

## PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**ESTUDI EXPERIMENTAL DEL FLUX CONCENTRAT DE  
LLIMS EN UN CANAL**

Autor/a

LAIA RAGUÉS PUJOL

Tutor/a

JUAN PEDRO MARTÍN VIDE  
SERGI CAPAPÉ MIRALLES

Departament

ENGINYERIA HIDRÀULICA, MARÍTIMA I AMBIENTAL

Intensificació

ENGINYERIA HIDRÀULICA

Data

24/01/2013



## AGRAÏMENTS

En primer lloc voldria donar les gràcies als meus tutors Juan Pedro Martín Vide i Sergi Capapé Miralles per haver-me donat la oportunitat de realitzar aquesta tesina experimental. Ha estat molt gratificant poder fer recerca i formar part del procés que segueix un investigador per fer camí cap a uns objectius prèviament fixats. La orientació diària, els suggeriments i el coneixement que m'han transmès han guiat el meu aprofundiment en aquest camp de la hidràulica fluvial.

Gràcies al Prof. Ferran Colombo, professor de la Facultat de Geologia hem pogut realitzar tots els experiments en el laboratori SIMGEO de la UB, però no és menys l'agraïment cap a José Álvarez i Víctor Lozano del laboratori Departament d'Enginyeria del Terreny de la UPC per haver posat a la nostra disposició un conjunt d'instal·lacions que ens ha permès dur a terme part del procés experimental.

M'agradaria agrair a Josep Maria Ragués el material que ens ha proporcionat i el seu temps dedicat. Així mateix, dono les gràcies a l'empresa Turco Española per assessorar-me i deixar-me realitzar assajos en el laboratori químic.

Els agraïments més sincers a tots els familiars que han dedicat temps i han donat el seu punt de vista en diferents moments de la realització de la tesina. En particular, a Alejandro Capapé Miralles, per l'ajuda prestada en la realització dels assajos granulomètrics.

Agraeixo novament l'ajuda incondicional de Sergi Capapé Miralles; sense ell la realització d'aquesta tesina no hauria estat possible.

Finalment, mencionar als companys i amics de la Universitat, perquè al seu costat sempre he pogut tirar endavant.

## RESUM

Títol: Estudi experimental del flux concentrat de llims en un canal.

Autora: Laia Ragués Pujol.

Tutors: Juan Pedro Martín Vide i Sergi Capapé Miralles.

Els efectes que produeix el transport de sediment fi en suspensió en fluxos d'aigua són de gran importància en rius que contenen una gran càrrega de llims i argila, com és el cas del Pilcomayo. Per tal de fer front als problemes ambientals i econòmics que generen aquests rius és important conèixer i poder caracteritzar el comportament del seu flux amb càrrega de rentat provinent de la conca.

Per intentar caracteritzar el flux en presència de sediment fi assimilable a la càrrega de rentat, en aquesta tesina es realitza un estudi experimental que consisteix en la preparació i realització d'un conjunt d'experiments així com un anàlisi de resultats per tal de donar resposta a diferents objectius fixats prèviament. La experimentació s'ha realitzat en un canal de laboratori de fons pla que funciona a través d'un circuit hidràulic en el que no hi ha pèrdues i que per tant el volum d'aigua en circulació es manté sempre constant.

L'objectiu principal consisteix en determinar si existeix una primera concentració limitant de càrrega de rentat a partir de la qual el material comença a dipositar al fons i en cas d'existir saber si hi ha una segona concentració limitant a partir del qual el fons ja està totalment format. Per a portar a terme aquest objectiu s'ha treballat amb un sediment format per sílice, amb partícules de mides equivalents a les mides dels llims, les quals són més petites que el valor teòric màxim de la càrrega de rentat. Partint de condicions d'aigua clara, aquest sediment s'ha introduït en el sistema en diferents fases, cadascuna de les quals conté el sediment afegit més l'acumulat en les altres fases. A cada fase s'han fet un seguit d'observacions, mostrejos i una presa de dades de velocitat en una zona de treball localitzada aigües avall del canal. Amb les dades dels mostrejos i de les velocitats s'han obtingut perfils de concentracions i de velocitats al llarg del calat. A partir d'una concentració elevada s'ha deixat d'introduir sediment, i per a posteriors experiments la metodologia ha consistit en la presa de dades de velocitat instantània amb un ADV, que alhora han donat informació sobre l'evolució de la formació del fons.

Amb les observacions fetes, sembla que existeix una primera concentració limitant que depèn del temps de circulació del flux i de la concentració del flux, a partir de la qual es comença a formar el fons. Les formes arrodonides i acabades amb punxa que es formen inicialment s'acaben transformant en una tipologia de dunes, les dimensions de la qual van creixent fins que la cresta assoleix una alçada màxima. A partir d'aquí s'assoleix la segona concentració limitant, i les formes de fons es desplacen sense augmentar la seva altura, de manera que el sediment que se segueix dipositant al fons forma un dipòsit que va creixent amb el temps.

Els resultats obtinguts permeten intuir que quan es produeix aquesta primera concentració limitant, la concentració al fons és inferior a la concentració en cotes

superiors i per altra banda la distribució de la concentració al llarg del calat es fa més i menys uniforme de manera cíclica.

No obstant cal més experimentació per tal de poder determinar si una vegada el fons ha estat completament format, el transport de fons generat per aquesta càrrega de rentat és assimilable al transport de fons amb material provinent de la llera.

## ABSTRACT

Title: Experimental study of the silt concentrated flow in a flume.

Author: Laia Ragués Pujol

Tutors: Juan Pedro Martín Vide and Sergi Capapé Miralles.

The effects of the suspended fine sediment transport in water flows are important in rivers which contain high concentrations of silt and clay, such as the Pilcomayo river. Knowledge of the mechanism of wash load transport is required for handling many environmental and economic problems due to these rivers.

In order to characterize the wash load flow, this dissertation faces the preparation and execution of a set of experiments as well as the results analysis in order to achieve different objectives previously established. The experiments are conducted in a flat-bottomed flume which operates through an hydraulic circuit. In this circuit there are no losses, therefore the volume of water flow is kept constant all the time.

The main objective is to determine whether it exists a first limiting wash load concentration, defined as the time when the material begins to sediment at the bottom of the flume. In this case, it also has to be determined the moment when the additional sediment ends up in a flat deposit under the bed roughness, instead of keep growing the bed forms. To accomplish this objective it has been used silica particles, whose sizes are considered the same as the silt particle sizes, and actually these are even much smaller than the maximum wash load theoretical size. Starting with clear water conditions, this sediment was introduced into the system according to different phases. For each phase, the flow had not only the new added material but also the accumulated sediment from the other phases. At each stage several observations were made, concentration samples were obtained and velocity data was acquired in a downstream working zone. The velocity and concentration data were means to obtain the velocity and concentration profiles along the depth.

After being achieved a high concentration value, the methodology of the subsequent experiments involved the instantaneous velocity data obtained by an ADV, which also can give information about the development of the bed forms.

With regards to the observations, it seems to be a first wash load limiting concentration, which is a time-concentration depending function. After that moment the bed forms start to grow. Initially they are round and finished with a spike. With more concentration, this forms become a type of dunes, whose dimensions grow until the crests reach a maximum height. From then and onwards the forms move downstream

without increasing its height, so that the sediment accumulates under the forms, creating a flat deposit which grows with time.

The results also suggest that previously to the first limiting concentration, the concentration is lower in the deeper lever than in the center. Moreover the concentration distribution along the depth changes ciclically from more to less uniformity.

