



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

Transport de sediments al riu Cinca. Comparació de resultats numèrics amb dades de camp.

Treball realitzat per:

Marta Subirana Casanovas

Dirigit per:

Ernest Bladé Castellet

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 19 de Setembre del 2016

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

ABSTRACT

The river Cinca is a gravel based river, flowing through the Pyrenees. It has suffered gravel mining in both channel and floodplain during many years, affecting its sediment transport rates as well as its erosive capacity. In that area, many leisure spots can be found, meaning that the definition and prevention of possible changes in the morphology of the river are especially important. After an event in 2013, a camping site located in the proximities of the River suffered damage. It was at that moment when MorphSed project had its opportunity to start working directly with the effects of the gravel mining in the river basin.

The aim of this thesis is to work with a numerical model performed with Iber, which simulates the effects of an actual event, in terms of erosion and sediment transport. The results will be compared with the field data provided by MorphSed research group. A hydraulic validation will be done (water depth and velocities, registered at the monitoring sites) as well as a qualitative validation of the sediment transport rates (riverbed elevation before and after the event).

In this thesis it will be seen how important is to create a numerical model with a low computational time, but at the same time, reliable enough to provide representative results.

AGRAÏMENTS

Voldria agrair al tutor d'aquest treball Ernest Bladé, per donar-me totes les pautes per anar definint aquest projecte a mesura que anava avançant i mostrar-se sempre disposat a ajudar en la resolució dels problemes que han anat sorgint.

Al Damià Vericat, i per extensió al equip de MorphSed. En primer lloc, per facilitar-me totes les dades experimentals. Però sobretot per haver-se mostrat proper i amb ganes de respondre sempre aquells dubtes que anessin sortint.

Al Sergi Gargallo, pel seu consell sobre com rendibilitzar les poques hores que disposava per escriure aquest treball i la bona gestió del temps. També a tots els amics d'ASG pel seu suport i ganes de donar-me un cop de mà sempre que ho he necessitat.

I per acabar, als meus amics i a la meva família, per la seva ajuda i suport en tot moment.

ÍNDIX

ÍNDIX DE FIGURES.....	5
ÍNDIX DE GRÀFIQUES.....	6
ÍNDIX DE TAULES	7
1 INTRODUCCIÓ.....	9
1.1 Context	9
1.2 Objectiu i metodologia.....	9
2 PROJECTE MORPHSED.....	11
2.1 Objectius	11
2.2 El riu Cinca	11
2.3 El projecte	13
2.3.1 Fotogrametria digital automatitzada (SfM)	15
3 EROSIÓ FLUVIAL	17
3.1 Equacions de transport de sediments.....	18
4 MODELITZACIÓ NUMÈRICA I SIMULACIÓ	21
4.1 Iber	21
4.1.1 Mòdul de transport de sediments	23
4.1.2 Creació d'un model numèric	23
4.2 Creació del model del riu Cinca.....	26
5 VALIDACIÓ MODEL HIDRÀULIC	35
5.1 Tractament i conversió de les dades.....	37
5.2 Resultats.....	40
6 VALIDACIÓ QUALITATIVA DEL MODEL DE TRANSPORT DE SEDIMENTS	45
6.1 Ajust de l'equació de transport de sediments	45
6.1.1 Simulació 0 – Original.....	46
6.1.2 Simulació 1. $\tau_{crit} = 0,0523$	48
6.1.3 Simulació 2. $\tau_{crit} = 0,1$	49
6.1.4 Simulació 3. $\tau_{crit} = 0,0761$	51
6.2 RESULTATS.....	53
6.2.1 Resultats en una secció transversal de la zona 1	54
6.2.2 Resultats en una secció de la zona 4.....	56
6.2.3 Resultats en una secció longitudinal	57
7 CONCLUSIONS	59
ANNEX: DETERMINACIÓ QUANTITATIVA DEL TRANSPORT DE SEDIMENTS ENTRE EL MODEL IBER I EROSIÓ REAL	61

Comparació amb les dades reals.....	62
Comparació amb les dades “raw”	65
Calibratge dels coeficients α i β	66
Ajust de valor β	68
Ajust de valor α	68
Comparació final	70
REFERÈNCIES	72

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1: El riu Cinca, un riu de graves que neix als pirineus aragonesos.....	12
Figura 2: Granulometria del riu Cinca	12
Figura 3: Extracció d'àrids durant entre 1990 – 2011	13
Figura 4: Zona d'estudi, part alta del riu Cinca entre les poblacions de Laspunya i Ainsa.....	14
Figura 5: Punt de control i dron utilitzat per la fotogrametria digital. Esquema de funcionament de SfM.	15
Figura 6: Models de canvi amb i sense tenir en compte l'error (Vericat et al, 2015).....	16
Figura 7: Gràfica de la capacitat de transport de sediments d'un riu (Frings, R., 2014).....	17
Figura 8: Gràfic esquemàtic de la dependència del cabal sòlid amb la tensió de fons.....	18
Figura 9: Condicions de contorn d'entrada (Cabal total).....	22
Figura 10: Esquema de càlcul del mòdul de transport de sediments (Manual de Referència Hidràulic – Iber)	23
Figura 11: Diferències entre malla i MDT. Creació de punts sense cota.....	26
Figura 12: Mida de la malla escollida	27
Figura 13: Imatge del abans i el després de filtrar i eliminar els elements de la malla que no es mullen mai (per cabals molt elevats).	28
Figura 14: Vols e08 i e09. Hidrograma entre els vols e08 i e09	29
Figura 15: Diagrames de distribució d'elements que es mobilitzarien en funció de un Q determinat i el diàmetre de l'element. En vermell es marca el límit del D50 = 0.067 m	30
Figura 16: Hidrograma abans i després de filtrar-ho per cabals superiors a 40 m ³ /s.....	31
Figura 17: Zona final d'estudi.....	32
Figura 18: Velocitat i erosió elevades produïdes aigües avall, provocada per la condició de contorn.....	33
Figura 19: Capa de roca situada al límit aigües avall de la simulació.....	33
Figura 20: Estació hidromètrica d' Escalona, on van ser mesurats els cabals i les velocitats (Font: MorphSed)	35
Figura 21: Correspondència entre el canal mullat observat en la fotografia aèria (esquerra) i l'àrea mullada observada en la simulació.	36
Figura 22: Esquema de funcionament del aDcp.	36
Figura 23: En vermell, la zona on van prendre's les mesures de calats i velocitats amb el aDcp.	37
Figura 24: Seccions d'estudi per la validació hidràulica del model.....	38
Figura 25: Conversió dels resultats Iber a format taula.	39
Figura 26: Ràster obtingut filtrant els errors (Real) i sense (Raw)	45
Figura 27: Resultats de la simulació 0	47
Figura 28: Valors de la tensió crítica de fons a la zona 1	48
Figura 29: Resultats de la simulació 1	49
Figura 30: Resultats de la simulació 2	50
Figura 31: Tensions crítiques en diversos punts de la zona d'estudi.	51
Figura 32: Resultats de la simulació 3	52
Figura 33: Perfil longitudinal que s'usarà per fer una valoració final, en el ràster de MorphSed (esquerra) i en l'Iber (dreta).....	57
Figura 34: Polígons i malla necessària per la quantificació de cabal sòlid del model.....	61
Figura 35: Polígons exportats per treballar amb les dades reals	63
Figura 36: Càlcul dels volums amb ArcMaps.....	63

ÍNDIX DE GRÀFIQUES

Gràfica 1: Densitat de punts obtinguts amb l'Iber i amb el aDcp (MorphSed).....	40
Gràfica 2: Cabal específic en la secció 1, dades de MorphSed i Iber	41
Gràfica 3: : Calat observat en la secció 1, dades de MorphSed i Iber	41
Gràfica 4: Velocitat observada en la secció 1, dades de MorphSed i Iber	41
Gràfica 5: Cabal específic en la secció 2, dades de MorphSed i Iber	42
Gràfica 6: Calat en la secció 2, dades de MorphSed i Iber	42
Gràfica 7: Velocitat observada en la secció 2, dades de MorphSed i Iber	42
Gràfica 8: Cabal específic corresponent a la secció 3, dades de MorphSed i Iber.....	43
Gràfica 9: Calat corresponent a la secció 3, dades de MorphSed i Iber.....	43
Gràfica 10: Velocitat observada en la secció 3, dades de MorphSed i Iber	43
Gràfica 11: Relació de la tensió crítica, tensió de fons i erosió.....	53
Gràfica 12: Erosió en una secció de la zona 1.	54
Gràfica 13: Cota de la llera en una secció de la zona 1	54
Gràfica 14: Erosió en una secció de la zona 4.	56
Gràfica 15: Cota de la llera en una secció de la zona 4.	56
Gràfica 16: Zones amb erosió / sedimentació en un perfil longitudinal (dades MorphSed)	57
Gràfica 17: Zones amb erosió / sedimentació en un perfil longitudinal (dades Iber).....	58
Gràfica 18: Comparació de les diferències entre el volum de sediment transportat en la simulació, amb dades reals i amb dades Raw.....	65
Gràfica 19: Comparació de les dades de la simulació i de les dades reals.....	66
Gràfica 20: Evolució del cabal sòlid en cada un dels polígons	68
Gràfica 21: Evolució del cabal sòlid en cada un dels polígons	69
Gràfica 22: Evolució del cabal sòlid en cada un dels polígons	70
Gràfica 23: Comparació de l'evolució del cabal sòlid en cada un dels polígons	70

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1: Ratis temporals de la simulació.....	27
Taula 2: Dades finals del model per la simulació	34
Taula 3: Cabals totals per cada secció.....	38
Taula 4: Resum de les simulacions	53
Taula 5: Resultats de volum de sediment mobilitzat en cadascun dels polígons	62
Taula 6: Comparació quantitativa dels volums dins de cada un dels polígons amb les dades reals.....	64
Taula 7: Comparació quantitativa dels cabals sòlids observats dins de cada un dels polígons amb les dades Raw.....	65
Taula 9: Coeficients ajustats en cada un dels polígons i mitjana de la mostra	67
Taula 10: Coeficients ajustats en cada un dels polígons i mitjana de la mostra.....	69

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Context

La relació entre les accions humanes i els canvis físics i ecològics en l'ecosistema és una informació necessària per entendre els efectes que aquestes activitats produeixen. Aquest és un tema recurrent i actual, fent que es prengui cada vegada més consciència dels efectes que tenen activitats com l'agricultura, la ramaderia o la construcció en el medi natural. És en aquest context quan ja fa anys va començar a prendre importància el fenomen de l'erosió fluvial.

Amb el boom de la construcció va anar-hi acompanyada una necessitat de material (bàsicament d'àrids). Aquests podien obtenir-se en pedreres, o com ha estat comú en zones de Catalunya i Espanya, en lleres de rius amb presència de graves. Aquesta extracció provoca que, a mig termini, aquests rius puguin presentar canvis morfològics importants. Aquests canvis, sovint traduïts en erosió de la llera (*Centro Ibérico de Restauración Fluvial, 2015*), a part dels efectes que puguin tenir en els microhàbitats del riu i en la seva morfologia (*Vericat, D., et al. 2014*), podem provocar danys a infraestructures existents (pilars de ponts, zones de canalització i, aigües avall, també en infraestructures portuàries i platges). El cas del riu Tordera és un exemple de com aquestes extraccions de sediments han provocat efectes adversos en el medi, en aquest cas concret, en el retrocés de la platja.

És per aquest motiu que mica en mica, s'ha anat fent ressò de la problemàtica de l'erosió fluvial fins al punt que en moltes zones s'ha limitat l'extracció d'àrids.

Concretament, aquest treball es centrarà en el cas del riu Cinca, afectat per extraccions d'àrids durant molts anys, fet que ha generat preocupació en els habitants de la zona pels possibles efectes que això pugui tenir en desbordaments i inundacions.

1.2 Objectiu i metodologia

L'objectiu d'aquest projecte és construir i posar a punt un model numèric que simuli els efectes d'una riuada real, en termes d'erosió i transport de sediment, en un tram del riu Cinca en els pirineus aragonesos.

Per la posada a punt del model numèric, es compta amb les dades de camp proporcionades pel grup de Recerca RIUS de la Universitat de Lleida, obtingudes en el marc del projecte MorphSed. Aquest equip investiga els efectes que té l'extracció d'àrids en la morfologia del riu i en la seva dinàmica fluvial. Gràcies a això, el projecte MorphSed ha pogut facilitar dades de cabals, calats i velocitats en varis punts de la zona d'estudi, on hi tenen instal·lades estacions d'aforament. En quant a les dades de transport de sediments, s'han facilitat dos models topogràfics, un abans i un després de la riuada que s'ha utilitzat en aquest estudi, per poder fer una comparació dels efectes causats per la riuada en la cota de la llera, o en altres paraules, l'erosió observada. Aquestes dades comptaran amb moltes incerteses, donada en gran part per l'error produït al obtenir les diferències entre topografies, ja que sempre s'estarà parlant de valors petits, ja sigui de diferència de cota de la llera com de l'erosió produïda. El procés de modelització consistirà en la creació d'un model numèric amb l'eina de simulació numèrica bidimensional Iber, per tal

de simular una riuada concreta i analitzar els resultats obtinguts comparant-los amb les dades de camp preses per l'equip de MorphSed.

Aquest projecte doncs, es basarà primer en un anàlisi del fenomen de l'erosió fluvial i de les particularitats del riu Cinca. En aquest apartat, s'analitzaran les variables que incideixen en el transport de sediments així com les equacions que s'usen en el seu estudi. Seguidament, es farà la anàlisi de les dades de camp i el seu procés d'obtenció, amb les diferents metodologies que ha usat l'equip de MorphSed. Les particularitats d'aquestes metodologies farà entendre les possibles diferències que puguin aparèixer més endavant amb el model numèric. A més a més, una part important d'aquest document es basarà en com s'han tractat aquestes dades per tal de poder treballar amb elles amb eines com Iber o GIS. És en aquest punt on s'il·lustraran les hipòtesis que s'han assumit així com les decisions que s'han pres a l'hora de crear el model numèric que permetrà la simulació hidràulica de la riuada d'estudi i els efectes d'aquesta a la cota de la llera. La realització d'un model de càlcul amb un cost computacional baix ha estat un punt molt important. El fet de disposar d'un model de càlcul "lleuger" serà avantatjós a l'hora de realitzar canvis i diverses simulacions.

Abans d'analitzar el transport de sediments, es farà una validació hidràulica del model. És a dir, s'analitzarà, en una zona molt reduïda, els calats i velocitats entre el model creat amb l'Iber i les dades de camp. Finalment, un cop el model s'ha validat hidràulicament, el següent pas serà centrar-se en els canvis morfològics del riu, causats per l'erosió i el transport sòlid que s'hi ha produït. Es realitzarà una simulació amb l'hidrograma de la riuada d'estudi i es mostraran els resultats obtinguts. Aquestes, es compararan amb les dades reals. Per últim, es farà un ajust de les variables de les equacions que regeixen el transport de sediments per tal que els resultats de la simulació s'acostin a les dades obtingudes a camp, bàsicament en termes espacials: establir una concordança entre les zones erosionades o amb acumulació de sediment entre les observades a camp i les obtingudes amb el model numèric.

Un pas més enllà serà el de la quantificació d'aquests volums sòlids que han estat mobilitzats. A l'annex s'inclou una primera aproximació d'aquest estudi on s'explica les eines i la metodologia que s'hauria de seguir per ajustar aquests valors, així com uns resultats inicials.

2 PROJECTE MORPHSED

2.1 Objectius

El projecte MorphSed investiga les dinàmiques morfo sedimentaries del riu Cinca. Els principals objectius d'aquest projecte de recerca són:

- Avaluar la variabilitat dels canvis morfològics i del volum de sediments en funció de la magnitud de les riuades i la seva freqüència
- Avaluar l'impacte de l'extracció d'àrids en les característiques del transport de sediments
- Avaluar l'impacte de l'extracció d'àrids en la comunitat d'invertebrats del riu.
- Determinar la millor manera de quantificar els efectes de l'extracció d'àrids.

Amb els diferents estudis que duen a terme, volen establir connexions entre els processos ecològics i físics que es produeixen a petita escala i els canvis que provoquen a gran escala (*Vericat et al., 2014*). Amb aquesta informació es volen obtenir eines per tal de prevenir i/o administrar les respostes als canvis hidrològics que es produeixin als rius i a la seva àrea d'influència.

El projecte MorphSed rep fons del Ministeri d'Economia així com Fons Europeus pel Desenvolupament Regional (FEDER).

2.2 El riu Cinca

El riu Cinca neix als pirineus aragonesos i transcorre a través de la província d'Osca, per desembocar al riu Segre pocs quilòmetres aigües amunt de la seva desembocadura al riu Ebre. El curs del riu té una longitud de una 170 km i un cabal de 10 m³/s. En èpoques de desglaç, quan es produeixen les riuades, s'arriba a cabals al voltant de 200 m³/s. La riuada del 2013 van registrar-se valors de quasi 500 m³/s.

Al llarg del curs del riu, hi ha establertes diverses poblacions, així com càmpings i diferents punts d'oci a l'aire lliure. Es per aquest motiu que pren especial importància la definició i la previsió dels possibles canvis en la morfologia del riu.



Figura 1: El riu Cinca, un riu de graves que neix als pirineus aragonesos.

És un riu de graves (Figura 2), que n'ha patit la seva extracció durant anys, sobretot durant els anys del boom de la construcció. En concret s'ha comptabilitzat que s'extreien $2 \cdot 10^5$ T / any. La granulometria d'aquest riu ve definida pel diàmetre $D_{50} = 67.15$ mm, (és a dir, el 50% de la mostra d'àrids del riu és més fi que aquest valor).

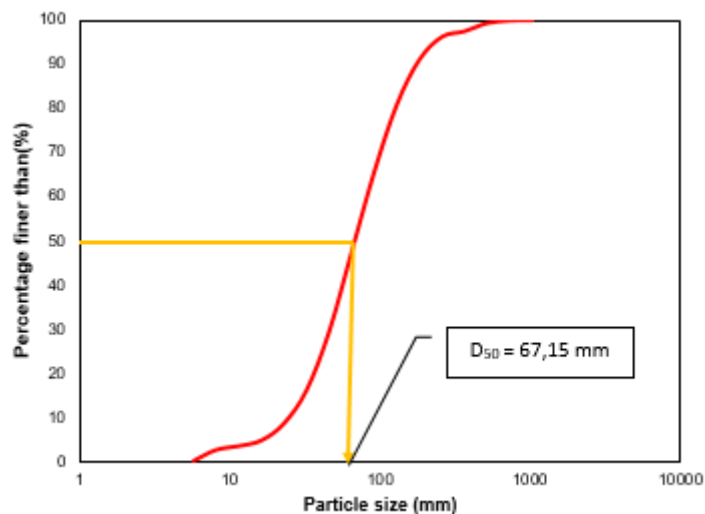


Figura 2: Granulometria del riu Cinca

Si bé és cert que en els últims anys, aquestes extraccions han disminuït, es fet que aigües amunt el riu contingui unes baixes proporcions de material groller, fa que immediatament aigües avall d'aquests punts on l'extracció de graves va ser intensa, es produeixi erosió de la llera del riu. La geometria de la llera del riu, així com la seva morfologia depenen directament dels cabals que hi circulen, de la granulometria del llit del riu i del volum i transport de sediments que conté. Les interaccions d'aquests elements produeixen canvis en el riu, o pertorbacions de la llera. Aquestes alteracions poden produir-se de manera natural (p. ex: riudes) o que hagin estat produïdes pel factor humà, com és el cas de l'extracció d'àrids. Així doncs, els canvis induïts per

l'activitat humana, afegeix un "factor d'estrès" addicional a la dinàmica del riu, i n'afecta la seva morfologia i conseqüentment, els microhàbitats que s'hi formen. En els propers apartats s'explicarà més detalladament el fenomen de l'erosió fluvial.

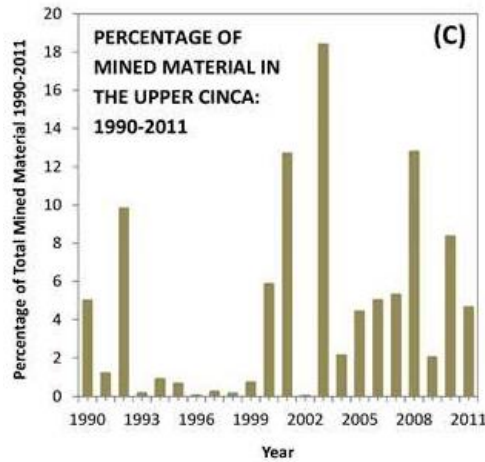


Figura 3: Extracció d'àrids durant entre 1990 – 2011

Després d'una riuada de grans dimensions al 2013, un càmping a les proximitats del riu Cinca va patir molts danys materials. Va ser aleshores quan la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre va estudiar la possibilitat de realitzar treballs a la llera del riu.

Els detalls del projecte van ser presentats al grup de Recerca de Dinàmica Fluvial (RIUS), de la Universitat de Lleida. Aquest grup d'investigadors van fer estudis per tal de donar consells i recomanacions per tal que les obres tinguessin l'impacte més petit possible als hàbitats i a la geomorfologia del riu. Va ser aleshores quan l'equip de MorphSed va tenir una gran oportunitat de treballar i estudiar directament els efectes de l'extracció de material de la llera en la morfologia del riu.

2.3 El projecte

El projecte MorphSed avalua com aquesta extracció d'àrids provoca canvis morfològics a la llera del riu Cinca i del tributari Ara. Per fer aquesta avaluació no s'ha tingut en compte l'extracció patida abans del 1990 (Figura 3) ni a la plana al·luvial. En concret s'estudia un tram del riu de 13 km, situat entre les poblacions d'Ainsa i Laspunya.



Figura 4: Zona d'estudi, part alta del riu Cinca entre les poblacions de Laspunya i Ainsa

Per avaluar els canvis en el riu, l'equip disposa de:

- 3 estacions de monitorització: Es registren els cabals, volums de sediment en suspensió, temperatura, terbolesa i altres variables cada 15 min.
- 5 punts mostreig: Població de invertebrats i granulometria.

A més a més, per tal d'obtenir els calats utilitzen el *aDcp* (acoustic Doppler corrent profiler), per tal d'extreure la batimetria del riu, així com la *fotogrametria digital automàtica* (SfM), per extreure la topografia. En el següent apartat s'explicarà aquesta última metodologia, que és amb la que s'ha obtingut gran part de la informació que es necessitarà pel present treball.

L'equip de MorphSed treballa seguint 4 fases:

1. Planificació i formació pel projecte
2. Obtenció de dades de camp
3. Anàlisi de les dades, interpretació i difusió dels resultats
4. Validació experimental

En el cas que ocupa aquest treball, s'incidirà en els dos últims punts. Amb la realització de simulacions hidràuliques s'analitzaran les dades, sempre amb la vista

posada en el futur objectiu de ser capaços de predir com i quan les zones patiran erosió. A més a més, es podrà fer una validació dels resultats que s'obtenen a camp.

2.3.1 Fotogrametria digital automatitzada (SfM)

Com s'ha mencionat anteriorment, un dels objectius del projecte MorphSed és el d'estudiar els canvis de topografia d'un tram del riu Cinca. Per a l'obtenció d'aquesta topografia s'utilitzen fotos aèries de gran resolució. La fotogrametria digital es basa en, mitjançant algorismes, identificar punts comuns en parelles de fotografies (*Vericat et al., 2014*). Aquest núvol de punts es geolocalitza oferint informació 3D. Mitjançant punts de control (uns 220) distribuïts pel terreny, a cada punt se li donen les coordenades concretes segons un sistema de referència per poder processar i treballar amb aquestes dades. El fet que sigui un procediment de baix cost temporal fa que sigui un bon mètode per aquest tipus d'investigacions, on poden haver-hi canvis de manera ràpida. S'obtenen imatges d'una resolució de fins 2000 ppp.



