



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

Modelització numèrica del transport de sediments per arrosseigament de fons. Validació i aplicació.

Treball realitzat per:
Adrià Estany Roura

Dirigit per:
Ernest Bladé Castellet

Màster en:
Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 31 de Gener del 2022

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Agraïments

M'agradaria agrair a totes les persones que han estat al meu costat durant la realització d'aquest treball, que encara que les coses anessin malament, han seguit recolzant-me fins al final. Sobretot a l'Anna, que sempre ha tingut paraules de motivació i ànims quan les coses s'anaven torçant. Gràcies a tots.

Abstract

The modelling of the behaviour of the bedload transport in rivers and streams is very important to predict the possible consequences of high intensity rainfalls. If there are not sediment control measures, the sedimentation of the sediments carried by rivers and streams may cause big material damages.

Piton, G. and Richard, D. (2018) present a set of essays made to a small-scale model built to simulate the behaviour of a sediment detention basin located at the French village of La Combe-de-Lancey, in the French Alps. In this project, the data and boundary conditions are introduced to the Iber software, and the problem will be simulated using the bedload transport formulas for non-uniform sediments, to validate the results.

It is concluded that this specific problem is not the best to verify the functioning of the software because the small-scale model is not studying the bedload transport. Instead, it is studying how the sediments are getting trapped in the basin and it is verifying the good functioning of the sediment detention basin.

Resum

La modelització del comportament del transport de fons en els rius i rieres resulta molt important alhora de predir les possibles conseqüències d'episodis de pluges molt intenses. Si no hi ha dispositius de control dels sediments que s'enduen els rius i rieres, la sedimentació d'aquests pot provocar grans danys materials.

Piton, G. i Richard, D. (2018) presenten una sèrie d'assajos realitzats d'un model reduït construït per tal de simular el comportament d'una conca de retenció de sediments situada a la vil·la francesa de La Combe-de-Lancey, als Alps francesos. En aquest treball introduïrem les dades d'aquest model reduït i el simularem utilitzant les fórmules de transport de fons de sediments per granulometries no uniformes amb el programa Iber, per tal de validar-ne els resultats.

Es conclou que aquest problema en qüestió no és l'ideal per tal de verificar el funcionament del programa ja que aquest model reduït no estudia el transport de fons dins un riu sinó que estudia com és el dipòsit de sediments dins la conca de retenció i en verifica el seu funcionament.

Taula de continguts

Agraïments.....	i
Abstract	ii
Resum	iii
Taula de continguts	iv
Llista de taules	vi
Llista de figures	vii
1. Introducció.....	1
1.1. Objectius	1
1.2. Metodologia.....	2
1.2.1. Limitacions.....	2
2. Fonaments teòrics	3
2.1. Moviment incipient de sediments	3
2.2. Mecanismes de transport	5
2.3. Formes de fons	7
2.4. Equacions governants del transport de fons	8
2.4.1. Equació de conservació dels sediments	8
2.4.2. Partició de tensions	9
2.4.3. Cabal del sòlid de fons	9
2.5. Transport de fons per granulometries no uniformes	10
2.5.1. Capa activa.....	10
2.5.2. Amagament de les partícules de sediments	11
3. Simulació de casos per la validació	13
3.1. Cas 1: moviment de sediments en la confluència entre dos rius.....	13
3.1.1. Cas 1 simulat amb graves	15
3.1.2. Cas 1 simulat amb sorres.....	19
3.1.3. Cas 1 simulat amb llims	22
3.1.4. Conclusions i observacions.....	25
3.2. Cas 2: moviment de sediments en un coll d'ampolla en un canal	27
3.2.1. Cas 2 simulat amb graves	28
3.2.2. Cas 2 simulat amb sorres.....	29
3.2.3. Cas 2 simulat amb llims	30
3.2.4. Conclusions i observacions.....	32

4.	Presentació estudi real	34
4.1.	Geometria del model reduït	36
4.2.	Resultats del model reduït.....	38
5.	Simulació estudi real al programa Iber.....	43
5.1.	Introducció de la geometria al programa	43
5.2.	Condicions de contorn	45
5.3.	Resultats de la simulació considerant granulometria no uniforme	49
5.4.	Resultats de la simulació considerant granulometria uniforme	53
5.5.	Conclusions	56
6.	Conclusions i recomanacions	57
	Referències	59
	Annex.....	62

Llista de taules

Taula 2.1. Influència de les forces estabilitzadores sobre els sediments en funció de la mida.....	4
Taula 3.1. Propietats dels diferents tipus de sediments considerats en aquest capítol.	13
Taula 3.2. Taula comparativa entre els diferents tipus de sediments analitzats pel cas 1 a l'últim instant de temps simulat.....	26
Taula 3.3. Taula comparativa entre els diferents tipus de sediments analitzats pel cas 2 a l'últim instant de temps simulat.....	33
Taula 4.1. Granulometries de les mescles de sediments mitjana i grollera. Font: Piton, G., Richard, D. (2018).....	37
Taula 4.2. Paràmetres dels assajos realitzats en el model reduït. Font: Piton, G., Richard, D. (2018).	38
Taula 4.3. Resum de les pendents calculades dels sediments dipositats a la conca de retenció de sediments pels dos assajos realitzats. Font: pròpia.....	41
Taula 5.1. Granulometria de la mescla de sediment introduïda al programa per la simulació del problema. Font: pròpia.	45
Taula 5.2. Valors utilitzats per crear l'hidrograma d'entrada d'aigua i sediments al model. Font: pròpia.	47
Taula 5.3. Resum de les pendents calculades dels sediments a la conca de retenció de sediments al final de la simulació amb la geometria aproximada considerant la granulometria no uniforme. Font: pròpia.	53
Taula 5.4. Resum de les pendents calculades dels sediments dipositats a la conca de retenció de sediments al final de la simulació amb la geometria aproximada considerant la granulometria uniforme. Font: pròpia.	56
Taula 5.5. Taula comparativa entre les simulacions realitzades. Font: pròpia.	56
Taula 5.6. Taula comparativa entre les simulacions realitzades i les dades dels models reals. Font: pròpia.....	56

Llista de figures

Figura 2.1. Esquema de les forces actuant sobre els sediments del fons dels rius. Font: Basile, P. A. (2018).	4
Figura 2.2. Variació de la tensió tangencial que provoca l'aigua i la velocitat de la mateixa amb la profunditat. Font: Basile, P. A. (2018).	5
Figura 2.3. Diagrama de Shields. Font: Shields, A. (1936).	6
Figura 2.4. Esquema dels tipus de transport de sediments que es donen en els rius. Font: Salinas, H. (2015).	6
Figura 2.5. Formes de fons que es poden trobar en els rius segons la velocitat del flux de l'aigua. Font: Basile, P. A. (2018).	8
Figura 2.6. Esquema del concepte de la capa activa del fons del riu. Font: Budinski, L., Spasojević, M. (2014).	11
Figura 2.7. Esquema del concepte d'amagament de les partícules més fines de les mescles de sediments. Font: Janssen, S. R. (2010).	12
Figura 3.1. Vista en planta del primer cas. Font: pròpia.	14
Figura 3.2. Ortofoto de la zona d'on s'ha basat el primer cas. Font: Google Earth.	14
Figura 3.3. Localització de les entrades i sortides d'aigua en el primer cas. Font: pròpia.	15
Figura 3.4. Cas 1 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia.	16
Figura 3.5. Cas 1 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 4,6 dies. Font: pròpia.	16
Figura 3.6. Cas 1 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 6,9 dies. Font: pròpia.	17
Figura 3.7. Cas 1 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 9,3 dies. Font: pròpia.	17
Figura 3.8. Cas 1 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 11,6 dies. Font: pròpia.	18
Figura 3.9. Cas 1 simulat amb graves: secció transversal aigües avall de la confluència entre els rius. Font: pròpia.	19
Figura 3.10. Cas 1 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia.	19
Figura 3.11. Cas 1 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 4,6 dies. Font: pròpia.	20
Figura 3.12. Cas 1 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 6,9 dies. Font: pròpia.	20
Figura 3.13. Cas 1 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 9,3 dies. Font: pròpia.	21
Figura 3.14. Cas 1 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 11,6 dies. Font: pròpia.	21
Figura 3.15. Cas 1 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia.	22

Figura 3.16. Cas 1 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 4,6 dies. Font: pròpia. 23

Figura 3.17. Cas 1 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 6,9 dies. Font: pròpia. 23

Figura 3.18. Cas 1 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 9,3 dies. Font: pròpia. 24

Figura 3.19. Cas 1 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 11,6 dies. Font: pròpia. 24

Figura 3.20. Seccions transversals escollides per comparar la cota del fons del riu per cada tipus de sediment analitzat en l'últim instant de temps. Font: pròpia. 25

Figura 3.21. Gràfica comparativa d'elevació de la cota de fons del riu a la secció transversal entre els punts (250,50) i (250,0) a l'últim instant de temps simulat. Font: pròpia..... 25

Figura 3.22. Gràfica comparativa d'elevació de la cota de fons del riu a la secció transversal entre els punts (100,50) i (150,50) a l'últim instant de temps simulat pel cas 1. Font: pròpia. 26

Figura 3.23. Vista en planta del cas 2. Font: pròpia. 27

Figura 3.24. Cas 2 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 0,6 dies. Font: pròpia. 28

Figura 3.25. Cas 2 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 1,2 dies. Font: pròpia. 28

Figura 3.26. Cas 2 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 1,7 dies. Font: pròpia. 28

Figura 3.27. Cas 2 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia. 29

Figura 3.28. Cas 2 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 0,6 dies. Font: pròpia. 29

Figura 3.29. Cas 2 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 1,2 dies. Font: pròpia. 30

Figura 3.30. Cas 2 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 1,7 dies. Font: pròpia. 30

Figura 3.31. Cas 2 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia. 30

Figura 3.32. Cas 2 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 0,6 dies. Font: pròpia. 31

Figura 3.33. Cas 2 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 1,2 dies. Font: pròpia. 31

Figura 3.34. Cas 2 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 1,7 dies. Font: pròpia. 31

Figura 3.35. Cas 2 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia. 32

Figura 3.36. Secció escollida per dibuixar el gràfic comparatiu del cas 2. Font: pròpia. 32

Figura 3.37. Gràfica comparativa d'elevació de la cota de fons del riu a la secció transversal entre els punts (120,15) i (220,15) a l'últim instant de temps simulat pel cas 2. Font: pròpia.	33
Figura 4.1. (a) Perfil longitudinal complet del torrent de La Combe-de-Lancey. (b) Detall del con de dejecció del torrent. (c) Vista en planta del con de dejecció del torrent. Font: Piton, G. et al. (2019).....	34
Figura 4.2. Desbordament del torrent Vorz el 23 d'agost del 2005. Font: IRMA (2006).	35
Figura 4.3. Desbordament del torrent de Gleysin a la localitat de Pinsot. Font: IRMA (2006).....	35
Figura 4.4. Imatge del model reduït de la conca de retenció de sediments del torrent de La Combe-de-Lancey. Font: Rozani, F. (2020).	37
Figura 4.5. Detall de la barrera hídrica del model reduït. Font: Piton, G., Richard, D. (2018).....	37
Figura 4.6. Freqüència acumulada de cada mescla de sediments utilitzada als assajos en el model reduït. Font: pròpia.	38
Figura 4.7. Gràfic de cabal de sòlid i cabal d'aigua al llarg del transcurs dels assajos. Font: Piton, G., Richard, D. (2018).	39
Figura 4.8. Intersecció entre les línies de contorn i les línies d'estudi, utilitzats per dibuixar el perfil longitudinal de les línies de l'assaig 4. Font: pròpia.	40
Figura 4.9. Línies d'estudi. En total n'hi ha 5, i estan numerades de forma que la línia superior és la número 1 i la inferior la número 5. Font: pròpia.	40
Figura 4.10. Perfil longitudinal de les línies d'estudi al final de l'episodi de l'assaig 4. Font: pròpia.....	41
Figura 4.11. Perfil longitudinal de les línies d'estudi al final de l'episodi de l'assaig 6. Font: pròpia.....	41
Figura 5.1. Ortofoto del model reduït utilitzada per crear la geometria del problema al programa Iber. Font: pròpia.	43
Figura 5.2. Conjunt de nodes, línies i superfícies creades a partir de l'ortofoto dins el programa Iber. Font: pròpia.	44
Figura 5.3. Model tridimensional creat per simulat el model reduït al programa Iber. Font: pròpia.	44
Figura 5.4. Entrada de sediments i aigua dins el model. Font: pròpia.	46
Figura 5.5. Hidrograma de sòlid i líquid d'entrada al model. Font: pròpia.	47
Figura 5.6. Sortida de l'aigua dins els model. Font: pròpia.	48
Figura 5.7. Malla d'elements triangulars irregulars per la simulació. Font: pròpia.	48
Figura 5.8. Profunditat de l'aigua en diferents instants de temps de la simulació. Font: pròpia.....	49
Figura 5.9. Geometria del problema en 2D. Font: pròpia.	50
Figura 5.10. Profunditat de l'aigua en diferents instants de temps de la simulació en el problema amb la geometria aproximada i granulometria de sediments no uniforme. Font: pròpia.	51

Figura 5.11. Profunditat de l'aigua en diferents instants de temps de la simulació en el problema amb la geometria aproximada i granulometria de sediments no uniforme (cont.). Font: pròpia..... 52

Figura 5.12. Cota del llit de la conca en diferents instants de temps de la simulació en el problema amb la geometria aproximada i amb els sediments de granulometria no uniforme. Font: pròpia 52

Figura 5.13. Perfil longitudinal de les línies d'estudi al final de la simulació amb la geometria aproximada considerant la granulometria no uniforme. Font: pròpia. 53

Figura 5.14. Profunditat de l'aigua en diferents instants de temps de la simulació en el problema amb la geometria aproximada i granulometria de sediments uniforme. Font: pròpia..... 54

Figura 5.15. Cota del llit de la conca en diferents instants de temps de la simulació en el problema amb la geometria aproximada i amb els sediments de granulometria uniforme. Font: pròpia 55

Figura 5.16. Perfil longitudinal de les línies d'estudi al final de la simulació amb la geometria aproximada considerant la granulometria uniforme. Font: pròpia. 55

1. Introducció

Els desastres naturals, desgraciadament, formen part de les nostres vides. Per desastre natural entenem aquell que causa danys tant materials com personals i que no ha estat comès per l'esser humà, sinó que ha estat comès per esdeveniments que escapen al control humà. Els desastres naturals poden ser esllavissaments, terratrèmols, erupcions volcàniques, inundacions, tsunamis i huracans, entre d'altres. Nosaltres ens centrarem en aquest treball en els episodis de pluja molt intensa. Aquests episodis poden produir tant danys materials com personals si el període de retorn de les pluges és prou elevat. Aquestes pluges poden desencadenar en inundacions, desbordaments dels rius i en el transport de grans masses de sediments. Aquest últim efecte és amb el que ens centrarem en aquest treball.

Sabem que la Terra és un ens en constant moviment i la seva morfologia va canviant amb el temps. De fet, un dels causants de que la superfície de la Terra vagi canviant són els rius que, mitjançant els processos d'erosió, transport i sedimentació, és capaç d'esculpir valls i crear deltes. Quan es produeix un episodi de pluja extrema, sovint l'aigua arrossega tots els sediments del curs del riu o de les rieres i se'ls endú aigües avall. Quan aquests rius i rieres arriben a una part més plana de la superfície, els sediments transportats s'hi dipositen i poden causar danys materials, sobretot a les infraestructures.

Aquest fet de que els grans episodis de pluja siguin capaços de transportar grans volums de sediments, fa que sigui necessari la construcció de sistemes de retenció de sediments, per tal d'evitar que aquests es dipositin sobre les infraestructures o els habitatges existents al peu d'una riera o riu. En aquest treball ens centrarem en les conques de retenció de sediments, que, com el seu nom indica, són conques que es troben al curs del riu però de gran amplitud i de pendent molt baixa, fet que facilita la sedimentació. Aquesta sedimentació que es fa aigües amunt dels nuclis urbans facilita que en episodis de grans pluges no hi hagi una gran sedimentació a les valls dels rius i rieres, sinó que aquesta sedimentació es pugui produir en la major part a les conques de retenció de sediments.

En el present treball, s'analitzaran els resultats d'un model reduït d'una conca de retenció de sediments i s'intentaran replicar les condicions de contorn i la geometria del problema real per tal de verificar el resultat mitjançant la versió 3.1 del programa dissenyat a la UPC Iber. Així doncs, passem a veure els principals objectius marcats en aquest treball.

1.1. Objectius

A continuació es presentaran els objectius principals a assolir en aquest treball:

- Revisió literària i presentació de la teoria associada al transport de fons dels sediments.

- Creació i simulació de casos bàsics de transport de fons de sediments considerant una granulometria uniforme.
- Anàlisi i revisió de les dades disponibles del model reduït real.
- Creació de la geometria i condicions de contorn per tal de simular correctament el problema al programa Iber.
- Simulació del model a reduït dins el programa en dos casos diferents: un per granulometria no uniforme dels sediments (igual que al cas real) i un altre per granulometria uniforme.
- Comparació dels resultats obtinguts de les dues simulacions entre les granulometries uniforme i no uniforme, i comparació de les simulacions obtingudes amb els resultats del model reduït.

1.2. Metodologia

Com s'ha esmentat, s'utilitza la versió 3.1 del programa Iber per tal de simular el transport de fons dels sediments en el problema.

1.2.1. Limitacions

Degut a que la versió 3.1 d'Iber ha estat llançada al Desembre del 2021, i l'entrega del treball ha estat just un mes després, no es disposava de problemes a mode d'exemple ni d'un manual que expliqués els conceptes bàsics de la simulació de problemes de transport de fons per a granulometries dels sediments no uniformes.

2. Fonaments teòrics

En aquest capítol es presenten les bases teòriques i les equacions necessàries pel modelatge del transport de sediment en rius, tant en el cas de granulometria de les partícules uniforme com en el cas no uniforme.

Cal recordar que els sediments transportats pels rius s'originen amb l'erosió, que consisteix en l'extracció per acció de la força de l'aigua d'una part del sòl per on el riu discorre. L'erosió del sòl per acció del riu dona lloc a partícules de diferents mides. Les partícules més grans (sorres i graves) seran transportades pel fons del riu gràcies a la força de l'aigua (més endavant veurem les equacions i detallarem el funcionament físic d'aquest fenomen). Aquestes es transporten per el fons ja que el seu pes no permet que siguin transportades en suspensió, sinó que són transportades rodolant a la superfície del fons del riu. En canvi, les partícules més petites poden ser transportades en suspensió degut al seu petit pes. El transport en suspensió de les partícules més petites queda fora de l'abast d'aquest projecte.

Existeixen diferents models numèrics per simular el transport de fons considerant totes les partícules que son transportades d'igual mida, però la realitat és ben diferent. Sovint ens podem trobar que la erosió ha generat partícules que són transportades pel fons de diferents mides, i això complica la simulació numèrica.

Hem vist el concepte d'erosió i de transport. L'últim procés que es dona als rius és el de la sedimentació, que consisteix en la disposició d'aquestes partícules transportades al riu, creant així deltes i altres elements de la morfologia costanera. Aquesta sedimentació se sol dur a terme prop de les desembocadures dels rius, on les aigües són més tranquil·les i discorren a menys velocitat, facilitant així la precipitació dels sediments transportats al fons del riu.

Seguidament, entrarem en detall en els diferents processos que es poden trobar dins els rius i donarem a conèixer la teoria darrera el transport de sediments i presentarem les seves equacions.

2.1. Moviment incipient de sediments

L'equilibri de les partícules al fons dels rius es veuen pertorbades per les forces desestabilitzadores d'arrossegament i d'aixecament hidrodinàmic que causa l'aigua. Aquestes forces són contrarestades amb les forces estabilitzadores encarregades de resistir al moviment de les partícules. Aquestes forces de resistència són la gravetat i la cohesió o fregament.

Per tant, en forma esquemàtica, les forces que actuen en el moviment incipient dels sediments són:

- Forces desestabilitzadores: d'arrossegament i d'aixecament hidrodinàmic.
- Forces estabilitzadores: gravetat i cohesió entre partícules.

Òbviament, s'iniciarà el moviment quan les forces desestabilitzadores siguin superiors a les estabilitzadores i no hi haurà inici de moviment en el cas contrari.

Depenent del tipus de sediments presents al fons del riu, la força estabilitzadora de la cohesió tindrà un paper més o menys important. Si les partícules són d'un diàmetre gran (sorres i graves), aquestes es mouran com a entitats simples, independents entre elles. D'aquesta forma, en les partícules de gran mida l'efecte de la cohesió entre partícules és petit. En canvi, si les partícules són argiles o llims (de diàmetres petits), la cohesió serà més gran. A la taula 2.1. es pot observar un resum de la influència de les forces estabilitzadores en funció de la mida dels sediments.

Mida sediments	Gravetat	Cohesió (o fregament)
Sediments petits (llims i argiles)	Baixa	Gran
Sediments grans (graves i sorres)	Gran	Baixa

Taula 2.1. Influència de les forces estabilitzadores sobre els sediments en funció de la mida.

De forma esquemàtica, a la figura 2.1. es poden observar les forces actuant sobre els sediments.

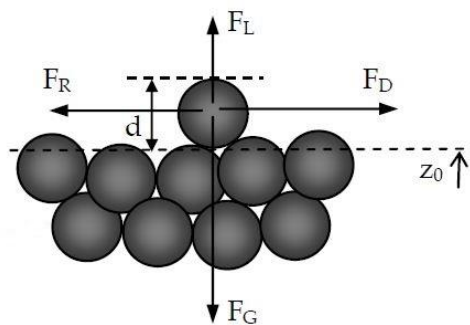


Figura 2.1. Esquema de les forces actuant sobre els sediments del fons dels rius. Font: Basile, P. A. (2018).

F_R es refereix a la força de fregament, F_G es refereix a la força de la gravetat, F_L es refereix a la força d'aixecament feta per l'aigua i F_D es refereix a la força d'arrossegament.

És de gran importància saber si els sediments iniciaran moviment o bé romandran en repòs segons unes condicions concretes tant del riu com dels sediments. Shields, A. (1936) va fer una gran contribució en aquest aspecte amb la seva tesi doctoral. En ella, es presenta un diagrama conegut com el diagrama de Shields, que ens diu si en un riu hi ha moviment de sediments o no segons la tensió tangencial que l'aigua exerceix sobre els sediments del fons del riu i segons el nombre de Reynolds.

Cal recordar que tant la velocitat de l'aigua del riu com la tensió tangencial que provoca l'aigua no són constants en tota la profunditat del riu. En particular, la velocitat tangencial de l'aigua varia de forma quadràtica amb la profunditat essent nul·la al fons, mentre que la tensió tangencial que provoca l'aigua és nul·la a la superfície i varia de forma lineal amb la profunditat (veure figura 2.2.).

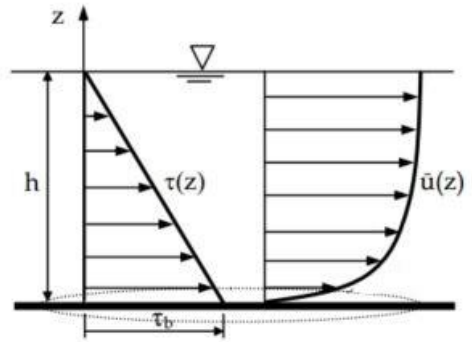


Figura 2.2. Variació de la tensió tangencial que provoca l'aigua i la velocitat de la mateixa amb la profunditat. Font: Basile, P. A. (2018).

La tensió tangencial adimensional que provoca l'aigua contra el fons del riu (τ^*) és calculada:

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad (2.1)$$

on τ_b és la tensió tangencial crítica de l'aigua contra els sediments del fons, d és mediana de la mida de les partícules dels sediments, γ és el pes específic de l'aigua i γ_s és el pes específic del les partícules de sediments.

La velocitat tangencial que exerceix l'aigua es calcula:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (2.2)$$

on ρ és la densitat específica de l'aigua.

Per últim, el nombre de Reynolds de les partícules és definit per:

$$Re^* = \frac{u^*d}{\nu} \quad (2.3)$$

on ν és la viscositat cinemàtica de l'aigua.

Amb tots aquests paràmetres definits, podem dibuixar el diagrama de Shields. Aquest ens dona un àrea de l'espai $\tau^* - Re^*$ on hi haurà moviment dels sediments, i una altra àrea del mateix espai on no n'hi haurà. A la figura 2.3. es pot veure el diagrama de Shields en detall.

2.2. Mecanismes de transport

El transport de sediments es divideix en dos grans grups segons la modalitat del moviment (Basile, P. A. (2018)). Aquests dos grups són el transport de fons i el transport en suspensió.

- Transport de fons. En aquest tipus de transport les partícules rodolen o salten pel fons del riu. La magnitud del transport depèn de la tensió tangencial que provoca el curs de l'aigua i del diàmetre dels sediments. El transport de fons és

independent del diàmetre del sediment quan la tensió tangencial aplicada és molt més gran que la tensió tangencial crítica.

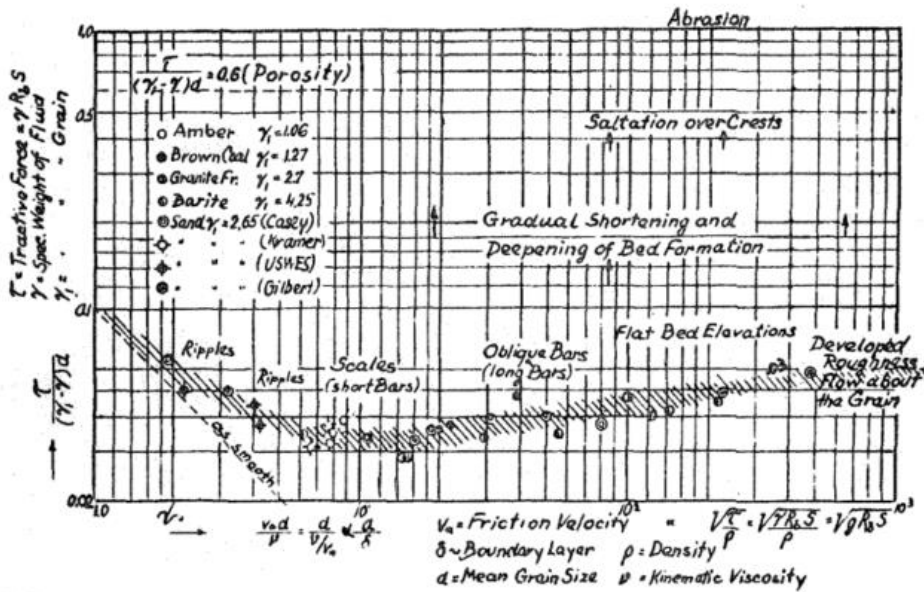


Fig. 6. Tractive - force coefficient $\frac{\tau}{(\gamma_1 - \gamma)d}$ against the Reynolds number of the grain $\frac{V_* d}{\nu}$.

Figura 2.3. Diagrama de Shields. Font: Shields, A. (1936).

- Transport en suspensió. En aquest transport les partícules de sediments perden el contacte amb el fons del riu realitzant trajectòries relativament llargues. Aquestes partícules estan sostingudes per les pulsacions turbulentes del corrent del riu. El transport en suspensió sempre depèn del diàmetre del sediment.

Com ja hem comentat anteriorment, en aquest projecte ens centrarem només en el primer tipus de transport de sediments, el transport de fons. A la figura 2.4 es pot veure esquemàticament la diferència entre el transport de fons i el transport en suspensió.

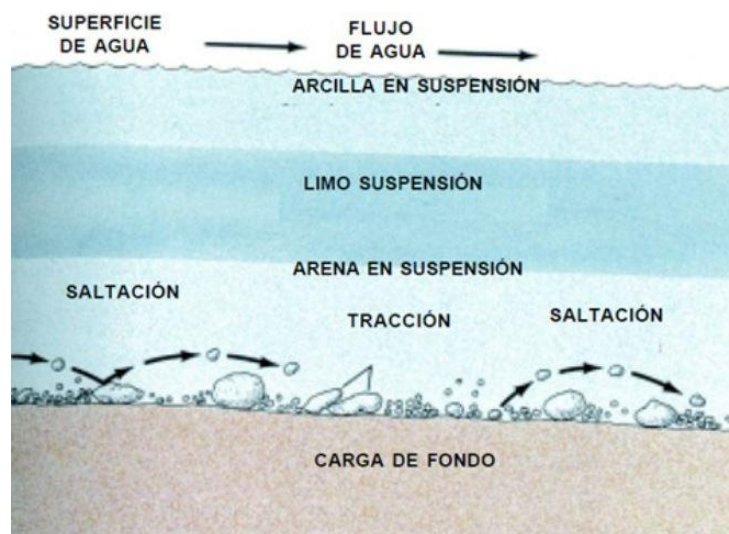


Figura 2.4. Esquema dels tipus de transport de sediments que es donen en els rius. Font: Salinas, H. (2015).