More experiments are required to determine if once the bed forms have are fully formed, the bed material transport due to the wash load is equal to the bed-material load transport.

# INDEX

CAPÍTOL PRELIMINAR .....	3
CAPITOL 1 .....	10
1. Característiques del lloc de treball .....	11
1.1. El laboratori de Simulació de processos geològics .....	11
1.2. Equipament i estructura del laboratori .....	11
1.2.1. Descripció del circuit hidràulic .....	11
1.2.2. Aparells de mesura .....	16
1.3. Cabal .....	16
CAPÍTOL 2 .....	18
2. Preparació de la fase experimental .....	19
2.1. Règim del flux .....	19
2.2. Establiment de les variables hidràuliques .....	19
2.2.1. Pendent .....	19
2.2.2. Càlcul de velocitats .....	20
2.2.1. Cabal .....	21
2.3. Obtenció i instal·lació dels aparells de mesura .....	21
2.3.1. Sifons .....	21
2.3.2. Sensor ADV .....	23
2.4. efecte de la capa límit i col·locació dels instruments de mesura .....	27
2.5. Número de froude .....	28
2.6. Granulometria i sedimentació .....	29
2.6.1. Granulometria del material .....	29
2.6.2. Anàlisi de la possibilitat que les partícules sedimentin .....	30
2.7. Criteris empírics de les configuracions del fons .....	31
CAPÍTOL 3 .....	33
3. Metodologia i observacions .....	34
3.1. Descripció del primer experiment (19/11/12) .....	34
3.1.1. Objectius .....	34
3.1.2. Procediment .....	34
3.1.3. Observacions .....	37
3.2. Descripció del segon experiment (29/11/12) .....	40
3.2.1. Objectius .....	40
3.2.2. Procediment .....	40
3.2.3. Observacions .....	43
3.3. Descripció del tercer experiment (5/12/12) .....	45
3.3.1. Objectius .....	45
3.3.2. Procediment .....	45
3.3.3. Observacions .....	45
3.4. Descripció del quart experiment (10/12/12) .....	46
3.4.1. Objectius .....	46
3.4.2. Procediment .....	46
3.4.1. Observacions .....	47
3.5. Descripció del cinquè experiment (17/12/12) .....	48
3.5.1. Objectius .....	48
3.5.2. Procediment .....	48
3.5.3. Observacions .....	49
3.6. descripció del sisè experiment (19/12/2012) .....	49

3.6.1.	Objectius i preparació .....	49
3.7.	Descripció del setè experiment (21/12/12).....	50
3.8.	obtenció dels resultats de concentració.....	50
3.9.	taula-Resum de les característiques dels experiments .....	50
CAPÍTOL 4 .....		52
4.	Resultats i discussió .....	53
4.1.	Concentracions .....	53
4.1.1.	Limitacions de la instal·lació .....	54
4.1.1.	Perfils de concentració experimentals.....	54
4.1.2.	Perfils de concentració teòrics.....	57
4.1.3.	Anàlisi del fenomen de ciclicitat en els perfils experimentals .....	60
4.1.4.	Mostrejos addicionals.....	60
4.2.	Formes de fons .....	63
4.2.1.	Granulometria del llim que queda dipositat al fons .....	63
4.2.2.	Característiques de les formes de fons del primer experiment.....	64
4.2.3.	Característiques de les formes de fons del segon experiment.....	67
4.3.	Relació entre l'evolució de les formes de fons, les dades de velocitat obtingudes amb el Vectrino i la concentració .....	70
4.3.1.	Primera concentració limitant .....	70
4.3.2.	Cinquè experiment .....	71
4.3.3.	Sisè experiment .....	73
4.3.4.	Segona concentració limitant .....	76
4.3.5.	Setè experiment.....	77
4.4.	Perfils de velocitat .....	79
4.4.1.	Perfils amb el Vectrino.....	81
4.5.	Temperatura i viscositat .....	82
CAPÍTOL 5 .....		86
5.	Conclusions .....	87
CAPÍTOL 6 .....		90
6.	Referències bibliogràfiques.....	91
CAPÍTOL 7 .....		93
6.1.	Llista d'il·lustracions .....	94
6.2.	Llista de figures.....	95
6.3.	Llista de taules .....	96



# CAPÍTOL PRELIMINAR

---

## Motivació

La hidràulica fluvial estudia el comportament dels rius pel que fa a cabals, calats, velocitats de flux i capacitat de transport de sediment. El coneixement del transport de sediments és necessari per tal d'afrontar problemes com ara el disseny de canals estables, l'erosió d'infraestructures o els canvis morfològics que experimenten els rius, ja sigui degut a la erosió dels marges o a la variació de la cota del fons dels rius. Sovint hem sentit a parlar de les inundacions produïdes com a conseqüència de les crescudes que arrosseguen grans quantitats de sediment, col·lapsen la llera i afecten les planes d'inundació, produint danys mediambientals i danys a les poblacions adjacents.

Per tal de tenir un coneixement del comportament del transport del sediment al llarg del curs del riu i poder fer front als problemes que engloba l'enginyeria fluvial s'han realitzat nombrosos estudis que analitzen la capacitat de transport de sediments pel fons i en suspensió, la formació de formes de fons i la tendència a l'erosió o a la sedimentació. No obstant, la major part dels estudis se centra en partícules de mides equivalents a les de les sorres i graves, deixant de banda a les partícules de mides equivalents a les dels llims i argiles. Si bé Einstein et al. (1940) exposava que aquestes partícules tan petites eren transportades pel flux sense tenir cap interacció amb el fons, estudis posteriors com el de Khullar (2010) conclouen que partícules de mides de 0,064 mm interactuen amb el fons de la mateixa manera que ho fa el sediment en suspensió de mides més grans. Aquesta afirmació és de gran importància en rius on el transport de sediment fi en suspensió és elevat, com en el riu Groc de Xina, o el riu Pilcomayo.

El riu Pilcomayo neix a les muntanyes andines de Bolívia i flueix cap a l'est de les planes del Chaco, on forma part de la frontera entre el Paraguai i Argentina. El riu hauria de desembocar al riu Paraguai, un afluent del Paranà. No obstant abans d'arribar-hi el riu perd la seva llera principal i es desvia formant una regió de pantans. El transport de sediment del riu és principalment d'argila i llims i segons l'article de Martín Vide (2008) el volum total de sediment es quantifica amb un valor mitjà de  $140 \cdot 10^6$  tonelles/any<sup>1</sup>, del qual un 89% és de gra inferior a 62 micres, és a dir són llims i argiles, i només l'11% és major a 62 micres. Les mides de les partícules transportades són menors en l'època humida que en l'època seca i a més en l'època humida pot arribar a circular el 98% del volum sòlid anual. Aquesta irregularitat del cabal sòlid reflexa que aquest sediment fi prové del rentat de la conca provocat per les pluges del període humit.

Degut a aquesta gran quantitat d'aigua i sediment d'un trimestre de duració provinent de la conca, el flux desborda sobre les planes; l'aigua alimenta un sistema complex d'aiguamolls, llacunes i flux subterrani mentre que el sediment forma dipòsits amb dimensions de l'ordre dels 10 km de costat i mig metre d'acreció cada any al voltant del punt de col·lapse. Degut a l'acumulació successiva de sediment la longitud "viva" del riu ha retrocedit molts quilòmetres en direcció aigües amunt. En efecte, i d'acord amb Martín Vide (2008) entre el 1947 i el 1976 es van perdre 150 km de riu (22 km només al 1976) i uns altres 150 km fins al 1990 (45 km només al 1984). Aquest retrocés ha afectat les poblacions riverenques (majoritàriament indígenes),

---

<sup>1</sup> Valor mitjà calculat a partir de 30 anys d'obtenció de dades.

l'ambient (degut a una tendència a la desertificació), i la presa equitativa de les aigües per part d'Argentina i el Paraguai, de la que depèn el seu desenvolupament agropecuari i en menor mesura, l'abastament d'aigua.

