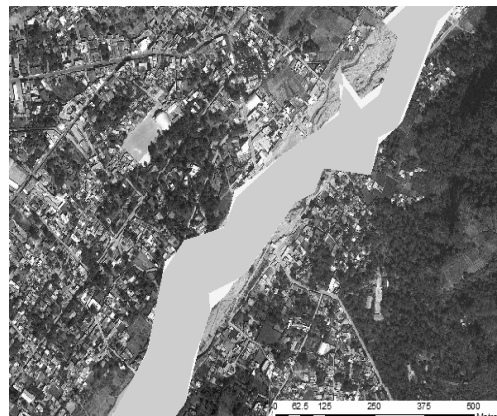
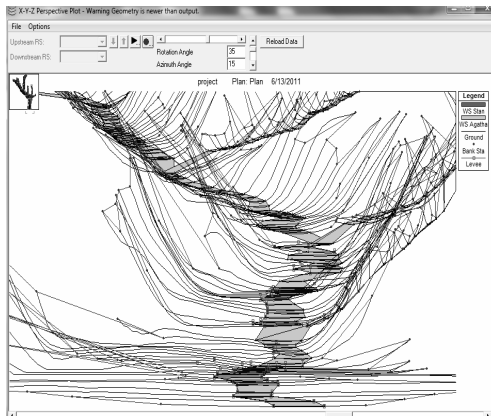
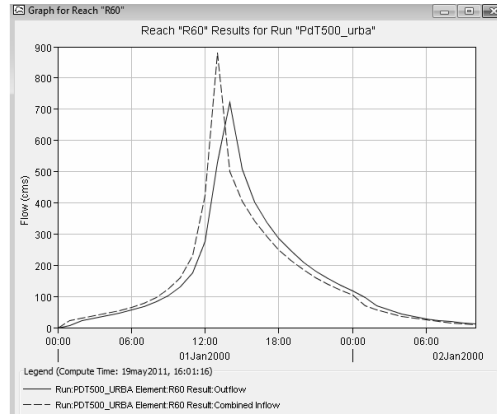
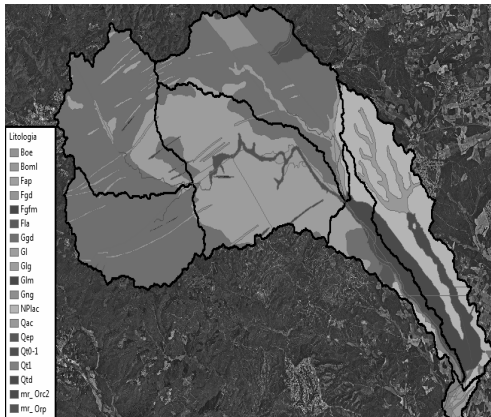


Anàlisi de la modelització hidrològica com a eina per la predicció d'inundacions i la gestió del territori

Sergio Gil Villalba
Juny 2011



Projecte de final de carrera de
Ciències Ambientals dirigit per:
Albert Folch i Sancho

While performing an hydrologic simulation with modeling software, you must know the meaning of each of the parameters you are entering. Entering some parameters just to get any results and believe them can be done by a secretary, but not by a scientist.

Erik Pasche (2008)

Nota: Aquest treball ha estat imprès en paper reciclat lliure de clor. Al final del document s'adjunta un CD que conté una versió digital del projecte. Igualment, també s'adjunta un resum en format d'article.

Agraïments

En primer lloc vull donar les gràcies al meu tutor del projecte, Dr. Albert Folch del Grup d'Hidrologia del Departament de Geologia de la Universitat Autònoma de Barcelona, per donar-me la oportunitat de desenvolupar aquest projecte, per confiar en mi en tot moment i per ajudar-me sempre que ho he necessitat. Pels seus consells i la seva paciència, especialment els dies previs a l'entrega de la memòria. També per obrir-me portes a la continuació de la recerca en aquesta temàtica un cop finalitzat aquest projecte.

També vull agrair especialment a en Joan Bach, catedràtic de la Unitat de Geodinàmica Externa del Departament de Geologia de la Universitat Autònoma de Barcelona, per les dades de camp que m'ha proporcionat per l'estudi de la conca del riu San Francisco, així com pel passatge de fotografies que m'han servit per comprendre millor la morfologia de la conca. De la mateixa manera vull agrair a en Guillermo Serra per cedir-me dades de la seva tesi de màster per generar el model de Panajachel.

Al Dr. Eng. Erik Pasche, ex-director del *Institute of River & Coastal Engineering* a la *Hamburg University of Technology*. Gràcies a ell vaig despertar especial interès en la hidrologia superficial així com en l'ús de models informàtics per la simulació hidrològica. Espero que descansi en pau allà on sigui.

A l'Alex Guerra pels consells referents a la pluviometria associada a l'huracà Stan i les explicacions dels fenòmens meteorològics locals que es donen al llac Atitlán.

A en Josep Culler i en Josep Descamps, per acollir-me amablement a l'Ajuntament de Santa Coloma de Farners, escoltar l'explicació del meu projecte i explicar-me el funcionament de la xarxa de clavegueram de Santa Coloma de Farners, així com mostrar-me el desenvolupament urbanístic previst pel municipi en el Pla d'Ordenació Urbana Municipal.

A l'Agència Catalana de l'Aigua per proporcionar-me els mapes de precipitacions màximes de la conca del riu Tordera.

Vull agrair als meus pares tot l'esforç i dedicació que han dipositat en la meua educació, així com pels valors que m'han inculcat des de petit. Sense ells no seria qui soc. De la mateixa manera vull donar les gràcies al meu germà per haver estat sempre al meu costat ajudant-me quan ho he necessitat, especialment en qüestions matemàtiques.

Finalment vull agrair a la Gema Sánchez, la seva paciència i comprensió al llarg de tota la realització del projecte, per suportar-me en moments de tensió i per mostrar interès per tot el que he fet.

Índex

1. Introducció.....	1
1.1. Antecedents.....	5
1.2. Legislació.....	6
1.3. Objectius.....	7
2. Metodologia.....	9
2.1. Marc teòric. Conceptes d'hidrologia.....	11
2.1.1. El cicle hidrològic.....	11
2.1.2. Sistema hidrològic.....	12
i. Paràmetres hidromorfomètrics.....	12
ii. Temps de concentració.....	13
iii. llindar d'escorrentiu.....	14
2.1.3. Precipitació.....	15
i. Distribució temporal i espacial.....	15
ii. Intensitat de precipitació.....	16
iii. Pluja de projecte.....	17
2.1.4. Cabal d'avinguda.....	20
2.1.5. Estimació de la velocitat d'avinguda.....	22
2.2. Models de transformació Precipitació-escorrentiu.....	23
2.2.1. Conceptes.....	23
2.2.2. Tipus de model.....	23
2.2.3. Transformació pluja-escorrentiu.....	24
i. Hidrograma unitari.....	24
ii. Hidrogrames unitaris sintètics.....	26
iii. Hidrograma adimensional de l'SCS.....	27
2.3. Mètodes de propagació d'avingudes.....	28
2.3.1. Conceptes.....	28
2.3.2. Models de propagació.....	29
2.3.3. Temps de retard.....	30
2.4. Metodologia.....	31
3. Resultats i discussió.....	33
3.1. Estudi de la Riera de Santa Coloma.....	35
3.1.1. Descripció de la conca.....	35
3.1.2. Preparació del model.....	38
3.1.3. Estimació de la precipitació a l'àrea d'estudi.....	39
3.1.4. Determinació de la pluja neta.....	40
3.1.5. Construcció de l'hietograma.....	41
3.1.6. Càlcul de l'hidrograma de sortida.....	44

3.1.7. Estudi del impacte generat per l'increment de la superfície urbanitzada del municipi de Santa Coloma de Farners.	46
3.1.8. Estudi del volum d'escorrentiu en funció del percentatge de urbanització de la conca	48
3.1.9. Conclusions.	50
3.2. Estudi del Rio San francisco.	52
3.2.1. Descripció de la conca.	52
3.2.2. Preparació del model.	55
3.2.3. Estimació de la precipitació a l'àrea d'estudi.	56
3.2.4. Determinació de la pluja neta.	57
3.2.5. construcció de l'hietograma.	60
3.2.6. Càlcul de l'hidrograma de sortida.	61
3.2.7. Delimitació de les zones inundables.	63
3.2.8. Conclusions.	66
4. Conclusions.	69
5. Propostes de millora.	72
6. Bibliografia.	73
7. Pressupost.	77
8. Programació.	79

Annexos.

Annex I. Hidrograma unitari

Annex II. Mètode del nombre de corba de l'SCS

Annex III. Equació de Manning

Annex IV. Porcessat del DEM

Índex de figures

Fig. 2.1- Esquema del cicle hidrològic	11
Fig. 2.2- Corbes de transformació Precipitació-Pluja resultants del model de l'SCS.	14
Fig. 2.3- Exemple d'hietograma.	16
Fig. 2.4- Exemple d'hidrograma corresponent a una avinguda d'inundació.	21
Fig. 2.5- Etapes temporals d'un hidrograma.	24
Fig. 2.6.a- Hipòtesi de proporcionalitat dels hidrogrames unitaris.	25
Fig. 2.6.b- Superposició d'hidrogrames segons la hipòtesi de additivitat.	25
Fig. 2.7- Hidrograma adimensional de l'SCS.	27
Fig. 2.8- Concepte d'emmagatzematge prismàtic i en cuny segons el mètode de Muskingum.	30
Fig. 3.1- Ubicació de la Riera de Santa Coloma.	35
Fig. 3.2- Model generat per l'HEC-GeoHMS per al tram de la Riera de Santa Coloma que es vol estudiar.	38
Fig. 3.3- Isomàximes pluvials facilitades per l'ACA.	39
Fig. 3.4.a- Mapa de pendents i mapa d'usos del sòl de la Riera de Santa Coloma.	42
Fig. 3.4.b- Mapa geològic i mapa del nombre de corba obtingut amb el mètode de l'SCS.	42
Fig. 3.5- Hietograma calculat per la precipitació diària amb període de retorn de 50 anys en la subconca W110.	43
Fig. 3.6- Model de la conca al programa de simulació HEC-HMS. Punts de calibratge amb les dades de l'ACA.	44
Fig. 3.7- Hidrogrames obtinguts per al punt de control C, per períodes de retorn de 50, 100 i 500 anys.	45
Fig. 3.8- Plànol del POUM de Santa Coloma de Farners.	46
Fig. 3.9- Reclassificació dels usos del sòl de Santa Coloma de Farners segons el POUM.	47
Fig. 3.10- Canvis generats en la precipitació lliandar i la intensitat horària màxima efectiva en funció del percentatge d'urbanització de la conca	48
Fig. 3.11- Canvis generats en el cabal pic i el volum total de precipitació efectiva en funció del percentatge d'urbanització de la conca.	49
Fig. 3.12- Ubicació del riu San Francisco.	52
Fig. 3.13- Efectes de l'esllavissada produïda a "Cantón Panabaj" durant l'huracà Stan l'any 2005 i inundacions a Panajachel.	54
Fig. 3.14- Model generat per l'HEC-GeoHMS per al riu San Francisco.	55
Fig. 3.15- Ubicació de les diferents estacions meteorològiques de les quals es disposa d'informació a la conca del llac Atitlán.	56
Fig. 3.16.a- Mapa de pendents de la conca del riu San Francisco.	58
Fig. 3.16.b- Mapa geològic de la conca del riu San Francisco.	58
Fig. 3.16.c- Mapa dels usos del sòl de la conca del riu San Francisco.	59

Fig. 3.16.c- Mapa obtingut del nombre de corba de la conca del riu San Francisco. .	59
Fig. 3.17- Hietograma determinat per la precipitació sobre la subconca W360 durant l'episodi de l'Agatha.	61
Fig. 3.18- Model de la conca del riu San Francisco al programa de simulació HEC-HMS.	61
Fig. 3.19- Hidrogrames obtinguts a la desembocadura del riu San Francisco per als episodis del Stan i l'Agatha.	62
Fig. 3.20- Ubicació dels murs que canalitzen el riu San Francisco construïts l'any 1949.	63
Fig. 3.21- Delimitació de les zones inundades per l'Stan i l'Agatha a Panajachel.	64
Fig. 3.22- Punts de control de la velocitat del flux al riu San Francisco.	65
Fig. 3.23.a- Construcció de vivendes dins de la llera delimitada pels murs de l'any 1949 al municipi de Panajachel.	67
Fig. 3.23.b- Construcció de vivendes dins la llera del riu, al barri nord de Panajachel conegut com "La Manzanita" l'any 2007.	67

Index de Taules

Taula 2.1- Paràmetres de calibratge de les corbes IDF a la conca de l'Atitlán.	19
Taula 3.1- Percentatges d'ús del sòl a la zona d'estudi de la Riera de Santa Coloma .37	37
Taula 3.2- Hectàrees corresponents a cada tipus d'ocupació del territori a les comarques de la Selva, el Maresme i el Vallès Oriental.	37
Taula 3.3- Valors de precipitació màxima obtinguts a partir de mapes d'isomàximes i la seva correcció mitjançant el coeficient de simultaneïtat.	40
Taula 3.4- Mitjana del nombre de corba per cada subconca transformat a llinar d'escorrentiu i multiplicat pel coeficient regional.	41
Taula 3.5- Exemple de càlcul dels hietogrames.	43
Taula 3.6- Cabals obtinguts per cadascun dels punts de calibratge i període de retorn.	45
Taula 3.7- Llinar d'escorrentiu per cada subconca, després de la urbanització.	47
Taula 3.8- Cabal pic en el punt C abans i després de la urbanització.	47
Taula 3.9.a- Determinació del temps de concentració i el temps de pic per cada subconca, amb els usos del sòl actuals.	51
Taula 3.9.b- Determinació del temps de concentració i el temps de pic per cada subconca, amb els canvis previstos al POUM de Santa Coloma.	51
Taula 3.10- Percentatges d'ús del sòl a la conca del Riu San Francisco	54
Taula 3.11- Valors màxims de precipitació diària corresponents al Stan i l'Agatha, per cadascuna de les estacions pluviomètriques.	56
Taula 3.12- Nombre de corba i precipitació llinar corresponent per a cada subconca.	57
Taula 3.13- Exemple de càlcul dels hietogrames.	60
Taula 3.14- Velocitat del flux obtinguda amb l'HEC-RAS en funció del coeficient de Manning introduït.	65

1. INTRODUCCIÓ

Des de l'any 1900, més de 10.000 persones han perdut la vida, només als Estats Units, degut a les inundacions. En la darrera dècada els danys materials deguts a aquests fenòmens s'han valorat en més de 4.000 milions de dòlars per any en aquest país. Dins l'àmbit europeu, els darrers 10 anys s'han produït més de 120 inundacions catastròfiques amb un total de 1.7 milions de persones afectades i danys valorats en 30 bilions d'euros (Keller B., 2004). Les inundacions representen el risc natural més freqüent i en el qual hi ha una major exposició de la població. Una exposició creixent degut a l'increment de la urbanització dins les zones inundables dels rius i a les modificacions dels espais fluvials que limiten l'espai del que disposa l'aigua per fluir.

A diferència de les darreres dècades, quan la protecció davant episodis d'inundació s'havia basat en la construcció de mesures tècniques correctores, les recents inundacions han desembocat en una major conscienciació del problema que poden suposar aquestes avingudes. És per això que ha esdevingut necessari l'establiment de sistemes de gestió de conques fluvials. Una gestió que passa obligatòriament per una correcta valoració dels diversos conflictes d'interès on les inundacions han de ser acceptades com un part natural del cicle hidrològic (APFM).

Per realitzar una correcta gestió de l'ús de les conques fluvials cal una visió holística que integri els aspectes fluvials, geomorfològics, hídrics, socials, econòmics, ecològics, etc. És aquí on l'ambientòleg juga un paper molt important en aquest tipus de projecte, es requereix un tècnic interdisciplinari que sigui capaç de valorar correctament cadascun d'aquests àmbits. A partir d'aquesta visió de conjunt sorgeix el nou concepte de IWRM (Integrated Water Resource Management) que promou una gestió conjunta de l'aigua, sòls i altres recursos naturals amb l'objectiu de maximitzar els resultats econòmics i el benestar social d'una manera equitativa sense comprometre la sostenibilitat dels ecosistemes vitals (APFM).

Aquest tipus de model de gestió comença per la realització de models físics per passar posteriorment per models ecològics, econòmics i socials de manera que acaba essent una eina útil per a la gestió real i la presa de decisions dins l'àmbit d'una conca fluvial. La motivació principal per la realització d'aquest projecte és la participació en aquest nou mecanisme de gestió, des de la seva base de partida que són els models físics del territori.

Als països en vies de desenvolupament la situació és encara molt més greu. A Bangladesh, l'any 1970, el cicló Bholá va acabar amb la vida de 300.000 persones, constituint la pitjor catàstrofe natural que es recorda (CRED). Però aquest no és un cas aïllat, l'any 1991 el cicló Gorky va generar unes 138.000 víctimes també a Bangladesh i l'any 2008 el cicló Nargis va provocar 138.373 víctimes a Myanmar. Només al país de Guatemala, l'huracà Stan, l'any 2005, va produir 1.500 morts i es van confirmar 3.000 desapareguts mentre 24.000 persones van haver d'abandonar la seva vivenda.

La manca de recursos a aquests indrets no permet l'establiment de mesures correctores, per no parlar de models de gestió integrada. L'explosió demogràfica a aquests països, vinculada a la pobresa dels mateixos, fa que els nivells de exposició i vulnerabilitat al risc siguin molt superiors als dels països desenvolupats, provocant calamitats de grans magnituds.

El risc associat a un episodi d'inundació determinat ve donat per tres factors:

- La perillositat: associada a la magnitud del fenomen natural. Usualment es classifica la magnitud de les inundacions segons la seva recurrència, a partir del concepte de temps de retorn.
- La vulnerabilitat: especialment vinculada a les característiques econòmiques del país per construir edificacions resistents a inundacions, estructures de prevenció i elaborar plans d'emergència.
- La exposició: en el cas de les inundacions és un factor totalment determinat per la ocupació de la zona inundable. La planificació del territori esdevé determinant per atorgar a les zones inundables usos que siguin compatibles, o resistents als episodis d'inundació.

Deixant de banda la vulnerabilitat, els models de simulació hidrològica són una eina molt útil per, a partir d'una perillositat determinada associada a un període de retorn concret, poder establir quines han de ser les pautes d'ocupació del territori per reduir al mínim l'exposició. Tant pels països desenvolupats, on la vulnerabilitat és menor, com als països subdesenvolupats, amb vulnerabilitats majors, l'establiment d'una zona de policia on es controlin de manera estricta els usos del sòl és alhora una mesura de precaució per evitar el risc associat a les inundacions i una mesura ambiental per que els ecosistemes vinculats a la zona de ribera es puguin desenvolupar.

1.1 Antecedents

L'aigua ha estat sempre un requisit indispensable per al desenvolupament de les societats humanes. Per aquest motiu els nuclis de població sempre s'han establert històricament a prop dels rius. El creixement demogràfic al llarg del segle XX, però, ha portat en molts casos a una urbanització inadequada de la plana d'inundació.

La predicció de les inundacions suposa un factor determinant per la planificació territorial. Els fonaments hidrològics en que es basa l'escorrentiu dels canals naturals, però, deriven d'estudis d'hidrologia de canals dissenyats per les grans ciutats (AUBUISSON J.F., 1834, *Traité d'hydraulique*).

A finals del segle XIX i la primera meitat del XX es van establir alguns conceptes importants d'hidràulica, equacions de Darcy-Weisbach o Manning (AUBUISSON J.F., 1834; MANNING R., 1890; FOREL F. A., 1904;).

Especialment la segona meitat del segle XX, es van establir els models actuals, integrant multitud de paràmetres i fórmules per a la caracterització hidrològica de una conca i la seva modelització (STRAHLER A. L., 1952; CHOW V.T., 1959; PONCE V. M., 1989). Posteriorment, agències com el Soil Conservation Service (d'ara en endavant SCS) han calibrat paràmetres empírics, facilitant els estudis hidrològics arreu del món.

A Catalunya

L'Agència Catalana de l'Aigua (d'ara en endavant ACA) ha dut a terme estudis de les conques internes al llarg de la darrera dècada:

- La delimitació de les zones inundables per a l'INUNCAT, on s'estableixen les zones afectades per inundacions en funció del període de retorn. (ACA, 2001)
- La planificació dels espais fluvials (PEF), que estudia les conques amb tots els factors que els afecten (hidrologia, aigües subterrànies, pluviometria, litologia, característiques socioeconòmiques, transport de sediments, etc.). (ACA, 2002)

Aquest estudis parteixen de la base teòrica establerta en les fórmules hidrològiques proposades per l'antic *Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo* (d'ara en endavant MOPU) per a la península ibèrica (TÉMEZ, J.R. 1978).

A Guatemala

A Guatemala s'han realitzat alguns estudis, especialment després de la catàstrofe que va generar la tempesta tropical Stan (2005).

- El *Plan de las Naciones Unidas para el Desarrollo* (PNUD) va desenvolupar l'any 2007 un *Plan de Reconstrucción i Reducción de Riesgos del Departamento de Sololá*, on s'analitzen els efectes que va tenir l'episodi del 2005 i es proposen una sèrie d'actuacions i pressupostos per la reconstrucció de les infraestructures i l'activació de la economia a la zona amb els objectius de reduir la pobresa i la vulnerabilitat.

1.2 Legislació

A Catalunya

La Directiva Marc de l'Aigua (Directiva 2000/60/CE), estableix com a objectiu l'elaboració de plans de gestió per a cada conca hidrogràfica dels estats membres que garanteixin un bon estat ecològic de les masses d'aigua, amb data límit el desembre de 2015. A Catalunya, l'ACA s'encarrega de la gestió de les conques internes, mentre que les conques que formen part del riu Ebre són gestionades per la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre.

La legislació relacionada a la gestió dels usos i activitats desenvolupades a l'espai fluvial, remet al Reial Decret referent al Domini Públic Hidràulic (DPH) (RD 849/1986), desenvolupat a la Llei 29/1985 d'Aigües.

Es defineix el DPH com "les aigües continentals superficials, així com les subterrànies renovables, integrades totes elles en el cicle hidrològic, constitueixen un recurs unitari subordinat a l'interès general" (art.1.2).

També defineix les zones de ribera: "Zona lateral dels llits públics; subjectes a una zona de servitud (5 m), de policia (100 m) on s'han de regular diverses activitats com a mesura de protecció" (art. 6.1, 9.1)

L'objectiu del DPH es fixa com: "Mantenir la qualitat, evitar la contaminació al subsòl i evitar qualsevol causa de degradació"(art. 232), "del medi físic o biològic vinculat a l'aigua" (art. 234c).

Per la qual cosa s'estableix un cànon d'ús: "La ocupació o ús del DPH (...) es gravarà amb un cànon destinat a la protecció i millora del domini" (art. 284).

A Guatemala

A diferència del cas d'Europa, a Guatemala la gestió dels rius es duu a terme en base a la divisió politico-administrativa del país, sense tenir en compte el concepte de conca. Si que existeixen, però, organismes de gestió integrada dels recursos hídrics per les conques de quatre llacs del país, entre els quals s'inclou el llac Atitlán.

A Guatemala no es disposa de cap llei d'aigües concreta, fet que deriva en una gran quantitat de normes i reglaments generats des de diferents ministeris. La *Ley de Áreas Protegidas* (1989) incorpora de forma genèrica l'aigua com part de processos ecològics essencials i sistemes naturals vitals.

La generació de polítiques i estratègies per a la gestió de l'aigua està dividida entre:

- El *Ministerio de Comunicaciones, Transporte, Obras Públicas y Vivienda* és responsable de la construcció de canals de navegació i del dragat dels rius.
- El *Ministerio de Energía y Minas* s'encarrega de fomentar el desenvolupament de centrals hidroelèctriques.
- El *Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA)* és encarregat de promoure els sistemes de reg.
- El *Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social* s'encarrega de controlar la qualitat de l'aigua potable.

- El *Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales* s'encarrega de la elaboració de les polítiques referents a gestió dels recursos naturals, incloent els recursos hídrics i la seva legislació.

D'altra banda el *Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología* (d'ara en endavant INSIVUMEH), és la organització governamental encarregada de la investigació i generació de dades en l'àmbit de la hidrologia.

L'any 2004 es va fundar la *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA), que intenta coordinar y revisar les accions que es duen a terme sobre els recursos hídrics. Gràcies a aquesta nova institució s'ha elaborat una *Política hídrica Gubernamental*, encara pendent de publicació. A més s'han generat sistemes d'informació dels recursos hídrics i la campanya de sensibilització a nivell nacional *Agua con el Agua*.

1.3 Objectius

L'objectiu general d'aquest projecte és dur a terme una simulació hidrològica, mitjançant models informàtics, que permeti delimitar les zones inundables i observar quins efectes generen els canvis en els usos del sòl. Es farà servir el paquet de software del Hydrologic Engineering Center, de l'exèrcit dels Estats Units, ja que és una de les eines informàtiques més utilitzades arreu del món per realitzar estudis hidrològics.

Objectius específics:

- Elaborar models hidrològics per a les conques de la Riera de Santa Coloma (Catalunya) i el riu San Francisco (Guatemala).
- Estimar els efectes que generarà la urbanització del municipi de Santa Coloma de Farners, segons les delimitacions del POUM.
- Estudiar com afecta l'increment del percentatge de la superfície urbanitzada d'una conca determinada en la generació d'escorrentiu superficial en un episodi d'inundació.
- Simular les avingudes del riu San Francisco associades als episodis d'inundació corresponents als huracans Stan i Agatha.
- Valorar l'eficàcia de les mesures correctores que s'han aplicat al municipi de Panajachel (Guatemala) per evitar el desbordament del riu durant episodis d'inundació.
- Analitzar en quin grau és la planificació urbanística, o la manca d'aquesta, responsable de les catàstrofes ocorregudes a la conca del riu San Francisco amb els huracans Stan i Agatha.
- Avaluar en quin grau són fiables els models hidrològics utilitzats en la modelització de les dues conques objectes d'estudi.

2. METODOLOGIA

2.1 Marc teòric. Conceptes bàsics d'hidrologia

2.1.1. El Cicle hidrològic

El cicle hidrològic constitueix el principi fonamental de la hidrologia. Es tracta de la idealització de la circulació de l'aigua i els seus mecanismes de reciclatge i transformació al planeta. El cicle hidrològic és un procés continu per mitjà del qual l'aigua és transportada dels oceans a l'atmosfera, d'on precipitarà als continents i tornarà a l'oceà degut a les forces gravitacionals. Com que la quantitat total d'aigua a la Terra és finita, el cicle hidrològic es pot considerar com un sistema tancat, en el qual processos com evaporació, advecció del vapor d'aigua, precipitació i escorrentiu, superficial i subterrani, cap als oceans, es troben en equilibri. Aquest equilibri s'expressa en l'equació del balanç hidrològic:

$$P = Q + E \pm \Delta S \quad (2.1)$$

On

P és la precipitació mitjana.

Q és el cabal mitjà

E és l'evaporació

ΔS és la variació de l'emmagatzematge d'aigua al continent.

Aquesta equació, però, només representa una simplificació dels processos que tenen lloc a la natura. El cicle hidrològic està format per multitud de factors, i és complicat establir les relacions exactes que s'estableixen entre aquests. De fet, la descripció matemàtica acurada dels processos hidrològics és una de les tasques més complexes de les ciències experimentals, i comporta l'establiment d'un model integral on s'han d'establir components com models de canvi climàtic, escorrentiu superficial i escorrentiu subterrani en sòls saturats i no saturats. Si es té en compte que en cadascun d'aquests components del model encara hi ha processos físics i processos naturals a petita escala que no s'han descrit acuradament, la simplificació realitzada del cicle hidrològic, doncs, sembla molt més que raonable.

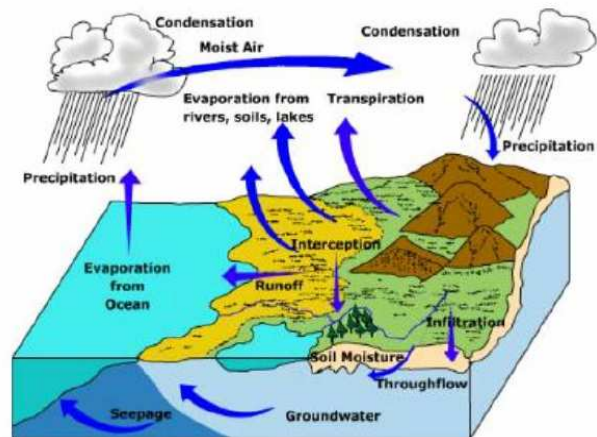


Figura 2.1. Esquema del cicle hidrològic.

Font: Michael E. Ritter, University of Wisconsin.

De cara a la modelització d'avingudes, l'aigua de precipitació es reparteix en els següents processos (Figura 2.1):

- Intercepció: Retenció de l'aigua a la vegetació, bassals o construccions.
- Emmagatzematge en forma de gel o neu.
- Infiltració a capes inferiors del sòl.
- Esorrentiu superficial

Si la precipitació no és suficientment abundant, tota l'aigua serà interceptada, de manera que no s'infiltrarà ni es generarà escorrentiu superficial. Un cop es sobrepassa el llindar d'intercepció, es genera flux d'aigua terrestre, que es pot donar en tres formes: flux superficial, flux subsuperficial, constituït per l'aigua que circula per la zona no saturada i flux subterrani, compost per l'aigua que circula per la capa freàtica. Els dos darrers es generen a partir de l'aigua infiltrada al sòl. És important ser conscient de la diferència de velocitats entre aquests tres fluxos terrestres ja que mentre el flux superficial presenta velocitats força elevades, el flux subterrani es dona en una escala temporal més llarga.

Dins l'escorrentiu superficial, a més, es discerneixen dos components:

- Escorrentiu base: Provenent del flux subterrani i subsuperficial. Degut a les velocitats menors d'aquests fluxos l'escorrentiu base es pot continuar produint quan no hi ha pluges i presenta una evolució suau en el temps, per la qual cosa no es tindrà en compte en els estudis d'inundabilitat a curt termini.
- Escorrentiu directe: Provenent majoritàriament de la precipitació que no infiltra al sòl, també anomenada pluja neta. Aquest presenta una variació en el temps molt més acusada, lligada a la existència de pluges. L'aigua provenent del desglaç, quan hi hagi, també passarà a formar part de l'escorrentiu directe.

2.1.2. Sistema hidrològic

Conceptualment, un sistema hidrològic és un volum o sistema en l'espai, que rep aigua d'origen meteorològic o subterrani i que en transforma part en escorrentiu superficial. La superfície d'un sistema hidrològic s'anomena conca. Dins d'una conca es poden diferenciar els cursos fluvials, per on circula l'aigua, que es classifiquen en:

- Principal: És aquell que passa pel punt de desguàs de la conca i genera un cabal punta més gran.
- Tributari: Engloba la resta de cursos fluvials, que desemboquen al curs principal.

El funcionament d'un sistema hidrològic, doncs, es basa en la transformació de part de la precipitació que rep en escorrentiu superficial. És a partir d'aquest concepte que sorgeixen els models de simulació hidrològica anomenats precipitació-escorrentiu, que es treballen en aquest projecte.

El grau de resposta que presenta un sistema hidrològic en rebre una pluja ve donat pels paràmetres hidromorfomètrics, el temps de concentració i el llindar d'escorrentiu.

Paràmetres hidromorfomètrics: engloba el conjunt de característiques geomètriques bàsiques d'una conca:

- Àrea(S): normalment expressada en km².
- Longitud de la llera (L): expressada en km.
- Pendent mitjà de la llera (j): expressada en tant per u (m/m) i que generalment es calcula a través de la fórmula següent:

$$j = \frac{\cot a_2 - \cot a_1}{L} \quad (2.2)$$

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. A efectes pràctics es considera com el temps que triga una gota de pluja neta caiguda a l'extrem superior del curs principal a sortir pel punt de desguàs, per la qual cosa es calcularà en base a la longitud (L) i al pendent (j).

S'han proposat diverses fórmules empíriques per al càlcul del T_c . Donada la base empírica de les fórmules, la seva validesa depèn de la semblança de la conca que es vol estudiar amb les conques utilitzades per a la seva deducció.