Figura 5: Punt de control i dron utilitzat per la fotogrametria digital. Esquema de funcionament de SfM.

La dificultat però, està en obtenir dades fiables i tractar els errors que puguin haver-hi. Donat que es vol treballar amb les diferències de topografia de dos vols en dos instants diferents (veure canvis en la topografia significarà veure quins llocs han patit erosió per exemple), té especial rellevància la magnitud dels errors que es puguin trobar. Per exemple:

Topografia A = $MDT_A \rightarrow$ Error A (E_A)

Topografia B = $MDT_B \rightarrow$ Error B (E_B)

Error total (E_T) $\rightarrow E_T = \sqrt{(E_A^2 + E_B^2)}$

Pot donar-se el cas que en aquest punt hi hagi un E_T major que el canvi real que s'ha produït. Quan el canvi és menor que l'error, és quan hi ha una incertesa sobre la validesa de les dades.

Quan s'estudia un model en concret, aquest error no pren tanta importància, però al fer la comparació i obtenir la diferència entre dos models, és molt important eliminar aquest error o "soroll". La manera com s'elimina aquest error és la següent:

- 1) Identificació de les àrees que s'han inundat. Les que no, no tindrà interès en avaluar l'error, ja que la diferència entre les topografies serà nul·la.
- 2) Càlcul de l'error de cada un dels models i identificar el llindar de cada píxel a partir del qual s'ha considerat que el canvi en la topografia és real.
- 3) Eliminar tots els valors de canvi inferiors al llindar

L'àrea mòbil per tant es veurà reduïda, ja que s'hauran eliminat valors de canvi que no s'han considerat per trobar-se sota del llindar.

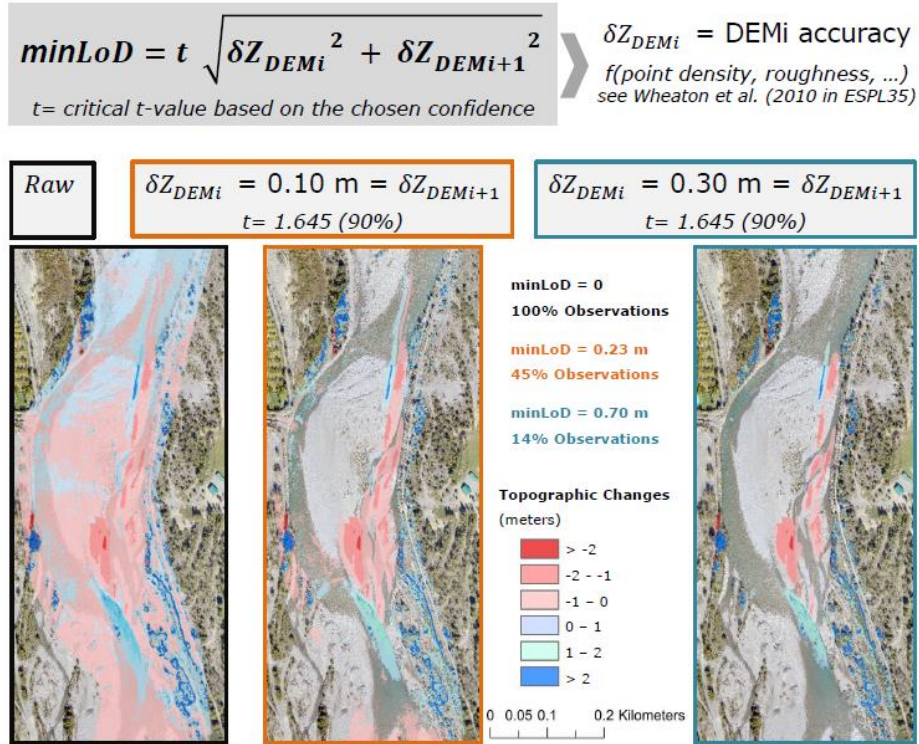


Figura 6: Models de canvi amb i sense tenir en compte l'error (Vericat et al, 2015)

El model de canvi que s'utilitzarà en aquest projecte ha estat realitzat per l'equip de MorphSed, que han proporcionat ambdós models: un amb els errors eliminats (s'anomenarà "Real") i un altre sense haver eliminat els errors (s'anomenarà "Raw").

3 EROSIÓ FLUVIAL

L'erosió fluvial s'entén com el descens de la cota de fons del riu, així com el retrocés dels marges (*Martín Vide, J.P. 1996*). Es distingeix de l'erosió transitòria i la permanent. L'erosió transitòria és aquella que es produeix durant una riuada, on s'assoleixen velocitats i calats alts, que augmenten la tensió del fons de la llera del riu, i per tant, la seva capacitat erosiva. Un cop l'avinguda ha finalitzat, la cota de fons torna a l'estat inicial. Si existeix una diferència entre aquests dos estats (abans i després de l'avinguda) en la cota de fons, es diu que hi ha una erosió residual, que a llarg termini seria l'erosió permanent.

El fet que existeixi una erosió residual és degut a un desequilibri en el cabal sòlid aigües amunt, és a dir, que el volum de sediments transportats és inferior a la capacitat del riu. A la Figura 7 es mostra un gràfic de la capacitat de transport en un riu en condicions normals. En el cas que ocupa aquest projecte, fa que, al haver-hi una aportació inferior de sediments aigües amunt, la capacitat de transport del riu provoqui una erosió a la llera. Aquest fenomen pot ser produït per causes naturals, però s'accentua amb l'actuació humana. Aquestes actuacions normalment són la construcció de preses (interrupció completa del cabal sòlid) o l'extracció de material de la llera del riu. Quan l'extracció de material és superior a l'aportació de sediments per part del riu, és quan es produeix un rebaix de la cota de fons, és a dir, una erosió de la llera permanent.

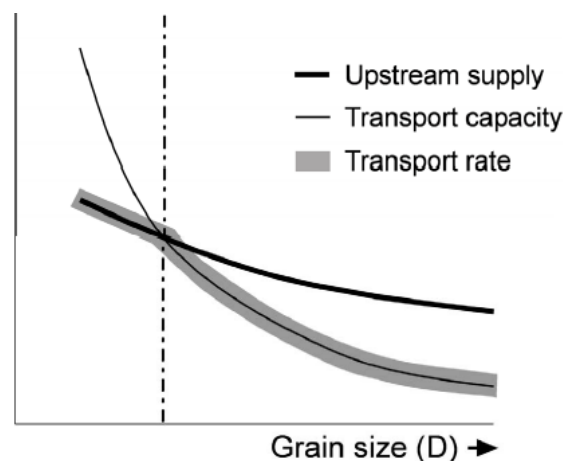


Figura 7: Gràfica de la capacitat de transport de sediments d'un riu (*Frings, R., 2014*)

3.1 Equacions de transport de sediments

El cabal sòlid és proporcional a la tensió de fons que experimenta el riu. Aquesta, és funció a la seva vegada del calat i el tipus de granulometria.

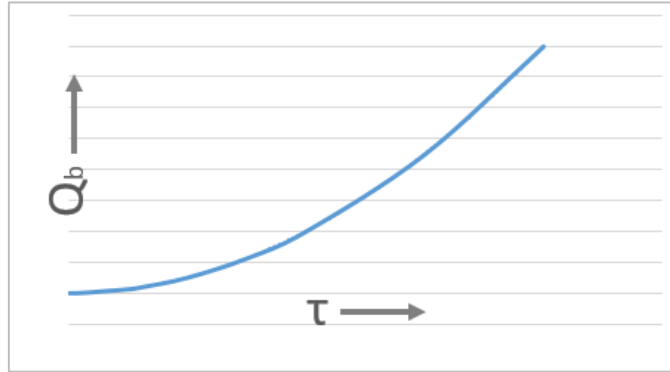


Figura 8: Gràfic esquemàtic de la dependència del cabal sòlid amb la tensió de fons.

Donat que el cabal sòlid és una variable extremadament difícil de mesurar, hi ha varies fórmules empíriques que intenten predir i quantificar el volum de sediment en funció d'un calat i una granulometria (Frings, R. 2014). La més famosa i més aplicada és la de Meyer-Peter&Müller (1948), però n'hi ha d'altres. A continuació es resumeixen 3 d'aquestes fórmules, totes recollides al mòdul de transport sòlid de l'Iber, permetent usar la que es desitgi pels càlculs.

- Fórmula de Meyer-Peter&Müller (1948)

$$q_s^* = 8(\mu\theta - 0.047)^{1.5}$$

On el paràmetre μ és un factor de rugositat del fons i la variable θ és el paràmetre de Shields, que es podria entendre com una tensió de fons adimensional. La manera per calcular-la és:

$$\theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma_w) * D_{50}}$$

On :

γ_s, γ_w pes específic del sediment i de l'aigua respectivament (N/m^3)

D_{50} mitjana de la mostra de sediments (m)

τ tensió de fons (N/m^2)

Aquesta fórmula dona un cabal sòlid adimensional. Basada en anàlisis de dades, es resumeix en una fórmula força simple, que s'usa molt sovint.

- Fórmula de Van Rijn (1984):

$$q_s = \alpha \rho_s U h (d_{50}/h)^{1.2} M_e^\eta$$

On:

α, η són coeficients adimensionals

$$M_e = \frac{U - U_{cr}}{2(s-1)gD_{50}}$$

ρ_s densitat (Kg/m³)

U mitjana de la velocitat amb la profunditat (m/s)

U_{cr} mitjana de la velocitat crítica amb la profunditat (m/s)

D_{50} mitjana de la mostra de sediments (m)

s densitat específic del sediment (-)

h calat (m)

Aquesta fórmula dona un cabal sòlid integrat en tota la profunditat del punt que s'està estudiant. Aquesta fórmula resumeix les equacions de moviment per cada partícula en funció de les condicions de flux (*Van Rijn, L., 1984*). Concretament, amb aquesta fórmula Van Rijn mostra que el diàmetre de les partícules té poca influència en el transport de fons.

- Fórmula de Engelund-Hansen (1984):

$$G = \frac{0.05WV^2h^{1.5}S^{1.5}}{(s-1)^2D_{50}\sqrt{g}}$$

On:

G Cabal sòlid (adimensional)

W ample del flux (m)

V velocitat del flux (m)

h calat (m)

S pendent del flux a la superfície (-)

s pes específic del sediment (-)

D_{50} mitjana de la mostra de sediments (m)

Aquesta fórmula s'obté igualant les forces d'arrossegament del flux amb l'energia potencial de les partícules que tenen al ser aixecades pel flux.

Com es pot veure, en general, les dues fórmules anteriors depenen de moltes variables i demanen determinar força coeficients. Amb les dades de camp que es proporcionen possiblement hi hagi molta incertesa en els resultats. D'aquesta manera, i com s'explicarà més endavant en l'apartat de càlculs, s'optarà per fer servir la fórmula "Ad-hoc", una variant de la de Meyer-Peter&Müller, però ajustant els coeficients.

- Fórmula Ad-hoc

$$q_s = \alpha(\tau^* - \tau_c^*)^\beta$$

On:

τ^* la tensió al fons produïda per la velocitat i el calat (-)

τ_c^* la tensió crítica a la qual un element es mobilitza (llindar sedimentació – erosió) (-)

α i β són coeficients empírics (-)

4 MODELITZACIÓ NUMÈRICA I SIMULACIÓ

4.1 Iber

El model Iber és un model numèric bidimensional que simula el comportament hidràulic de fluxos de làmina lliure, bàsicament el flux de rius (*Bladé et al., 2014*). És un software que permet modelitzar la dinàmica fluvial: donades unes condicions de contorn i un model d'elevació del terreny permet simular com i per on circularia un cabal determinat durant un temps determinat, per exemple.

La versió actual del programa permet, entre d'altres:

- Anàlisi de zones inundables
- Simulació de flux de làmina lliure
- Processos d'erosió i sedimentació
- Càlcul de corrents en estuaris
- Avaluació d'interaccions entre infraestructures i flux

Per la realització d'aquests càlculs utilitza el mètode de volums finits. El mètode de volums finits consisteix en resoldre les equacions hidrodinàmiques o de Saint Venant, que es basen en la conservació de massa i moment en dues dimensions dins de cada domini definit, en aquest cas, cada un dels elements de la malla. Aquestes equacions diferencials s'integren sobre cada volum de control, i finalment s'acaba obtenint una versió discretitzada de l'equació, tant temporal com espacial. És a dir, es tindran resultats per a cada punt de la malla per cada instant de temps de la modelització.

Les equacions de Saint Venant, assumeixen una distribució hidrostàtica de la pressió i uniforme de la velocitat, hipòtesis que s'acostumen a complir en rius. Quan això no és així, es farà un anàlisi més profund d'aquestes variables.

Equació de conservació de la massa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = M_s$$

Equacions de conservació del moment en ambdues direccions (x,y):

$$\frac{\partial hU_x}{\partial t} + \frac{\partial hU_x^2}{\partial x} + \frac{\partial hU_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h\tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial hU_y}{\partial t} + \frac{\partial hU_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial hU_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h\tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

On:

h és el calat

U_x i U_y les velocitats horitzontals

Z la cota de la làmina d'aigua

τ_s i τ_b són les tensió superficial produïda pel vent i la fricció de fons respectivament

ρ és la densitat de l'aigua

Ω i λ la velocitat de rotació de la terra i la latitud del punt d'estudi respectivament

τ_{xx}^e , τ_{xy}^e , τ_{yy}^e les tensions tangencials efectives (horitzontals)

M_s és el valor de la massa

M_x i M_y el moment en la direcció x i y , respectivament.

Per a la resolució d'aquest sistema d'equacions es determinaran unes condicions de contorn.

Se'n distingeixen dos tipus:

- Condicions de contorn tancades. Assumeix un límit impermeable que es tradueix en imposar una fricció lateral que afecta a la turbulència del fluid.
- Condicions de contorn obertes. Es distingiran les d'entrada (aigües amunt) i les de sortida (aigües avall). Les primeres, es basen en imposar un cabal d'entrada al domini de càlcul (Figura 9), distingint si es tracta de règim subcrític/crític o supercrític. Les condicions de sortida, només si es tracta de règim supercrític, s'imposarà un calat o cota d'aigua determinada.

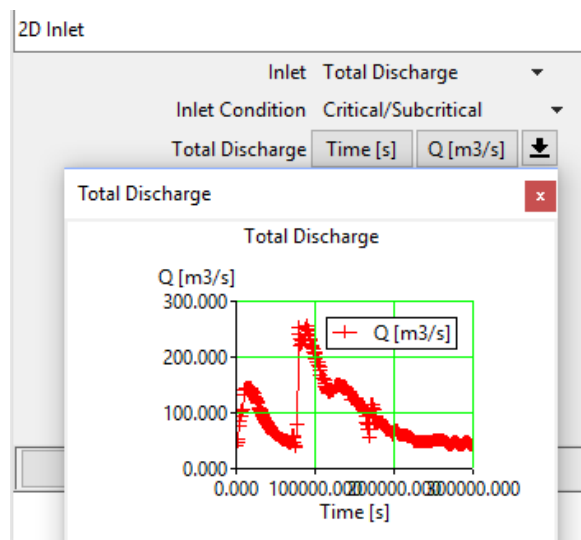


Figura 9: Condicions de contorn d'entrada (Cabal total)

4.1.1 Mòdul de transport de sediments

L'Iber consta de tres mòduls de càlcul: El model hidrodinàmic, el de flux turbulent i el de transport de sediment no estacionari.

En aquest projecte s'usaran el hidrodinàmic i el de transport sòlid. Entre els molts resultats que poden obtenir-se, els que prendran més importància en el present treball seran:

Variables hidrodinàmiques: Calats, velocitats i tensió de fons.

Variables transport sòlid: Erosió, cabal sòlid i cota de la llera del riu.

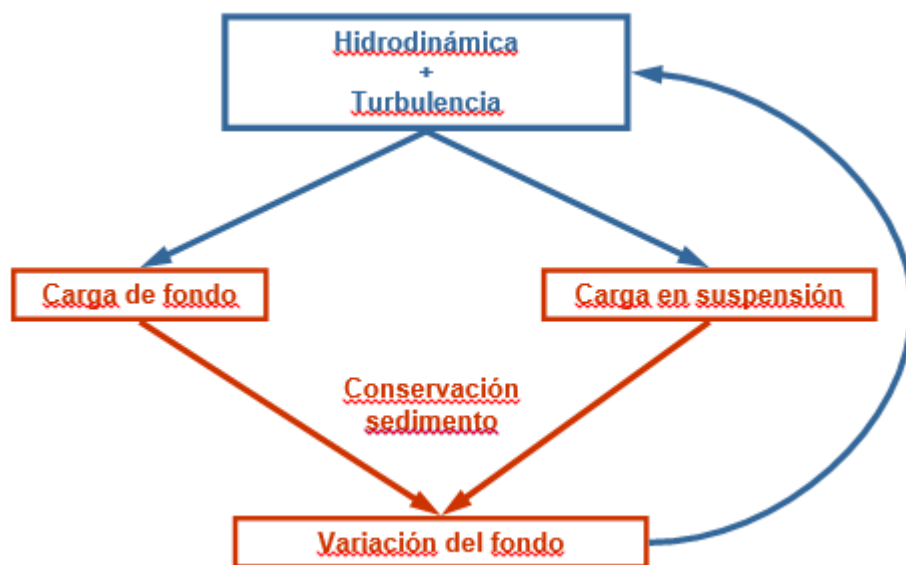


Figura 10: Esquema de càlcul del mòdul de transport de sediments (Manual de Referència Hidràulic – Iber)

En el mòdul de transport de sediments s'avalua tant el transport per càrrega de fons com per suspensió, tot i que en el present treball es limitarà al primer. Això permetrà estudiar l'evolució de la cota de la llera i localitzar les zones d'erosió en el domini d'estudi. Per fer un model simplificat, a dia d'avui, es considera una granulometria uniforme.

Com s'ha explicat en l'apartat anterior, s'inclouen les diferents equacions de transport de material sòlid, així que el llindar de moviment (paràmetre Shields), condicions de cota de fons no erosionable ("Rock layer"), i altres variables com tensió crítics en talús i condicions d'inici d'arrossegament, que no s'inclouen en aquest projecte.

4.1.2 Creació d'un model numèric

Un cop introduïdes les variables de càlcul que defineixen el model, el següent pas serà el de la creació d'una malla d'elements finits. Com s'ha introduït al principi d'aquest capítol, "dins" de


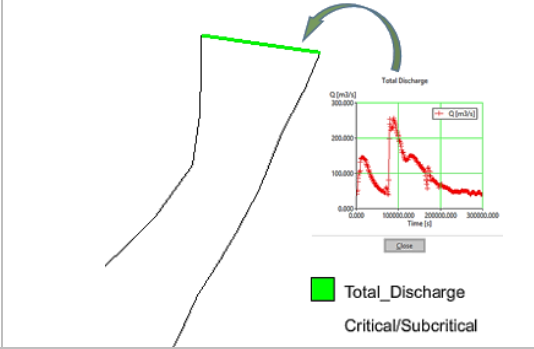
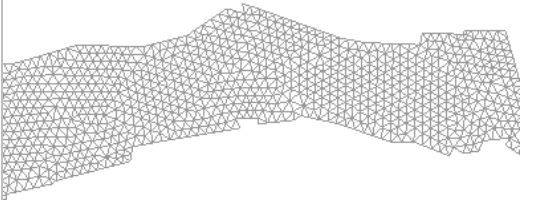
cada un d'aquests elements es resoldran tant les equacions de Saint Venant com les de transport de sediments.

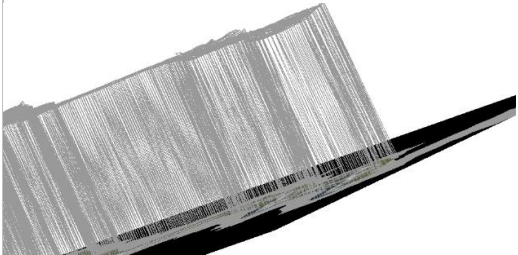
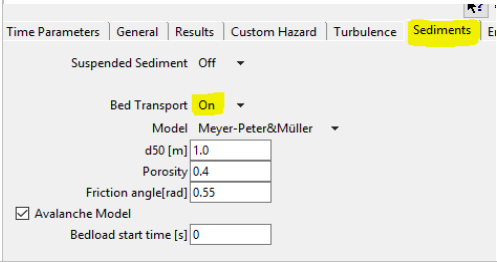
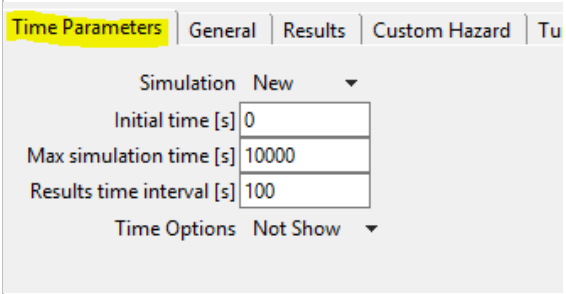
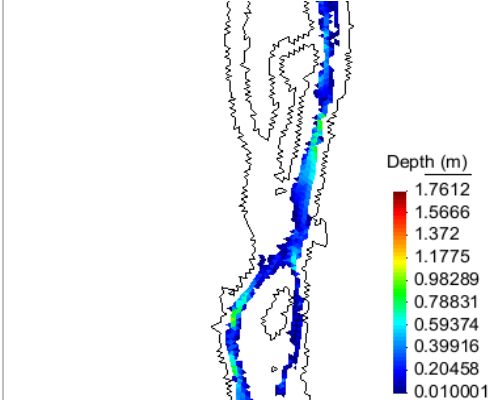
La malla d'elements tindrà una mida determinada: principalment la mida de l'element significarà la precisió en els resultats que es desitgi, així com el temps computacional del càlcul. Com més fina sigui la malla, millors resultats s'obtidran, però més temps es trigarà per la realització dels càlculs. Al revés passarà amb una malla més grollera, amb elements més grans: els resultats seran de baixa precisió, però el cost computacional dels càlculs serà baix.

La interfase que utilitza es basa en el programa GiD. Aquest programa permet treballar el pre-procés i el post-procés de manera gràfica.

A continuació es mostren els passos a seguir per a la creació i posterior càlcul de una modelització numèrica amb l'Iber.

- 1) PRE-PROCÉS: definició de les característiques del model, condicions de contorn, model d'elevació del terreny i paràmetres de càlcul.
- 2) CÀLCUL: Computació del model de volums finits.
- 3) POST-PROCÉS: obtenció dels resultats.