Per a solucionar els canvis bruscos del curs del riu entre Argentina i el Paraguai al 1991 es va establir un acord entre els dos països per excavar dos canals. Des d'aleshores els canals no han funcionat simultàniament més d'una temporada humida sinó que un d'ells ha capturat tota l'aigua del riu mentre que l'altre ha quedat reblert de sediment. Per a capturar l'aigua del riu, cada país ha dragat el canal per tal de mantenir el flux cap a alguna regió d'aigües avall, que malauradament també ha quedat reblerta de dipòsits de sediment fi.

L'observació de la problemàtica d'aquest cas real ha actuat com a incentiu per endinsar-me en l'estudi del transport de sediment fi en suspensió i formar part de la recerca experimental dirigida per un doctorand del departament d'Enginyeria Hidràulica. La tesina consistirà en la preparació, realització i anàlisi d'un seguit d'experiments per intentar caracteritzar el comportament del flux en presència de sediment fi assimilable a la càrrega de rentat.

## Introducció

Quan la tensió superficial que actua en el llit d'un riu excedeix un valor mínim definit com la tensió crítica de Shields, comença el transport del sediment. El conjunt de partícules afectat per l'inici de moviment es desplaça rodant, lliscant o saltant al llarg del llit del riu i es coneix com a càrrega de fons (*bed load*). A mesura que la tensió superficial augmenta part d'aquest sediment transportat pel fons es posa en suspensió i és transportat en aquest estat gràcies a les fluctuacions turbulentes del flux. Aquest conjunt de partícules esdevé la càrrega en suspensió (*suspended load*). La suma de la càrrega de fons i la càrrega en suspensió és la càrrega total (*total load*), altrament anomenada càrrega de material de la llera (*bed-material load*) en cas que tot el material provingui de la llera. Ara bé, moltes vegades el material en suspensió està format per una quantitat significant de sediment que no es pot trobar ni en el llit ni en els marges del riu. Aquesta part de material en suspensió s'anomena càrrega de rentat (*wash load*) i tal i com ja s'ha explicat, prové de l'erosió de la conca del riu. L'erosió de la conca del riu engloba tan els efectes que provoca l'escolament al terreny -erosionant petits barrancs - com l'erosió de les vores del riu principal i afluent.

La quantitat de càrrega de rentat transportada per la corrent depèn no només de les condicions hidràuliques del flux i de les característiques del sediment, sinó també de la seva disponibilitat. La disponibilitat de la càrrega de rentat va associada a la quantitat de material erosionat a la conca, que és el que posteriorment circularà o es dipositarà a la capa més superficial del llit del riu, tot i que la deposició temporal de la càrrega de rentat al fons ha estat qüestionada per alguns autors.

El concepte de càrrega de rentat ha anat variant al llarg del temps; Einstein et al. (1940) van ser dels primers en introduir aquest concepte, definint-lo com les fraccions de càrrega de sediment la mida de les quals no es troba en significants quantitats ni al llit ni als marges i que és fàcilment transportable pel flux sense quedar dipositada al fons. Al 1950, Einstein va perfeccionar aquesta teoria limitant la mida de les partícules al valor pel qual el 10% del material de llit és més fi. Al 1953, Einstein and Chien van contradir la primera teoria que afirmava que la càrrega de rentat no es dipositava al fons; els seus experiments indicaven que aquest material fi s'establí temporalment al llit. No obstant, per una petita quantitat present al fons grans quantitats es desplacen en suspensió pel flux. Així, quan hi ha un canvi en les condicions del flux, l'intercanvi entre el material en circulació i el dipositat al fons es restringeix únicament a la superfície del llit. En canvi, en el cas del material provinent de la llera (*bed-material load*) la fracció de material present en el llit en relació al material que circula en suspensió és més gran. De manera que quan canvien les condicions hidràuliques, hi ha suficient material disponible pel transport per sota de la capa del llit. D'aquesta manera el transport d'aquest només depèn de les característiques del flux i de les característiques del sediment (Garde, 1985).

El concepte va canviar quan Shen (1970) va definir la càrrega de rentat com la mida del sediment per la qual la disponibilitat és inferior a la capacitat de transport per unes condicions hidràuliques donades. Seguint aquest criteri, ja no s'obtenia un valor constant màxim de la mida de les partícules que entren dins la definició de càrrega de rentat, sinó que aquest valor incrementava amb l'augment de transport de material fi. En canvi, Partheniades (1977) no feia una distinció en funció de la mida de les partícules

sinó que parlava d'una coexistència entre dues tipologies de sediment; la primera té una funció de càrrega de fons, és a dir, tot i que per alts cabals es transporta en suspensió, per cabals baixos diposita al fons. La segona tipologia mai pot tenir una funció de càrrega de fons; es transporta en suspensió sense deixar cap rastre en el fons o es diposita en estuaris o inclús en reserves en les que la tensió tangencial és suficientment baixa com per permetre la deposició. Però va posar de manifest que, tot i que aquesta última tipologia no depenia de les condicions de flux ni de la composició del fons, una part de la càrrega de rentat sí que podia exercir una funció de càrrega de fons.

Per tal de donar un valor aproximat a la mida límit, molts enginyers han definit la càrrega de rentat com els llims i l'argila amb una mida inferior a 0,0625mm, però ja al 1986 Woo et al. afirmava que no era possible establir una frontera, ja que en rius amb molt pendent, on el material del llit té una mida gruixuda, la sorra i la grava fina pot ser considerada com a material de rentat sempre que la disponibilitat sigui inferior a la capacitat. En canvi per a rius de poc pendent, sí que són els llims i l'argila els que passen a fer aquesta funció (Albertson, 1957). És per aquest motiu que molts articles científics parlen de material fi per a referir-se a la càrrega de rentat. Així, en rius amb llit de graves, la sorra transportada en suspensió passa a formar part de la fracció més fina mentre que en rius amb llit sorrenc, la definició de càrrega de rentat queda cenyida als llims i a les argiles.

Si bé és cert que s'han realitzat experiments que analitzen el transport en suspensió de material fi, les mostres utilitzades sovint comprenen mides de sorres, a més de llims i argiles. Així doncs els estudis existents fan referència a un transport de material no uniforme i no tracten la influència que podria tenir un riu que transportés només càrrega de rentat. Coleman (1991) va estudiar la influència que tenia el sediment en suspensió format per una composició de llims i sorres de partícules fins a 0,212mm en la modificació de les propietats del flux. L'estudi consistia en un anàlisi experimental en un canal rectangular obert de 15,24m de longitud, 1,0m d'amplada i 0,305m de profunditat. Mentre es mantenia el cabal, la profunditat i el pendent constants s'anava variant sistemàticament la quantitat de material fi en suspensió; la seqüència experimental començava amb aigua clara, seguit per una injecció de 0,25kg de la mostra del material. Després d'una hora de mesclat s'afegia la següent injecció, i es repetia el procés fins que 1,25kg d'aquest material havien estat introduïts al flux; moment a partir del qual s'havia assolit la concentració limitant.