- A Catalunya:

Les fórmules proposades per J.R. Témez proporcionen resultats satisfactoris. Les seves expressions inclouen un coeficient que distingeix les conques urbanes de les no urbanes i, alhora, les no urbanes en rurals i urbanitzades, de la següent manera:

- Conques rurals: Aquelles que presenten un grau d'urbanització inferior al 4% de l'àrea de la conca.

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

- Conques urbanitzades: Presenten un grau d'urbanització superior al 4% de l'àrea de la conca, amb urbanitzacions independents que no consten un clavegueram de pluvials unificat o complet i el curs principal no està revestit amb material impermeable i de petita rugositat, com per exemple formigó.

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

- Conques urbanes: Amb un grau d'urbanització superior al 4% de la conca, amb clavegueram complet i/o curs principal canalitzat, impermeable i de petita rugositat.

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

On,

T_c és el temps de concentració en hores

L és la longitud del curs principal en km

j és el pendent mitjà en tant per u (m/m)

μ és el grau d'urbanització de la conca en tant per u (km^2/km^2)

- A Guatemala:

Es fa servir la fórmula de Califòrnia, també anomenada equació de Kirpich:

$$T_c = \frac{3L^{1,15}}{154H^{0,38}} \quad (2.6)$$

On,

T_c és el temps de concentració en hores.

L és la longitud del curs principal en m.

H és el desnivell del tram considerat en m.

Cal anar amb compte amb la definició de temps de concentració en l'àmbit anglosaxó. Es considera com el temps que transcorre entre la finalització de la precipitació neta i el punt d'inflexió de l'hidrograma. Segons aquesta definició, doncs, el temps de concentració és el temps que triga l'escorrentiu directe en anar des del punt més allunyat directament de la conca fins al punt de desguàs. La fórmula de Kirpich, es basa en aquest concepte, fet que caldrà tenir en compte a l'hora de realitzar els càlculs.

Llindar d'escorrentiu (P_0) és el valor de precipitació a partir del qual es genera escorrentiu superficial. Per a volums inferiors de precipitació tota la pluja es perd per intercepció, emmagatzematge, infiltració o evapotranspiració. El llindar d'escorrentiu és el valor a partir del qual es determinarà la pluja neta en un sistema hidrològic.

El mètode de càlcul més utilitzat per determinar el llindar d'escorrentiu és el desenvolupat pel Soil Conservation Service (SCS), que calcula la pluja neta mitjançant l'expressió:

$$\sum E = 0 \quad \text{si } \Sigma P \leq P_0 \quad (2.7)$$

$$\sum E = \frac{(\Sigma P - P_0)^2}{\Sigma P + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } \Sigma P > P_0 \quad (2.8)$$

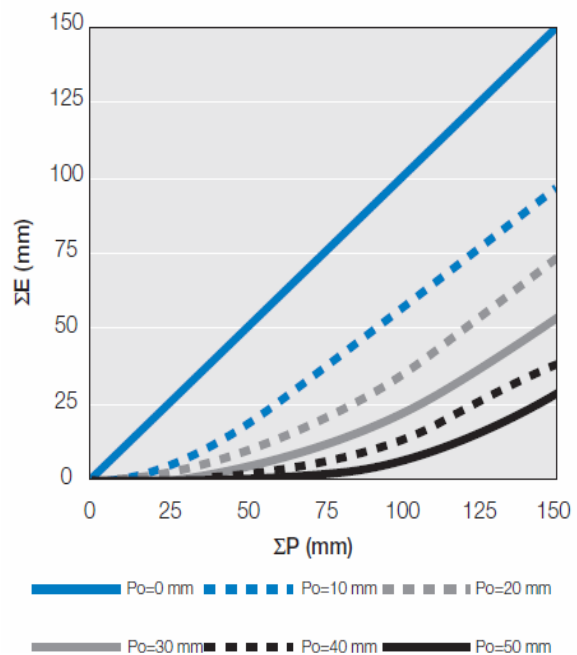


Figura 2.2. Corbes de transformació Precipitació-Pluja resultants del model de l'SCS. Font: ACA 2003.

L'SCS presenta un conjunt de corbes de transformació precipitació-pluja resultants de l'aplicació del seu model (Figura 2.2).

Per estandarditzar l'aplicació d'aquest model, l'SCS va definir un paràmetre adimensional, anomenat nombre de corba NC, de manera que a cada NC li correspon un llindar d'escorrentiu determinat. Aquest valor pot variar entre 1 i 100, de tal manera que 100 correspon a una superfície totalment impermeable, és a dir, amb $P_0=0$. L'equació que determina la precipitació llindar en funció del NC és la següent.

$$P_0 = \frac{5000}{NC} - 50 \quad (2.9)$$

L'SCS va tabular els NC en funció de l'ús del sòl, el pendent, les característiques hidrològiques (grau previ d'humitat) i el grup del sòl (litologia). A l'Annex II s'expliquen els fonaments d'aquest model i es troben les taules corresponents.

De l'anàlisi dels resultats obtinguts en moltes conques, l'SCS va concloure que és convenient ampliar el llindar d'escorrentiu 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 Catalunya, l'ACA recomana agafar un factor regional d'1'3, de manera que el llindar d'escorrentiu pel càlcul de la pluja neta es calcularà com:

$$P_0' = r \cdot P_0 = 1,3 \cdot P_0 \quad (2.10)$$

- A Guatemala, no s'ha trobat informació disponible respecte l'aplicació de coeficients regionals per la correcció de la pluja neta estimada. S'ha preferit no aplicar cap mena de coeficient corrector, donat que aquests presenten força variabilitat en funció del indret on s'hagin estimat.

2.1.3 Precipitació

La precipitació és el procés més important en la modelització de conques, ja que representa l'input del sistema hidrològic. L'escorrentiu superficial és conseqüència directa de la precipitació.

Distribució temporal i espacial

LLuny de constituir un procés uniforme, la precipitació es distribueix en l'espai i en el temps. L'estructura temporal de la precipitació es representa a través de l'hietograma, un gràfic en el qual s'indica el volum de pluja que entra al sistema al llarg del temps (Figura 2.3). La precipitació s'acostuma a expressar en mm (litres/m²). Normalment es tracta d'un diagrama de columnes, que representa una pluja amb una durada determinada. La suma de la precipitació de les diferents columnes ens proporciona el valor total de la precipitació.

La precipitació caiguda en un dia s'anomena P_d , i és la dada que presenta major disponibilitat, ja que és la que es registra en la gran majoria d'estacions pluviomètriques. Per això, la P_d serà la dada de partida en els estudis d'inundabilitat.

La distribució espacial es calcula a partir de mapes d'isomàximes o mitjançant el càlcul de precipitacions màximes per període de retorn a partir de registres d'estacions meteorològiques. Els mapes d'isomàximes, es representen mitjançant corbes on el valor de la precipitació màxima és el mateix (isohietes), per a una durada i període de retorn determinats. La distribució espacial de la precipitació als models precipitació-escorrentiu es representa subdividint la superfície de la conca, de manera que a cada regió li correspondrà un hietograma diferent.

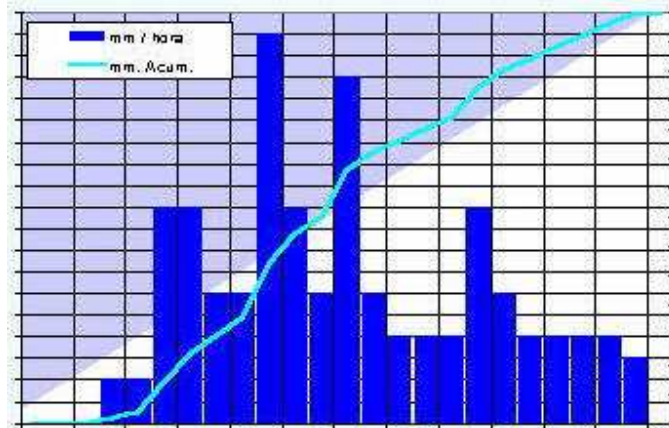


Figura 2.3. Exemple d'hietograma on es representa els mil·límetres de pluja per hora en blocs i els mil·límetres de pluja precipitats respecte el total en una corba.

Font: <http://www.evarsa.com.ar/>

Intensitat de precipitació

Es defineix com el volum de pluja precipitada per unitat de temps. S'acostuma a considerar la intensitat de precipitació mitjana, que es calcula segons:

$$I = \frac{P}{D} \quad (2.11)$$

On

I és la intensitat de la precipitació P, expressada en mm/h.

P és el volum de precipitació, en mm, caigut durant el interval de temps D per al qual es vol calcular la intensitat.

D és la durada del 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.

Quan es parla de intensitat de precipitació mitjana, es diferencia:

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

$$I_d = \frac{P_d}{24} \quad (2.12)$$

Pluja de Projecte

Les pluges presenten caràcter estocàstic i, per tant, es tracten com una variable aleatòria. Una precipitació diària associada a un període de retorn determinat “ $(P_d)_T$ ”, es defineix com aquella que té una probabilitat de ser superada segons:

$$P(P_d \geq (P_d)_T) = \frac{1}{T} \quad (2.13)$$

La única manera d'obtenir informació de les pluges que poden caure en una determinada conca és l'anàlisi de tempestes que ja s'hagin produït amb anterioritat a la zona. Malauradament, la informació registrada és escassa. Es disposen de sèries de dades de pocs anys en comparació amb els períodes de retorn habituals i, a més, la fiabilitat dels registres és limitada, especialment en grans tempestes. És per aquest motiu que cal ser molt curós amb el tractament estadístic de les sèries de pluges històriques i sempre és convenient contextualitzar els estudis segons les propietats de la regió que s'estudia, tenint en compte factors com la orografia i complementant els resultats obtinguts amb estudis meteorològics existents.

Hi ha dues maneres de definir l'hietograma d'una pluja:

- Conèixer el volum total de precipitació i desenvolupar l'hietograma a partir d'aquest volum.
- Obtenir registres reals de pluviogrames que puguin considerar-se prou significatius. Aquesta opció, però, es pot realitzar poques vegades degut a la escassa disponibilitat d'aquestes dades.

Càlcul de la P_d

Ja són moltes les institucions governamentals que han publicat mapes d'isomàximes de precipitació diària per diferents períodes de retorn.

- A Catalunya: L'ACA ha publicat mapes d'isomàximes de precipitació diària per períodes de retorn de 10, 25, 50, 100, 200 i 500 anys
- A Guatemala: L'INSIVUMEH ha publicat mapes d'isomàximes de precipitació diària per períodes de retorn de 2, 10 i 30 anys.

Una vegada obtinguda la precipitació diària per la conca, caldrà reduir el seu valor aplicant el coeficient K_A , anomenat coeficient de simultaneïtat segons:

$$\begin{aligned} K_A &= 1 && \text{si } S \leq 1\text{km}^2 \\ K_A &= 1 - \frac{\log S}{15} && \text{si } S \geq 1\text{Km}^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

On

K_A és el coeficient de simultaneïtat, adimensional

S és la superfície de la conca en Km^2

La necessitat de l'aplicació d'aquest coeficient és deguda a que, per la construcció dels mapes d'isomàximes, es fan servir registres de precipitacions puntuals, corresponents a les estacions meteorològiques, que s'extrapolaran a àrees extenses. Amb aquest

coeficient es corregeix l'efecte que quan es registra una precipitació màxima, l'estació d'aforament acostuma a situar-se a prop del centre del xàfec, on la intensitat de la pluja és major. El valor de precipitació diària que caldrà utilitzar en la construcció de l'hietograma, doncs, serà:

$$P_d' = K_A \cdot P_d \quad (2.15)$$

Determinació de l'hietograma

Un cop coneguda la precipitació diària, el mètode més utilitzat en la construcció de l'hietograma es basa en les corbes d'Intensitat-Durada-Freqüència (IDF). Aquestes corbes són resultat de la unió de valors representatius de la intensitat mitjana en intervals de diferent durada i corresponents a un mateix període de retorn o freqüència. La seva obtenció es realitza a partir de pluviògrafs i la seva aplicació és de caràcter regional.

- A Catalunya: són vàlides les corbes proposades per Témez (Témez, 1978):

$$\frac{I}{I_d} = \left(\frac{I_1}{I_d}\right)^{\frac{(28^{0.1} \cdot D^{0.1})}{(28^{0.1} - 1)}} \quad (2.16)$$

On

I és la intensitat de la precipitació, en mm/h, per a una durada efectiva de la pluja de D hores i el període de retorn determinat.

I₁ és la intensitat horària, en mm/h, per al període de retorn considerat.

I_d és la intensitat mitjana diària, en mm/h, per al període de retorn considerat.

D és la durada efectiva, en hores, de la pluja de la qual es vol calcular la intensitat I.

A la zona de Catalunya es pot considerar un valor mitjà de I₁/I_d igual a 11 (MOPU, 1987). Així, es pot calcular la intensitat de la pluja per a una determinada durada D a partir de:

$$I_D = \frac{P_d'}{24} (11)^{\frac{(28^{0.1} \cdot D^{0.1})}{(28^{0.1} - 1)}} \quad (2.17)$$

- A Guatemala: L'INSIVUMEH proposa la següent fórmula per representar les corbes IDF:

$$i_T = \frac{A}{(B + t)^n} \quad (2.18)$$

On

I_T és la intensitat de pluja en mm/h associada al període de retorn T

t és la duració de la precipitació en minuts

A, B i n són paràmetres de calibratge obtinguts a través de regressions no lineals.

Aquests paràmetres de calibratge estan publicats per l'INSIVUMEH per cadascuna de les conques hidràuliques a Guatemala (Taula 2.1). Els paràmetres corresponents a la conca d'Atitlán, s'han estimat en base als registres de 64 tempestes al llarg de 9 anys a l'estació "Santiago Atitlán", per a diferents períodes de retorn (Tr) i amb els corresponents coeficients de correlació.

Taula 2.1. Paràmetres de calibratge de les corbes IDF a la conca de l'Atitlán.

Font: INSIVUMEH

Santiago Atitlán								
Tr	2	5	10	20	25	30	50	100
A	1,28	1,001	1,19	1,16	1,02	1,015	1,01	1,008
B	13	12	5	5	4	4	4	4
n	0,812	0,705	0,72	0,705	0,677	0,674	0,671	0,668
R ²	0,993	0,986	0,991	0,988	0,987	0,987	0,986	0,986

Un cop conegudes la P_d' i la corba IDF corresponent, el càlcul de l'hietograma s'acostuma a realitzar a partir del mètode dels blocs alterns. Un mètode senzill que parteix d'una precipitació amb una durada efectiva de 24 hores, dividida en intervals de temps, la durada dels quals depèn de les característiques de la conca. D'aquesta manera, partint de la P_d' , es podran calcular les intensitats de pluja per a cadascun dels intervals de temps mitjançant la corba IDF corresponent.

A continuació es pot generar un pluviograma de precipitació, amb la suma de precipitació de cadascuna de les intensitats calculades:

$$\sum P_{n \cdot \Delta t} = n \cdot \Delta t \cdot I_{n \cdot \Delta t} \quad \text{on } n \in [2, 24] \quad (2.19)$$

On,

$\sum P_{n \cdot \Delta t}$ és la suma de precipitació per un interval de temps determinat.

n és el nombre d'intervals de temps que es consideren.

Δt és la longitud del interval de temps.

$I_{n \cdot \Delta t}$ és la intensitat que correspon a les intensitats calculades per a cada interval.

Mitjançant la metodologia de l'SCS, s'obté la precipitació neta, per a cadascun dels intervals, generant els blocs de pluja neta.

Finalment, l'hietograma es construeix col·locant el bloc $E'_{1 \cdot \Delta t}$ en el punt mitjà de la durada efectiva, el bloc $E'_{2 \cdot \Delta t}$ al interval anterior, el següent al posterior i així successivament. Es pot trobar un exemple del càlcul, que facilita la comprensió general dels càlculs, en l'annex I.

2.1.4 Cabal d'avinguda

El cabal d'avinguda és el cabal pic per a una avinguda associada a un període de retorn determinat. Serà el valor que es farà servir per determinar l'alçada màxima de la làmina d'aigua durant l'episodi d'inundació.

Període de retorn

Degut al seu caràcter estocàstic, es considera una variable aleatòria, on s'entenen els cabals d'avinguda com a màxims anuals. La magnitud d'una avinguda es mesura comparant el seu pic de cabal amb determinats cabals de referència, generalment associats a períodes de retorn "T".

Un cabal associat a un període de retorn determinat " Q_T ", es defineix com el cabal que té una probabilitat de ser superat pel cabal màxim anual "Q" segons:

$$P(Q \geq Q_T) = \frac{1}{T} \quad (2.20)$$

Mentre que la probabilitat de superar aquest cabal en un període d'anys T és:

$$P(Q \geq Q_T) = 1 - \left(1 - \frac{T}{1}\right) \quad (2.21)$$

És interessant observar que, partint d'un cabal de referència determinat com Q_{500} , la probabilitat de que es produeixi una avinguda que el superi en un període de 5 anys és de l'1%, en 50 anys del 10%, en 100 anys del 18% i en 500 anys del 63%, no pas del 100% com a primera vista es podria esperar.

Hidrograma

La distribució temporal del cabal d'avinguda al punt de desguàs d'un sistema hidrològic es representa a través dels hidrogrames, on s'indica el cabal que surt de la conca al llarg del temps, expressant el cabal en m^3/s i el temps en hores.

En molts casos, degut a la fiabilitat limitada dels registres històrics, només es podrà determinar el valor del cabal punta, ja que si es vol estimar l'hidrograma d'avinguda, és necessària la correlació amb hidrogrames històrics representatius.

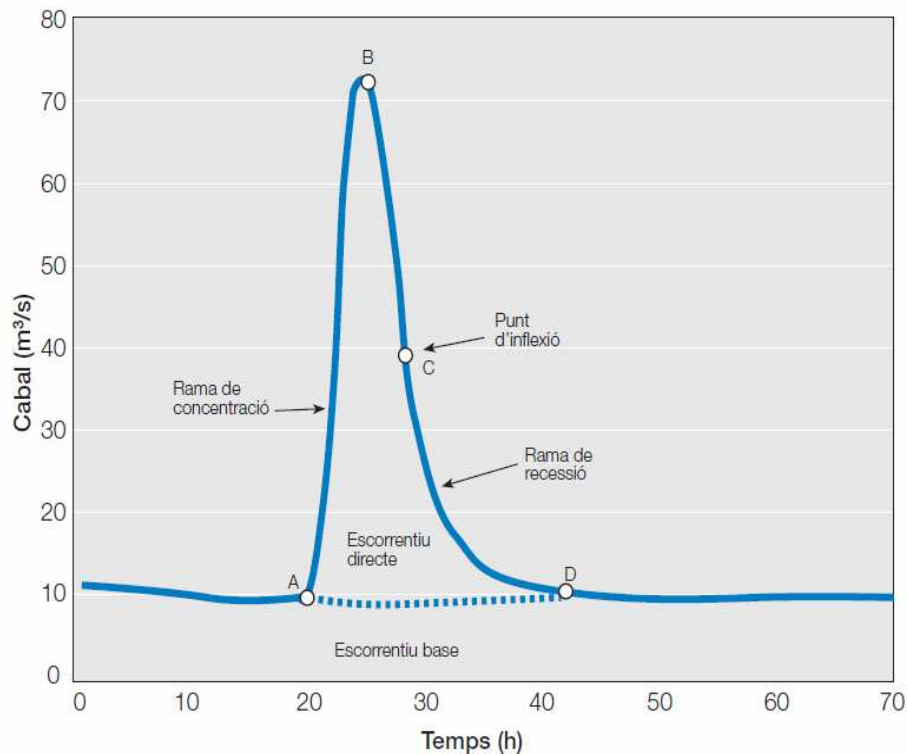


Figura 2.4. Exemple d'hidrograma corresponent a una avinguda d'inundació.

Un hidrograma consta de quatre punts d'interès (Figura 2.4):

- A: Punt d'aixecament: Moment en què l'aigua procedent de la pluja comença a arribar al punt de desguàs. En funció de les característiques de la conca i la precipitació es pot donar immediatament quan comença la pluja, durant aquesta o posteriorment.
- B: Punt de cabal pic: Correspon a l'instant en què es produeix el cabal màxim d'escorrentiu superficial.
- C: Punt d'inflexió: Correspon al punt en què tot l'escorrentiu ha arribat a lleres ben definides. A partir d'aquest moment, tota l'aigua discorre com a escorrentiu superficial dins les lleres o com a flux subsuperficial o subterrani.
- D: Fi de l'escorrentiu directe: A partir d'aquest moment tot l'escorrentiu prové del flux subterrani i subsuperficial.

Dins de la branca d'escorrentiu directe es poden distingir, a més:

- 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).
- Branca de recessió: És la secció que va des del punt d'inflexió (C) fins a la fi de l'escorrentiu directe (D).

2.1.5 Estimació de la velocitat de l'avinguda

La velocitat del flux a una secció determinada del riu depèn de factors morfològics com el pendent, la rugositat, i la forma del canal o radi hidràulic, que determina la superfície de fricció de la secció amb el fluid.

La fórmula empírica més utilitzada per al càlcul de la velocitat és l'equació de Manning:

$$V = \left(\frac{1}{n}\right)R^{2/3}S^{1/2} \quad (2.22)$$

on,

V és la velocitat del flux, en m/s.

R és el radi hidràulic, en m.

S és el pendent del canal.

n és el coeficient de fricció de Manning.

El paràmetre S no correspon estrictament al pendent del canal, sinó al gradient hidràulic, és a dir, el pendent del nivell de l'aigua entre els dos punt considerats. Habitualment però, s'utilitza el pendent del terreny per simplificat i perquè és molt similar.

Els valors del coeficient de Manning per conques naturals acostumen a oscil·lar entre 0.024 i 0.079 (PONCE, 1989). S'han determinat els valors del coeficient de Manning en funció de la descripció de la morfologia de la llera(Annex III).

Per la determinació del radi hidràulic es calcula la relació entre l'àrea mullada de la secció i el perímetre mullat. Segons la geometria de la secció, hi ha diferents fórmules per al seu càlcul (Annex III).

2.2. Models de transformació pluja-escorrentiu

2.2.1 Conceptes

Els models de transformació precipitació-escorrentiu permeten estimar el cabal punta i l'hidrograma d'avinguda a partir de dades de precipitació i les característiques de la conca hidrogràfica. El gran avantatge, així com la major dificultat de la modelització consisteix en la coordinació de tota la informació hidrològica, pluviomètrica i de l'estat de la conca.

Aquests models permeten abordar l'estudi de conques no aforades per extrapolació de paràmetres hidrològics regionalitzats, obtinguts de l'anàlisi de conques aforades que disposen de sèries de cabals suficientment fiables.

La gran nombre de dades que s'han de coordinar i el desconeixement en la seva influència exacte en la generació d'escorrentiu, genera incerteses en els cabals fan que els resultats d'aquests mètodes es considerin aproximacions.

És per això que la calibració dels models és un pas molt convenient a realitzar sempre que sigui possible, considerant tant el registre d'avingudes històriques com els resultats del tractament estadístic de les sèries d'aforaments.

2.2.2 Tipus de model

Des d'un punt de vista general, la transformació precipitació-escorrentiu es pot dur a terme mitjançant mètodes distribuïts o agregats:

Models distribuïts

Els models distribuïts divideixen la superfície de la conca en cel·les, distribuint la precipitació entre les pèrdues per intercepció i els diferents tipus de fluxos (superficial, subsuperficial i subterrani) i la seva distribució dins la conca. Aquest tipus de model és força complex i encara s'estan desenvolupant.

Models agregats

Els models agregats consideren que la transformació pluja-escorrentiu a la conca es fa de manera unitària. Aquesta transformació es pot dur a terme amb tres metodologies:

- 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 en l'espai i el temps sobre la conca. Es fan servir per la modelització d'episodis d'inundació quan la disponibilitat de dades és molt pobre. El mètode simplificat més utilitzat és el mètode racional, que tot i que va ser deduït al segle XIX, encara es continua fent servir degut a la seva simplicitat i el bons resultats que proporciona.
- Transformació pluja-escorrentiu amb un model de circulació contínua. Es calcula en continu el balanç d'aigua en els diferents processos hidrològics. Requereixen

programes informàtics potents de simulació numèrica i un esforç considerable de calibració dels nombrosos paràmetres a modelitzar.

- Transformació pluja-escorrentiu d'un xàfec. Són models que simulen la transformació de l'hietograma de precipitació en un hidrograma d'escorrentiu superficial en el punt de sortida. Són els més utilitzats per la modelització d'episodis d'inundació vinculats a precipitació. El més conegut és el que es basa en el concepte d'hidrograma unitari, i és el que farem servir en aquest projecte. Cal tenir en compte, però, que el concepte d'hidrograma unitari és vàlid per a conques predominantment rurals, mentre que per conques urbanes s'utilitza el mètode de l'ona cinemàtica, que estudia la superfície de la conca amb molt més detall.

2.2.3 Transformació pluja escorrentiu

L'hidrograma unitari

L'hidrograma unitari es defineix com l'hidrograma d'escorrentiu directe en el punt de desguàs d'una conca generat per la pluja neta uniforme d'1cm sobre tota la conca durant un període de temps determinat, anomenat durada efectiva (Figura 2.5). A la durada total de l'hidrograma se l'anomena temps base (t_b) i es compleix que:

$$t_b = D + T_c \quad (2.23)$$

On

t_b és el temps base, és a dir, la durada de l'hidrograma d'escorrentiu directe.

D és la durada efectiva, és a dir, la durada de la pluja neta.

T_c és el temps de concentració.

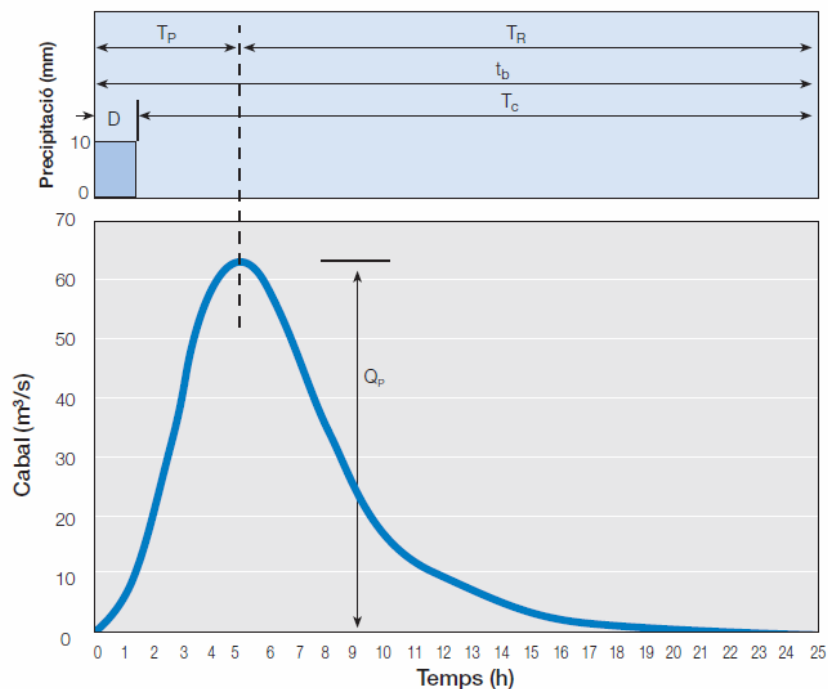


Figura 2.5. Etapes temporals d'un hidrograma.

Font: ACA, 2002.

L'aplicació de l'hidrograma unitari parteix de les següents premisses:

- La pluja neta té una intensitat constant durant un temps mínim igual a la durada efectiva D .
- La pluja neta es distribueix uniformement per tota la conca (hipòtesi que es corregirà amb el coeficient de simultaneïtat).
- Temps base constant: Per a una conca donada, el temps base serà el mateix per qualsevol precipitació que tingui una durada determinada independentment del volum total de la pluja neta.
- Linealitat: comprèn els conceptes de proporcionalitat i additivitat d'hidrogrames:
 - o Proporcionalitat: Consisteix en el fet que tots els hidrogrames d'escorrentiu amb el mateix temps base són directament proporcionals al volum de pluja neta en l'eix de les ordenades (Figura 2.6.a).
 - o Additivitat: Consisteix en el fet que es poden superposar els hidrogrames generats per diferents pluges netes. D'aquesta manera l'hidrograma resultant d'un període de pluja donat es pot superposar a hidrogrames procedents de precipitacions anteriors. L'hidrograma total s'obtindrà com la suma dels hidrogrames de cada precipitació (Figura 2.6.b).

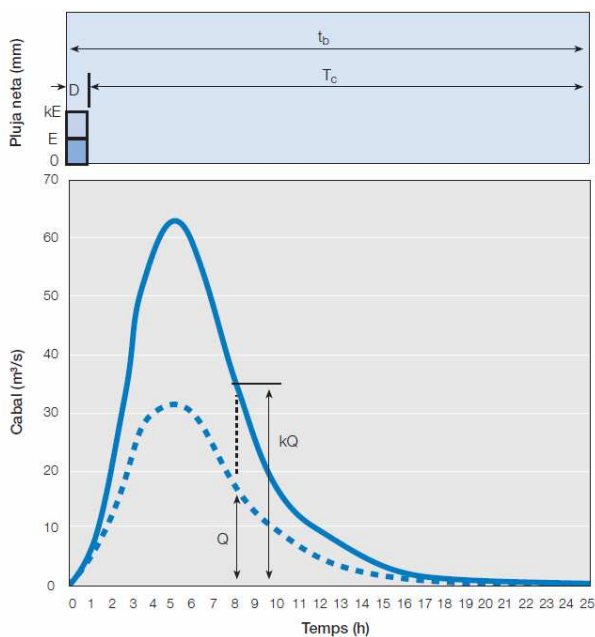


Figura 2.6.a. Hipòtesi de proporcionalitat dels hidrogrames unitaris.
Font: ACA. 2002.

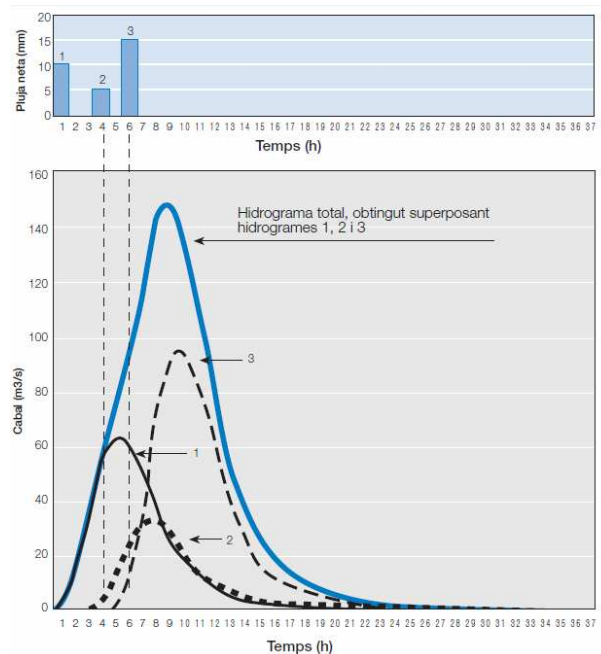


Figura 2.6.b. Superposició d'hidrogrames segons la hipòtesi de additivitat.
Font: ACA. 2002.

Les hipòtesis del temps base constant i la linealitat representen els principals factors limitants de l'aplicabilitat d'aquest mètode. A aquesta limitació s'hi afageix la poca flexibilitat en la determinació de la forma de l'hidrograma unitari, per la qual cosa la superfície màxima de la conca on es vol aplicar l'hidrograma unitari és de 50km^2 . Si la

conca que es vol estudiar presenta una superfície superior, caldrà dividir la superfície de la conca en subconques, amb una superfície inferior a l'esmentada.

En principi, per obtenir un hidrograma unitari d'una determinada conca es necessiten hidrogrames i hidrogrames reals, i els resultats només seran aplicables per al indret on es van obtenir les dades i per episodis de precipitació similars. Per trobar hidrogrames unitaris per a altres punts de la conca o per conques on no es disposa de pluviògrafs ni limnífgrafs s'han desenvolupat diversos mètodes:

- Hidrogrames unitaris sintètics: Permeten construir hidrogrames unitaris a partir d'hidrogrames tipus. Aquesta metodologia és la que s'aplica habitualment a la pràctica i és la que es farà servir a aquest projecte. Les seves limitacions principals apareixen quan el comportament hidrològic de la conca està condicionat per la presència d'embassaments, on es recomana aplicar algun dels següents models.
- Mètode de l'embassament lineal: Calcula l'hidrograma unitari generat per un flux d'aigua que passa per un embassament amb una corba de volum d'aigua emmagatzemada enfront de cabal de sortida de l'embassament de tendència lineal.
- Mètode de Nash: Calcula l'hidrograma unitari generat per una sèrie d'embassaments idèntics que tenen una corba de volum d'aigua emmagatzemada enfront de cabal de sortida de l'embassament lineal. Constitueix una extensió del mètode de l'embassament lineal.