2.3. Formes de fons

El transport de sediments dona lloc a diferents formes al fons dels rius. Aquestes són importants de classificar ja que determinen la rugositat del llit d'un riu: com més irregularitats hi ha al fons del riu, major serà el nombre de Manning del mateix. A més, les formes de fons i el transport de sediments tenen una influència mútua, ja que al variar la rugositat del riu degut a les irregularitats de les formes de fons, es modifiquen la profunditat del riu i, en conseqüència, la velocitat del flux, que són factors rellevants al transport de sediments.

Segons Basile, P. A. (2018), Les formes de fons que ens podem trobar als rius es poden classificar de la següent forma:

- Règim inferior (per nombres de Froude inferiors a 0,6):
 - Fons pla: per valors de la velocitat just per sobre de la velocitat crítica. Es desenvolupa un transport de fons sense deformació del fons del riu, on les partícules de sediment llisquen, rodolen o donen petits salts.
 - Rínxols: Es formen al incrementar la velocitat del flux. Són petites ondulacions regulars que es donen en rius on el diàmetre dels sediments no supera els 0,6 mm.
 - Dunes: Si la velocitat augmenta, es creen irregularitats de gran longitud i baixa alçada. La cresta de les ondulacions és perpendicular a la direcció del flux.
- Règim superior (per nombres de Froude superiors a 0,6):
 - Fons pla: incrementant la velocitat del flux, les dunes s'aplanen i desapareixen. El fons del riu es torna pla però hi ha un transport de sediments molt elevat.
 - Antidunes: si incrementa la velocitat del flux per valors del nombre de Froude al voltant de 1, la superfície del fons es torna inestable. Es formen formes de fons quasi sinusoidals, que poden afectar a la superfície de l'aigua, creant ones.
 - "Hoyas" i ràpids: per velocitats encara més altes es formen "hoyas" i ràpids, que són característics de rius amb fortes pendents, molt freqüents en zones d'alta muntanya.

A la figura 2.5 es pot observar un dibuix esquemàtic de les diferents formes de fons descrites.

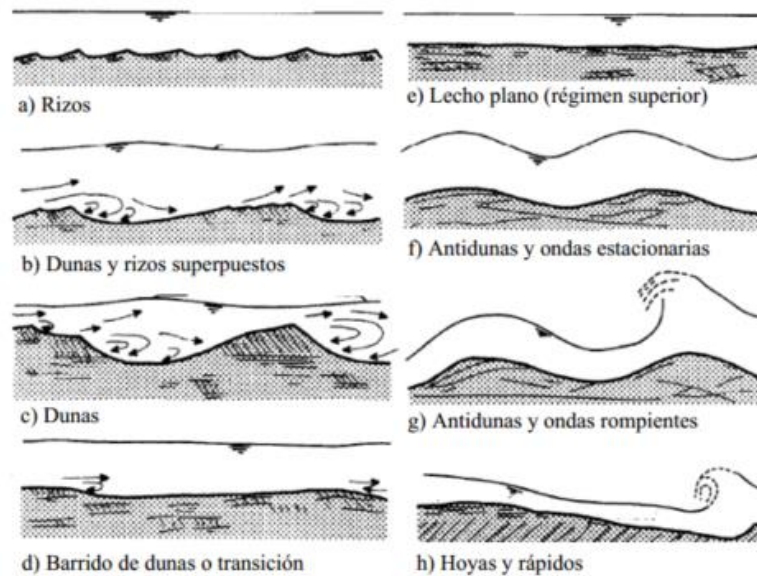


Figura 2.5. Formes de fons que es poden trobar en els rius segons la velocitat del flux de l'aigua. Font: Basile, P. A. (2018).

2.4. Equacions governants del transport de fons

El software que es farà servir en aquest projecte, l'IBER, conté un mòdul de transport de sòlid que resol les equacions de transport de sediments no cohesius en règim no estacionari¹. En el software, es resolen tant les equacions de transport de fons com les de transport en suspensió, modelant l'acoblament entre les càrregues de fons i en suspensió. Com s'ha comentat, el transport de sediments en suspensió queda fora de l'àmbit del projecte i, per tant, només veurem les equacions que governen el transport de fons. En aquest punt presentarem les diferents equacions que governen el transport de fons de sediments als rius.

2.4.1. Equació de conservació dels sediments

Exner, F. M. (1925) va fer una gran contribució al proposar una equació de balanç de massa dels sediments. Aquesta equació es coneix com la equació de conservació dels sediments de Exner, i s'escriu:

$$(1 - p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{sb,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sb,y}}{\partial y} = D - E \quad (2.4)$$

on p és la porositat dels sediments del fons, z_b és la cota del fons, $q_{sb,x}$ i $q_{sb,y}$ són les dues components (una en cada direcció de l'espai bidimensional) del cabal del sòlid de fons, i l'expressió $D - E$ representa el balanç de càrrega de fons i càrrega en suspensió.

Com que aquest projecte està centrat en el transport de fons de sediments, es considerarà que el balanç de càrrega entre el fons i els sediments en suspensió és nul.

¹ El règim no estacionari és aquell en que les variables involucrades al seu estat canvien amb el temps.

Els termes del cabal de sòlid de fons es calcula, com veurem a continuació, o bé mitjançant l'equació de Meyer-Peter Müller o bé amb l'equació de Van Rijn.

2.4.2. Partició de tensions

La tensió total del fons del riu està generada per la rugositat dels grans de sediments i per les formes de fons que hem vist anteriorment. Només la tensió per cada partícula de sediment contribueix al moviment dels sediments per càrrega de fons, per tant, és necessari calcular la tensió de fons deguda al les partícules.

En aquest sentit, Einstein, H. A. (1950) va desenvolupar una formulació per la partició de tensions per tal de estimar la tensió de les partícules a partir de la tensió total de fons. Aquesta estimació s'escriu:

$$\tau_{bs}^* = \tau_b^* \left(\frac{n_s}{n} \right)^{3/2} \quad (2.5)$$

on n és el nombre de Manning total, n_s és el nombre de Manning equivalent a cada partícula calculat mitjançant l'equació 2.6 (que depèn del diàmetre de cada partícula), τ_{bs}^* és la tensió de fons adimensional deguda a la partícula calculat mitjançant l'equació 2.7 i τ_b^* és la tensió total adimensional de fons calculat mitjançant l'equació 2.8.

El nombre de Manning equivalent degut a cada partícula (n_s) es calcula

$$n_s = \frac{k_s^{1/6}}{25} \quad (2.6)$$

on $k_s = \frac{5}{2} D_s$ és l'alçada de la rugositat de la partícula essent D_s el diàmetre del sediment.

Les tensions adimensionals degut a la partícula i total de fons es calculen respectivament:

$$\tau_{bs}^* = \frac{\tau_{bs}}{(\rho_s - \rho)gD_s} \quad (2.7)$$

$$\tau_b^* = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gD_s} \quad (2.8)$$

2.4.3. Cabal del sòlid de fons

Existeixen diferents formulacions per determinar el cabal del sòlid de fons (q_b). Enguany en repassarem les dues més important: l'equació de Meyer-Peter Müller i l'equació de Van Rijn.

- Meyer-Peter Müller

Meyer-Peter, E. i Müller, R. (1948) presenten una equació per fons de graves de fins a 30 mil·límetres de diàmetre. Aquesta equació calcula el cabal del sòlid del fons mitjançant l'equació 2.9.

$$q_{sb}^* = 8(\tau_{sb}^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad (2.9)$$

on el cabal del sòlid adimensional és calculat:

$$q_{sb}^* = \frac{q_{sb}}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g D_s^3}} \quad (2.10)$$

Si ens trobem en el cas de que el fons del riu és pla, llavors la tensió crítica adimensional serà $\tau_c^* = 0,047$. Si el fons no és pla, haurem de realitzar una correcció per la pendent del fons.

Anys després, al revisar la equació proposada per Meyer-Peter i Müller, Wong, M. i Parker, G. (2006) van proposar la següent correcció a la fórmula:

$$q_{sb}^* = 3,97(\tau_{sb}^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad (2.11)$$

on en el cas de fons pla, s'utilitzarà la tensió crítica $\tau_c^* = 0,0495$. En cas contrari, serà necessari realitzar una correcció per pendent del fons.

- Van-Rijn

En una línia similar, Van Rijn, L. C. (1984) suggereix una formulació per calcular el cabal sòlid de fons. Les fórmules que utilitza són:

$$T < 0,3 \rightarrow q_{sb}^* = 0,053 \frac{T^{2,1}}{D_*^{0,3}} \quad (2.12)$$

$$T > 0,3 \rightarrow q_{sb}^* = 0,100 \frac{T^{1,5}}{D_*^{0,3}} \quad (2.13)$$

on T es tracta d'un paràmetre adimensional que calcula l'excés de fricció de fons per sobre del valor crític que defineix el llindar del moviment de les partícules del fons. Aquest paràmetre es calcula:

$$T = \frac{\tau_{bs}^* - \tau_c^*}{\tau_c^*} \quad (2.14)$$

A més, el diàmetre adimensional (D_*) és calculat:

$$D_* = D_s \left(\frac{gR}{v^2} \right)^{1/3} \text{ amb } R = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (2.15)$$

2.5. Transport de fons per granulometries no uniformes

Els sediments transportats en els rius no solen tenir un diàmetre uniforme al no ser la erosió un procés exacte. Per això ens podem trobar sovint que tenim una part dels sediments que són transportats en suspensió (els de menor pes i diàmetre) i una altra part que és transportada pel fons del riu per arrossegament, rodolant o fent petits salts (partícules de major pes i diàmetre).

En aquest punt es presenten els fonaments teòrics i equacions bàsiques pel transport de fons de material no uniforme, és a dir, quan aquest material no es pot caracteritzar solament per un diàmetre.

2.5.1. Capa activa

Aquest concepte va ser introduït per Hirano, M. (1971) per l'estudi de transport de sediments de granulometria no uniforme. Segons Hirano, M. (1971), el transport de sediments per arrossegament pel fons del riu es produeix en un espessor determinat

anomenat capa activa (h_a). Aquesta capa es troba a l'estrat superior del fons d'un riu. En resum, la capa activa és un espessor del riu on es duu a terme el transport per arrossegament quan el sediment és no uniforme. Sota aquest espessor de la capa activa no s'hi duu a terme transport per arrossegament.

Per quantificar l'espessor de la capa activa, s'utilitza un paràmetre N multiplicat per d_{50} o d_{90} de la mida més gran utilitzada a la simulació. Encara que l'espessor sol variar amb el temps, en les simulacions es considera que l'espessor de la capa és constant. A la figura 2.6 es pot veure un esquema del concepte de la capa activa.

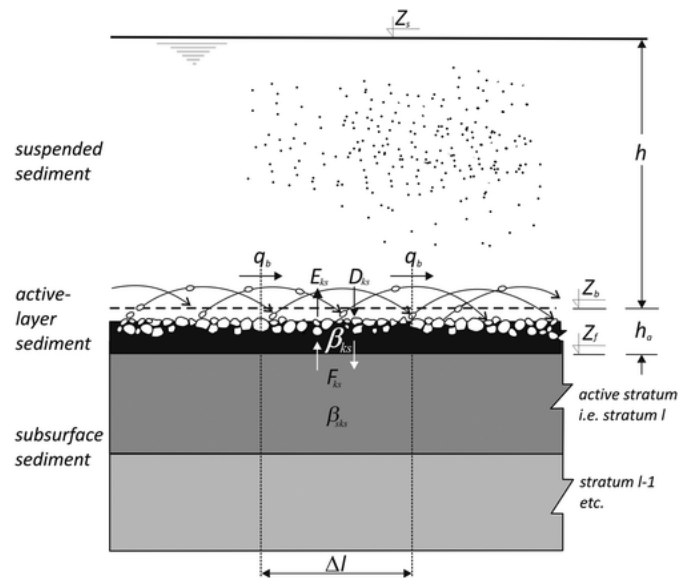


Figura 2.6. Esquema del concepte de la capa activa del fons del riu. Font: Budinski, L., Spasojević, M. (2014).

2.5.2. Amagament de les partícules de sediments

Les partícules d'una certa mida característica no es comportaran igual quan formen part d'una mescla de sediments de diferents mides, que quan la granulometria de la mescla de sediments és uniforme (tots tenen el mateix diàmetre característic). A aquest fet se'l coneix com a amagament de les partícules, estudiat primer per Ashida, K. i Michiue, M. (1972).

Segons aquest estudi, la relació entre la tensió tangencial crítica adimensional i la tensió tangencial crítica es poden calcular a través de la mitjana geomètrica dels diàmetres de la mescla de sediments i el diàmetre de cada classe, com ja havia proposat Egiazaroff, I. (1965).

L'amagament de les partícules més petites del sediment és un fenomen rellevant alhora de calcular el transport de fons, ja que les partícules més grans de sediment impedeixen que les més petites puguin ser arrossegades pel fons si les més grans no tenen moviment.

A la figura 2.7 es pot veure d'una forma molt esquemàtica l'amagament de les partícules més fines de la mescla de sediments quan aquesta és sotmesa a la força de l'aigua d'un riu.

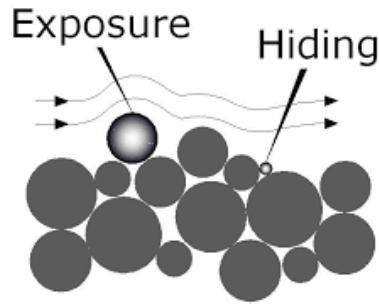


Figura 2.7. Esquema del concepte d'amagament de les partícules més fines de les mescles de sediments. Font: Janssen, S. R. (2010).

Per tal de quantificar aquest fenomen, veurem les equacions principals proposades fins a data d'avui: Egiazaroff, Ashida i Michiue i Parker.

- *Egiazaroff*

Ashida, K. i Michiue, M. (1972) basen el seu estudi en la fórmula proposada per Egiazaroff, I. (1965). Aquesta fórmula s'escriu:

$$\frac{\tau_{sci}^*}{\tau_{scg}^*} = \frac{D_i}{D_g} \left(\frac{\ln(19)}{\ln\left(19\frac{D_i}{D_g}\right)} \right)^2 \quad (2.16)$$

on τ_{sci}^* és la tensió tangencial crítica adimensional per una classe, τ_{scg}^* és la tensió tangencial crítica adimensional que es tindria amb un diàmetre característic, D_g és el diàmetre característic calculat mitjançant la mitjana geomètrica dels diàmetres de tota la mescla de sediments, i D_i és el diàmetre d'una classe.

- *Ashida i Michiue*

Segons Ashida, K. i Michiue, M. (1972), l'equació d'Egiazaroff sobreestima la mobilitat de les partícules més fines. Per això, proposen una nova equació per les partícules més fines del sediment:

$$\frac{\tau_{sci}^*}{\tau_{scg}^*} = 0,843 \left(\frac{D_i}{D_g} \right)^{-1} \quad \text{si } \frac{D_i}{D_g} < 4 \quad (2.17)$$

$$\frac{\tau_{sci}^*}{\tau_{scg}^*} = \frac{D_i}{D_g} \left(\frac{\ln(19)}{\ln\left(19\frac{D_i}{D_g}\right)} \right)^2 \quad \text{si } \frac{D_i}{D_g} \geq 4 \quad (2.18)$$

- *Parker, Klingeman i McLean*

Anys més tard, Parker, G., et. al. (1982) proposen una nova equació relacionada amb l'amagament de les partícules més fines.

$$\frac{\tau_{sci}^*}{\tau_{scg}^*} = \left(\frac{D_i}{D_g} \right)^{-y} \quad (2.19)$$

on y és un valor comprès entre 0 i 1 que depèn del substrat per on discorre el riu. En el seu estudi van analitzar el Oak Creek d'Oregon y van adoptar un valor de $y = 0,982$.

3. Simulació de casos per la validació

Al següent capítol es presentaran diferents casos de problemes de transport de sediments per tal de validar el funcionament del programa. Ja que es tracta de casos bàsics i no entren dins l'objectiu bàsic del treball, aquests casos seran simulats considerant una mida uniforme de les partícules de sediments.

En aquests casos bàsics es consideren tres diferents tipus de sediments amb les seves pròpies característiques, a fi de comparar el comportament dels diferents sediments sota les mateixes condicions.

És important que a cada cas presentat es pugui fer una comparació entre diferents sediments on les seves propietats també ho són, ja que d'aquesta manera podem discutir si els resultats que ens dona el programa són lògics i concordants amb la experiència experimental. En definitiva, aquests casos bàsics simulats serien per verificar les equacions i que el programa dona resultats coherents i lògics.

Aquests tres tipus de sediments que farem servir són les graves, les sorres i els llims, les propietats de les quals es poden observar a la taula 3.1. Recordem que les graves són partícules de gran mida, mentre que la mida de les partícules dels llims són pràcticament invisibles a ull humà. Les sorres, en canvi, tenen una mida entre les graves i els llims.

Tipus de sediment	Porositat (%)	Pes específic (kg/m ³)	Angle de fricció (graus)	Diàmetre mig (mm)
Llims	45	1.920	25	0,075
Sorra	32	2.120	35	2
Grava	35	2.650	30	7

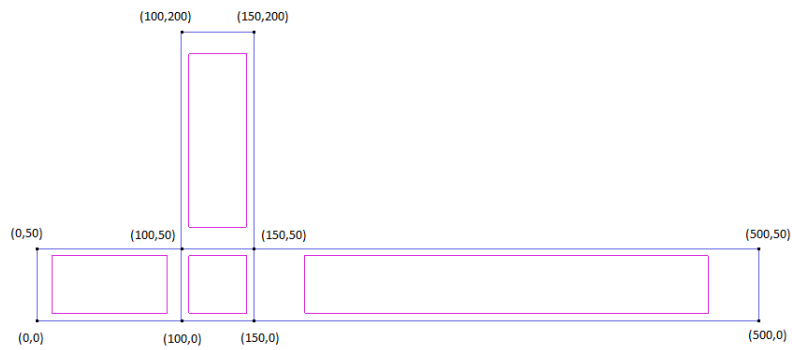
Taula 3.1. Propietats dels diferents tipus de sediments considerats en aquest capítol.

El primer cas que veurem és el de el comportament dels sediments a la intersecció entre dos canals artificials. El segon cas es tracta de veure el moviment de sediments en un canal on hi ha un coll d'ampolla.

3.1. Cas 1: moviment de sediments en la confluència entre dos rius

El primer dels casos simulats consisteix en la confluència entre dos rius. Aquesta confluència és en 90 graus, de forma que un dels rius discorre horitzontalment i l'altre conflueix verticalment amb aquest. Els dos tenen una amplada de 50 metres. A la figura 3.1 s'hi pot veure la vista en planta de la geometria del problema.

En aquest cas, el que ha volgut simular d'una forma molt senzilla i esquemàtica seria la confluència entre els rius Segre i Ebre a la població de Mequinensa. A la figura 3.2 s'hi pot veure una ortofoto de la zona en concret.



iber

Figura 3.1. Vista en planta del primer cas. Font: pròpia.



Figura 3.2. Ortofoto de la zona d'on s'ha basat el primer cas. Font: Google Earth.

El problema compta amb dues entrades de cabal d'aigua i només una sortida. La localització de les entrades d'aigua i de la sortida es pot veure a la figura 3.3. Al riu vertical s'ha assignat un cabal d'entrada de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre que al riu horitzontal se li ha assignat un cabal de $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

A més, s'assigna una entrada de sediments a les dues entrades d'aigua que tenim a la geometria.

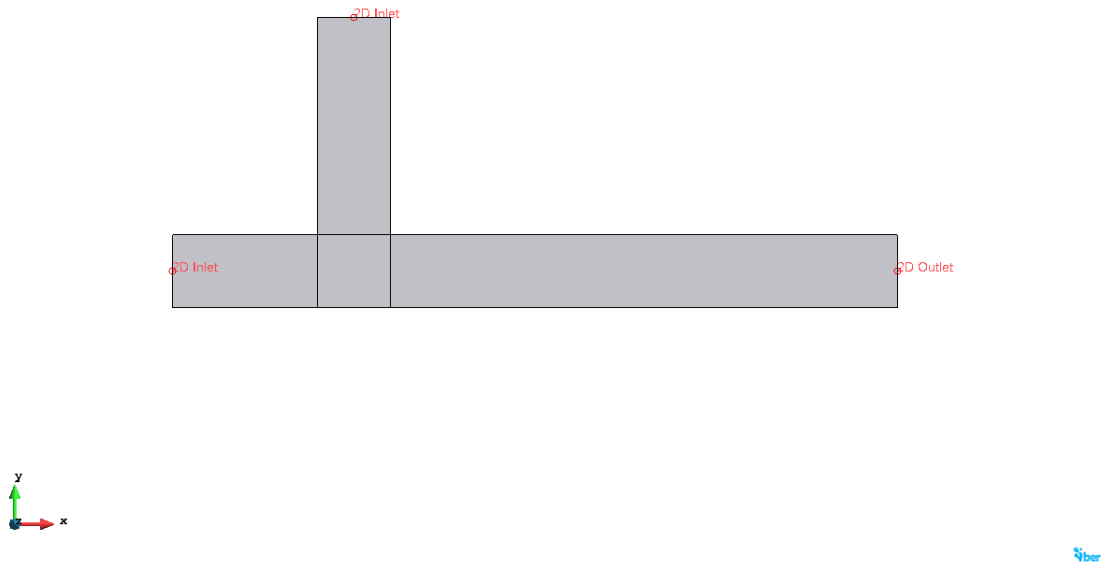


Figura 3.3. Localització de les entrades i sortides d'aigua en el primer cas. Font: pròpia.

El temps d'inici de moviment dels sediments s'assigna als 1.000 segons des de l'inici de la simulació, quan les condicions hidràuliques s'han estabilitzats. L'elevació inicial de l'aigua en tot l'àmbit del problema s'ha assignat a 2 metres per sobre del llit del riu.

S'ha assignat un coeficient de rugositat de 0,025, semblant al que podem trobar a la realitat als rius.

En tots els casos analitzats, es simula el problema un total de 11,6 dies (1.000.000 segons) i s'extreuen resultats cada 16 minuts i 40 segons (1.000 segons). Per últim, la malla generada en tots els casos es tracta d'una malla no estructurada d'elements triangulars de 10 metres de mida, la qual resulta en un total de 428 nodes i 714 elements.

El primer cas és simulat tres vegades diferents, una per cada tipus de sediment presentat a la taula 3.1 i amb les mateixes condicions descrites per tal de veure l'afectació del tipus de sediment en el mateix problema. L'equació seleccionada per simular aquest primer cas és l'equació de Meyer-Peter i Müller.

3.1.1. Cas 1 simulat amb graves

La primera simulació correspon a la simulació amb graves, que són les partícules de sediments més grans de les que estudiarem. Aquestes al ser més grans, tenen una massa major, fet que provoca que el transport dels sediments es doni només pel fons.

Des de la figura 3.4 fins la 3.8, podem veure els resultats de la cota del llit del riu en diferents intervals de temps de la simulació.

A fi d'interpretar correctament els resultats del programa, acotarem els valors de la llegenda, així es pot observar no només la cota del llit del riu a cada interval de temps en tot el domini del problema, sinó que també ens permet comparar la magnitud dels màxims i mínims entre tots els intervals de temps presentats.

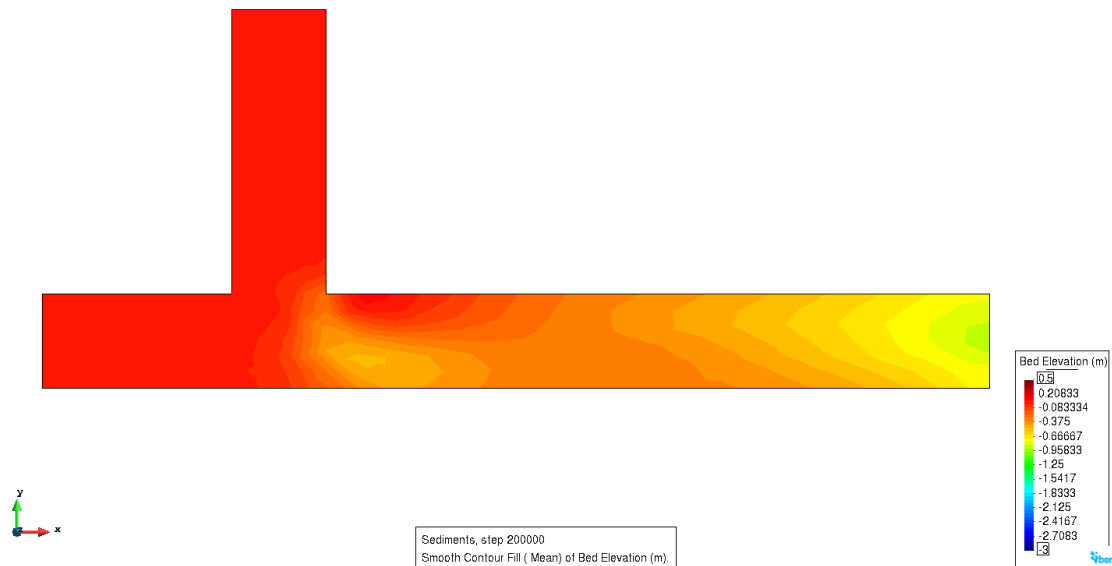


Figura 3.4. Cas 1 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia.

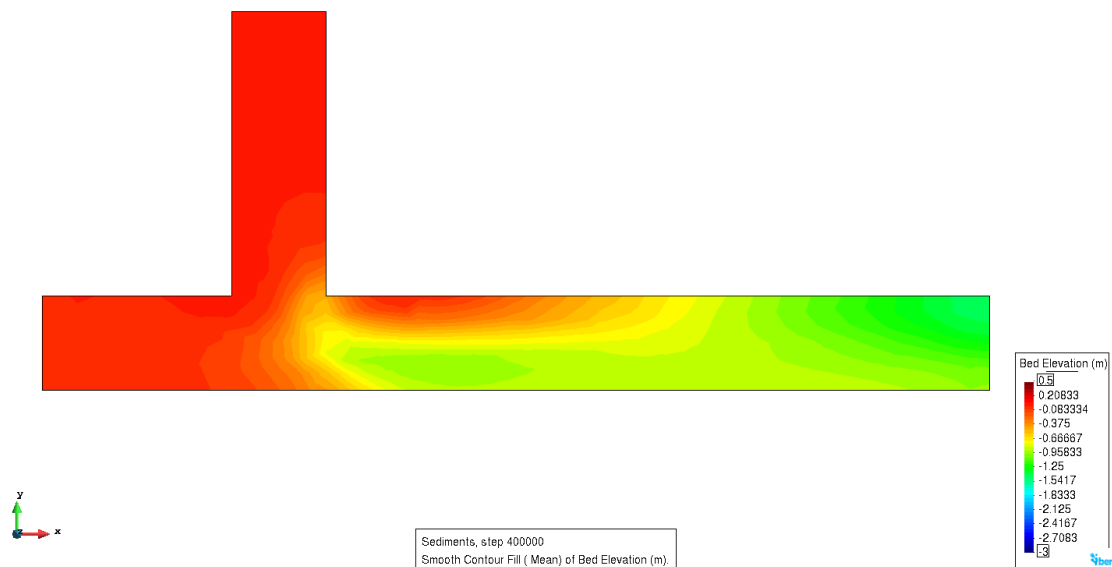


Figura 3.5. Cas 1 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 4,6 dies. Font: pròpia.

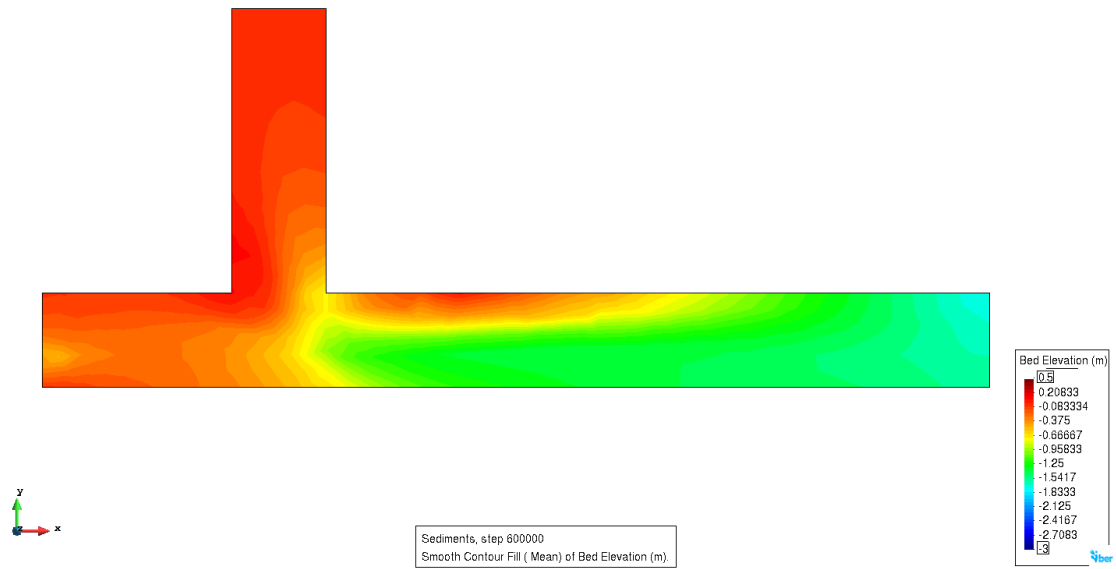


Figura 3.6. Cas 1 simulat amb grava: cota del llit del riu al cap de 6,9 dies. Font: pròpia.

