *National Engineering Handbook, Section 4*. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.

Simons 1976

Simons, D. B. i Sentürk, F. 1976. *Sediment Transport Technology*. Water Resources Publications, Fort Collins, CO.

Snyder 1938

Snyder, F. F. 1938. *Synthetic Unit-graphs*. Trans. Amer. Geophys. Union. Vol. 19, p. 447-454.

Streeter 2000

Streeter, V. L., Wylie, E. B. i Bedford, K. W. 2000. *Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill. Santafé de Bogotá.

Témez 1978

Témez, J. R. 1978. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. MOPU. Madrid.

Annex 1. Càlcul del llindar d'escorrentiu P_0

A1.1 Introducció

(1) En aquest annex s'exposa d'una manera clara i breu el càlcul del llindar d'escorrentiu P_0 segons el model de l'SCS.

A1.2 Model SCS

(1) L'SCS va tabular els NC segons l'ús del sòl, el pendent, les característiques hidrològiques i el grup de sòl (vegeu la taula A1.1). Aquests NC s'apliquen per a condicions anteriors d'humitat de tipus II, les quals corresponen a condicions normals. Per a condicions seques de tipus I o per a condicions humides de tipus III, es poden calcular els NC equivalents amb les fórmules següents:

$$NC(I) = \frac{4,2 \cdot NC(II)}{10 - 0,058 \cdot NC(II)} \quad (A1.1)$$

$$NC(III) = \frac{23 \cdot NC(II)}{10 + 0,13 \cdot NC(II)} \quad (A1.2)$$

(2) El model classifica els grups de sòl en quatre tipus:

A. Sòls en què l'aigua infiltra ràpidament, encara que estiguin molt humits. Estan formats per sòls granulars de poca potència (espessor de la capa de sòl), bàsicament sorres i sorres llimoses.

B. Sòls que quan estan molt humits tenen una capacitat d'infiltració moderada. Estan formats per estrats de sòls de potències moderades a grans, amb litologies franco-sorrenques, franques, franco-argilo-sorrenques o franco-llimoses. Normalment estan bé o moderadament ben drenats.

C. Sòls en què l'aigua infiltra lentament quan estan molt humits. Estan formats per sòls de poca o mitjana potència amb litologies franco-argiloses, franco-argilo-llimoses, llimoses o argilo-sorrenques. Són sòls imperfectament drenats.

D. Sòls amb una infiltració molt lenta quan estan molt humits. Tenen estrats argilosos superficials o propers a la superfície. Estan pobrament o molt pobrament drenats. S'inclouen en aquest grup els sòls amb nivells freàtics permanentment propers a la superfície i els sòls de molta poca potència (litosòls).

Les zones amb bancals s'inclouen entre els sòls amb pendents inferiors al 3 %.

Els nuclis urbans, les edificacions rurals, els camins, etc., no s'han de tenir en compte si l'àrea que ocupen en conjunt representa un percentatge menor del 4% de l'àrea total de la conca. En cas contrari, caldrà considerar cada àrea específicament, atribuint un NC de 100 (P_0 nul) a les superfícies totalment impermeables.

Les característiques hidrològiques considerades són les següents:

R. superfícies en què el cultiu es fa segons les corbes de nivell.

N. superfícies en què el cultiu es fa segons la línia de màxim pendent.

(3) La relació entre el P_0 i l' NC utilitzada habitualment a la Península és la proposada per Témez.

$$P_0 = \frac{5000}{NC} - 50 \quad (A1.3)$$

On:

P_0 llindar d'escorrentiu en condicions d'humitat de tipus II, expressat en mm

NC nombre de corba; és adimensional

En la taula A1.2 es presenta una variació de la taula A1.1 en la qual es relacionen els valors del llindar d'escorrentiu P_0 en condicions d'humitat de tipus II segons l'ús del sòl, el pendent, les característiques hidrològiques i el grup de sòl. Aquests valors s'han obtingut partint de la taula A1.1 i fent servir la fórmula A1.3.

Es presenten tant els valors de l' NC com els valors del P_0 , perquè els primers són els que es fan servir en els càlculs amb l'hidrogràfic adimensional de l'SCS, i els segons, els utilitzats en el mètode racional. Es vol assenyalar que en el càlcul s'ha d'emprar l' NC , que és el que es dedueix de P_0 .

A1.3 Grup del sòl

A Catalunya, l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) ha editat la cartografia geològica a escala 1:250.000 amb els sòls classificats segons diversos codis que són diferents segons el format sigui paper o digital. En la taula A1.3 es recullen els codis que corresponen a sòls de tipus A; en la taula A1.4, els que corresponen a sòls tipus B; en la taula A1.5, els que corresponen a sòls de tipus C, i en la taula A1.6, els que corresponen a sòls de tipus D.

Ús del sòl	Pendent (%)	Característiques hidrològiques	Grup del sòl			
			A	B	C	D
Guaret	≥3	R	77	86	89	93
		N	75	82	86	89
	<3	R/N	71	78	82	86
Conreus en filera	≥3	R	68	79	86	89
		N	67	76	82	86
	<3	R/N	64	72	78	82
Cereals d'hivern	≥3	R	63	75	83	86
		N	61	72	81	83
	<3	R/N	60	70	78	81
Rotació de conreus pobres	≥3	R	66	77	85	89
		N	64	75	82	86
	<3	R/N	63	72	79	83
Rotació de conreus densos	≥3	R	57	71	81	85
		N	54	68	78	82
	<3	R/N	52	67	76	79
Praderies	≥3	Pobra	68	78	86	89
		Mitjana	49	68	78	85
		Bona	42	60	74	79
		Molt bona	38	55	69	77
	<3	Pobra	46	67	81	88
		Mitjana	38	59	75	83
		Bona	29	48	69	78
		Molt bona	17	33	67	76
Plantacions regulars d'aprofitament forestal	≥3	Pobra	45	64	77	83
		Mitjana	38	60	72	78
		Bona	33	54	69	77
	<3	Pobra	40	60	72	78
		Mitjana	34	54	69	77
		Bona	25	38	67	74
Masses forestals (boscos, garriga, etc.)		Molt clara	56	75	86	91
		Clara	45	68	78	83
		Mitjana	40	60	69	76
		Espessa	36	52	62	68
		Molt espessa	29	43	54	60
Roques permeables	≥3	En qualsevol cas		94		
	<3	En qualsevol cas		91		
Roques impermeables	≥3	En qualsevol cas		96		
	<3	En qualsevol cas		93		

Taula A1.1. Valors del nombre de corba NC en condicions antecedents d'humitat de tipus II.