Hidrogrames unitaris sintètics

Es tracta d'una tècnica desenvolupada per generar hidrogrames unitaris partint de les característiques hidrològiques de la conca donada la dificultat de disposar d'hidrogrames i hietogrames al punt de desguàs de cada sistema hidrològic. Al igual que algunes metodologies explicades anteriorment, es tracta d'una tècnica empírica, desenvolupada a partir de l'estudi de conques reals.

Existeixen tres tipus d'hidrogrames sintètics:

- Els que relacionen les característiques de l'hidrograma amb les característiques de la conca (Témez).
- Els que es basen en hidrogrames adimensionals (SCS).
- Els que es basen en models d'emmagatzematge de conca (Clark).

Al projecte farem servir l'hidrograma unitari sintètic de l'SCS, degut a la seva relativa simplicitat i la qualitat dels resultats que proporciona. Aquest mètode té un fort component empíric, ja que es basa en resultats d'estudis d'inundabilitat realitzats a una gran quantitat de conques rurals. Es tracta del mètode el més utilitzat arreu del món a l'hora de realitzar estudis d'inundabilitat, proporcionant resultats correctes per a un ampli ventall de conques.

Hidrograma adimensional de l'SCS

Es tracta d'un hidrograma adimensional basat en l'estudi del comportament de nombroses conques petites, predominantment rurals, dels Estats Units. A l'hidrograma adimensional s'expressa la relació del cabal respecte el cabal punta enfront la relació entre el temps i el temps pic (Figura 2.7). Aquest hidrograma adimensional es farà servir per la construcció d'hidrogrames unitaris un cop coneguts el cabal punta i el temps pic.

En base a dades empíriques, l'SCS va construir un hidrograma triangular, a partir del qual va determinar que el temps de recessió (T_R), transcorregut entre el cabal pic i el final de l'hidrograma, és equivalent a $1,67 \cdot T_P$ per a un gran nombre de conques. Com que l'àrea sota l'hidrograma unitari ha de ser igual a un escorrentiu d'1cm en el qual el volum de la pluja neta és igual que el volum d'escorrentiu:

$$0,01 \cdot S = \frac{1}{2} \cdot Q_P \cdot (2,67 \cdot T_P) \quad (2.24)$$

On

S és la superfície de la conca en m^2

Q_P és el cabal punta en m^3/s

T_P és el temps de pic, expressat en segons

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	0,450
1,8	0,340
1,9	0,240
2,0	0,160
2,2	0,077
2,4	0,041
2,6	0,022
2,8	0,012
3,0	0,006
3,2	0,003
3,4	0,002
3,6	0,001
3,8	0,001
4,0	0,000
4,5	0,000
5,0	0,000

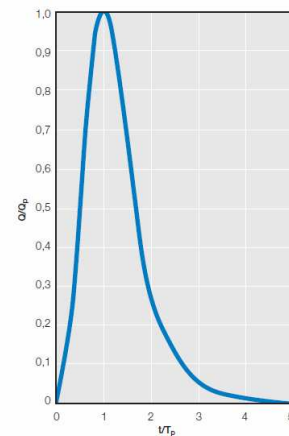


Figura 2.7. Hidrograma adimensional de l'SCS.

Font: ACA, 2002.

Canviant les unitats al sistema internacional, s'obté l'expressió següent:

$$Q_P = \frac{2,08 \cdot S}{T_P} \quad (2.25)$$

On la superfície s'expressa en km^2 , el cabal en m^3/s i el temps en hores.

De l'hidrograma triangular també s'extreu que:

$$T_P = \frac{D}{2} + t_{gp} \quad (2.26)$$

On

T_P és el temps que triga a arribar el cabal punta

D és la durada efectiva

T_{gp} és el temps de retard, també anomenat T_{lag}

L'SCS, a partir de càlculs experimentals va induir que generalment es compleix la relació:

$$t_{gp} \approx 0,6 T_c \quad (2.27)$$

Aquesta fórmula, però, considera el temps de concentració (T_c) segons la definició anglosaxona, per la qual cosa, si volem fer servir les fórmules de Témez (Equacions 2.3, 2.4 i 2.5), haurem de fer servir les següents expressions, calibrades pel CEDEX:

$$t_{gp} \approx 0,31 \cdot T_c \quad (2.28)$$

$$T_p = \frac{D}{2} + 0,31 \cdot T_c \quad (2.29)$$

Per a una modelització adequada del pic de l'hidrograma cal que es compleixi:

$$D \leq 0,29 t_{gp} \quad (2.30)$$

Aquesta durada efectiva D és l'interval de discretització de l'hidrograma de pluja neta, és a dir, l'interval de temps que correspon a cada del hidrograma.

L'hidrograma unitari s'obté multiplicant l'hidrograma adimensional de l'SCS pel temps pic en l'eix de les abscisses i pel cabal punta en l'eix de les ordenades. Tot seguit, es calcula l'hidrograma que correspon a cadascuna de les columnes de l'hidrograma i s'adjunten segons les propietats de linealitat i proporcionalitat. A l'annex X es mostra un exemple del càlcul de l'hidrograma.

2.3 Mètodes de propagació d'avingudes

2.3.1 Conceptes

Quan es modelitza un sistema fluvial dividint la superfície en subconques, esdevé necessari propagar l'hidrograma d'avinguda generat a cada subconca, riu avall. Els efectes d'emmagatzematge i resistència al pas del flux que presenta la llera canvien la distribució temporal de l'hidrograma que es vol propagar. És molt important, per calibrar correctament els paràmetres de les equacions que es fan servir en aquests mètodes, disposar de registres reals de cabals màxims, temps de pic i hidrogrames per determinats volums de precipitació.

Conceptualment, hi ha dues maneres de propagar un hidrograma:

- Propagació agregada o hidrològica. Parteixen de l'equació de continuïtat (2.31). Són els models que es faran servir al projecte.

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (2.32)$$

On,

S és la funció d'emmagatzematge d'aigua en el volum de control considerat, expressada en m^3 .

$I(t)$ és l'hidrograma d'entrada en el volum de control, expressat en m^3/s

$O(t)$ és l'hidrograma de sortida en el volum de control, expressat en m^3/s

- Propagació distribuïda o hidràulica. En aquest tipus de distribució es fan servir les equacions de Saint Venant, per flux variable gradualment variat.

2.3.2 Models de propagació

Els models de propagació agregada són el model de Puls modificat, Muskingum i Muskingum-Cunge.

-Model de Puls modificat: Calcula el transit de l'avinguda com si el tram de riu fos un embassament, on es genera un cert emmagatzematge i surt un cabal determinat. A partir de l'hidrograma d'entrada, s'obté l'hidrograma de sortida basat en la relació entre emmagatzematge i cabal de sortida.

-Muskingum: Divideix l'emmagatzematge en un tram de riu en dues parts: 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 entre aquest emmagatzematge i el real (Figura 2.8).

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

$$S = \text{Emmagatzematge prismàtic} + \text{Emmagatzematge en cuny} \quad (2.33)$$

$$S = K \cdot O + K \cdot X \cdot (I - O) \quad (2.34)$$

De manera que s'obté la següent equació:

$$S = K \cdot (X \cdot I + (1 - X) \cdot O) \quad (2.35)$$

On,

S és el volum d'aigua total al tram de riu considerat en m³.

O és el cabal que surt del tram de riu considerat, en m³/s.

I és el cabal que entra en el tram de riu considerat, en m³/s.

K és el coeficient de proporcionalitat, que representa el temps de viatge d'una ona d'avinguda en el tram de riu considerat, expressat en s.

X és el factor de ponderació adimensional. El seu valor es comprèn entre 0 i 0.5.

La combinació de les equacions 2.33 i 2.34 genera la l'equació de propagació segons el mètode de Muskingum (Equació 2.35), en la qual s'hauran d'ajustar els paràmetres K i X amb registres històrics per calibrar el model.

-Muskingum-Cunge: És una tècnica de propagació basada en el mètode de Muskingum, però que genera l'hidrograma en funció de paràmetres físics de la conca com la difusivitat hidràulica, la velocitat de l'ona d'avinguda i la distància al llarg de la llera, entre altres.

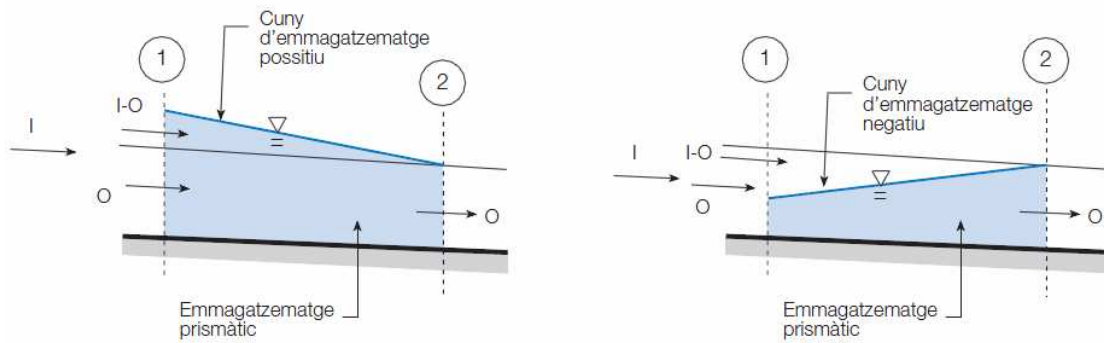


Figura 2.8. Concepte d'emmagatzematge prismàtic i en cuny segons el mètode de Muskingum. I i O són els cabals d'entrada i sortida, respectivament, en m^3/s .
Font: ACA, 2003.

Temps de retard

En el cas que sigui impossible determinar els paràmetres necessaris per fer servir aquests mètodes, es pot estimar el temps de propagació de l'avinguda a partir del hidrograma unitari de l'SCS, mitjançant el temps de retard (T_{lag}). La propagació estimada a través del T_{lag} únicament representa la translació de les avingudes, no inclou fenòmens de difusió o atenuació del pic. El T_{lag} indica, en minuts, el temps que transcorre entre l'entrada i la sortida del cabal pic (Equacions 2.28 i 2.29).

2.4 Metodologia

A continuació s'exposarà el procediment que es seguirà en l'elaboració dels estudis hidrològics, exposant les dades i els paràmetres que s'han fet servir en cada cas:

1- Preparació del model: Consisteix en la construcció del model hidrològic de la conca, dividint-la en subconques i establint la connectivitat dels trams de riu per poder introduir-la a l'HEC-HMS. Les dades de partida són el MDT i un arxiu en format *shape* del traçat del riu (Annex IV).

2- Estimació de la precipitació: Determinació del volum de precipitació inicial per a l'episodi que es vol modelar. En el cas de la Riera de Santa Coloma es parteix del mapes d'isomàximes proporcionats per l'ACA, per períodes de retorn de 50, 100 i 500 anys. A partir d'aquesta cartografia s'extraurà la precipitació corresponent a cada subconca mitjançant el programa Arcmap. Finalment, a cada subconca s'aplicarà el coeficient de simultaneïtat (Equació 2.14).

En el cas de Guatemala, com s'estudien els episodis concrets de l'Stan i l'Agatha, es faran servir els registres de precipitació diària proporcionats per l'INSIVUMEH, també corregits amb el coeficient de simultaneïtat.

3- Determinació de la pluja neta: A partir de la precipitació inicial, s'estima quina part d'aquesta acabarà generant escorrentiu i quina es perdrà en processos intermedis (evaporació, infiltració, intercepció, etc.). Aquest pas s'ha dut a terme amb la metodologia del nombre de corba de l'SCS (Annex II). Aquest mètode determina la precipitació neta en base a les següents característiques de cada subconca:

- Geologia: S'ha fet servir el mapa geològic de l'ICC (1:50.000, fulls 333 i 365) i s'ha classificat la geologia en els grups establerts pel SCS, mitjançant les taules publicades (Annex II). A Guatemala s'ha fet servir el mapa geològic del departament de Sololá (1:50.000), fent servir les mateixes taules per classificar la litologia.
- Usos del sòl: Partint del mapa d'usos del sòl de l'ICC (1:25.000), s'han classificat els usos del sòl segons el criteri establert pel SCS, mitjançant les taules publicades (Annex X). A Guatemala s'ha fet servir el mapa d'usos del sòl del departament de Sololá (1:50.000), fent servir les mateixes taules.
- Pendent: S'ha establert a partir de l'MDT amb pas de malla 15x15 proporcionat per l'ICC. A Guatemala s'ha fet servir el MDT amb pas de malla de 20x20.

Per al càlcul del nombre de corba, s'ha suposat en ambdós casos unes condicions anteriors d'humitat del sòl elevades, en base al criteri establert per l'SCS (Annex II).

A partir del nombre de corba s'estableix la precipitació llindar (2.9). En el cas de Catalunya, s'ha aplicat un coeficient regional d'1.3 (ACA, 2003) a la precipitació llindar obtinguda per aquest mètode. A Guatemala, per manca d'informació no s'ha aplicat cap mena de coeficient i s'ha fet servir directament el resultat obtingut per mètode de l'SCS.

4- Construcció de l'hietograma: L'hietograma es determina a partir de les corbes IDF, en el cas de la Riera de Santa Coloma, es fa servir la fórmula proposada per l'ACA (Equació 2.17) i en el cas de Guatemala la fórmula proposada per l'INSIVUMEH (Equació 2.18).

A partir dels resultats obtinguts amb les corbes IDF, i seguint la metodologia dels blocs alterns, es construeix l'hidrograma (Annex I). D'aquesta manera s'obté un hietograma per cada subconca, aconseguint representar dins del model la variació temporal i espacial en la distribució de la precipitació.

5- Càlcul de l'hidrograma: L'hidrograma es determina mitjançant el programa HEC-HMS. En el qual s'introdueix el model de la conca generat en el pas 1, i els valors de precipitació de cadascuna de les columnes de l'hietograma calculat per cada subconca en el pas 6. A partir d'aquestes dades el model calcularà un hidrograma de sortida per cadascuna de les subconques.

6- Propagació d'avingudes: Per calcular l'hidrograma generat al final de la conca, s'han de sobreposar els hidrogrames generats a cadascuna de les subconques, però abans s'ha de calcular l'efecte de propagació dels hidrogrames que, havent estat generats a una subconca s'han de traslladar, aigües avall, a través del canal principal d'altres subconques.

En el cas de la Riera de Santa Coloma, com es disposa de dades per calibrar el cabal màxim a diversos punts de la conca, per cada període de retorn (ACA, 2001), s'ha fet servir el mètode de Muskingum (Apartat 2.3.2). Per calibrar el cabal pic, s'ha d'ajustar el paràmetre K (Equació 2.35), ja que el paràmetre X correspon a l'amplitud de la branca d'esgotament de l'hidrograma i no afectarà a la determinació del cabal pic ni del temps que aquest triga a assolir-se. D'aquesta manera s'ha calibrat el paràmetre K mitjançant el mètode prova-error fins que el cabal màxim obtingut s'ha ajustat amb les dades de referència. Això permetrà que el model generat esdevingui predictiu, amb una precisió suficient, per a fenòmens d'inundació de magnitud similar, si varien característiques de la conca com la superfície urbanitzada.

Al cas de Guatemala, la manca de dades de cabals associats als episodis que es volen modelitzar, ha provocat que s'adopti un altre mètode per estimar la propagació de l'avinguda, el mètode del temps de retard (Apartat 2.3.2). Aquest mètode calcula la translació del temps pic en funció a les característiques de la conca que determinen el temps de concentració (pendent i longitud del tram), però no pot estimar l'atenuació del pic durant el trànsit de l'avinguda.

7- Càlcul dels nivells d'aigua: Per determinar els nivells d'aigua a Guatemala s'ha fet servir el programa HEC-RAS, en el qual es modelitzen les lleres del riu, extrems del MDT, com si es tractés d'un canal artificial. Per estimar la velocitat de l'avinguda i, per tant, el nivell màxim que assoleix l'aigua, es fa servir l'equació de Manning. Davant la dificultat d'atorgar un valor correcte al coeficient de Manning "n", s'ha fet servir un rang que comprèn els valors típics de les lleres naturals amb característiques similars (0.04-0.07).

Mitjançant aquests procediments s'ha dut a terme la construcció dels models hidrogràfics de cadascuna de les conques estudiades. En els casos concrets de l'estudi de la urbanització de la conca de la Riera de Santa Coloma, els paràmetres utilitzats s'indiquen al propi estudi.

3. RESULTATS I DISCUSSIÓ

3.1 Estudi de la Riera de Santa Coloma

3.1.1 Descripció de la conca

Ubicació

La Riera de Santa Coloma es situa a la depressió de la Selva, dins la província de Girona, al NE de Catalunya (Figura 3.1). Forma part del sistema fluvial del riu Tordera, del qual en constitueix l'afluent més important. El tram objecte d'estudi de la Riera comprèn des del seu naixement, al massís de les Guilleries, fins al municipi de Riudarenes, abans de rebre l'aport de la riera de Sils. El llit de la riera és de natura sorrenca, inestable i molt variable morfològicament a causa de les constants avingudes periòdiques a les que es veu sotmès (MAS PLA, 1985).

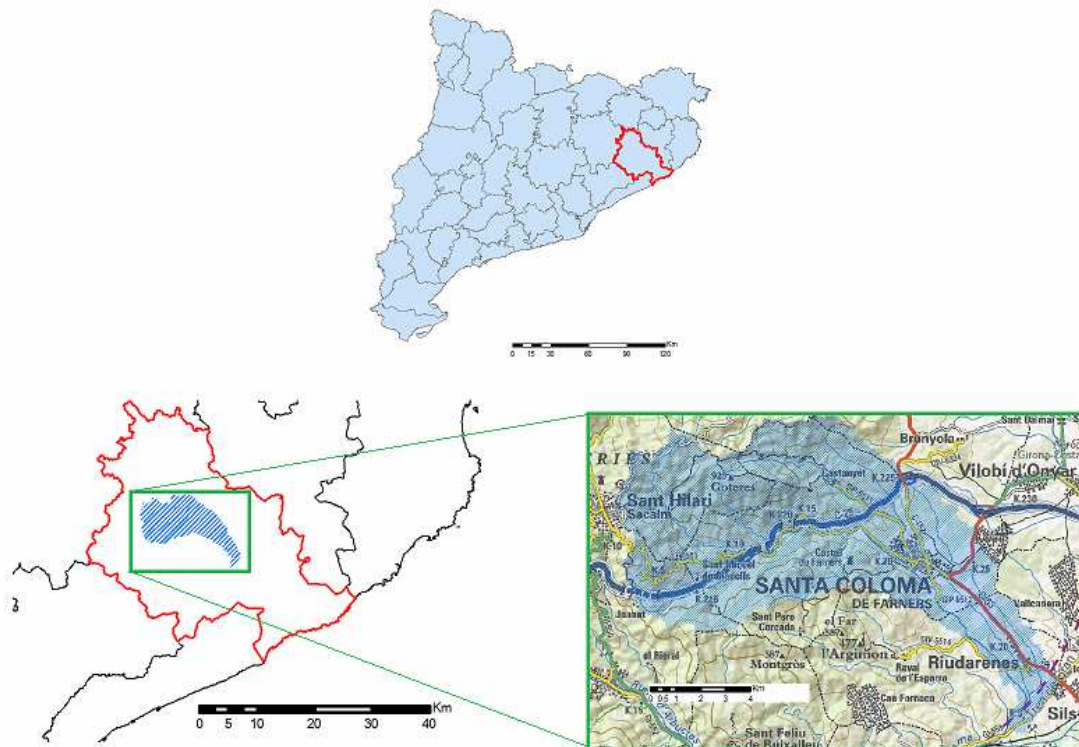


Figura 3.1. Ubicació de la Riera de Santa Coloma.

Font. Elaboració pròpia.

Característiques físiques de la conca

La zona d'estudi de la Riera de Santa Coloma ocupa 100.54km². El tram més llarg considerat recorre 23.13km, amb un desnivell de 356m. El punt més elevat, al massís de les Guilleries, assoleix els 431m, mentre que el punt de sortida del tram estudiat es situa a 75m sobre el nivell del mar. La llera del riu presenta un pendent mitjà del 1.53% mentre que el pendent mitjà de la superfície de la conca és de 27.09%.

A la riera aflora un ampli dipòsit al·luvial quaternari que dona lloc a un important aqüífer. També hi ha presència de materials del neogen, constituïts per llims argilosos, sorres arcòsiques, graves i capes de conglomerats amb petits continguts d'argil·les, en forma de lleties, envoltades de terrenys més aviat argil·losos i amb menor permeabilitat (MAPA GEOLOGIC 1:50.000, ICC).

En quant a la pluviometria, a la conca de la Tordera es donen dos tipus de fenòmens locals que donen lloc a precipitacions intenses. Aquests poden tenir focus a Sant Celoni o a Santa Coloma de Farners (ACA, 2003). Les dades que es faran servir per a l'estudi de la zona seran els registres de les pluges amb focus a Santa Coloma, donat que generaran un major volum de precipitació a la zona d'estudi.

Característiques socioeconòmiques

La conca del riu Tordera es caracteritza per gaudir d'una important proporció de superfície forestal, amb predomini de boscos d'esclerofil·les (Taula 3.1). L'activitat agrícola és especialment important a la comarca de la Selva, on es situa la Riera de Santa Coloma, duplicant la superfície dedicada al conreu respecte a les altres comarques que contenen part de la conca del Riu Tordera, el Vallès Oriental i el Maresme (ACA, 2003). Aquest increment de la superfície agrícola va en detriment de la superfície urbanitzada que només representa el 0.5% de la superfície de la comarca, mentre que al Vallès Oriental i al Maresme suposen el 16.3% i el 23.3% respectivament (Taula 3.2). La mineria és una activitat important, especialment les extraccions d'àrids, al llarg de tot el riu Tordera i a la part baixa de la Riera de Santa Coloma, fora dels límits de la zona que s'estudiarà.

Demogràficament, la comarca de la Selva, presenta un creixement de la població força suau en relació amb les comarques veïnes. En conseqüència, el POUM preveu un creixement urbanístic moderat.

En quant al tram de la Riera de Santa Coloma objecte d'estudi, es tracta d'una zona principalment forestal, tot i que a la meitat oriental es dona un increment de la superfície urbanitzada i destinada al conreu tant de secà com de regadiu. (Figura 3.4.a).

El registre històric d'inundacions a la Riera de Santa Coloma és molt escàs i es limita a alguna referència puntual als trams més baixos. Els darrers anys, les crescudes han produït inundacions locals de camps de conreu i plantacions de pollancre als municipis de Sils, Riudarenes i Vidrieres. No obstant, la modificació dels paràmetres hidrològics de la conca, com els produïts per la desforestació, o el increment de la superfície urbanitzada pot generar efectes més greus aigües avall, a la part baixa del riu Tordera.

Taula 3.1. Percentatges d'ús del sòl a la zona d'estudi de la Riera de Santa Coloma.
Font: Elaboració pròpia.

Ús del sòl	% superfície
Zona impermeable	4.78
Cereals d'hivern	7.42
Rotació de conreus densos	2.26
Plantació forestal pobre	1.27
Plantació forestal mitjana	0.77
Massa forestal mitjana	9.71
Massa forestal densa	72.31
Guaret	1.48

Taula 3.2. Hectàrees corresponent a cada tipus d'ocupació del territori a les comarques de la Selva, el Maresme i el vallès Oriental.
Font: ACA, 2003.

(Ha)	Superfície forestal	Superfície agrícola	Superfície urbanitzada	Rius i llacs	Total
La Selva	78162	20690	518	500	99870
Vallès Oriental	57630	13244	13894	422	85190
Maresme	20847	9398	9250	205	39700

3.1.2 Preparació del model

Per a la generació del model precipitació-escorrentiu de la conca de la Riera de Santa Coloma, s'ha fet servir el software que proporciona l'Hydrologic Engineering Center de l'US Army. L'HEC-GeoHMS és un complement de la plataforma de cartografia digital Arcgis que permet generar un model hidrològic a partir de la cartografia de la zona d'estudi. Així, partint del Model d'Elevacions del Terreny i el perfil del riu, aquest software ens permet determinar les subconques en què es divideix la zona d'estudi així com el tram de riu que resulta significatiu per a la determinació del cabal punta. El procediment s'explica en detall a l'Annex IV. D'aquesta manera, s'ha obtingut el model hidrològic de la Riera (Figura 3.2):

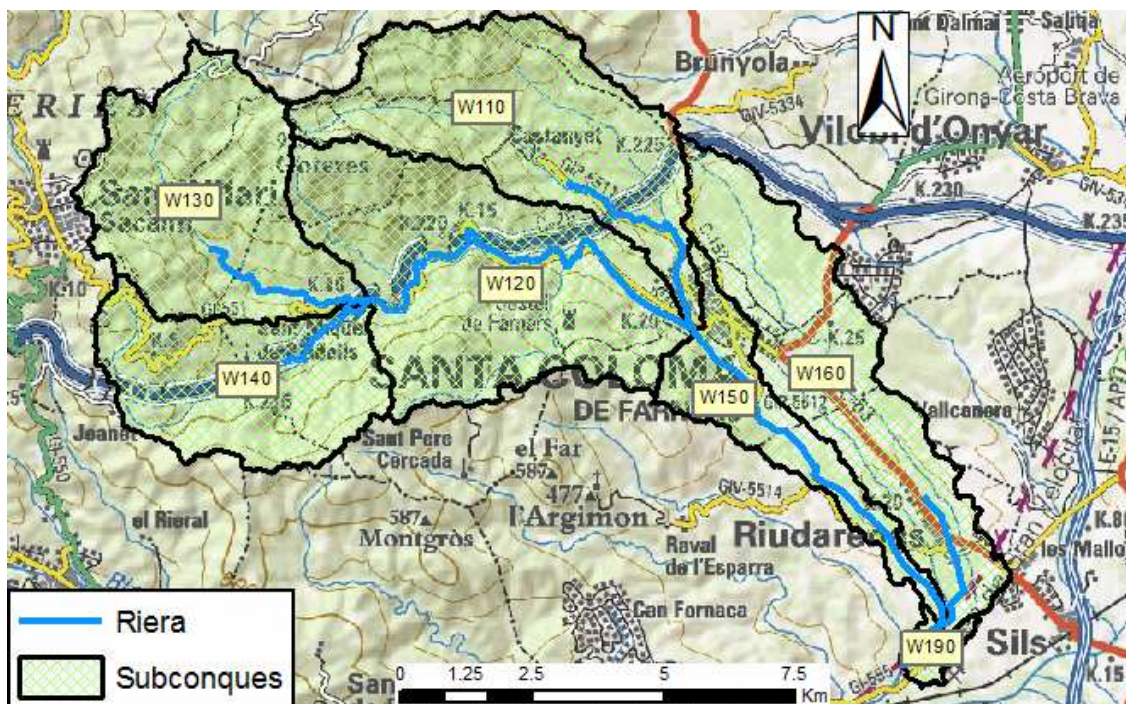


Figura 3.2. Model generat per l'HEC-GeoHMS per al tram de la Riera de Santa Coloma que es vol estudiar.

Font: Elaboració pròpia.

Seguint les recomanacions de diversos protocols d'hidrologia (ACA 2003; MOPU 1987), s'ha dividit la zona d'estudi en 7 subconques, amb una superfície d'entre 15 i 25 km². A cadascuna de les subconques li correspon únicament un tram de riu. S'ha establert un codi d'identificació, W per a les subconques i R per als trams del riu.

3.1.3 Estimació de la precipitació en l'àrea d'estudi

La determinació acurada de la pluja que es fa servir en un estudi d'inundabilitat resulta un factor clau per obtenir resultats raonables. La precipitació és l'input principal d'un sistema hidrològic, sempre que es tracten períodes de temps curts. Això és degut a que el flux superficial generat per un episodi de precipitació, circula a una escala temporal molt més curta que la que presenta el flux subterrani.

Per la determinació de cabals punta, es fan servir els valors de precipitació diària màxima (P_d) per a períodes de temps determinats. Els càlculs que s'han efectuat corresponen a períodes de retorn de 50, 100 i 500 anys (Taula 3.3). Les dades ha estat extretes dels mapes d'isomàximes pluvials diàries construïts per l'Agència Catalana de l'Aigua (Figura 3.3). S'observa que la precipitació per a qualsevol període de retorn, és major a les subconques més occidentals, situades al massís de Guillerries on neix la Riera. Els valors de precipitació van disminuint riu avall, en sentit SE.

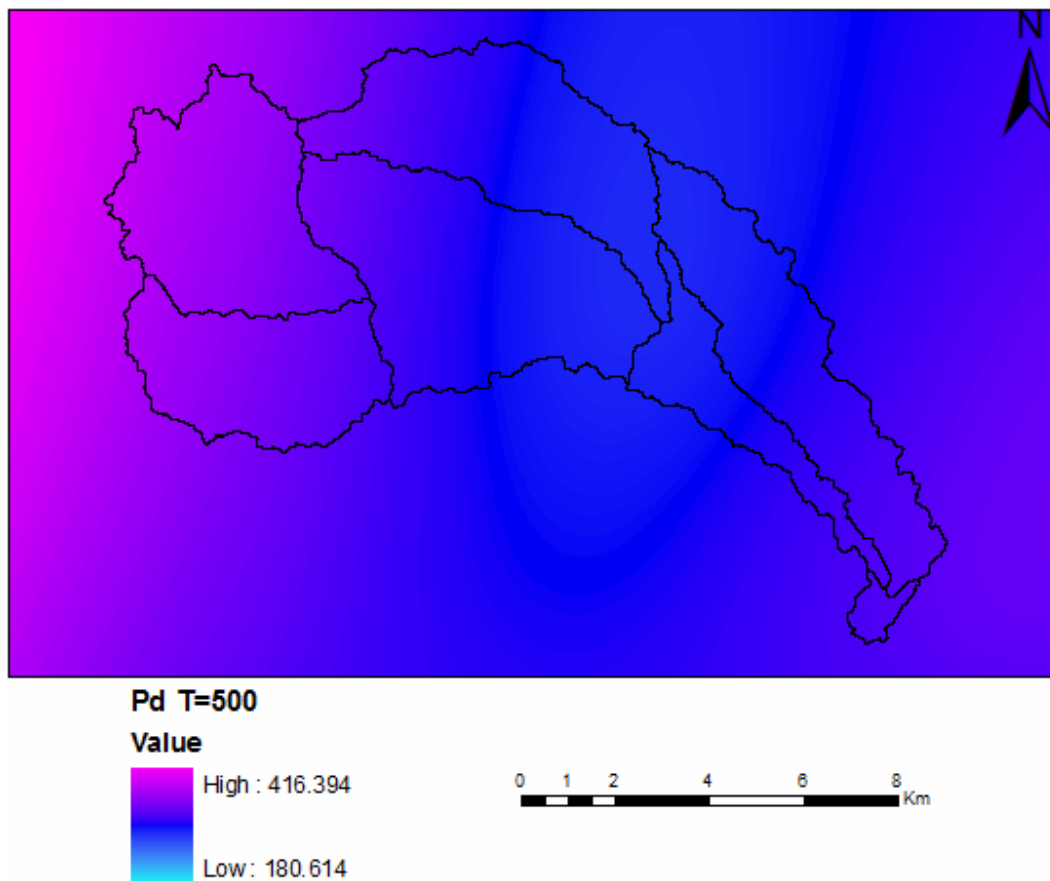


Figura 3.3. Isomàximes pluvials facilitades per l'ACA.

Font: Elaboració pròpia.

Esdevé necessària l'aplicació d'un coeficient de simultaneïtat, K_A , (Equació 2.14), per extrapolar el valor de mesura puntual a tota la superfície de la conca.

Taula 3.3. Valors de precipitació màxima obtinguts a partir dels mapes d'isomàximes i la seva correcció mitjançant el coeficient de simultaneïtat (K_A).

Font: Elaboració pròpia.