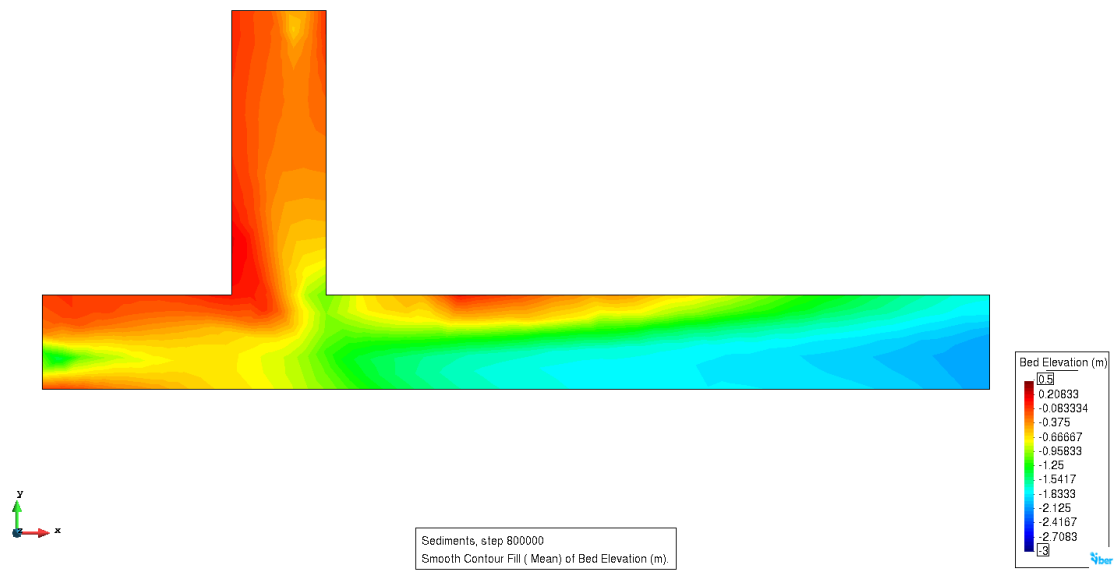


Figura 3.7. Cas 1 simulat amb grava: cota del llit del riu al cap de 9,3 dies. Font: pròpia.

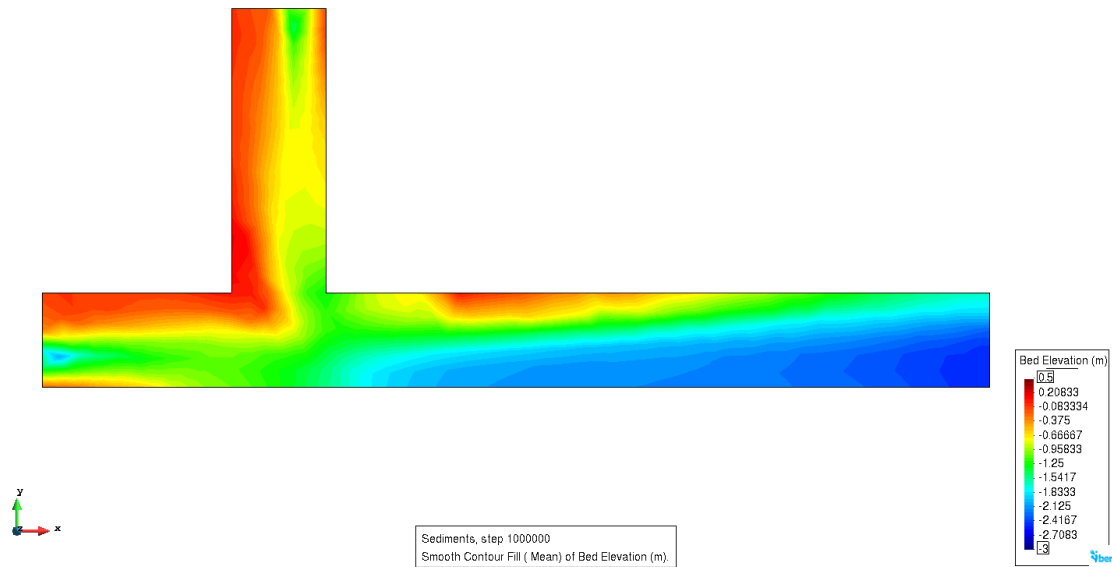


Figura 3.8. Cas 1 simulat amb grava: cota del llit del riu al cap de 11,6 dies. Font: pròpia.

El primer que podem observar és que a mesura que va passant el temps, la elevació del llit del riu al tram després de la confluència va disminuint. Això denota que es tracta d'una erosió remuntant progressiva. Aquest tipus d'erosió consisteix en el descens de la cota del seu nivell de base o punt de desembocadura. És per això que per major temps simulat, major serà la erosió a la desembocadura del riu.

Cal recordar que la erosió és simplement el contrari que la cota del llit del riu. Això significa que si tenim en un punt en concret del riu dos metres negatius de cota del llit, la erosió en aquest mateix punt serà de 2 metres positius.

Podem observar, també, que la erosió al vèrtex aigües amunt de la confluència del riu és inexistent. És més, allà s'hi estan acumulant els sediments, cosa que provoca que la cota del llit del riu augmenti progressivament en el temps.

També podem veure una zona d'erosió molt baixa (i fins i tot d'elevació de la cota del llit) aigües avall de la confluència dels rius (veure la línia vermella de la figura 3.9). En concret, en aquesta secció del riu podem observar una part d'elevació de la cota del llit i una altra part de gran erosió del mateix. Aquesta secció uneix els punts (250,50) i (250,0). Quan dos grans rius conflueixen de la forma que ho fan en aquest problema, aigües avall de la confluència es pot observar com l'aigua discorre amb més força a la part exterior i amb menys a la interior. Això explica aquest fet descrit.

A mode de comparació entre sediments, a la figura 3.21 s'hi pot veure una gràfica comparativa de la cota del llit del riu a la mateixa secció transversal en el tres problemes simulats.

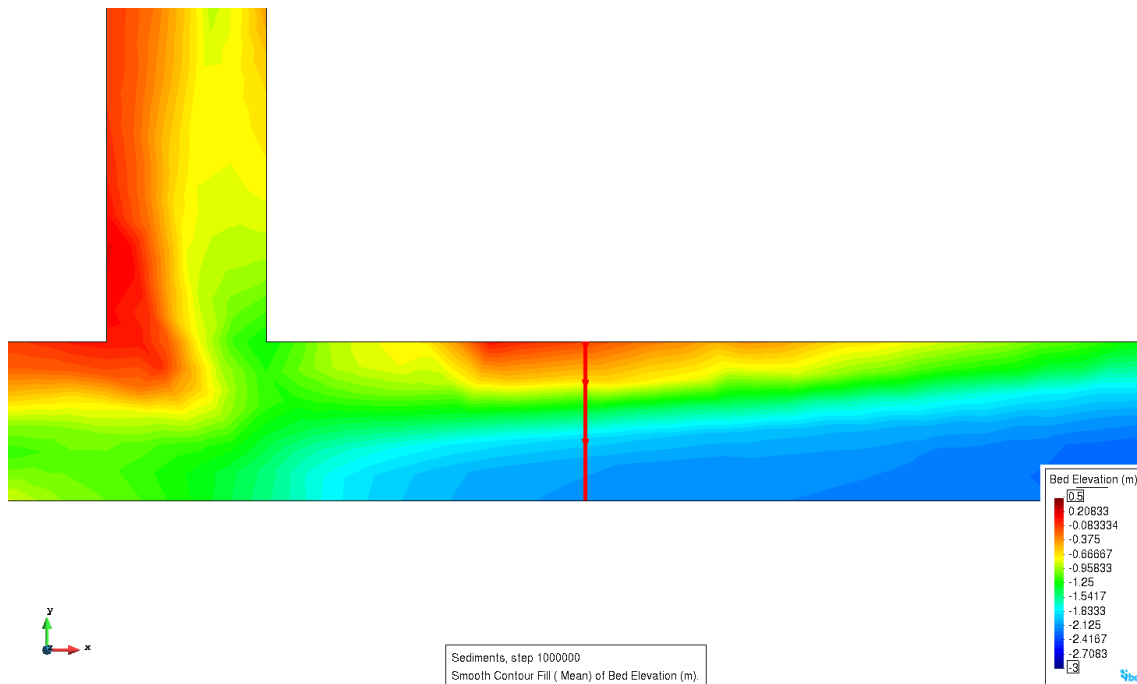


Figura 3.9. Cas 1 simulat amb grava: secció transversal aigües avall de la confluència entre els rius. Font: pròpia.

En resum, en aquest problema en concret, les grava resulten en una erosió remuntant progressiva. Anem a veure a continuació quin el mateix problema simulat amb les sorres.

3.1.2. Cas 1 simulat amb sorres

Les sorres podem dir que en quant a propietats físiques i mecàniques són força semblants que les grava. Per això anticipem que per les sorres els resultats obtinguts siguin força semblants als obtinguts al problema simulat amb les grava.

Des de la figura 3.10 fins la 3.14, podem veure els resultats de la cota del llit del riu en diferents intervals de temps de la simulació.

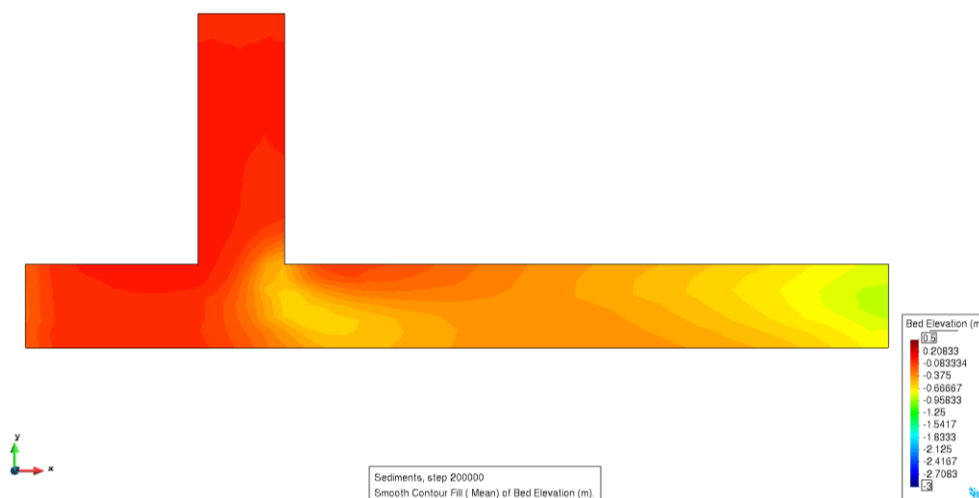


Figura 3.10. Cas 1 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia.

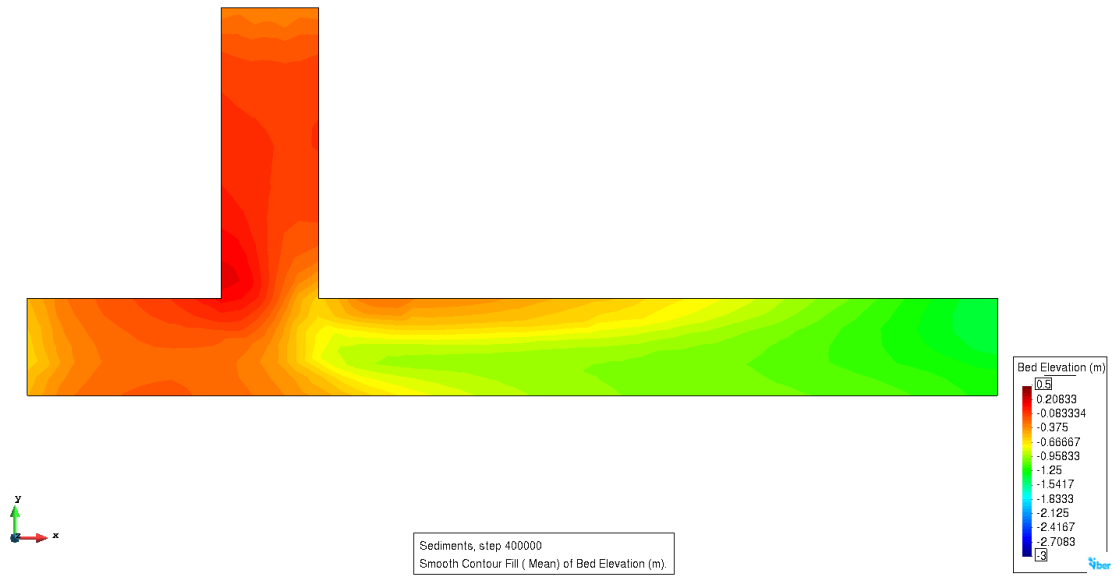


Figura 3.11. Cas 1 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 4,6 dies. Font: pròpia.

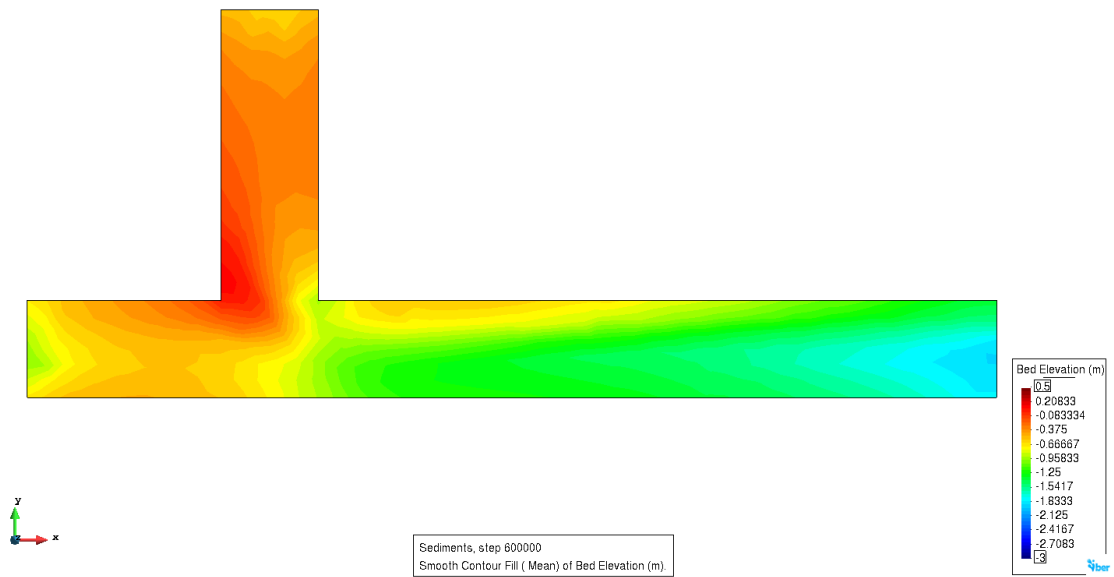


Figura 3.12. Cas 1 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 6,9 dies. Font: pròpia.

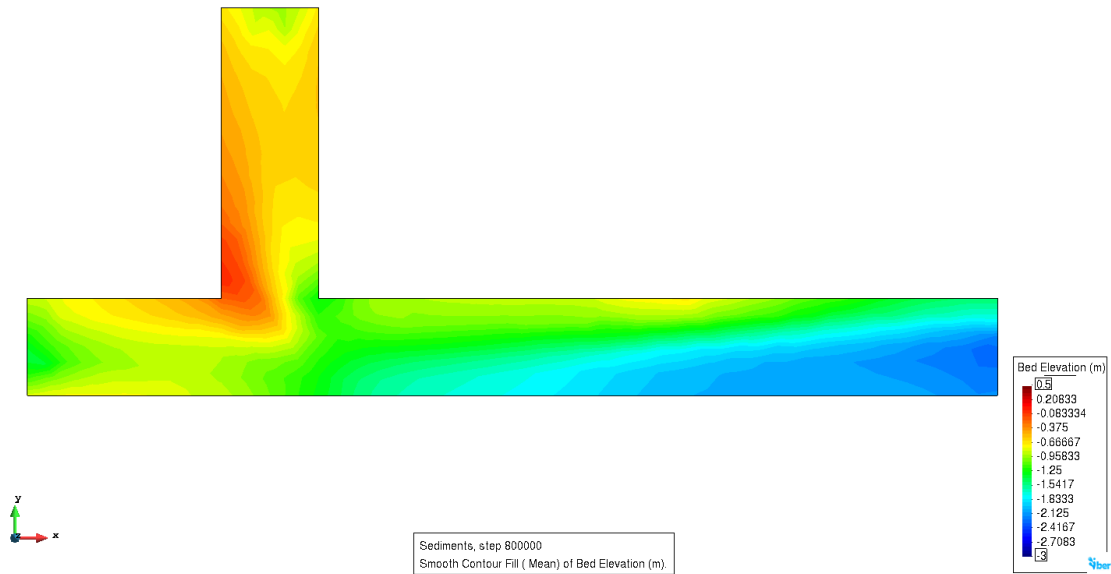


Figura 3.13. Cas 1 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 9,3 dies. Font: pròpia.

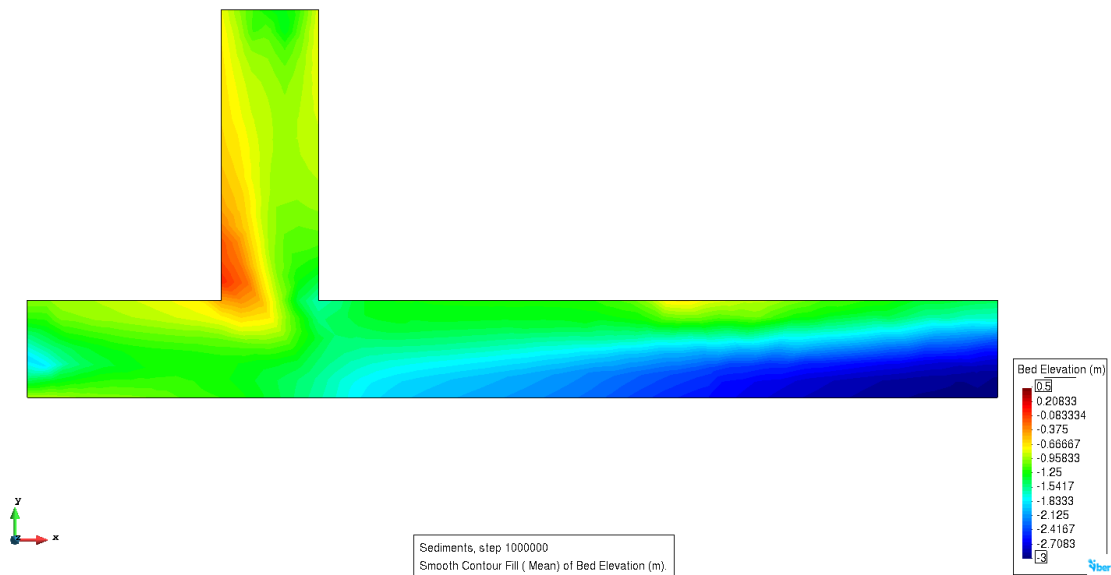


Figura 3.14. Cas 1 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 11,6 dies. Font: pròpia.

Com s'havia anticipat, els resultats del problema simulat amb sorres són força similars als resultats del problema simulat amb les graves. Observem com la màxima erosió es dona als voltants de la desembocadura dels rius, conformant així una erosió remuntant progressiva. El que sí es pot observar és que amb el mateix temps de simulació, les sorres mostren una erosió superior a les graves. A més, s'observa una mínima elevació de la cota del llit del riu a la confluència d'aquests (només 2,6 centímetres), mentre que en les gaves podíem observar que l'elevació de la cota del riu a aquest mateix punt era superior.

Per últim, simularem el cas 1 amb llims.

3.1.3. Cas 1 simulat amb llims

Els llims són el tipus de sediments més diferent a la resta. Es tracta d'un tipus de sediment de mida molt petita i que és molt impermeable. En aquest problema (i en aquest projecte) només analitzem el transport de fons de sediments, però en la realitat, simulant el problema amb llims, aquestes en gran part haurien de ser transportades en suspensió degut a la seva baixa massa.

Des de la figura 3.15 fins la 3.19, podem veure els resultats de la cota del llit del riu en diferents intervals de temps de la simulació.



Figura 3.15. Cas 1 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia.

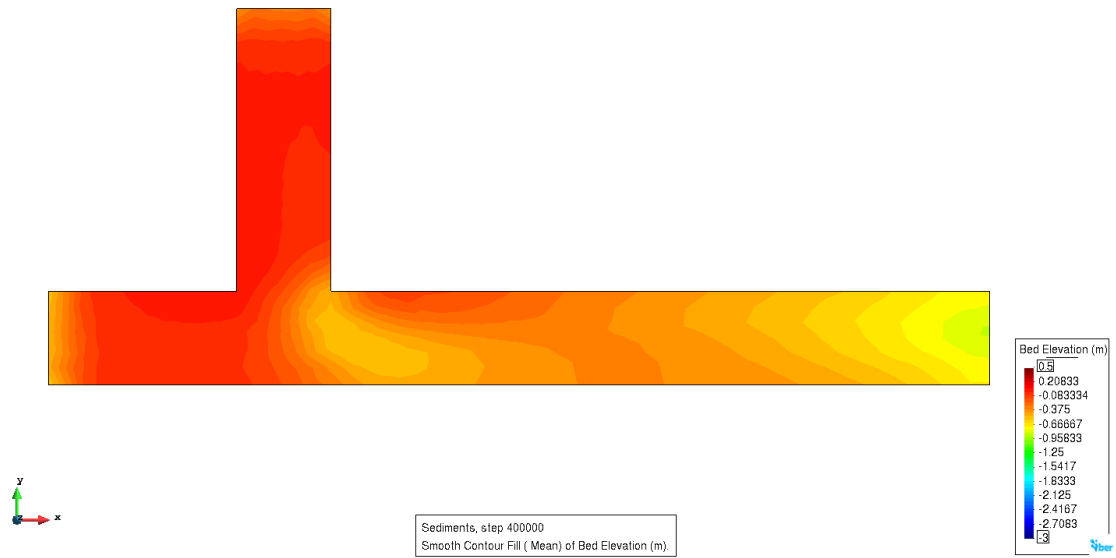


Figura 3.16. Cas 1 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 4,6 dies. Font: pròpia.

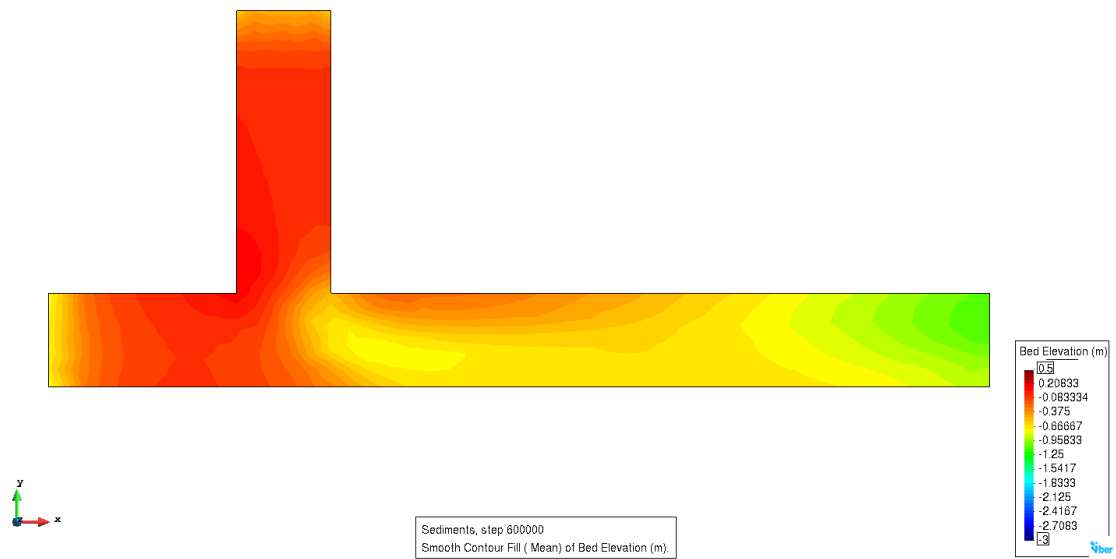


Figura 3.17. Cas 1 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 6,9 dies. Font: pròpia.

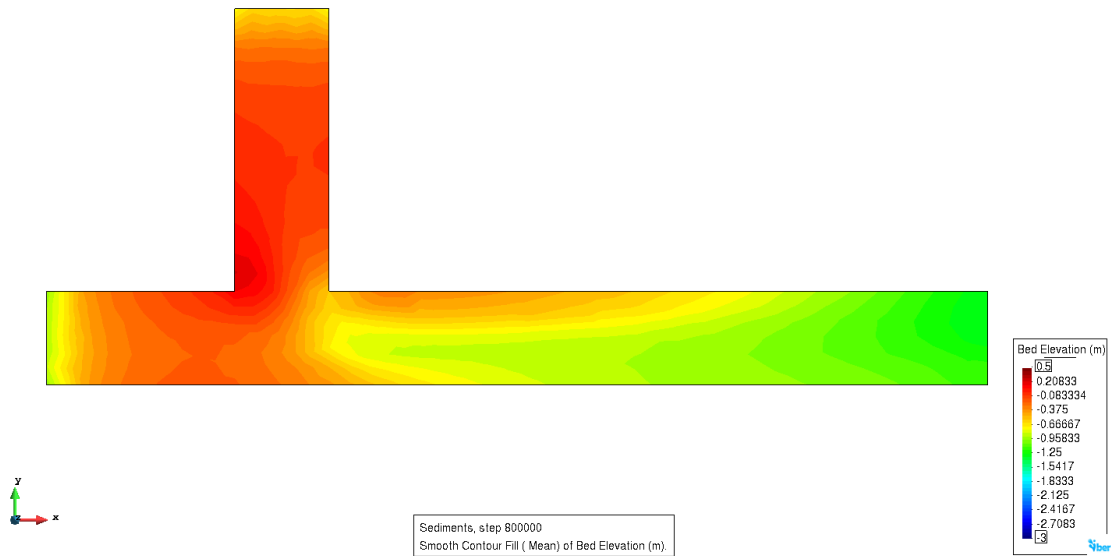


Figura 3.18. Cas 1 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 9,3 dies. Font: pròpia.

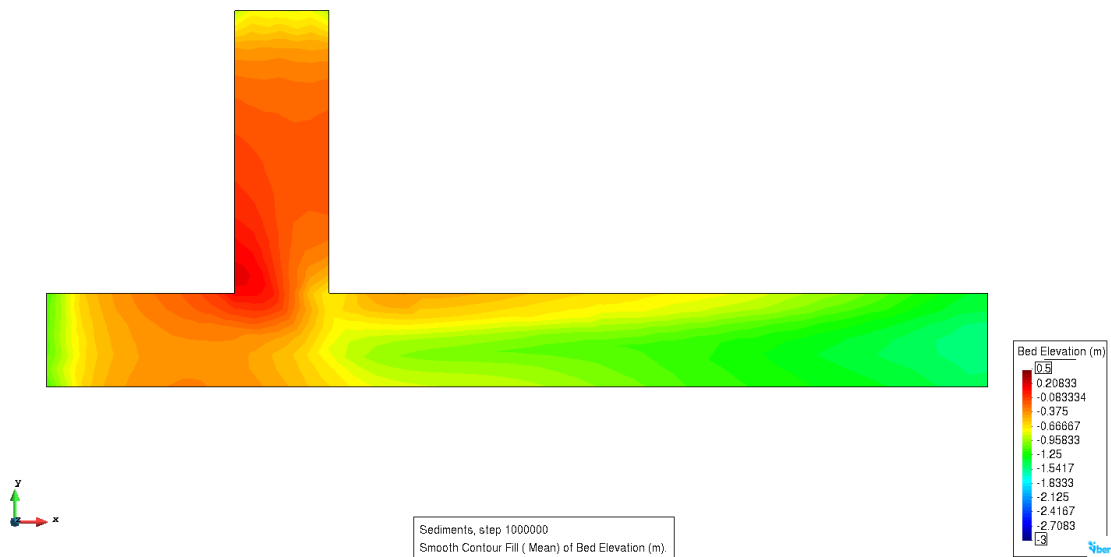


Figura 3.19. Cas 1 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 11,6 dies. Font: pròpia.

En la simulació del primer cas amb llims, observem que els resultats són similars als resultats de les graves i les sorres en la localització de les zones d'erosió i les zones d'elevació de la cota del fons del riu, però no en magnitud. A més, a diferència de els resultats extrets de la simulació amb sorres i graves, s'observa als voltants de les entrades d'aigua una elevada erosió, com la que podem veure a la desembocadura dels rius.

3.1.4. Conclusions i observacions

A fi de comparar els resultats entre els tres tipus de sediments, s'han fet dos gràfics referents a la cota del fons del riu. El primer dels gràfics (figura 3.21) ensenya els resultats de la secció transversal comprèn els punts del pla (250,50) i (250,0) (color verd), mentre que el segon dels gràfics (figura 3.22) ensenya els resultats a la secció transversal de la confluència dels dos rius, és a dir, la secció compresa entre els punts del pla (100,50) i (150,50) (color vermell). A la figura 3.20 es poden veure les dues seccions transversals escollides per fer els gràfics comparatius de cota del fons de riu.