Actualment està en procés d'elaboració la cartografia geològica a escala 1:25.000 i es disposa ja de bona part de Catalunya cartografiada a aquesta escala.

L'escala d'aquesta metodologia obliga a fer-ne una anàlisi crítica i a contrastar-la tant amb visites de camp com amb altres fonts cartogràfiques, com ara les de l'Institut Geomíner d'Espanya (IGME), que està a escala 1:50.000.

En els estudis fets a Catalunya convé emprar la cartografia editada per l'ICC com a base per a la determinació del grup del sòl, i cal especificar els contrastes que s'han efectuat i la justificació dels canvis realitzats, si hi fossin.

L'adquisició de la cartografia editada per l'ICC es pot fer en els punts de venda indicats a la mateixa pàgina web de l'ICC, www.icc.es.

A1.4 Ús del sòl

(1) En la determinació de l'ús del sòl cal considerar dues fases clarament diferenciades.

a) Determinació de l'ús del sòl en el seu estat actual, necessari per als estudis de calibració que s'efectuïn i que, a més a més, servirà de situació de partida per a la fase següent.

b) Anàlisi de la possibilitat que en un futur pròxim es canviï l'ús del sòl. Aquests canvis normalment van lligats a l'augment de sòl urbà o a la construcció d'urbanitzacions.

(2) L'ICC ha editat un mapa d'usos del sòl a Catalunya a escala 1:250.000 que representa l'estat actual, o més exactament, l'estat d'usos del sòl a la data en què es va editar el plànol. En la taula A1.7, es presenta la correlació d'usos del sòl considerats a la cartografia de l'ICC amb la que es preveu en el mètode de l'SCS. És necessari per a la validesa dels resultats que en els estudis fets a Catalunya s'utilitzi aquesta cartografia com a base per a la fase a.

Ús del sòl	Pendent (%)	Característiques hidrològiques	Grup del sòl			
			A	B	C	D
Guaret	≥3	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	6
	<3	R/N	20	14	11	8
Conreus en filera	≥3	R	23	13	8	6
		N	25	16	11	8
	<3	R/N	28	19	14	11
Cereals d'hivern	≥3	R	29	17	10	8
		N	32	19	12	10
	<3	R/N	34	21	14	12
Rotació de conreus pobres	≥3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	<3	R/N	30	19	13	10
Rotació de conreus densos	≥3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	<3	R/N	47	25	16	13
Praderies	≥3	Pobra	24	14	8	6
		Mitjana	53	23	14	9
		Bona	69	33	18	13
		Molt bona	81.6	41	22	15
	<3	Pobra	58	25	12	7
		Mitjana	81.5	35	17	10
		Bona	122	54	22	14
		Molt bona	244	101	25	16
Plantacions regulars d'aprofitament forestal	≥3	Pobra	62	28	15	10
		Mitjana	80	34	19	14
		Bona	101	42	22	15
	<3	Pobra	75	34	19	14
		Mitjana	97	42	22	15
		Bona	150	80	25	16
Masses forestals (boscos, garriga, etc.)		Molt clara	40	17	8	5
		Clara	60	24	14	10
		Mitjana	75	34	22	16
		Espessa	89	47	31	23
		Molt espessa	122	65	43	33
Roques permeables	≥3	En qualsevol cas		3		
	<3	En qualsevol cas		5		
Roques impermeables	≥3	En qualsevol cas		2		
	<3	En qualsevol cas		4		

Taula A1.2. Valors del llindar d'escorrentiu P_0 en condicions antecedents d'humitat de tipus II.

A causa que es poden haver produït canvis significatius en els usos del sòl des que es va editar aquesta cartografia, caldrà contrastar i justificar que no hi ha hagut canvis substancials en els usos del sòl que s'hi especifiquen, com ara desforestacions per talaes o incendis, construcció d'urbanitzacions, etc. Aquesta informació es pot obtenir de l'anàlisi d'ortofotomapes, fotografies aèries, visites de camp i consultes amb les autoritats locals, els tècnics i els inspectors de l'Agència i els veïns de la zona.

(3) A la fase *b* caldrà corregir la cartografia considerada a la fase *a* amb els canvis que es poden esperar en l'ús del sòl en un futur pròxim, com ara augment de sòl urbà, construcció d'urbanitzacions, etc.

Aquesta informació normalment es pot aconseguir als ajuntaments i és necessari tenir-la en compte.

(4) En resum, en tots els estudis de determinació de zones inundables a Catalunya s'haurà de presentar la cartografia

d'usos del sòl en l'estat actual, basant-se en la cartografia editada per l'ICC amb les correccions ja esmentades, i la cartografia d'usos futurs del sòl, i aquesta última és la que caldrà tenir en compte en el càlcul H&H definitiu.

A1.5 Càlcul del pendent

Per al càlcul del pendent en cada punt de la conca, és molt convenient fer servir cartografia en format digital tridimensional, és a dir, que contingui un model digital del terreny (MDT). Partint d'aquest MDT es pot generar una malla per comprovar si en cadascun dels seus vèrtexs el pendent del terreny és major/igual o menor del 3 %. Les dimensions màximes d'aquesta malla no haurien de sobrepassar els 100 x 100 m. En la figura A1.1 es presenta, a tall d'exemple, un mapa de Catalunya en què es distingeix la superfície del terreny on el pendent és major/igual o menor del 3 %.