Pre-procés	Creació de la geometria (sobre ortofoto georreferenciada)	
	Aplicar condicions de contorn (hidrograma) i valor de rugositat	
	Creació de la malla (triangular/rectangular, estructurada/no estructurada)	

	<p>Inserció de la topografia (MDT, model digital del terreny)</p>																																																																	
	<p>Definició paràmetres del mòdul de càlcul (hidrodinàmic, turbulència, transport sòlid)</p>																																																																	
	<p>Definició de paràmetres del temps de càlcul</p>																																																																	
<p>Càlculs</p>	<p>Computació del model de volums finits</p>	<table border="1"> <tbody> <tr><td>8500.087</td><td>0.13025</td><td>14:35:38:36</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>8600.004</td><td>0.13022</td><td>14:36:47:28</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>8700.054</td><td>0.13027</td><td>14:37:55:66</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>8800.108</td><td>0.13031</td><td>14:39:04:11</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>8900.036</td><td>0.13024</td><td>14:40:12:69</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>9000.099</td><td>0.13031</td><td>14:41:22:26</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>9100.037</td><td>0.13037</td><td>14:42:31:28</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>9200.102</td><td>0.13030</td><td>14:43:40:11</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>9300.046</td><td>0.13032</td><td>14:44:48:95</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>9400.119</td><td>0.13032</td><td>14:45:57:92</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>9500.058</td><td>0.13037</td><td>14:47:07:08</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>9600.127</td><td>0.13028</td><td>14:48:16:44</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>9700.062</td><td>0.13030</td><td>14:49:25:76</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>9800.122</td><td>0.13028</td><td>14:50:35:50</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>9900.046</td><td>0.13035</td><td>14:51:45:10</td><td>10.000</td></tr> <tr><td>10000.087</td><td>0.13022</td><td>14:52:54:93</td><td>10.000</td></tr> </tbody> </table> <p>COMPUTATION FINISHED SUCCESSFULLY!</p>	8500.087	0.13025	14:35:38:36	10.000	8600.004	0.13022	14:36:47:28	10.000	8700.054	0.13027	14:37:55:66	10.000	8800.108	0.13031	14:39:04:11	10.000	8900.036	0.13024	14:40:12:69	10.000	9000.099	0.13031	14:41:22:26	10.000	9100.037	0.13037	14:42:31:28	10.000	9200.102	0.13030	14:43:40:11	10.000	9300.046	0.13032	14:44:48:95	10.000	9400.119	0.13032	14:45:57:92	10.000	9500.058	0.13037	14:47:07:08	10.000	9600.127	0.13028	14:48:16:44	10.000	9700.062	0.13030	14:49:25:76	10.000	9800.122	0.13028	14:50:35:50	10.000	9900.046	0.13035	14:51:45:10	10.000	10000.087	0.13022	14:52:54:93	10.000
8500.087	0.13025	14:35:38:36	10.000																																																															
8600.004	0.13022	14:36:47:28	10.000																																																															
8700.054	0.13027	14:37:55:66	10.000																																																															
8800.108	0.13031	14:39:04:11	10.000																																																															
8900.036	0.13024	14:40:12:69	10.000																																																															
9000.099	0.13031	14:41:22:26	10.000																																																															
9100.037	0.13037	14:42:31:28	10.000																																																															
9200.102	0.13030	14:43:40:11	10.000																																																															
9300.046	0.13032	14:44:48:95	10.000																																																															
9400.119	0.13032	14:45:57:92	10.000																																																															
9500.058	0.13037	14:47:07:08	10.000																																																															
9600.127	0.13028	14:48:16:44	10.000																																																															
9700.062	0.13030	14:49:25:76	10.000																																																															
9800.122	0.13028	14:50:35:50	10.000																																																															
9900.046	0.13035	14:51:45:10	10.000																																																															
10000.087	0.13022	14:52:54:93	10.000																																																															
<p>Post - procés</p>	<p>Obtenció dels resultats</p>																																																																	

El futur desenvolupament del programa Iber, s'espera incorporar models de qualitat d'aigües, hàbitat fluvial i model de transport en mescles de sediments (*Bladé et al., 2014*)

4.2 Creació del model del riu Cinca

Durant el desenvolupament del model de càlcul utilitzat en aquest projecte, s'han anat assumint certes hipòtesis i fent algunes simplificacions sempre provocades per problemàtiques que s'han anat esdevenint o per la falta de dades.

En els següents punts es farà un resum de com s'han anat prenent les decisions, donant forma al model final utilitzat per realitzar els càlculs. Com s'explicarà més endavant, la optimització del temps de càlcul ha estat una restricció important en aquest treball. Per tant, s'ha posat especial èmfasis en disminuir el cost computacional de la simulació.

- 1) El projecte parteix d'unes imatges de gran resolució obtingudes pel personal del projecte Morphsed. Aquestes fotografies obtingudes a partir de la fotogrametria especial automàtica tenen una resolució molt alta, de fins a 2000 ppp (píxels per polzada). Aquestes dades de gran precisió són massa "pesades" pel seu processament. Només es necessita per dibuixar una malla de càlcul, així que s'opta per una de 400 ppp (píxels per polzada).
- 2) El model digital del terreny (MDT) té unes dimensions diferents a la de la ortofoto, per això, no és directe el treballar sobre la fotografia aèria per després aplicar-hi el MDT. Al no coincidir es creen punts sense cota: el Iber ho llegeix com a pous, fet que provoca uns calats elevadíssims que distorsionen la modelització (Figura 11). Per solucionar-ho es fa un "pre-processament" d'aquestes dades amb GIS, ajustant la imatge a les dimensions del MDT.

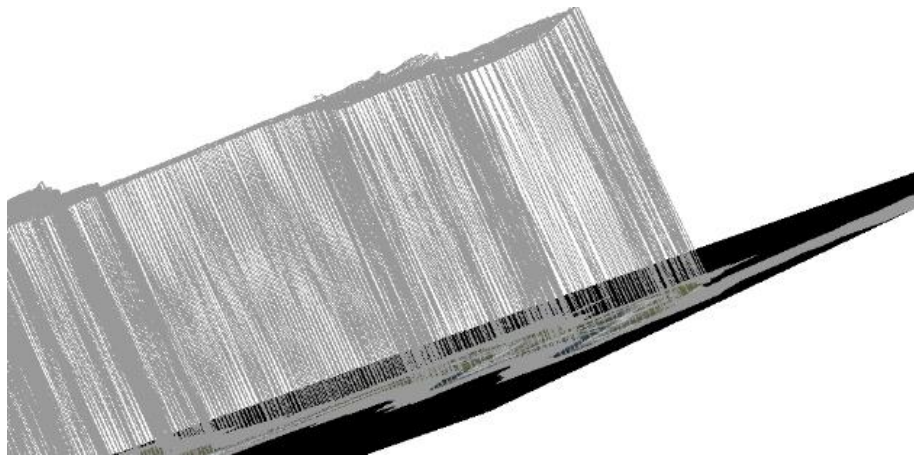


Figura 11: Diferències entre malla i MDT. Creació de punts sense cota.

- 3) Un cop solucionat el punt anterior, s’ha de decidir la mida de la malla a utilitzar. Per això, es decideix crear ratis de temps de simulació sobre temps real simulat. És a dir, quan triga el programa a calcular una avinguda de una determinada duració.

$$rati = \frac{Durada\ simulació}{Duració\ real\ simulada}$$

Com és lògic, s’han d’assolir ratis sempre més petits que 1, i com menor el valor, millor. Els hidrogrames de l’avinguda que es pretén estudiar dura dies. Per tal de fer un bon estudi, s’ha de tenir la capacitat de realitzar moltes simulacions per anar acotant variables. En aquest punt era qüestió d’anar provant diferents mides de malla (s’opta per malla triangular, ja que s’adapta millor a la geometria de la figura), i calculant aquests ratis és tria el més petit. És realitza amb cabals constants, de 10 m³/s i de 220 m³/s (valors petits i elevats presents en un hidrograma).

	Mida màx. element	Mida mín. element	Q (m ³ /s)	Temps real simulat (s)	T de simulació (s)	Rati
1	10	2,5	10	5000 s	1620	0.324
			220	10000s	14400	1.44
2	20	5	10	10000	8340	0.834
			220	15000	3780	0.252
3	5	1	10	15000	20000	1.333
4	15	3.5	220	10000	2640	0.264

Taula 1: Ratis temporals de la simulació

Observant la Taula 1 es veu que la combinació amb cabals elevats de la malla (2) i (4) donen ratis força baixos. S’opta per la número 4, ja que la malla és més fina i podrà donar resultats més ajustats a la realitat (Figura 12).

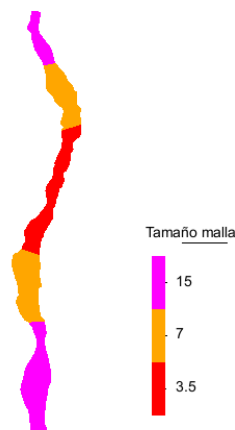


Figura 12: Mida de la malla escollida

- 4) En aquest punt s’observa que hi ha un gran nombre d’elements de la malla que mai arriben a mobilitzar-se, és a dir, no es “mullen” i per tant, no intervenen en el càlcul

però si alenteixen tot el procés computacional. El següent pas és el de filtrar els elements de la malla esborrant aquells que romanen sempre secs. El Iber permet fer aquesta operació, amb l'inconvenient que després no pot canviar-se la malla, ja que s'està treballant directament sobre els elements d'aquesta. Aquest ha de ser l'últim pas un cop s'ha decidit quina malla s'utilitzarà. Es fa amb cabals molt elevats, superiors al màxim que s'utilitzarà en l'hidrograma, per assegurar que en cap cas s'estan eliminant cel·les que podrien intervenir en el càlcul.

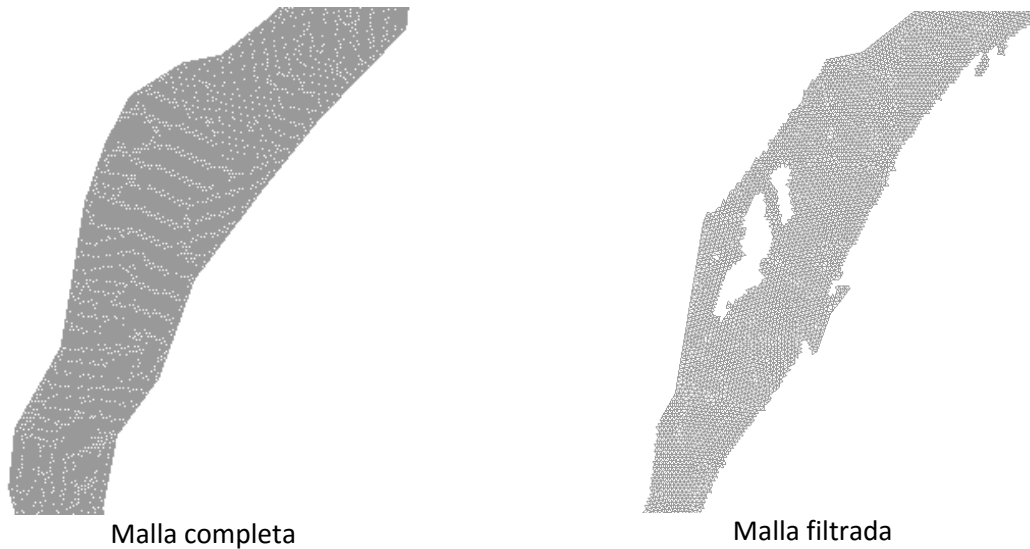


Figura 13: Imatge del abans i el després de filtrar i eliminar els elements de la malla que no es mullen mai (per cabals molt elevats).

- 5) Per l'elecció de l'hidrograma de l'avinguda a modelitzar, és interessant buscar aquell del qual tenim dades just abans i després. Si s'observa la Figura 14, es veu que l'equip de MorphSed va realitzar vols (obtenció de topografia mitjançant fotometria digital) just abans i just després de l'avinguda del 09/10/2014. Així doncs, es treballa amb l'hidrograma de l'avinguda entre els vols e08 i el e09.

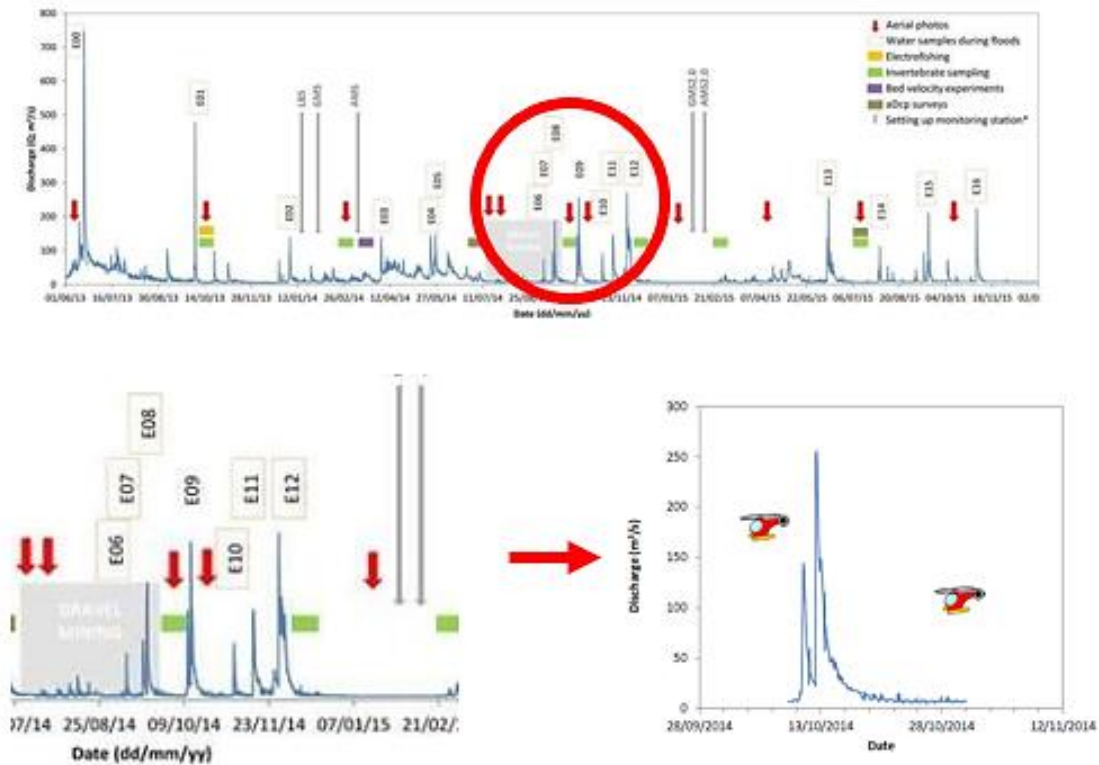


Figura 14: Vols e08 i e09. Hidrograma entre els vols e08 i e09

- 6) Una gran part dels cabals present en l'hidrograma són significativament baixos, els quals no mobilitzen un volum important de sediment. Per tal de reduir el cost computacional de la simulació i fer-la més "lleugera", es decideix treballar amb el que es coneix com a **diàmetre crític**, és a dir, després de veure una relació de cabals i diàmetre de sediment, s'escull aquell cabal per sota del qual es produeix un transport de sediment mínim, i per tant, negligible. Altre cop, l'Iber ens permet simular aquestes variables, i obtenir diagrames de distribució com els següents:

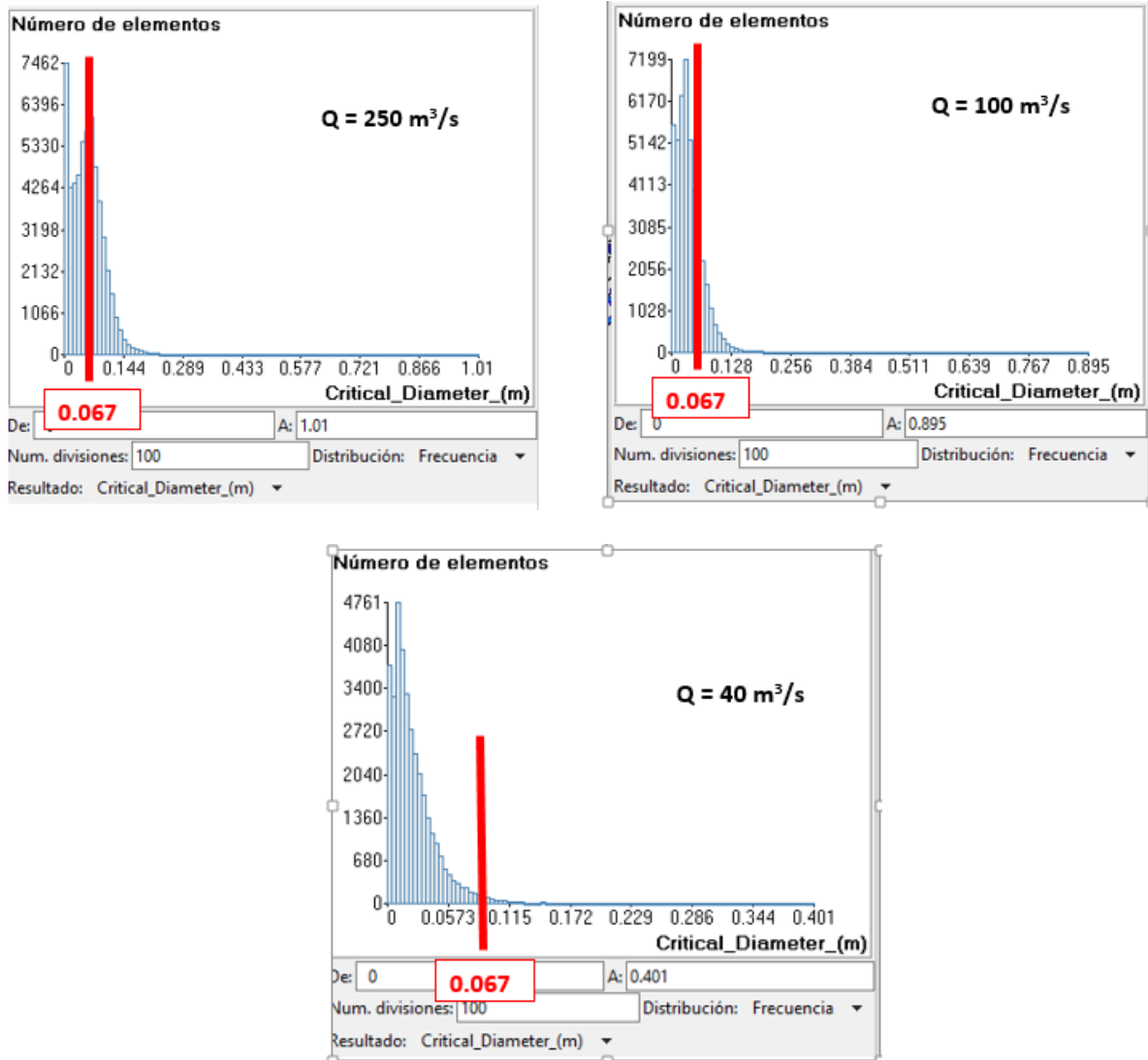


Figura 15: Diagrames de distribució d'elements que es mobilitzarien en funció de un Q determinat i el diàmetre de l'element. En vermell es marca el límit del D50 = 0.067 m .

- 7) Com s'observa en la Figura 15, s'ha anat iterant amb el cabal i observant el nombre d'elements que, per sota del $D_{50} = 0,067$ m, es mobilitzarien. Com menys elements quedin a la dreta del D_{50} , significa que més acurada serà la simulació, ja que estarem descartant menys elements. S'escull un cabal de $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 8) Un cop triat el cabal mínim es filtra l'hidrograma. Els cabals inferiors a aquest valor, no es tindran en compte, i es redibuixarà l'hidrograma d'estudi. (Figura 16)

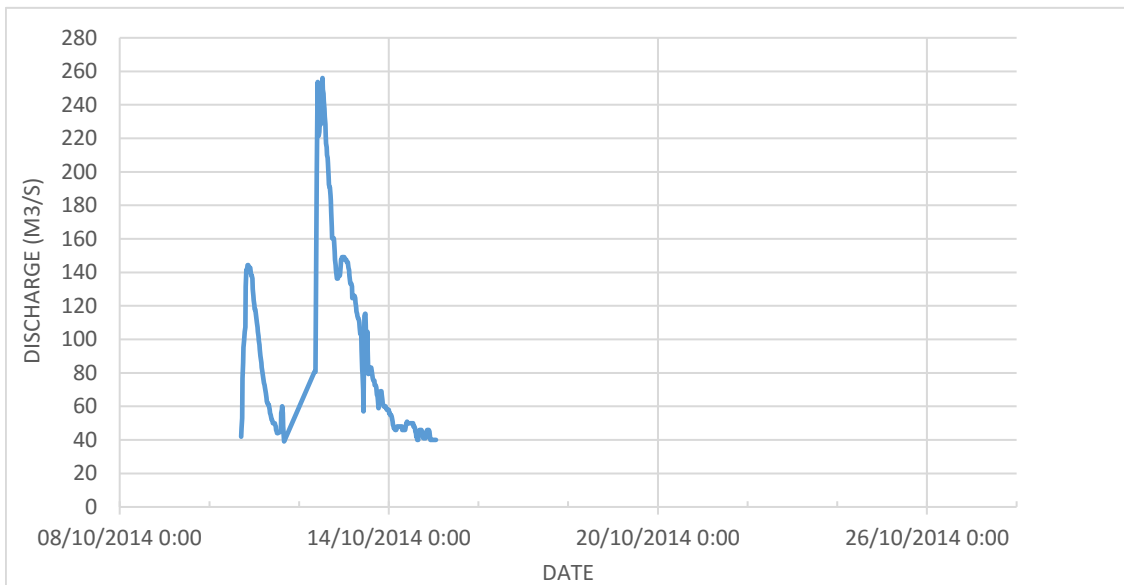
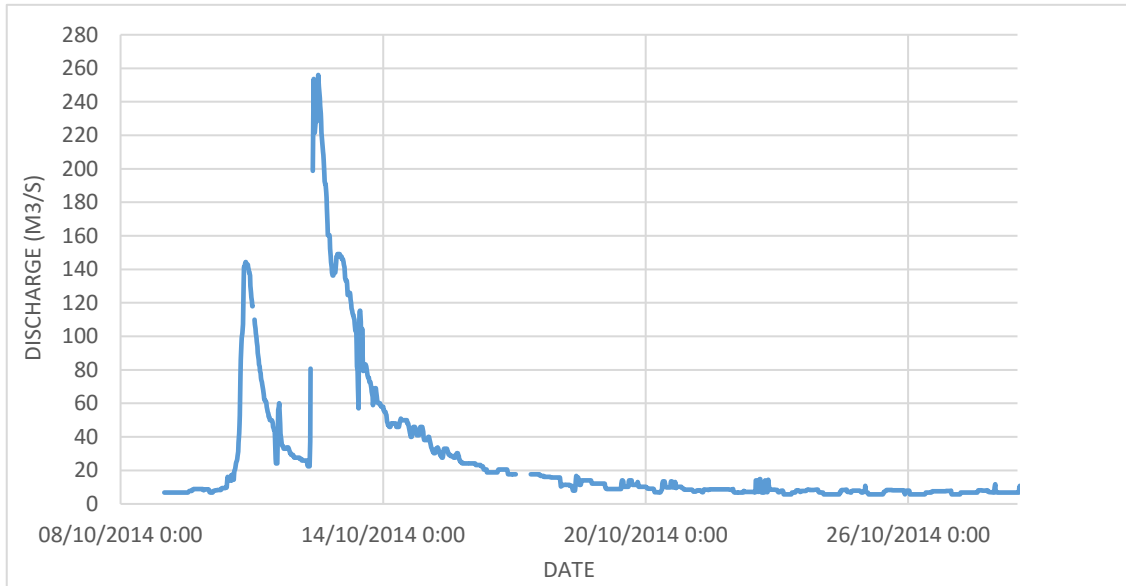


Figura 16: Hidrograma abans i després de filtrar-ho per cabals superiors a 40 m³/s

Com es veu en l'hidrograma reduït, es simularan de 4 dies (contra 20 dies en l'inicial aproximadament).

- 9) Simulant el tram de 12 km, s'obtenien simulacions molt llargues, així que es decideix reduir la zona d'estudi. S'escull una zona on l'equip de MorphSed han observat registres d'erosió i de transport de sediments més importants (Figura 17). El tram és de 2 km aproximadament.