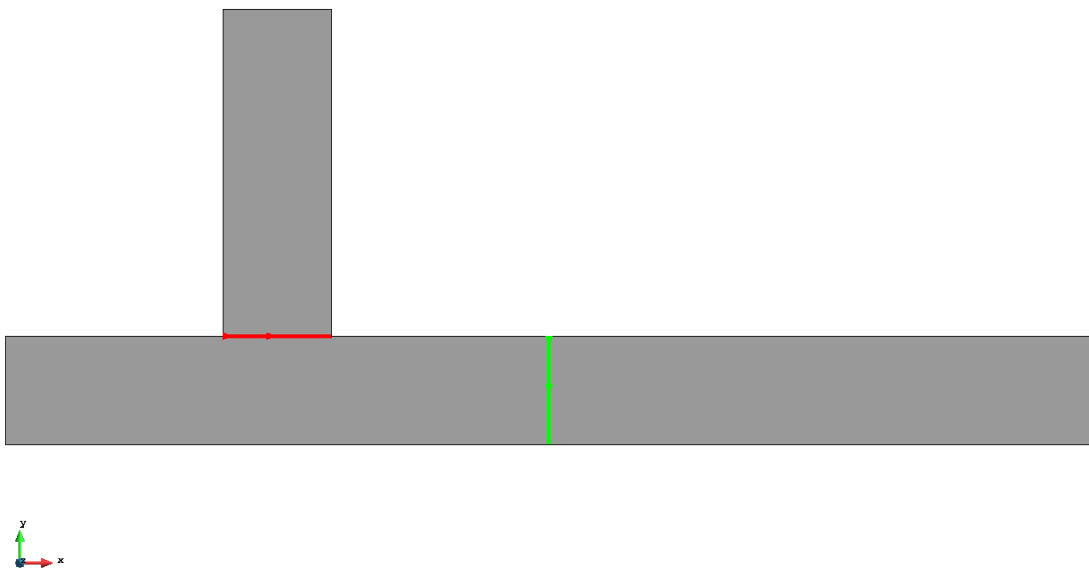


Figura 3.20. Seccions transversals escollides per comparar la cota del fons del riu per cada tipus de sediment analitzat en l'últim instant de temps. Font: pròpia.

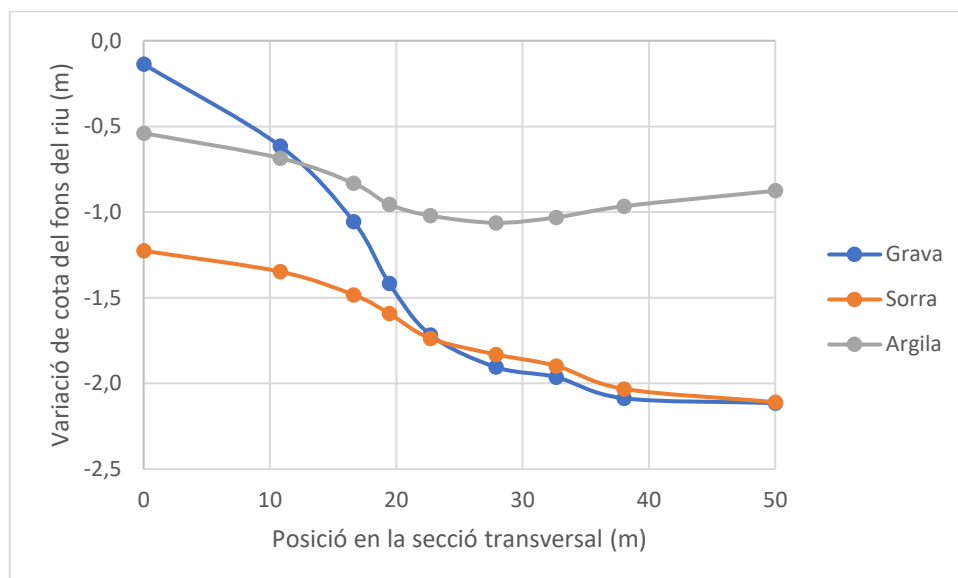


Figura 3.21. Gràfica comparativa d'elevació de la cota de fons del riu a la secció transversal entre els punts (250,50) i (250,0) a l'últim instant de temps simulat. Font: pròpia.

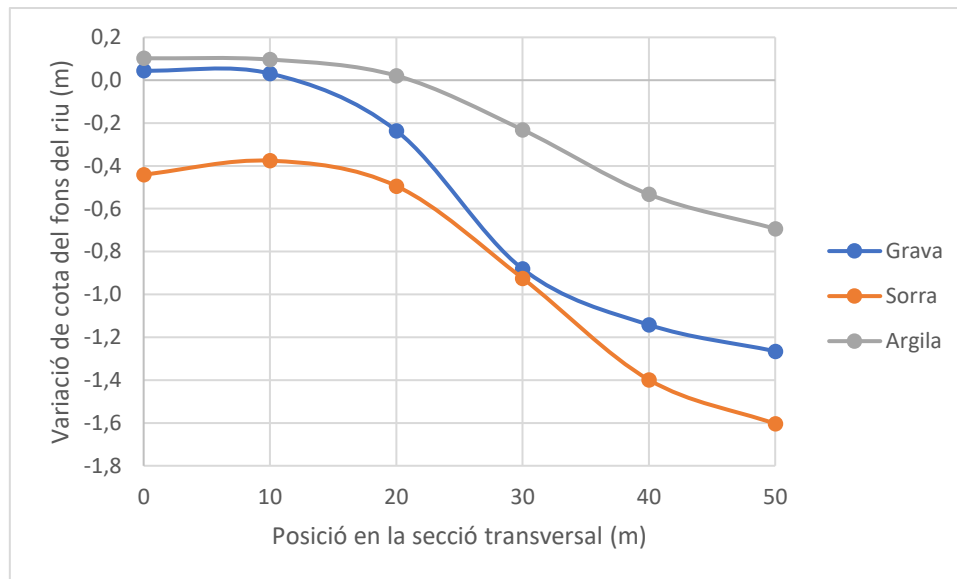


Figura 3.22. Gràfica comparativa d'elevació de la cota de fons del riu a la secció transversal entre els punts (100,50) i (150,50) a l'últim instant de temps simulat pel cas 1. Font: pròpia.

A la taula 3.2 es pot observar una comparativa entre l'erosió màxima, l'elevació de la cota de fons dels riu màxima i el màxim transport de sediments que es dona en el últim instant de temps per cada tipus de sediment analitzat.

Tipus de sediment	Màxima elevació de la cota de fons (m)	Màxima erosió (m)	Màxim transport de fons (m ² /h)
Grava	0,160	2,502	2,661
Sorra	0,026	2,991	4,378
Llims	0,252	1,560	1,053

Taula 3.2. Taula comparativa entre els diferents tipus de sediments analitzats pel cas 1 a l'últim instant de temps simulat.

Ens fixem primer en la figura 3.21, que és la comparació entre les elevacions de la cota de fons del riu per cada tipus de sediment aigües avall de la intersecció. El més significant que trobem és que quan es tracta de llims, l'erosió és la més petita de totes. Aquest fet és lògic ja que la força que generen les partícules de llims que estan sent transportades pel fons que exerceixen sobre les partícules en repòs és petita degut a la baixa massa d'aquestes. En canvi, tant la grava com la sorra generen més erosió al fons del riu.

A la figura 3.22 podem observar una cosa similar: els llims són el tipus de sediment que menys erosió exerceix sobre el fons del riu. També veiem que l'únic tipus de sediment que no augmenta la cota del fons per la sedimentació de partícules és la sorra.

En general, amb aquests gràfics comparatius i amb la taula, podem concloure que la sorra sembla ser el tipus de sediment que més erosió genera sobre el fons del riu, ja que la erosió màxima generada i el transport de fons màxim és el més gran comparat amb els altres tipus de sediments.

3.2. Cas 2: moviment de sediments en un coll d'ampolla en un canal

El segon dels casos simulats és el cas d'un coll d'ampolla en un canal artificial. A la figura 3.23 es pot veure la planta del problema en qüestió.

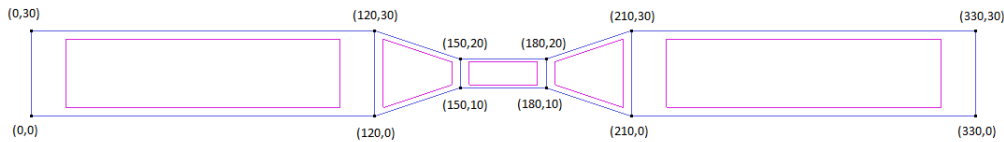



Figura 3.23. Vista en planta del cas 2. Font: pròpia.

L'aigua al canal "viatja" de esquerra a dreta, de forma que a la el límit vertical de la esquerra s'ha assignat una entrada d'aigua de 15 m³/s de cabal, i al límit vertical dret s'ha assignat una sortida d'aigua.

Ja que a l'esquerra hi ha assignada l'entrada d'aigua al domini del problema, també s'hi ha assignat una entrada de sediments. En les condicions inicials, dins el propi canal no hi ha presència de sediments, sinó que aquests són introduïts a l'entrada de l'aigua. Per tal d'introduir els sediments una vegada hi ha unes condicions hidràuliques estables, aquests són introduïts al canal al cap de 16,7 minuts (1.000 segons) de l'inici de la simulació.

Se simula el problema un total de 2,3 dies, extraient resultats cada 16,7 minuts (1.000 segons).

Suposarem que el canal és de formigó i, per tant, adoptarem el coeficient de rugositat del formigó que és 0,010.

En el primer cas bàsic hem utilitzat la fórmula de Meyer-Peter i Müller. Per aquest segon cas, en canvi, utilitzarem la fórmula de Van Rijn.

La malla generada per aquest cas és una malla no estructurada d'elements triangulars de mida 5 metres. La malla en qüestió compta amb 441 nodes i 736 elements.

De la mateixa forma que en el cas 1, aquest problema serà simulat amb les mateixes condicions en els tres diferents tipus de sediments considerats, les característiques dels

quals es poden veure a la taula 3.1. A fi de poder comparar correctament la magnitud dels resultats obtinguts per cada tipus de sediment, s'han establert els mateixos límits a la llegenda de colors.

3.2.1. Cas 2 simulat amb graves

Des de la figura 3.24 fins la 3.27, podem veure els resultats de la cota del llit del riu en diferents intervals de temps de la simulació.

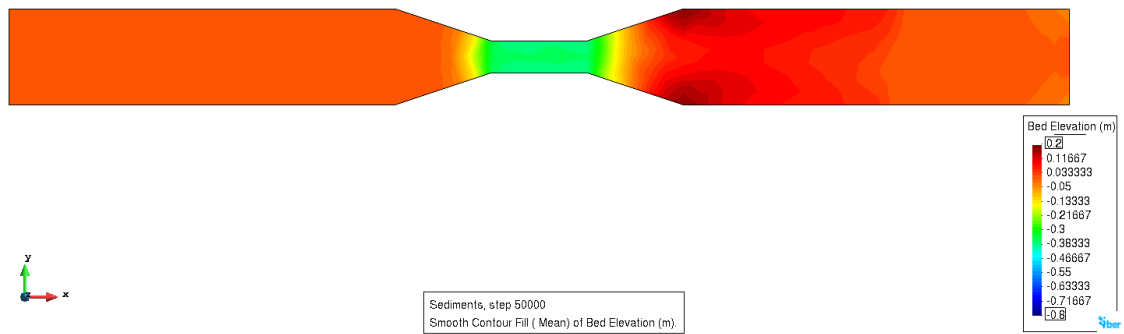


Figura 3.24. Cas 2 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 0,6 dies. Font: pròpia.

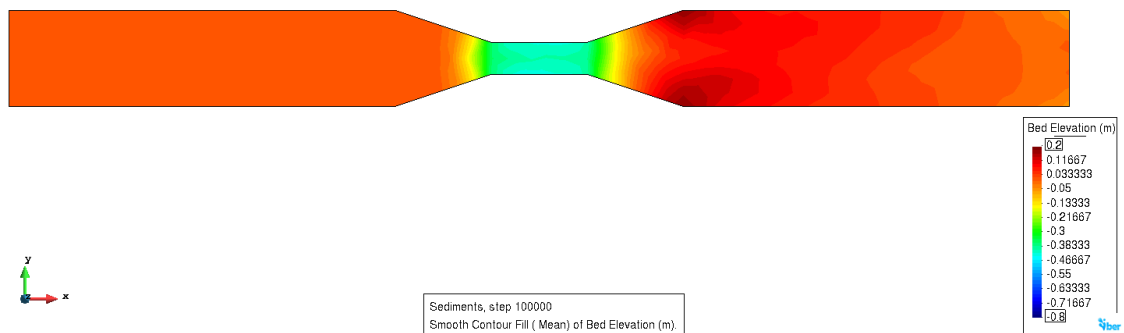


Figura 3.25. Cas 2 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 1,2 dies. Font: pròpia.

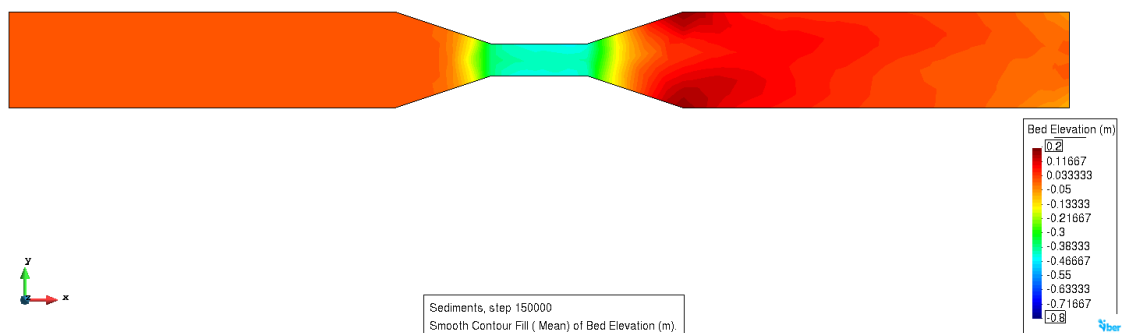


Figura 3.26. Cas 2 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 1,7 dies. Font: pròpia.

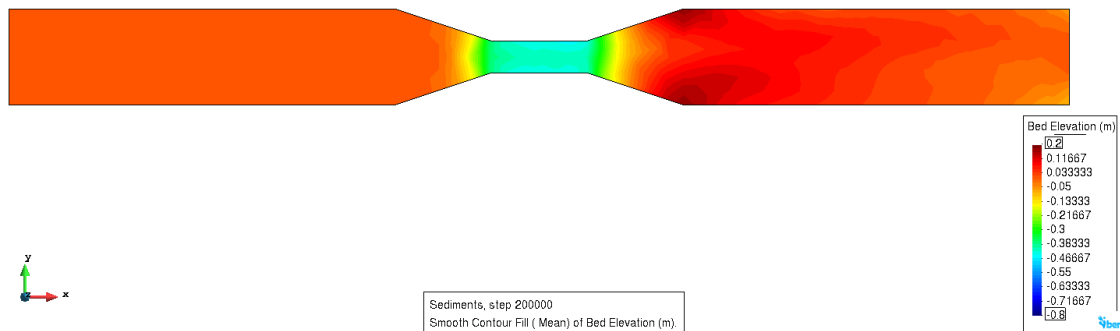


Figura 3.27. Cas 2 simulat amb graves: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia.

El que primer podem veure dels resultats, és que aquests no semblen variar massa amb el pas del temps, al contrari del que passava en el primer problema. Podem veure clarament com al coll d'ampolla hi ha major erosió degut a l'augment de la força que exerceix l'aigua contra el fons del riu. Com que al coll d'ampolla hi ha de passar el mateix cabal d'aigua que en les altres seccions més amples, aquesta tindrà més força. En definitiva, pel coll d'ampolla hi ha de passar els 15 metres cúbics per segon que hem assignat d'entrada.

El que també podem observar és que el màxim augment de la cota del fons del riu és just aigües avall del coll d'ampolla, quan aquest acaba. Aquests resultats són lògics ja que tots els sediments erosionats al coll d'ampolla s'acaben dipositant quan aquest acaba.

La màxima erosió es dona al coll d'ampolla i la màxima elevació de la cota del fons del riu es dona just al acabament del coll d'ampolla, com bé es pot veure a les figures anteriors.

3.2.2. Cas 2 simulat amb sorres

Des de la figura 3.28 fins la 3.31, podem veure els resultats de la cota del llit del riu en diferents intervals de temps de la simulació.

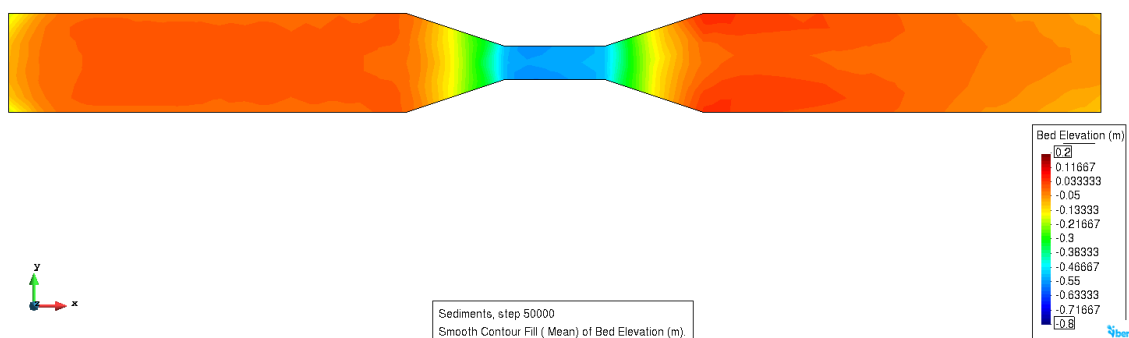


Figura 3.28. Cas 2 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 0,6 dies. Font: pròpia.

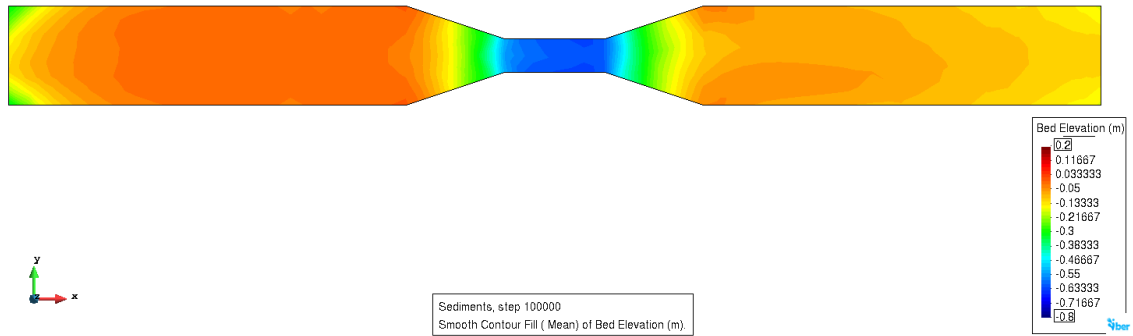


Figura 3.29. Cas 2 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 1,2 dies. Font: pròpia.

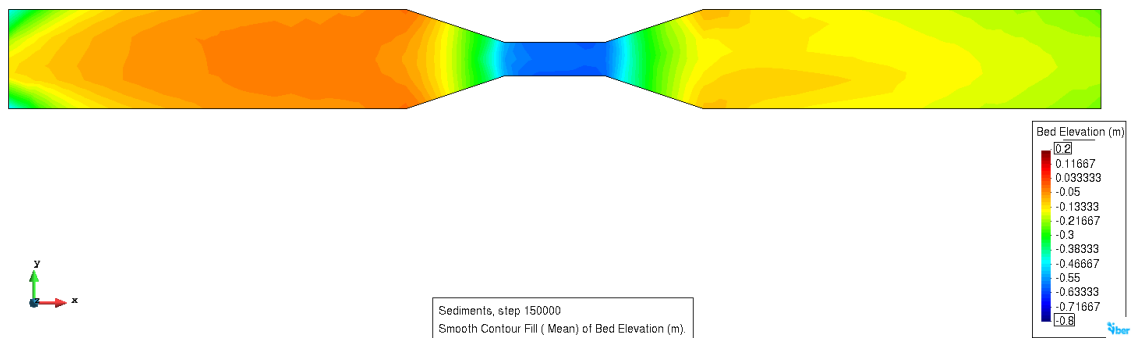


Figura 3.30. Cas 2 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 1,7 dies. Font: pròpia.

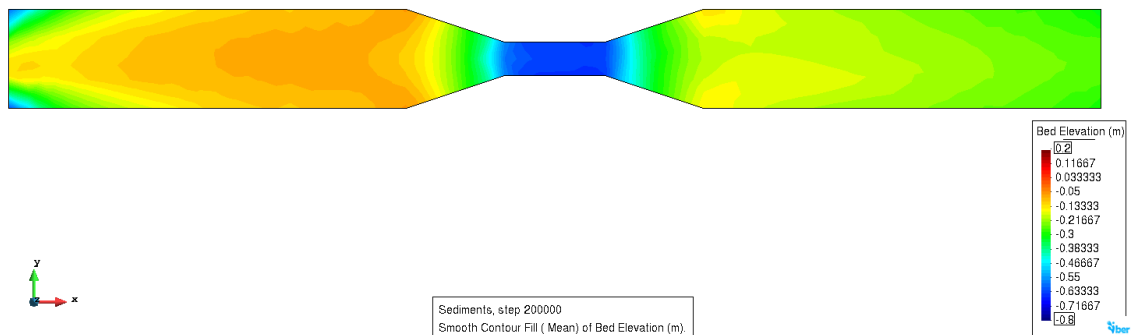


Figura 3.31. Cas 2 simulat amb sorres: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia.

Pel cas de les sorres, podem observar que l'erosió provocada al coll d'ampolla és superior que en el cas de les graves. A més, en cap punt del domini hi ha una sedimentació en termes d'augment de la cota del fons del riu. Es tracten d'uns resultats semblants en localització de les erosions i sedimentacions però no en magnitud.

3.2.3. Cas 2 simulat amb llims

Des de la figura 3.32 fins la 3.35, podem veure els resultats de la cota del llit del riu en diferents intervals de temps de la simulació.

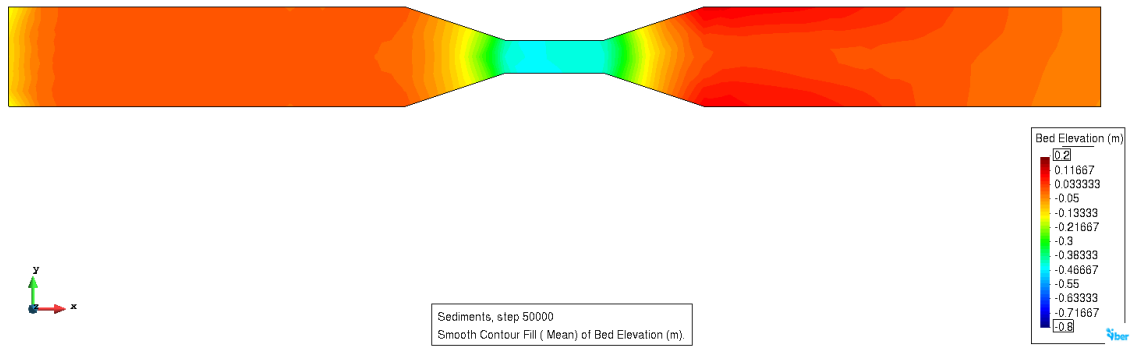


Figura 3.32. Cas 2 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 0,6 dies. Font: pròpia.

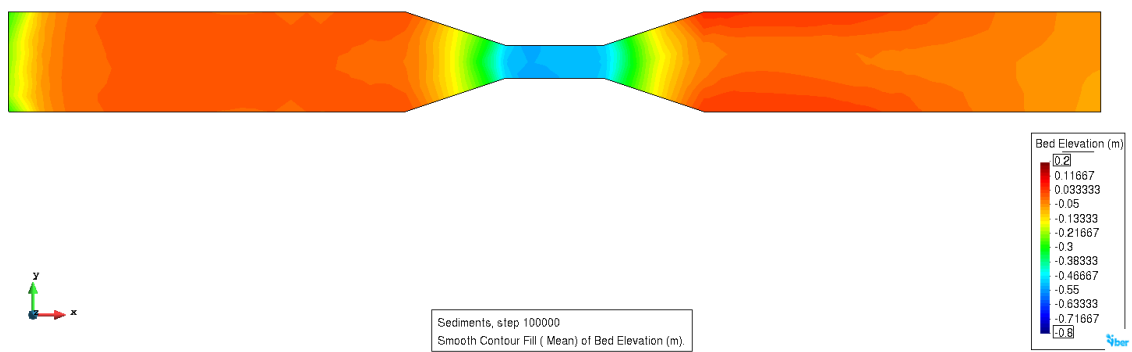


Figura 3.33. Cas 2 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 1,2 dies. Font: pròpia.

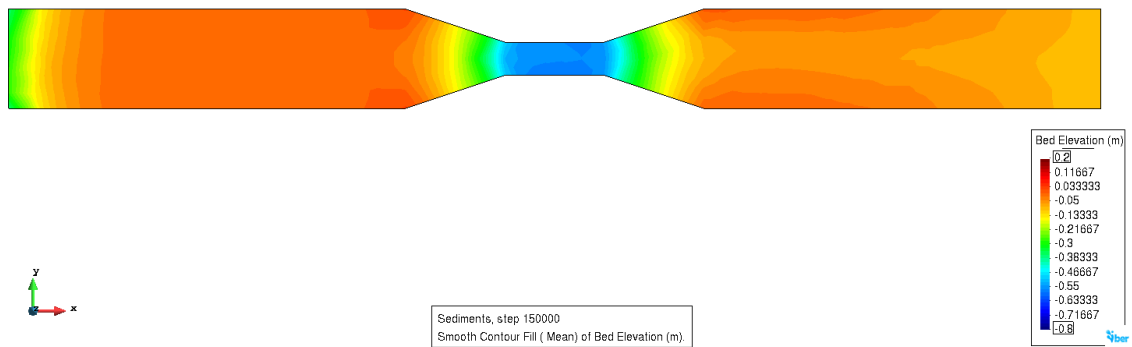


Figura 3.34. Cas 2 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 1,7 dies. Font: pròpia.

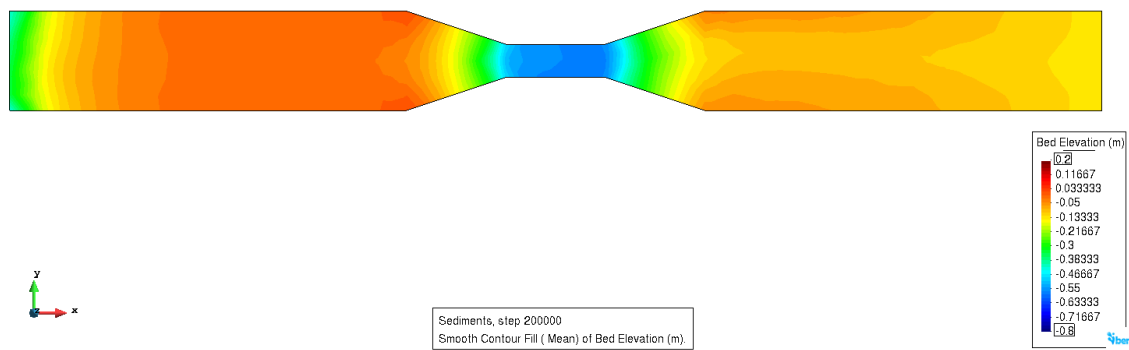


Figura 3.35. Cas 2 simulat amb llims: cota del llit del riu al cap de 2,3 dies. Font: pròpia.

Al cas dels llims, el que més sorprèn és el fet de que es vegi una gran erosió just a l'entrada d'aigua. Sorprèn perquè ni al cas de les sorres ni al cas de les graves s'ha pogut observar aquest fet en els resultats.

En qualsevol cas, també podem observar una major erosió al coll d'ampolla i una sedimentació just al final d'aquest coll d'ampolla.

3.2.4. Conclusions i observacions

Per tal de comparar els resultats obtinguts en les tres simulacions, s'han dibuixat els resultats de l'elevació del fons del riu de la secció de la figura 3.36. El gràfic comparatiu en qüestió es pot veure a la figura 3.37. A més, a la taula 3.3 hi podem veure una comparativa entre la màxima erosió, transport de fons i elevació del fons del riu per cadascun dels problemes simulats.