Subconca	$P_d T=50$ (mm)	$P_d T=100$ (mm)	$P_d T=500$ (mm)	Àrea (km ²)	K_A	$P_d' T=50$ (mm)	$P_d' T=100$ (mm)	$P_d' T=500$ (mm)
W110	184.72	212.44	288.45	19.32	0.91	168.88	194.23	263.72
W120	186.12	214.59	290.52	24.30	0.91	168.93	194.77	263.68
W130	214.26	248.54	338.50	17.63	0.92	196.46	227.89	310.38
W140	206.83	239.11	324.28	13.71	0.92	191.15	220.99	299.70
W150	180.85	209.49	283.43	7.29	0.94	170.45	197.44	267.13
W160	182.87	211.38	287.39	17.18	0.92	167.81	193.98	263.73
W190	191.06	223.25	303.67	1.11	1.00	190.47	222.56	302.73

3.1.4 Determinació de la pluja neta

Un cop determinada la precipitació màxima diària, per cada subconca i període de retorn, s'ha determinat la pluja neta. Per calcular el llinar d'escorrentiu s'ha fet servir el model del nombre de corba del Soil Conservation Service (Annex II). Aquest model requereix l'entrada de tres paràmetres, corresponents a ús del sòl, geologia i pendent per tal determinar el nombre de corba tabulat per l'SCS. S'han tingut en compte unes condicions inicials del sòl humides, ja que normalment els màxims diaris de precipitació venen precedits de diversos dies de precipitació, fet que genera unes condicions d'humitat elevada pel dia de màxima precipitació (Annex II).

Al mapa de pendents es pot apreciar com la inclinació de la conca és major a la zona oest, corresponent al massís de Guilleries. No obstant, aquest fet no afectarà al càlcul de les abstraccions hidrològiques, donat que la major part d'aquesta zona es troba recoberta de massa forestal, que minimitza els efectes que provoca la inclinació en la generació de l'escorrentiu. Al mapa geològic s'ha de generalitzar la litologia present a quatre classes de sòl, establertes per l'SCS, en funció de la permeabilitat dels materials presents. Els materials més permeables es situen a la zona est, i corresponen als dipòsits al·luvials del quaternari. El mapa d'usos del sòl ja està estandarditzat als usos establerts pel SCS, i es pot observar com a prop del municipi de Santa Coloma de Farners, situat a la zona est, s'hi desenvolupa activitat agrícola, mentre que a l'oest de la conca predominen les masses forestals. Finalment, el mapa del nombre de corba té en compte tots els paràmetres determinats a la cartografia anterior. Es pot observar un descens del nombre de corba a la zona est de la conca, fet que indica un increment del llinar d'escorrentiu. Aquest descens està vinculat a la presència dels dipòsits al·luvials que incrementen en gran mesura la permeabilitat del sol, elevant les pèrdues per infiltració.

A partir la cartografia generada, s'han obtingut les mitjanes del nombre de corba per a cada subconca (Taula 3.4). Aquestes són transformades a llinar d'escorrentiu (P_0) i multiplicades pel coeficient regional d'1,3 (ACA, 2003).

Arribats a aquest punt, ja tenim calculats els dos valors principals a partir dels quals es generarà l'hietograma de precipitació neta: la precipitació màxima diària i el llinar d'escorrentiu corresponent a les abstraccions hidrològiques.

Taula 3.4. Mitjana del nombre de corba per cada subconca (NC), transformat a llinar d'escorrentiu (P_0) i multiplicat pel coeficient regional (P_0').
Font: Elaboració pròpia.

Subconca	NC	P_0	P_0'
W110	83.98	10	12.4
W120	84.41	9	12.0
W130	83.10	10	13.2
W140	82.86	10	13.4
W150	80.54	12	15.7
W160	77.80	14	18.5
W190	78.12	14	18.2

3.1.5 Construcció de l'hietograma

El mètode emprat per la construcció de l'hietograma ha estat el dels blocs alternats. Aquest mètode parteix de les corbes Intensitat-Durada-Freqüència (IDF), a través de les quals es pot obtenir el valor de la intensitat de la precipitació coneixent la durada de la mateixa i el volum de la precipitació P_d' (Equació 2.17).

S'ha dividit la precipitació diària en intervals d'una hora, calculant la intensitat de precipitació per a cadascun. Tot seguit s'ha determinat la precipitació acumulada a cada interval de temps, a partir de la qual s'ha calculat la precipitació neta (Equació 2.8).

Els valors obtinguts s'han ordenat de manera que el valor més elevat es situa al centre de l'hietograma i descendeix de manera alternada a dreta i a esquerra del mateix. A la taula 3.5 hi ha un exemple de càlcul d'hietograma, representat a la figura 3.5.

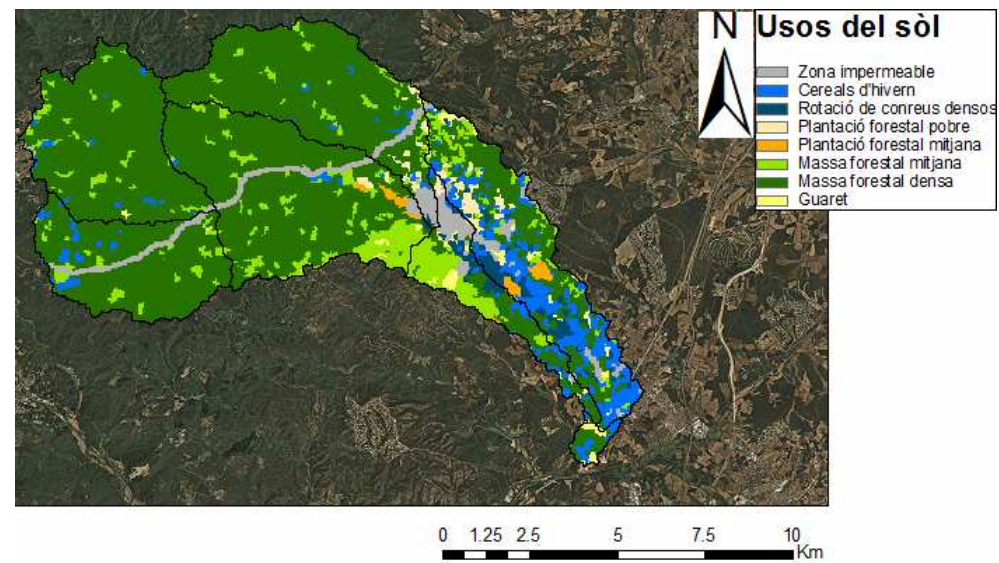
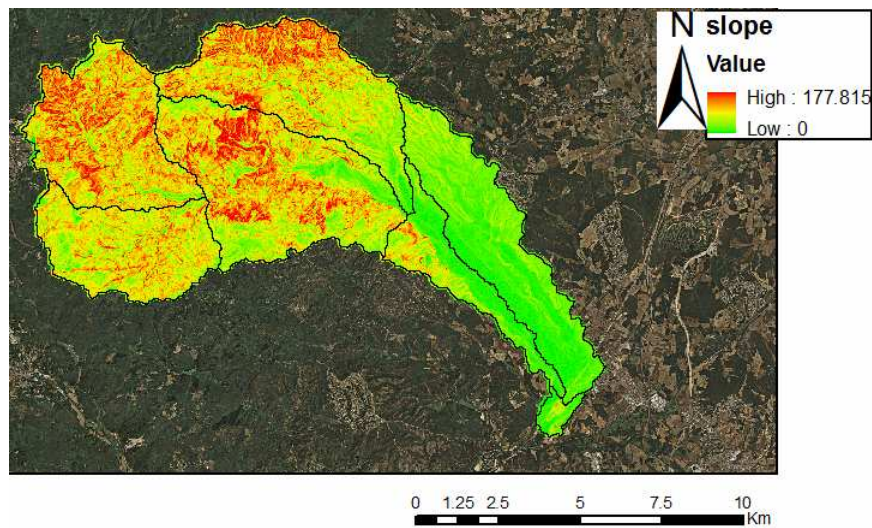


Figura 3.4.a. A l'esquerra mapa de pendents. A la dreta mapa de usos del sòl.

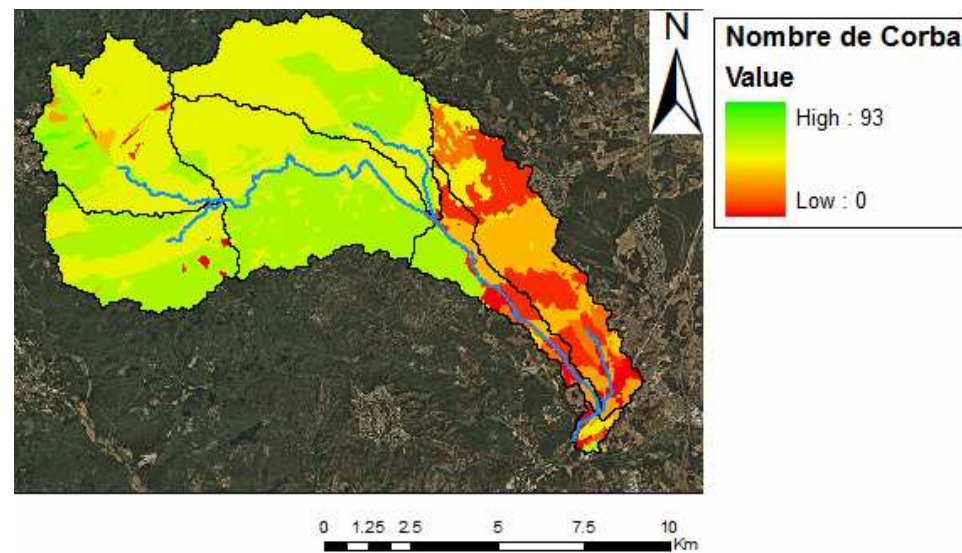
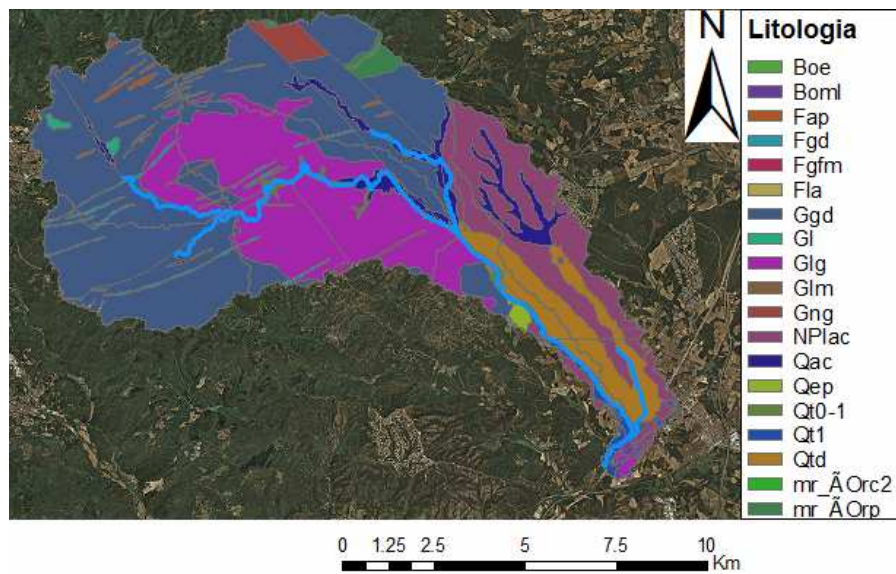


Figura 3.4.b. A l'esquerra mapa geològic. A la dreta mapa del valor del nombre de corba obtingut amb el mètode de l'SCS.

Taula 3.5 Exemple de càlcul de l'hietograma. Les columnes corresponen al temps de precipitació (T), intensitat(I), acumulació(ΣP), pluja neta acumulada(ΣE), pluja neta generada E i valors de l'hietograma, per interval de temps.

Font: Elaboració pròpia.

T(h)	I(mm/h)	ΣP (mm)	ΣE (mm)	E(mm)	Hietograma (mm)	E
1	87.30	87.299	29.823	29.823	1.396	
2	56.49	112.987	48.360	18.537	1.564	
3	43.17	129.518	61.249	12.889	1.766	
4	35.43	141.738	71.137	9.888	2.014	
5	30.28	151.403	79.139	8.002	2.322	
6	26.56	159.369	85.837	6.698	2.716	
7	23.73	166.117	91.577	5.741	3.237	
8	21.49	171.950	96.584	5.007	3.955	
9	19.67	177.069	101.010	4.426	5.007	
10	18.16	181.615	104.965	3.955	6.698	
11	16.88	185.693	108.529	3.565	9.888	
12	15.78	189.380	111.766	3.237	18.537	
13	14.83	192.737	114.723	2.957	29.823	
14	13.99	195.809	117.439	2.716	12.889	
15	13.24	198.637	119.945	2.506	8.002	
16	12.58	201.249	122.267	2.322	5.741	
17	11.98	203.673	124.425	2.159	4.426	
18	11.44	205.929	126.439	2.014	3.565	
19	10.95	208.036	128.323	1.884	2.957	
20	10.50	210.008	130.089	1.766	2.506	
21	10.09	211.858	131.749	1.660	2.159	
22	9.71	213.599	133.314	1.564	1.884	
23	9.36	215.240	134.790	1.476	1.660	
24	9.03	216.790	136.186	1.396	1.476	

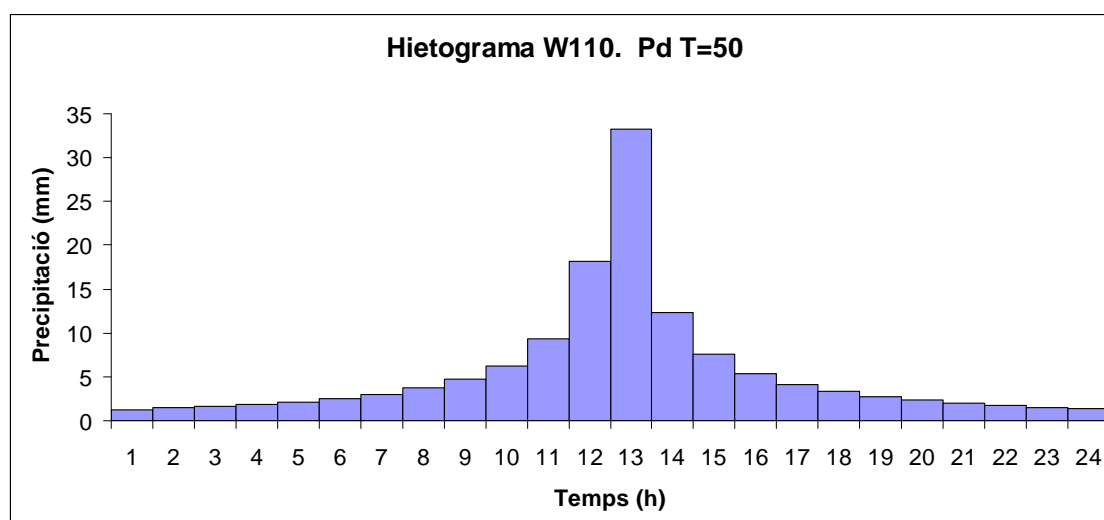


Figura 3.5 Hietograma calculat per a una precipitació diària amb període de retorn de 50 anys a la subconca W110. El volum total de precipitació és de 184.72mm.

Font: Elaboració pròpia.

3.1.6 Càlcul de l'hidrograma de sortida

En base als hietogrames de precipitació obtinguts per cada subconca i temps de retorn determinat, el programa HEC-HMS determina l'hidrograma i el cabal pic de sortida de cada subconca.

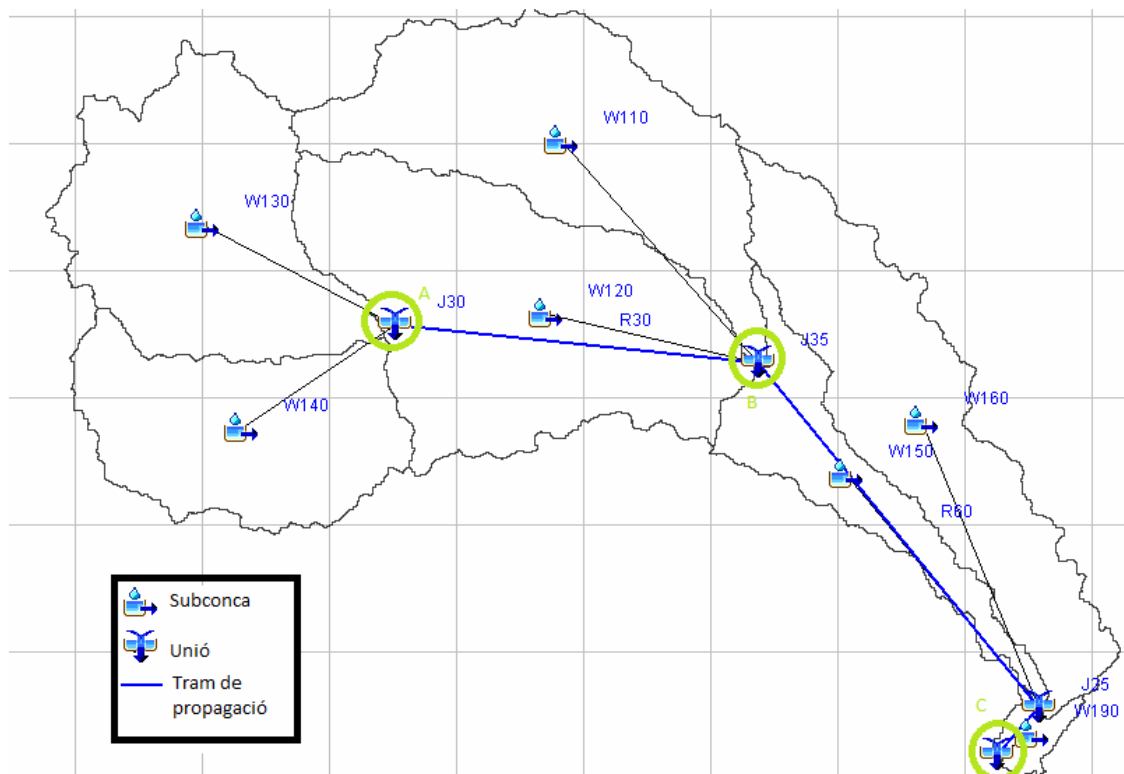


Figura 3.6. Model de la conca al programa de simulació HEC-HMS. Els cabals als indrets A, B i C s'han calibrat a partir de dades obtingudes per l'ACA.

Font: Elaboració pròpia.

S'han determinat tres models meteorològics en la simulació, corresponents a 50, 100 i 500 anys de retorn. La simulació s'ha realitzat durant un període de 34 hores, per incloure la regressió de l'hidrograma un cop finalitzada la pluja. La propagació de l'avinguda s'ha estimat amb el mètode de Muskingum (Apartat 2.3.2), en el qual s'han ajustat els paràmetres X i K. El calibratge dels cabals obtinguts s'ha dut a terme a partir de dades de la planificació de l'espai fluvial de la conca de la Tordera (ACA 2002), a tres indrets A, B i C (Figura 3.6).

El calibratge s'ha centrat, especialment, en l'ajustament del cabal pic d'avinguda, deixant de banda la inclinació de la corba de desgast.

Els hidrogrames de sortida per al punt C de la conca presenten valors de cabal màxim de 452.8, 544.2 i 757.0m³/s per als períodes de retorn de 50, 100 i 500 anys respectivament, assolint-se aquests entre les 13:00 i les 15:00 hores del inici del xàfec (Figura 3.7).

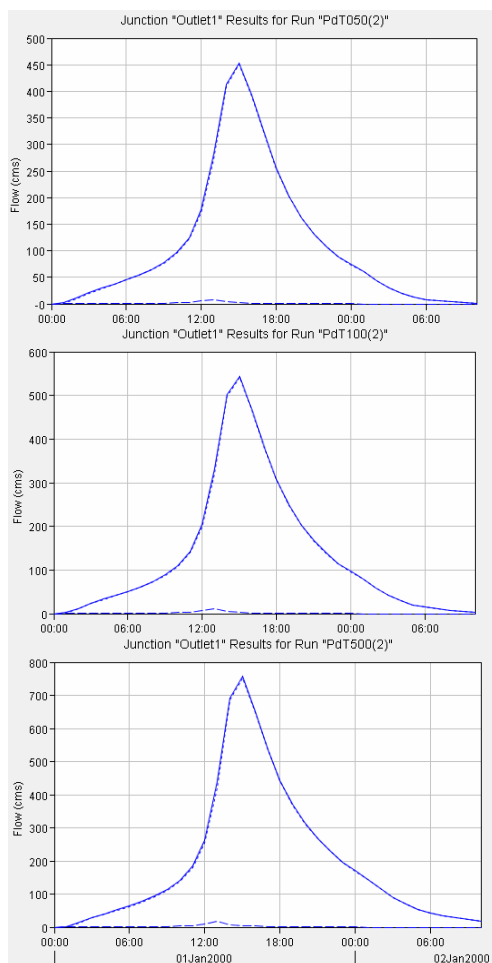


Figura 3.7. Hidrogrames obtinguts per al punt de control C, per períodes de retorn de 50, 100 i 500 anys.

Font: Elaboració pròpia.

Per cadascun dels punts de calibratge, s'han ajustat els paràmetres de Muskingum i la relació entre els cabals generats pel model i els cabals determinats per l'ACA (Taula 3.6).

En la fórmula de Muskingum el paràmetre K correspon a la velocitat de propagació de l'avinguda i és el que determina el cabal pic de l'avinguda. El paràmetre X indica la dispersió del flux, que afecta a la distribució de l'hidrograma, és a dir, a la inclinació de les corbes de concentració i desgast. Amb l'objectiu de determinar correctament el cabal pic, s'ha ajustat el valor de K, mentre a X se l'ha atorgat un valor estàndard de 0.2 en tots els casos.

L'error respecte als cabals estimats per l'ACA, en la major part dels casos no arriba a l'1%, per la qual cosa es pot afirmar que el model genera prediccions acurades per precipitacions d'intensitats similars a cadascun dels períodes de retorn estudiats. A l'estimació de cabal del punt B, l'error és una mica més gran degut a que el punt de calibratge no correspon exactament amb els punt d'estimació del cabal al model generat sinó que es situa aigües amunt d'aquest, per això el cabal obtingut és menor que el de l'ACA.

Taula 3.6. Cabals obtinguts per cadascun dels punts de calibratge i període de retorn. S'indica quins paràmetres K i X s'han fet servir en Muskingum i la diferència obtinguda respecte els cabals calculats per l'ACA.

Temps (anys)	retorn	Punt	K	X	Cabal obtingut	Cabal ACA	Diferència
50		A	3.1	0.2	498.2	499.01	0.16%
		B	0.8	0.2	496	520.87	4.77%
		C	1.4	0.2	452.8	448.5	-0.96%
100		A	3.8	0.2	601.6	601.33	-0.04%
		B	0.7	0.2	623.8	641.46	2.75%
		C	1.5	0.2	544.2	542.19	-0.37%
500		A	5.8	0.2	880.2	877.78	-0.28%
		B	0.85	0.2	903	902.43	-0.06%
		C	1.6	0.2	757	751.1	-0.79%

3.1.7 Estudi del impacte generat pel increment de la superfície urbanitzada de Santa Coloma de Farners

Santa Coloma de Farners té establert en el seu POUM, una superfície de 200ha, al voltant del nucli urbà actual, designada com sòl urbanitzable delimitat (SUD) (Figura 3.8). A partir del model hidrològic que s'ha construït i calibrat, es pot estimar com afectarà el increment de la superfície urbana si aquest es duu a terme segons la planificació del POUM.

El desenvolupament urbà de Santa Coloma es preveu sobre zones on l'ús actual del sòl és agrícola, principalment conreus de regadiu i de secà. El canvi en l'ús del sòl comporta un canvi en el llinar d'escorrentiu, provocant canvis en l'escorrentiu generat.



Figura 3.8. Plànol del POUM de Santa Coloma de Farners. Es diferencien superfície urbanitzada (S.U.R.), superfície urbanitzable delimitada (S.U.D.), superfície urbanitzable no delimitada (S.U.N.D.) i superfície no urbanitzable (S.N.U.).

Font: POUM de Santa Coloma de Farners.

Per simular el desenvolupament futur del municipi de Santa Coloma de Farners, s'ha modificat el mapa d'usos del sòl, classificant parcel·les agrícoles contigües amb el terme municipal actual com a sòl urbanitzat (Figura 3.9). La superfície total reclassificada ha estat de 2km² (200ha).

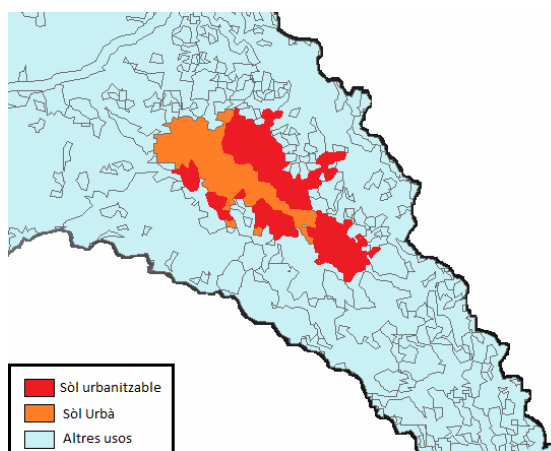


Figura 3.9. Reclassificació dels usos del sòl de Santa Coloma de Farners, on s'ha introduït la superfície urbanitzable segons el POUM.

Font: Elaboració pròpia.

Taula 3.7. Llindars d'escorrentiu per cada subconca, després de la urbanització.

Font: Elaboració pròpia.

Subconca	NC	Po	Po'
W110	84.03	10	12.4
W120	84.46	9	12.0
W130	83.10	10	13.2
W140	82.86	10	13.4
W150	81.00	12	15.2
W160	79.46	13	16.8
W190	78.12	14	18.2

Taula 3.8. Cabal pic en el punt C abans i després de la urbanització.

Font: Elaboració pròpia.

Temps de Retorn (anys)	Cabal sense urbanització (m3/s)	Cabal amb urbanització (m3/s)
50	452.8	457.2
100	544.2	549.2
500	757	763.3

A partir d'aquest nou mapa d'usos del sòl, s'ha recalculat el nombre de corba per cada subconca, trobant que aquest ha incrementat a les subconques afectades per la urbanització, fet que generarà un increment en el cabal calculat aigües avall. Es dona un descens del llindar d'escorrentiu a les subconques W150 i W160 (Taula 3.7), que suposa un descens total de 2.2mm del llindar d'escorrentiu.

Les noves dades s'han introduït al model que s'ha construït prèviament. Els resultats obtinguts han estat pràcticament idèntics als que s'havien obtingut sense tenir en compte la urbanització. El creixement del cabal és negligible i té una magnitud similar a l'error comès en la construcció del model (Taula 3.8).

3.1.8 Estudi del volum d'escorrentiu en funció del percentatge de urbanització de la conca

Per estudiar la influència del percentatge d'urbanització d'una conca, s'ha aïllat la subconca W160 de la resta, establint-la com àrea representativa, a petita escala, dels canvis esperables a tota la conca. En aquest sentit, s'ha generat un model independent al qual s'ha estimat l'escorrentiu generat per la superfície urbanitzada actual de la subconca, 5.65%, i pels següents percentatges d'urbanització: 15, 25, 50, 75 i 100%. Primer s'ha calculat com afecta a la generació de precipitació neta i, en segon lloc, com afecta al cabal màxim d'avinguda, sempre amb un període de retorn de 500 anys.

S'ha suposat que tota la subconca, tret del percentatge d'urbanització considerat, correspon a superfície forestal, donat que és la ocupació del territori predominant a la conca. De la mateixa manera, s'ha suposat que la litologia a tota la conca correspon al tipus B, ja que aquest és el que predomina a la subconca W160.

Pel nivell d'urbanització actual, s'ha obtingut una intensitat horària màxima efectiva de 14.9mm. La precipitació efectiva es duplica quan s'urbanitza el 30% de la superfície de la conca i continua ascendint d'una manera pràcticament lineal (Figura 3.10).

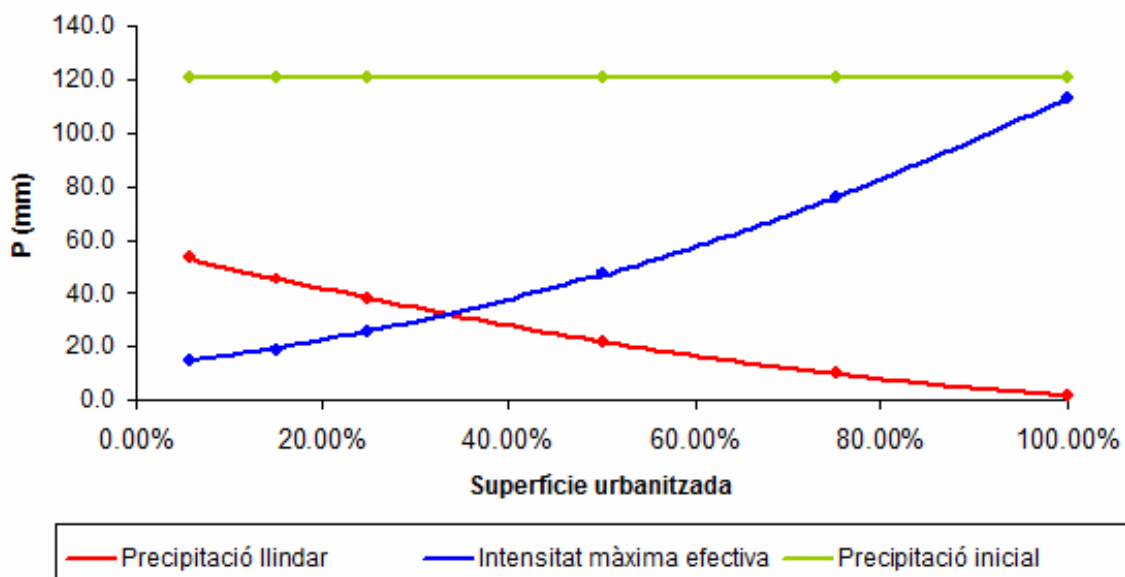


Figura 3.10. Canvis generats en la precipitació llindar i la intensitat horària màxima efectiva en funció del percentatge d'urbanització de la conca.

Font: Elaboració pròpia

A partir dels hietogrames de precipitació neta, per cada percentatge d'urbanització s'han determinat els hidrogrames de cabal de sortida de la subconca mitjançant l'HEC-HMS. D'aquí se n'ha extret el cabal pic i el volum total de precipitació efectiva (Figura 3.11).

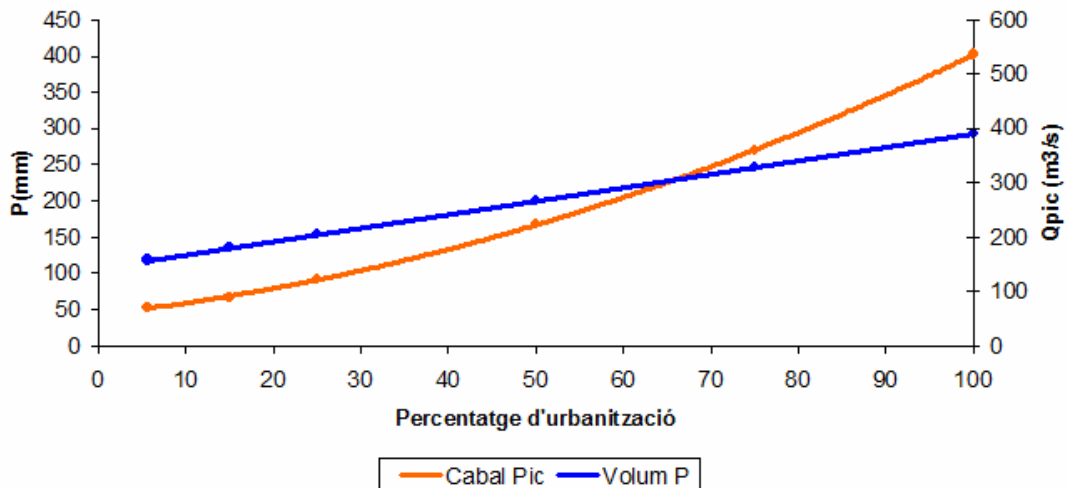


Figura 3.11. Canvis generats en el cabal pic i el volum total de precipitació efectiva en funció del percentatge d'urbanització de la conca.