Figura 17: Zona final d'estudi

- 10) Donat que la zona ha estat reduïda, es torna a fer un estudi de la malla. Aquest cop es provenen elements de la mateixa mida, la mínima possible (la metodologia per triar la mida de la malla és la mateixa que s'ha explicat anteriorment). La mida final de l'element és de 5.
- 11) És en aquest punt quan s'identifica un altre problema, aquest de caràcter numèric. Al realitzar la simulació, quan s'assoleix el valor màxim de l'hidrograma, aquesta s'atura ja que no es compleix la *Condició de Courant*. La condició de Courant és una restricció que es pot resumir en la següent inequació:

$$CFL \geq (v + \sqrt{gh}) \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

On:

CFL és el nombre de Courant-Friedrich-Levy, $CFL < 1$

Δt l'increment de pas de temps (s)

Δx la mida de l'element (m)

$v + \sqrt{gh}$ la velocitat del fluid (celeritat) (m/s)

La condició de Courant determina la relació que ha de tenir la mida de la malla i el pas de temps ("time-step"). El CFL és el quocient entre l'interval de temps i el temps de residència en un volum finit (mida de la malla dividit per la celeritat). Quan la mida de la malla és molt petita o el calat o la velocitat assoleixen valor molt elevats, aquesta condició no es compleix i no pot realitzar-se la següent iteració. Per tant, el càlcul s'atura.

La condició de contorn aigües avall és la de calat crític. Això fa que es produeixi una erosió no realista en aquests punts, i vagi augmentant a cada iteració. S'assoleixen valors de velocitats molt elevats (Figura 18) que fan disminuir l'interval de temps i provoquen que la condició de Courant no es compleixi i la modelització no pugui realitzar-se.

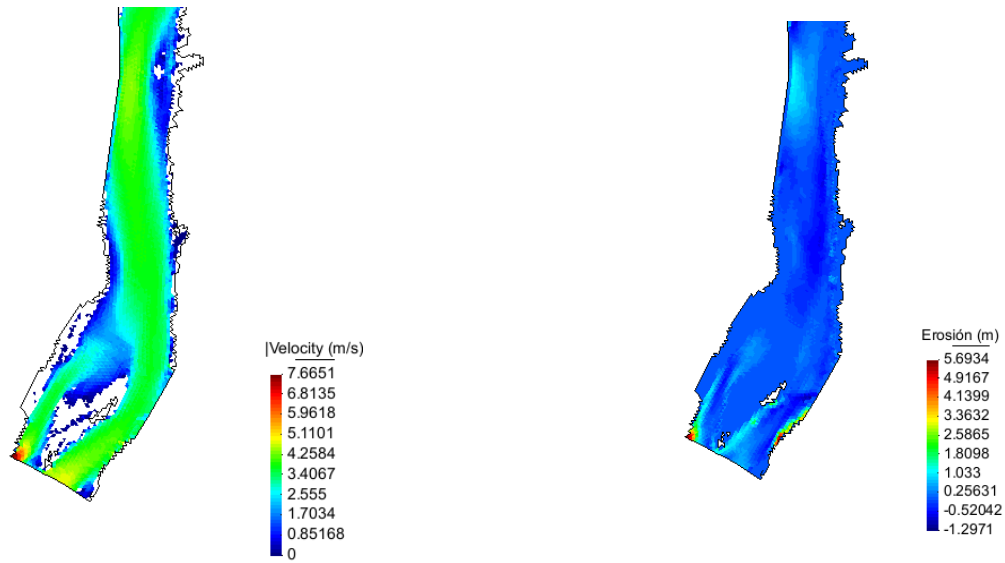


Figura 18: Velocitat i erosió elevades produïdes aigües avall, provocada per la condició de contorn

Es decideix imposar una condició al tram final de la malla, per evitar que això succeeixi. Es situa una capa de roca (Figura 19), és a dir, una capa on no es produirà cap tipus de transport de sediment, per evitar aquesta divergència en els resultats.

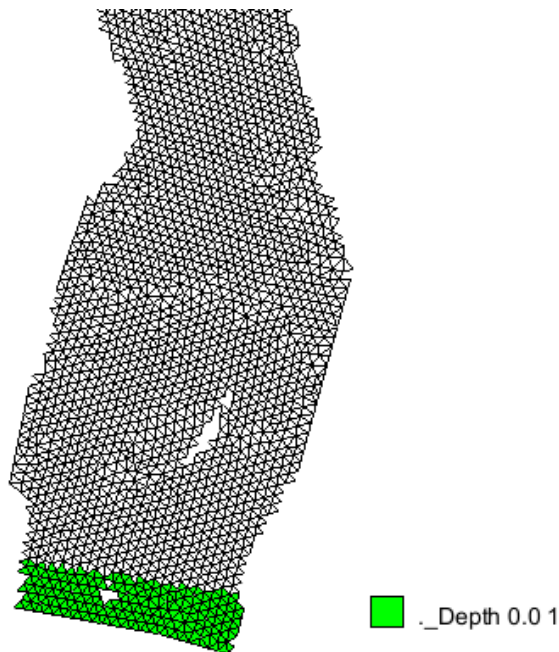


Figura 19: Capa de roca situada al límit aigües avall de la simulació

- 12) Un cop eliminats aquests punts, la simulació es realitza sense problemes, amb un temps de simulació de 6 hores i 46 min (24.240 seg). A la Taula 2 es resumeixen les dades finals de la simulació.

Mida de la malla	5
Km simulats	1.726 m
Nombre d'elements	17.314 elements
Temps simulat	300.600 s (3,46 dies)
Temps de simulació	24.240 s (6,7 hores)
Rati	0,08064

Taula 2: Dades finals del model per la simulació

5 VALIDACIÓ MODEL HIDRÀULIC

Abans de entrar en el tema central d'aquest treball, la calibració del model de transport de sediments, s'ha de realitzar el pas previ de fer una validació del model hidràulic, sense tenir en compte variables de transport sòlid.

Durant la riuada corresponent al vol e08, es van prendre mesures de calat i velocitats a l'estació d'Escalona (X: 265757; Y:4706736), un punt aigües amunt de la zona on es farà la anàlisi més exhaustiu del transport de sediments. Aquests valors s'utilitzaran per fer una validació del model, comparant les variables hidràuliques de calats i velocitats amb les del model Iber i s'analitzaran les diferències que es produeixin.



Figura 20: Estació hidromètrica d' Escalona, on van ser mesurats els cabals i les velocitats (Font: MorphSed)

En primer lloc, es fa una validació del model observant la correspondència del canal mullat que s'observa en l'ortofotografia i el obtingut amb la simulació (Figura 21).



Figura 21: Correspondència entre el canal mullat observat en la fotografia aèria (esquerra) i l'àrea mullada observada en la simulació.

Un cop feta una primera validació visual, es comprovaran si els valors del calat i la velocitat en diverses seccions transversals de la simulació es corresponen amb els valors reals en les mateixes seccions durant la riuada d'estudi, que com s'ha mencionat a l'inici d'aquest apartat van ser preses a l'estació hidromètrica d' Escalona.

Aquestes dades les va prendre l'equip de MorphSed a partir de l'aparell aDcp, un aparell que permet mesurar la velocitat i la profunditat d'una columna d'aigua a partir de la velocitat de propagació de les ones que emet i que rep. Es basa en l'efecte Doppler que provoca que les ones interceptin partícules en aquesta columna d'aigua.

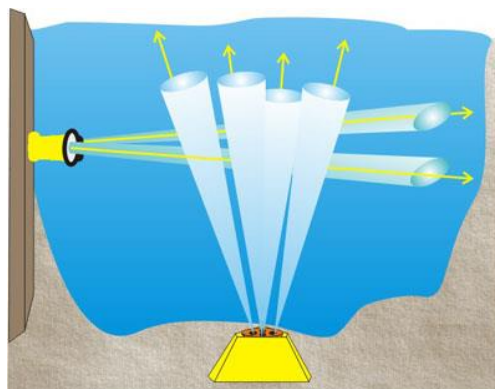


Figura 22: Esquema de funcionament del aDcp.

5.1 Tractament i conversió de les dades

El pas previ a realitzar és la conversió d'aquestes dades de camp (tipus taula Excel) a un format ràster, per tal de poder treballar amb seccions transversals i perfils. Aquesta transformació és realitzarà exportant les dades en un format tipus text, per convertir-les a ràster amb el programa ArcMaps: (*Toolbox* → *Conversion Tools* → *ASCII to Raster (Float)*). Amb aquest tractament de les dades s'obtenen un seguit de punts a l'espai que tenen associats valors de calat i velocitat.



Figura 23: En vermell, la zona on van prendre's les mesures de calats i velocitats amb el aDcp.

Per tal de comprar-ho amb la simulació és necessària la informació sobre el cabal que passava en aquestes seccions al instant que van prendre's les mesures. D'aquesta manera, serà possible extreure les dades en aquest instant de temps concret en el model de l'Iber. Per trobar aquest valor, es treballarà amb el cabal específic de tres seccions distribuïdes en la zona d'anàlisis, dels que s'extrauran els perfils corresponents que permetran trobar el cabal que circulava en aquesta zona quan van prendre's les dades (Figura 24).

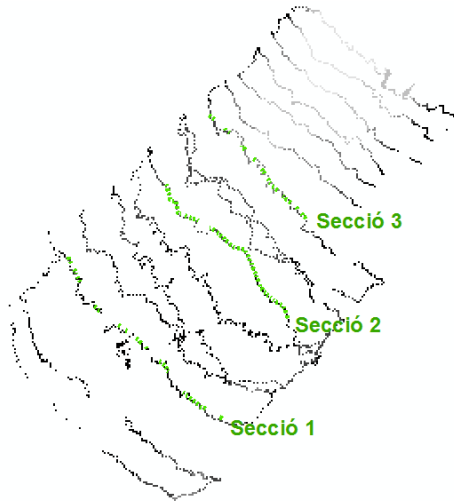


Figura 24: Seccions d'estudi per la validació hidràulica del model.

El cabal que passa per una secció transversal, tenint les dades de velocitat i calat, s'obté integrant el cabal específic de la secció d'estudi.

$$Q = \int q_s dl = \int v \cdot y dl$$

On:

Q és el cabal que circula per la secció

q_s el cabal específic

v la velocitat del fluid

y el calat

	Q (m ³ /h)
Secció 1	15.31
Secció 2	16.52
Secció 3	15.99

Taula 3: Cabals totals per cada secció

De les dades de la Taula 3 s'obté un cabal mig de 15.31 m³/h, que es correspon, a un instant concret del hidrograma de la riuada ($t = 136000$ seg). Així doncs, s'analitza aquest instant de l'hidrograma de la simulació, per a continuació validar les dades tant de cabal específic com de calats i velocitats, en cada una de les 3 seccions abans considerades.

Abans de procedir amb la validació, s'ha de tenir en compte la diferència de densitats de dades. L'equip de MorphSed obtenen dades cada 0,5 m amb el dispositiu aDcp. El model realitzat amb l'Iber, es tenen resultats cada 5m.

Per exemplificar-ho, s'exporten els resultats obtinguts amb el model Iber a format "taula", per així comparar el nombre de punts entre un cas i l'altre.

A continuació es descriu els passos que s'han fet per arribar a tenir les dades de l'Iber en format de taula.

- 1) Iber: Exportació dels resultats (calat i velocitat) en format ASCII.
- 2) ArcMaps: *Toolbox* → *Conversion Tools* → *ASCII to Raster (Float)*
- 3) ArcMaps: *Toolbox* → *Conversion Tools* → *Raster to Point*
- 4) ArcMaps: *Toolbox* → *Data Management* → *Features* → *Add XY Coordinates*

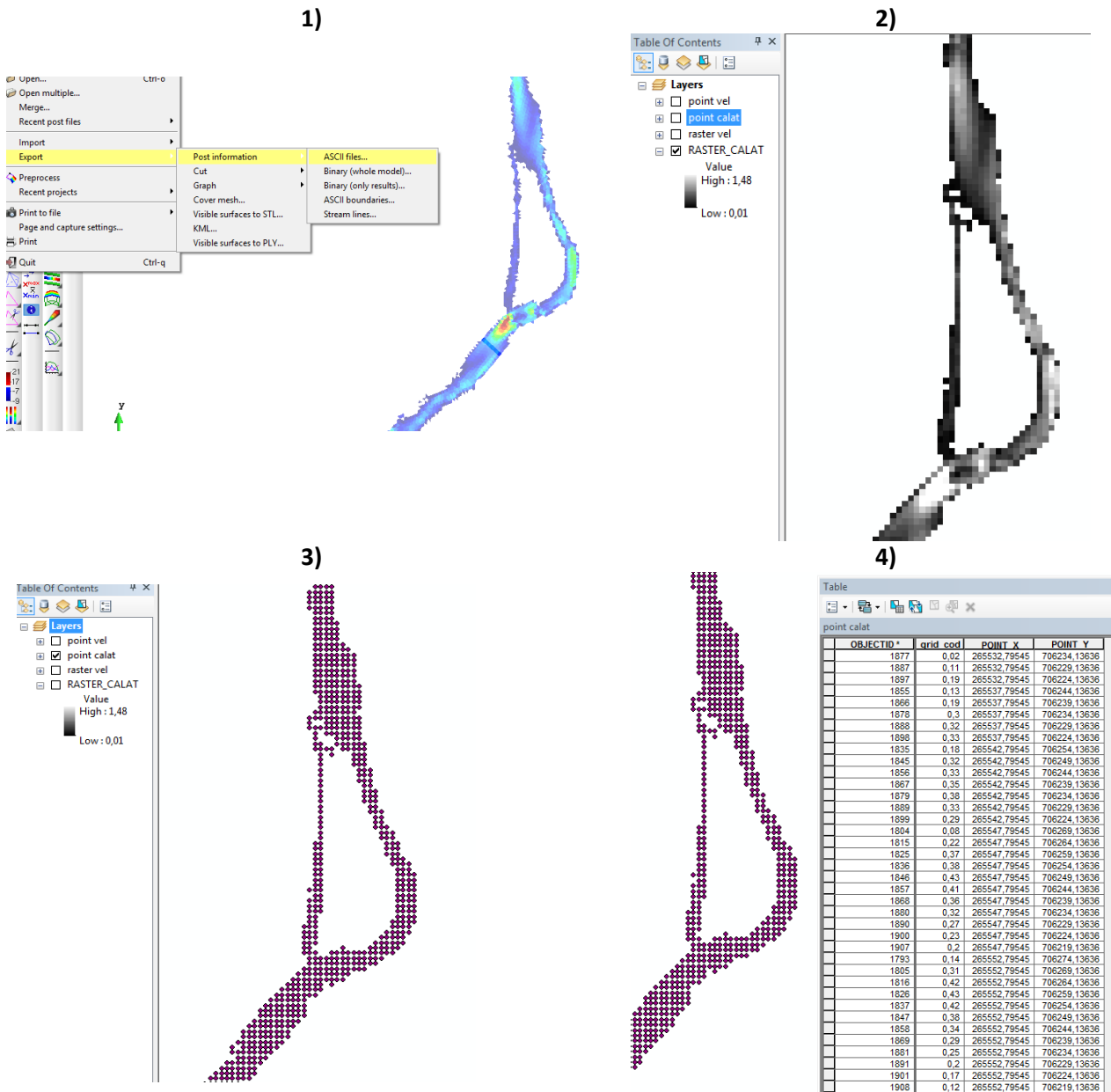
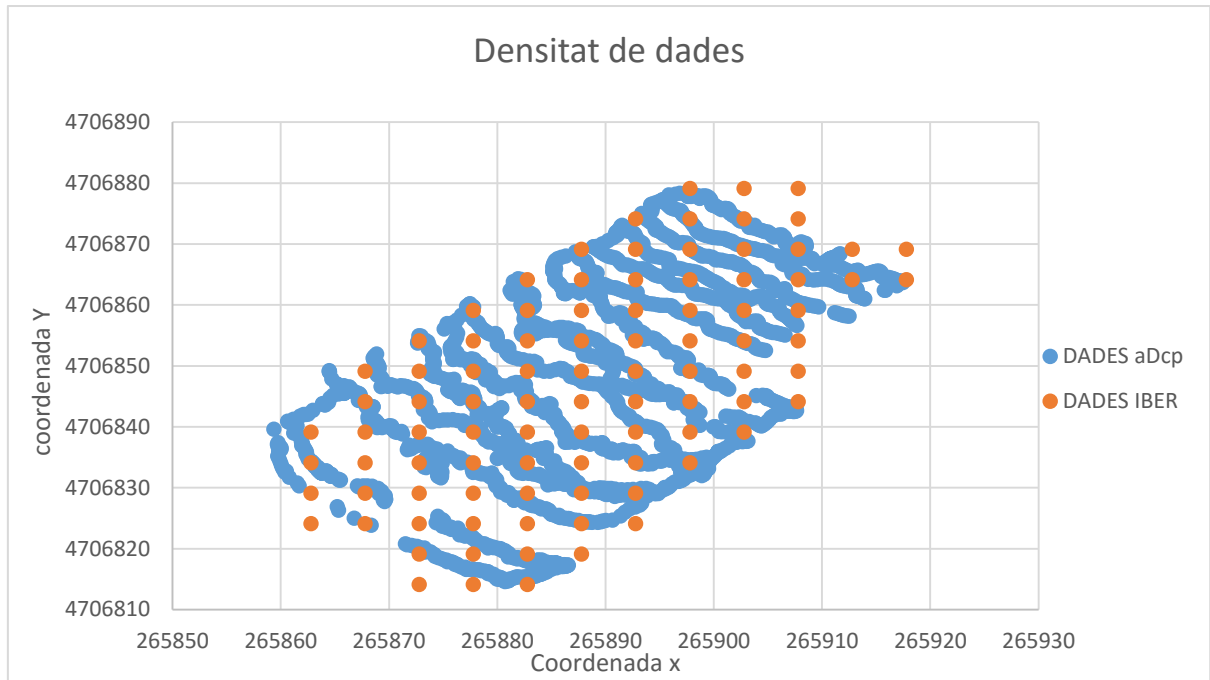


Figura 25: Conversió dels resultats Iber a format taula.

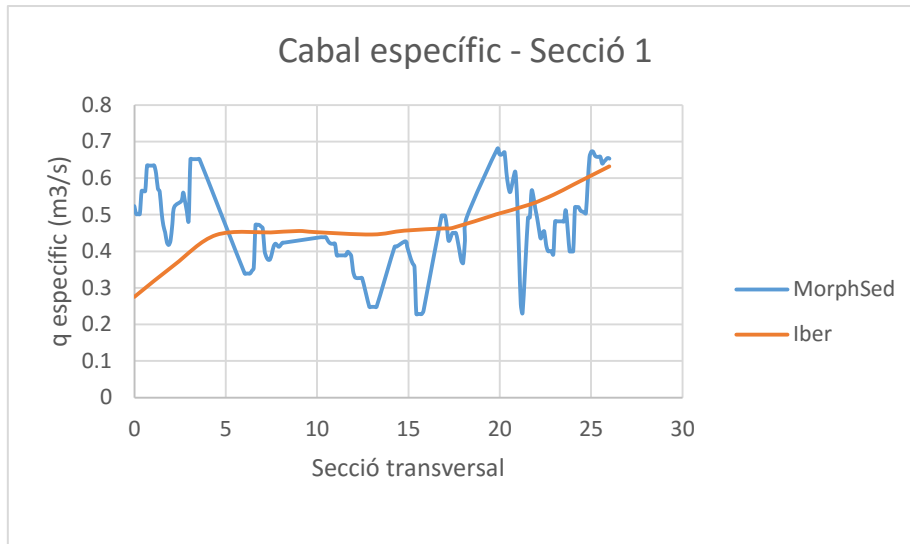
Si aquests punts es comparen amb els punts obtinguts a camp amb el mètode aDcp, s'observa la diferència de densitat de mesures que tindrem en un cas i en l'altre (Gràfica 1)



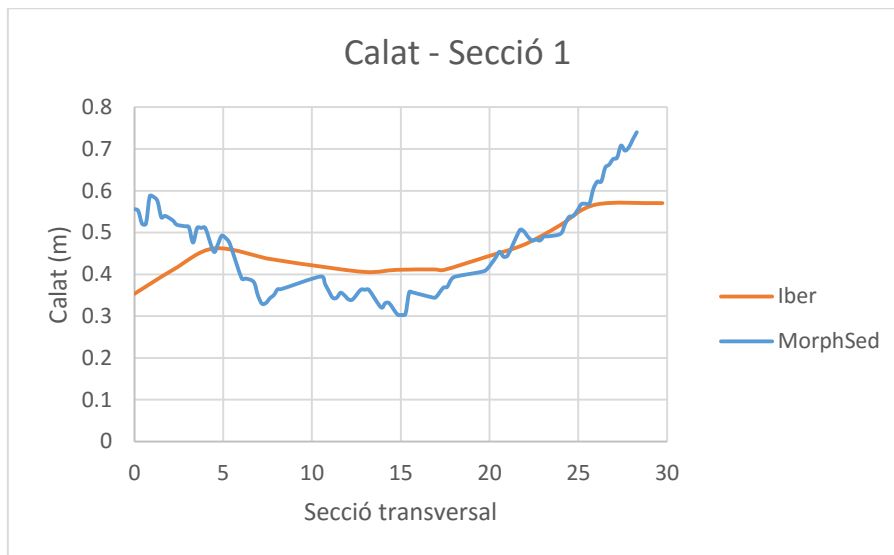
Gràfica 1: Densitat de punts obtinguts amb l'Iber i amb el aDcp (MorphSed)

5.2 Resultats

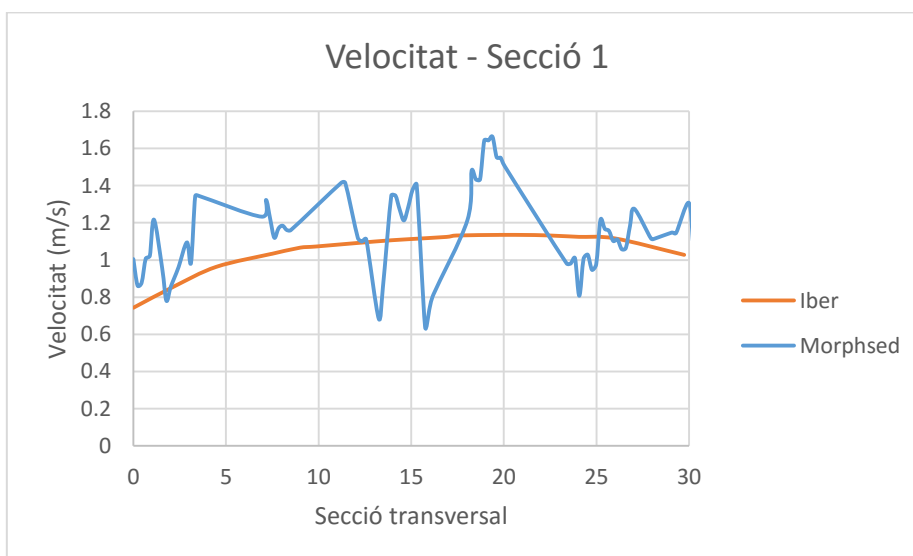
A continuació, es mostra en forma de gràfiques, les corbes de cabal específic, calats i velocitats per cada una de les tres seccions d'estudi.