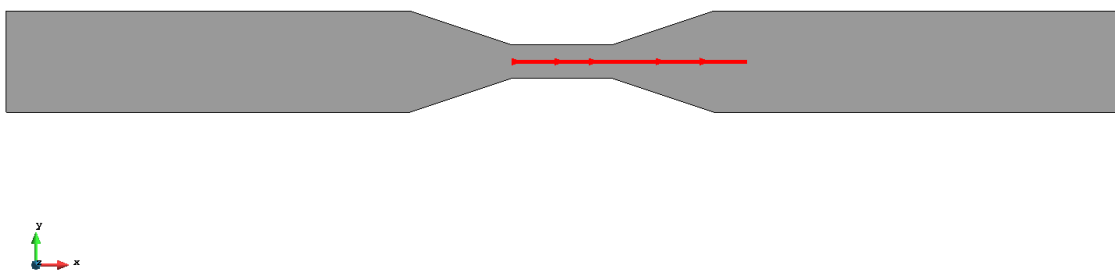


Figura 3.36. Secció escollida per dibuixar el gràfic comparatiu del cas 2. Font: pròpia.

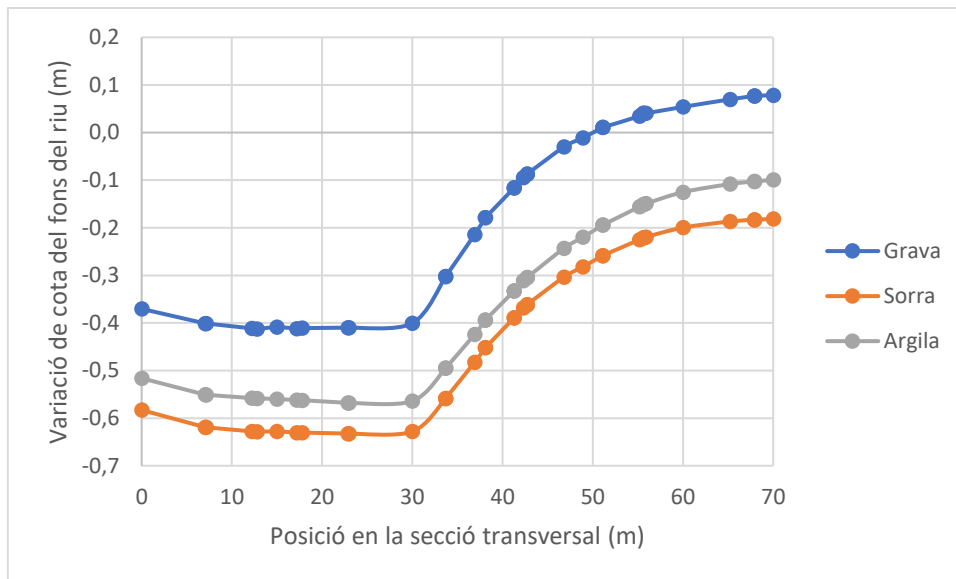


Figura 3.37. Gràfica comparativa d'elevació de la cota de fons del riu a la secció transversal entre els punts (120,15) i (220,15) a l'últim instant de temps simulat pel cas 2. Font: pròpia.

Tipus de sediment	Màxima elevació de la cota de fons (m)	Màxima erosió (m)	Màxim transport de fons (m ² /dia)
Grava	0,186	0,496	0,806
Sorra	0,000	0,671	27,195
Llims	0,021	0,583	8,097

Taula 3.3. Taula comparativa entre els diferents tipus de sediments analitzats pel cas 2 a l'últim instant de temps simulat

Al gràfic comparatiu de la figura 3.37 podem observar com els tres tipus de sediments tenen una gran erosió al coll d'ampolla, i a mesura que es va sortint d'aquest, l'erosió disminueix. En definitiva, tots els sediments segueixen el mateix patró d'erosió del fons del canal.

En aquest gràfic comparatiu podem veure com la grava és el sediment que menys erosió provoca sobre el fons del canal, mentre que tant la sorra com els llims provoquen una erosió més alta. Això ens denota que l'aigua té menys força per desplaçar les graves i que aquestes erosionin el fons del canal. En canvi, per les partícules menys pesades com les sorres i els llims la força de l'aigua del canal és suficient per desplaçar-les i que aquestes erosionin el fons del canal.

4. Presentació estudi real

El corrent de La Combe-de-Lancey és un corrent de pendent elevada que drena una conca de 18 quilòmetres quadrats a la serralada de Belledonne, als Alps francesos. La confluència de la Riera amb el riu Isèra es troba a la localitat de Villard-Bonnot, on s'hi troba el con de dejecció² de la Riera. El con de dejecció de la Riera està actualment ocupat per una fàbrica abandonada, el centre de la vil·la, una carretera regional i una línia de ferrocarril. A la figura 4.1 podem observar un perfil longitudinal i una vista en planta del corrent de La Combe-de-Lancey. Al perfil longitudinal d'aquesta figura podem observar que el torrent es pot diferenciar el 4 trams:

- (i) Capçalera del torrent.
- (ii) Tram mig de pendent del 12%.
- (iii) Petit tram de pendent del 28%.
- (iv) Con de dejecció del torrent.

Cadascun d'aquests trams del torrent tenen unes característiques similars que fan que els trams es puguin considerar de característiques físiques homogènies.

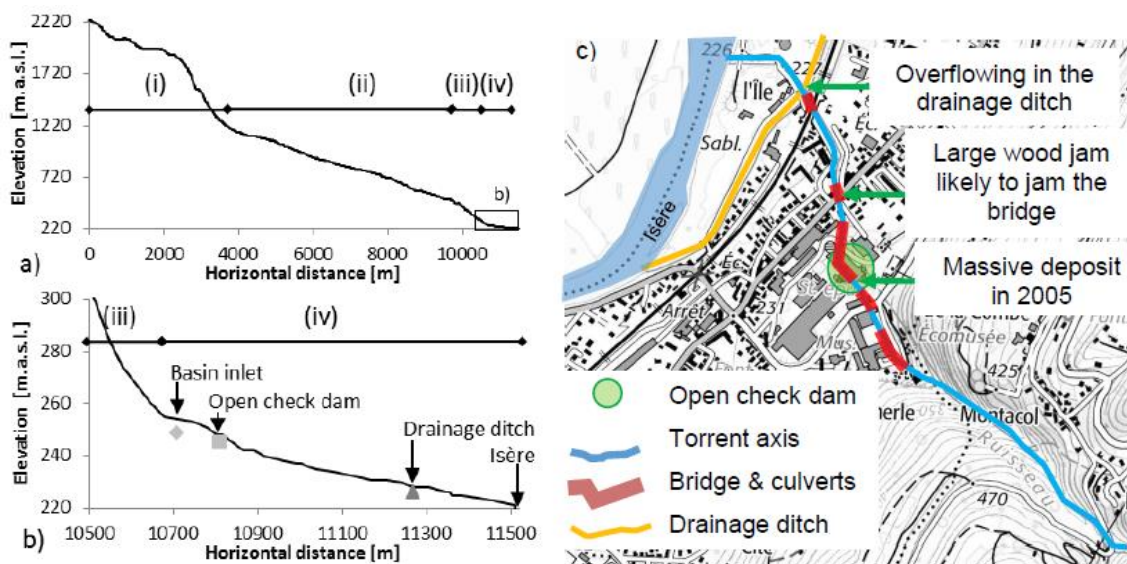


Figura 4.1. (a) Perfil longitudinal complet del torrent de La Combe-de-Lancey. (b) Detall del con de dejecció del torrent. (c) Vista en planta del con de dejecció del torrent. Font: Piton, G. et al. (2019).

El model experimental que intentarem simular al programa Iber per tal de verificar-ne els resultats és el dut a terme per Moldenhauer-Roth, A. et al. (2021). Aquests autors van desenvolupar un model reduït de la conca de retenció de sediments real situada al curs del torrent de La Combe-de-Lancey. Aquesta conca de retenció va ser dissenyada arran del l'episodi de pluja intensa que es va donar a la zona els dies 21 i 22 d'agost de l'any 2005 (IRMA (2006)). Aquest episodi de pluges molt intenses va donar a lloc a un

² El con de dejecció (també conegut com a ventall al·luvial) és una acumulació natural de sediments portats pel curs dels rius o torrents secundaris que són arrossegats per aquests. Aquesta forma fluvial es genera a la confluència entre rius o torrents secundaris amb el curs principal.

moviment molt gran de sediments a les rieres de la zona, provocant grans desastres als nuclis urbans propers (veure figures 4.2 i 4.3). Aquest gran episodi de pluges torrencials va provocar que es dipositessin fins a 20.000 metres cúbics de sediments portats pel torrent a la població de Villard-Bonnot, situada al con de dejecció del torrent. El període de retorn de l'episodi de pluja s'estima que va ser de 100 anys, essent el cabal punta de 22 metres cúbics per segon. La durada de l'episodi de pluja va ser de 30 hores (Piton, G. et al. (2019)).



Figura 4.2. Desbordament del torrent Vorz el 23 d'agost del 2005. Font: IRMA (2006).



Figura 4.3. Desbordament del torrent de Gleysin a la localitat de Pinsot. Font: IRMA (2006).

La conca de retenció de sediments es construeix per tal de desenvolupar la principal funció de retenir partícules sòlides que porta el riu que podrien agreujar inundacions aigües avall, tot deixant circular el cabal d'aigua que porta el torrent. Una conca de retenció de sediments consisteix en una trampa de sediments en la qual els sediments no poden seguir al curs del torrent, mentre que l'aigua sí. En la part de la conca el llit del riu s'eixampla i la pendent disminueix, provocant així un règim lent de l'aigua al seu pas per la conca. El règim lent de l'aigua del torrent facilita la sedimentació dels sediments

transportats per l'aigua, fent que aquests es dipositin a la conca i l'aigua pugui seguir el seu camí.

La construcció de la conca de retenció de sediments és especialment important al torrent de La Combe-de-Lancey ja que aquesta té unes pendents molt elevades abans d'arribar a la desembocadura al riu Isèra (veure perfil longitudinal de la figura 4.1). Aquestes elevades pendents fan que la velocitat de l'aigua sigui molt elevada i, per tant, hi hagi una elevada erosió al llarg del transcurs de la Riera, provocant que una elevada quantitat de sediments sigui transportada pel fons del riu. Aquest problema s'agreuja sobretot en períodes de pluges de gran intensitat, que es converteix en un elevat cabal que transporta el riu i, per tant, hi ha més erosió i més transport de fons de sediments. Els sediments que són retinguts per la conca són de mida gran, per tant, la conca de retenció de sediments deixa passar tant l'aigua com les partícules més fines de sediments que són transportades en suspensió, a més de les partícules de mida més petita que es transporten pel fons.

El model reduït ha estat construït per tal de observar i estudiar experimentalment com funciona el procés de retenció dels sediments que són transportats pel torrent en pluges de gran períodes de retorn.

4.1. Geometria del model reduït

El model reduït s'ha construït amb una escala geomètrica de 1:40. Aquesta escala ha estat definida per tal de respectar els valors reals de nombre de Froude i criteri de Shields. La conca de retenció de sediments té una forma de diamant (veure figura 4.4). La pendent de la conca és del 1,5% i disposa d'un canal guia de 13 mil·límetres de fondària i 88 mil·límetres de llarg, que representa una capacitat de 0,7 litres per segon que té el torrent real al seu pas per la població de Villard-Bonnot.

A la sortida de la conca de retenció s'hi col·loca una barrera hídrica, que consisteix en una estructura que retén les partícules més grans dels sediments i deixa passar tant l'aigua com les partícules més fines de sediments (veure figura 4.5). Aquesta estructura és de 13 mil·límetres d'alçada i 100 mil·límetres de llarg.

La distància entre barres és de 5 mil·límetres, el qual correspon a una distància de $0,6-0,74 D_{95}$, on D_{95} és el diàmetre del sediment representatiu.

S'han utilitzat dos granulometries diferents en els assajos duts a terme: una granulometria mitjana i una granulometria grollera. Les granulometries de les dues mescles diferents de sediments es poden observar a la taula 4.1, i la freqüència acumulada de les dues mescles es pot observar a la figura 4.6.

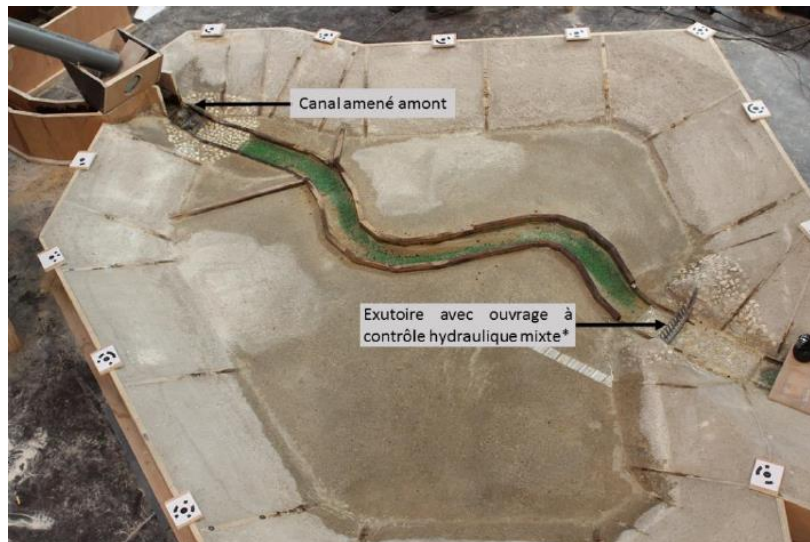


Figura 4.4. Imatge del model reduït de la conca de retenció de sediments del torrent de La Combe-de-Lancey. Font: Rozani, F. (2020).



Figura 4.5. Detall de la barrera hídrica del model reduït. Font: Piton, G., Richard, D. (2018).

Granulometria	D ₁₆ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₈₄ (mm)	D ₉₀ (mm)	D _{màx} (mm)
Mitjana	20	30	47	111	183	1000
Grollera	22	31	54	188	289	1000

Taula 4.1. Granulometries de les mesclures de sediments mitjana i grollera. Font: Piton, G., Richard, D. (2018).

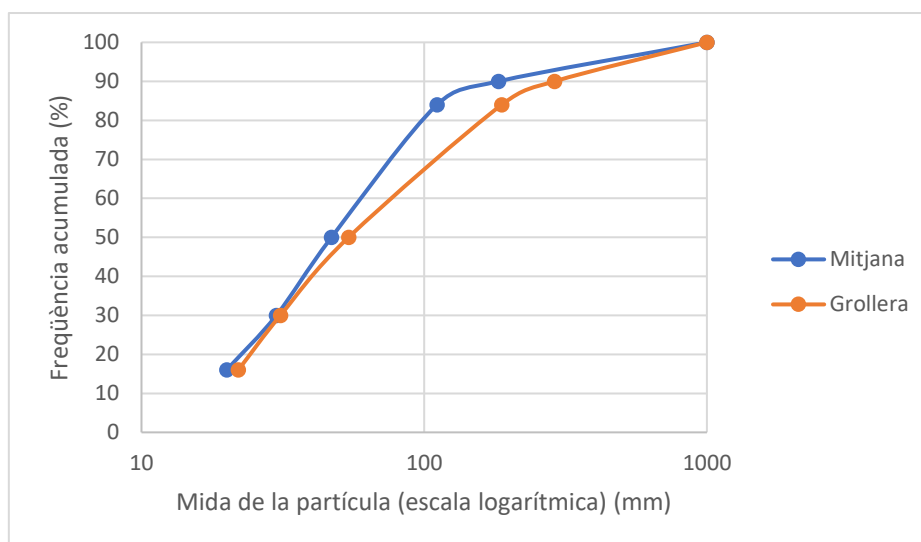


Figura 4.6. Freqüència acumulada de cada mescla de sediments utilitzada als assajos en el model reduït. Font: pròpia.

4.2. Resultats del model reduït

Es realitzen un total de 6 assajos, els paràmetres dels quals els podem veure resumits a la taula 4.2. Els assajos 1, 2 i 3 es realitzen per tal d'optimitzar l'obertura de la sortida de la conca de retenció, mentre que els assajos 4, 5 i 6 es realitzen per tal de verificar el funcionament de la conca de retenció de sediments.

Assaig	Granulometria	Cabal punta (m ³ /s)	Període de retorn (anys)	Durada de la riuada (h)	Volum total de sediments (m ³)	Cabal punta de sòlid (m ³ /s)
1	Mitjana	22	30	10	20.000	2,4
2	Mitjana	22	30	24	20.000	0,8
3	Mitjana	35	100	11	20.000	1,5
4	Mitjana	35	100	11	20.000	1,5
5	Mitjana	35	100	30	40.000	1,5
6	Grollera	35	100	11	20.000	1,5

Taula 4.2. Paràmetres dels assajos realitzats en el model reduït. Font: Piton, G., Richard, D. (2018).

Ens centrarem només en els assajos 4 i 6, ja que en aquests hi ha aplicat el mateix cabal punta d'aigua i de sòlid i la durada de l'episodi és el mateix. L'únic que canvia és la granulometria de la mescla de sediments. Aquests dos assajos són els que simularem al punt 5 del treball amb el programa Iber.

A la figura 4.7 podem observar els cabals de sòlid i aigua aplicats als assajos 4 i 6. Podem observar que el cabal punta tant de sòlid com d'aigua es donen aproximadament a les 1800 segons després de l'inici de l'episodi.

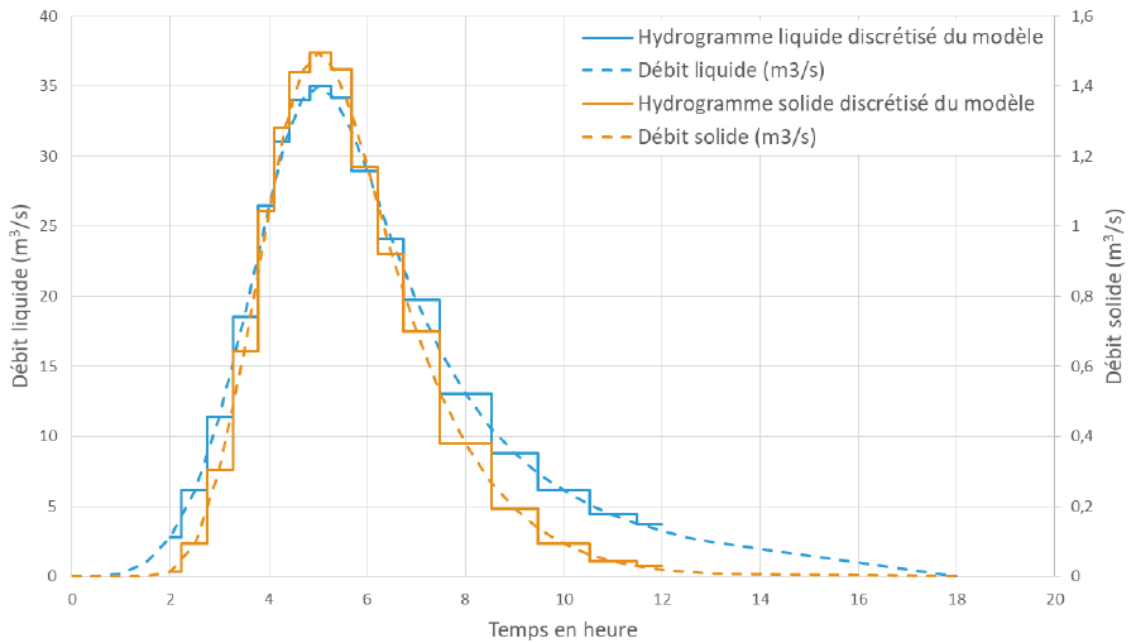


Figura 4.7. Gràfic de cabal de sòlid i cabal d'aigua al llarg del transcurs dels assajos. Font: Piton, G., Richard, D. (2018).

Els resultats amb els quals ens centrarem per comparar els resultats del model reduït amb els resultats trets amb Iber són les pendents i les cotes dels sediments un cop passat l'episodi. S'han facilitat els models digitals d'elevacions (MDE) dels assajos 4 i 6 després de l'episodi de pluja. També s'han definit 5 línies per les quals es calcula la pendent i es pot dibuixar el perfil longitudinal del terreny final. Per tal de dibuixar els perfils longitudinals de cada línia, s'ha hagut de recórrer al programa QGis, que ens permet transformar un MDE en unes línies de contorn amb cotes. Un cop s'han generat les línies de contorn, al mateix programa s'ha buscat la intersecció de les línies a estudiar amb les línies de contorn, de forma que cada punt resultant correspon a una cota en concret. A mode d'exemple, a la figura 4.8 es pot veure les línies de contorn amb els punts d'intersecció amb les línies a estudiar per l'assaig 4. Una vegada tenim tots els punts d'intersecció, es pot dibuixar el perfil longitudinal final de cada assaig amb les coordenades de cada punt i l'elevació dels mateixos. A l'annex hi podem observar les taules utilitzades per dibuixar els perfils longitudinals de cada línia de cada assaig.

Les línies en qüestió es poden observar a la figura 4.9. Els perfils longitudinals de cada línia pels assajos 4 i 6 realitzats es poden veure a la figura 4.10 i 4.11 respectivament, i el resum de les pendents obtingudes en cada assaig es pot veure a la taula 4.3.

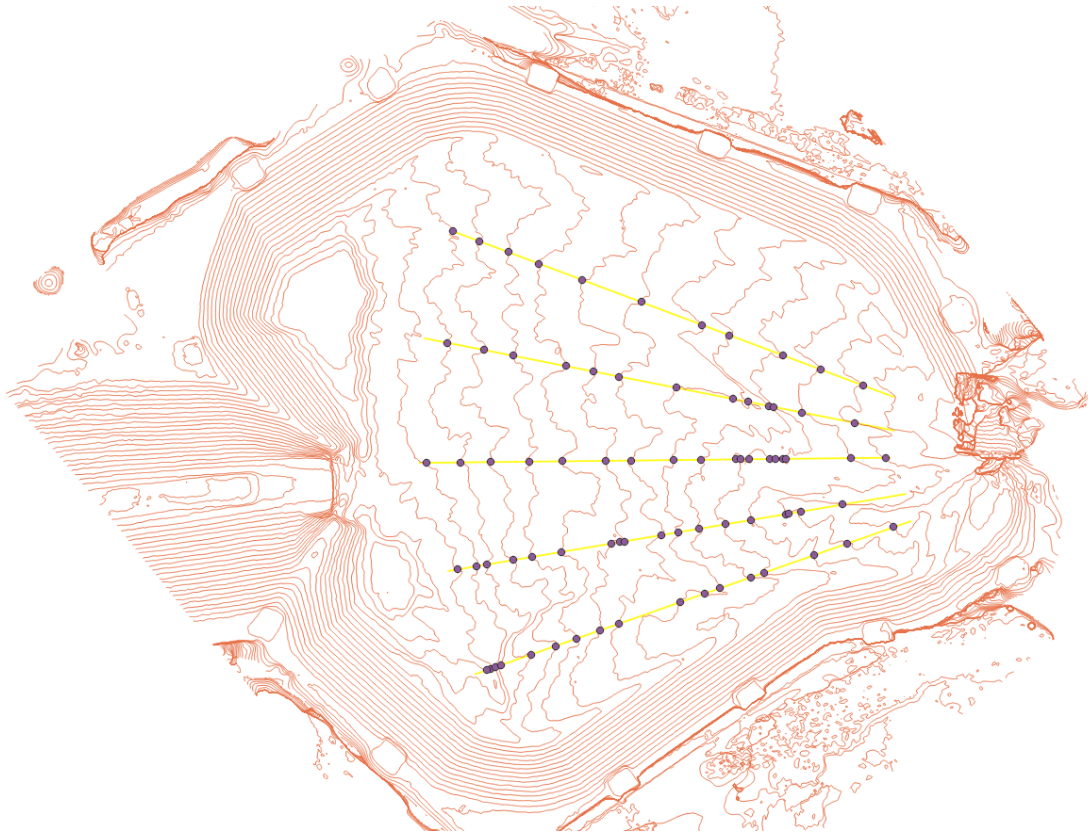


Figura 4.8. Intersecció entre les línies de contorn i les línies d'estudi, utilitzats per dibuixar el perfil longitudinal de les línies de l'assaig 4. Font: pròpia.

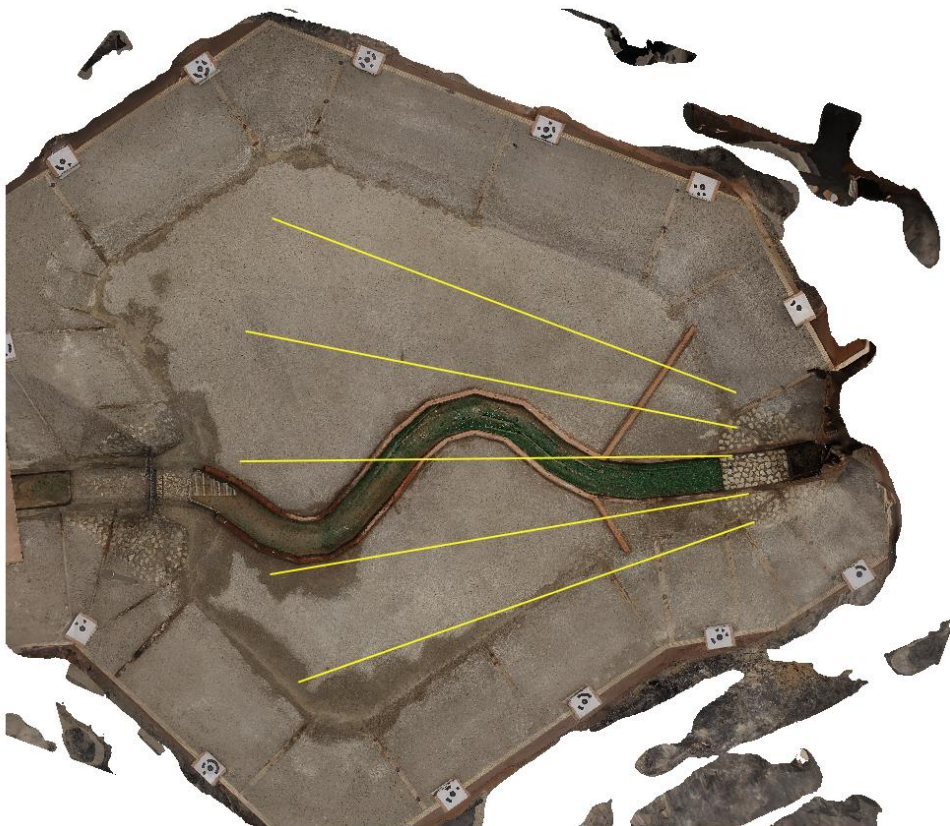


Figura 4.9. Línies d'estudi. En total n'hi ha 5, i estan numerades de forma que la línia superior és la número 1 i la inferior la número 5. Font: pròpia.

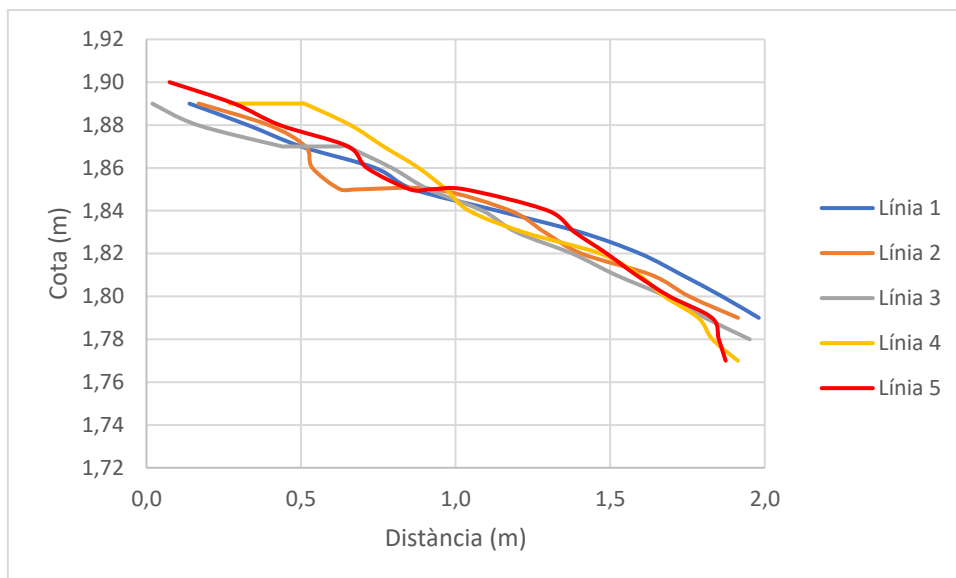


Figura 4.10. Perfil longitudinal de les línies d'estudi al final de l'episodi de l'assaig 4. Font: pròpia.