Els resultats van ser un perfil uniforme de concentració al llarg de tota la profunditat, variacions del perfil de velocitats no sistemàtiques amb la variació de la concentració, i un coeficient de Von Karman de valor 0,41 representatiu per a tots els perfils de velocitat. Pel que fa a la variació de la intensitat de la turbulència, no es va trobar cap variació sistemàtica com a resposta als canvis del sediment en suspensió.

Recentment, en la tesina de Pineda (2010) es va analitzar la influència que tenia la presència de sediment en suspensió en un flux d'aigua clara contingut en un canal de laboratori de pendent suau. En aquest cas el sediment també era no uniforme amb una  $D_{50}^2=0,025\text{mm}$  i una desviació típica<sup>3</sup> de 2,5. Les característiques de l'experiment eren les mostrades en la Taula 1.

---

<sup>2</sup>  $D_{50}$  correspon a la mida per la qual el 50% del material és més petit.

<sup>3</sup> Paràmetre adimensional de la mesura de la dispersió definit com:  $\sigma_g = \sqrt{D_{84}/D_{16}}$

Q (m <sup>3</sup> /s)	s (%)	h (m)	B (m)	D <sub>50</sub> (μm)	ρ <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )
0,012	0,02	0,092	0,37	25	2650	14,06

**Taula 1.** Característiques hidràuliques i granulomètriques i concentració resultant de l'experiment de Pineda (2010).

La mida de les partícules es va calcular amb un número de Rouse<sup>4</sup> majorat per tal d'assegurar que les partícules no precipitarien. Després de realitzar l'assaig es va aconseguir una concentració de 14,06g/l, que representava el 56% de la concentració màxima esperada. De tal manera que el 44% del material no estava en suspensió sinó reposant al fons formant un conjunt de formes asimètriques d'una altura mitjana de 3,5mm, així com en altres parts d'un circuit hidràulic tancat. Això indicava que el transport de sediment en suspensió i el transport de fons coexistien per a determinades concentracions, i no només depenia de la granulometria.

Tenint en compte aquests resultats, en aquesta tesina ens plantejem un nou experiment en el mateix canal de laboratori i amb sediment molt fi de  $D_{50}=0,004$  mm per tal d'entendre el comportament del transport de la càrrega de rentat, que ha estat ben poc analitzat fins a l'actualitat.

---

<sup>4</sup> Relació que estableix que la velocitat de tall de les partícules ha de ser superior a la seva velocitat de caiguda.

## Objectius

Per a dur a terme la caracterització del flux en presència de càrrega de rentat s'han fixat diferents objectius en relació a les concentracions, velocitats i formació de les formes de fons.

En primer lloc es tracta de determinar si existeix una primera concentració limitant de càrrega de rentat a partir de la qual el material comença dipositar al fons. I en cas d'existir, saber si hi ha una segona concentració limitant a partir del qual el fons ja està totalment format.

Per definició es considerarà que la primera concentració limitant s'assoleix quan en tota la longitud del canal s'hi observen les primeres formes. Donat que aquest criteri es determinarà per mitjà de la observació el fet de definir la primera concentració limitant com aquell primer moment en que s'observa la primera forma de fons podria induir a errors temporals més grans.

En segon lloc es vol veure quina és la distribució de concentració al llarg del calat i com la uniformitat de la concentració al llarg del calat es veu afectada per la concentració.

Es tractarà també d'estudiar el comportament de la velocitat al llarg del temps i al llarg del calat.

Per a donar resposta a aquestes qüestions es portarà a terme una experimentació en un canal de laboratori de fons pla i en aigua clara. Es tractarà doncs d'aïllar completament el fenomen a estudiar i crear unes condicions estables al llarg del temps per tal d'obtenir una idea clara del comportament d'aquest tipus de partícules.

Amb tots els resultats obtinguts es vol obtenir una idea del transport de la càrrega de rentat i si és possible determinar si una vegada sobrepassat el límit de la segona concentració limitant el transport de càrrega de rentat és el mateix que el transport de la càrrega de material provinent de la llera. És a dir, si el coneixement existent en relació al transport de material amb origen a la llera es pot extrapolar al transport de material més fi generalment amb origen a la conca.

# CAPITOL 1

---



# 1. Característiques del lloc de treball

---

## 1.1. EL LABORATORI DE SIMULACIÓ DE PROCESSOS GEOLÒGICS

El conjunt d'assajos i proves s'han realitzat al Laboratori de Simulació de Processos Geològics (SIMGEO) localitzat a la Facultat de Geologia de la UB. SIMGEO ens ha ofert un espai amb l'equipament necessari per tal de poder dissenyar i desenvolupar el conjunt d'assajos experimentals que permetran dur a terme els objectius de la tesina.

## 1.2. EQUIPAMENT I ESTRUCTURA DEL LABORATORI

El laboratori té una superfície de 500 m<sup>2</sup>, la qual està dividida en diferents espais; en un extrem hi ha un laboratori de petrologia experimental i síntesis mineral, mentre que en l'altre extrem s'hi localitza una sala informàtica equipada amb ordinadors i el software necessari per a desenvolupar models matemàtics i simulacions en sistemes d'informació geogràfica. L'espai central està format per un canal amb el seu circuit hidràulic. Aquest espai és el que s'ha utilitzat per a la tesina i per tant el que serà descrit a continuació.

### 1.2.1. Descripció del circuit hidràulic

El canal del laboratori funciona a través d'un circuit hidràulic tancat, és a dir, un circuit en el que no hi ha pèrdues i que per tant el volum d'aigua en circulació es manté sempre constant. Això vol dir, que en el moment en que s'introdueixi la concentració de sediment requerida per a fer la experimentació, el volum de sediment introduït es quedarà en el sistema.

El circuit, controlat per un panell de control digital, està format pels següents elements: 4 dipòsits de PVC connectats entre ells, una bomba que impulsa l'aigua fins a l'extrem d'aigües amunt del canal, el canal, un decantador i una segona bomba que retorna l'aigua del decantador als dipòsits.



**Il·lustració 1.** Vista lateral de les instal·lacions.

Quan el sistema està en repòs l'aigua queda emmagatzemada en els quatre dipòsits, en el conjunt de conduccions que connecten els diferents elements del canal i en el decantador. En la Il·lustració 2 es mostra la planta del canal amb cadascun dels elements de la instal·lació.

Quan el canal es posa en funcionament, l'aigua del quart dipòsit és impulsada aigües amunt del canal a través d'una bomba. Una vegada l'aigua passa per la comporta que hi ha aigües amunt passa a través d'un difusor i entra al canal. El difusor és un complement que es va elaborar manualment amb l'objectiu de suavitzar l'entrada del flux, reduir les ones superficials, i per tant, aconseguir que l'aigua que passava per la comporta d'aigües amunt assolís un règim uniforme de manera més immediata. Està format per múltiples làmines de canyes de plàstic que cobreixen tota l'amplada del canal i estan col·locades una sobre l'altra fins a cobrir una cota de 10cm, que és el màxim assolible per les característiques del sistema.

Quan el flux d'aigua passa a través de la comporta d'aigües avall, aquesta és enviada al decantador, el qual té l'objectiu de reduir el sediment en suspensió que entren als dipòsits i els embruten.

A continuació, l'aigua és enviada al dipòsit 2 mitjançant la segona bomba. Els dipòsits estan connectats entre ells per tal de que l'aigua recirculi i evitar que el dipòsit 4 es quedi sense l'aigua necessària per a tornar a començar el cicle.

### Panell de control digital

El panell de control està format per comandaments i comptadors digitals programables a través dels quals es pot fer tot el control dels diferents paràmetres que fan variar les característiques del flux del canal. Els paràmetres són: el cabal, la inclinació de les comportes i el pendent del sistema.