Codi paper	Codi digital	Descripció
C2A	C12	Calcàries bioclàstiques i esculloses
C2D	C2E	Calcàries i calcarenites localment dolomititzades
COB	C4C	Microconglomerats i gresos
COB	COA	Microconglomerats i gresos
COD	COC	Calcàries. Localment inclou els materials del Caradocià-Ashgíl-lià
J1-3	J13	Dolomies, calcàries, calcarenites i margues
J1-C1	J1C1	Dolomies
J3-C1B	J3CA	Calcàries laminades i margues amb intercalacions dolomítiques
J3-C1C	J3CB	Dolomies i calcàries
J3-C1A	J3CC	Calcàries amb esponges
K3D	K3D	Calcàries arenoses
K4D	K4D	Calcàries bioclàstiques i esculloses
N1A	N1A	Calcàries esculloses
N1B	N1B	Calcàries bioclàstiques
P1-6B	P16B	Lutites roges, bretxes i conglomerats
P2	P2	Calcàries amb alveolina
P4E	P4C	Calcàries amb nummulits i assilines
P6E	P6D	Calcàries amb nummulits
P7D	P7C	Calcàries esculloses
P8F	P8A	Calcàries
Q1A	Q1A	Travertins
Q1D	Q1D	Conglomerats, sorres i lutites
Q2C	Q2C	Travertins
Q2D	Q2D	Graves
Q3D	Q3A	Graves, sorres i llims
Q3A	Q3D	Sorres
Q3F	Q3F	Còdols i llims
T1-2	T12	Dolomies i calcàries
T1-4B	T14A	Dolomies
T4	T4	Dolomies ben estratificades

Taula A1.3. Codis de la cartografia geològica de l'ICC, tant en format paper com digital, que corresponen al grup del sòl de tipus A segons la classificació de l'SCS (Agència, 2001).

A la pàgina web de l'Agència, www.gencat.net/aca, figura el plànol de la figura A1.1, a escala 1:250.000, que podrà ser utilitzar per a aquest fi.

A1.6 Característiques hidrològiques

La informació de si el cultiu es realitza segons la direcció del màxim pendent o seguint les corbes de nivell es pot obtenir a partir de fotos aèries o ortofotomapes amb bona definició o, alternativament, per mitjà de visites de camp.

Donada l'estacionalitat de les feines agrícoles s'aconsella que únicament es consideri la característica hidrològica N quan la plantació sigui d'arbres, ja que la forma de cultiu d'altres espècies pot variar d'una temporada a l'altra.

A1.7 Exemple d'aplicació

En la taula A1.8 es presenta un exemple d'aplicació del mètode de càlcul del llinard d'escorrentiu P'_0 per facilitar la comprensió del mètode exposat.

A1.8 Model digital de la conca

Per facilitar l'obtenció del llinard d'escorrentiu P_0 a partir de la cartografia especificada (mapa geològic, mapa d'usos del sòl i model digital del terreny), hi ha dues possibilitats: treballar en entorn CAD o en ARCVIEW.

En entorn CAD caldrà superficialitzar les diferents superfícies a fi d'obtenir el llinard d'escorrentiu P_0 o el nombre de corba NC , segons convingui. Aquesta feina resulta molt més fàcil i ràpida si es treballa en entorn ARCVIEW.

Codi paper	Codi digital	Descripció
C1A	C1A	Bretxes carbonàtiques
C2C	C3C	Calcàries micrítiques amb lignits
C3C	C5B	Calcàries bioclàstiques amb rudites i orbitolines
C6C	C6C	Calcàries amb ortitolina
C6E	C6E	Gresos
Dp	DP	Pelites i gresos amb nivells de lidites al sostre
J1	J1	Bretxes, dolomies, calcàries, margues i calcarenites, localment evaporites a la base
J2	J2	Calcàries, dolomies i margues fosques i blaves
K1-2C	K12B	Calcàries bioclàstiques amb prealveolina i dolomies
K1C	K1C	Calcàries amb prealveolina
K2D	K2D	Calcàries amb rudites
K3E	K3E	Gresos arcòsics i conglomerats
K5-P1A	K51	Conglomerats, argiles i gresos vermells
K5-P1B	K51A	Calcàries lacustres i nivells de lignits
N1D	N1	Guixos
N2-3A	N13A	Lutites vermelles, gresos i conglomerats
N2-3B	N13B	Arcoses, lutites i conglomerats
N1H	N1E	Bretxes, conglomerats i gresos
N1F	N1F	Lutites, gresos i conglomerats
N1E	N1G	Arcoses i conglomerats
N2A	N2A	Gresos silícics i bioclàstiques
N2F	N2B	Bretxes
N2E	N2C	Conglomerats
N2D	N2D	Conglomerats, gresos i lutites
N2C	N2E	Lutites i gresos
N2B	N2F	Arcoses i lutites
N3A	N3A	Sediments marins: lutites, margues, gresos, conglomerats i bretxes
N3E	N3C	Conglomerats, gresos i lutites
N3C	N3D	Gresos
P	P	Conglomerats, gresos, lutites i tosques àcides
P1-6A	P16A	Guixos
P1-6C	P16C	Gresos, lutites roges i conglomerats
P1-6D	P16D	Lutites roges, bretxes i conglomerats
P1-6E	P16E	Lutites i gresos i conglomerats i gresos vermells
P1-6F	P16F	Grup Pontils no diferenciat, localment inclou la Fm. Mediona
P2-3	P23	Margues i guixos amb intercalacions calcàries
P5E	P5D	Guixos
P6-7A	P67A	Conglomerats
P6-7B	P67B	Gresos i lutites
P6-7C	P67C	Bretxes
P6C	P6C	Gresos i margues grises
P6F	P6E	Conglomerats i gresos
P7B	P7B	Gresos, margues, calcàries esculloses
P7C	P7BA	Nivells de bretxes locals
P7E	P7D	Gresos amb glauconita
P7F	P7E	Gresos, conglomerats, margues i nivells de lignits
P7G	P7F	Sals sòdiques i potàssiques
P7H	P7G	Guixos
P8K	P8F	Conglomerats massius
P8J	P8G	Conglomerats, gresos i lutites
P8I	P8H	Gresos i lutites
P8A	P8J	Arcoses
P8L	P8S	Guixos
Q2F	Q2F	Conglomerats, gresos i lutites
Q2G	Q2G	Blocs i argiles
Q3B	Q3C	Lutites amb matèria orgànica i torba
Q3E	Q3E	Llms i còdols
Q3G	Q3G	Graves, gresos i lutites
T1	T1	Conglomerats de quars, gresos i lutites roges
T23	T23	Dolomies, calcàries i margues

Taula A1.4. Codis de la cartografia geològica de l'ICC, tant en format paper com digital, que corresponen al grup del sòl de tipus B segons la classificació de l'SCS (Agència, 2001).