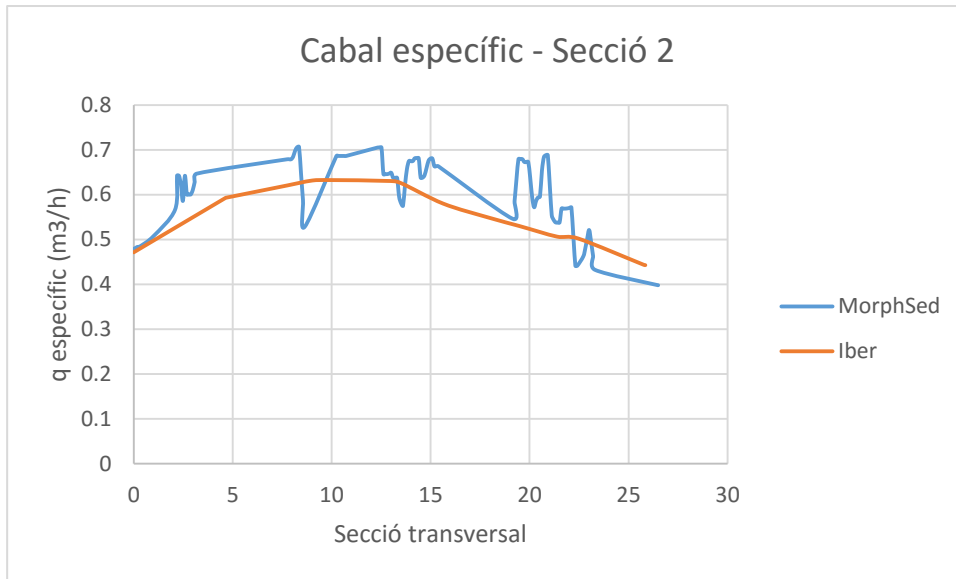
Gràfica 2: Cabal específic en la secció 1, dades de MorphSed i Iber



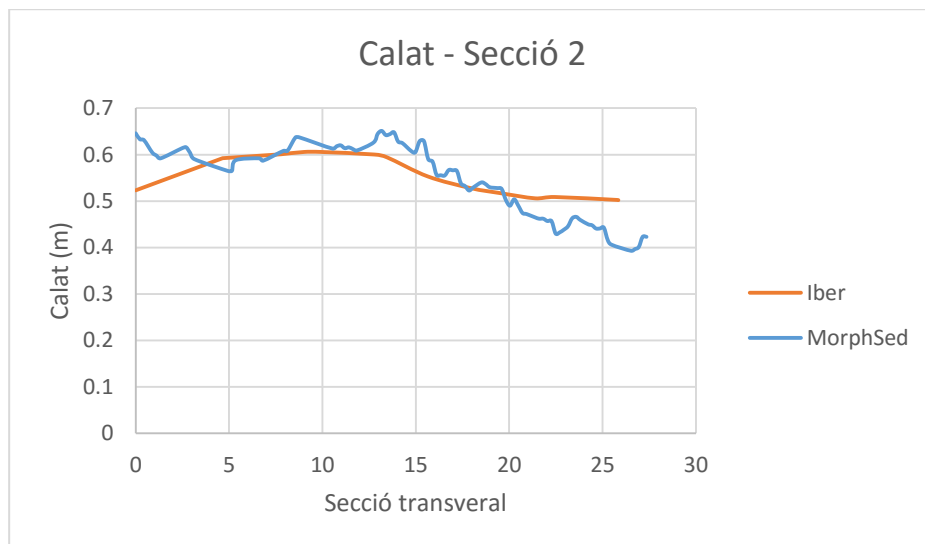
Gràfica 3: Calat observat en la secció 1, dades de MorphSed i Iber



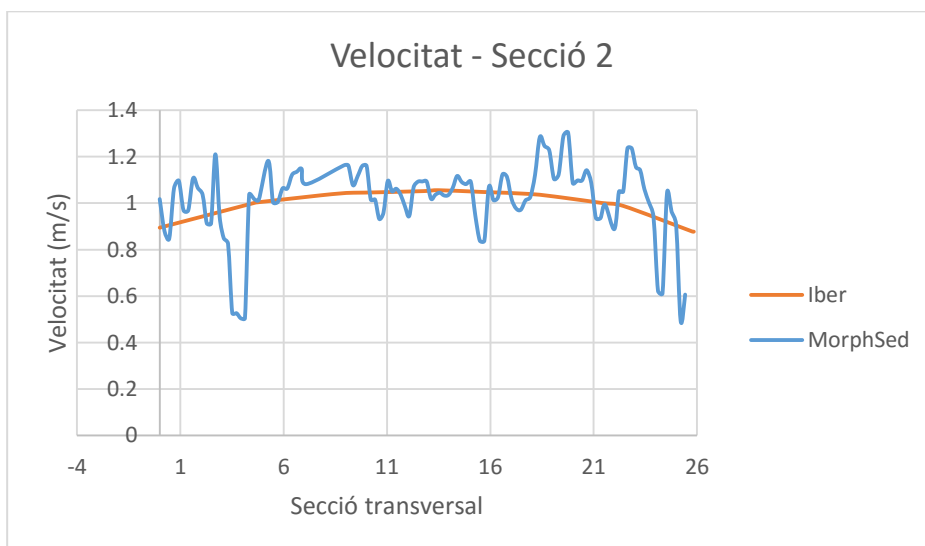
Gràfica 4: Velocitat observada en la secció 1, dades de MorphSed i Iber



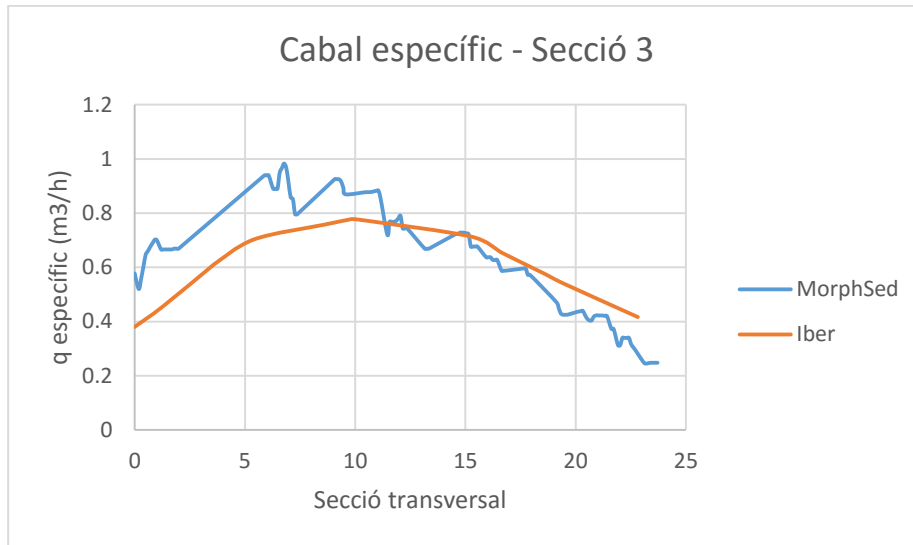
Gràfica 5: Cabal específic en la secció 2, dades de MorphSed i Iber



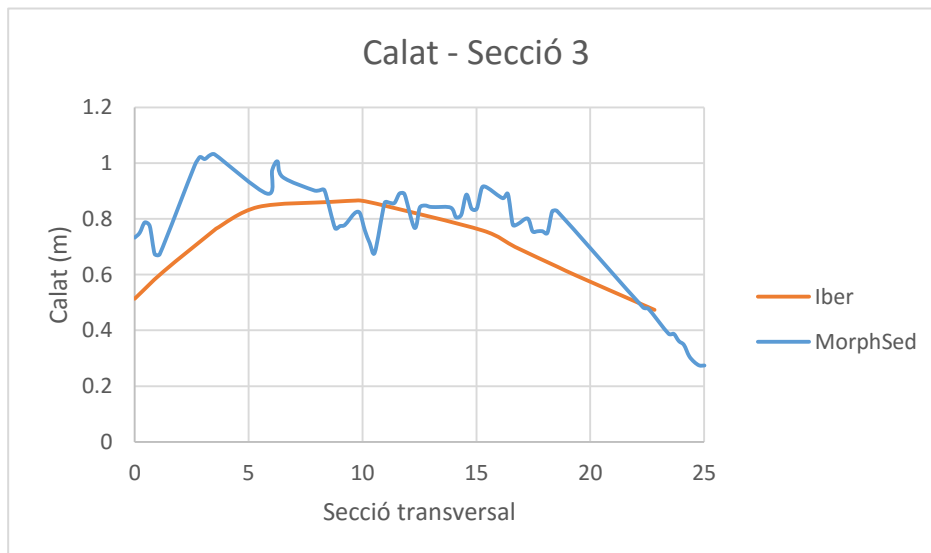
Gràfica 6: Calat en la secció 2, dades de MorphSed i Iber



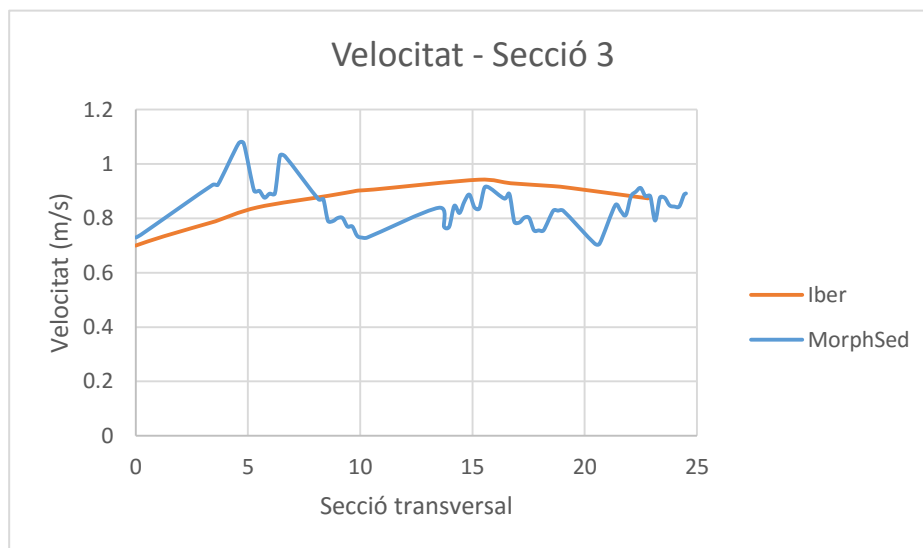
Gràfica 7: Velocitat observada en la secció 2, dades de MorphSed i Iber



Gràfica 8: Cabal específic corresponent a la secció 3, dades de MorphSed i Iber



Gràfica 9: Calat corresponent a la secció 3, dades de MorphSed i Iber



Gràfica 10: Velocitat observada en la secció 3, dades de MorphSed i Iber

El primer que s'observa en les gràfiques anteriors és el fet que, com s'ha comentat anteriorment, la limitació de la mida de la malla del model Iber fa que tinguem menys punts d'anàlisi. Les dades de MorphSed ofereixen una millors precisió, donat que la densitat d'informació és molt més elevada.

Tot i així, la sèrie de dades procedent del model Iber segueix la mateixa tendència que les dades reals, sempre oferint un aspecte més suau, ja que és tenen menys punts. Aquesta informació ens permet validar el model hidràulic, ja que, tot i les limitacions que ofereix la simulació numèrica, s'observa que els resultats segueixen el mateix patró de monotonia que les dades de camp, així com valors numèrics dins del rang de cada secció.

Es pot concloure que, amb una malla més fina, aquestes corbes que defineixen la velocitat i el calat a cada una de les tres seccions d'estudi, s'aproximarien a les definides per les dades de camp, ja que seria una qüestió de tenir més dades, o dit d'una altre manera, més elements finits en el model. Per aquest motiu, el model es dona per validat hidràulicament, i amb aquesta premissa, es pot procedir al anàlisi del transport de sediments.

6 VALIDACIÓ QUALITATIVA DEL MODEL DE TRANSPORT DE SEDIMENTS

En aquest apartat es farà una valoració qualitativa del model de transport de sediments. S'analitzaran aquelles zones on el model mostra erosió o sedimentació i es compararà amb les dades reals proporcionades per l'equip de MorphSed.

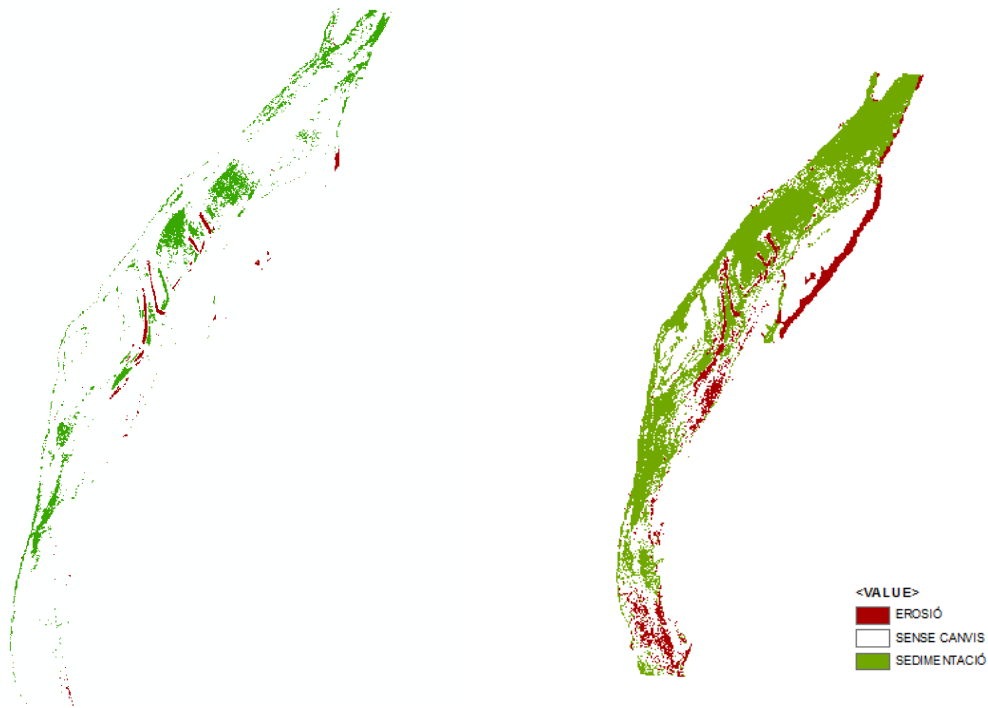


Figura 26: Ràster obtingut filtrant els errors (Real) i sense (Raw)

Per fer la comparació qualitativa s'utilitzaran les dades on s'han eliminat els errors, és a dir, el model "Real". En l'annex s'inclou un estudi també amb les dades "Raw".

6.1 Ajust de l'equació de transport de sediments

En apartats anteriors s'han definit les equacions que defineixen el transport de sediments. S'utilitza la fórmula Ad-hoc, que permet ajustar els coeficients. A continuació es recorda l'equació:

$$q_s = \alpha(\tau^* - \tau_c^*)^\beta$$

On:

τ^* és la tensió al fons produïda per la velocitat i el calat (-)

τ_c^* és la tensió crítica a la qual un element es mobilitza (llindar sedimentació – erosió) (-)

α i β són coeficients empírics (-).

És a dir, si $\tau^* < \tau_c^*$ implica un cabal sòlid (q_s) negatiu, és a dir, **sedimentació**.

En canvi, si $\tau^* > \tau_c^*$ implica un cabal sòlid (q_s) positiu, és a dir, **erosió**.

L'Iber usa per defecte els valors de $\tau_c^* = 0.0495$, $\alpha = 3.97$ i $\beta = 1.5$, que són els valors de la fórmula de Meyer-Peter&Müller.

Per fer la comparació qualitativa, s'intentarà ajustar les zones on es produeix erosió o sedimentació. Qui controla aquest fenomen és la tensió crítica, el llindar entre un estat i l'altre. Així doncs, el procediment serà el següent: un cop s'obté els resultats de la primera simulació, s'analitzen les zones on hi ha diferències significatives: zones on apareix erosió a les dades reals obtingudes amb la diferència del MDTs, però que el model realitzat amb l'Iber no ho mostra, o a l'inrevés. Aquelles zona on es vegi una diferència més important, s'hi analitzarà la tensió crítica. Aquest valor, per tal d'introduir-lo a la fórmula Ad-hoc, ha de ser adimensional. La manera de convertir aquest valor en adimensional és mitjançant el pes específic relatiu del sediment:

$$\tau_c^* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma_w) * D_{50}}$$

La manera d'il·lustrar aquestes diferències serà mitjançant imatges de les zones de sedimentació i erosió al final de la simulació i comparar-les amb el ràster de les dades de camp (Figura 26). Es marcaran amb cercles aquelles zones on es vegin diferències substancials.

6.1.1 Simulació 0 – Original

Es realitza la simulació amb els valors que venen per defecte en l'Iber.

The screenshot shows the 'Bed Transport' settings in the Iber software. The 'Bed Transport' option is set to 'On'. The 'Model' is set to 'Ad Hoc'. The parameters are as follows:

Alpha	3.97
Tau crit	0.0495
Beta	1.5
d50 [m]	0.067
Porosity	0.4
Friction angle[rad]	0.55

Below these parameters, there is an unchecked checkbox for 'Avalanche Model' and a 'Bedload start time [s]' field set to 0.

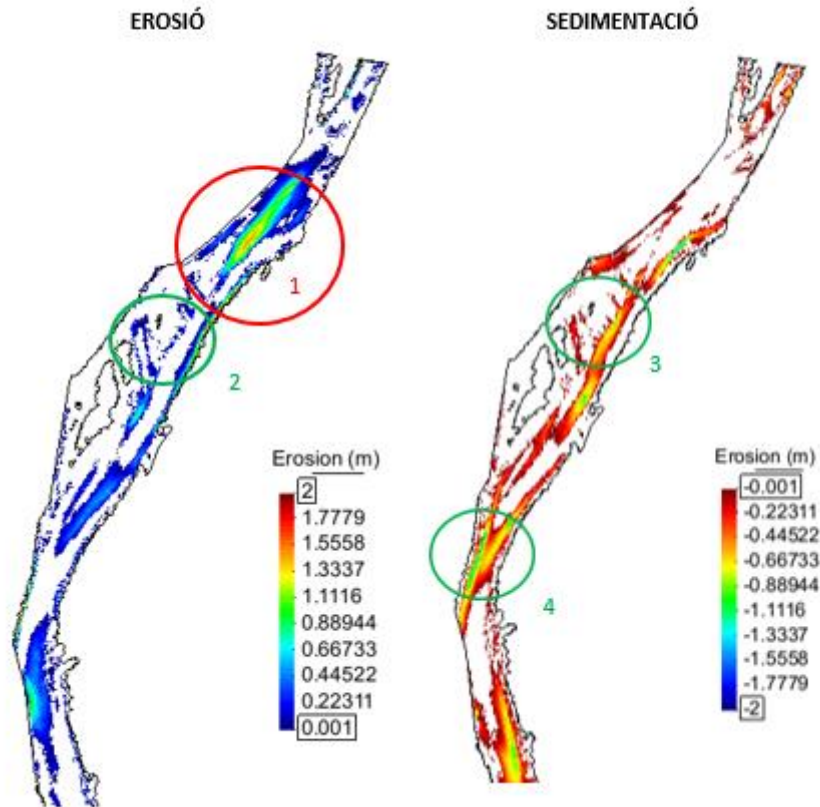


Figura 27: Resultats de la simulació 0

En la Figura 27 es marca en vermell aquelles zones on hi ha una diferència clara amb la Figura 26 i en verd, aquelles on coincideixen.

Es veu una zona d'erosió molt incipient que no es correspon amb el ràster real (1). Tota la zona a la part dreta de les imatges on hi ha tant sedimentació com erosió, no apareix en les dades reals. A pesar d'això, no es s'analitzarà ja molt probablement sigui degut a la proximitat del límit de la malla, i poden haver-hi efectes de la rugositat que no s'han tingut en compte. De totes maneres, la magnitud d'aquestes diferències són poc significatives. Les zones centrals (2 i 3) s'observa un patró similar amb les dades reals. Unes bandes d'erosió i sedimentació que s'alternen. També la part aigües avall marcada (4) mostra un comportament similar al cas real (zona de sedimentació). Per calibrar la simulació doncs, s'agafarà la part que difereix (1) i s'intentarà ajustar. Es troba al centre de la malla, en una zona que es mulla pràcticament durant tot l'episodi, així que es descarten efectes de malla o rugositat.

Com s'ha explicat prèviament, es calibrarà el valor de la tensió tangencial crítica en aquesta zona (1), per moure el llindar erosió – sedimentació. Un cop realitzada la nova simulació, s'analitzaran de la mateixa manera que s'ha fet els nous resultats.

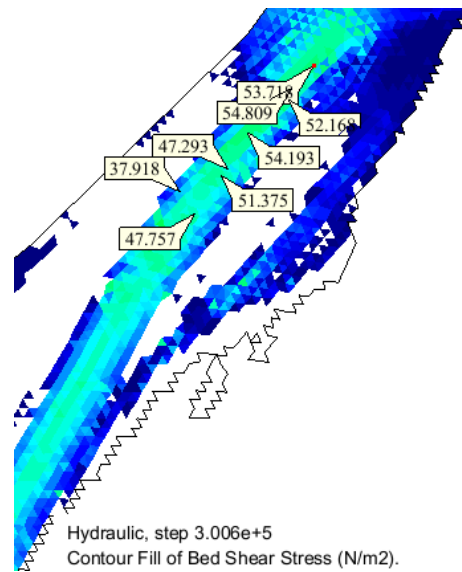


Figura 28: Valors de la tensió crítica de fons a la zona 1

S'agafa una primera aproximació de 55 N/m². Aquest valor dóna una tensió crítica adimensional de 0,0523.

6.1.2 Simulació 1. $\tau_{crit}^* = 0,0523$

Suspended Sediment Off ▾

Bed Transport On ▾

Model Ad Hoc

Alpha	3.97
Tau crit	0.0523
Beta	1.5
d50 [m]	0.067
Porosity	0.4
Friction angle[rad]	0.55

Avalanche Model

Bedload start time [s] 0

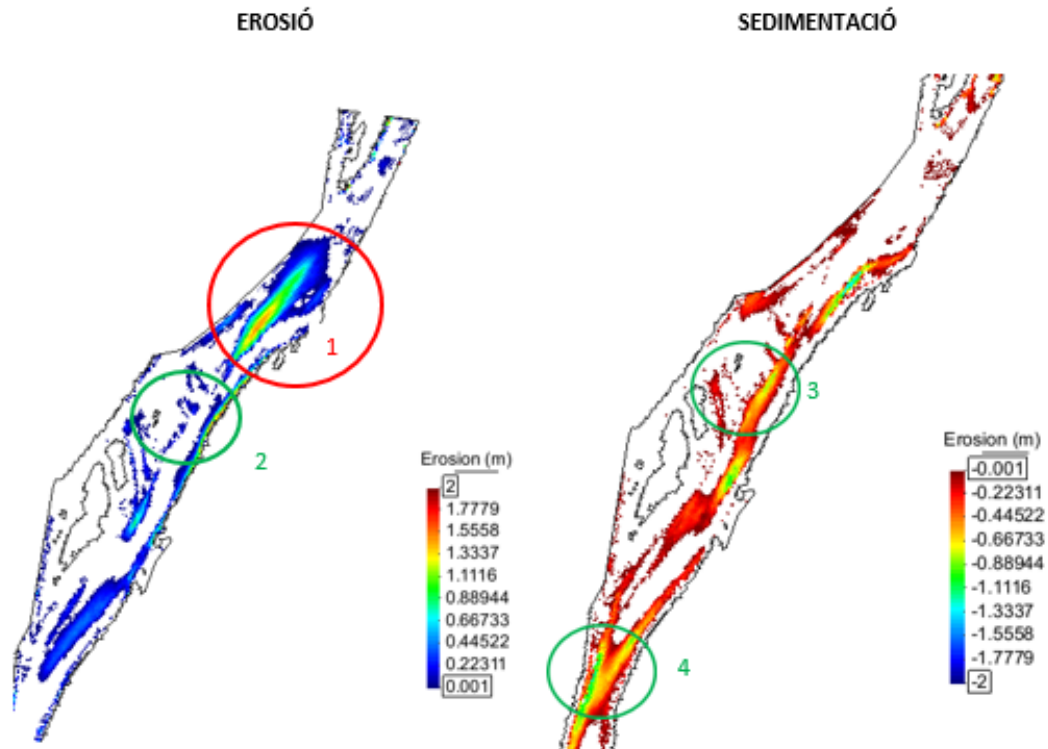


Figura 29: Resultats de la simulació 1

Pràcticament no s'observen canvis. La variació dels valors ha estat mínima, però les zones que es volien canviar no han patit cap modificació. La diferència entre les tensions entre el cas original i aquest són petites, insuficients per produir els canvis necessaris a la simulació.