Font: Elaboració pròpia

Els resultats indiquen un creixement lineal de la precipitació neta, que duplica el seu volum entre els valors de 5.65 i 100%. La intensitat màxima de la precipitació neta, en canvi pateix un increment exponencial, degut al seu càlcul amb l'equació de l'SCS (Equació 2.8). D'altra banda, el cabal pic pateix també un creixement molt significatiu, donat que el valor de precipitació llindar de la zona urbana és molt petit (1.3mm), mentre que la a la zona forestal la precipitació llindar és de 60mm. D'aquesta manera si s'urbanitzés un 50% d'una subconca similar a W160, que inicialment presentava un 5.65% de la superfície urbanitzada, es triplicaria el cabal pic d'una avinguda.

A partir dels resultats obtinguts amb aquest petit model, queda demostrat que la petita diferència de cabal que genera la urbanització de les àrees previstes al POUM de Santa Coloma, és deguda a la diferència d'escala entre la conca i la zona que es preveu urbanitzar. La zona d'estudi ocupa una superfície de 100.54km², mentre que el increment de zona urbanitzada suposa 2km², és a dir, un 2% de la zona d'estudi.

Tot i que els valors d'urbanització fets servir en aquest model pugin semblar desorbitats per la conca de la riera de Santa Coloma, s'ha de tenir en compte que en el context del litoral Mediterrani sí que s'ha urbanitzat un important percentatge del territori. A la Comunitat Valenciana, per exemple, en un període de 13 anys la superfície urbanitzada va créixer un 52.14%, passant de 75.851ha el 1.987 a 115.397ha l'any 2.000 (INE). El percentatge de superfície urbanitzada respecte el total (2.325.500ha) ha passat del 3.2% al 5% en tant sols 13 anys. Amb aquest ritme de creixement de la superfície urbanitzada, les precipitacions intenses que tenen lloc al litoral mediterrani poden multiplicar els seus efectes en qüestió de poques dècades.

3.1.9 Conclusions

Mentre que el coneixement teòric i l'experiència adverteixen dels greus efectes que pot generar el increment massiu de la superfície urbanitzada, degut als seus efectes directes en la generació de l'escorrentiu superficial, hom es pregunta com pot ser que la duplicació de la superfície urbanitzada, al municipi de Santa Coloma, sigui negligible en el volum d'escorrentiu superficial aigües avall. Per valorar correctament els resultats obtinguts s'han de tenir en compte diversos conceptes.

En primer lloc, quan es parla d'efectes hidrològics derivats del increment de la urbanització, el creixement del cabal pic d'una avinguda no suposa un risc tan greu com el increment de la velocitat de concentració de l'hidrograma. És a dir, el temps que triga a assolir-se el cabal punta es redueix degut a un increment de la velocitat del flux. Aquest fet incrementa els impactes generats per l'avinguda, fins i tot amb el mateix volum d'aigua. S'ha calculat el temps de concentració i el temps de pic per cada subconca, abans i després de la urbanització prevista en Santa Coloma de Farners (Taula 3.9). La subconca on es dóna un major increment de la superfície urbanitzada, W160, redueix el seu temps de pic en més de 5 minuts, mentre que el temps de concentració, és a dir, el temps que transcorre entre la finalització de la precipitació i l'esgotament de l'hidrograma, es redueix en més de 15 minuts. Aquest fet indica un increment de la velocitat de l'avinguda i, per tant, una major capacitat destructiva de l'episodi d'inundació. (de cara prendre mesures d'evacuació, gestió d'envasaments, etc.)

La zona urbanitzada presenta pendents molt petits, fet que possiblement minimitza els efectes que es donen en el increment del cabal i velocitat respecte altres zones d'estudi.

A la conca estudiada de la Riera de Santa Coloma, el increment de la superfície urbanitzada respecte la superfície total de la conca és molt petit, fet que esmorteix els efectes en els temps i el cabal, com s'ha vist en el model d'urbanització de la subconca W160. A la zona de Catalunya, les zones que presenten majors problemes d'inundabilitat són les conques costaneres. Aquestes conques acostumen a tenir una àrea reduïda amb el que un increment de la zona urbanitzada pot tenir efectes significatius, ja que pot suposar un increment significatiu del percentatge de la conca urbanitzat.

Finalment també hem de tenir en compte que el software mitjançant el qual s'ha realitzat la modelització, és òptim per la simulació de conques predominantment rurals, degut a que no simula bé les processos que tenen lloc a les zones urbanes. Existeixen models informàtics en dues dimensions que simulen millor les condicions urbanes. Això és degut a que l'aigua, a zones edificades, circula seguint carrers i clavegueram. Aquests models bidimensionals inclouen paràmetres que permeten tenir en compte la circulació de l'aigua per la ciutat. Un exemple d'aquest model és el Kalypso, creat per "Björnsen Consulting Engineers (BCE)" amb col·laboració del "Department for river and coastal engineering" de la Universitat Tècnica d'Hamburg. Malgrat que la intenció inicial d'aquest projecte era realitzar un model amb Kalypso, amb l'objectiu de poder comparar els resultats amb el model de l'HEC-HMS, aquest estudi comparatiu ha estat inviable per dues raons. Primer per l'elevat requeriment d'informació de partida, en molts casos no disponible. I pel increment del temps que s'hauria de dedicar per obtenir i parametritzar les dades necessàries. Tanmateix, el model que s'ha fet servir, no

contempla la ocupació de la zona inundable, que genera un doble efecte. Per un costat augmenta l'escorrentiu generat però, a més, redueix la secció de drenatge. Aquest és un aspecte important i que s'hauria de tenir en compte en la gestió del territori, evitant la urbanització de les zones inundables, tal com es recull al Reial Decret referent al Domini Públic Hidràulic.

Taula 3.9.a. Determinació del temps de concentració (Tc) i temps de pic (Tpic) per cada subconca, amb els usos del sòl actuals.

Font: Elaboració pròpia.

Subconca	Sup. Urb.	Longitud curs principal(km)	j(pendent en m/m)	Tc (h)	Tc (min)	Tlag (min)	Tpic (min)	Àrea (km2)
W110	4.56%	4.89	0.01758	2.16	129.6	40.2	100.2	19.32
W120	4.19%	9.64	0.01702	3.64	218.3	67.7	127.7	24.30
W130	0.42%	4.09	0.03523	1.65	99.1	30.7	90.7	17.63
W140	2.13%	2.43	0.02020	1.23	74.1	23.0	83.0	13.71
W150	14.05%	8.20	0.00537	1.58	94.9	29.4	89.4	7.29
W160	5.65%	3.08	0.00195	1.16	69.5	21.5	81.5	17.18
W190	0.11%	1.20	0.00332	1.02	61.3	19.0	79.0	1.11

Taula 3.9.b. Determinació del temps de concentració (Tc) i temps de pic (Tpic) per cada subconca, amb els canvis previstos al POUM de Santa Coloma.

Font: Elaboració pròpia.

Subconca	Sup. Urb.	Longitud curs principal(km)	j(pendent en m/m)	Tc (h)	Tc (min)	Tlag (min)	Tpic (min)	Àrea (km2)
W110	4.77%	4.89	0.01758	1.66	99.3	30.8	90.8	19.32
W120	4.36%	9.64	0.01702	2.82	169.0	52.4	112.4	24.30
W130	0.43%	4.09	0.03523	1.65	99.1	30.7	90.7	17.63
W140	2.13%	2.43	0.02020	1.23	74.1	23.0	83.0	13.71
W150	16.87%	8.20	0.00537	1.50	90.2	27.9	87.9	7.29
W160	15.43%	3.08	0.00195	0.89	53.3	16.5	76.5	17.18
W190	0.11%	1.20	0.00332	1.02	61.3	19.0	79.0	1.11

3.2 Estudi del Riu San Francisco (Guatemala)

3.2.1 Descripció de la conca

Ubicació

El riu San Francisco forma part de la conca del llac Atitlán al departament de Solola, a la regió occidental de Guatemala (Figura 3.12). Es tracta d'un indret muntanyós, d'origen volcànic amb una alçada que avarca des dels 1.600 fins als 2.400 metres sobre el nivell del mar. El riu desemboca a l'Atitlán, un llac de muntanya receptor dels rius i nombrosos torrents existents a la zona. La conca es troba repartida entre els municipis de Concepción, San Andrés Semetabaj, Sololá, Chichicastenango i Panajachel, que es situa sobre el ventall al·luvial del propi riu. Aquest fet, ha generat una greu problemàtica per a aquesta població, relacionada amb el cabal d'avinguda vinculat als huracans que regularment s'originen a la zona. El risc d'inundació s'ha posat de manifest, especialment, després dels huracans Stan i Agatha, que han provocat danys greus al municipi i als seus habitants. Tot i que el registre històric ja disposa de dades d'avingudes importants des de l'any 1.902, les darreres crescudes han generat major impacte, degut al increment de la superfície urbanitzada, fins i tot dins les lleres del riu (Figura 3.13).

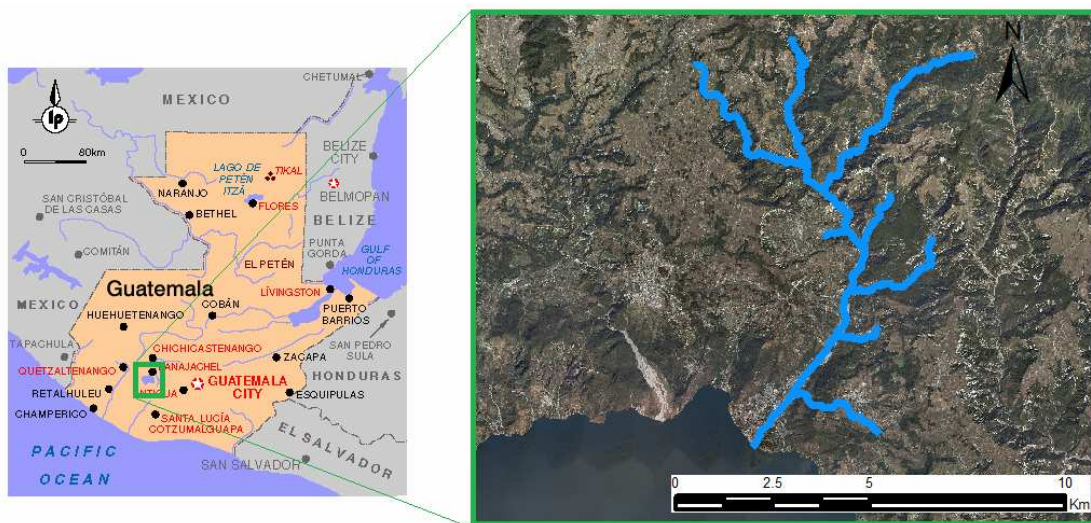


Figura 3.12. Ubicació del riu San Francisco.
Font. Elaboració pròpia.

Característiques físiques de la conca

La conca del riu Panajachel ocupa una superfície de 70,85km². En el tram més llarg, el riu recorre 15,23km, amb un desnivell de 803m. El punt més elevat del curs fluvial es situa a 2.393metres sobre el nivell del mar mentre que la seva desembocadura es troba a 1.590m. La llera del riu, presenta un pendent mitjà del 5,27%, mentre que el pendent mitjà de tota la superfície de la conca és del 41,87%, assolint en alguns punts valors del 80%. Aquest fort pendent està vinculat a la importància de la geologia i dels processos erosius dins la conca.

Degut a la naturalesa volcànica de la regió, episodis de fortes precipitacions poden originar esllavissades i inundacions de fang, tal i com va ocórrer l'any 2005 durant l'huracà Stan a "Cantón Panabaj", un dels barris de Panajachel, amb efectes devastadors (Figura 3.13). El cabal mitjà anual del riu s'estima en $0.53\text{m}^3/\text{s}$ (INSIVUMEH).

En quant a la pluviometria, cal destacar, que aquesta no ve donada generalment per fenòmens procedents de la costa del pacífic, sinó per la dinàmica local, generada a partir del sistema muntanyós que engloba la conca. A excepció, però, dels huracans i fenòmens de magnitud similar.

Resulta peculiar i digne de menció l'origen del llac Atitlán, generat per l'enfonsament de la cambra volcànica originària dels volcans que avui dia l'envolten. Aquest enfonsament va generar una depressió circular de 18 km de diàmetre, amb una superfície de 250km^2 , 130 dels quals corresponen al actual llac, i 900 metres de profunditat. Actualment, dels 900 metres de profunditat, 300 es troben coberts per sediments, 300 corresponen a la profunditat de l'aigua i els 300 restants són la part visible de la depressió. Les falles originades durant l'enfonsament de la cambra és per on drena el llac, que no presenta cap sortida en superfície. Les anàlisis químiques de l'aigua indiquen que l'aigua percola cap al Río Madre Vieja, situat a l'est de l'Atitlán (PNUD, 2007).

Característiques socioeconòmiques

A la conca del llac Atitlán, un 70% de la superfície inicialment forestal, es destina a l'agricultura intensiva o ha estat abandonada després de la seva explotació, ocasionant un fort deteriorament del sòl.

Tot i que a principis del segle XX el municipi de Panajachel es situava a una distància aproximada d'un kilòmetre de la llera del riu, el creixement demogràfic ha provocat que la urbanització arribi a envair la llera del riu. La taxa promig anual de creixement demogràfic del departament de Sololá és del 3.1%, assolint en alguns municipis taxes de creixement anuals superiors al 7%. A aquest ritme, la població del departament es duplicaria en un període inferior als 20 anys, assolint densitats de població de 1000 habitants per kilòmetre quadrat (PNUD, 2007).

El percentatge de pobresa del departament de Sololá, calculat en base a necessitats bàsiques insatisfetes, rendes i nivells de consum, és del 76% mentre que un 32% es troba en situació d'extrema pobresa. Sololá és un dels departaments més pobres de Guatemala, molt per sobre del promig nacional que és de un 54% de pobresa i un 23% d'extrema pobresa. (Plan de Desarrollo Integral del Municipio de Sololá, 2001).

A la conca del Riu San Francisco, predomina l'ús forestal, tot i que la superfície destinada a la rotació de conreus ocupa més del 12% de l'àrea de la conca. (Taula 3.10).

Així doncs, l'elevat risc d'inundació a Panajachel no només ve donat per les propietats físiques de la conca sinó que les característiques socioeconòmiques de Panajachel són les que determinen bona part del elevat risc enfront desastres naturals. La pobresa de la població i la degradació ambiental reflexen la manca de planificació en la utilització i

gestió de recursos naturals com sòls, boscos i aigua. La vulnerabilitat de la població està relacionada amb multitud de factors, entre els quals destaquen els elevats nivells de pobresa, l'increment demogràfic, l'educació deficient, l'empobriment dels sòls i l'alt nivell d'erosió, ambdós vinculats a la desforestació per tals il·legals que generen també un increment en les taxes de sedimentació, tant a la llera del riu com al propi llac Atitlán (PNUD, 2007).

L'arrossegament aigües avall de gran quantitat de sediments, fa que la llera del riu s'exploti com a font d'àrids, sense cap mena de control.

Taula 3.10. Percentatges d'ús del sòl a la conca del Riu San Francisco.

Font: Elaboració pròpia.

Ús del sòl	% superfície
Zona impermeable	2.48
Cereals d'hivern	0.06
Rotació de conreus	12.39
Plantació regular pobra	0.33
Plantació regular mitjana	30.25
Praderies	1.06
Masses forestals	53.43



Figura 3.13. Efectes de l'esllavissada produïda al "Cantón Panabaj" durant l'huracà Stan l'any 2005, a l'esquerra. Inundacions a Panajachel durant l'huracà Stan l'any 2005, a la dreta.

Font: Plan de reconstrucción y reducción de riesgos del departamento de Sololá, PNUD 2007.

3.2.2 Preparació del model

Per a la generació del model precipitació-escorrentiu de la conca del Riu San Francisco de Panajachel, també s'ha fet servir el software que proporciona l'Hydrologic Engineering Center de l'US Army. Partint del Model Digital del Terreny i el traçat del riu, aquest software ens permet determinar les subconques en què es divideix la zona d'estudi així com el tram de riu que resulta significatiu per a la determinació del cabal punta. El procediment s'explica en detall a l'Annex IV. D'aquesta manera, s'ha obtingut el model del Riu San Francisco (Figura 3.14).

El sistema fluvial s'ha dividit en 15 subconques, amb una superfície d'entre 15 i 25 km² cadascuna. El major nombre de conques respecte al model de Santa Coloma és degut a que es volen representar els importants aports de flux lateral per part d'alguns torrents al tram mig i baix del riu. Com el model de flux que es fa servir per la modelització és unidimensional, la millor manera de representar fluxos laterals és incorporant subconques on l'aigua circuli en aquesta direcció. A cadascuna de les subconques li correspon únicament un tram de riu. S'ha establert un codi d'identificació, W per a les subconques i R per als trams del riu.

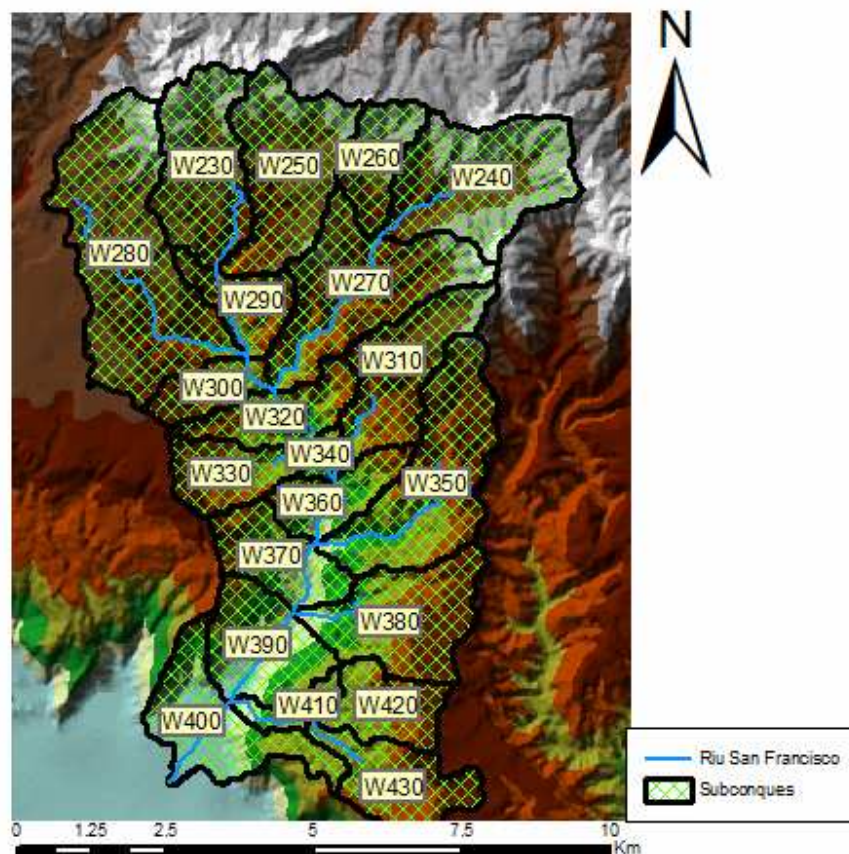
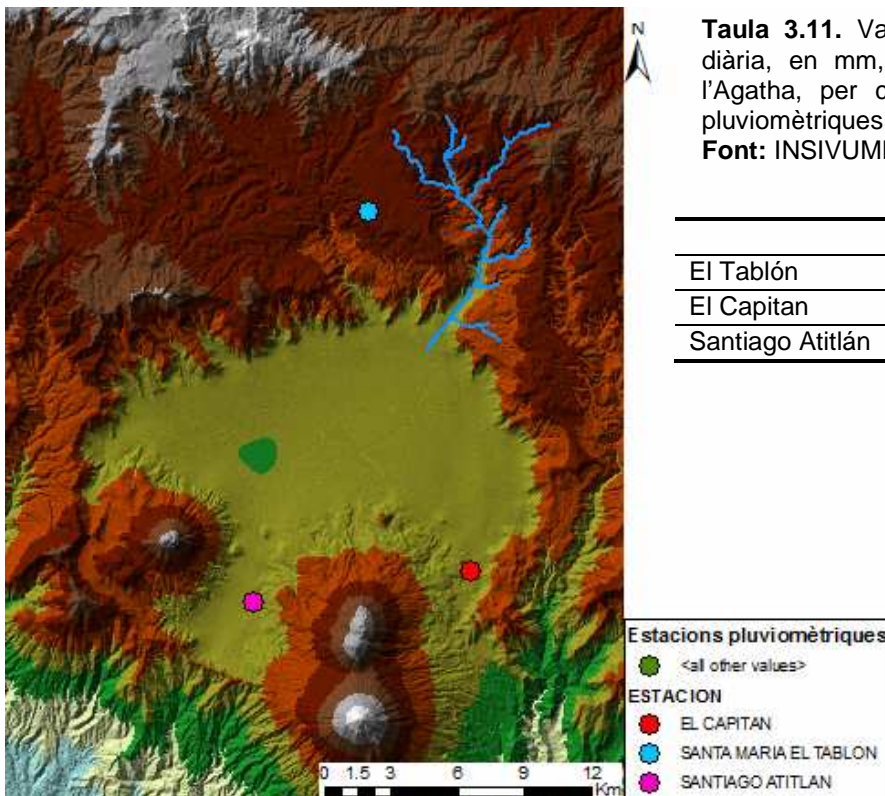


Figura 3.14. Model generat per l'HEC-GeoHMS per al riu San Francisco sobre el MDT .
Font: Elaboració pròpia.

3.2.3 Estimació de la precipitació en l'àrea d'estudi

Per a la determinació dels cabals punta en els episodis de l'Stan i l'Agatha es disposa de registres de precipitació en tres estacions pluviomètriques diferents: El Tablón, El Capitan i Santiago Atitlán (Figura 3.15). Els registres de precipitació per als mateixos fenòmens divergeixen força tenint en compte la proximitat de les estacions de mesura (Taula 3.11). Tot i que les estacions de El Capitan i Santiago es troben a una altitud similar, aquestes estan separades pels volcans Atitlán i Tolimán, que assoleixen alçades properes als 3000m. L'estació de El Capitan, a més, s'ubica en un indret on penetra aire humit del sud de Guatemala, per la qual cosa acostuma a presentar registres més elevats. L'estació de El Tablón, per ser la més propera a la conca i trobar-se en un indret amb condicions similars a la zona alta de la conca del riu San Francisco, esdevé la més indicada per extreure les dades pluviomètriques que es faran servir. Les dades de precipitació es corregiran amb el coeficient de simultaneïtat (K_A) en funció de la superfície de cadascuna de les subconques del model.



Taula 3.11. Valors màxims de precipitació diària, en mm, corresponents al Stan i a l'Agatha, per cadascuna de les estacions pluviomètriques.

Font: INSIVUMEH

	Stan	Agatha
El Tablón	166.7	215.8
El Capitan	144.5	322
Santiago Atitlán	230.7	145

Figura 3.15. MDT de la conca hidrogràfica del llac Atitlán, on es pot observar la ubicació de les diferents estacions meteorològiques de les quals es disposa d'informació.

Font: Elaboració pròpia.

3.2.4 Determinació de la pluja neta

Un cop determinada la precipitació màxima diària, per cada episodi, es pretén determinar la pluja neta a cada subconca. Per calcular el llindar d'escorrentiu s'ha fet servir el model del nombre de corba del Soil Conservation Service. Aquest model requereix l'entrada de tres paràmetres, corresponents a ús del sòl, geologia i pendent per tal determinar el nombre de corba, tabulat per l'SCS (Figura 3.16.d). S'han tingut en compte unes condicions inicials del sòl humides, ja s'ha comprovat als registres disponibles que els màxims diaris de precipitació que es faran servir venen precedits de diversos dies de precipitació.

Es poden apreciar els forts desnivells que hi ha al llarg de tota la conca (Figura 3.16.a), directament vinculats a la història geològica i els forts processos erosius que tenen lloc a la zona. El mapa de pendents està relacionat, doncs, amb el mapa geològic, ja que s'observa que les zones de major pendent són aquelles on es troben els materials més resistents, com és el cas de les tobres, roques d'origen volcànic. Mentrestant, les zones de dipòsits al·luvials, presenten relleus molt més suavitzats, així com l'al·luvió on s'ubica el municipi de Panajachel. El mapa d'usos del sòl ja està estandarditzat als usos establerts pel SCS, i es pot observar el petit grau d'urbanització de la conca, tret de la zona de la desembocadura, i el predomini de vegetació arbustiva baixa, zones de bosc mixt o pinars, així com el cultiu de blat de moro, cebes i altres llegums (3.16.c). Finalment, es pot observar com el nombre de corba incrementa especialment a les zones on la litologia és menys permeable (roques volcàniques) i on s'hi desenvolupa el centre poblat de Panajachel (Figura 3.16.b).

A partir la cartografia generada, s'han obtingut les mitjanes del nombre de corba per a cada subconca (Taula 3.12). Aquestes són transformades a llindar d'escorrentiu (P_0).

Amb aquestes dades tenim calculats els dos valors principals a partir dels quals es generarà l'hietograma de precipitació neta: La precipitació màxima diària i el llindar d'escorrentiu corresponent a les abstraccions hidrològiques.

Taula 3.12. Nombre de corba i precipitació llindar corresponent per a cada subconca.

Font: Elaboració pròpia.

Subconca	NC	P_0
W270	69.21	22
W280	65.27	27
W290	74.65	17
W300	68.90	23
W310	68.68	23
W320	78.99	13
W330	80.57	12
W340	79.09	13
W350	71.78	20
W360	80.86	12
W370	78.11	14
W380	66.08	26
W390	80.49	12
W400	84.03	10
W430	66.11	26

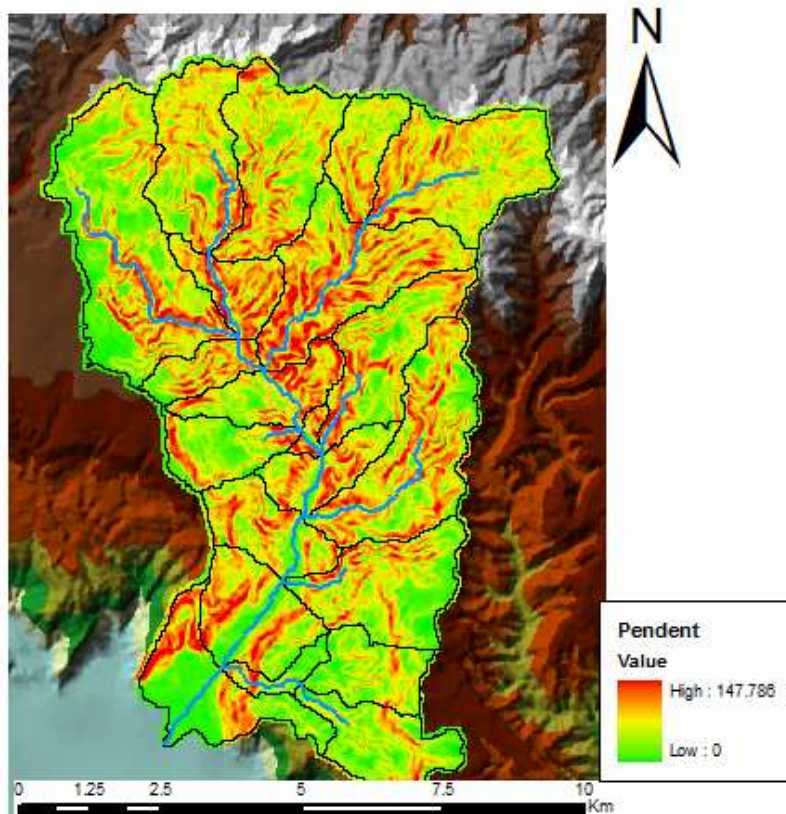


Figura 3.16.a. Mapa de pendent de la conca del Riu San Francisco.
Font: Elaboració pròpia.

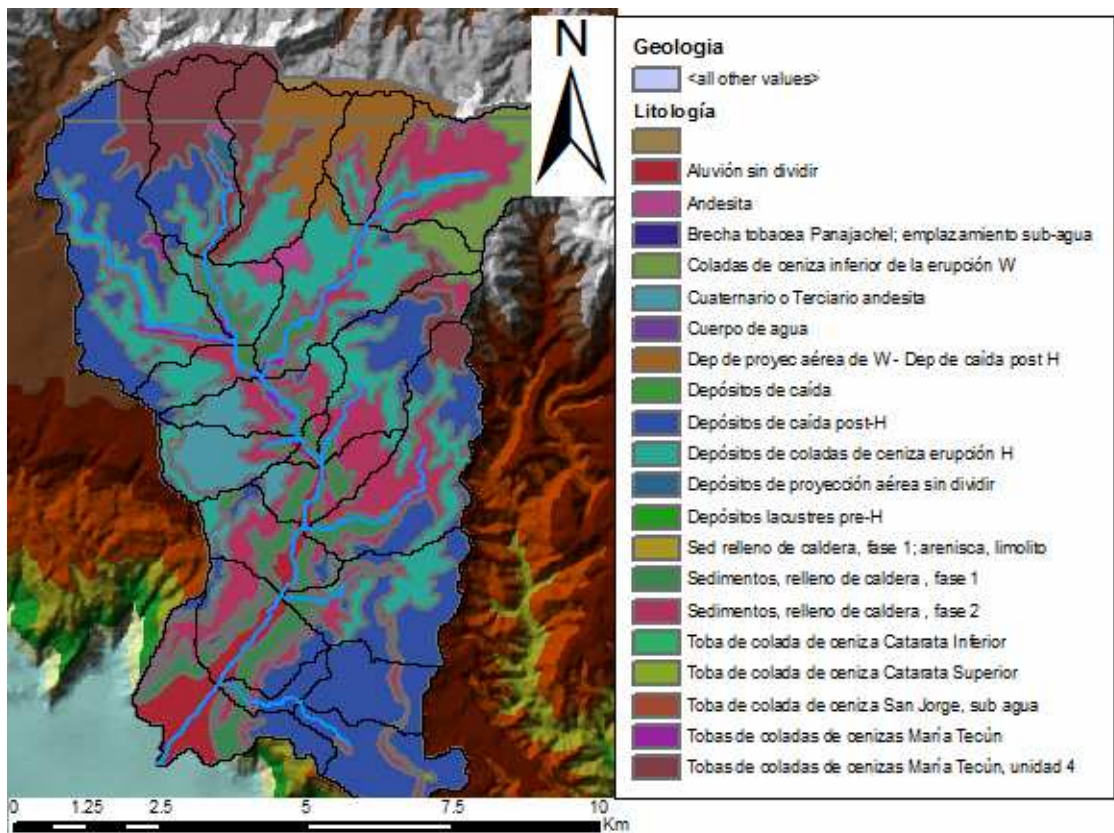


Figura 3.16.b. Mapa geol3gic de la conca del riu San Francisco.
Font: Elaboració pr3pia.

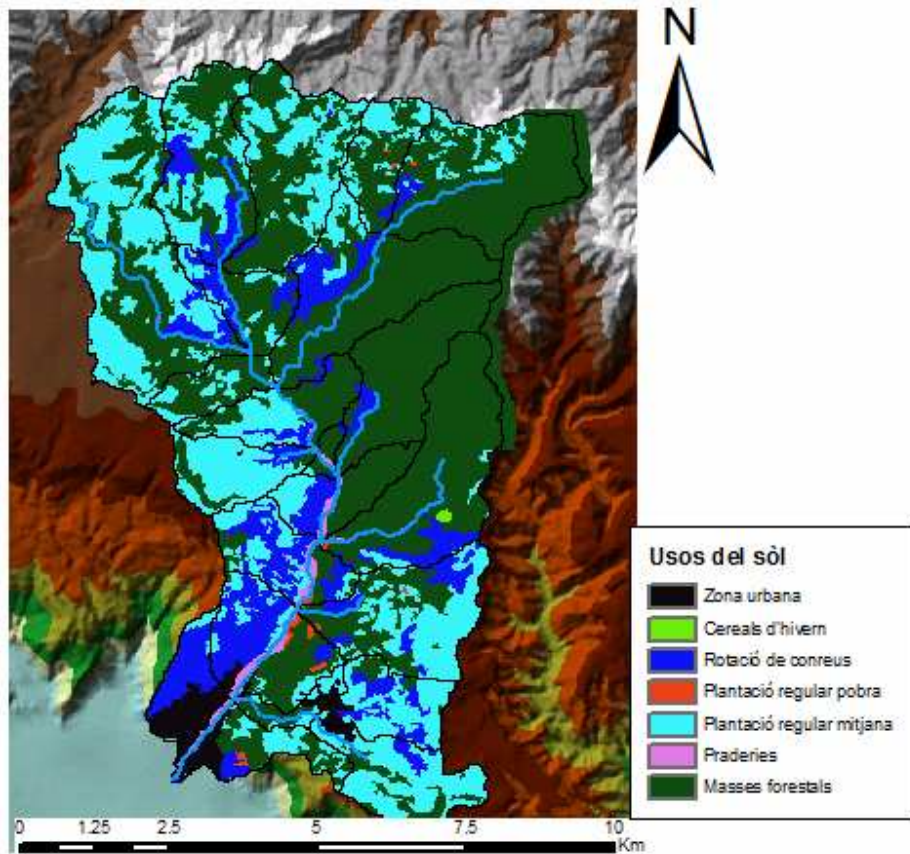


Figura 3.16.c. Mapa dels usos del sòl de la conca del riu San Francisco.
Font: Elaboració pròpia.