Codi paper	Codi digital	Descripció
C2B	C2B	Calcàries i argiles laterítiques
C34	C34	Margues i biocalcarenites
C3A	C3A	Margues amb ammonits
C4A	C4A	Margues i margocalcàries
C4B	C4B	Calcàries bioclàstiques amb rudistes i orbitolines
C6D	C6D	Margues i argiles amb lignits
CAA	CAA	Lidites amb nòduls de fosfats i calcàries. Turbidites, gresos, pelites i conglomerats poligènics
CO-AB	CO	Pelites, gresos i grauvaques, amb intercalacions de microconglomerats i gresos
Dco	DCO	Indiferenciat (varietat de calcàries)
Dsc	DSC	Calcàries grises noduloses i pelites
K3-5	K35	Margues i calcàries bioclàstiques
N1C	N1C	Llims, margues i gresos bioclàstics
OA	O	Conglomerats, grauvaques, lutites, calcofillites i vulcanites, calcàries, pelites, quarsarnites; conglomerats, calcopelites, pelites, grauvaques i calcàries
P3B	P3B	Margues i gresos vermells i calcàries
P4D	P4B	Margues, margocalcàries i bretxes
P5A	P5AA	Turbidites, guixos a sostre
P5D	P5C	Margues fosques localment amb guixos
P6B	P6B	Margues blaves
P7A	P7A	Margues blaves i nivells de gresos
P8G	P8B	Lutites, gresos, margues i calcàries localment dolomies i guixos, i localment lignits
P8H	P8I	Lutites roges, gresos i calcàries
Q2A	Q2A	Llims lacustres
Q2B	Q2B	Lutites, llims i crostes
Q2E	Q2E	Argiles i còdols
S	S	Pissarres ampelítiques, localment calcàries lidites i radilarites
St2	ST2	Toves i laves
T1-4A	T14	Argiles versicolors, evaporites
T2	T2	Lutites roges amb nivells de guixos, intercalacions locals de dolerites, paleocanals de gresos i dolomies al sostre
T3-4	T34	Argiles versicolors i evaporites

Taula A1.5. Codis de la cartografia geològica de l'ICC, tant en format paper com digital, que corresponen al grup del sòl de tipus C segons la classificació de l'SCS (Agència, 2001).

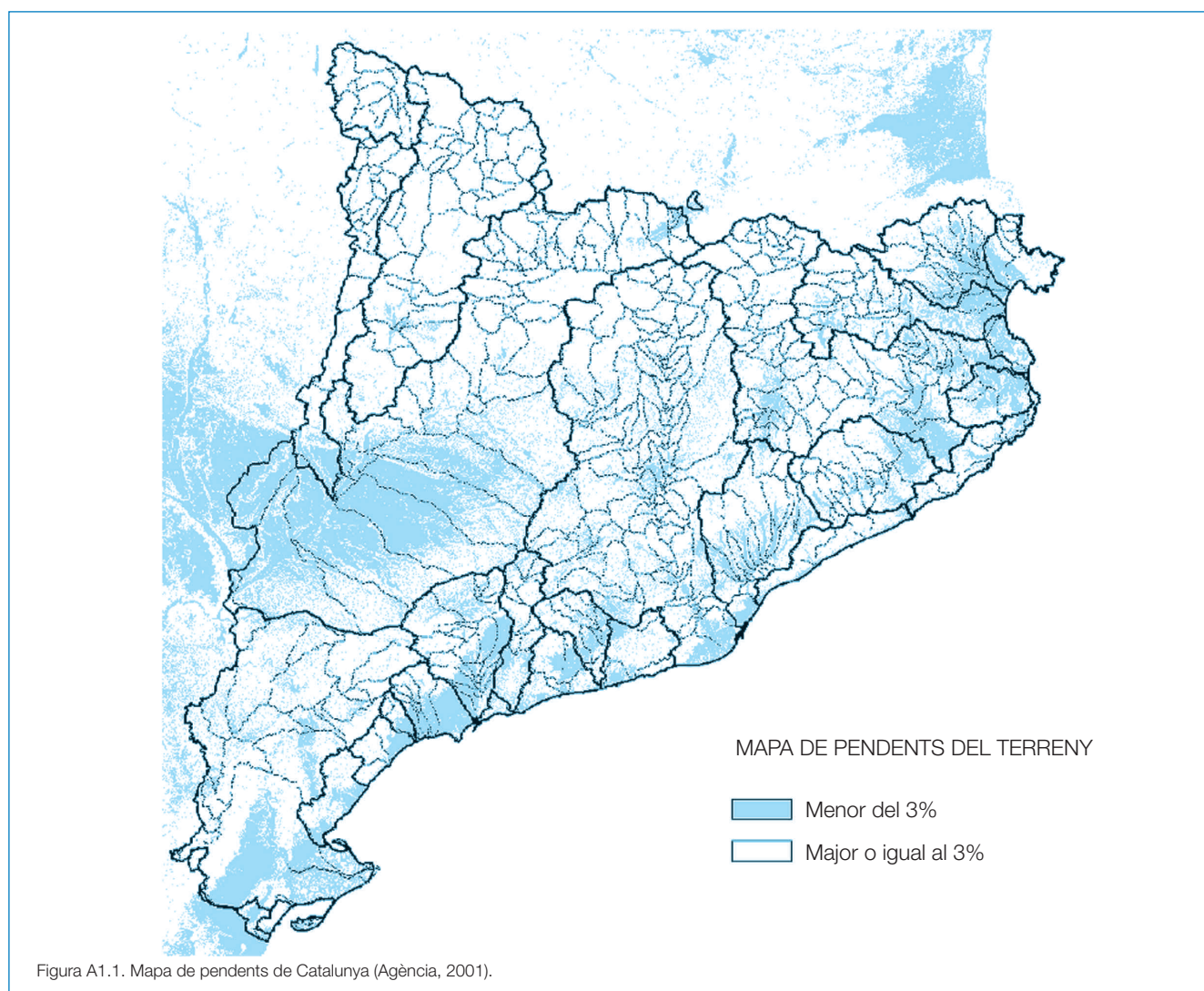
Codi paper	Codi digital	Descripció
RVQB	BNQ	Basanites
RVQA	BTM	Basalts
RVNA	BTQ	Basalts
COC	COB	Materials volcànics
DI	DI	Diorites quarsíferes, diorites i roques bàsiques
GNA	GNA	Gneiss moscovítics; biotítics
GNB	GNB	Anatexites en gneiss moscovítics; biotítics
GRA	GRA	Leucogranits
GRB	GRB	Granits leucocràtics
GRC	GRC	Granits biotítics
GRDA	GRDA	Granodiorites biotítics
GRDB	GRDB	Granodiorites biotítico-hornblèndiques
GRDC	GRDC	Granodiorites biotítics amb ortopiroxè
GRF	GRF	Granòfir
GLM	GRIT	Granit leucocràtic moscovític (biotític)
HET	HET	Zones heterogènies pluricomposicionals
LLAC	LLAC	Llacs, embassaments, etc.
MRD	MRD	Zona de la sil-limalita; feldespat potàssic, anatexites
OB	OA	Materials volcànics i porfirites
MPA	PEGA	Microgranitoids, pegmetites i aplites granítiques
PRQ	PRQ	Piroclastes
TOA	TOA	Tonalites biotítics o biotítico-hornblèndiques
TOB	TOB	Tonalites biotítics o biotítico-hornblèndiques amb ortopiroxè
RVN	TRM	Traquites
UTB	UTB	Roques ultrabàsiques