En el següent pas s'opta per posar una tensió crítica molt més gran, per avaluar la resposta del model.

6.1.3 Simulació 2. $\tau_{crit}^* = 0,1$

Suspended Sediment Off ▾

Bed Transport On ▾

Model Ad Hoc

Alpha	3.97
Tau crit	0.1
Beta	1.5
d50 [m]	0.067
Porosity	0.4
Friction angle[rad]	0.55

Avalanche Model

Bedload start time [s] 0

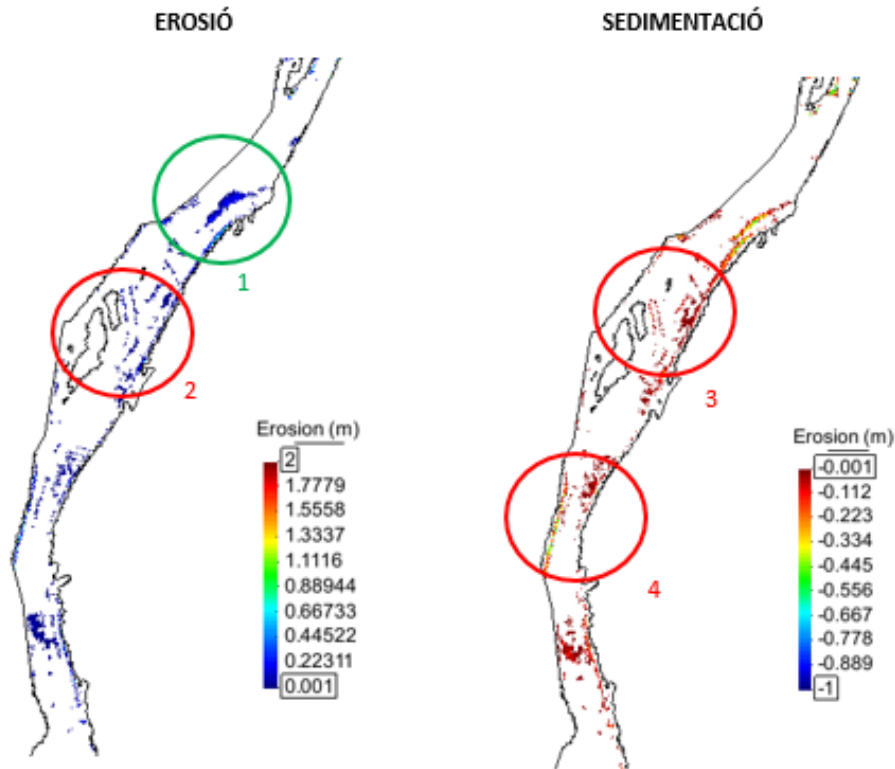


Figura 30: Resultats de la simulació 2

A mode iteratiu es prova un valor molt més gran, una tensió adimensional de 0,1, que equivaldria a una tensió crítica de 105 aproximadament, per avaluar la magnitud dels canvis que es produeixen i a on es produeixen. El fet d'augmentar dràsticament la tensió crítica no fa que es produeixi menys erosió en concret, sinó que el cabal sòlid disminueixi en conjunt. Això farà que les zones on hi havia presència de sedimentació o acumulació de material, tampoc es produeixen. Que l'erosió en la zona 1 desapareix és el que es buscava, però causant errors en la resta de la zona d'estudi. S'observa que les zones 2,3 i 4 que anteriorment s'observava similituds amb el cas real, ara ja no és així. Bàsicament s'ha deixat de mobilitzar sediment en tot el tram i això fa que s'allunyi del òptim que es busca.

Per trobar un valor intermedi es torna a observar la tensió de fons en la zona que volem estudiar i provar un altre valor que estigui entre els dos anteriorment simulats.

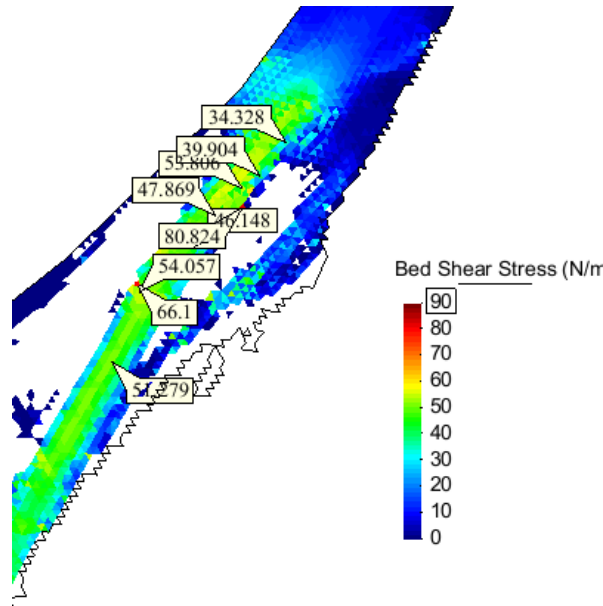


Figura 31: Tensions crítiques en diversos punts de la zona d'estudi.

Es mira d'acotar millor la tensió. Augmentar-la però sense arribar al límit que no es produeixi cabal sòlid a la zona d'estudi. Es busca la tensió màxima d'aquesta zona (zona 1), un valor que ens asseguri que no es mobilitzarà el sediment. Triem 80: que ens dóna una tensió adimensional de 0,0761.

6.1.4 Simulació 3. $\tau_{crit}^* = 0,0761$

Suspended Sediment Off ▾

Bed Transport On ▾

Model Ad Hoc

Alpha	3.97
Tau crit	0.0761
Beta	1.5
d50 [m]	0.067
Porosity	0.4
Friction angle[rad]	0.55

Avalanche Model

Bedload start time [s] 0

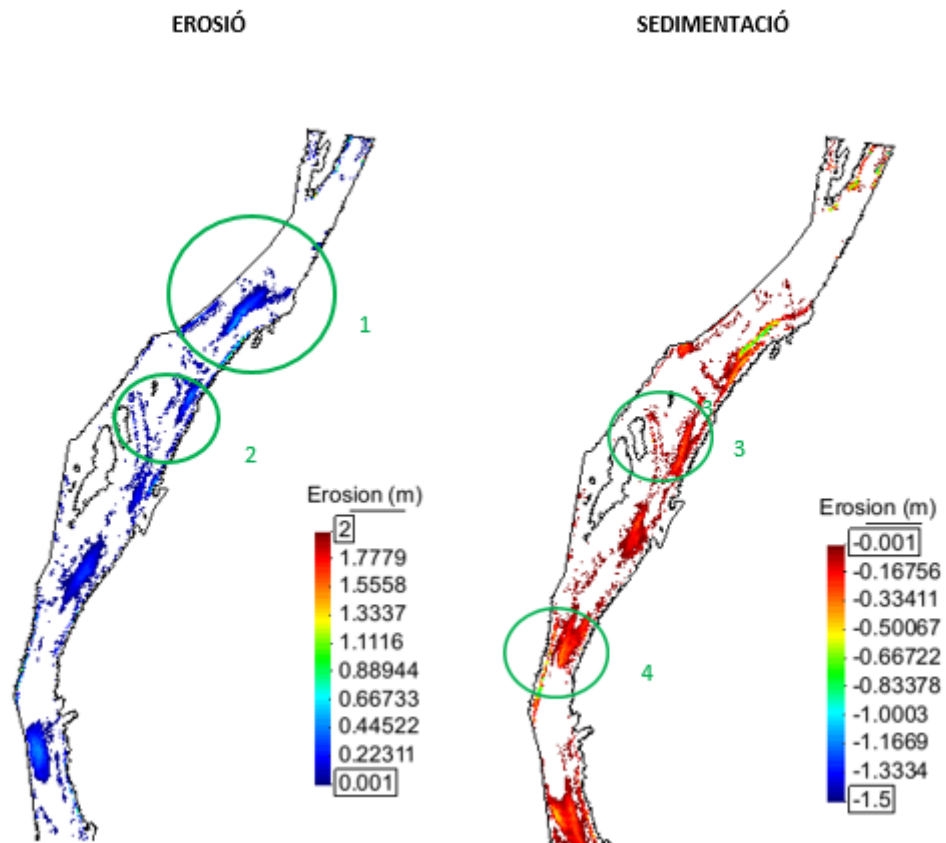
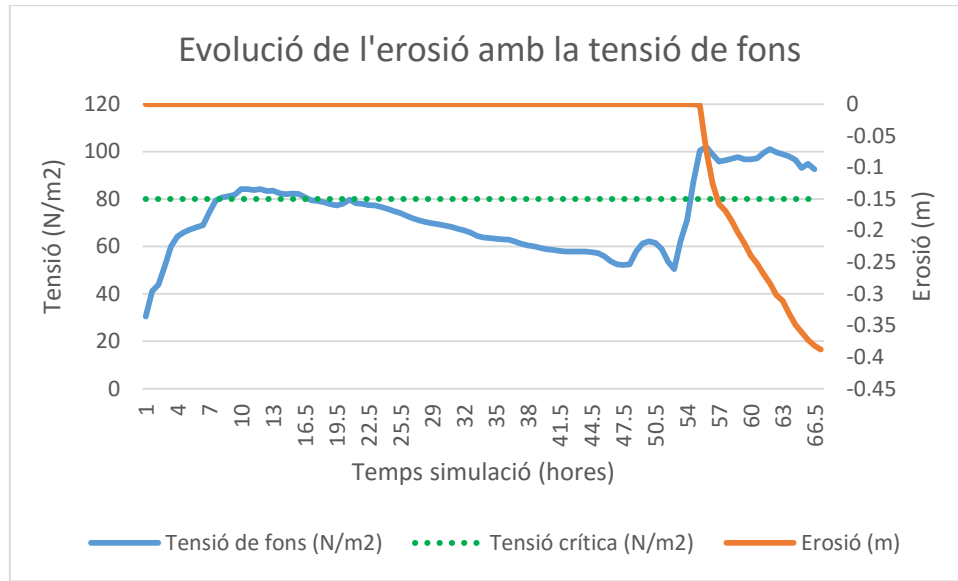


Figura 32: Resultats de la simulació 3

A pesar que no s'ha aconseguit que la zona 1 desapareix l'erosió, si que s'hi observen valors molt petits. Hi ha una limitació, el fet que si s'augmenta més la tensió crítica passi com el cas anterior, que tampoc es produeixi el cabal sòlid necessari per què s'observin les zones de sedimentació.

S'agafa aquest valor de tensió crítica com a definitiu a pesar que continuen havent-hi zones amb clares diferències. En el següent apartat s'analitzaran específicament els resultats i les diferències obtingudes amb les dades de camp.

6.2 RESULTATS



Gràfica 11.: Relació de la tensió crítica, tensió de fons i erosió.

En la Gràfica 11 es pot veure la relació amb la tensió de fons i la magnitud de l'erosió que experimenta un punt del model Iber en una part (part inicial) de la simulació.

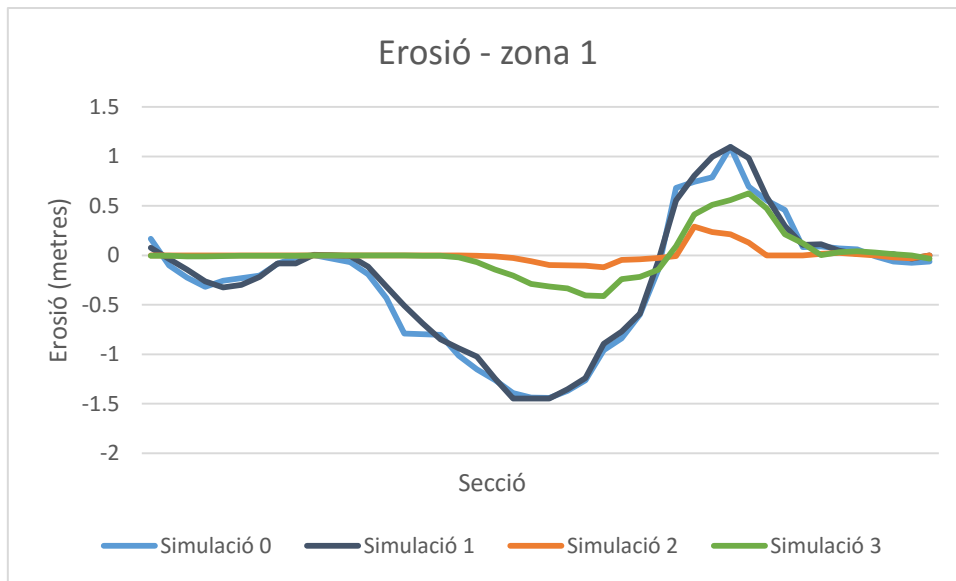
Tot i que no és directament proporcional, com s'ha vist en l'apartat anterior, l'erosió depèn bàsicament de si la tensió de fons és inferior o superior de un llindar (tensió crítica). En aquesta gràfica es veu clarament que al punt que la tensió de fons supera a la tensió crítica (80 N/m², s'ha utilitzat l'última simulació) és quan es produeix la mobilització de sediment i per tant, en aquest punt concret, s'observa com s'erosiona. L'erosió abans d'aquest instant de temps és nul·la, ja que la tensió era insuficient com per generar un cabal sòlid, i per tant, el punt no experimentava moviment.

A continuació es mostra una comparació de l'evolució de la cota de la llera i l'erosió de les 4 simulacions estudiades:

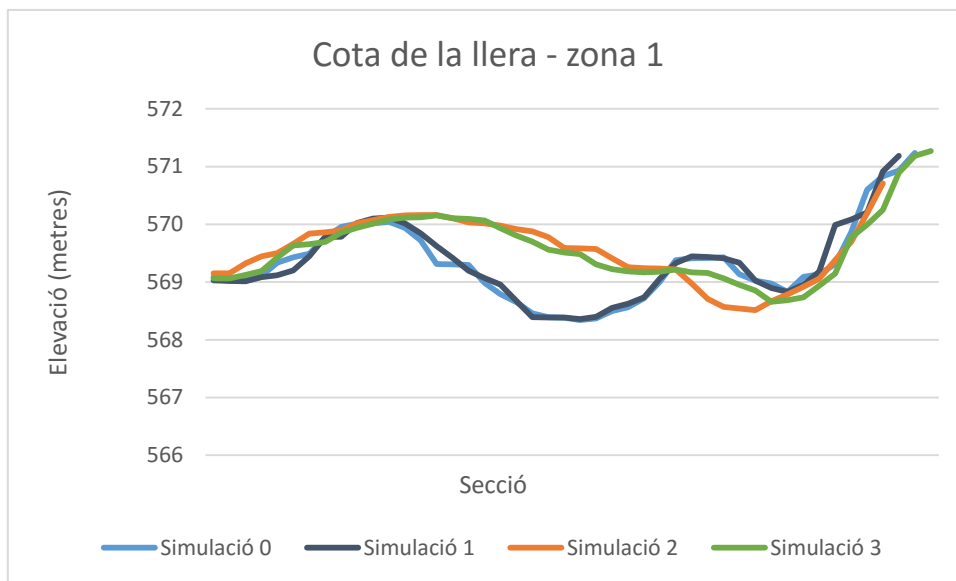
Simulació 0	$\tau_{crit} = 52 \text{ N/m}^2$
Simulació 1	$\tau_{crit} = 55 \text{ N/m}^2$
Simulació 2	$\tau_{crit} = 105 \text{ N/m}^2$
Simulació 3	$\tau_{crit} = 80 \text{ N/m}^2$

Taula 4: Resum de les simulacions

6.2.1 Resultats en una secció transversal de la zona 1



Gràfica 12: Erosió en una secció de la zona 1.



Gràfica 13: Cota de la llera en una secció de la zona 1

Aquestes són dues gràfiques d'una secció de la zona 1 (Gràfica 12 i Gràfica 13). La simulació 3 (verd), és la simulació feta amb una tensió de fons de 80 N/m^2 , valor que s'ha donat com a definitiu.

El criteri de signes utilitzat és:

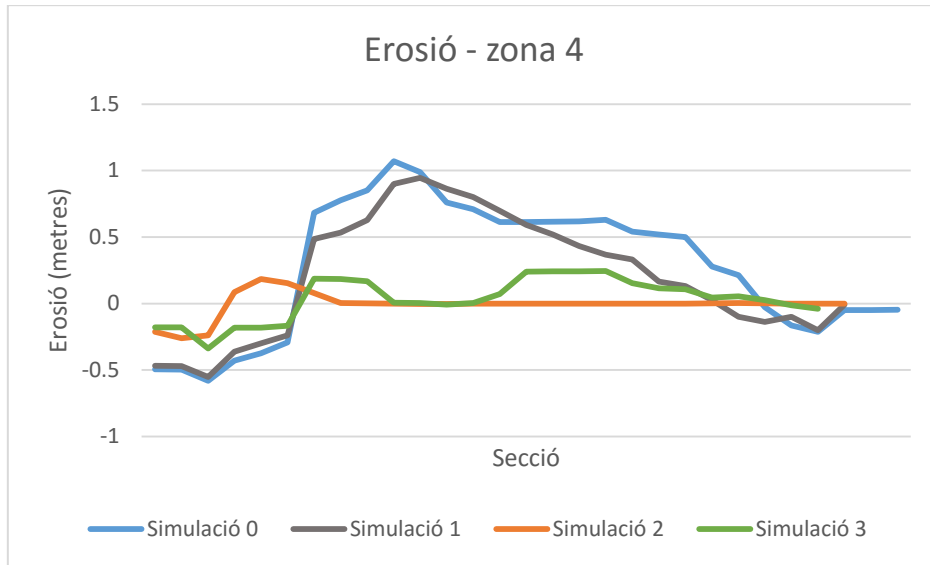
- Valors negatius representen erosió.
- Valors positius representen sedimentació.

La zona 1 és aquella on amb la primera simulació s'havia obtingut una zona d'erosió no corresponent amb la realitat, la qual s'ha mirat de disminuir. En la Gràfica 12 i en la Gràfica 13

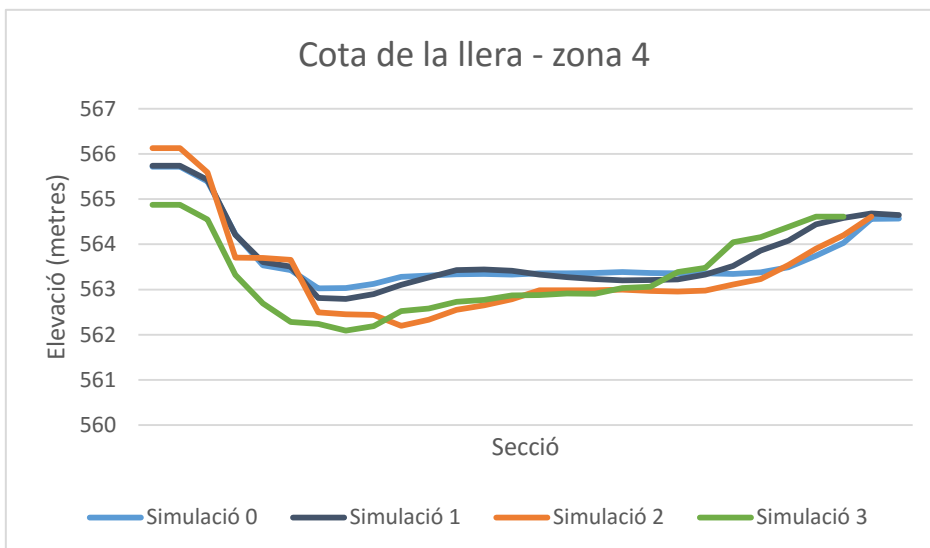
es veu com varia l'erosió i la corresponent cota de la llera amb les diferents simulacions. Les simulacions 2 i 3, són les que s'han calculat amb una major tensió crítica, o llindar, i conseqüentment, són les que mostren una menor erosió, donat que el sediment necessitarà més tensió de fons per mobilitzar-se. Paral·lelament, allà on es produeix erosió és on s'identifiquen les zones on la cota de la llera disminueix. Com s'ha comentat anteriorment és prudent fixar-se en la part central del riu, ja que és aquella zona on pràcticament hi circularà aigua sempre i on es produiran els canvis més significatius. Als límits de la zona d'estudi poden donar-se errors degut a la rugositat considerada i a la malla utilitzada pels càlculs.

En el punt anterior s'ha vist que la simulació 2 no era vàlida degut a que el valor de tensió crítica era massa gran i pràcticament no mobilitzava sediment, i, tot i que a la zona 1 funcionava ja que es volia reduir l'erosió, en altres zones era insuficient, ja que es necessitava un cabal sòlid superior.

6.2.2 Resultats en una secció de la zona 4



Gràfica 14: Erosió en una secció de la zona 4.



Gràfica 15: Cota de la llera en una secció de la zona 4.

En aquestes últimes gràfiques es veu el motiu pel qual una tensió crítica molt elevada no serveix en aquest cas. Es recorda que en aquesta zona, la simulació de partida (Simulació 0), ja ofería un aspecte molt similar a la realitat, amb uns valors de sedimentació significatius. La simulació 2 fa que no hi hagi cap tipus de sedimentació. Al disminuir una mica el llindar de la tensió (simulació 3), s'observa com en efecte, es produeix una acumulació de sediment en aquesta zona. Com s'ha mencionat anteriorment, es tracta de aproximacions qualitatives. Es veu clarament que la magnitud d'aquesta sedimentació està lluny del valor òptim que es buscava, però s'ha aconseguit que en aquesta es produeixin valors positius d'acumulació de material. Aquest fet, combinat amb el bon resultat a la zona 1, fa que la simulació 3 i el valor de tensió crítica de 80 N/m² es donin com a bons i definitius.