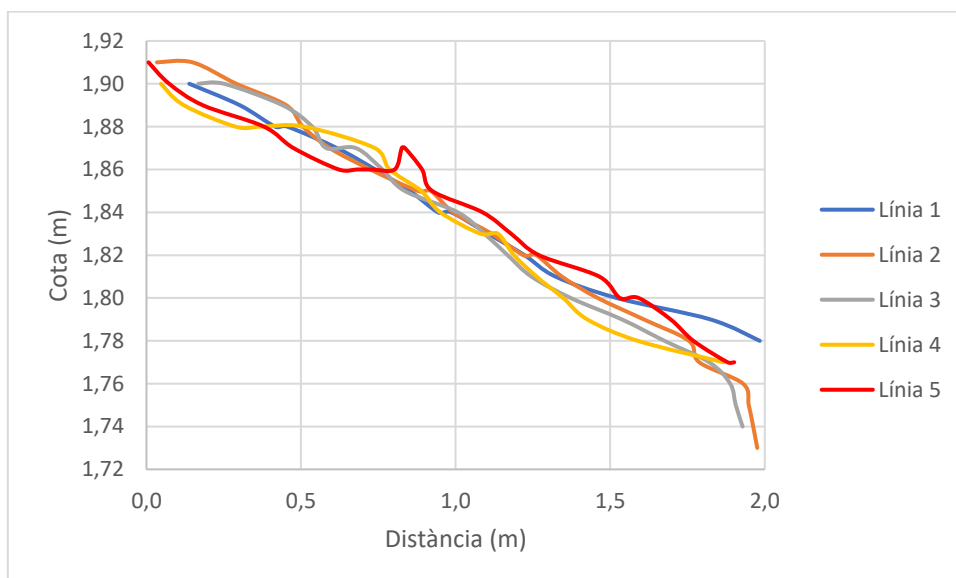


Figura 4.11. Perfil longitudinal de les línies d'estudi al final de l'episodi de l'assaig 6. Font: pròpia.

Assaig	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 4	Línia 5	Mitjana	Desviació típica
4	5,43%	5,73%	5,69%	7,30%	7,23%	6,28%	0,91%
6	6,50%	9,27%	9,09%	7,14%	7,39%	7,88%	1,23%

Taula 4.3. Resum de les pendents calculades dels sediments dipositats a la conca de retenció de sediments pels dos assajos realitzats. Font: pròpia.

El primer que podem observar dels resultats dels assajos 4 i 6 és que la pendent al final de l'episodi de pluja dels sediments dipositats és major en el cas de l'assaig 6 que a l'assaig 4. Cal recordar que l'única diferència entre els assajos és la granulometria dels sediments utilitzada; a l'assaig 4 s'ha utilitzat una granulometria mitjana mentre que a l'assaig 6 se n'ha utilitzat una grollera (veure taula 4.1). Això significa que el fet de que

Adrià Estany Roura

les partícules de sediments siguin més grans, es tradueix en una major pendent final dels sediments.

Al següent punt del treball es simularà aquest model reduït presentat per tal de veure la diferència, si és que n'hi ha, entre el model real reduït i el simulat.

5. Simulació estudi real al programa Iber

Un cop presentats els resultats i les característiques dels experiments, toca introduir les tant la geometria del problema com les dades d'aquest. Cal recordar que el model reduït ha estat construït simulant la conca de retenció de sediments real, per tal d'avaluar-ne el comportament en períodes de pluges d'alt període de retorn. Així doncs, també cal recordar que els valors de la granulometria de la mescla de sediments i l'hidrograma de líquid i sòlid presentats en el punt 4 són els valors adoptats reals, no els del model reduït i, per tant, els valors adoptats a la nostra simulació a l'Iber.

En aquest apartat veurem els resultats de dues simulacions diferents. Amb les mateixes condicions de contorn, simularem el mateix problema amb sediments amb granulometria uniforme i no uniforme per tal de comparar-ne els resultats, tot comparant els resultats de les simulacions amb els resultats de l'estudi real presentat a l'apartat 4.

Als següents apartats d'aquest punt anirem presentant el mètode i les dades a introduir al programa. Aquestes dades són la geometria del problema, les condicions de contorn, els hidrogrames d'entrada... i a continuació es presentaran els resultats de les simulacions.

5.1. Introducció de la geometria al programa

Per tal de que el problema sigui simulat amb la màxima precisió i semblança al model reduït, la geometria d'aquest s'ha d'introduir en tres dimensions. Així doncs, aprofitant que teníem una ortofoto del model reduït (veure figura 5.1), s'ha carregat al programa i s'han pogut anar dibuixant nodes sobre la ortofoto.

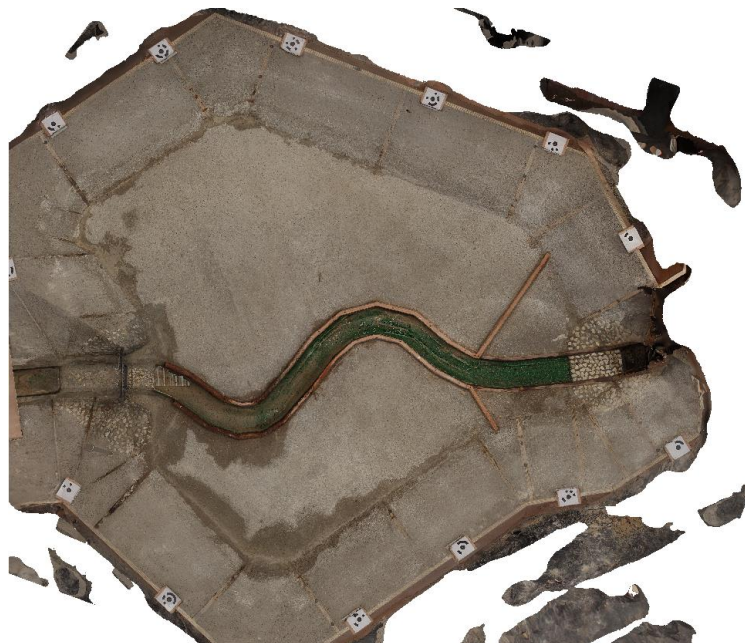


Figura 5.1. Ortofoto del model reduït utilitzada per crear la geometria del problema al programa Iber. Font: pròpia.

A la figura 5.2 hi podem observar el la geometria dibuixada a partir de l'ortofoto al programa.

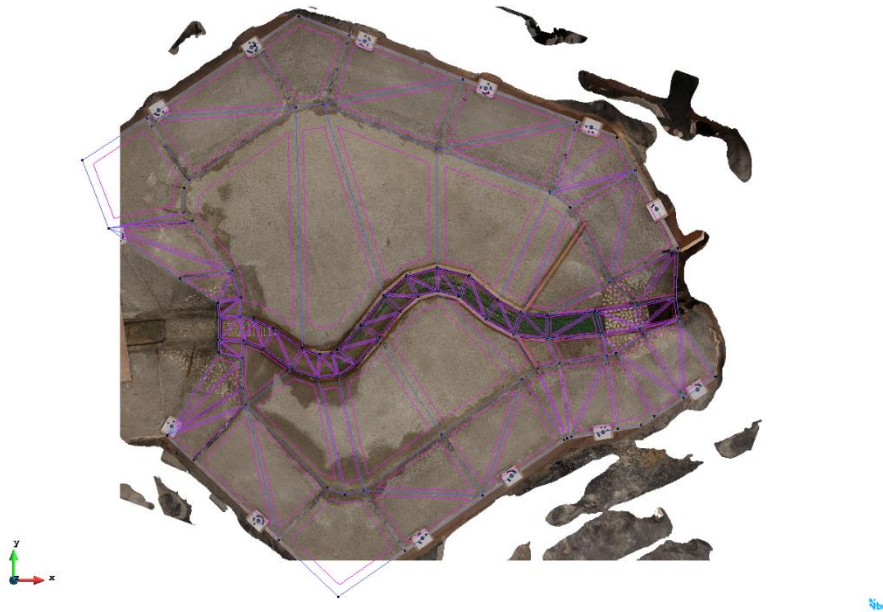


Figura 5.2. Conjunt de nodes, línies i superfícies creades a partir de l'ortofoto dins el programa Iber. Font: pròpia.

Un cop tenim la geometria bidimensional creada, hem d'assignar a cada node la seva component "z" per tal de plasmar el model reduït de la millor forma possible al programa. Per fer-ho, hem recorregut al model digital d'elevacions que ha estat facilitat i, amb l'ajuda de l'ortofoto i amb el programa QGis hem pogut anar assignant la cota de cada node al model generat amb l'Iber. El model tridimensional final és el que es pot observar a la figura 5.3.

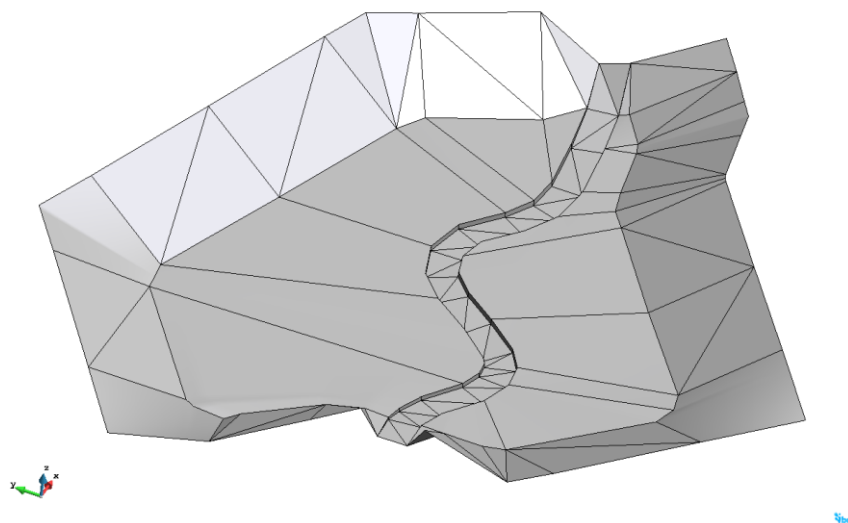


Figura 5.3. Model tridimensional creat per simular el model reduït al programa Iber. Font: pròpia.

5.2. Condicions de contorn

A continuació es presenten totes les condicions de contorn aplicades al problema. Aquestes engloben tant la granulometria de la mescla de sediments a utilitzar com l'hidrogràma d'entrada de l'aigua i la posició del mateix.

- *Sediments.*

Començarem per l'apartat dels sediments. Ja que l'abast d'aquest treball no contempla el transport de sediments en suspensió, només calcularem amb el programa el transport de fons que es dona al model. L'equació triada per modelitzar el transport de fons és l'equació de Meyer-Peter i Müller, i l'equació per calcular l'efecte de l'amagament de les partícules més petites dels sediments és l'equació d'Ashida i Michiue.

La porositat de la mescla de sediments és 0,245 i la densitat relativa és de 2,65. Per últim, l'angle de fricció de la mescla de sediments és de 30 graus (0,5236 radians) i es considera la partició d'Einstein. El temps d'inici dels sediments és al mateix moment que comença l'aigua a entrar al model.

La granulometria de la mescla de sediments no és la presentada al punt 4, ja que aquesta correspon a la granulometria real. La granulometria que utilitzarem per la nostra simulació, que coincideix amb la granulometria del model reduït, és la que es pot veure a la taula 5.1.

Classe	Diàmetre (mm)
D0	0,11
D10	0,17
D16	0,79
D25	0,92
D50	1,30
D75	2,15
D84	2,92
D90	4,91
D95	6,70
D100	14,00

Taula 5.1. Granulometria de la mescla de sediment introduïda al programa per la simulació del problema. Font: pròpia.

Finalment, l'entrada de sediments, que coincidirà amb l'entrada d'aigua al model, és la que es pot veure a la figura 5.4.

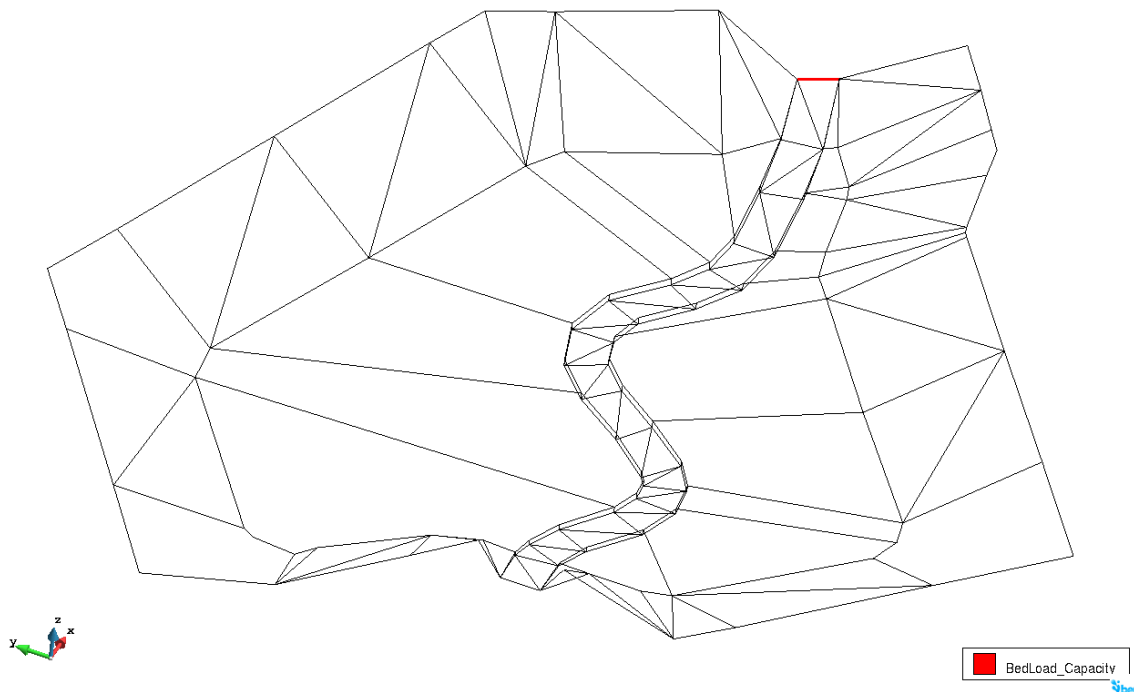


Figura 5.4. Entrada de sediments i aigua dins el model. Font: pròpia.

- *Aigua i altres condicions de contorn.*

A la figura 4.7 hi podem veure l'hidrograma d'entrada tant d'aigua com de sediments. Cal recordar que l'hidrograma no és l'utilitzat al model reduït, sinó que aquest hidrograma és el real. Observem que el cabal punta líquid és de 35 m³/s i el cabal punta de sediments és de 1,5 m³/s. A la taula 5.2 hi podem observar els valors de l'hidrograma introduït al model d'Iber i les que ha estat utilitzat al model reduït. A la figura 5.5 hi podem observar l'hidrograma en qüestió.

Temps (s)	Cabal d'aigua (l/s)	Cabal de sediments (cm ³ /s)
0,00	0,15	0,00
284,60	0,59	7,36
569,21	1,10	22,07
853,81	1,80	47,82
1138,42	2,40	73,57
1423,02	3,10	95,64
1707,63	3,40	105,20
1992,23	3,50	110,35
2276,84	3,50	110,35
2561,44	3,30	102,99
2846,05	2,85	89,75
3130,65	2,40	73,57
3415,26	1,92	55,18
3699,86	1,40	36,78
3984,47	0,90	22,07
4269,07	0,60	12,51

Temps (s)	Cabal d'aigua (l/s)	Cabal de sediments (cm ³ /s)
4553,68	0,45	8,09
4838,28	0,32	5,15
5122,89	0,20	2,21
5407,49	0,10	0,74
5692,10	0,02	0,00
5700,00	0,00	0,00

Taula 5.2. Valors utilitzats per crear l'hidrograma d'entrada d'aigua i sediments al model.

Font: pròpia.

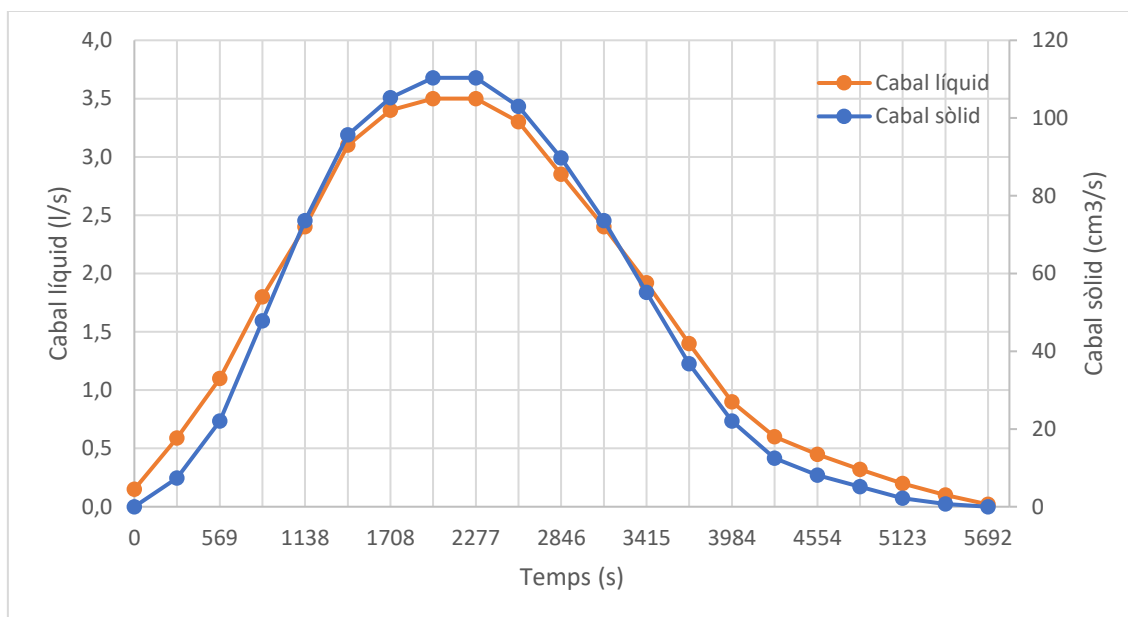


Figura 5.5. Hidrograma de sòlid i líquid d'entrada al model. Font: pròpia.

Com podem observar, el temps total de simulació és de 5.700 segons (1 hora i 35 minuts) i els cabals punta són 3,5 l/s per l'aigua i 110,35 cm³/s pels sediments.

L'hidrograma per l'aigua ha pogut ser introduït sense problemes al programa. L'hidrograma sòlid, en canvi, no pot ser introduït al model ja que no hi ha aquesta opció al programa.

L'entrada d'aigua i sediments és la que es pot veure a la figura 5.4, i a la figura 5.6 hi podem veure la sortida d'aigua. Finalment, s'ha assignat una rugositat a tot el domini de 0,025.

Amb totes les condicions presentades, el següent pas ja és generar la malla i començar el càlcul del problema. A la figura 5.7 hi podem veure la malla generada. Aquesta malla és d'elements triangulars irregulars i compta amb 1.712 nodes i 3.339 elements.

La simulació dura un total de 5.700 segons i s'imprimeixen resultats cada 100 segons. Això resulta en un total de 58 instants de temps en els quals tenim resultats.

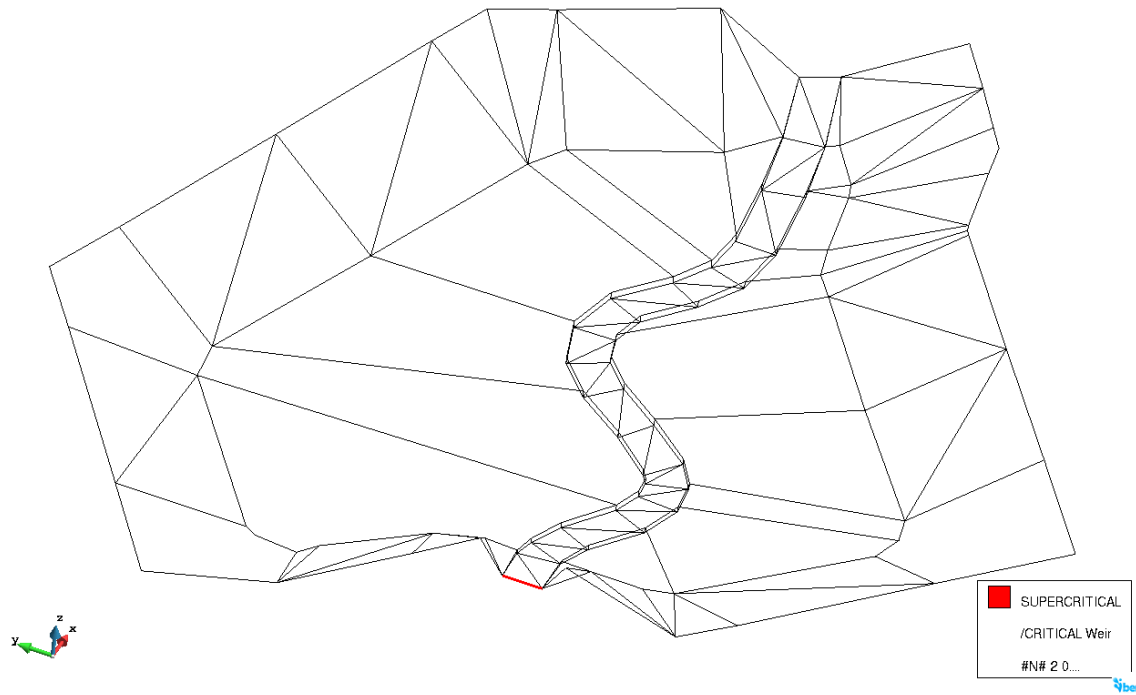


Figura 5.6. Sortida de l'aigua dins els model. Font: pròpia.

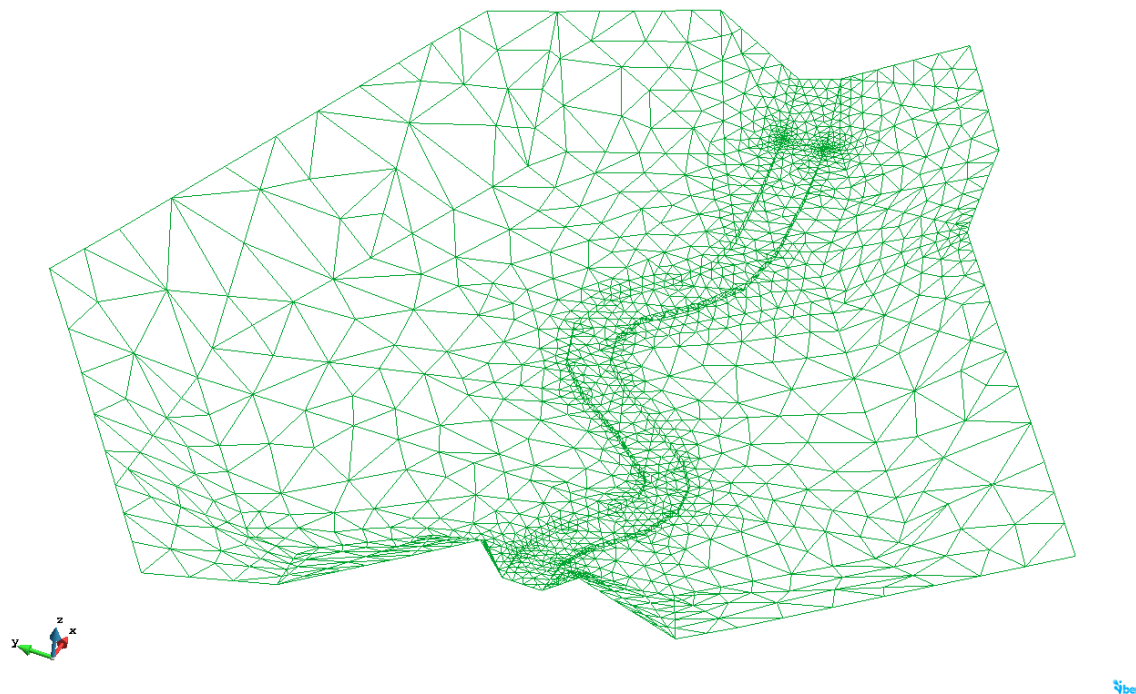


Figura 5.7. Malla d'elements triangulars irregulars per la simulació. Font: pròpia.

5.3. Resultats de la simulació considerant granulometria no uniforme

La simulació amb les condicions de contorn esmentades ha trigat dos dies en simular-se. Anem a veure'n els resultats.

Pel que fa a els resultats hidràulics, a les figures 5.8 fins 5.15 hi podem veure la profunditat de l'aigua en diferents instants de temps.

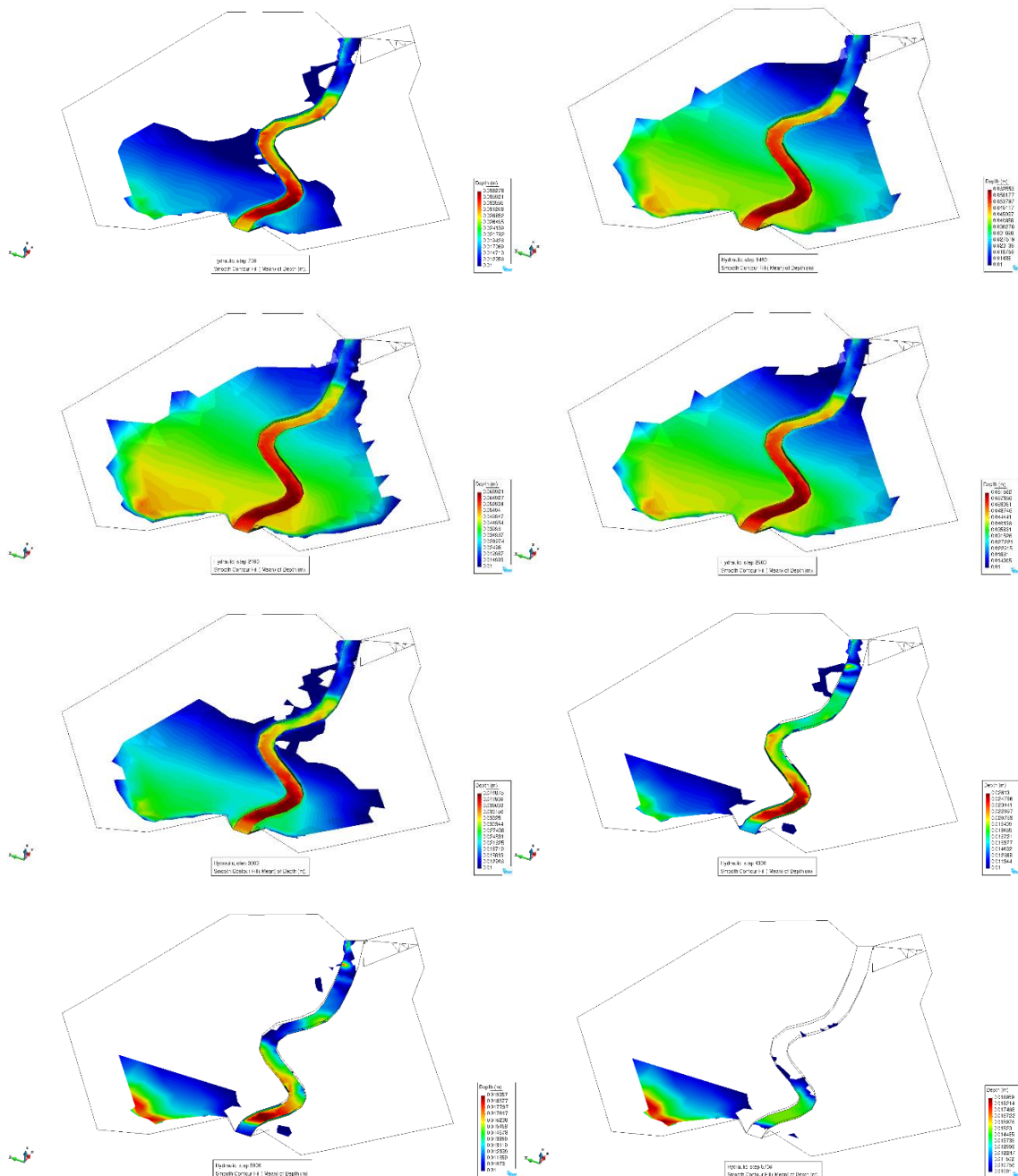


Figura 5.8. Profunditat de l'aigua en diferents instants de temps de la simulació. Font: pròpia.

La profunditat màxima de l'aigua es de 70 mil·límetres i es dona a la part del final de la guia que simula el curs del riu. Podem observar com els resultats hidràulics són lògics i, per tant, considerem correctes.

Ja que el problema amb l'anterior geometria no ens ha sortit una simulació correcta, provarem de simular aquest mateix problema amb una geometria no tant exacta i més aproximada. Això significa que mentre que la geometria tridimensional creada anteriorment era la més exacta possible a la realitat, aquesta nova geometria creada també s'assemblarà a la realitat sense ser exacte del tot, però mantenint els aspectes essencials de la geometria real com són la pendent i els límits del domini. En aquesta nova geometria creada (diguem-li geometria aproximada) els límits del domini no són els límits reals de la conca de retenció de sediments, sinó que aquesta vegada dels límits són la conca en sí, sense tenir en compte les parets inclinades de la conca de retenció (veure figura 5.9). D'aquesta forma ens assegurem que el domini del problema creat és on circularan l'aigua i els sediments, tal i com passaria a la realitat. Un dels objectius del treball és crear un model que pugui simular de la forma més acurada possible la realitat, i des del meu punt de vista crec que aquesta geometria, tot i no ser exacta, reproduïx força bé el que passa la realitat.

Des del meu punt de vista, crear la geometria d'aquesta forma disminueix la versemblança amb el model real i és possible que els resultats no siguin els mateixos que a l'experiment ja que la geometria no serà la mateixa, sinó que serà una aproximació del model real.