Taula A1.6. Codis de la cartografia geològica de l'ICC, tant en format paper com digital, que corresponen al grup del sòl de tipus D segons la classificació de l'SCS (Agència, 2001).

Categoria	Usos del sòl ICC	Usos del sòl del mètode de l'SCS
1	Fora de Catalunya	–
2	Aigua continental	Zona impermeable
3	Aigua marina	Zona impermeable
4	Acumulacions de neu	Zona impermeable*
5	Infraestructures viàries	Zona impermeable
6	Urbanitzacions	Zona impermeable
7	Nuclis urbans	Zona impermeable
8	Zones industrials i comercials	Zona impermeable
9	Conreus herbacis de secà	Cereals d'hivern
10	Conreus herbacis de regadiu	Rotació de conreus densos
11	Fruiters de secà	Plantacions regulars d'aprofitament forestal pobre
12	Fruiters de regadiu	Plantacions regulars d'aprofitament forestal mitjà
13	Vinyet	Plantacions regulars d'aprofitament forestal pobre
14	Prats supraforestals	Praderia pobra
15	Arbustos i prats	Massa forestal mitjana
16	Bosc d'escleròfiles	Massa forestal espessa
17	Bosc de caducifòlies	Massa forestal espessa
18	Bosc d'aciculifòlies	Massa forestal espessa
19	Vegetació de zones humides	Roca permeable
20	Sòl amb vegetació escassa o nul·la	Guaret
21	Zones cremades	Guaret
22	Zones de sorra i platges	Guaret

*Donat l'abast d'aquesta guia, s'admet no considerar que en fondre's la neu el cabal d'avinguda serà major, però el tècnic redactor podrà tenir en compte aquest fenomen si ho considera oportú.

Taula A1.7. Correlació de codis utilitzats en la cartografia d'usos del sòl editada per l'ICC i codis d'usos del sòl considerats en el mètode de l'SCS (Agència, 2001).



Usos del sòl	Superf. (%)	Pend. (%)	Caract. hidrol.	P _o (mm)				Grup sòl (%)				P _o (mm)
				A	B	C	D	A	B	C	D	
Guaret		≥ 3	R	15	8	6	4					0,0
		≥ 3	N	17	11	8	6					0,0
		< 3	R/N	20	14	11	8					0,0
Conreus en filera		≥ 3	R	23	16	8	6					0,0
		≥ 3	N	25	16	11	8					0,0
		< 3	R/N	28	19	14	11					0,0
Cereals d'hivern		≥ 3	R	29	17	10	8					0,0
		≥ 3	N	32	19	12	10					0,0
		< 3	R/N	34	21	14	12					0,0
Rotació conreus pobres		≥ 3	R	26	15	9	6					0,0
		≥ 3	N	28	17	11	8					0,0
		< 3	R/N	30	19	13	10					0,0
Rotació conreus densos	26,3 1,8 0,9	≥ 3	R	37	20	12	9		100			5,3
		≥ 3	N	42	23	14	11			100		0,3
		< 3	R/N	47	25	16	13			100		0,2
Praderies	3,9	≥ 3	pobra	24	14	8	6					0,0
			mitjana	53	23	14	9					0,0
			bona	69	33	18	13					0,0
		< 3	m. bona	81	41	22	15					0,0
			pobra	58	25	12	7					0,0
			mitjana	81	35	17	10			100		0,6
Plantacions regulars d'aprofitament forestal		≥ 3	pobra	62	28	15	10					0,0
			mitjana	80	34	19	14					0,0
			bona	101	42	22	15					0,0
		< 3	pobra	75	34	19	14					0,0
			mitjana	97	42	22	15					0,0
			bona	150	80	25	16					0,0
Masses forestals (boscos, muntanya baixa, garriga, etc.)	2,5 0,4 25,6		m. clara	40	17	8	5				100	0,3
			clara	60	24	14	10				100	0,1
			mitjana	75	34	22	16				100	5,1
			espessa	89	47	31	23					0,0
			m. esp.	122	65	43	33					0,0
Tipus de terreny	Superf. (%)	Pend. (%)		P_o (mm)							P_o (mm)	
Roques permeables		≥ 3		3							0,0	
		< 3		5							0,0	
Roques impermeables		≥ 3		2							0,0	
		< 3		4							0,0	
Ferms granulars (no pav.)				2							0,0	
Empedrats				1,5							0,0	
Paviments (bitum. o formig.)	38,6			1							0,4	
	100,0										12,3	

(N = conreu segons les corbes de nivell; R = conreus segons la línia de màxim pendent)

Coef. correct. = 1,30

P_o (inicial) = 12,3 mm

P'_o = 16 mm

Taula A1.8. Exemple del càlcul del llindar d'escorrentiu P'_o.