6.2.3 Resultats en una secció longitudinal

A continuació es mostra els resultats obtinguts amb la simulació 3 comparats amb les dades reals de MorphSed en un perfil longitudinal que englobi totes les zones analitzades en els anteriors punts (Figura 33 i **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

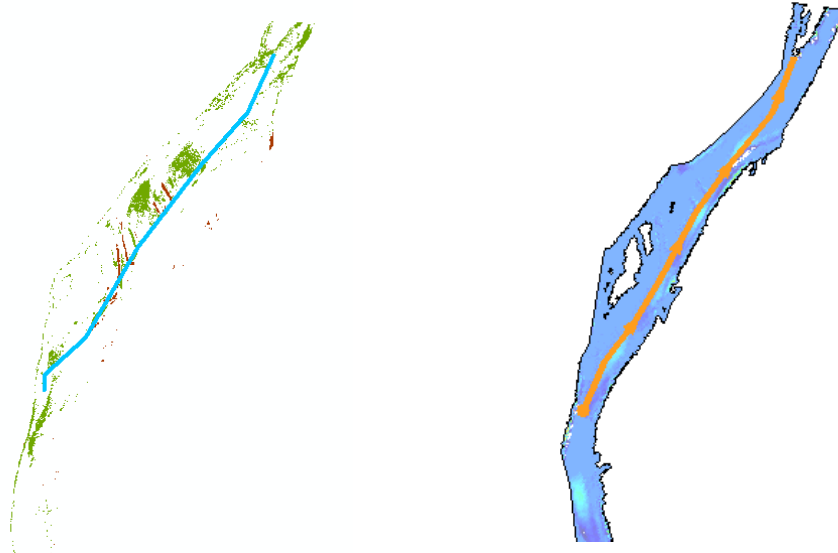
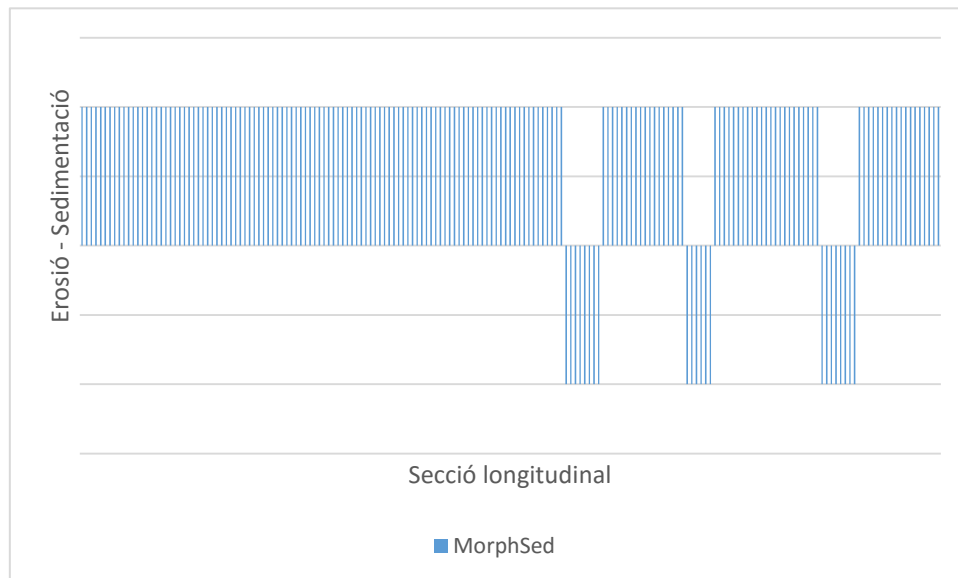


Figura 33: Perfil longitudinal que s'usarà per fer una valoració final, en el ràster de MorphSed (esquerra) i en l'Iber (dreta)



Gràfica 16: Zones amb erosió / sedimentació en un perfil longitudinal (dades MorphSed)



Gràfica 17: Zones amb erosió / sedimentació en un perfil longitudinal (dades Iber)

En les gràfiques anteriors, s'observen els resultats obtinguts. Si bé en quan la magnitud hi ha grans diferències, hi ha concordança amb les zones on es produeix erosió / sedimentació. Cal destacar però, que no s'ha aconseguit determinar aquell valor de la tensió crítica que ens permeti eliminar l'erosió que apareix al model, però que no apareix a la realitat (sobretot a la zona 1, part inicial de la Gràfica 16 i de la Gràfica 17, com també en els límits de la malla). Això pot ser degut a diversos motius:

S'ha de tenir en compte que s'ha usat una rugositat uniforme (Coeficient de Manning (n) de 0,025, valor òptim per material de la llera). La riuada inunda zones de vegetació, que fa que l'erosió disminueixi significativament a la realitat, però sense considerar-se en el model. Aquest fet s'observa clarament als límits de la malla; mentre que al canal mullat les zones erosionades i a on s'ha acumulat material són força semblants, als límits de la malla això no és així. En aquestes zones és on es troben les zones de vegetació pròximes al riu, on s'hauria de donar un valor més elevat a la rugositat ($n = 0,08 - 0,2$).

També podria considerar-se l'error amb l'obtenció de les dades amb la SfM (fotogrametria). Com s'ha explicat en apartats anteriors, aquesta metodologia pot dur a un grau de incertesa elevat, si s'esperen canvis petits en la topografia (com és aquest cas). Aquesta incertesa fa que, eliminant aquest error també puguin eliminar-se zones que, efectivament, contenen zones amb canvis en la topografia.

En quant a les equacions que regeixen el transport de sediments, destacar que es basen en una granulometria uniforme i, per tant, una tensió crítica constant, una simplificació que causa també el model doni resultats diferents a la realitat.

En el procés de la creació del model usat en aquest projecte, s'han anat prenent decisions per tal de crear una simulació amb poc cost computacional: això ha fet que s'hagi usat malla de mida 5 en el model, malla grollera si es compara en la precisió de dades que s'ha facilitat des de l'equip de MorphSed, d'entre 0.5 i 1m.

7 CONCLUSIONS

A continuació s'exposen les principals conclusions de l'estudi, resultants de l'anàlisi de les dades de camp subministrades, el procés de creació i operació del model numèric i la comparació dels resultats de les simulacions amb mesures.

Amb el model numèric usat en aquest treball, s'han pogut acotar les zones amb erosió i les d'acumulació de sediment, simulant els efectes observats amb les dades reals. Una conseqüència destacable d'aquest estudi però, ha estat veure la importància de la metodologia a seguir i l'elecció d'hipòtesis a la hora de crear un model de càlcul suficientment precís per obtenir resultats acceptables, però també, assumint imprecisions per crear un model amb un cost computacional baix.

El treball realitzat ha servit també però, per posar de manifest les limitacions que s'han observat a l'hora de modelitzar el transport de sediments amb una eina determinada, sotmesa a una sèrie d'hipòtesis a les equacions de partida, i que utilitza un mètode numèric concret.

En primer lloc, el punt de partida d'aquest projecte s'ha basat en unes dades reals de camp que ja contenen incerteses, donat que el mètode de fotogrametria automàtica (SfM) pot donar petits errors en la determinació de la topografia. Si aquests errors ja són majors que els canvis experimentats a la llera, farà que sigui difícil detectar-los i/o eliminar-los. En general, el mètode explicat en aquest document (usat per la realització del ràster del canvi de la cota de la llera), tendeix a subestimar les diferències, per tant, tendirà a presentar un model amb menys canvis.

Les equacions que regeixen el transport de sediment de fons utilitzades en aquest treball simplifiquen la granulometria del riu, assimilant una granulometria uniforme, i per tant, una tensió de fons crítica constant i per tant la mateixa relació entre el flux d'aigua i la capacitat de transport en tota la zona d'estudi. Una altra simplificació que s'ha fet en aquesta modelització numèrica ha estat assignar una mateixa rugositat, o fricció de fons, a tota la malla de càlcul. El valor del Coeficient de Manning ha estat de $n=0,025$, que és un valor típic de material de llera. En la part del canal mullat pròpiament, és un valor que es considera acceptable. En canvi, els límits de la malla són zones on abunda la vegetació (que s'inundaran només als pics del hidrograma), i per tant, zones amb una rugositat superior. Aquestes zones patiran canvis diferents, ja que la rugositat que se'ls hi ha assignat no es correspon amb la realitat.

Per acabar, pot haver-hi diferències relacionades directament amb la mida i forma de la malla usada. Una mida força grollera (5m) si es compara amb les dades de camp (0,5 – 1m), que ha estat necessària per realitzar una simulació amb un temps de càlcul acceptable que permetés fer canvis i un número elevat de simulacions de forma "lleugera", és a dir, en un interval de temps raonable.

La limitació principal del treball podria resumir-se en la impossibilitat de treballar amb unes dades d'alta precisió i densitat, com seria una topografia amb detalls de fins a 50cm. El model Iber, per treballar amb una malla d'aquestes dimensions tant reduïdes, necessitaria un tram d'estudi molt més petit, no de diversos quilòmetres com és el cas d'aquest treball. Amb una malla tant fina, el cost computacional assoleix valors molt elevats, no acceptable si es vol treballar fent canvis i simulant constantment. Per estudiar una zona més àmplia s'ha hagut de recórrer a una malla més grollera, amb la pèrdua de precisió que això comporta.

Durant la validació de les variables hidrodinàmiques, s'ha pogut observar un bon ajust del model amb les dades de camp. Tot i així, durant aquest estudi va observar-se una discrepància entre el cabal proporcional com a dada de l'estació d'aforament i el que realment circulava en aquell instant. Al realitzar una primera simulació va detectar-se aquesta diferència i es va prosseguir amb l'ajust del cabal real que circulava durant la presa de dades.

En quant a l'ajust del model sedimentològic, com s'ha observat en punts anteriors, s'ha aconseguit reproduir les zones d'erosió i sedimentació d'una forma força aproximada, si bé és cert que no s'ha aconseguit ajustar la magnitud d'aquests valors. Aquestes diferències s'expliquen amb les hipòtesis preses en la realització d'aquest model i comentades més amunt en aquest mateix apartat.

Com a continuació d'aquest treball, per tal d'aconseguir un millor ajust entre dades mesurades i calculades, una recomanació seria treballar amb rugositats variables segons el terreny, però sobretot convindria tenir la possibilitat d'aplicar una granulometria no uniforme a les equacions del transport de sediments. Aquesta darrer opció no estava disponible en el model numèric en el moment de la realització del treball. De cara a la quantificació d'aquests volums, a l'annex s'adjunta una primera aproximació del càlcul que podria seguir-se, si bé els resultats que s'han obtingut pel model d'aquest projecte són limitats i de difícil extrapolació.

En definitiva, es podria concloure que per la complexitat del fenomen i les característiques del tram d'estudi, el mètode emprat que ha donat bons resultats en altres rius, presenta unes simplificacions i limitacions que condicionen l'ajust dels resultats més enllà de l'ajust bàsicament qualitatiu que s'ha presentat.

ANNEX: DETERMINACIÓ QUANTITATIVA DEL TRANSPORT DE SEDIMENTS ENTRE EL MODEL IBER I EROSIÓ REAL

A mode d'ampliació, després d'haver fet una valoració qualitativa del model, el següent pas és comprar el model amb les dades reals de manera quantitativa, ajustant al màxim possible la quantitat de sediment mobilitzat que es quantifica amb el model Iber i les dades reals.

Com s'observarà en el final d'aquest annex, els resultats no han estat concloents. Així, s'ha optat per mostrar el procediment per aconseguir aquestes dades i els canvis que s'han fet per aproximar les dades del model amb les dades reals de camp.

L'equip de recerca Flumen ha desenvolupat una aplicació que permet quantificar el cabal sòlid que mobilitza el model. Només és necessària la creació d'uns polígons que serviran per calcular el volum dins de cada un d'ells de material que s'erosiona o sedimenta.

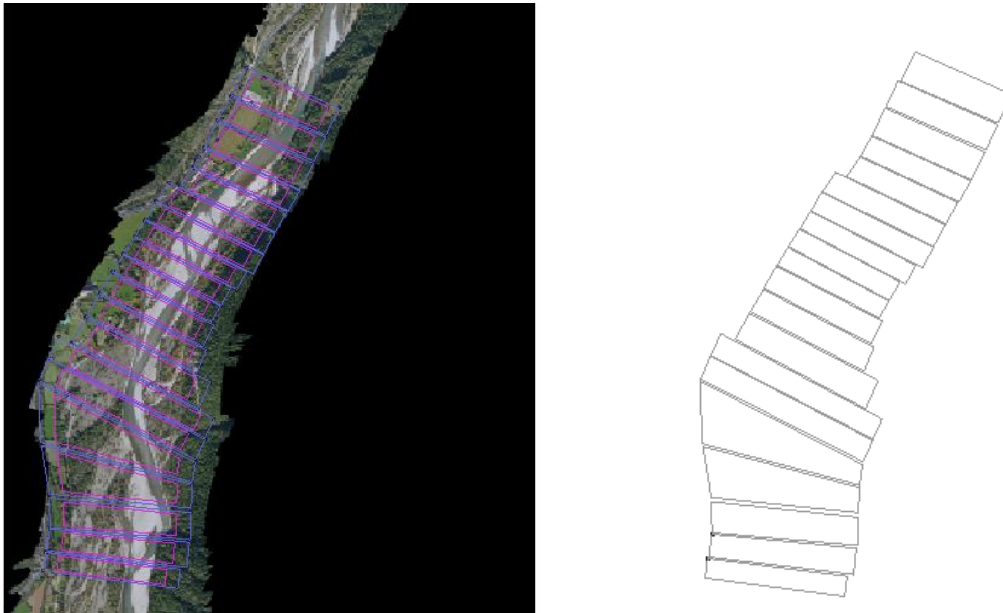


Figura 34: Polígons i malla necessària per la quantificació de cabal sòlid del model

Amb aquests polígons i els resultats de la simulació, s'obtenen les dades que s'utilitzaran per a la quantificació de l'erosió (Taula 5).

	TOTAL	SEDIMENTACIÓ (m³)	EROSIÓ (m³)
1	-111,1861	5.537,6087	-5.648,7948
2	99,4139	163,1902	-63,7764
3	-2,3078	1,6512	-3,9590
4	-412,5226	490,5125	-903,0351
5	-214,3915	1.821,0149	-2.035,4064
6	200,5102	468,7289	-268,2187
7	-65,6752	734,4056	-800,0809
8	-133,8306	214,6388	-348,4694
9	32,6611	173,6343	-140,9732

10	-532,3553	89,1724	-621,5277
11	-212,1122	666,6626	-878,7748
12	-240,1649	997,8124	-1.237,9773
13	-245,3392	1.005,5715	-1.250,9107
14	1.182,2653	1.695,0150	-512,7497
15	152,3444	298,3973	-146,0529
16	-232,7440	774,2879	-1.007,0319
17	-45,6463	818,1560	-863,8023
18	-59,5760	5.020,8900	-5.080,4661
19	13,2857	502,5811	-489,2954
20	523,5506	945,3140	-421,7634

Taula 5: Resultats de volum de sediment mobilitzat en cadascun dels polígons

Les dades reals que s’han obtingut de l’equip de Morphsed és la diferència dels dos MDT que van obtenir abans i després de la riuada. Com s’ha explicat anteriorment, ells han realitzat un laboriós treball de processament de dades per obtenir aquest “model digital d’erosió”, en format ràster. Aquesta informació doncs és d’erosió/sedimentació element a element.

Com s’ha explicat en apartats anteriors, la metodologia per obtenir aquestes diferències, tenia una gran dependència amb l’error que es pogués obtenir, i de la magnitud dels canvis observats entre ambdues topografies. Es farà una primera comparació amb el model tenint en compte la informació filtrada sense els errors – a partir d’ara “Real” i després una amb el model “Raw”, és a dir, sense tenir en compte els errors. És d’esperar que en el primer cas, els volums a la simulació surtin superiors, ja que la informació filtrada (sense els errors) s’hauran depreciat zones on podrien haver-hi canvis. A partir d’aquí es podrà veure si el model creat amb l’Iber s’ajusta a un cas o a l’altre, o es queda en un punt entremig.

Comparació amb les dades reals

La primera problemàtica que s’obté és la diferència de mida d’element: el ràster amb la informació de camp té una mida de píxel de 1x1. En canvi, el model Iber que s’ha realitzat en aquest projecte, la mida d’element és de 5. Això ja farà que sigui més difícil la aproximació quantitativa amb el model.

Seguidament, s’observa que les dades de camp són en unitats de longitud (m), erosió/sedimentació. Els valors que s’han obtingut de l’Iber són metres cúbics (m³). En el següent punt s’explica com s’ha fet per poder comparar aquestes dues magnituds diferents.

Per obtenir una quantificació de les mateixes zones en el ràster de dades reals, s’ha exportat la malla al ArcMaps.

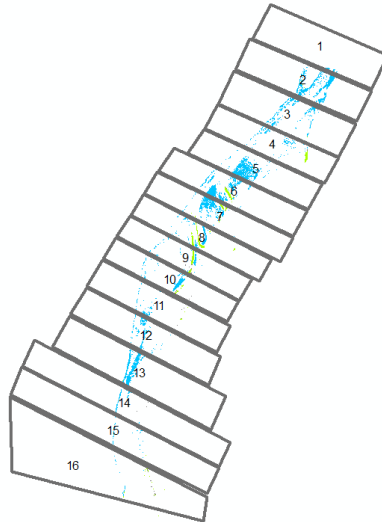


Figura 35: Polígons exportats per treballar amb les dades reals

La idea ha estat la de quantificar el valor assignat de cota que té cada píxel del ràster. D'aquesta manera, multiplicant-ho per l'àrea que representen el nombre de píxels dins de cada polígon, es tindria una primera aproximació per comparar-ho amb els m³ obtinguts amb la simulació. Per això s'utilitzarà l'eina del ArcMaps de *Spatial Analyst* → *Zonal* → *Zonal statistics as Table*. Aquesta eina dona una sèrie de dades sobre els píxels dins de una zona determinada (en aquest cas, els polígons exportats del Iber).

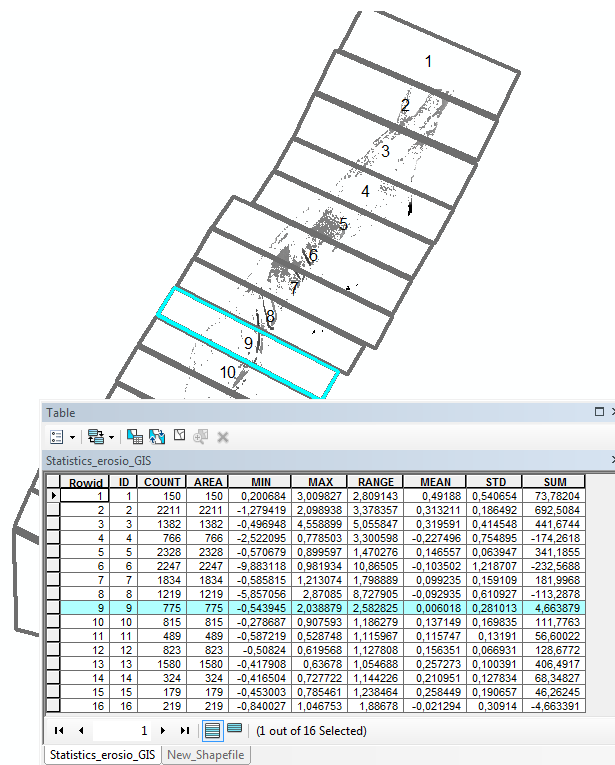


Figura 36: Càlcul dels volums amb ArcMaps

Si comparem aquestes dades amb les reals, es pot observar com difereixen molt.

	REAL (m³)	SIMULACIÓ (m³)
1	73,78204	-111,186131
2	692,5084	99,4138881
3	441,6744	-2,30783723
4	-174,2618	-412,522614
5	341,1855	-214,391528
6	-232,5688	200,510161
7	181,9968	-65,6752143
8	-113,2878	-133,830631
9	4,663879	32,6610854
10	111,7763	-532,355337
11	56,60022	-212,112223
12	128,6772	-240,164868
13	406,4917	-245,339163
14	68,34827	1182,26525
15	46,26245	152,344388
16	-4,663391	-232,743989

Taula 6: Comparació quantitativa dels volums dins de cada un dels polígons amb les dades reals

En vermell es remarquen aquelles zones on hi ha clarament una gran diferència entre el model i la simulació. Per grans diferències s'entén que el volum resultant és de signe oposat, és a dir, que en un cas es considera un volum sòlid positiu i en l'altre negatiu (valors que venen marcats en vermell a la Taula 6).

Per justificar aquestes diferències s'ha de tenir en compte que es tracta d'una zona amb valors d'erosió o sedimentació bastant petits, segons la informació facilitada per MorhpSed. A part d'això, hi ha les diferències de malla entre unes dades i les altres, que provoca que les dades obtingudes amb l'Iber siguin més grolleres. Aquest fet fa que encara que es variïn les equacions de transport de sediments, no pugui solucionar-se aquesta deficiència. Com es veu en les imatges, hi ha força diferències als límits de la malla, on s'observen valors força elevats d'erosió o sedimentació, fet que no passa al model real. Donat que els polígons engloben totes aquestes zones, les diferències poden venir donades en gran part per aquest fet.

Un cop fets aquests apunts, si s'observen els polígons que no contenen tantes diferències (en negre a la Taula 6) els valors obtinguts a la simulació són en general força més grans que les dades reals. Així que es pot afirmar que el model realitzat en aquest projecte sobredimensiona els valors del volum sòlid que es mobilitza. Com s'ha dit anteriorment, això es podia esperar, ja que el ràster amb el que s'han comparat les dades s'havia filtrat per evitar zones incertes amb possibles errors, eliminant zones potencialment mòbils, o en el límit de la incertesa.

Comparació amb les dades “raw”

Es segueix el mateix procediment que en el cas anterior i s’obtenen uns volums de cabal sòlid que es resumeixen a la següent taula:

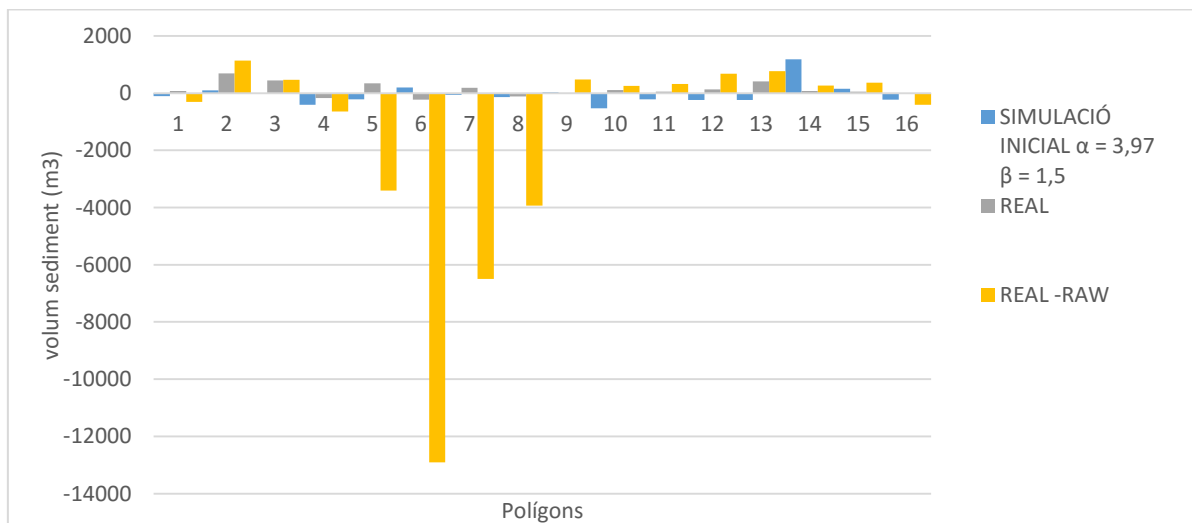
	REAL RAW (m ³)	SIMULACIÓ (m ³)
1	-307,9204	-111,186131
2	1137,6570	99,4138881
3	467,2692	-2,30783723
4	-647,4613	-412,522614
5	-3406,4740	-214,391528
6	-12905,4600	200,510161
7	-6492,2040	-65,6752143
8	-3934,9790	-133,830631
9	474,4241	32,6610854
10	252,8582	-532,355337
11	324,7634	-212,112223
12	678,3945	-240,164868
13	772,1456	-245,339163
14	266,6115	1182,26525
15	368,1530	152,344388
16	-409,7913	-232,743989

Taula 7: Comparació quantitativa dels cabals sòlids observats dins de cada un dels polígons amb les dades Raw

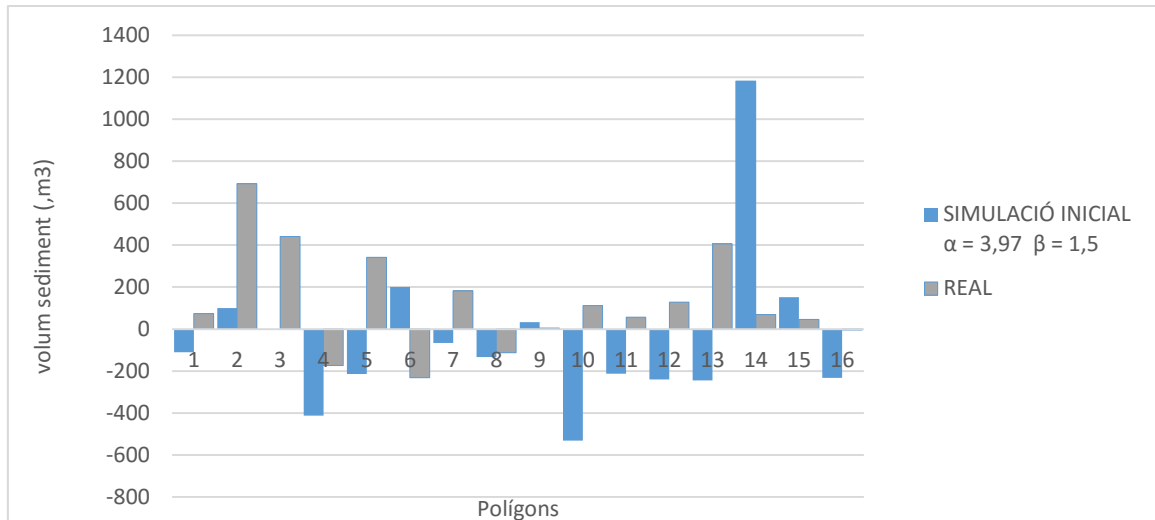
En aquest cas, contràriament a l’anterior, els valors de la simulació són molt menors que els obtinguts amb el ràster “raw”, sent varies magnituds inferiors en alguns casos.