### Canal hidràulic

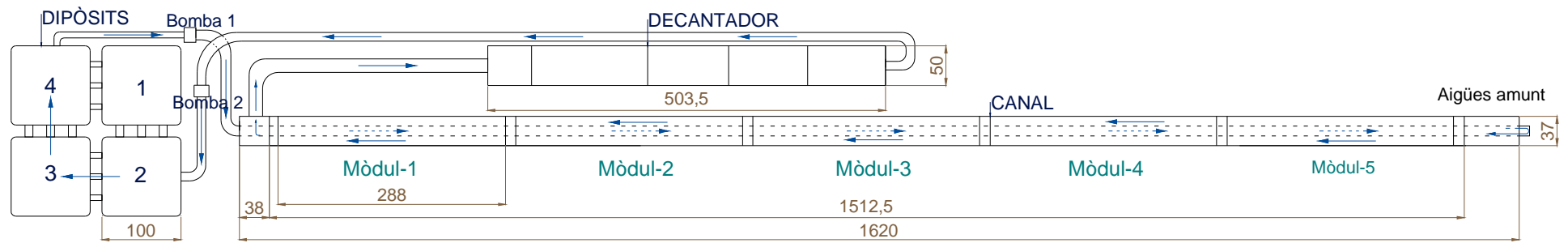
El canal té una longitud total de 17,06m, una amplada de 0,37m i una altura de 0,42m. Per tal de regular les condicions de contorn aigües amunt i aigües avall, el canal disposa de dues comportes situades a 0,97m respecte cadascun dels extrems.

Les parets laterals del canal són de vidre blindat transparent i que no deforma les imatges. Aquestes parets estan col·locades sobre una base metàl·lica suficientment rígida com per no permetre flexions longitudinals ni transversals. La unió dels vidres amb el fons és perfectament estanca i tot el fons del canal és metàl·lic.

El canal disposa d'un mecanisme d'elevació que permet fer els assajos amb diferents pendents. Els pendents es controlen a través del panell de control, el qual està calibrat de tal manera que els valors del pendent són diferents als reals. A continuació es mostra una taula amb les equivalències entre els pendents que s'utilitzaran en la fase experimental:

Pendent que mostra el panell de control	Pendent real
0	0
0,01	0,000303
0,02	0,000424

**Taula 2.** Relació entre el pendent del panell de control i el pendent real.



II-Il·lustració 2. Planta del canal i del seu sistema de recirculació.

La modificació del pendent es tradueix en un canvi de l'altura d'aigües amunt. Aquest extrem pot pujar o baixar mitjançant un sistema de suspensions pneumàtiques format per 6 pistons (tres a cada costat). En l'extrem d'aigües avall hi ha un dispositiu de frontissa que s'adequa a l'altura introduïda per tal de garantir l'estabilitat del canal.

El canal està fix transversalment, de manera que no pot vascular al voltant de l'eix longitudinal. La solera del canal no és completament horitzontal; la inclinació es troba al voltant del 0,41% respecte la horitzontal.



**Il·lustració 3.** Vista del canal.

### Bombes

El sistema de bombeig compta amb dues bombes: una que impulsa l'aigua des del dipòsit 4 al canal i una altra que porta l'aigua des del decantador fins al dipòsit 2. Des del panell de control es pot regular el cabal que passa per la primera bomba. Quan l'aigua arriba al decantador i sobrepasa una altura de 34cm la segona bomba s'activa automàticament per evacuar l'aigua del decantador.

### Decantador

El decantador té una longitud de 5,02 m, una amplada de 0,5 m i una altura de 1,30 m. Està fet d'acer inoxidable i està dividit en 5 seccions separades per comportes verticals que es poden desplaçar manualment en sentit vertical.

La funció del decantador és la de reduir el sediment en suspensió que entra en els dipòsits. Això s'aconsegueix gràcies a la major secció respecte la conducció incident; pel principi de continuïtat, per tal de mantenir el mateix cabal la velocitat del flux disminueix en augmentar la secció. Com a conseqüència de la reducció de velocitat del flux, la trajectòria de les partícules en suspensió queda dominada per les forces de pes, que actuen atraient a les partícules cap a la superfície del decantador.

Per tal de realitzar el nostre experiment necessitem que el sediment recirculi i es mantingui en suspensió. Si per una



**Il·lustració 4.** Mòduls del decantador.

mateixa concentració de partícules presents al flux aquestes decanten després d'un cert temps d'haver posat en funcionament el sistema aleshores el volum de sediments que arriba novament al canal després d'haver passat pel decantador és un percentatge inferior al calculat inicialment, i per tant, el perfil de concentracions mesurats en una secció del canal per una mateixa concentració és variable. Després d'haver fet probes i haver observat aquest fenomen es va decidir col·locar una bomba a cada mòdul del decantador, les quals gràcies a la turbulència generada permetrien mantenir les partícules en suspensió. Això mateix es va fer en cadascun dels dipòsits, ja que en aquests el material fi podia patir el mateix tipus de decantació.

## Dipòsits

El sistema està format per 4 dipòsits de PVC amb capacitat d' $1\text{m}^3$ . Al voltant dels dipòsits hi ha una estructura metàl·lica que serveix per a evitar possibles moviments transversals dels dipòsits. Estan connectats entre ells a través de conduccions metàl·liques rectangulars. Les característiques de les conduccions dels dipòsits són les següents:

Conduccions	Dimensions exteriors (cm)	Dimensions interiors (cm)	Nº	Volum d'aigua contingut ( $\text{cm}^3$ )	Volum total ( $\text{cm}^3$ )	Volum total ( $\text{m}^3$ )
Dipòsit 1- Dipòsit 2	15x10x40	15,6x9,4x39,4	3	34.665,70	58.267,87	0,058
Dipòsit 3- Dipòsit 4			3			
Dipòsit 2- Dipòsit 3			3			
Dipòsit 4- Dipòsit 1	15x7x50	15,6x6,4x39,4	3	23.602,18		

Taula 3. Volum d'aigua contingut en les conduccions dels dipòsits.

## Conduccions

Quan el sistema està en funcionament, el volum d'aigua en circulació ve donat pel volum d'aigua contingut en els dipòsits, en el decantador, en el canal i en les conduccions.

Conduccions	Radi exterior (cm)	Radi interior (cm)	Longitud (cm)	Volum ( $\text{cm}^3$ )
Dipòsit 4-Bomba 1	3,77	3,47	206	7792,486
Bomba 1-Canal	6,16	5,66	1855	186.692,40
Canal-Decantador	8,52	8,02	305	61.630,89
Decantador-Bomba 2	5,45	4,95	658	50.650,78
Bomba 2-Dipòsit 2	5,45	4,95	298	22.939,11
<b>Volum total (<math>\text{m}^3</math>)</b>				<b>0,33</b>

Taula 4. Càlcul del volum d'aigua contingut en les conduccions del sistema.