Annex 2. Mètode racional

A2.1 Introducció

En aquest annex es presenta una recopilació de les fórmules del mètode racional, descrit en l'apartat 3.2, per facilitar-ne l'ús.

A2.2 Resum del mètode racional

La fórmula per calcular el cabal punta és:

$$Q_p = K \cdot \frac{C \cdot I \cdot S}{3,6} \quad (3.4)$$

On:

- Q_p cabal punta (m^3/s)
- C coeficient d'escorrentiu (adimensional)
- I intensitat de precipitació (mm/h) corresponent a una durada efectiva de la pluja D igual al temps de concentració T_c de la conca
- S superfície de la conca (km^2)
- K coeficient d'uniformitat (adimensional)

El coeficient d'uniformitat es calcula mitjançant l'equació següent:

$$K = 1 + \frac{T_c^{1,25}}{T_c^{1,25} + 14} \quad (3.3)$$

On:

- K coeficient d'uniformitat (adimensional)
- T_c temps de concentració, expressat en h

El temps de concentració T_c es calcula mitjançant les expressions següents:

- (a) *Conques rurals*, amb un grau d'urbanització no superior al 4 % de l'àrea de la conca.

$$T_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{j^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (2.3)$$

- (b) *Conques urbanitzades*, amb un grau d'urbanització superior al 4 % de l'àrea de la conca i amb urbanitzacions independents que tinguin un clavegueram de pluvials no unificat o complet.

$$T_c = \frac{1}{1 + \sqrt{\mu(2 - \mu)}} \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{L}{j^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (2.4)$$

- (c) *Conques urbanes*, amb un grau d'urbanització superior al 4 % de l'àrea de la conca amb clavegueram complet i curs principal canalitzat, impermeable i de petita rugositat.

$$T_c = \frac{1}{1 + 3\sqrt{\mu(2 - \mu)}} \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{L}{j^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (2.5)$$

On

- T_c temps de concentració expressat en h
- L longitud del curs principal expressat en km
- j pendent mitjà del curs principal expressat en tant per u, m/m
- μ grau d'urbanització de la conca expressat en tant per u, km^2/km^2

El coeficient d'escorrentiu es calcula amb la fórmula:

$$C = \frac{(P'_d - P'_0) \cdot (P'_d + 23 \cdot P'_0)}{(P'_d + 11 \cdot P'_0)^2} \quad (3.5)$$

On:

- C coeficient d'escorrentiu (adimensional)
- P'_d volum de precipitació diària (mm)
- P'_0 llinar d'escorrentiu (mm)

El volum de precipitació diària es calcula mitjançant l'expressió:

$$P'_d = K_A \cdot P_d \quad (2.8)$$

On:

- K_A coeficient de simultaneïtat. És adimensional i minora la precipitació diària P_d
- P_d volum de precipitació diària per al període de retorn considerat obtingut del mapa d'isomàximes de precipitació corresponent (mm)
- P'_d volum de precipitació diària corregit (mm)

El coeficient de simultaneïtat K_A es calcula mitjançant l'expressió:

$$\begin{aligned} K_A &= 1 && \text{si } S \leq 1 \text{ km}^2 \\ K_A &= 1 - \frac{\log S}{15} && \text{si } S > 1 \text{ km}^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

On:

- K_A coeficient adimensional minorador de la precipitació diària P_d
- S superfície de la conca, expressada en km^2

El llindar d'escorrentiu P_0' és calculat com:

$$P_0' = 1,3 \cdot P_0$$

On:

P_0' llindar d'escorrentiu corregit amb el factor regional d'1,3, expressat en mm

P_0 llindar d'escorrentiu obtingut segons el que s'ha exposat en l'annex 1, expressat en mm

La intensitat de precipitació I es calcula:

$$I = \frac{P_d'}{24} \cdot \left(11 \right)^{\frac{(28^{0,1} - T_c^{0,1})}{(28^{0,1} - 1)}}$$

On:

I intensitat màxima mitjana, expressada en mm/h

I_1 intensitat horària per al període de retorn considerat, que és la intensitat de precipitació per a una durada efectiva de la pluja d'una hora, expressada en mm/h

I_d intensitat mitjana diària per al període de retorn considerat, que és la intensitat de precipitació per a una durada efectiva de la pluja d'un dia, expressada en mm/h. Es vol assenyalar que I_d no és exactament igual a I_{24}

T_c temps de concentració, expressat en h

Ad.1 Introducció

D'acord amb el que s'ha exposat en l'apartat 1.3 (10), a continuació es relacionen diversos criteris i definicions hidràuliques que apareixen en els estudis de zones inundables. Les definicions de zona fluvial, sistema hídic i zona inundable van ser aprovades pel Consell d'Administració de l'Agència el 28 de juny de 2001; la resta està pendent d'aprovació.

Ad.2 Zona fluvial (ZF)

Ve definit per la franja delimitada per la línia de cota d'inundació de l'avinguda de període de retorn de 10 anys (figura 1). Aquesta definició vol superar l'ambigüitat de la definició legal del Domini Públic Hidràulic per la via d'englobar tant la llera legal com la seva zona d'influència immediata que, a l'efecte ecosistèmic, podríem catalogar de llera. L'ambigüitat rau en la diferent torrencialitat dels diversos rius per considerar, torrencialitat que amb la definició del cabal de període de retorn de 10 anys (Q_{10}) resta acotada a un nivell superior.