Així doncs, podem concloure que la modelització numèrica realitzada amb l’Iber es queda en un punt intermedi entre els dos ràsters. Si més no, cal destacar que en quant a magnituds de volums, existeixen moltes més diferències amb el model “raw”.

A continuació es mostren dos gràfics on es veuen aquestes diferències:



Gràfica 18: Comparació de les diferències entre el volum de sediment transportat en la simulació, amb dades reals i amb dades Raw.



Gràfica 19: Comparació de les dades de la simulació i de les dades reals

Com s’observa en la Gràfica 18 i en la Gràfica 19, les dades “Raw”, s’allunyen molt en algunes zones dels valors simulats (en quant a ordres de magnitud). En canvi, els valors de les dades reals, si bé difereixen en algun punt, globalment mantenen ordres de magnitud similars amb els de la simulació. És per això que en aquest punt, la anàlisi de les dades es centrarà en les dades reals, aquelles que MorphSed ha filtrat i eliminat els errors.

En el següent punt, s’estudiaran els canvis que pateix la simulació al canviar els coeficients α i β de l’equació que defineix el transport de sediments. La idea serà sempre buscar que els valors obtinguts a la simulació siguin propers als valors reals.

Calibratge dels coeficients α i β

En aquest punt s’intentarà ajustar l’equació de cabal sòlid, per fer que doni valors menors d’erosió/sedimentació.

$$q_s = \alpha(\tau^* - \tau_c^*)^\beta$$

Es tractarà de acotar els valors de α i β .

Per buscar quin dels dos coeficients variar, es farà un estudi de les dades obtingudes (Taula 6). En un primer moment s’ha pensat de tenir en compte només aquells valors que mostren un igual comportament (valors en verd), donat que al tenir el mateix signe, seran zones de sedimentació en ambdós casos (ídem amb l’erosió). S’ha de tenir en compte que en aquest cas, s’estarien aïllant els valors de cada un dels polígons. Això podria donar errors, ja que els cabals sòlids no són independents un dels altres. És per això que s’ha optat per tenir en compte tots els valors dels polígons.

El coeficient α defineix una relació proporcional, i el β exponencial. El següent pas serà avaluar la relació entre els valors de les dues columnes i escollir quin coeficient ajudarà a apropar els valors.

	SIMULACIÓ	REAL	α_R	β_R
1	-111,1861	73,7820	-2,634	1,369
2	99,4139	692,5084	27,655	2,133
3	-2,3078	441,6744	-759,779	10,924
4	-412,5226	-174,2618	1,677	1,285
5	-214,3915	341,1855	-6,318	1,630
6	200,5102	-232,5688	-4,605	1,542
7	-65,6752	181,9968	-11,002	1,865
8	-133,8306	-113,2878	3,361	1,449
9	32,6611	4,6639	0,567	0,663
10	-532,3553	111,7763	-0,834	1,127
11	-212,1122	56,6002	-1,059	1,130
12	-240,1649	128,6772	-2,127	1,329
13	-245,3392	406,4917	-6,578	1,638
14	1182,2653	68,3483	0,230	0,896
15	152,3444	46,2625	1,206	1,144
16	-232,7440	-4,6634	0,080	0,424
		Mitjana	1,893	1,909
		Desviació estàndard	8,276	2,442

Taula 8: Coeficients ajustats en cada un dels polígons i mitjana de la mostra

Es defineix el coeficient α_R com el quocient entre el valor real i el de la simulació.

$$\alpha_R = \alpha_S \frac{A_R}{A_S}$$

On A_R i A_S són els valors obtinguts (real i simulat, respectivament) i α_S el valor de 3,97 de la fórmula de Meyer-Peter&Müller que s'ha usat a la simulació.

En la Taula 8 s'ha eliminat el valor de α del polígon 3 ja que diferia molt de la resta de valors i feia que la desviació estàndard de la mostra fós molt elevada, fent que la mitjana fos poc representativa.

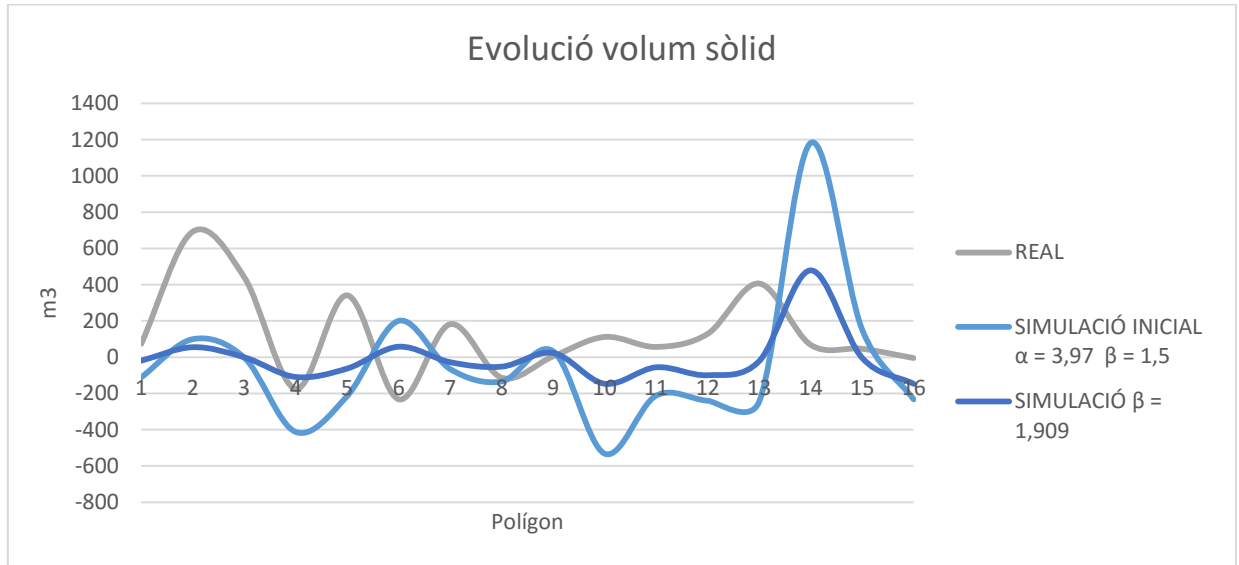
Es defineix el coeficient β_R com la el quocient dels logaritmes entre el valor real i el de la simulació, per així tenir una relació exponencial, on β_S és el valor de 1,5 de la fórmula de Meyer-Peter&Müller que s'ha usat a la simulació.

$$\beta_R = \beta_S \frac{\log(A_R)}{\log(A_S)}$$

Ajust de valor β

Com s'observa a la Taula 8, el coeficient β dona una desviació estàndard més petita, així que utilitzarem aquest valor per fer una primera nova simulació ($\beta = 1,909$). El coeficient α no es variarà.

Un cop realitzada la simulació, es compara amb els valors de la simulació i els valors reals.

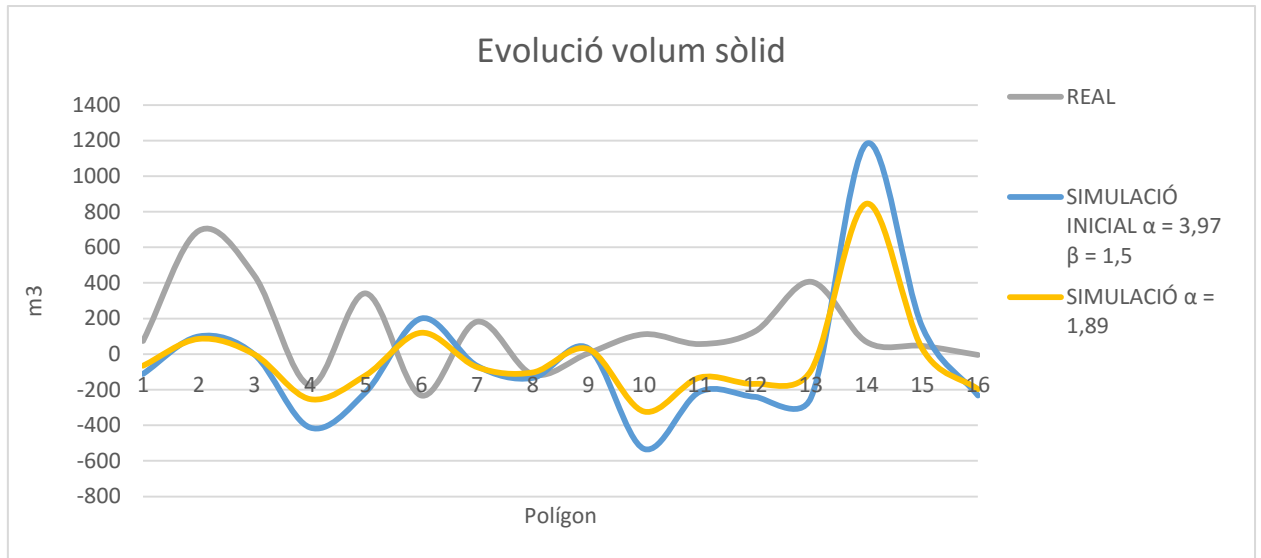


Gràfica 20: Evolució del cabal sòlid en cada un dels polígons

Com es pot observar a la Gràfica 20, modificant el valor del coeficient β provoca una perturbació molt gran en els valors del cabal sòlid, en molts punts fent que les diferències amb les dades reals siguin molt més elevades.

Ajust de valor α

Cas 1) Donat que el cas anterior, no ha millorat la simulació, en aquest es fixarà el valor del coeficient α . S'utilitza el procediment abans descrit. Es farà una simulació amb el valor $\alpha = 1,893$.



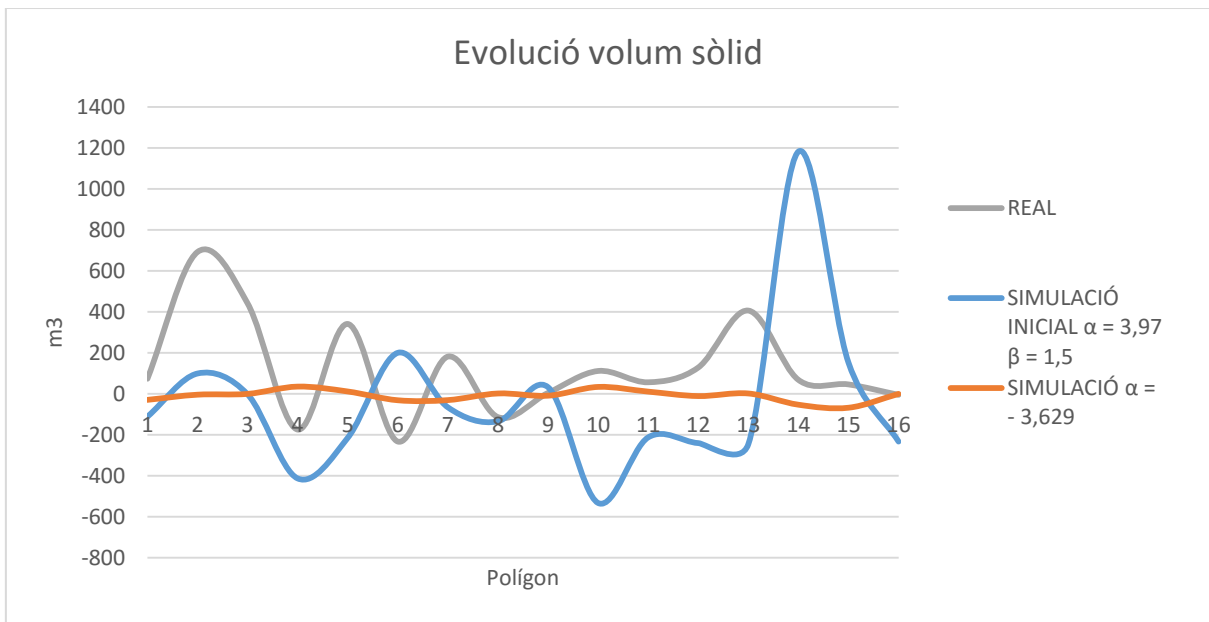
Gràfica 21: Evolució del cabal sòlid en cada un dels polígons

En aquest cas, les variacions són menors i més suaus, donat que es tracta d'una relació proporcional. Tot i així, continua sent molt semblant a la simulació de partida d'aquest apartat.

Cas 2) Observant les dades de la Taula 8, es traurà també el valor del polígon 2, ja que també difereix molt dels altres valors. Amb aquests canvis es pretén buscar un valor el més representatiu possible. Amb aquest canvi, s'obté una $\alpha = -3,629$.

	SIMULACIÓ	REAL	α	β
1	-111,1861	73,7820	-2,634	1,369
2	99,4139	692,5084	27,655	2,133
3	-2,3078	441,6744	-759,779	10,924
4	-412,5226	-174,2618	1,677	1,285
5	-214,3915	341,1855	-6,318	1,630
6	200,5102	-232,5688	-4,605	1,542
7	-65,6752	181,9968	-11,002	1,865
8	-133,8306	-113,2878	3,361	1,449
9	32,6611	4,6639	0,567	0,663
10	-532,3553	111,7763	-0,834	1,127
11	-212,1122	56,6002	-1,059	1,130
12	-240,1649	128,6772	-2,127	1,329
13	-245,3392	406,4917	-6,578	1,638
14	1182,2653	68,3483	0,230	0,896
15	152,3444	46,2625	1,206	1,144
16	-232,7440	-4,6634	0,080	0,424
		Mitjana	-3,629	1,909
		Desviació estandard	3,908	2,442

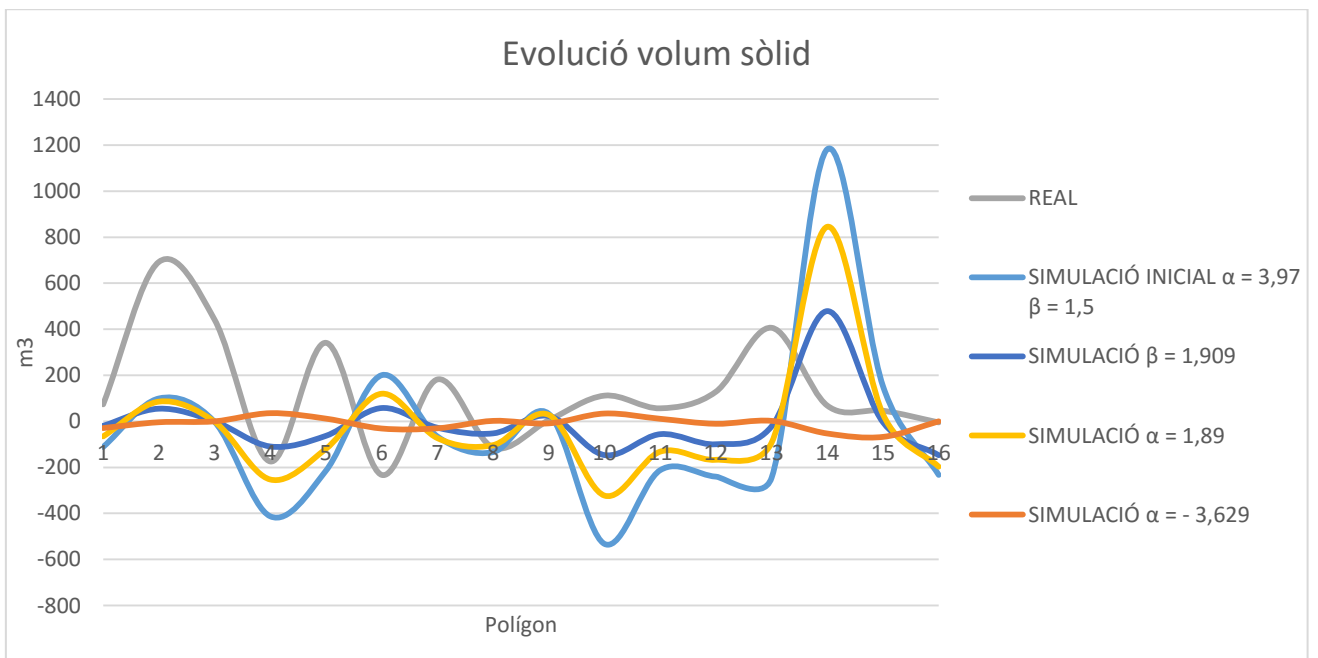
Taula 9: Coeficients ajustats en cada un dels polígons i mitjana de la mostra



Gràfica 22: Evolució del cabal sòlid en cada un dels polígons

Aquest últim canvi fa que la simulació s'allunyi del cas real, mostrant pràcticament cap canvi entre els volums dels polígons d'estudi.

Comparació final



Gràfica 23: Comparació de l'evolució del cabal sòlid en cada un dels polígons

Com s'observa en la gràfica anterior, en el present projecte no s'ha pogut ajustar el model numèric amb les dades de volum sòlid de la realitat. Això es pot deure a varis factors, alguns depenent de les hipòtesis que s'han anat prenent al llarg de la creació del model, com s'ha comentat anteriorment (mida i límits de la malla, rugositat) i d'altres que poden ser degut a les dades preses a camp (model d'erosió REAL i RAW, valoració incorrecte de l'error en l'obtenció del MDT).

Les dades que l'equip de MorphSed ha facilitat són de elevacions (concretament, diferència de cota), és a dir, unitats de longitud. L'aplicació realitzada per Flumen, donava volums de sediment mobilitzat, és a dir, unitats de volum. Per tal de fer aquesta conversió, i com s'ha vist en aquest apartat, s'ha multiplicat l'elevació per la mida del píxel, una aproximació que compta també amb un error.

REFERÈNCIES

- Béjar, M., Gibbins, C.N., Vericat, D., Batalla, R.J., Buendia, C., i Lobera, G. (2014) "Integrated methods to study the impact of gravel mining on benthic invertebrate communities in a highly dynamic gravelbed river", *XIII Reunión Nacional de Geomorfología*, Cáceres 2014
- Béjar, M., Gibbins, C., Vericat, D., Batalla, R.J., Muñoz, E., Ramos, E., Lobera G., López-Tarazón J., Piqué G., Tena A., Buendía C., i Rennie C. (2015) "Invertebrate drift during in-channel gravel minning: The upper river Cinca (southern Pyrenees)" *High Resolution Topography in the Geosciences: methods and applications. Vienna: European Geosciences Union, General Assembly 2015*
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz., J i Coll, A (2014) "Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos." *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 30(1): 1–10
- Brasington, J., Vericat, D. i Rychkov, I. (2012) "Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning", *Water Resources Research*, vol 38, W11519
- Brufao P., Elso J., García E., Herrera T., i Jaso C. (2015) "Aspectos técnicos y jurídicos de los dragados i limpiezas de cauces" *Notas Técnicas del CIREF, nº 8, 2015*
- Espinal, M., (2012) *Trencament de preses de materials solts per rebasament. Comparació entre modelització numèrica i estudis experimentals*. Tesina d'especialitat. Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Hidràulica
- Frings, R. (2014) "River Morphodynamics: Sedimentology" [Apunts seminari Sediment transport and Morphodynamics, Lecture 2], RWTH Aachen
- Frings, R. (2014) "River Morphodynamics: Bed-load transport" [Apunts seminari Sediment transport and Morphodynamics, Lecture 3], RWTH Aachen
- Martín Vide, J.P. (1996) "Ingeniería de ríos", Ediciones UPC
- MorphSed: Morphosedimentary Dynamics in Human-Stressed Fluvial Systems. www.morphsed.es
- Muñoz-Narciso, E., Béjar, M., Tena, A., Vericat, D., Ramos, E., Brasington, J., Gibbins, C.N. and Batalla, R.J. (2014) "Developing terrain models in a highly dynamic gravel bed river by means of automatic digital photogrammetry", *XIII Reunión Nacional de Geomorfología*, Cáceres 2014
- Ollero Alfredo (2015) "Nota del CIREF contra el decretazo para dragar el Ebro" *Cuidando Ríos*, 10-03-2015, disponible a <http://river-keeper.blogspot.com.es/2015/03/nota-del-ciref-contra-el-decretazo-para.html>
- RIUS: Fluvial Dynamics Research Group, www.fluvialdinamics.com
- Van Rijn, L (1984). "Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport." *Journal of Hydraulic Engineering*. 10. 1431-1456.
- Vericat, D. i Batalla, R.J. (2012) "Mesura i mostreig de variables geomorfològiques" *Quaderns DMACS nº38, RIUS - Fluvial Dynamics Research Group, UdL-CTFC-ICRA*

Vericat, D., Smith, M. and E. Muñoz-Narciso, E. (2014) "Automatic Digital Photogrammetry in Geomorphology: Data collection and quality at multiple spatial scales", *XIII Reunión Nacional de Geomorfología*, Cáceres 2014

Vericat, D., Batalla, R.J., Gibbins, C.N., Brasington, J., Tena, A., Béjar, M., Muñoz-Narciso, E., Ramos, E., Lobera, G., Buendia, C., López-Tarazón, J.A., Smith, M., Wheaton, J., López, R., Verdú, J., and Palau, A. (2014) "Coupling channel morphology and ecological diversity in a gravel bed river: MorphSed conceptual approach and experimental design", *XIII Reunión Nacional de Geomorfología*, Cáceres 2014

Vericat, D., Ramos, E., Brasington, J., Muñoz, E., Béjar, M., Gibbins, C., Batalla, R.J., Tena, A., Smith, M. i Wheaton, J. (2015) "Multi-temporal topographic models in fluvial systems: are accuracies enough to change the temporal and spatial scales of our studies?" *High Resolution Topography in the Geosciences: methods and applications. Vienna: European Geosciences Union, General Assembly 2015*

Vericat, D., Llena, M., Muñoz, E., Ramos, E., Béjar, M., Brasington, J., Gibbins, C., Batalla, R.J., Tena, A., Martínez, J.A. i Wheaton, J. (2015) "Channel disturbances and morpho-dynamics: linking topographic changes and human impacts in a highly dynamics wandering river at multiple temporal scales" *High Resolution Topography in the Geosciences: methods and applications. Vienna: European Geosciences Union, General Assembly 2015*

"Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas" IBER: Manual de referencia hidráulico. 2016

"La empresa de un alcalde del PAR extrae áridos en un lugar protegido" *El Periódico de Aragón*, 08/01/2014, disponible a http://www.elperiodicodearagon.com/noticias/aragon/empresa-alcalde-par-extrae-aridos-lugar-prottegido_911337.html

"IU denuncia la extracción sin autorización de áridos en el río Cinca" *El Heraldo* 07/01/2014, disponible a http://www.heraldo.es/noticias/aragon/huesca_provincia/2014/01/07/iu_denuncia_extraccion_sin_autorizacion_aridos_rio_cinca_264148_1101026.html

"Científicos creen que es inútil el dragado del Ebro para evitar inundaciones" *El Heraldo* 10/03/2015, disponible a http://www.heraldo.es/noticias/aragon/zaragoza_provincia/2015/03/10/cientificos_creen_que_e_inutil_dragado_del_ebro_para_evitar_inundaciones_344560_1101025.html