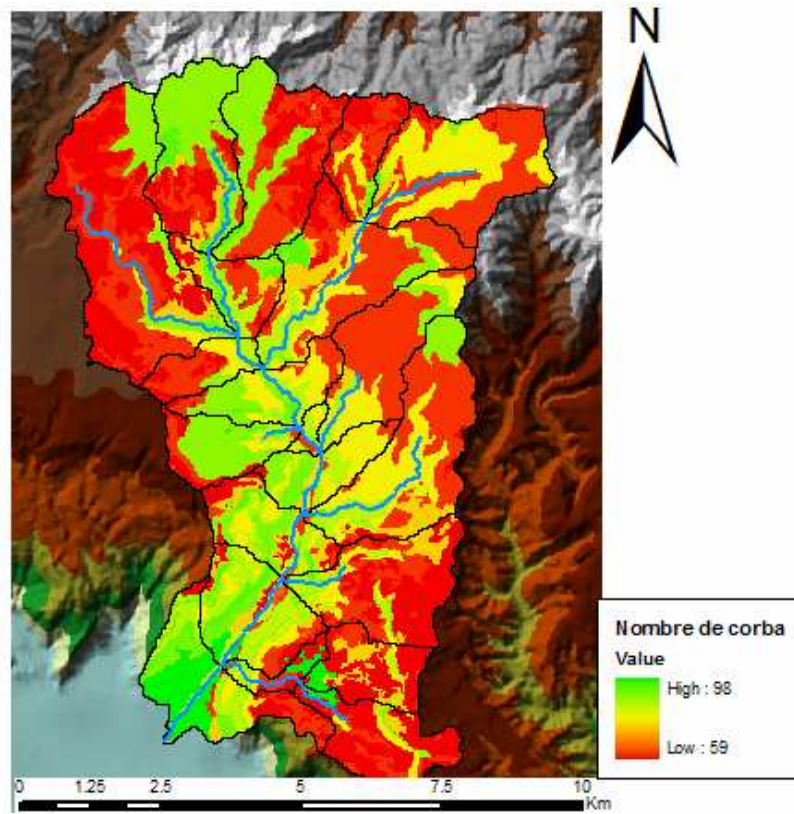


Figura 3.16.d. Mapa obtingut del nombre de corba de la conca del riu San Francisco.
Font: Elaboració pròpia.

3.2.5 Construcció de l'hietograma

El mètode emprat per la construcció de l'hietograma és el dels blocs alternats. Aquest mètode parteix de les corbes Intensitat-Durada-Freqüència (IDF), a través de les quals es pot obtenir el valor de la intensitat de la precipitació coneixent la durada de la mateixa i el volum de la precipitació P_d' . Les equacions IDF disponibles corresponents a Guatemala (Equació 2.18) no han proporcionat resultats acceptables, generant intensitats de precipitació horària màximes de l'ordre de 10mm/h, s'ha fet servir, de la mateixa manera que en el cas de la Riera de Santa Coloma, la fórmula 2.17 proposada per Téméz. S'ha dividit la precipitació diària en intervals d'una hora, calculant la intensitat de precipitació per a cadascun. Tot seguit s'ha determinat la precipitació acumulada a cada interval de temps, a partir de la qual s'ha calculat la precipitació neta (Taula 3.13). Els valors finals s'han ordenat de manera que el valor més elevat es situa al centre de l'hietograma i descendeix de manera alternada a dreta i a esquerra (Figura 3.17).

Taula 3.13. Exemple de càlcul de l'hietograma per la subconca W360 durant l'episodi de l'Agatha. Les columnes corresponen als intervals de precipitació (T), intensitat(I), acumulació(ΣP), pluja neta acumulada(ΣE), pluja neta generada ϵ i valors de l'hietograma, per interval de temps.

T(h)	I(mm/h)	ΣP (mm)	ΣE (mm)	E(mm)	Hietograma (mm)	E
1	89.73	89.733	43.870	43.870	1.514	
2	58.07	116.137	66.070	22.200	1.699	
3	44.38	133.129	81.004	14.934	1.921	
4	36.42	145.689	92.276	11.271	2.194	
5	31.12	155.624	101.304	9.028	2.535	
6	27.30	163.812	108.808	7.504	2.973	
7	24.39	170.748	115.205	6.397	3.554	
8	22.09	176.743	120.762	5.556	4.362	
9	20.22	182.005	125.657	4.895	5.556	
10	18.67	186.679	130.019	4.362	7.504	
11	17.35	190.870	133.941	3.923	11.271	
12	16.22	194.660	137.496	3.554	22.200	
13	15.24	198.110	140.737	3.242	43.870	
14	14.38	201.268	143.711	2.973	14.934	
15	13.61	204.174	146.450	2.740	9.028	
16	12.93	206.860	148.985	2.535	6.397	
17	12.31	209.351	151.340	2.355	4.895	
18	11.76	211.670	153.534	2.194	3.923	
19	11.25	213.835	155.584	2.050	3.242	
20	10.79	215.862	157.506	1.921	2.740	
21	10.37	217.765	159.311	1.805	2.355	
22	9.98	219.554	161.009	1.699	2.050	
23	9.62	221.241	162.612	1.602	1.805	
24	9.28	222.834	164.126	1.514	1.602	

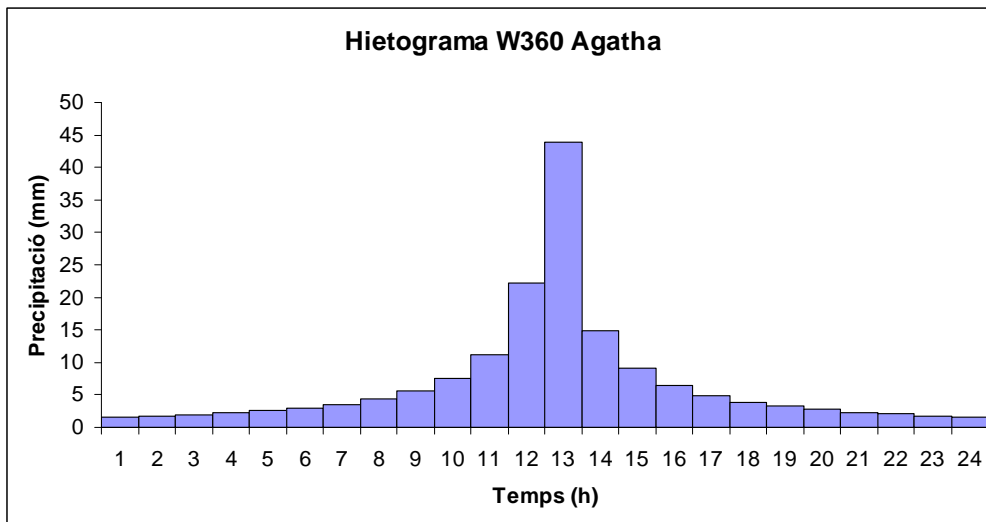


Figura 3.17. Hietograma determinat per la precipitació sobre la subconca W360 durant l'episodi de l'Agatha.
Font: Elaboració pròpia.

3.2.6 Càlcul de l'hidrograma de sortida

A partir del model de la conca (Figura 3.18) i en base als hietogrames obtinguts per cada subconca i temps de retorn, el programa HEC-HMS determina l'hidrograma i el cabal pic de sortida de cada subconca.

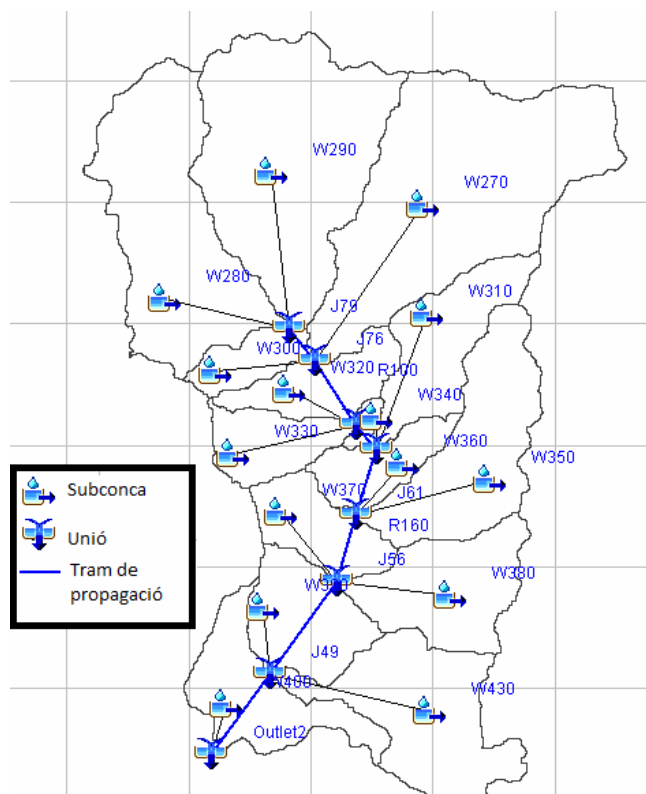


Figura 3.18. Model de la conca al programa de simulació HEC-HMS.
Font: Elaboració pròpia.

S'han establert els models meteorològics en la simulació, corresponents al volum de precipitació generat en les tempestes Stan i Agatha. La simulació s'ha realitzat durant un període de 34 hores, per incloure la corba d'esgotament de l'hidrograma un cop finalitzada la pluja. La propagació de l'avinguda s'ha estimat amb el mètode de Tlag (Apartat 2.3.2) , degut a la manca de hidrogrames o mesures del cabal pic per calibrar altres mètodes de propagació.

D'aquesta manera s'han obtingut els hidrogrames de sortida a la desembocadura (Figura 3.19). Els valors de cabal màxim són de 355 m³/s per l'Stan i de 533 m³/s per l'Agatha.

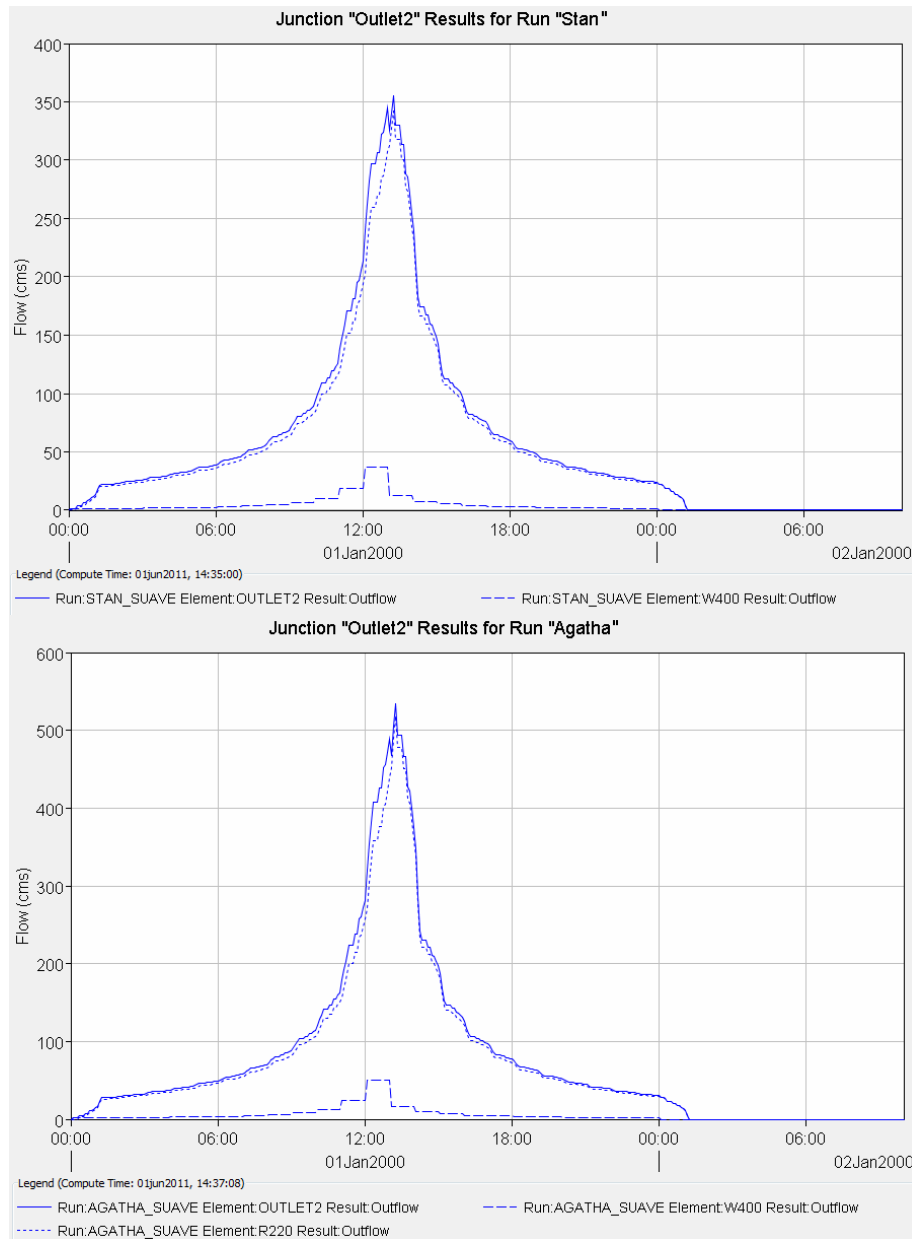


Figura 3.19. Hidrogrames obtinguts a la desembocadura del riu San Francisco per als episodis del Stan i l'Agatha.
Font:Elaboració pròpia.

3.2.7 Delimitació de les zones inundades

A partir del cabal d'avinguda estimat a cada subconca s'ha realitzat un càlcul del nivell d'aigua assolit a cada episodi, amb l'objectiu de determinar la zona inundada. Per dur a terme aquests càlculs s'ha fet servir el software HEC-RAS. Aquest software permet calcular, a partir del cabal pic i la topografia de la zona d'estudi quina serà la secció inundada i la velocitat del flux.

Ha estat especialment complicat definir les zones inundables a la zona del ventall al·luvial on s'ubica el municipi de Panajachel, ja que el MDT de partida presentava una resolució de 20x20 metres, mentre que per estudis d'inundabilitat es recomana fer servir un pas de malla de 5x5 metres o inferior (ACA, 2002). Aquesta limitació es fa patent especialment a seccions amples amb pendents suaus, com és la zona de la desembocadura. A més de la limitació que suposa la baixa resolució de les dades, els canvis en la llera del riu, deguts a les extraccions d'àrids o l'actual projecte d'aprofundiment de la llera del riu, fan que sigui impossible establir amb precisió el comportament que tindrà el riu davant d'un futur episodi d'inundació.

L'any 1949 es van construir murs de contenció a banda i banda del canal del riu que, fins ara, no han estat superats per cap avinguda. Per aquest motiu, s'han introduït aquests murs (SERRA, G. 2011) en el model amb alçada suficient per contenir les avingudes de l'Stan i l'Agatha (Figura 3.20).

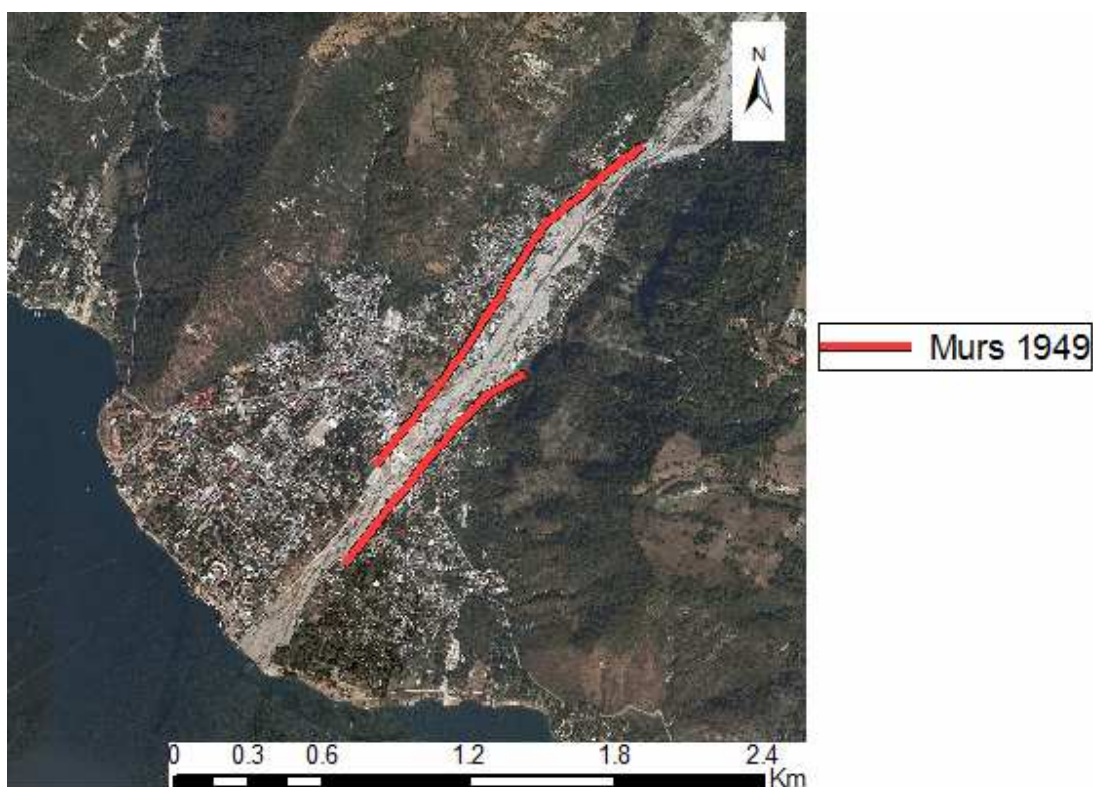


Figura 3.20. Ubicació dels murs que canalitzen el riu San Francisco construïts l'any 1949.
Font: Elaboració pròpia.

L'HEC-RAS determina la velocitat del flux a partir de l'equació de Manning, (Equació 2.22). Davant la dificultat d'ajustar el coeficient de Manning, s'han generat dues simulacions, amb coeficients de 0.04 i 0.07. Això permet obtenir un rang de velocitats del flux que ens dona la idea de la magnitud del mateix (Taula 3.14).

Les zones inundables resultants, malgrat la diferència de cabal entre els dos casos, són molt similars (Figura 3.21). Tot i que la manca de precisió del MDT al tram baix del riu genera algunes irregularitats de la llera respecte l'ortofotomapa, el flux no sobrepassa en cap cas els murs de contenció construïts el 1949. Davant un canal limitat pels murs de contenció o per pendents importants riu amunt, l'augment del cabal provoca un increment de la velocitat. S'han establert tres punts de control per comparar les velocitats del flux en l'Agatha i l'Stan. El punt A es troba a prop d'una antiga estació d'aforament aigües amunt, el punt B abans de l'entrada al ventall al·luvial i el punt C a la desembocadura (Figura 3.22).



Figura 3.21. Delimitació de les zones inundades per l'Stan i l'Agatha a Panajachel

Font: Elaboració pròpia.

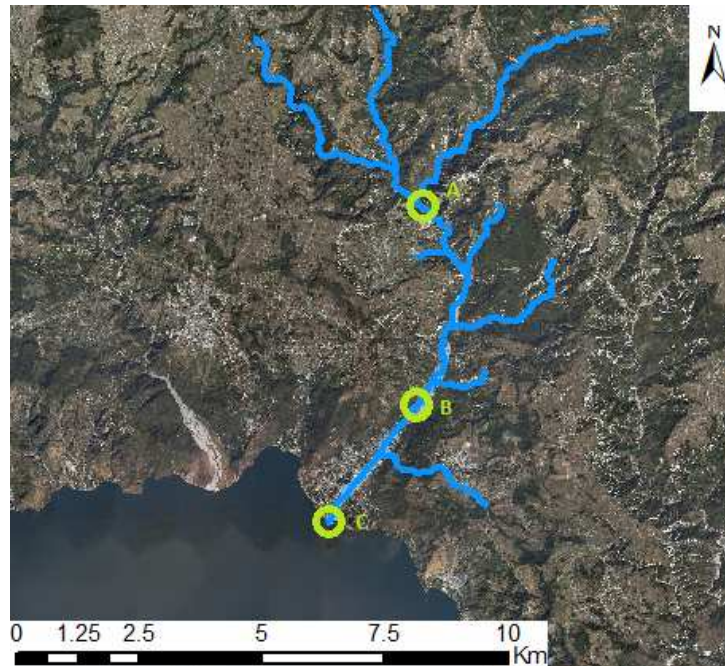


Figura 3.22. Punts de control de la velocitat del flux al Riu San Francisco.
Font: Elaboració pròpia.

Taula 3.14. Velocitat del flux (m/s) obtinguda amb l'HEC-RAS, segons el coeficient de Manning introduït.

	Stan		Agatha	
Manning	0.04	0.07	0.04	0.07
A	5.07	4.28	5.41	4.68
B	4.57	3.63	4.99	4.11
C	4.03	2.71	4.66	3.23

Les velocitats obtingudes són més elevades a les zones amb major pendent i es redueixen a prop de la desembocadura degut a l'equació de Manning (Equació 2.22). D'altra banda les velocitats assolides per l'Agatha són més elevades, amb una diferència de l'ordre de 0.4m/s.

3.2.8 Conclusions

Cal tenir en compte, com a limitació del model generat, que per la seva construcció s'ha fet servir un hietograma tipus, que distribueix la precipitació diària al llarg d'un dia. En el cas de l'Agatha, es té constància que la intensitat va ser molt elevada, és a dir, que és probable que la precipitació es concentrés en unes poques hores i no en tot el dia. Aquest fet generaria una major concentració d'escorrentiu i, per tant un major cabal i velocitat en l'avinguda.

A més, per la representació dels resultats, s'ha hagut de convertir tota la cartografia al sistema de coordenades que es fa servir a Guatemala: Guatemala Transverse Mercator (GTM), canviant el fals est i l'escala quan ha estat necessari. Les transformacions no han seguit sempre el mateix patró, en funció de l'origen de les dades, per la qual cosa algunes d'elles s'han dut a terme mitjançant el mètode prova-error.

Cal tenir en compte, com a limitació del model, que s'ha fet servir la corba Intensitat-Durada-Freqüència proposada per Téméz (Equació 2.17), que no correspon a la regió d'estudi. Aquest fet provoca que la distribució de l'hietograma de precipitació pugui no ser exacte i, malgrat el volum total de precipitació serà totalment vàlid, es probable que el pic màxim de precipitació hagi quedat atenuat respecte les precipitacions locals vinculades a les tempestes Stan i Agatha, més intenses que les previstes per l'equació proposada per Téméz.

Malgrat l'eficàcia que han tingut els murs de contenció que es van construir el 1949, s'han hagut de lamentar danys personals en les inundacions que han tingut lloc al riu San Francisco. Aquests danys tenen dos motius principals:

Les característiques del terreny, amb grans pendents i constituït per materials fàcilment erosionables, suposa un elevat risc d'esllavissades i inundacions de fang davant un episodi de precipitació intens. Aquest fenomen va ser el responsable de la catàstrofe succeïda al Cantón Panajab (Santiago Atitlán) durant l'huracà Stan (Figura 3.13). Aquest fenomen també incrementa la massa de material transportat pels rius durant les avingudes, que poden fer incrementar l'àrea inundada.

Malgrat la canalització, s'ha continuat construint dins la llera del riu, dins del canal delimitat pels murs (Figura 3.24). La manca de planificació territorial i control de la construcció és responsable en aquest cas de les catàstrofes vinculades a aquest fet. A prop de la desembocadura del riu, el mur queda tapat per un talús de sediments que assoleix una alçada de 2-3metres. Tot i que aquesta alçada no ha estat rebassada per les avingudes, la capacitat erosiva del flux ha produït esfondraments que han afectar greument a les construccions situades al llindar del talús. Dintre d'aquestes construccions també es situen equipaments públics com un poliesportiu, fet que fa patent el greu problema de planificació territorial que hi ha a la zona.

D'altra banda, un problema associat als murs del 1949 és que poden generar una falsa sensació de seguretat en front de les avingudes que es puguin ocasionar. Segons el registre disponible, el temps de retorn corresponent a un episodi de la magnitud de l'Agatha és d'uns 120 anys. Per això, es probable que davant un fenomen amb temps de retorn superior, els murs de contenció no siguin suficients per canalitzar tot el cabal. Això pot generar efectes devastadors si es té en compte el conseqüent increment de la velocitat i la baixa qualitat de les construccions de la zona.



Figura 3.23.a Construcció de vivendes dins de la llera delimitada pels murs de l'any 1949, al municipi de Panajachel.
Font: Elaboració pròpia.



Figura 3.23.b Construcció de vivendes dins de la llera del riu, al barri nord de Panajachel conegut com "La Manzanita" l'any 2007.
Font: PNUD, 2007.

4. CONCLUSIONS

4.1 Conclusions

Els estudis realitzats a les conques hidrològiques de la Riera de Santa Coloma i el Riu San Francisco per a moments i/o períodes de precipitacions importants han aportat gran quantitat d'informació de la qual es poden extreure les següents conclusions:

A l'hora de planificar la distribució territorial un dels paràmetres que cal tenir en compte són els riscos naturals associats al territori que es vol ocupar. En referència al risc d'inundacions s'ha de tenir en compte la delimitació de les zones inundables a les riberes fluvials, per tal d'evitar la construcció a zones inundables i minimitzar l'exposició de les activitats humanes a les avingudes.

En quant als efectes generats aigües avall per la impermeabilització d'una superfície degut a la urbanització, s'ha comprovat que l'increment del percentatge de superfície urbanitzada d'una conca pot generar efectes importants fins i tot si aquesta es construeix lluny de les lleres del riu, ja que incrementa el cabal generat, augmentant el risc d'inundació a la part baixa del riu.

Quan es treballa amb models hidràulics, cal conèixer, en tot moment les suposicions que implica cadascuna de les equacions que conforma el model. Només d'aquesta manera serà possible interpretar correctament els resultats del mateix.

La realització de models hidrològics precisos és una feina feixuga, que requereix la obtenció i administració d'una gran quantitat de dades. Aquestes dades, alhora, han de presentar la major precisió possible. S'ha observat, per exemple, que el MDT que s'ha fet servir en el model de Panajachel presenta una resolució massa petita, tot i que aquesta és de 20x20metres. La determinació de les zones inundables, generalment a zones planeres, requereix una gran precisió de les dades, i això no sempre és possible d'aconseguir. D'altra banda s'ha de tenir molta cura amb el tractament de les dades estadístiques, especialment amb les dades de precipitació, ja que representen l'entrada d'aigua al sistema hidrològic. Una determinació errònia de les dades de precipitació generarà resultats erronis.

L'increment de la urbanització en una conca determinada genera un doble efecte; per una banda redueix l'evaporació i la infiltració de l'aigua precipitada, incrementant el volum de precipitació efectiva i esorrentiu superficial. Per altra banda, la urbanització en zona inundable suposa una canalització de la llera i una reducció de la secció d'inundació, fet que incrementa la velocitat de l'avinguda, així com el nivell assolit per la làmina d'aigua. Els resultats dels models de la Riera de Santa Coloma indiquen que els efectes generats en l'avinguda per l'increment del percentatge de superfície urbanitzada no només genera un creixement del cabal generat sinó que a més desemboca en un augment significatiu de la velocitat. Una avinguda amb major velocitat, fins i tot si el cabal no incrementa de manera significativa, té major capacitat erosiva, agreujant els efectes generats a la zona inundada. A més, al reduir-se el temps necessari per assolir el cabal màxim, el risc augmenta ja que es redueix el temps de reacció per establir estats d'emergència o plans d'evacuació.

El problema de la urbanització, radica en el percentatge de la conca que s'impermeabilitza. Una mateixa superfície urbanitzada provocarà un increment significatiu del cabal d'avinguda a una conca petita mentre que a una conca de majors dimensions, el impacte sobre el cabal màxim serà menor.

En el cas del Riu San Francisco, hi ha dos factors que multipliquen el risc associat a les avingudes: l'exposició al risc, causada per una deficient planificació territorial, donada la ubicació de construccions a la mateixa llera del riu i la major vulnerabilitat per la baixa qualitat de les edificacions associada a la pobresa de la zona.

Com a conclusió final, s'ha d'entendre el sistema fluvial respectant-ne l'espai que ocupa, atorgant a les lleres i zones inundables usos del sòl que no multipliquin els efectes de les avingudes aigües avall. La manca de legislació en aquest sentit o la manca de control del compliment de la mateixa, quan n'hi ha, esdevé un fet determinant en els impactes causats per les inundacions. Es pot concloure que el fet que les inundacions representin una de les catàstrofes naturals que genera més víctimes i més danys és resultat d'una gestió del territori deficient, que no ha respectat els límits que genera cada riu.

4.2 Propostes de millora

Ha quedat patent en aquest projecte que la planificació territorial té molt a veure amb el risc associat a un episodi d'inundació. En aquest sentit, les directrius de gestió del sòl han d'anar orientades a evitar al màxim els riscos que genera la ocupació de zones inundables, bé mitjançant les obres hidràuliques corresponents, amb la qualitat necessària de la construcció o directament evitant la construcció en aquestes zones.

En el cas de que la zona inundable ja es trobi urbanitzada, és imprescindible establir plans d'emergència i plans d'evacuació, basats en estudis d'inundabilitat similars als que es realitzen en aquest projecte. En el cas que un municipi s'ubiqui a la zona inundable per un riu, s'ha d'evitar en la mesura que sigui possible l'excés d'urbanització aigües amunt, doncs pot generar un increment considerable del volum i la velocitat de l'avinguda.

Especialment a les conques grans, que ocupen diferents administracions territorials, resulta necessari l'establiment d'un organisme supraterritorial que gestioni la conca en tot el seu conjunt, per evitar conflictes d'interès, i evitar que es provoquin canvis substancials en el sòl de la conca aigües amunt, que puguin generar una catàstrofe de gran magnitud al curs baix del riu.

Per últim mencionar que les mesures correctores són adients sempre que no facin desaparèixer la sensació de risc a la població de la zona. Les obres hidràuliques s'acostumen a construir en base a una precipitació màxima probable (PMP), que no deixa de ser una estimació estadística del cabal màxim que pot assolir el riu. El perill de desbordament, però sempre s'ha de tenir present i s'han d'establir de la mateixa manera plans d'actuació i evacuació.

En el cas del Riu San Francisco (Guatemala), una de les mesures que s'està portant a terme després de l'avinguda de l'episodi de l'Agatha, és l'aprofundiment de la llera. Hi ha diverses màquines retirant sediment de la llera del riu per incrementar la secció que hi ha entre els murs de canalització. Tot i que aquesta mesura pot resultar bona a curt termini, tenint en compte la gran capacitat erosiva i de transport del riu al curs alt, el treball que s'està realitzant durant mesos es pot desfer amb un sòl fenomen de precipitació intensa. Potser seria més adient canalitzar el riu als barris més elevats de Panajachel, on el riu va desbordar a l'avinguda de la tempesta Agatha i el reubicament de les famílies que habiten en cases dins la llera o a sobre del propi mur de contenció.

5. BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. 2001. Delimitació de zones inundables per a la redacció de l'INUNCAT. Conques internes de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. 2002. Planificació de l'espai fluvial de la conca de la Tordera. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. 2003. Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

AGGETT G.R., WILSON J.P. (2009) Creating and coupling a high-resolution DTM with a 1-D hydraulic model in a GIS for scenario-based assessment of avulsion hazard in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 113, (1-2), p. 21-34.