L'estudi hidràulic del riu per determinar la franja inundable amb el cabal de període de retorn de 10 anys s'haurà de fer en règim gradualment variat.

A més a més, en l'estudi de definició de la zona fluvial del riu cal considerar aspectes de caràcter històric, geomorfològic i biològic per tal de complementar la seva definició. L'estudi d'aquests aspectes definiran l'evolució històrica de la llera, l'existència de lleres secundàries recuperables, les zones de vegetació de ribera i altres característiques definitòries del sistema.

Ad.3 Sistema hídic (SH)

El «sistema hídic» de protecció fluvial, s'haurà de definir a partir de criteris basats en la consideració de valors ecològics, naturals i espacials associats als cursos fluvials i, alhora, s'hauran d'observar determinades normes i recomanacions tècniques hidràuliques de prevenció, definides en la planificació hidrològica.

Mentre aquesta planificació no estigui disponible i per tal de no hipotecar-la, es proposa adoptar el criteri de considerar l'SH com la zona ocupada pel cabal de 100 anys de període de retorn. Aquest criteri es complementarà també amb consideracions de caràcter històric, geomorfològic i biològic.

Ad.4 Zona inundable (ZI)

Es defineix per la franja delimitada per la línia de cota d'inundació de l'avinguda de període de retorn de 500 anys.

L'estudi hidràulic del riu per determinar la zona inundable amb el cabal de període de retorn de 500 anys s'haurà de fer en règim gradualment variat i considerant les condicions de contorn que afecten l'anàlisi del tram estudiat i el seu règim hidràulic.

A més a més, en l'estudi de definició de la zona inundable del riu cal considerar igualment aspectes de caràcter històric, geomorfològic i biològics per tal de complementar la seva definició. L'estudi d'aquests aspectes determinarà avingudes històriques i la seva afecció, les característiques geomorfològiques de les planes d'inundació, les característiques de la flora i la fauna de la zona i altres trets determinants de la zona inundable.

Ad.5 Zona d'inundació perillosa (ZIP)

És la zona en la qual es poden produir greus danys (materials i humans) amb l'avinguda de 500 anys.

Ad.6 Via d'intens desguàs (VID)

Es tracta de l'ample de llera i marges en el qual circula la major part del cabal (figura 4). Es defineix amb el cabal de període de retorn de 100 anys. És l'àrea on, limitant-se una determinada amplada entre marges amb uns hipotètics paraments verticals, la sobreelevació del nivell de l'aigua seria de ΔH metres respecte al nivell de l'aigua en la llera i els marges sense la limitació.

El valor mínim $\Delta H = 0,1$ m correspondria a zones on l'increment de la inundació provocaria danys greus o bé on hi hagi possibilitats tècniques i econòmiques de trobar zones alternatives per al desenvolupament urbà. Aquest valor és el que defineix la VID de major amplada.

El valor màxim $\Delta H = 0,5$ m correspondria a zones on l'increment de la inundació provocaria danys reduïts i on, a més a més, hi hagi dificultats tècniques i econòmiques de trobar zones alternatives per al desenvolupament urbà. Aquest valor és el que defineix la VID de menor amplada.

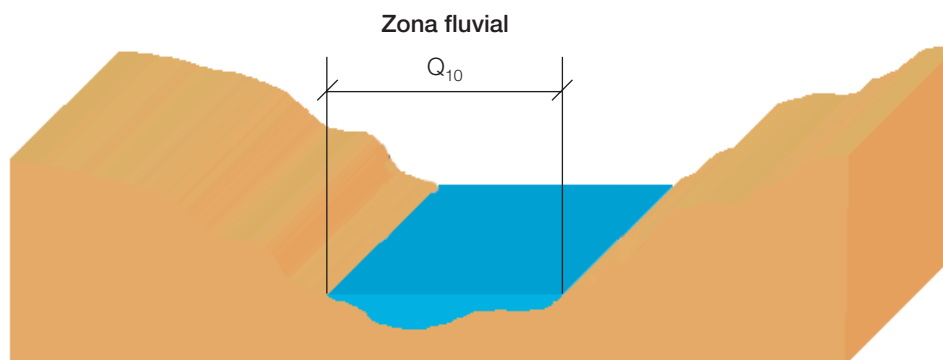


Figura 1. Definició de la zona fluvial

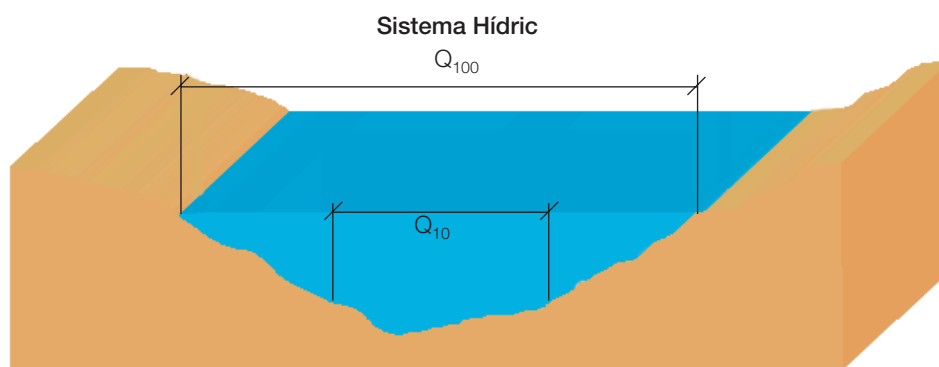


Figura 2. Definició del sistema hídric.