Recordem que les condicions de contorn seran les mateixes que les que hem presentat al punt 5.2. L'únic que canvia és la geometria del problema. A la figura 5.9 hi podem veure la geometria creada pel problema bidimensional.

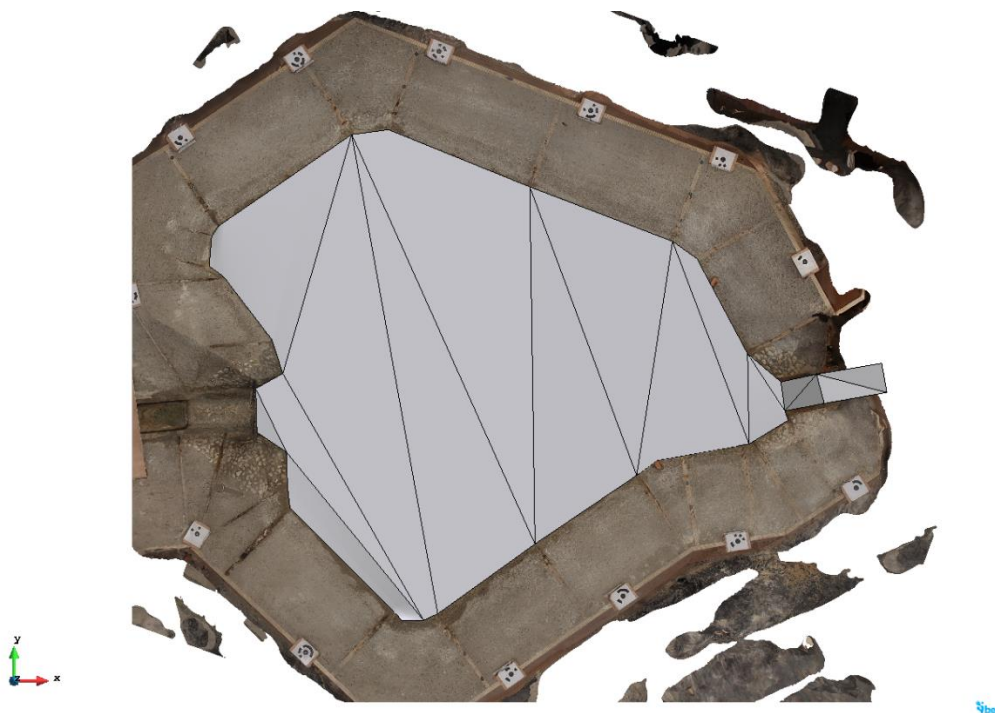


Figura 5.9. Geometria del problema en 2D. Font: pròpia.

Adrià Estany Roura

Pel que fa a les condicions de contorn, aquestes són molt semblants (per no dir iguals) a les presentades al punt 5.2, però anem a fer-ne un repàs. La fórmula escollida per calcular el transport de fons és la fórmula de Meyer-Peter i Müller, i la fórmula per calcular d'amagament de les partícules escollida és la fórmula d'Egiazaroff. La porositat dels sediments és 0,245, la seva densitat relativa és de 2,650 i l'angle de fricció del sediment és de 30 graus. L'opció de càlcul amb la partició d'Einstein s'activa.

S'assigna a tot el domini una rugositat de Manning de 0,025. L'hidrograma d'entrada es pot veure a la figura 5.5. Respecte a la mescla de sediments, la granulometria de la mescla es pot trobar a la taula 5.1. Finalment, s'assigna una entrada dels sediments al mateix punt del domini que l'entrada d'aigua i es procedeix a simular el problema.

A la figura 5.10 i 5.11 hi podem veure la profunditat de l'aigua resultant del model amb la geometria aproximada.

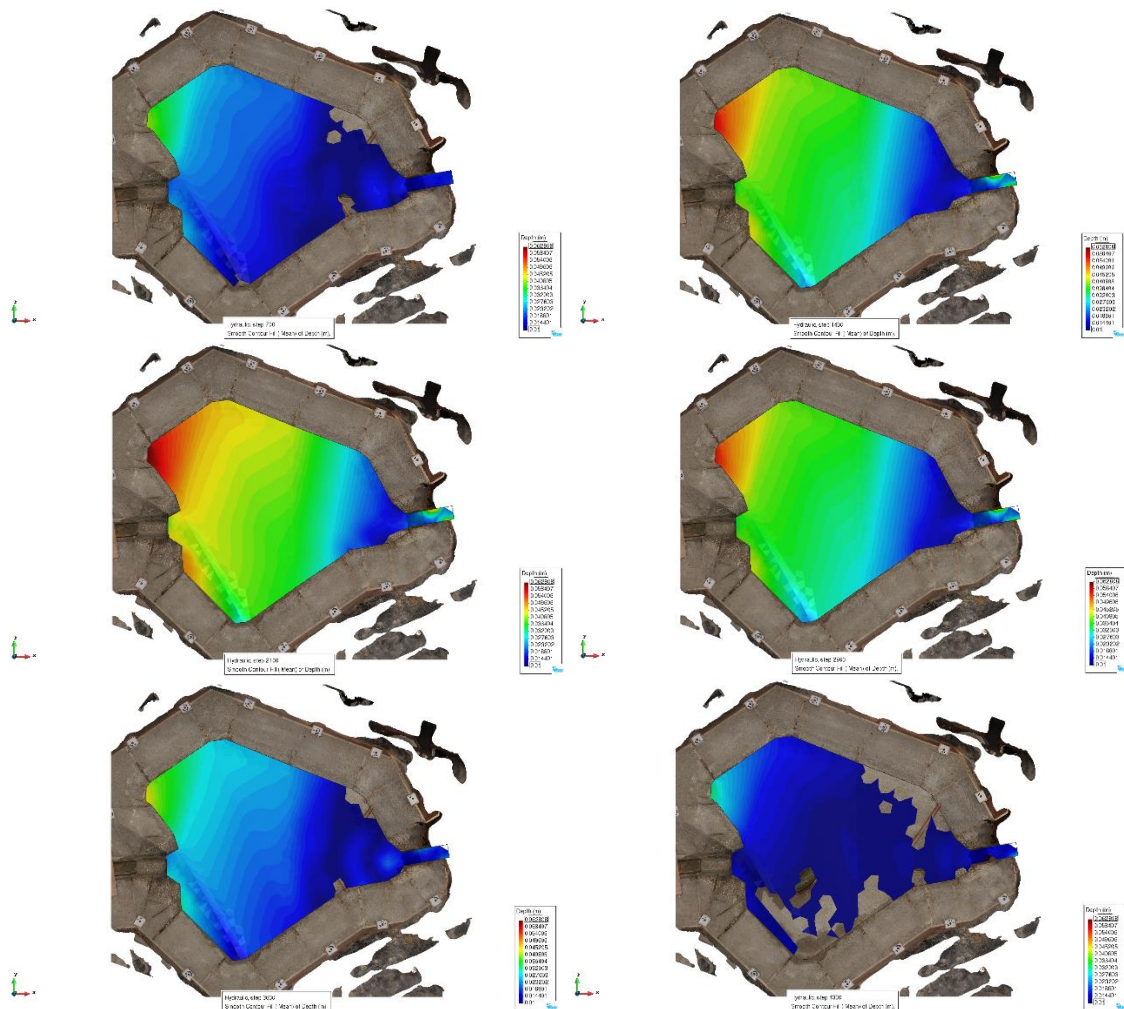


Figura 5.10. Profunditat de l'aigua en diferents instants de temps de la simulació en el problema amb la geometria aproximada i granulometria de sediments no uniforme. Font: pròpia.

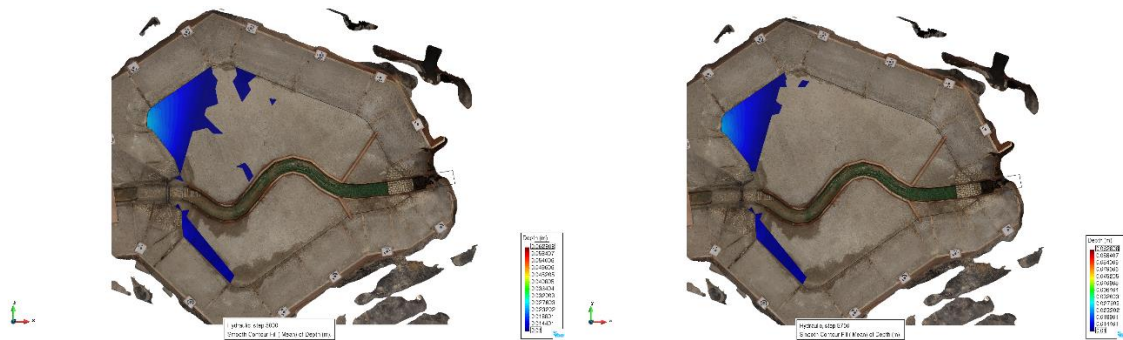


Figura 5.11. Profunditat de l'aigua en diferents instants de temps de la simulació en el problema amb la geometria aproximada i granulometria de sediments no uniforme (cont.).

Font: pròpia.

Observem que, a diferència de la simulació realitzada amb la geometria completa, en aquesta simulació l'aigua no segueix el curs de les guies del model real ja que no hi estan representades a la geometria aproximada.

La profunditat màxima de l'aigua és de 6,28 centímetres. Observem que aquest valor és força semblant al valor de la simulació amb la geometria inicial del problema, on la profunditat màxima era de 7 centímetres.

Per tal de comparar els resultats de la simulació amb els resultats de l'experiment real, compararem la posició final dels sediments segons les 5 línies d'estudi que es poden veure a la figura 4.9. Al llarg d'aquestes línies hi calcularem la pendent final dels sediments dipositats. A la figura 5.12 hi podem veure l'elevació del llit de sediments per diferents instants de temps. A la figura 5.13 hi podem veure la pendent calculada de cadascuna de les línies d'estudi i a la taula 5.3 hi podem veure un resum dels resultats obtinguts a partir de les pendents d'aquestes línies.

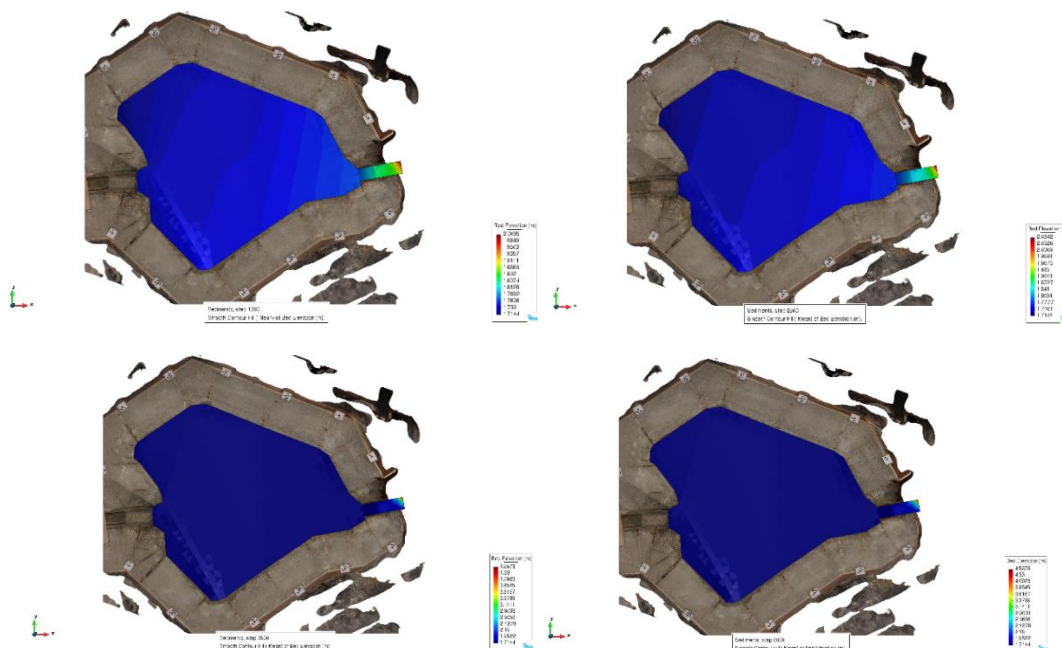


Figura 5.12. Cota del llit de la conca en diferents instants de temps de la simulació en el problema amb la geometria aproximada i amb els sediments de granulometria no uniforme.

Font: pròpia

Observem que als instants de temps 3.500 i 5.000 hi ha un node de la malla que ens dona un resultat excepcionalment alt. En aquest cas, la forma a actuar és considerar que al ser només un node del domini el resultat és erroni i per tant, n'ignorem el resultat.

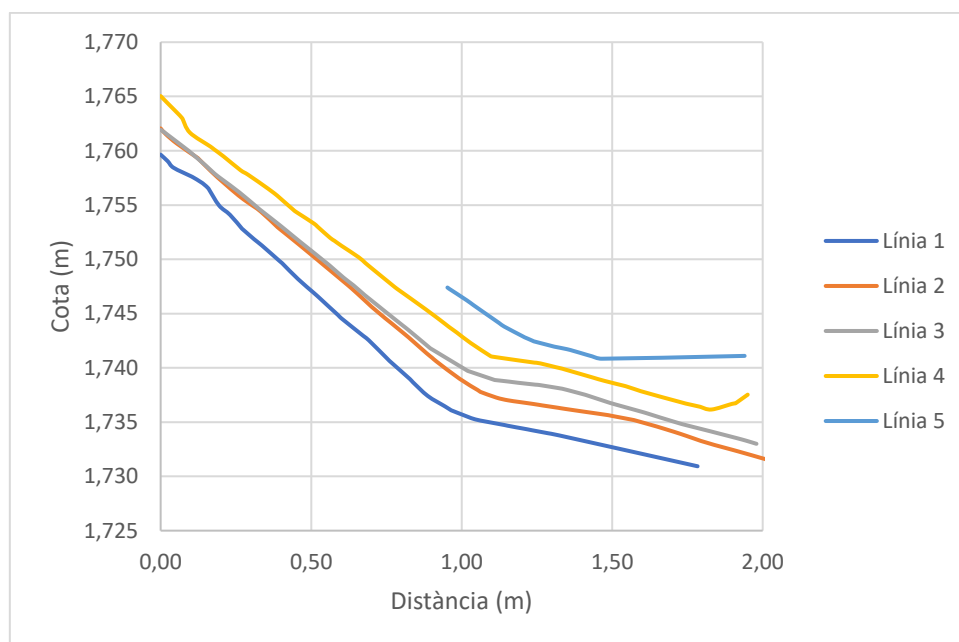


Figura 5.13. Perfil longitudinal de les línies d'estudi al final de la simulació amb la geometria aproximada considerant la granulometria no uniforme. Font: pròpia.

Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 4	Línia 5	Mitjana	Desviació típica
1,61%	1,51%	1,46%	1,41%	0,64%	1,33%	0,39%

Taula 5.3. Resum de les pendents calculades dels sediments a la conca de retenció de sediments al final de la simulació amb la geometria aproximada considerant la granulometria no uniforme. Font: pròpia.

Observem que hi ha una part de la línia d'estudi 5 que es troba fora del domini del problema i per aquesta raó hi ha una part de la línia que no té cap resultat.

El que farem a continuació i per tal de verificar correcte funcionament de l'extensió del càlcul de transport de sediments del programa serà simular-lo considerant una granulometria uniforme dels sediments.

5.4. Resultats de la simulació considerant granulometria uniforme

L'únic canvi que hi ha hagut a les condicions de contorn del problema és que no s'ha assignat una granulometria als sediments, sinó que s'ha assignat una mida als sediments uniforme de 0.13 centímetres, que coincideix amb el D50 de la mescla de sediments. El transport de fons es calcula amb la fórmula de Meyer-Peter i Müller.

A la figura 5.14 hi podem veure la profunditat de l'aigua en diferents instants de temps de la simulació.

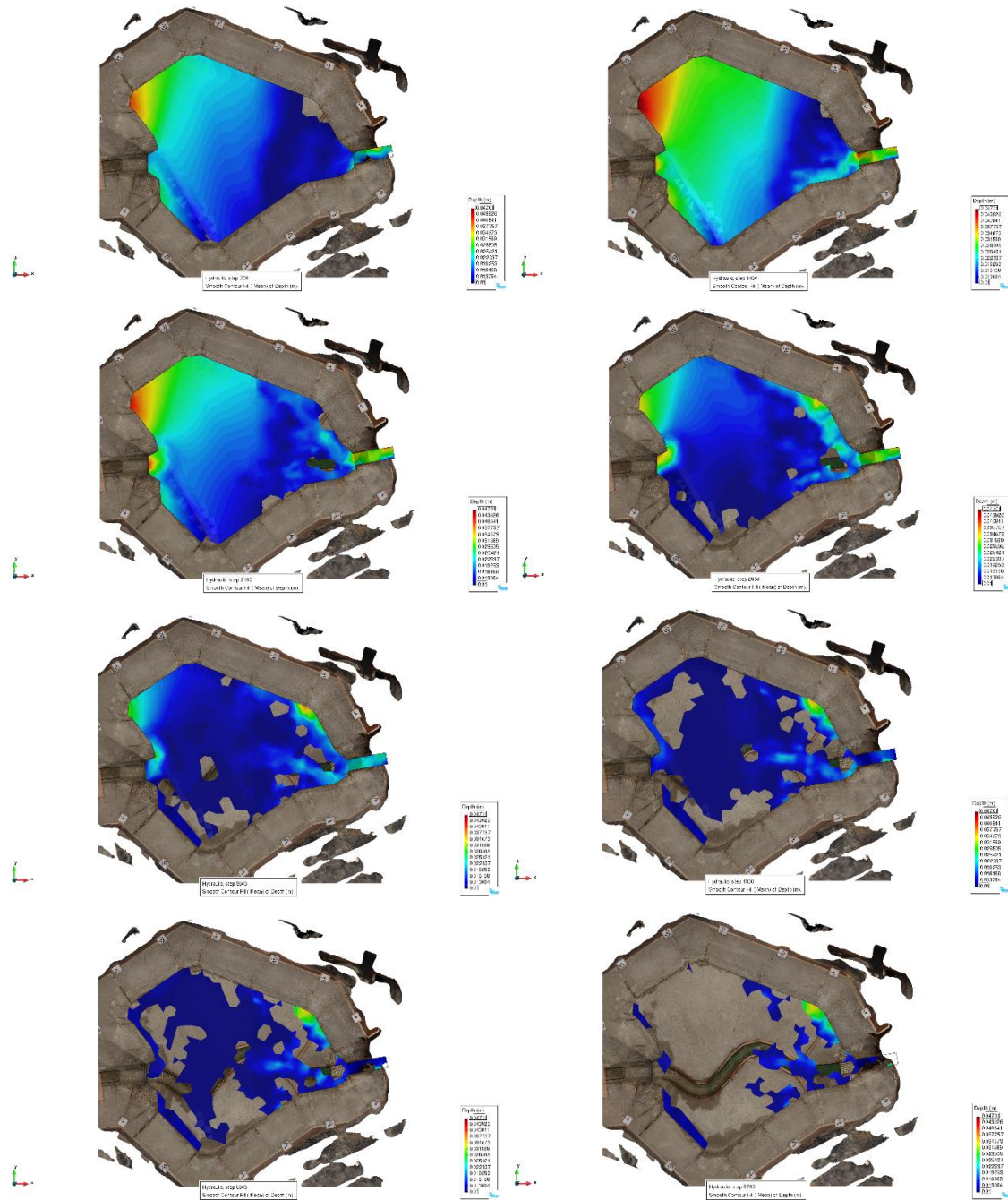


Figura 5.14. Profunditat de l'aigua en diferents instants de temps de la simulació en el problema amb la geometria aproximada i granulometria de sediments uniforme. Font: pròpia.

Observem que els resultats hidràulics pel que fa a profunditat de l'aigua són lleugerament diferents als resultats extrets en la simulació amb sediments de granulometria no uniforme. En aquest cas la màxima profunditat assolida de l'aigua és de 4,7 centímetres, força diferent a l'anterior simulació.

Anem a veure els resultats respecte als sediments. A la figura 5.15 hi podem veure la cota del llit de la conca de retenció de sediments en quatre instants de temps diferents.

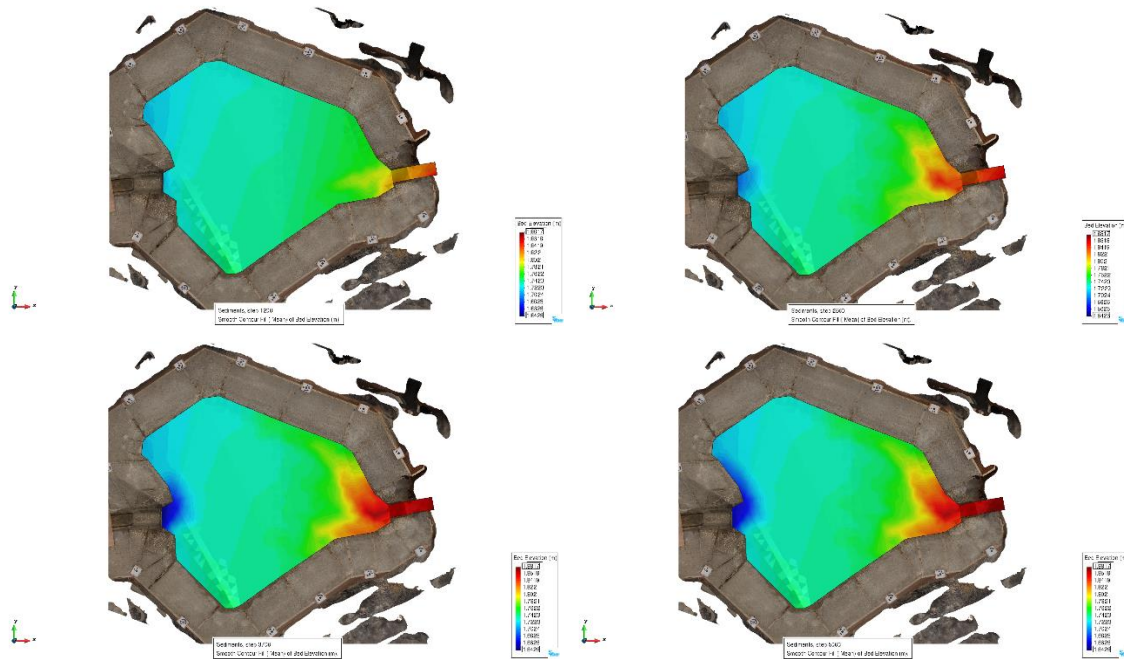


Figura 5.15. Cota del llit de la conca en diferents instants de temps de la simulació en el problema amb la geometria aproximada i amb els sediments de granulometria uniforme. Font: pròpia

Observem com els sediments es van dipositant a la conca a mesura que passa el temps de la simulació. Això provoca que el llit de la conca augmenti de cota fent que els sediments siguin dipositats en ella i, per tant, funcioni d'una forma correcta. Seguidament calcularem la pendent de les línies d'estudi per tal de comparar-ne els resultats amb la simulació amb granulometria no uniforme i els resultats reals. A la figura 5.16 s'hi pot veure el perfil longitudinal de cada una de les línies d'estudi en qüestió, i a la taula 5.4 hi podem veure un resum dels resultats obtinguts.

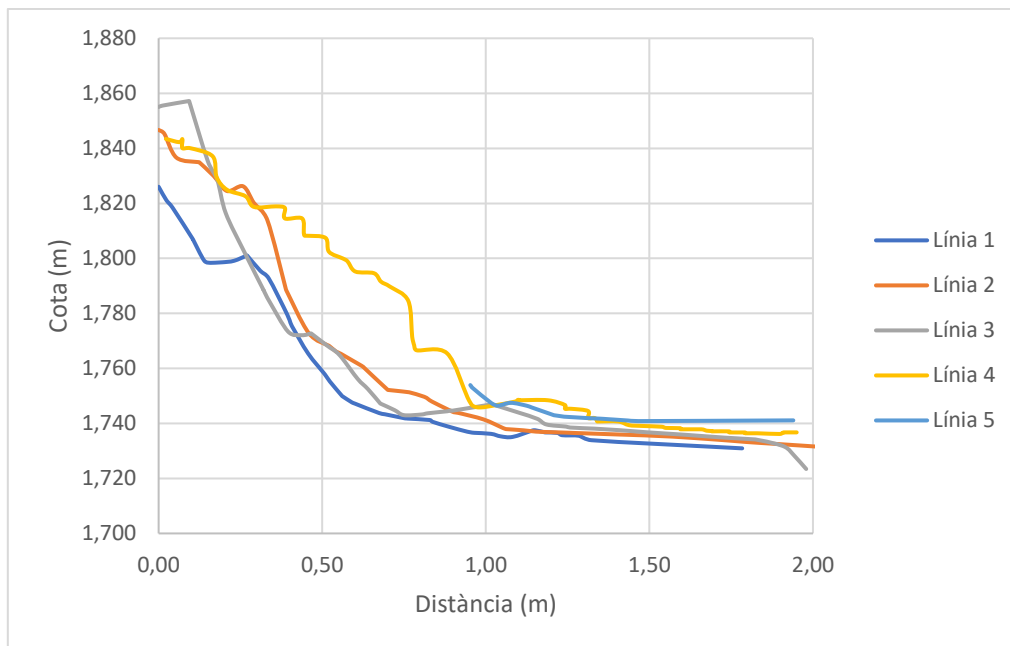


Figura 5.16. Perfil longitudinal de les línies d'estudi al final de la simulació amb la geometria aproximada considerant la granulometria uniforme. Font: pròpia.

Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 4	Línia 5	Mitjana	Desviació típica
5,33%	5,71%	6,65%	5,43%	1,30%	4,88%	2,07%

Taula 5.4. Resum de les pendents calculades dels sediments dipositats a la conca de retenció de sediments al final de la simulació amb la geometria aproximada considerant la granulometria uniforme. Font: pròpia.

5.5. Conclusions

Per tal de resumir els resultats obtinguts en les dues simulacions realitzades i per tal de comparar-los amb els resultats reals, construïm a taula 5.6 a mode de resum. A més, a la taula 5.5 hi podem observar una comparació entre les dues simulacions realitzades.

Simulació	Granulometria	Fórmula transport de fons	Fórmula amagament
1	No uniforme	Meyer-Peter i Müller	Egiazaroff
2	Uniforme	Meyer-Peter i Müller	-

Taula 5.5. Taula comparativa entre les simulacions realitzades. Font: pròpia.

Problema	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 4	Línia 5	Mitjana	Desv. típica
Assaig 4	5,43%	5,73%	5,69%	7,30%	7,23%	6,28%	0,91%
Assaig 6	6,50%	9,27%	9,09%	7,14%	7,39%	7,88%	1,23%
Gran. uniforme	1,61%	1,51%	1,46%	1,41%	0,64%	1,33%	0,39%
Gran. no uniforme	5,33%	5,71%	6,65%	5,43%	1,30%	4,88%	2,07%

Taula 5.6. Taula comparativa entre les simulacions realitzades i les dades dels models reals. Font: pròpia.

Podem observar que la simulació que més s'assemblaria a la realitat és la realitzada amb una granulometria uniforme, ja que la mitjana de les pendents final dels sediments dipositats a la conca seria més semblant a les pendents resultant de la simulació amb granulometria no uniforme. De fet, podem concloure que la simulació realitzada amb granulometria no uniforme no ha resultat correcta ja que les pendents de les línies d'estudi finals són les mateixes que les inicials, és a dir, són la mateixa pendent que el domini del problema.

Respecte a la simulació realitzada amb la granulometria dels sediments uniforme, podem concloure en què la simulació ha estat correcta, però els resultats finals no s'assemblen als de la realitat ja que la granulometria dels sediments utilitzada és diferent a la utilitzada en el model real.

6. Conclusions i recomanacions

La principal conclusió extreta d'aquest treball és que la simulació del problema amb la mescla de sediments no uniforme no ha sortit bé, ja que no hi ha un dipòsit de sediments a la conca, a diferència del problema simulat amb els sediments de granulometria uniforme.

Això ens fa pensar en la possibilitat de que el problema real escollit per simular amb el programa no sigui l'ídoni perquè en aquest problema no hi ha un efecte gran del transport de fons en sí mateix, sinó que el domini del problema és força petit i no hi ha una gran implicació del transport de fons en sí. Un problema com per exemple el transport sediments en un canal artificial sigui més apte per simular i comparar-ne els resultats que l'actual, ja que la component de la tensió que genera l'aigua sobre el fons del riu està més present que en el problema actual.

A més, s'ha verificat que aquest mateix problema simulat amb sediments de granulometria uniforme ens dona una simulació correcta ja que s'hi pot apreciar un dipòsit de les partícules sobre el domini del problema. De fet, això és el que s'ha vist en els assajos reals: que la conca de retenció de sediments s'hi dipositen aquests mateixos deixant passar l'aigua a través de la conca i impedit que els sediments (les partícules més grans de mida) puguin circular aigües avall.