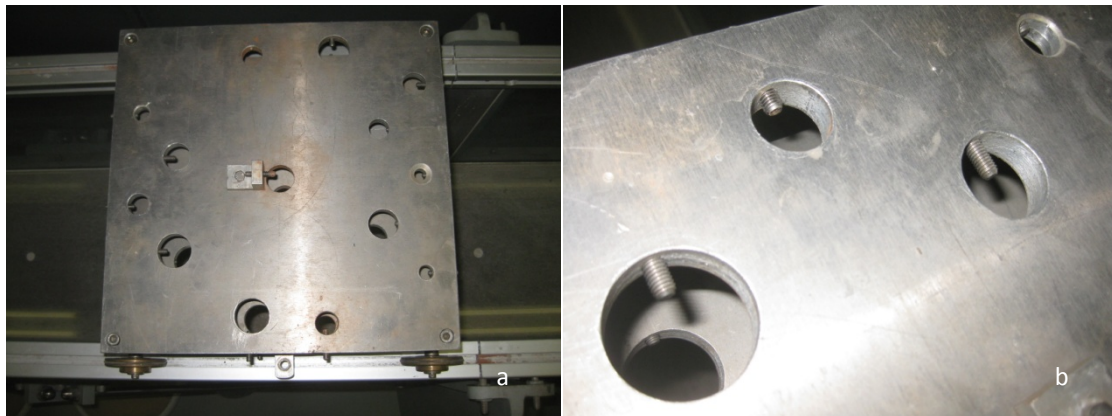
El volum total en les conduccions tenint en compte les conduccions entre dipòsits és de  $0,39\text{ m}^3$ .



Il·lustració 5. a) Conducció Bomba 2- Dipòsit 2 b) Conducció Decantador- Bomba 2.

### 1.2.2. Aparells de mesura

A la part superior de les parets de vidre del canal hi ha unes guies d'acer inoxidable que permeten el desplaçament longitudinal d'un carro metàl·lic. El carro està format per un sistema de doble xapa amb un total de 14 forats que travessen les dues xapes verticalment. Aquests forats disposen d'un cargol que permet fixar els aparells de mesura necessaris per a obtenir els resultats.



Il·lustració 6. a) Carro metàl·lic b) Detall dels forats.

### 1.3. CABAL

El cabal que circula pel canal es pot regular a través del panell de control. No obstant, el cabal que circula pel canal no s'adequa al valor que mostra el panell. En l'apartat 2.2.2 es mostren les equivalències entre el cabal teòric i el cabal real.

El cabal òptim per a l'assaig és aquell que permet mantenir el circuit hidràulic en funcionament durant un temps suficientment alt com per a poder observar i prendre les dades necessàries, però mantenint un calat adient per a la obtenció dels perfils de velocitat i concentració.

Per a cabals molt alts, la diferència entre el cabal de sortida del dipòsit bombejat per la bomba 1 i el cabal d'entrada bombejat per la bomba 2 és molt gran. Això fa que el dipòsit 4 no tingui suficient temps com per a recuperar el nivell mínim d'aigua que permet que la canonada que connecta amb la bomba 1 funcioni a pressió. La conseqüència és un cabal en circulació inferior al teòric, a més de poder malmetre

la bomba degut a una mala refrigeració. El temps a partir del qual la bomba deixa de funcionar a pressió és el que determina el màxim temps per a fer l'assaig, i en aquests casos és molt reduït.

En canvi, amb un cabals molt baixos, el temps augmenta generosament, no obstant, d'acord amb la fórmula de Manning, el calat del canal queda molt reduït.

Per tal de trobar el cabal òptim es va provar quin era el cabal més elevat que permetia aconseguir el màxim nivell d'aigua en el decantador mantenint un nivell d'aigua constant en els dipòsits el durant un període de temps prou gran, com és 1 hora. Per a 10.000 l/h teòrics no va ser possible mantenir estable el nivell dels dipòsits una vegada s'assolia el màxim en el decantador. L'òptim es va assolir per un cabal teòric de 8.850l/h, segons el panell controlador.

Per intentar augmentar el calat sense necessitat d'augmentar el cabal, i així mantenir un temps d'assaig suficientment gran, es van instal·lar un conjunt de 6 mànegues de PVC entre el decantador i el dipòsit 1. Aquestes mànegues actuaven com a sifó, és a dir, transportaven l'aigua d'un lloc a un altre gràcies a la diferència d'altures de les superfícies lliures de l'aigua. D'aquesta manera ajudaven a la bomba 2 a impulsar l'aigua des del decantador fins al dipòsit 1. Això es produïa sempre i quan les mànegues estiguessin a una altura superior a les superfícies lliures. Donat que aquest sistema només permetia augmentar 0,3cm el calat del canal, i no teníem la certesa que el pas de l'aigua fos constant al llarg del temps, vam optar per treballar sense les mànegues.

## CAPÍTOL 2

---



## 2. Preparació de la fase experimental

### 2.1. RÈGIM DEL FLUX

El número de Froude és la relació existent entre les forces d'inèrcia i les forces de gravetat, i ens permet definir el règim del flux de la següent manera:

$$Fr = \frac{\text{Forces d'inèrcia}}{\text{Forces de gravetat}} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}} \rightarrow \begin{cases} Fr > 1 \rightarrow \text{Règim supercrític} \\ Fr = 1 \rightarrow \text{Règim crític} \\ Fr < 1 \rightarrow \text{Règim subcrític} \end{cases} \quad Eq[1]$$

A més, un flux pot classificar-se en permanent o no permanent, uniforme o no uniforme, o bé unidimensional, bidimensional o tridimensional.

Un flux es considera permanent quan en un punt donat les seves característiques hidràuliques no varien amb el temps, en canvi el flux es considera uniforme quan en un determinat temps el flux presenta les mateixes característiques en totes les seccions del canal.

En la nostra fase experimental ens interessava treballar amb un règim uniforme per poder restringir els anàlisis i mostres en un únic punt del canal en un determinat instant de temps.

### 2.2. ESTABLIMENT DE LES VARIABLES HIDRÀULIQUES

#### 2.2.1. Pendent

En primer lloc es va determinar quin era el pendent pel qual s'assolien les condicions de règim uniforme per a cadascun dels cabals. Per a fer això es va mesurar el calat en un punt d'aigües amunt i un punt d'aigües avall del canal i es va calcular per a quin pendent s'aconseguien calats pràcticament iguals. En la Taula 5 s'indiquen els pendents més adequats per a cadascun dels cabals. Aquests cabals són els que mostra el panell de control, no obstant no equival a la quantitat d'aigua per unitat de temps que circula pel canal. El cabal real s'ha calculat en l'apartat 2.2.2.

Cabal controlador (l/h)	Codi pendent	Y <sub>amunt</sub>	Y <sub>avall</sub>	Δy	i quasi uniforme
8850	0	10,156	9,618	-0,538	
8850	1	9,820	9,618	-0,202	
8850	2	9,532	9,622	0,090	2
8500	2	9,434	9,502	0,068	2
8500	1	9,620	9,502	-0,118	
8500	0	9,962			
8000	0	9,766			
8000	1	9,466	9,274	-0,192	
8000	2	9,150	9,274	0,124	2
7500	2	8,968	9,064	0,096	2
7500	1	9,180	9,064	-0,116	

7500	0	9,480			
7000	0	9,210			
7000	1	8,920	8,802	-0,118	
7000	2	8,684	8,802	0,118	2
6500	2	8,390	8,550	0,160	
6500	1	8,620	8,550	-0,070	1
6500	0	8,962			

**Taula 5.** Relació entre els cabals, calats i pendents quasi uniformes obtinguts.

On:

Codi pendent	Pendent real
0	0
1	0,000303
2	0,000424

**Taula 6.** Codi del pendent.

Tal i com hem dit, el fet de poder establir condicions uniformes o quasi uniformes al llarg del canal ens permetria assegurar que les propietats del flux no variessin al llarg de les seccions, i que per tant només calgués prendre mesures de velocitat i mostres de la concentració de l'aigua en un únic punt del canal.