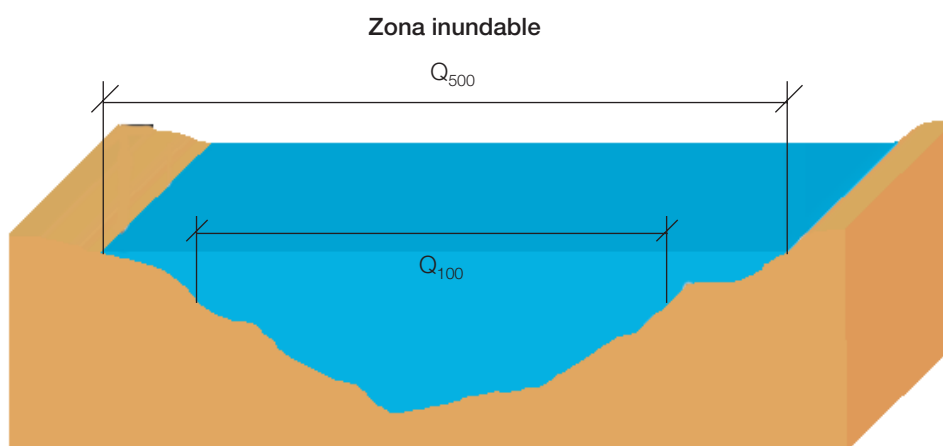


Figura 3. Definició de la zona inundable

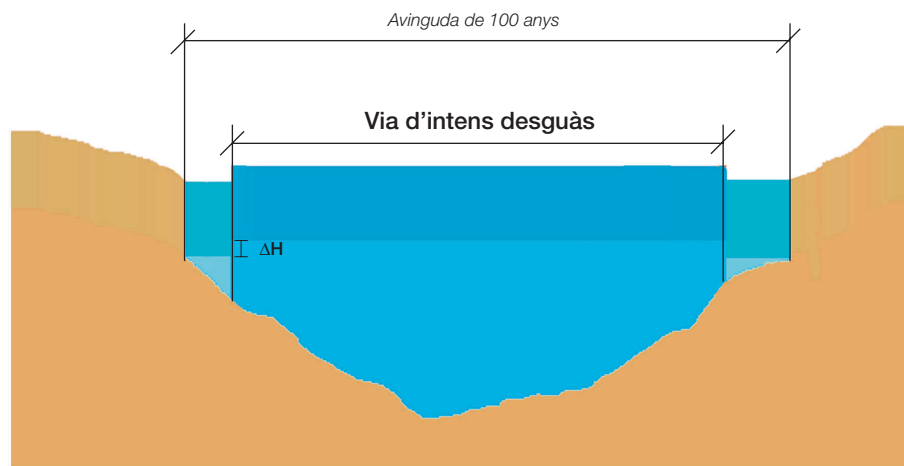


Figura 4. Definició de la via d'intens desguàs.

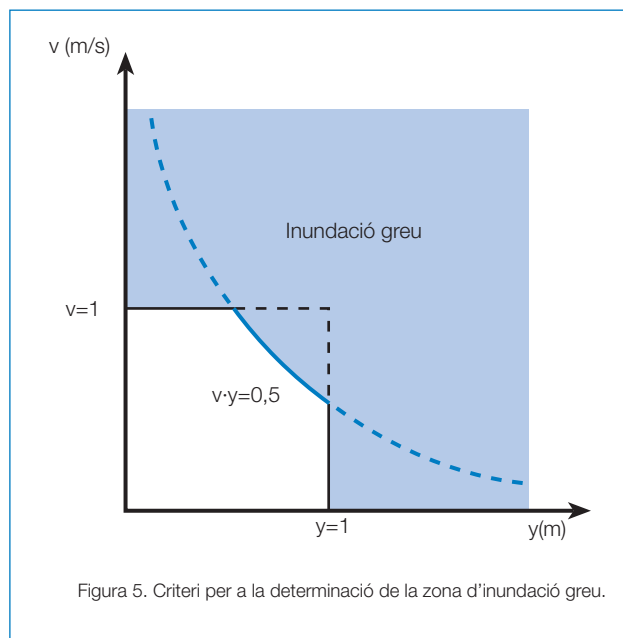


Figura 5. Criteri per a la determinació de la zona d'inundació greu.

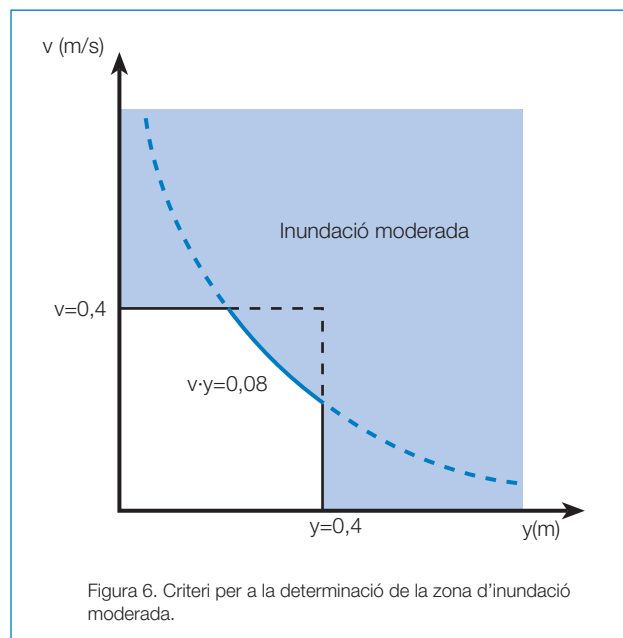


Figura 6. Criteri per a la determinació de la zona d'inundació moderada.

Ad.7 Zona d'inundació greu

La zona d'inundació greu és la zona fora de la via d'intens desguàs on les condicions hidràuliques presenten un calat superior a 1 metre, una velocitat major d'1 m/s i el producte d'ambdós és major de 0,5 m²/s (figura 5).

Ad.8 Zona d'inundació moderada

La zona d'inundació moderada és la zona fora de la via d'intens desguàs on les condicions hidràuliques presenten un calat superior a 0,4 m, una velocitat major de 0,4 m/s i el producte d'ambdós és major de 0,08 m²/s (figura 6).

Per definir l'equació que relaciona v i y es poden prendre els valors de les velocitats i els calats mitjans a cada marge que apareixen en les taules de resultats del programa HEC-RAS. Amb aquest model, els marges del riu es poden considerar dividits en diverses franges i en cadascuna d'aquestes franges es poden calcular els valors de v i y .

NOTES