CALLOW J. N., VAN NIEL K. P., BOGGS G. S. 2007. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis?. *Journal of Hydrology*, 332 (1-2), p. 30-39.

CHOW, V. T. ; Maidment, D. R.; Mays, L. W. 1988. *Applied Hydrology*, McGraw-Hill International editions

COOK A., MERWADE V. 2009. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377 (1-2), p. 131-142

KELLER A., BLODGETT H. 2004. *Riesgos naturales*. Ed. Pearson.

MOPU. 1999. *Máximas lluvias diarias en la España Peninsular*. Ministerio de Fomento. Madrid.

PAPPENBERGER F., BEVEN K., HORRITT M., BLAZKOVA S. 2005. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*, 302 (1-4), p. 46-69.

PASCHE E. 2007. *Surface hydrology*. University of Technology Hamburg-Harburg (TUHH). Hamburg.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD). 2007. *Plan de reconstrucción y reducción de riesgos del Departamento de Sololá. Proyecto GUA 03/005 12788*.

PONCE V. M. 1989. *Engineering hydrology. Principles and practices*. New Jersey. Ed. Prentice Hall.

SERRA, G. 2011. *Estudio de inundabilidad en la zona norte del lago Atitlán (Guatemala)*. Treball de recerca. Màster en geologia (riscos geològics).

SIDDIQUE-E-AKBOR A.H.M., HOSSAIN F., LEE H., SHUM C.K. 2011. Inter-comparison study of water level estimates derived from hydrodynamic-hydrologic model and satellite altimetry for a complex deltaic environment. *Remote Sensing of environment*, 115 (6), p. 1522-1531.

SURIYA S., MUDGAL B.V. 2011. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. Journal of Hydrology
TÉMEZ, J. R. 1978. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. MOPU. Madrid.

TODD, D. K.,(2005) Groundwater hydrology.

Adreçes web

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA :
<http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca/>

ASSOCIATED PROGRAM ON FLOOD MANAGEMENT:
<http://www.apfm.info/>

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS:
<http://www.cred.be/>

GUATEAGUA
www.infoiarna.org.gt/guateagua

INSIVUMEH
www.insivumeh.gob.gt

INSTITUT CARTOGRÀFIC DE CATALUNYA :
<http://www.icc.cat/>

6. Pressupost

Recursos humans			
Concepte	Hores	Preu(€)/hora	Total (€)
Recerca Documental	103	10	1030
Recerca de dades	42	10	420
Elaboració mapes, memòria, reunions, etc.	154	13	2002
Total(€)			3452

Desplaçaments			
Concepte	Preu(€)	Unitat(km)	Total (€)
Combustible	0,19€/km	335	63.65
Total (€)			63.65

Material fungible			
Concepte	Unitat	Preu(€)	Total (€)
Impressió del projecte	3	30	90
Format digital treball (CD)	4	0.3	0.9
Enquadernació	4	2	8
Total (€)			98.9

Cost total	
Concepte	Preu(€)
Recursos humans	3452
Desplaçaments	63.65
Recerca de dades	78.5
Material fungible	98.9
Subtotal(€)	3693.05
	IVA (18%) 664.75
Total	4357.80

Els preus dels recursos humans i els desplaçaments estan basats en la guia d'honoraris professionals orientatius publicada pel Col·legi d'Ambientòlegs de Catalunya.

7. PLANNING PROJECTE

Tasques realitzades	Setmana	Planejament del projecte		Recerca documental		Recerca de dades		Tutorials dels programes de modelització		Elaboració de mapes		Elaboració dels models		Reunions amb el tutor		Redacció		Entrega de la memòria		Preparació de la defensa oral		Defensa oral	
		P	R	P	R	P	R	P	R	P	R	P	R	P	R	P	R	P	R	P	R	P	R
Nov-2010	1																						
	2	X	X												X	X							
	3	X	X	X	X																		
Des-2010	4			X	X			X	X														
	1			X	X			X	X					X									
	2			X	X			X	X														
Gen-2011	3																						
	4																						
	1																						
Feb-2011	2			X	X		X	X	X					X	X								
	3			X	X	X	X	X	X							X							
	4			X	X			X	X					X	X								
Mar-2011	1				X	X	X			X	X	X	X										
	2				X	X	X			X	X	X	X	X	X								
	3						X				X	X	X										
Abr-2011	4										X	X	X	X	X			X					
	1											X	X									X	
	2											X	X	X	X							X	
Mai-2011	3											X	X									X	
	4											X	X	X	X	X	X					X	
	1				X							X	X		X	X	X						
Jun-2011	2				X					X	X		X	X			X	X					
	3				X						X	X			X	X	X						
	4										X				X	X	X	X					
Jul-2011	1														X	X					X	X	X
	2														X	X					X		X
	3																						
4																							

P= Previst R= Real

ANNEXOS

Annex I. Exemple de càlcul d'un hidrograma

Dades inicials

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

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

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

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

$$J=0,008$$

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

pluja neta
 $\mu=0$

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

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

Hidrograma adimensional		Hidrograma unitari		
t/Tp	Q/Qp	t (h)	Q (m3/s)	
0.0		0.000	0.000	0.000
0.1	0.030	0.401	0.777	0.777
0.2	0.100	0.803	2.592	2.592
0.3	0.190	1.204	4.924	4.924
0.4	0.310	1.605	8.034	8.034
0.5	0.470	2.007	12.181	12.181
0.6	0.660	2.408	17.105	17.105
0.7	0.820	2.809	21.251	21.251
0.8	0.930	3.210	24.102	24.102
0.9	0.990	3.612	25.657	25.657
1.0	1.000	4.013	25.916	25.916
1.1	0.990	4.414	25.657	25.657
1.2	0.930	4.816	24.102	24.102
1.3	0.860	5.217	22.288	22.288
1.4	0.780	5.618	20.214	20.214
1.5	0.680	6.020	17.623	17.623
1.6	0.560	6.421	14.513	14.513
1.7	0.460	6.822	11.921	11.921
1.8	0.390	7.223	10.107	10.107
1.9	0.330	7.625	8.552	8.552
2.0	0.280	8.026	7.256	7.256
2.2	0.207	8.829	5.365	5.365
2.4	0.147	9.631	3.810	3.810
2.6	0.107	10.434	2.773	2.773
2.8	0.077	11.236	1.996	1.996
3.0	0.055	12.039	1.425	1.425
3.2	0.040	12.842	1.037	1.037
3.4	0.029	13.644	0.752	0.752
3.6	0.021	14.447	0.544	0.544
3.8	0.015	15.249	0.389	0.389
4.0	0.011	16.052	0.285	0.285
4.5	0.005	18.059	0.130	0.130
5.0	0.000	20.065	0.000	0.000

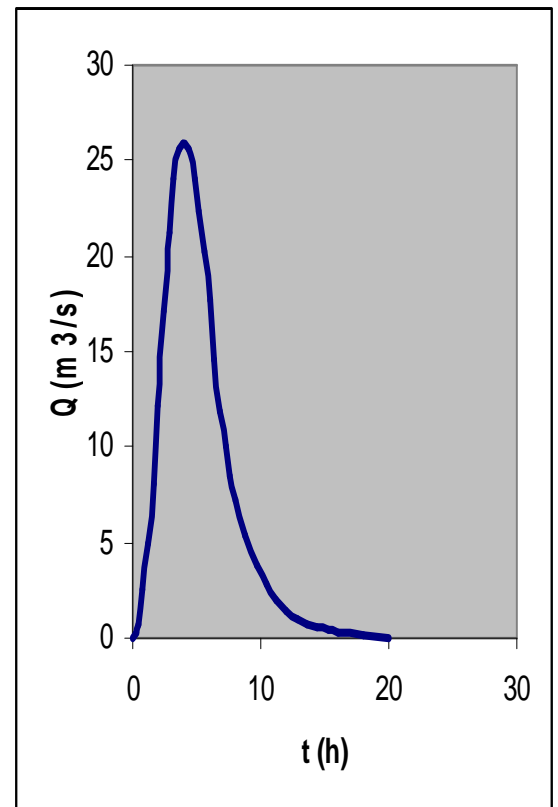


Figura AI.1. Hidrograma unitari resultant

Taula AI.1. Determinació de l'hidrograma unitari a partir de l'hidrograma adimensional de l'SCS

Annex II. Mètode del Nombre de Corba de l'SCS

En aquest annex s'exposa d'una manera clara i breu el càlcul del llindar d'escorrentiu P0 segons el model de l'SCS.

L'SCS va tabular el nombre de corba segons l'ús del sòl, el pendent, les condicions anteriors d'humitat (AMC) i el grup del sòl (Taula AII.2).

Nivell anterior d'humitat

El nivell d'humitat corresponent al mètode del nombre de corba de l'SCS es determina en funció de la precipitació corresponent als 5 dies anteriors al dia de màxima precipitació (Taula AII.1).

Taula AII.1. Criteri per determinar el nivell d'humitat anterior (AMC), en funció de la precipitació durant els 5 dies previs al dia de màxima precipitació.
Font: PONCE, 1989.

AMC	Precipitació anterior 5-d (cm)	
	Estació latent	Estació de creixement
I	<1.3	<3.6
II	1.3-2.8	3.6-5.3
III	>2.8	>5.3

Les taules del nombre de corba s'apliquen per a condicions anteriors d'humitat de tipus II. Per condicions seques del tipus I o humides del tipus III, s'han d'aplicar la fórmules:

$$NC(I) = \frac{4,2 \cdot NC(II)}{10 - 0,058 \cdot NC(II)} \quad (AII.1)$$

$$NC(III) = \frac{23 \cdot NC(II)}{10 + 0,13 \cdot NC(II)} \quad (AII.2)$$

Grup del sòl

El model de l'SCS classifica els sòls en quatre tipus, en funció de la litologia que el conforma:

- A. Sòls en què l'aigua infiltra ràpidament, encara que estiguin molt humits. Estan formats per sòls granulars de poca potència, bàsicament sorres i sorres llimoses. (Taula AII.3)
- 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, franco-argilo-sorrenques o franco-llimoses. Normalment estan ben o moderadament ben drenats. (Taula AII.4)
- 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. (Taula AII.5)
- D. Sòls amb una infiltració molt lenta quan estan 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 molt poca potència (litosòls). (Taula AII.6)

Ús del sòl

Cal tenir molta cura amb la cartografia d'usos del sòl, ja que és un paràmetre variable en el temps, de manera que s'ha de mirar de tenir les dades més recents possibles. També resulta interessant introduir en el territori possibles canvis en els usos del sòl, per veure quins efectes suposaran a nivell hidrològic. Per facilitar la classificació l'ACA ha publicat una taula amb els usos del sòl estandarditzats segons el SCS (Taula AII.7). En el cas dels cultius, caldrà conèixer si el cultiu es realitza segons la direcció del màxim pendent o seguint les corbes de nivell. Aquesta informació es pot obtenir a partir de fotografies aèries o ortofotomapes.

Pendent

Per al càlcul del pendent en cada punt de la conca és convenient fer servir un MDT, que ens permeti generar una capa on es separin les superfícies amb inclinacions superiors al 3% de les inferiors.

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
Masses forestals (boscos, garriga, etc.)		Bona	25	38	67	74
		Molt clara	56	75	86	91
		Clara	45	68	78	83
		Mitjana	40	60	69	76
		Espessa	36	52	62	68
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 AII.2. Valors del nombre de corba NC en condicions anteriors d'humiditat del tipus II.
Font: ACA, 2001

Codi paper	Codi digital	Descripció
C2A	C12	Calcàries bioclàstiques i esculloses
C2D	C2E	Calcàries i calcarenites localment dolomititzades
C0B	C4C	Microconglomerats i gresos
C0B	C0A	Microconglomerats i gresos
C0D	C0C	Calcàries. Localment inclou els materials del Caradocia-Ashgîl-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, brexes 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 AII.3. Codis de la cartografia geològica de l'ICC que corresponen al sòl de tipus A segons la classificació de l'SCS..

Font: ACA, 2001

Codi paper	Codi digital	Descripció
C1A	C1A	Breixes 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 lídites al sostre
J1	J1	Breixes, 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	Breixes, conglomerats i gresos
N1F	N1F	Lutites, gresos i conglomerats
N1E	N1G	Arcoses i conglomerats
N2A	N2A	Gresos silícics i bioclàstiques
N2F	N2B	Breixes
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 breixes
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, breixes 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	Breixes
P6C	P6C	Gresos i margues grises
P6F	P6E	Conglomerats i gresos
P7B	P7B	Gresos, margues, calcàries esculloses
P7C	P7BA	Nivells de breixes 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	Lliris i còdols
Q3G	Q3G	Graves, gresos i lutites
T1	T1	Conglomerats de quars, gresos i lutites roges
T23	T23	Dolomies, calcàries i margues

Taula AII.4. Codis de la cartografia geològica de l'ICC que corresponen al sòl de tipus B segons la classificació de l'SCS.

Font: ACA, 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 orbitoïnes
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	Llms, margues i gresos bioclàstics
OA	O	Conglomerats, grauvaques, lutites, calcofillites i vulcanites, calcàries, pelites, quarsarrites; 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	Llms lacustres
Q2B	Q2B	Lutites, llms i crostes
Q2E	Q2E	Argiles i còdols
S	S	Pissarres ampelítiques, localment calcàries lidites i radlarites
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 AII.5. Codis de la cartografia geològica de l'ICC que corresponen al sòl de tipus C segons la classificació de l'SCS.

Font: ACA, 2001

Codi paper	Codi digital	Descripció
RVQB	BNQ	Basanites
RVQA	BTM	Basalts
RVNA	BTQ	Basalts
COC	COB	Materials volcànics
DI	DI	Diorites quarzíferes, diorites i roques bàsiques
GNA	GNA	Gneiss moscovitics; biotitics
GNB	GNB	Anatexites en gneiss moscovitics; biotitics
GRA	GRA	Leucogranits
GRB	GRB	Granits leucocràtics
GRC	GRC	Granits biotitics
GRDA	GRDA	Granodiorites biotitiques
GRDB	GRDB	Granodiorites biotítico-hornblèndiques
GRDC	GRDC	Granodiorites biotitiques amb ortopiroxè
GRF	GRF	Granòfir
GLM	GRIT	Granit leucocràtic moscovitic (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 porfiritas
MPA	PEGA	Microgranitoids, pegmetites i aplites granitiques
PRQ	PRQ	Piroclastes
TOA	TOA	Tonalites biotitiques o biotítico-hornblèndiques
TOB	TOB	Tonalites biotitiques o biotítico-hornblèndiques amb ortopiroxè
RVN	TRM	Traquites
UTB	UTB	Roques ultrabàsiques

Taula AII.6. Codis de la cartografia geològica de l'ICC que corresponen al sòl de tipus D segons la classificació de l'SCS.

Font: ACA, 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	Nucls 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 pobre
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

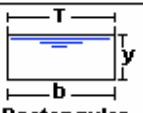

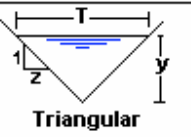
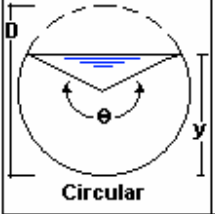
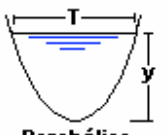
Taula AII.7. Correlació de codis utilitzats en la cartografia d'usos del sòl editada per l'ICC i codis d'usos del sòl considerats en el mètode de l'SCS.

Font: ACA, 2001

Annex III. Equació de Manning

Taula AIII.1. Fórmules del radi hidràulic per seccions geomètriques comuns.

Font: Chow V.T., 1959.

Tipo de secció	Àrea A (m ²)	Perímetre mojado P (m)	Radio hidràulic Rh (m)	Espejo de agua T (m)
 Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta-\text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1-\frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$(\text{sen}\frac{\theta}{2})D$ ó $2\sqrt{y(D-y)}$
 Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Taula AIII.2. Valors de Manning segons la descripció de la morfologia de la llera.

Font: Chow V.T., 1959.

NATURAL STREAM			
Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
1. Minor Stream (top width at flood stage < 100 ft)			
a. Stream on plain			
(1) Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
(2) Same as above, but more stones or weeds	0.030	0.035	0.040
(3) Clean, winding, some pools or shoals	0.033	0.040	0.045
(4) Same as above, but some weeds or stones	0.035	0.045	0.050
(5) Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
(6) Same as (4), but more stones	0.045	0.050	0.060
(7) Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
(8) Very weedy reaches, deep pools, or floodway with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150

Annex IV. Generació d'un model hidrològic mitjançant l'HEC-geoHMS

Probablement, el software més utilitzat en la modelització hidrològica arreu del món, és el compilat per l'HEC (Hydrologic Engineering Center) de la unitat d'enginyers de l'exèrcit dels Estats Units. L'HEC-HMS es tracta del primer d'una sèrie de programes que faciliten la simulació dels processos hidrològics, entre d'altres, la determinació de episodis d'inundació, especialment útils per a la gestió del territori. Aquest programa simula processos de transformació precipitació-escorrentiu. Així, partint d'una determinada precipitació i unes condicions del territori fixades, es calcularà un hidrograma, obtenint el cabal pic d'inundació. Aquestes dades s'introduiran posteriorment en el següent mòdul del programa, l'HEC-RAS, per determinar el nivell que assolirà l'aigua segons el cabal pic prèviament estimat.

Tant l'HEC-HMS com l'HEC-RAS tenen les seves corresponents aplicacions compatibles amb l'ArcGis. D'aquesta manera, a partir de la introducció de dades topogràfiques es podran estructurar els models hidrològics corresponents a un territori.

L'objectiu d'aquest annex és explicar, amb instruccions senzilles i d'una manera entenedora, quin és el procediment a seguir per a la construcció d'un model hidrològic mitjançant l'HEC-HMS.

Com a punt de partida ens faran falta les següents dades:

Model Digital del Terreny (MDT) i la capa en format Shape de la projecció del riu.

Abans de començar cal comprovar que totes les dades es troben projectades en les mateixes coordenades per evitar problemes de compatibilitat.

Si el procediment es realitza en l'ordre que s'exposa a continuació, el programa oferirà les dades adients a cada pas per a la construcció del model. Si alguns processos es repeteixen o es realitzen de forma desordenada caldrà revisar curosament les dades d'entrada ofertes pel programa.

Determinació de les subconques

Un dels punts clau en la creació d'un model hidrològic és la determinació de les subconques que es faran servir per l'estudi d'inundabilitat d'un riu, les quals depenen en gran mesura de les característiques del terreny com la geologia, el pendent o els usos del sòl. El programa HEC-geoHMS ens permet determinar les bases per a la construcció d'un model hidrològic. Genera una línia general de flux, així com un seguit de subconques amb una estructura hidrològica correcte, a partir del model d'elevacions del terreny i un mapa amb la projecció del riu. En el cas que sigui necessari, les divisions de les subconques que ens determinarà el programa podran ser modificades per obtenir uns resultats més acurats.

Processament del MDT

Abans de començar cal desar el mapa amb el MDT i la projecció del riu objecte del model (Figura AIV.1).

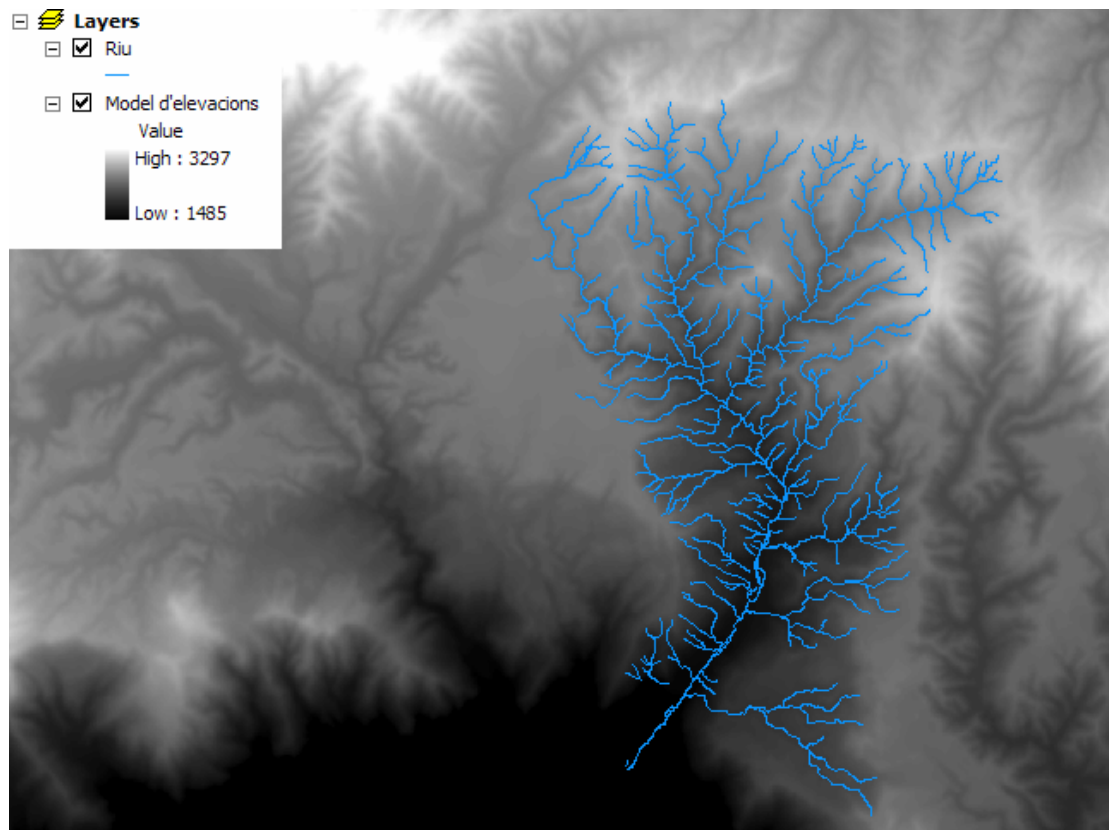


Figura AIV.1. Captura de pantalla de les dades d'entrada: la capa shape amb la forma del riu i el MDT.

1- Recondicionament del MDT

En primer lloc es recondiciona el MDT, per tal que la projecció del riu correspongui amb la màxima depressió de la secció de la depressió fluvial. El recondicionament es realitza mitjançant un mètode anomenat "AGREE" que es basa en l'aprofundiment del llit del riu

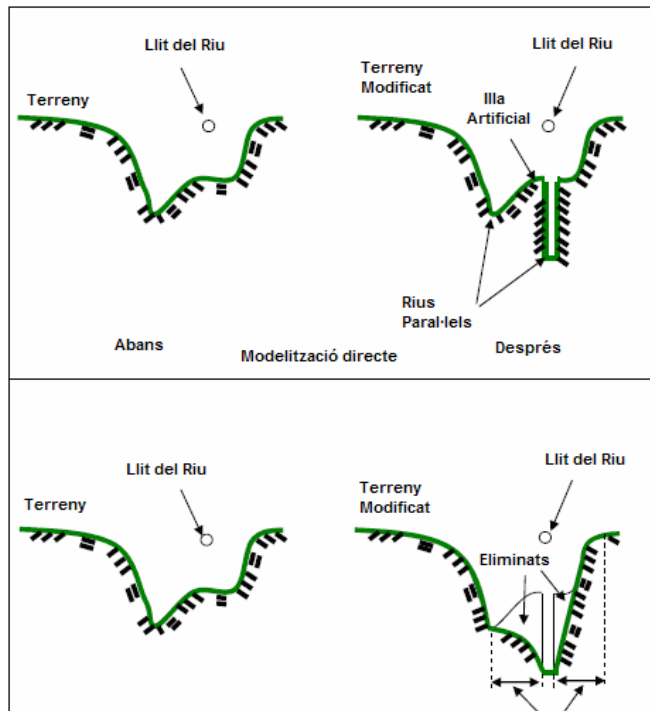


Figura AIV.2. Seccions esquemàtiques del funcionament del recondicionament mitjançant el mètode AGREE.

i la generació de pendents descendents als marges d'aquests, anomenats buffers (Figura AIV.2).

Aquest procés es realitza a la barra d'eines d'HEC-geoHMS:

Terrain preprocessing → **DEM manipulation** → **DEM recondiotining.**

Apareixerà una finestra on caldrà introduir el nom del MDT original i de la projecció del riu, el nom de sortida desitjat, "AgreeDEM" per defecte. Els següents paràmetres, que habitualment no cal modificar, indiquen el número de cel·les que formaran la zona buffer, i el valor que disminuirà tant la zona buffer com el propi llit del riu.

2- Correcció hidrològica del MDT

Per a la realització d'estudis d'inundabilitat es requereix un MDT hidrològicament corregit que s'aconsegueix amb l'eliminació de petites depressions del terreny. Com volem modelitzar successos d'inundació, i en casos de fortes precipitacions aquestes depressions estarien plenes d'aigua, resulta molt més senzill eliminar-les per tal que el model presenti un flux de l'aigua en superfície més proper al real. Per realitzar aquest procés: **Terrain Preprocessing** → **DEM manipulation** → **Fill Sinks**. A la finestra emergent només caldrà introduir el MDT recondicionat i el nom de sortida desitjat per al MDT hidrològic, per defecte "Fil". Ha de romandre seleccionada la opció per defecte "Fill all". El MDT obtingut serà el punt de partida per la generació de subconques i trams del model.

3- Direcció del flux

Aquest procés computa la direcció del flux per cada cel·la del MDT. Per realitzar aquest pas: **Terrain Preprocessing**→**Flow Direction**. Caldrà comprovar que el MDT hidrològic d'entrada és correcte i determinar el nom de la capa de sortida, "Fdr" per defecte. En el cas que tinguéssim una capa amb els límits de la conca que volem estudiar, es pot introduir a la opció "Outer Wall Polygon", fet que ens permetrà estalviar temps en la construcció del model, que ja no es realitzarà sobre tota la superfície del MET sinó dins dels límits de la conca.

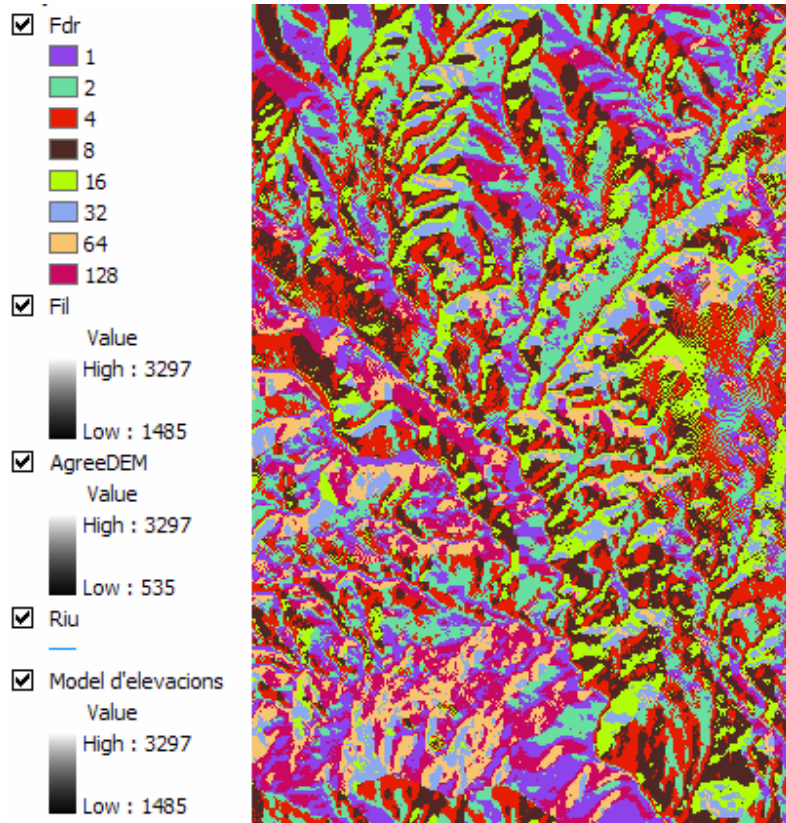


Figura AIV.3. Mapa resultant del càlcul de la direcció del flux.

4- Acumulació del flux

Aquest pas determina , per a cada cel·la del MDT, el nombre de cel·les que hi drenen. És a dir, que es podria calcular la superfície que drena un determinat punt multiplicant les cel·les que hi drenen per la superfície de la cel·la del MDT. Per realitzar aquest procés: **Terrain preprocessing**→**Flow Accumulation**. Només caldrà comprovar que el nom de la capa de direcció del flux és correcte i establir el nom de l'acumulació del flux, que per defecte és Fac.

Tal i com es pot observar a la llegenda del mapa de la figura V.3, els algoritmes del programa generaran 8 possibles direccions del flux (Figura AIV.4).

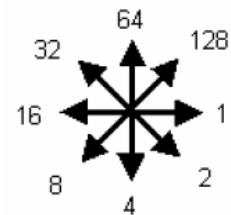


Figura AIV.4. Possibles direccions del flux calculades pel programa.

5- Determinació del corrent: Es tracta d'un procés en el qual es determinen les cel·les, dintre del llit del riu, que acumulen un escorrentiu superficial superior a una determinada superfície. Els trams del riu que superin aquesta superfície de drenatge formaran part de la línia de flux general del model. Aquest procés serveix per simplificar les nombroses ramificacions que presenten els rius, especialment aigües amunt. Per defecte, la superfície que ens proposa el programa és el 10% de la conca més gran que es troba al MDT. Per realitzar aquest pas: **Terrain preprocessing**→**Stream Definition**, on s'ha d'introduir la capa d'acumulació de flux i el nom per la nova capa que es generarà, per defecte Str. A més, una finestra addicional ens permetrà determinar quina superfície mínima de drenatge es vol determinar.

6- Segmentació del corrent: Un cop s'ha determinat la línia de flux general, cal procedir a la seva segmentació, a partir de la qual es conformaran les diferents subconques. Així, el resultat del procés anterior es segmentarà en fragments allà on hi hagi unions de línies de flux, és a dir, a indrets on el riu fusiona diferents branques de la seva estructura. El procés es realitza: **Terrain Preprocessing**→**Stream Segmentation**. Caldrà introduir en aquest cas el nom de dues capes: la de direcció del flux i la de determinació del corrent. El nom d'aquesta capa, per defecte, és StrLnk (Figura AIV.5).

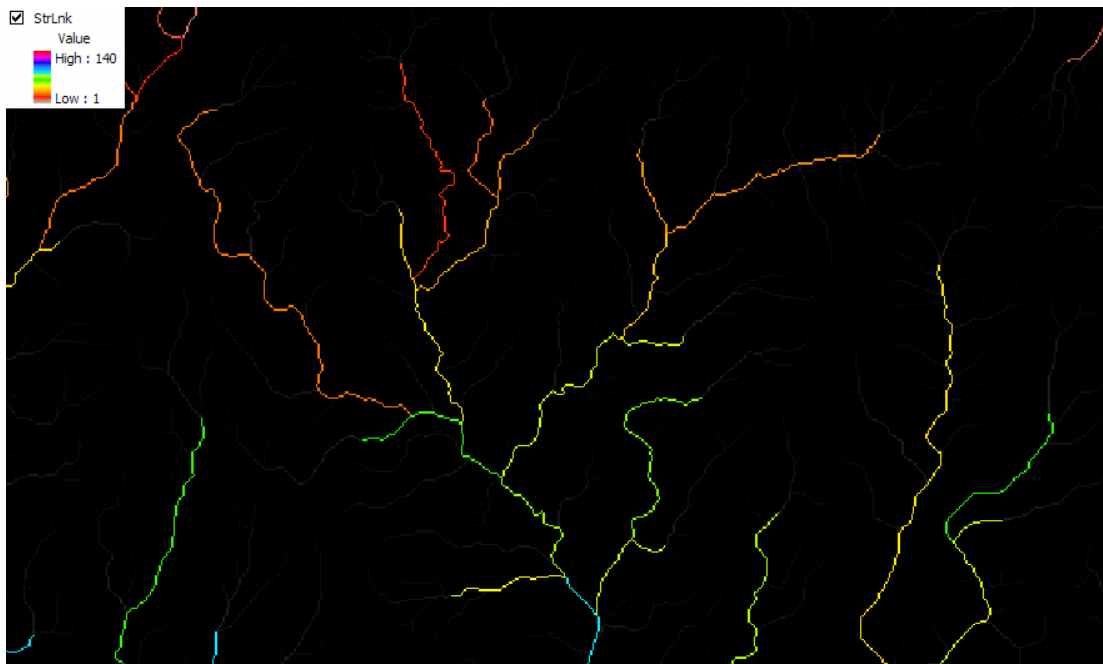


Figura AIV.5. Resultat del procés de segmentació del corrent.