### 2.2.2. Càlcul de velocitats

Amb els pendents quasi-uniformes determinats per a cadascun dels cabals teòrics es va obtenir un calat pràcticament uniforme al llarg de tot el canal. Per tal d'estudiar la velocitat del flux en aquest calat es va mesurar la velocitat en diferents cotes amb l'ajuda d'un molinet. Aquestes cotes eren les que es trobaven a un 20%, un 60% i un 80% del calat. Les dades de velocitat en cada cota es van ajustar amb una línia de tendència logarítmica. D'aquesta manera es van obtenir un perfil logarítmic de velocitats assimilable al propi dels fluxos turbulents. Segons Cardoso (1998) el perfil logarítmic de velocitats per un flux turbulent per fronteres llises és el següent:

$$\frac{v}{v^*} = 2,5 \cdot \ln\left(\frac{v^* \cdot y}{v}\right) + 5,5 \quad Eq[2]$$

Amb l'equació logarítmica es poden obtenir els valors de la velocitat més superficials, els quals no poden ser determinats amb aparells de mesura com el molinet, ja que aquests han d'estar totalment submergits. Només cal substituir la "x" pel valor del calat en cada cas.

La velocitat mitjana d'un perfil logarítmic s'ha calculat amb el següent criteri:

$$v_m = \frac{v_{0,2-H} + v_{0,8-H}}{2} \quad Eq[3]$$

El coeficient de Manning es calcula a través de l'Equació 4:

$$n = \frac{1}{v_m} \cdot \sqrt{i \cdot R_H^{4/3}} \quad Eq[4]$$

On:

$n$ : Coeficient de rugositat de Manning.

$v_m$ : Velocitat mitjana.

$R_H$ : Radi hidràulic, que es calcula dividint la secció entre el perímetre mullat. En el cas d'un canal prismàtic el radi hidràulic queda com:

$$R_H = \frac{B \cdot y}{B + 2 \cdot y}$$

En la Taula 7 es mostra la velocitat mitjana obtinguda per a cada cabal teòric. Donat que el cabal que mostra el panell de control no correspon al cabal real, s'ha recalculat el cabal utilitzant l'Equació [5]:

$$Q = v_m \cdot S \quad Eq[5]$$

Cabal controlador (l/h)	Calat (cm)	Vmitjana (m/s)	Manning	Cabal real (m <sup>3</sup> /s)	Cabal real (l/h)
8850	9,64	0,33	0.010	0,012	42391
8500	9,50	0,32	0.010	0,011	40493
8000	9,29	0,32	0.010	0,011	38962
7500	9,02	0,31	0.010	0,010	36637
7000	8,66	0,29	0.011	0,009	33436
6500	8,48	0,28	0.010	0,009	31062

**Taula 7.** Calats, velocitats mitjanes i cabals reals.

### 2.2.1. Cabal

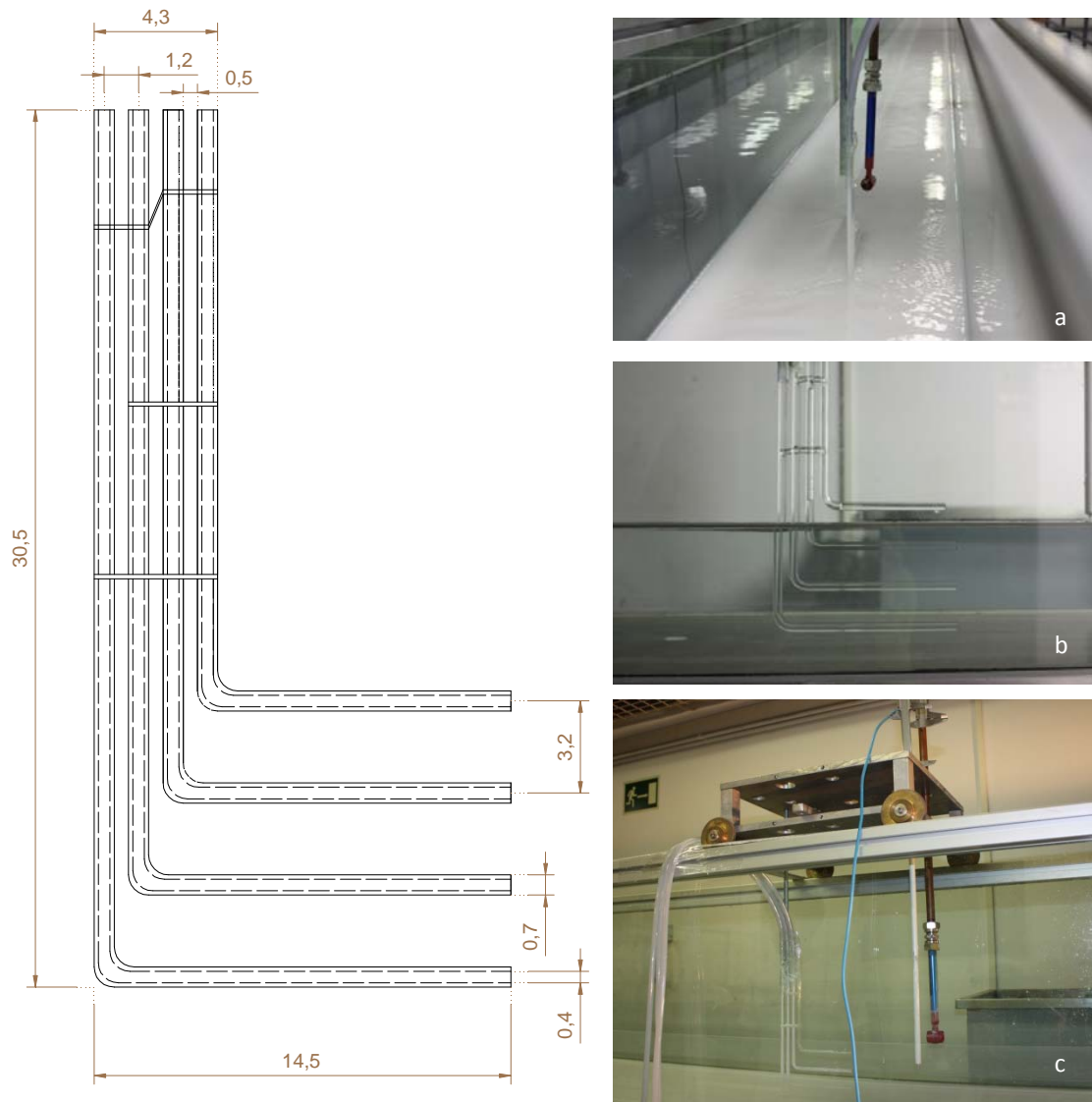
Tot i que l'òptim assolit va ser pels 8.850 l/h del panell controlador, que equival a 0,011 m<sup>3</sup>/s, en els experiments es va optar per treballar amb un cabal de 0,009 m<sup>3</sup>/s, ja que ens donava un cert marge d'error i la pèrdua de calat només representava un 8,5% menys respecte el calat obtingut amb els 0,011 m<sup>3</sup>/s.

## 2.3. OBTENCIÓ I INSTAL·LACIÓ DELS APARELLS DE MESURA

En primer lloc es va pensar en quins aparells i instruments podrien utilitzar-se en les diferents fases experimentals per a obtenir un seguit de resultats, que permetrien analitzar i discutir les qüestions plantejades en els objectius de la tesina.