Pel que fa a les recomanacions, crec que el programa Iber és molt intuïtiu en el seu ús respecte la modelització i introducció de dades i condicions de contorn en els problemes amb sediments amb granulometria uniforme però, en canvi, no és tant intuïtiu alhora de modelar problemes amb transport de fons per a sediments amb granulometries no uniformes. En el cas de la simulació de problemes amb sediments amb granulometria uniforme, els inputs d'entrada són la mida del sediment i altres propietats dels mateixos com la porositat, la densitat relativa i l'angle de repòs, a part de l'entrada dels sediments al domini o la posició inicial dels mateixos. A part d'aquests inputs, a més, es pot escollir quina és la fórmula que es vol utilitzar per calcular el transport de fons. Òbviament, Iber també permet calcular el transport de sediments en suspensió però com que aquest tema queda fora de l'àmbit del treball no comentarem sobre ell.

Respecte a la modelització de problemes amb sediments de granulometria no uniforme, a part dels mateixos inputs que als problemes uniformes, també es defineix una granulometria de la mescla de sediments, amb la mida de cada classe de la mescla i amb el percentatge sobre el total de cada classe. A part, també s'ha de definir una mida de la capa activa, cosa que és molt difícil de predir a ull nu. A part, si no s'assigna a cada superfície del domini una estructura del sòl no ens deixa calcular el problema. Això és útil quan s'ha de modelitzar el transport de fons en un riu on ja hi ha uns sediments sedimentats al fons del mateix, però en el nostre cas on el que volem simular és com i on es dipositen uns sediments que s'introdueixen dins del domini, aquesta característica del programa no ens permet calcular bé la disposició dels sediments. És raonable pensar que aquest fet de no deixar calcular una simulació sense prèviament assignar uns

Adrià Estany Roura

sediments a tot el domini del problema ha fet que la simulació amb els sediments de granulometria no uniforme no hagi sortit del tot bé.

També val a dir que, com que la versió 3.1 del programa Iber ha sortit al Desembre del 2021 i no s'ha pogut trobar cap manual del programa pel que fa a simulació de problemes amb sediments de granulometria no uniforme, ha fet que no es tingués una bona base teòrica de funcionament del programa. És possible que amb exemples de problemes simulats o amb un manual de referència, el problema simulat en aquest treball hagués sortit millor.

Referències

- Ashida, K., Michiue, M. (1972). Studies on bed load transportation for nonuniform sediment and river bed variation. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*: 59-69.
- Basile, P. A. (2000). Revisión de ecuaciones de transporte modificadas para sedimentos heterogéneos. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba*. 1: 369-378.
- Basile, P. A. (2018). Transporte de sedimentos y morfodinámica de los ríos aluviales. *Departamento de Hidráulica-EIC-FCEIA. Universidad Nacional de Rosario, Argentina*.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo de ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30(1): 1-10.
- Budinski, L., Spasojević, M. (2014). 2D modelling of flow and sediment interaction: sediment mixtures. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 140(2).
- Cea, L., Bladé, E., Sanz, M., Bermúdez, M., Mateos, Á. (2019). Iber applications basic guide. Two-dimensional modelling of free surface shallow water flows. *Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións*.
- Chow, V. T. (1959). Open-Channel Hydraulics. *New York McGraw-Hill Book Company, INC*.
- CIMNE. GiD User Manual. Consultat l'Octubre de 2021 de <https://www.gidhome.com/support/tutorials/>.
- Einstein, H. A. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. *United States Department of Agriculture. Technical Bulletin* 1026.
- Exner, F. M. (1925). Über die wechselwirkung zwischen wasser und geschiebe in flüssen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* 134, 2a: 165-203.
- Ezgiaroff, I. (1965). Calculation of nonuniform sediment concentrations. *Journal of the Hydraulics Division* 91(4): 225-247.
- Gonzales de Linares, M., Mano, V., Piton, G., Recking, A. (2020). Modelling of massive bed-load deposition in a debris basin: cross comparison between numerical and small scale modelling. *River Flow 2020: Proceedings of the 10th Conference on Fluvial Hydraulics*: 282-289.
- Hirano, M. (1971). River-bed degradation with armoring. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*: 55-65.
- IBER (2012). Anexo 4: Modelo de transporte de sedimento de fondo para granulometrías no uniformes. *Flumen*.

Adrià Estany Roura

- IBER (2012). Manual de referencia hidráulico. Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. *Flumen*.
- IRMA (2006). On n'a jamais vu ça! ou l'incorrigeable nature... *Institut des Risques Majeurs*. Consultat el Desembre del 2021 de http://www.irma-grenoble.com/PDF/06sorties/expo_itinerante/Expo_plaquette.pdf.
- Janssen, S. R. (2010). Testing sediment transport models under partial transport conditions. *MSc Thesis. University of Twente*.
- Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. *International Association for Hydraulic Structures Research. 2nd meeting. Appendix 2: 39-64*.
- Moldenhauer-Roth, A., Piton, G., Schwindt, S., Jafarnejad, M., Schleiss, A. J. (2021). Design of sediment detention basins: Scaled model experiments and application. *International Journal of Sediment Research* 36: 136-150.
- Parker, G., Klingeman, P. C., McLean, D. G. (1982). Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams. *Journal of the Hydraulics Division* 108(4): 544-571.
- Piton, G., Mano, V., Richard, D., Evin, G., Laigle, D., Tacnet, J., Reilland, P. (2019). Desing of a debris retention basin enabling sediment continuity for small events: the Combe de Lancey case study (France). *7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*: 1019-1026.
- Piton, G., Richard, D. (2018). Etude de l'aménagement d'une plage de dépôt sur le torrent de la Combe de Lancey. *IRSTEA: Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement*.
- Rivera, F., Soto, G. (2002). Análisis comparativo de transporte de sedimentos con cambio granulométrico. *Ingeniería del Agua* 9(1): 73-79.
- Rozani, F. (2020). Modélisation numérique hydrosédimentaire d'un torrent: La plage de dépôt de la Combe de Lancey. *Raport de stage. Université Grenoble Alpes*.
- Salinas, H. (2015). Transporte de sedimentos en cauces. *UAEM Universidad Autónoma del Estado de México*. Consultat el Setembre de 2021 de <https://slideplayer.es/slide/9392533/>.
- Shields, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Hydrodynamics Laboratory. California Institute of Technology, Pasadena* 167.
- Unal, N. E. (2018). Shear stress-based analysis of sediment incipient deposition in rigid boundary open channels. *Water* 10 (1399).
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 110(10).
- Viquipèdia, L'enciclopèdia lliure: Con de dejecció. Consultat el Desembre de 2021 de https://ca.wikipedia.org/wiki/Con_de_dejecci%C3%B3.

Adrià Estany Roura

Wikipédia, L'Encyclopédie Libre: Nivellement general de la France. Consultat el Novembre de 2021 de https://fr.wikipedia.org/wiki/Nivellement_g%C3%A9n%C3%A9ral_de_la_France .

Wong, M., Parker, G. (2006). Reanalysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Müller using their own database. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(11): 1159-1168.

Wu, W., Vieira, D. A., Wang, S. (2014). One-dimensional numerical model for nonuniform sediment transport under unsteady flows in channel networks. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(9): 914-923.

Wu, W., Wang, S., Jia, Y. (2001). Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research* 38(6): 427-434.

Annex

A les següents taules es poden observar els paràmetres dels punts d'intersecció entre les línies d'estudi i les línies de contorn del MDE per l'assaig número 4. Amb aquestes dades s'ha pogut dibuixar el perfil longitudinal de cada línia de l'assaig 4 (veure figura 4.10).

- Línia 1.

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-35,057	-15,546		0,000	0,000
-35,188	-15,499	1,890	0,139	0,139
-35,364	-15,433	1,880	0,188	0,327
-35,525	-15,372	1,870	0,172	0,500
-35,749	-15,288	1,860	0,239	0,739
-35,866	-15,244	1,850	0,125	0,864
-36,120	-15,148	1,840	0,271	1,135
-36,370	-15,054	1,830	0,268	1,403
-36,551	-14,986	1,820	0,194	1,596
-36,679	-14,938	1,810	0,136	1,732
-36,800	-14,892	1,800	0,129	1,862
-36,911	-14,851	1,790	0,119	1,981

- Línia 2.

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-35,058	-15,690		0,000	0,000
-35,223	-15,657	1,890	0,169	0,169
-35,445	-15,613	1,880	0,226	0,395
-35,562	-15,590	1,870	0,119	0,514
-35,584	-15,586	1,860	0,022	0,537
-35,672	-15,568	1,850	0,090	0,626
-35,733	-15,556	1,850	0,062	0,689
-35,972	-15,509	1,850	0,244	0,932
-36,212	-15,462	1,840	0,245	1,177
-36,321	-15,441	1,830	0,111	1,288
-36,438	-15,418	1,820	0,119	1,407
-36,660	-15,374	1,810	0,226	1,633
-36,780	-15,351	1,800	0,122	1,755
-36,935	-15,320	1,790	0,158	1,914

- Línia 3.

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-35,074	-15,804		0,000	0,000
-35,093	-15,804	1,890	0,019	0,019
-35,239	-15,806	1,880	0,146	0,165
-35,513	-15,809	1,870	0,274	0,439

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-35,522	-15,809	1,870	0,009	0,448
-35,555	-15,809	1,870	0,033	0,481
-35,580	-15,810	1,870	0,025	0,506
-35,665	-15,811	1,870	0,085	0,591
-35,702	-15,811	1,870	0,037	0,628
-35,721	-15,811	1,870	0,019	0,647
-35,867	-15,813	1,860	0,146	0,793
-35,986	-15,814	1,850	0,119	0,912
-36,161	-15,816	1,840	0,175	1,087
-36,270	-15,817	1,830	0,109	1,196
-36,451	-15,819	1,820	0,181	1,377
-36,592	-15,821	1,810	0,141	1,518
-36,755	-15,823	1,800	0,163	1,681
-36,881	-15,824	1,790	0,126	1,807
-37,025	-15,826	1,780	0,144	1,951

- Línia 4.

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-35,008	-15,959		0,000	0,000
-35,273	-16,002	1,890	0,269	0,269
-35,450	-16,031	1,890	0,179	0,448
-35,499	-16,040	1,890	0,050	0,498
-35,511	-16,042	1,890	0,012	0,510
-35,658	-16,067	1,880	0,149	0,659
-35,764	-16,085	1,870	0,108	0,767
-35,876	-16,103	1,860	0,113	0,880
-35,963	-16,118	1,850	0,088	0,969
-36,037	-16,130	1,840	0,075	1,044
-36,210	-16,160	1,830	0,176	1,219
-36,455	-16,201	1,820	0,248	1,468
-36,579	-16,222	1,810	0,126	1,593
-36,660	-16,236	1,800	0,082	1,676
-36,768	-16,254	1,790	0,109	1,785
-36,813	-16,261	1,780	0,046	1,831
-36,894	-16,275	1,770	0,082	1,913

- Línia 5.

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-34,986	-16,072		0,000	0,000
-35,057	-16,097	1,900	0,075	0,075
-35,254	-16,166	1,890	0,209	0,284
-35,393	-16,215	1,880	0,147	0,431
-35,602	-16,288	1,870	0,221	0,652
-35,659	-16,308	1,860	0,060	0,713
-35,790	-16,355	1,850	0,139	0,852

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-35,854	-16,377	1,850	0,068	0,920
-35,957	-16,413	1,850	0,109	1,029
-36,212	-16,503	1,840	0,270	1,299
-36,293	-16,531	1,830	0,086	1,385
-36,391	-16,566	1,820	0,104	1,489
-36,481	-16,597	1,810	0,095	1,584
-36,583	-16,633	1,800	0,108	1,692
-36,712	-16,679	1,790	0,137	1,829
-36,733	-16,686	1,780	0,022	1,851
-36,754	-16,693	1,770	0,022	1,873

A les següents taules hi podem trobar els mateixos paràmetres per tal de dibuixar els perfils longitudinals per l'assaig número 6.

- Línia 1.

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-35,057	-15,546		0,000	0,000
-35,187	-15,499	1,900	0,139	0,139
-35,340	-15,442	1,890	0,163	0,302
-35,447	-15,402	1,880	0,114	0,416
-35,484	-15,388	1,880	0,040	0,456
-35,634	-15,331	1,870	0,160	0,616
-35,750	-15,288	1,860	0,124	0,740
-35,855	-15,248	1,850	0,112	0,852
-35,940	-15,216	1,840	0,091	0,943
-35,980	-15,201	1,840	0,043	0,986
-36,092	-15,159	1,830	0,119	1,105
-36,202	-15,118	1,820	0,117	1,223
-36,296	-15,082	1,810	0,100	1,323
-36,481	-15,012	1,800	0,198	1,521
-36,765	-14,906	1,790	0,303	1,824
-36,914	-14,849	1,780	0,160	1,984

- Línia 2.

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-35,058	-15,690		0,000	0,000
-35,091	-15,683	1,910	0,034	0,034
-35,204	-15,660	1,910	0,116	0,149
-35,343	-15,633	1,900	0,141	0,291
-35,501	-15,602	1,890	0,161	0,452
-35,554	-15,592	1,880	0,054	0,506
-35,639	-15,575	1,870	0,087	0,593
-35,768	-15,549	1,860	0,132	0,724
-35,918	-15,520	1,850	0,153	0,877
-35,960	-15,512	1,850	0,043	0,920

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-36,031	-15,498	1,840	0,072	0,992
-36,153	-15,474	1,830	0,124	1,117
-36,254	-15,454	1,820	0,103	1,220
-36,295	-15,446	1,820	0,041	1,261
-36,376	-15,430	1,810	0,083	1,344
-36,490	-15,408	1,800	0,116	1,460
-36,636	-15,379	1,790	0,149	1,609
-36,779	-15,351	1,780	0,146	1,755
-36,812	-15,344	1,770	0,034	1,788
-36,951	-15,317	1,760	0,142	1,930
-36,969	-15,313	1,750	0,018	1,948
-36,983	-15,310	1,740	0,014	1,963
-36,996	-15,308	1,730	0,013	1,976

- Línia 3.

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-35,074	-15,804		0,000	0,000
-35,242	-15,806	1,900	0,169	0,169
-35,325	-15,807	1,900	0,083	0,251
-35,514	-15,809	1,890	0,189	0,440
-35,610	-15,810	1,880	0,096	0,536
-35,655	-15,810	1,870	0,045	0,581
-35,751	-15,811	1,870	0,096	0,677
-35,837	-15,812	1,860	0,086	0,763
-35,909	-15,813	1,850	0,072	0,835
-36,081	-15,815	1,840	0,172	1,007
-36,167	-15,816	1,830	0,086	1,093
-36,242	-15,817	1,820	0,075	1,168
-36,319	-15,818	1,810	0,077	1,245
-36,446	-15,819	1,800	0,127	1,372
-36,612	-15,821	1,790	0,166	1,538
-36,749	-15,823	1,780	0,138	1,676
-36,894	-15,824	1,770	0,145	1,820
-36,962	-15,825	1,760	0,068	1,888
-36,980	-15,825	1,750	0,018	1,906
-37,002	-15,825	1,740	0,022	1,928

- Línia 4.

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-35,008	-15,959		0,000	0,000
-35,054	-15,965	1,900	0,047	0,047
-35,127	-15,977	1,890	0,074	0,121
-35,292	-16,005	1,880	0,167	0,288
-35,374	-16,019	1,880	0,083	0,371
-35,511	-16,042	1,880	0,139	0,510

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-35,736	-16,080	1,870	0,228	0,738
-35,783	-16,088	1,860	0,048	0,786
-35,884	-16,105	1,850	0,102	0,889
-35,945	-16,115	1,840	0,062	0,950
-36,073	-16,137	1,830	0,130	1,080
-36,129	-16,146	1,830	0,057	1,137
-36,180	-16,155	1,820	0,052	1,189
-36,252	-16,167	1,810	0,073	1,262
-36,337	-16,181	1,800	0,086	1,348
-36,414	-16,194	1,790	0,078	1,426
-36,575	-16,221	1,780	0,163	1,589
-36,849	-16,268	1,770	0,278	1,867

- Línia 5.

X (m)	Y (m)	Cota (m)	Distància (m)	Coord. X (m)
-34,986	-16,072		0,000	0,000
-34,993	-16,074	1,910	0,007	0,007
-35,056	-16,096	1,900	0,067	0,074
-35,158	-16,133	1,890	0,109	0,182
-35,345	-16,198	1,880	0,198	0,380
-35,435	-16,230	1,870	0,096	0,476
-35,573	-16,278	1,860	0,146	0,622
-35,630	-16,298	1,860	0,060	0,682
-35,674	-16,314	1,860	0,047	0,729
-35,744	-16,338	1,860	0,074	0,803
-35,766	-16,344	1,870	0,023	0,826
-35,775	-16,349	1,870	0,010	0,836
-35,827	-16,368	1,860	0,055	0,891
-35,858	-16,378	1,850	0,033	0,924
-36,012	-16,432	1,840	0,163	1,087
-36,099	-16,463	1,830	0,092	1,179
-36,184	-16,493	1,820	0,090	1,270
-36,368	-16,558	1,810	0,195	1,465
-36,431	-16,580	1,800	0,067	1,532
-36,488	-16,600	1,800	0,060	1,592
-36,586	-16,634	1,790	0,104	1,696
-36,655	-16,659	1,780	0,073	1,769
-36,760	-16,695	1,770	0,111	1,880
-36,780	-16,703	1,770	0,022	1,901

A les següents taules hi podem trobar els valors utilitzats per crear els perfils longitudinals de la figura 5.13, corresponents als perfils longitudinals extrets de la simulació amb la geometria aproximada amb sediments no uniformes.

- Línia 1.

Distància (m)	Cota (m)
0,000	1,760
0,024	1,759
0,043	1,758
0,104	1,758
0,104	1,758
0,139	1,757
0,159	1,757
0,159	1,757
0,194	1,755
0,230	1,754
0,270	1,753
0,270	1,753
0,311	1,752
0,337	1,751
0,393	1,750
0,403	1,750
0,408	1,750
0,408	1,750
0,457	1,748
0,508	1,747
0,523	1,747
0,561	1,746
0,561	1,746
0,591	1,745
0,600	1,745
0,674	1,743
0,692	1,743
0,754	1,741
0,754	1,741
0,759	1,741
0,760	1,741
0,828	1,739
0,837	1,739
0,887	1,737
0,944	1,736
0,965	1,736
0,965	1,736
1,016	1,736
1,045	1,735
1,082	1,735
1,142	1,735
1,152	1,735
1,181	1,735
1,181	1,735
1,219	1,734
1,234	1,734
1,286	1,734

Distància (m)	Cota (m)
1,323	1,734
1,784	1,731

- Línia 2.

Distància (m)	Cota (m)
0,000	1,762
0,017	1,762
0,055	1,761
0,124	1,759
0,124	1,759
0,168	1,758
0,209	1,757
0,258	1,756
0,291	1,755
0,332	1,754
0,389	1,753
0,389	1,753
0,389	1,753
0,389	1,753
0,459	1,751
0,521	1,750
0,521	1,750
0,542	1,749
0,542	1,749
0,557	1,749
0,557	1,749
0,624	1,748
0,624	1,748
0,652	1,747
0,701	1,746
0,701	1,746
0,745	1,745
0,745	1,745
0,766	1,744
0,766	1,744
0,812	1,743
0,835	1,743
0,883	1,741
0,902	1,741
0,916	1,741
0,993	1,739
1,054	1,738
1,062	1,738
1,062	1,738
1,115	1,737
1,153	1,737
1,193	1,737

Distància (m)	Cota (m)
1,238	1,737
1,267	1,737
1,267	1,737
1,320	1,736
1,341	1,736
1,405	1,736
1,417	1,736
1,487	1,736
1,494	1,736
1,551	1,735
1,570	1,735
1,572	1,735
1,639	1,735
1,639	1,735
1,649	1,735
1,649	1,735
1,706	1,734
1,745	1,734
1,795	1,733
1,795	1,733
1,839	1,733
1,839	1,733
1,888	1,733
1,919	1,732
1,965	1,732
1,965	1,732
1,993	1,732
2,011	1,732
2,011	1,732
2,017	1,732

- Línia 3.

Distància (m)	Cota (m)
0,000	1,762
0,011	1,762
0,093	1,760
0,093	1,760
0,150	1,759
0,179	1,758
0,205	1,757
0,262	1,756
0,321	1,755
0,321	1,755
0,328	1,755
0,339	1,754
0,396	1,753
0,437	1,752

Distància (m)	Cota (m)
0,466	1,752
0,466	1,752
0,517	1,750
0,542	1,750
0,561	1,749
0,608	1,748
0,640	1,748
0,678	1,747
0,678	1,747
0,721	1,746
0,749	1,745
0,804	1,744
0,823	1,743
0,883	1,742
0,883	1,742
0,894	1,742
0,898	1,742
1,019	1,740
1,019	1,740
1,021	1,740
1,021	1,740
1,024	1,740
1,110	1,739
1,110	1,739
1,158	1,739
1,186	1,739
1,245	1,738
1,258	1,738
1,331	1,738
1,333	1,738
1,333	1,738
1,349	1,738
1,349	1,738
1,409	1,738
1,417	1,737
1,484	1,737
1,504	1,737
1,584	1,736
1,619	1,736
1,660	1,735
1,728	1,735
1,728	1,735
1,730	1,735
1,736	1,735
1,736	1,735
1,824	1,734
1,824	1,734
1,859	1,734
1,859	1,734

Distància (m)	Cota (m)
1,914	1,734
1,943	1,733
1,979	1,733

- Línia 4.

Distància (m)	Cota (m)
0,000	1,765
0,022	1,764
0,063	1,763
0,073	1,763
0,073	1,763
0,097	1,762
0,165	1,760
0,177	1,760
0,209	1,759
0,265	1,758
0,291	1,758
0,358	1,756
0,386	1,756
0,386	1,756
0,438	1,755
0,444	1,754
0,446	1,754
0,455	1,754
0,510	1,753
0,521	1,753
0,563	1,752
0,577	1,752
0,601	1,751
0,658	1,750
0,680	1,750
0,707	1,749
0,763	1,748
0,775	1,748
0,781	1,747
0,789	1,747
0,882	1,745
0,944	1,744
0,959	1,744
0,984	1,743
1,030	1,742
1,094	1,741
1,098	1,741
1,102	1,741
1,102	1,741
1,190	1,741
1,242	1,740

Distància (m)	Cota (m)
1,242	1,740
1,261	1,740
1,313	1,740
1,313	1,740
1,333	1,740
1,340	1,740
1,340	1,740
1,404	1,739
1,438	1,739
1,475	1,739
1,538	1,738
1,550	1,738
1,595	1,738
1,595	1,738
1,659	1,737
1,675	1,737
1,691	1,737
1,691	1,737
1,744	1,737
1,744	1,737
1,793	1,736
1,793	1,736
1,830	1,736
1,898	1,737
1,910	1,737
1,910	1,737
1,950	1,738

- Línia 5.

Distància (m)	Cota (m)
0,953	1,747
0,956	1,747
0,957	1,747
1,017	1,746
1,038	1,746
1,077	1,745
1,125	1,744
1,142	1,744
1,203	1,743
1,203	1,743
1,208	1,743
1,209	1,743
1,226	1,743
1,226	1,743
1,239	1,742
1,240	1,742
1,308	1,742

Distància (m)	Cota (m)
1,308	1,742
1,350	1,742
1,370	1,742
1,392	1,741
1,435	1,741
1,466	1,741
1,940	1,741

A les següents taules hi podem trobar els valors utilitzats per crear els perfils longitudinals de la figura 5.16, corresponents als perfils longitudinals extrems de la simulació amb la geometria aproximada amb sediments uniformes.

- Línia 1.

Distància (m)	Cota (m)
0,000	1,826
0,024	1,821
0,043	1,818
0,104	1,807
0,104	1,807
0,139	1,799
0,159	1,798
0,159	1,798
0,194	1,799
0,230	1,799
0,270	1,801
0,270	1,801
0,311	1,795
0,337	1,793
0,393	1,780
0,403	1,777
0,408	1,775
0,408	1,775
0,457	1,765
0,508	1,758
0,523	1,755
0,561	1,750
0,561	1,750
0,591	1,748
0,600	1,747
0,674	1,744
0,692	1,743
0,754	1,742
0,754	1,742
0,759	1,742
0,760	1,742
0,828	1,741
0,837	1,741

Distància (m)	Cota (m)
0,887	1,739
0,944	1,737
0,965	1,737
0,965	1,737
1,016	1,736
1,045	1,735
1,082	1,735
1,142	1,737
1,152	1,737
1,181	1,737
1,181	1,737
1,219	1,737
1,234	1,736
1,286	1,735
1,323	1,734
1,784	1,731

- Línia 2.

Distància (m)	Cota (m)
0,000	1,847
0,017	1,845
0,055	1,837
0,124	1,835
0,124	1,835
0,168	1,830
0,209	1,824
0,258	1,826
0,291	1,820
0,332	1,814
0,389	1,789
0,389	1,789
0,389	1,789
0,389	1,789
0,459	1,773
0,521	1,768
0,521	1,768
0,542	1,766
0,542	1,766
0,557	1,765
0,557	1,765
0,624	1,761
0,624	1,761
0,652	1,758
0,701	1,752
0,701	1,752
0,745	1,752
0,745	1,752

Distància (m)	Cota (m)
0,766	1,751
0,766	1,751
0,812	1,750
0,835	1,748
0,883	1,745
0,902	1,744
0,916	1,744
0,993	1,741
1,054	1,738
1,062	1,738
1,062	1,738
1,115	1,737
1,153	1,737
1,193	1,737
1,238	1,737
1,267	1,737
1,267	1,737
1,320	1,736
1,341	1,736
1,405	1,736
1,417	1,736
1,487	1,736
1,494	1,736
1,551	1,735
1,570	1,735
1,572	1,735
1,639	1,735
1,639	1,735
1,649	1,735
1,649	1,735
1,706	1,734
1,745	1,734
1,795	1,733
1,795	1,733
1,839	1,733
1,839	1,733
1,888	1,733
1,919	1,732
1,965	1,732
1,965	1,732
1,993	1,732
2,011	1,732
2,011	1,732
2,017	1,732

- Línia 3.

Distància (m)	Cota (m)
0,000	1,855
0,011	1,856
0,093	1,857
0,093	1,857
0,150	1,836
0,179	1,829
0,205	1,816
0,262	1,802
0,321	1,788
0,321	1,788
0,328	1,787
0,339	1,784
0,396	1,773
0,437	1,772
0,466	1,773
0,466	1,773
0,517	1,768
0,542	1,766
0,561	1,764
0,608	1,756
0,640	1,752
0,678	1,747
0,678	1,747
0,721	1,745
0,749	1,743
0,804	1,743
0,823	1,744
0,883	1,744
0,883	1,744
0,894	1,745
0,898	1,745
1,019	1,747
1,019	1,747
1,021	1,747
1,021	1,747
1,024	1,747
1,110	1,744
1,110	1,744
1,158	1,742
1,186	1,740
1,245	1,739
1,258	1,739
1,331	1,738
1,333	1,738
1,333	1,738
1,349	1,738
1,349	1,738

Distància (m)	Cota (m)
1,409	1,738
1,417	1,737
1,484	1,737
1,504	1,737
1,584	1,736
1,619	1,736
1,660	1,735
1,728	1,735
1,728	1,735
1,730	1,735
1,736	1,735
1,736	1,735
1,824	1,734
1,824	1,734
1,859	1,733
1,859	1,733
1,914	1,731
1,943	1,728
1,979	1,723

- Línia 4.

Distància (m)	Cota (m)
0,000	1,843
0,022	1,842
0,063	1,843
0,073	1,840
0,073	1,840
0,097	1,837
0,165	1,830
0,177	1,825
0,209	1,823
0,265	1,819
0,291	1,819
0,358	1,818
0,386	1,815
0,386	1,815
0,438	1,809
0,444	1,808
0,446	1,808
0,455	1,807
0,510	1,802
0,521	1,800
0,563	1,799
0,577	1,795
0,601	1,795
0,658	1,792
0,680	1,790

Distància (m)	Cota (m)
0,707	1,785
0,763	1,771
0,775	1,768
0,781	1,767
0,789	1,765
0,882	1,749
0,944	1,747
0,959	1,746
0,984	1,747
1,030	1,748
1,094	1,749
1,098	1,748
1,102	1,748
1,102	1,748
1,190	1,747
1,242	1,745
1,242	1,745
1,261	1,745
1,313	1,742
1,313	1,742
1,333	1,741
1,340	1,741
1,340	1,741
1,404	1,739
1,438	1,739
1,475	1,739
1,538	1,738
1,550	1,738
1,595	1,738
1,595	1,738
1,659	1,737
1,675	1,737
1,691	1,737
1,691	1,737
1,744	1,737
1,744	1,737
1,793	1,736
1,793	1,736
1,830	1,736
1,898	1,737
1,910	1,737
1,910	1,737
1,950	1,738

- Línia 5.

Distància (m)	Cota (m)
0,953	1,754

Distància (m)	Cota (m)
0,956	1,753
0,957	1,753
1,017	1,747
1,038	1,746
1,077	1,747
1,125	1,746
1,142	1,746
1,203	1,743
1,203	1,743
1,208	1,743
1,209	1,743
1,226	1,743
1,226	1,743
1,239	1,742
1,240	1,742
1,308	1,742
1,308	1,742
1,350	1,742
1,370	1,742
1,392	1,741
1,435	1,741
1,466	1,741
1,940	1,741