7- Delineació de la xarxa de subconques: Mitjançant aquest procés es genera una subconca de drenatge per cada segment creat en el pas anterior, donant lloc a la divisió de l'estructura fluvial en subconques. El procés es realitza seguint: **Terrain Preprocessing**→**Catchment Grid Delineation**, on s'ha d'introduir la capa de la direcció del flux i la de la segmentació del corrent. El nom de la capa generada és, per defecte, "Cat".

8- Processament dels polígons de les subconques: En aquest pas es crea una capa vectorial de polígons, amb les subconques generades a l'apartat anterior. Seleccionant: **Terrain Preprocessing**→**Catchment Polygon Processing**. Aquí només caldrà indicar

la capa de la xarxa de subconques generada prèviament. La capa vectorial generada rep, per defecte, el nom de "Catchment".

9- Processament de la línia de drenatge: Consisteix en la vectorització de la línia principal de flux creada en els apartats anteriors. Seguint la ruta: **Terrain Preprocessing**→**Drainage Line Processing**. També caldrà indicar el nom de la capa de direcció de flux i la capa de segmentació del corrent. El nom per defecte d'aquesta capa és "DrainageLine".

D'aquesta manera ens queden configurats, en formats fàcilment treballables, les capes vectorials amb les subconques i la línia de flux principal, (Figura AIV.6). A partir d'aquest punt, de fet, es pot treballar amb altres eines, aconseguint resultats correctes. Malgrat això, HEC-geoHMS, permet anar més enllà i processar les dades per enllestir el projecte en format HEC-HMS.

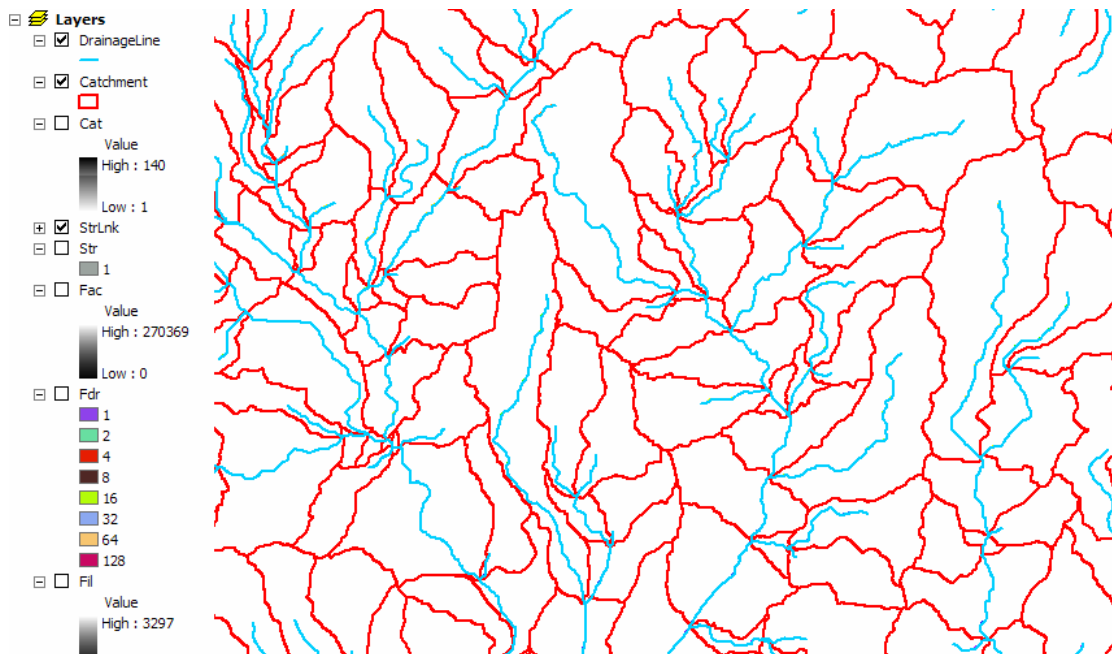


Figura AIV.6. Capes de la línia de drenatge (blau) i dels polígons de les subconques (vermell).


10- Agregació de la xarxa hidrològica: Aquest pas, lluny de tenir cap mena de significat hidrològic, és fonamental per a una correcta generació del model HEC-HMS. Es tracta de l'agregació a cada punt de d'unió de diferents trams de riu, de les conques que es situen aigües amunt. Mitjançant: **Terrain Preprocessing**→**Adjoint Catchment Processing**. Aquí s'haurà d'introduir les capes de la línia de drenatge i els polígons de les subconques. Per defecte, el nom de sortida és "AdjointCatchment".

Construcció del model HMS

Una vegada realitzat el processament del MDT, la generació del model pel programa HMS resulta força senzilla.

1- Començar un nou projecte: En primer lloc s'haurà de crear un nou projecte seguint la ruta: **HMS Project Setup→Start New Project**. Es recomana acceptar els noms per defecte "ProjectArea" i "ProjectPoint" que es faran servir més endavant, i ja es pot definir el nou projecte al qual se l'haurà d'atorgar nom, descripció i ubicació, deixant seleccionada la opció "Original Stream Definition".

2- Afegir punt de sortida: Per poder definir zona de projecte cal que s'indiqui quin serà el punt de sortida del riu o tram que es vol estudiar. Mitjançant l'eina "Add Project Points"

 , es determinarà la cel·la que representarà l'outlet o punt de sortida del sistema (figura AIV.7).

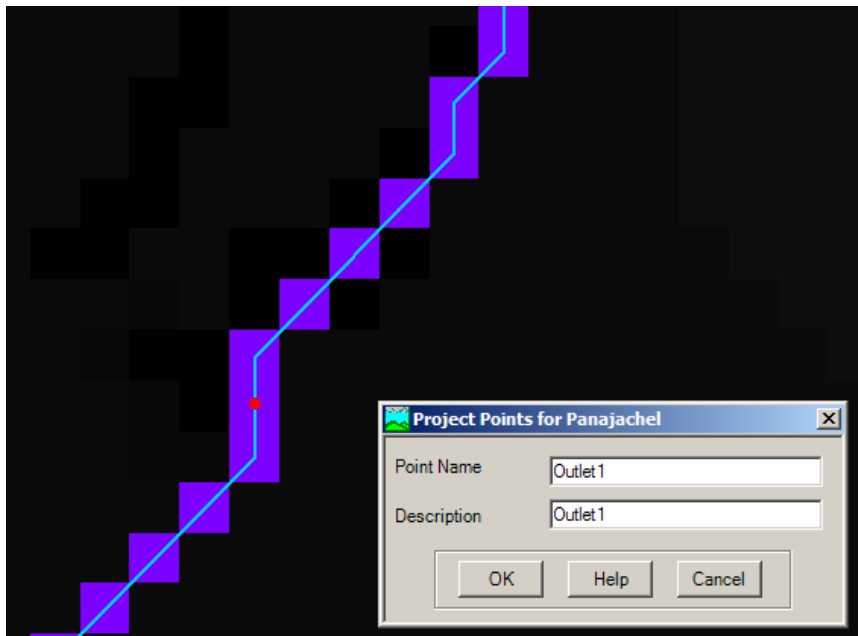


Figura AIV.7. Exemple d'ubicació d'un punt de sortida.

3- Generació del model: El model ja està preparat per ser construït amb la eina **HMSProject Setup→Generate Project**. És especialment important, en aquest pas, revisar que totes les dades introduïdes a la finestra emergent són correctes per a la construcció del model (Figura AIV.8). Tot seguit el programa ens mostrarà ombrejada l'àrea de projecte que s'està a punt de crear per tal que es pugui verificar que sigui la superfície desitjada.

A partir d'aquí, es crearà un nou projecte, al qual s'importaran totes les dades generades al processament del MDT i on, a més, s'inclouran noves capes per a les subconques, el punt de drenatge i el perfil del riu (Figura AIV.9).

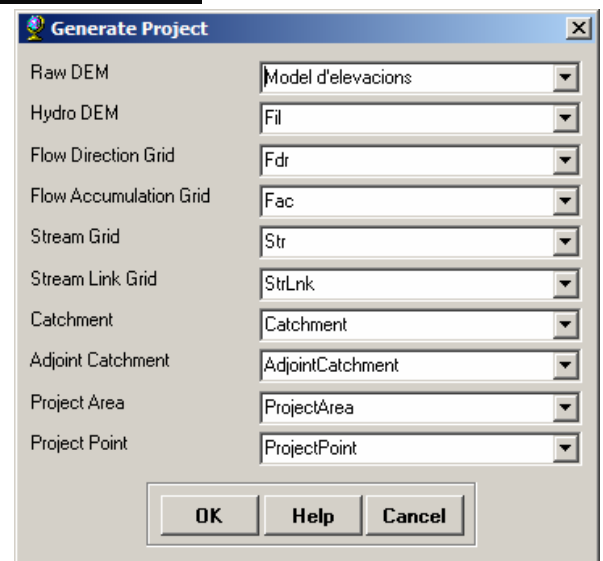


Figura AIV.8. Finestra resum de les dades necessàries per la construcció del model.

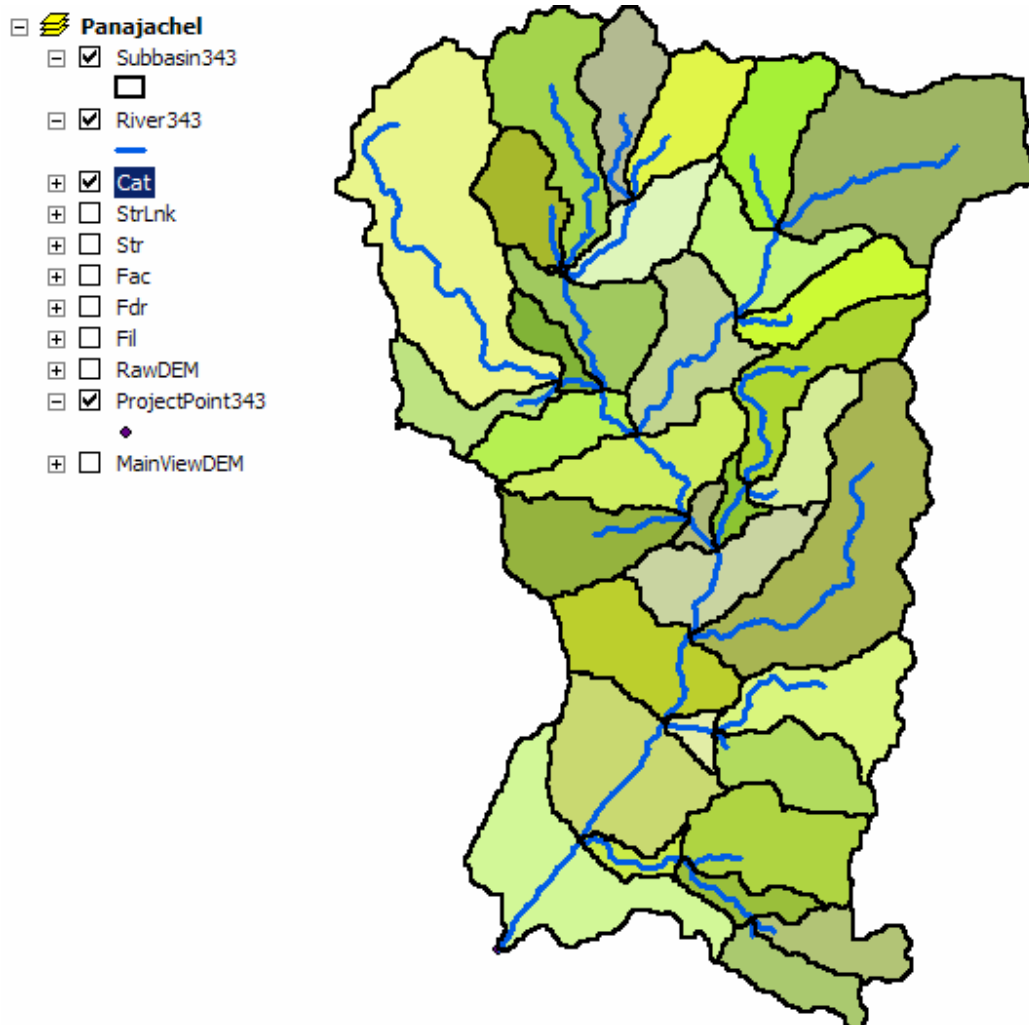



Figura AIV.9. Resultat final del model hidrològic extret a partir del MDT.

Un cop generat el model, es poden realitzar modificacions del mateix, unint diferents subconques o creant-ne de noves amb l'objectiu d'obtenir punts d'interès per a l'estudi hidrològic, per exemple estacions d'aforament, punts d'especial vulnerabilitat davant episodis d'inundació, etc. Totes aquestes operacions, es poden realitzar a través de la pestanya "Basin Processing". No s'expliquen en detall en aquest annex, però es troben descrites en detall al manual d'usuari del programa.

Perfil del riu

Es tracta d'una eina interessant del programa i que, a més, permet comprovar que les dades del MDT s'han transferit correctament al model generat. Mitjançant el botó , podrem seleccionar els trams del riu i obtenir-ne el perfil altitudinal. En aquest pas es pot observar la importància de la correcció hidrològica del MDT, ja que el perfil del riu amb el MET hidrològic proporciona un perfil altitudinal corregit, mentre que amb el MDT original s'obtenen trams on el riu presenta pendent ascendent (Figura AIV.10).

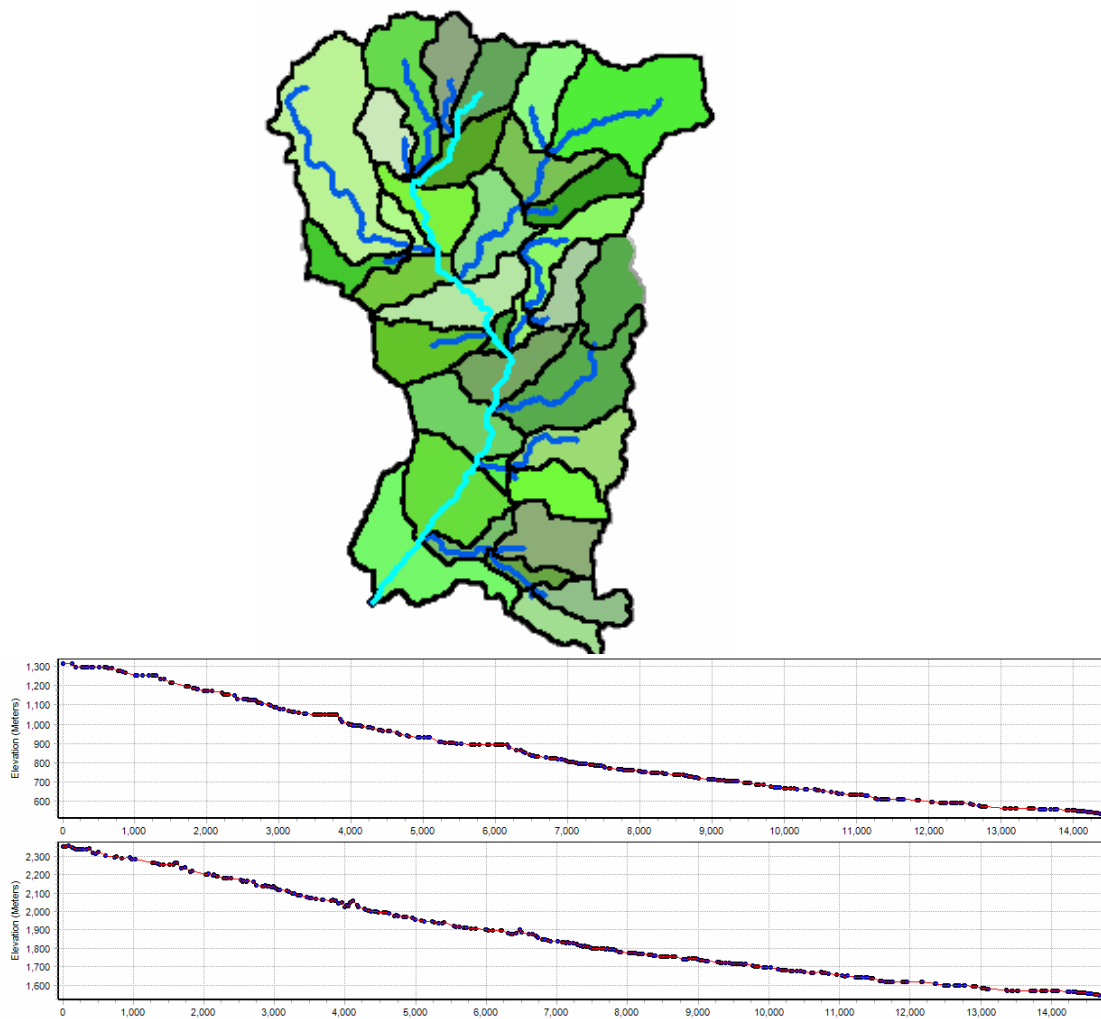


Figura AIV.10. Perfil longitudinal del riu, segons les dades del MDT hidrològic (a dalt) i segons les dades del MDT original (a sota).

Característiques de les subconques i els trams

El programa HEC-geoHMS ens permet extreure les característiques topogràfiques, necessàries per al model, a partir del MDT i el model prèviament generat. Proporciona dades com la longitud del riu, el pendent del riu i el pendent de les subconques, el recorregut més llarg de l'aigua dins del riu, el centroide de les subconques. Malgrat els bons resultats que s'obtenen a través del bon ús del programa, sempre és adient comparar les dades que ens proporciona aquest amb dades reals obtingudes en estudis previs.

1- Longitud del riu: Calcula la longitud del riu per a cadascun dels seus trams, generant un camp, a la taula d'atributs del riu, anomenat "RivLen". Seguint els passos: **Basin Characteristics**→**River Length**, i seleccionant el riu objecte d'estudi. Les unitats resultants del càlcul seran les mateixes del MDT.

2- Pendent del riu: Extreure l'alçada riu amunt i riu avall i calcula el pendent de cada tram, en tant per u, afegint a la taula d'atributs del riu les columnes "ElevUP", "ElevDS" i "Slp". A través de **Basin Characteristics**→**River Slope** i seleccionant el riu que volem estudiar, el programa ens avisarà, en el cas que el MET no tingui les unitats definides en l'eix vertical, que s'assumeix que les unitats verticals són les mateixes que les horitzontals.

3- Pendent de la subconca: Computa el pendent promig de cada subconca, dada que es farà servir més endavant per determinar el paràmetre de temps de retard del nombre de corba. Per dur a terme aquest procés, prèviament s'ha de crear una capa de pendent seguint **Terrain Preprocessing**→**Slope**, on s'ha de seleccionar el MDT original i determinar el nom de la xarxa resultant, per defecte "WshSlopePct"(Figura AIV.11). Un cop s'ha creat la nova capa, ja podem computar **Basin Characteristics**→**Basin Slope**. El pendent obtingut s'afegirà a la taula d'atributs de la conca, sota el nom de "BasinSlope" en percentatges.

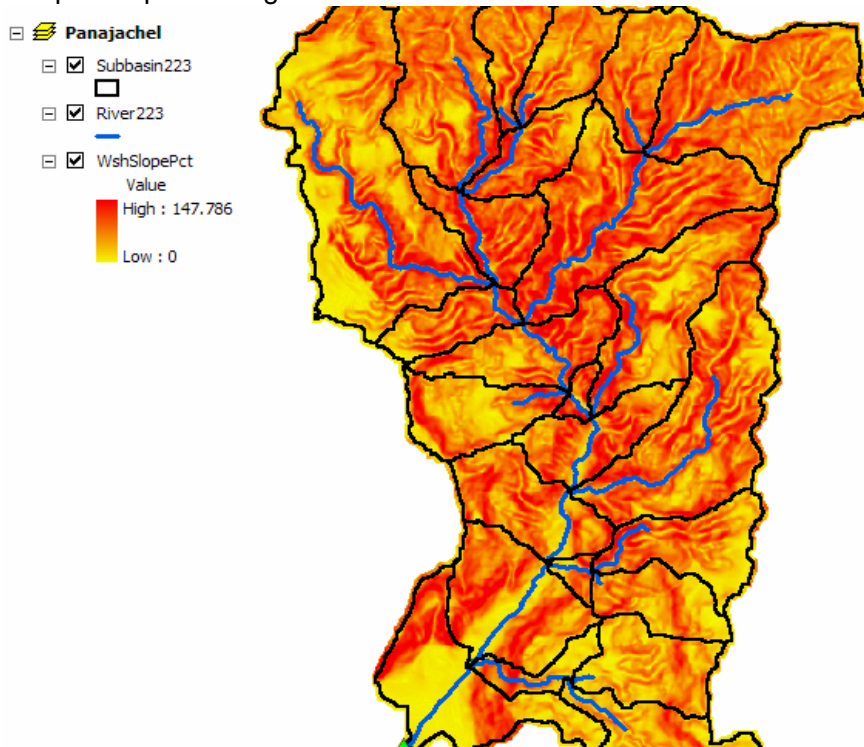


Figura AIV.11. Mapa del pendent de les subconques en tant per cent.

4- Recorregut més llarg: Calcula el recorregut més llarg del riu per cada subconca, l'elevació aigües amunt, aigües avall i el pendent. **Basin Characteristics→Longest Flow Path**. Cal introduir el MDT original i les capes subconques i de direcció del flux a la conca.

5- Centroide de la Subconca: El centroide representa el punt central de la subconca, a partir del qual s'establirà la posició de la subconca al model hidrològic de l'HEC-HMS. Hi ha diversos mètodes per la estimació del centroide que, segons la mida i forma de cada conca seran més o menys adients. Generalment es recomana realitzar la aproximació amb el mètode del centre de massa de la subconca i posteriorment, si s'escau, modificar manualment el centroide. Mitjançant aquest mètode el centroide es situa en el punt intermedi de la subconca, no necessàriament a sobre del riu. Més informació dels altres mètodes es pot trobar al manual d'usuari del programa. Mitjançant **Basin Characteristics→Basin Centroid**, i escollint la opció de càlcul del centroide desitjada.

6- Alçada del centroide: Un cop determinats els centroides, es computa l'alçada d'aquests, a partir de les dades del MDT original, seguint els passos: **Basin Characteristics→Centroid Elevation**. Les dades d'elevació seran registrades a la taula d'atributs de la capa dels centroides.

7- Finalment es computa el flux resultant a partir de cada centroide fins al punt de desguàs de la subconca corresponent (Figura AIV.12). **Basin Characteristics→Centroidal Flow Path**.

Aquests darrers passos són essencials per a la correcta exportació del projecte al programa HMS.

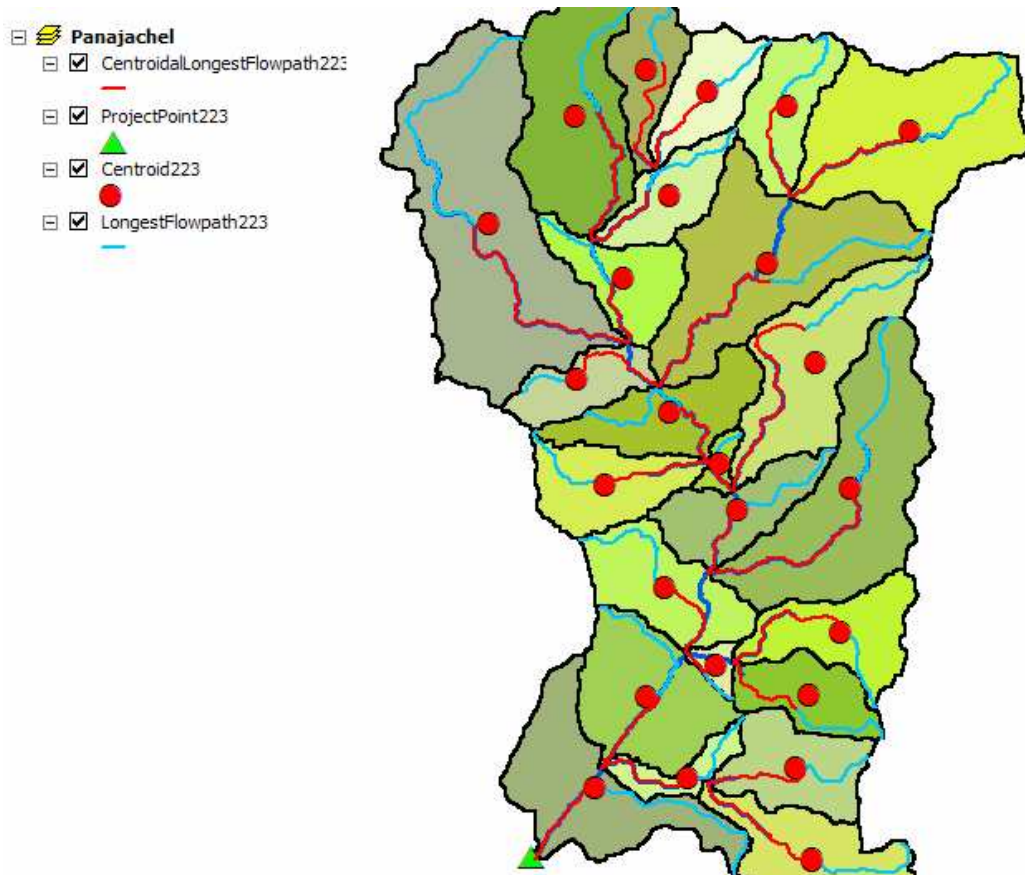


Figura AIV.12. Mapa resultant del processament del model, determinació de centroides de les subconques.

Exportació del model

Un cop arribat aquest punt totes les dades es troben en condicions de ser exportades per la seva modelització, seguint els següents passos:

1- Numeració de rius i subconques: Pas indispensable previ a la exportació de dades és el de donar un nom únic a cada tram de riu i subconca, que seran utilitzats per l'HMS. Aquesta feina es pot realitzar d'una manera molt senzilla seguint les rutes: **Hydrologic Parameters→River Auto Name** i **Hydrologic Parameters→Basin Auto Name**. Aquesta acció genera un nom automàtic per cada element del model format per una lletra (R en el cas del riu i W en el cas de les subconques) i tres números, de tal manera que un tram de riu quedarà anomenat, per exemple de la següent manera "R210".

2- Conversió del mapa en unitats de HMS: Determina quines unitats presenta el model per tal d'exportar-les correctament. L'usuari podrà fixar si es tracta de unitats del sistema anglosaxó o del sistema internacional. Selecciónant **HMS→Map to HMS Units**.

3- Comprovació de les dades: Realitza un anàlisi del format de les dades per comprovar la seva consistència a l'hora de generar un model, és a dir, que les subconques i trams presenten noms únics, que la xarxa hidrogràfica es troba correctament connectada, que els centroides es trobin a una posició adequada, etc. En cas de que aquest pas generés alguna mena d'error, el programa crearà un fitxer "SkelConsChk.txt" on registrarà quina mena d'errors conté el projecte. A partir d'aquest fitxer la correcció del model resulta senzilla. Seguint **HMS→HMS Check Data**.

4- Generació de l'esquema de la conca: Realitza la representació del format HEC-HMS sobre la plataforma GIS, creant una xarxa hidrològica simplificada que conté elements (subconques i trams) i la seva connectivitat. En aquest pas es creen arxius de nodes i enllaços, propis del programa HMS i típics de qualsevol programa de modelització hidrològica. Es realitza a **HMS→HMS Schematic** introduint les dades que demana l'assistent.

5- Fixar coordenades: Aquesta eina determina les coordenades dels diferents elements del sistema, especialment útil si posteriorment es volen afegir estacions pluviomètriques o d'aforament correctament ubicades. Mitjançant **HMS→Add Coordinates**.

6- Preparació de dades: Extreu dades de les taules d'atributs i les prepara per a la correcte exportació del model. **HMS→Prepare Data for Model Export**.

7- Mapa de fons: Aquesta eina permet extreure una imatge o un shape que es visualitzarà com a fons de l'esquema del model, per facilitar-ne la comprensió. Es recomanable fer servir el format shape, ja que resultarà més flexible dins de l'HMS. A través de **HMS→Background Map→Background Shape File**.

8- Fitxer de conca: Es tracta de la creació d'un fitxer en format ASCII, amb les dades del model que podrà ser directament utilitzat per l'HEC-HMS. Seguint la ruta **HMS→Basin File**.

9- Generació del Projecte HMS: Mitjançant aquest pas, podrem crear una carpeta que contingui totes les dades generades fins al moment. **HMS→HMS Project Setup**, on s'ha de determinar la ruta de destí. Els fitxers creats amb aquest procés ja podran ser carregats amb el HEC-HMS (Figura AIV.13).

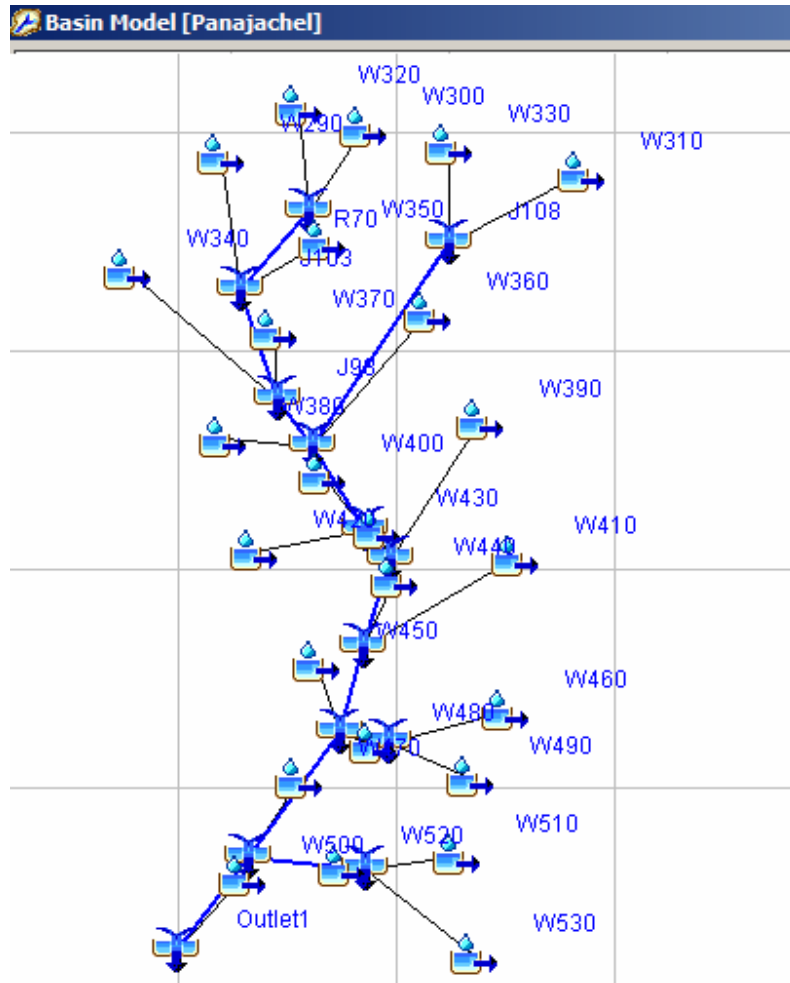


Figura AIV.13. Visualització final del model amb l'HEC-HMS.

Recomanacions

Com a resultat de l'experiència en la construcció dels models necessaris per a la realització del projecte a continuació s'exposaran una sèrie de recomanacions que poden estalviar al modelitzador diverses hores en la resolució de problemes trivials que sorgeixen durant la construcció del projecte:

- Abans de començar el projecte, és cal activar totes les extensions que caldrà fer servir en el desenvolupament del model: "3D analyst", "Data Interoperability", "Geostatistical Analyst" i "Spatial Analyst". Es poden activar seguint **Tools→Extensions**.
- Per començar, i especialment si existeix alguna divergència en el tipus de projecció de les dades cartogràfiques, es recomana, en el primer pas, carregar en primer lloc el MDT i només després, afegir el Shape amb el perfil del riu.
- Especialment si s'ha creat més d'un projecte, o si el programa ens genera problemes carregant dades o generant el projecte a partir del MDT, es recomana eliminar tots els fitxers de la carpeta "C:\Documents and Settings\Usuari\Configuración local\Temp".