### 2.3.1. Sifons

Per tal de poder definir un perfil de concentracions calia obtenir mostres d'aigua i sediment en diferents calats del canal. Per tal d'extreure mostres d'aigua es va dissenyar un instrument de mesura format per quatre tubs de vidre de 0,7cm de diàmetre exterior i 0,4cm de diàmetre interior separats una distància de 3,2cm entre centres. D'aquesta manera s'obtidrien mostres al llarg d'un calat de 6,4 cm. Per tal de facilitar la seva subjecció al carro del canal els quatre tubs estarien soldats entre ells i tindrien una forma de 90°. Així doncs només caldria lligar l'aparell a una barra de ferro, que es pot fixar al carro del canal a través d'un sistema de pressió.



**Il·lustració 7.** A l'esquerra vista en alçat dels sifons (mesures en centímetres). A la dreta imatges de la col·locació dels sifons al canal a) Sifons b) Subjecció de l'instrument de mesura en el centre del canal mitjançant una barra c) Unió dels sifons amb els tubs de plàstic.

Els extrems oposats dels tubs de vidre anirien units a tubs de plàstic, que conduirien l'aigua i el sediment fins a un recipient de plàstic.

Amb aquest sistema es podrien obtenir mostres de manera àgil, obrint unes pinces, les quals s'encarregarien d'obstruir el pas de l'aigua en moments en que no se n'hagués d'extreure.



**Il·lustració 8.** Extracció de mostres d'aigua i sediment a una cota inferior a la solera del canal.

### 2.3.2. Sensor ADV

En relació a la obtenció del perfil de velocitats es va optar per un sensor ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) model Vectrino de 4 sensors. La seva funció específica és la de mesurar la velocitat d'un flux en tres dimensions; s'obté una magnitud per a cada component ( $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ) de manera que per a cadascun dels punts seleccionats es pot conèixer el vector velocitat amb direcció, magnitud, sentit i punt d'origen.

#### Funcionament

El sensor utilitza l'efecte Doppler, que es basa en els següents lemes:

- *Observador que s'allunya d'un emissor en repòs*: en aquest cas la freqüència observada  $f'$  és superior a la freqüència  $f$  emesa pel focus, ja que sembla que l'ona viatgi a més velocitat.

$$f' = \frac{v_{total}}{\lambda} = \frac{v_{ona} + v_e}{\lambda} = \frac{v_{ona} + v_e}{\frac{v_{ona}}{f}} = \frac{v_{ona} + v_e}{v_{ona}} \cdot f \quad Eq[6]$$

On  $v_e$ : velocitat emesa pel focus.

- *Focus que s'aproxima a un observador en repòs*: en aquest cas no és que l'ona sembli que viatja a més velocitat sinó que a l'observador li sembla que la longitud d'ona rebuda  $\lambda'$  és més curta que la real  $\lambda$ , de tal manera que nota una freqüència superior a l'emesa.

$$f' = \frac{v_{ona}}{\lambda'} = \frac{v_{ona}}{\lambda - v_f \cdot T} = \frac{v_{ona}}{v_{ona} \cdot T - v_f \cdot T} = \frac{v_{ona}}{v_{ona} - v_f} \cdot f \quad Eq[7]$$

On  $v_f$ : velocitat emesa pel focus

Aquestes equacions es poden fer extensibles al funcionament del Vectrino. Aquest opera emetent pulsos d'ultrasons des d'un transmissor acústic central. Tal i com es mostra en la Figura 1 el so és emès amb una freqüència  $f_e = \frac{c}{\lambda_e}$ , sent  $c$  la velocitat del so en l'aigua i  $\lambda_e$  la longitud d'ona emesa. Aquestes ones xoquen amb les partícules del fluid, les quals porten una velocitat  $V$ , i finalment l'ona reflexada per la partícula és captada pels receptors, situats al voltant de l'emissor. L'angle d'inclinació dels receptors defineix el volum de mostra de les partícules, que normalment es troba entre 5 i 18 cm de distància de l'emissor. Els receptors mesuren el senyal de retorn de la velocitat del so emès per les partícules localitzades en el volum de mostra, altrament anomenat volum de control.

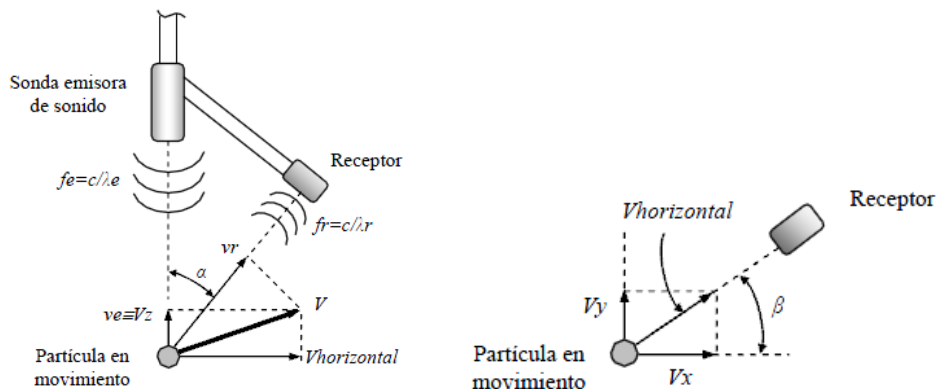


Figura 1. Vista frontal i en planta de l'emissor i el receptor d'ones del Vectrino.

Les bases teòriques de càlcul són les següents:

- La freqüència del so vista des de la partícula en moviment és:

$$f' = \frac{v_{total}}{\lambda} = \frac{v_{ona} + v_e}{v_{ona}} \cdot f = f_e \cdot \left( \frac{c + v_e}{c} \right) \quad Eq[8]$$

- La freqüència del so vista des del receptor és:

$$f_r = \frac{v_{ona}}{\lambda'} = \frac{v_{ona}}{v_{ona} - v_f} \cdot f = f' \cdot \left( \frac{c}{c - v_f} \right) \quad Eq[9]$$

I la freqüència Doppler serà:

$$f_D = f_r - f_e = f' \cdot \left( \frac{c}{c - v_f} \right) - f_e = f_e \cdot \left( \frac{c + v_e}{c} \right) \cdot \left( \frac{c}{c - v_f} \right) - f_e = \frac{f_e}{c} \cdot (v_e + v_f) \quad Eq[10]$$

Expressant aquestes velocitats en les components del vector velocitat del fluid:

$$f_D = \frac{f_e}{c} \cdot (v_x \cos \beta \cdot \sin \alpha + v_y \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha + v_z \cdot (\cos \alpha + 1)) \quad Eq [11]$$

A partir de l'Equació 9, plantejant tres equacions amb tres incògnites s'obtenen les magnituds de les tres components. D'aquesta manera, amb tres dels quatre receptors dels quals disposa el Vectrino, l'aparell és capaç de determinar les components de la velocitat.

Les mesures de velocitat que es poden obtenir a través del Vectrino són d'elevada precisió, en comparació amb les mesures que fan altres aparells de mesura que disposàvem, com ara el molinet OTS<sup>5</sup>. Per altra banda, l'ADV és un instrument que a més de calcular el vector velocitat és capaç de donar informació sobre la turbulència, fet que ens podia resultar útil a l'hora d'entendre el comportament de les partícules de sediment. Així doncs es va optar per aquesta solució.

### Col·locació i instal·lació

Per tal de poder utilitzar el Vectrino calia pensar en un sistema que permetés subjectar-lo i mantenir-lo vertical en el centre del canal. A més, aquest sistema hauria de permetre una àgil maniobrabilitat per tal de poder desplaçar l'aparell al llarg del calat a l'hora de prendre mesures. Es va pensar en utilitzar una placa metàl·lica amb diferents forats. A través d'aquests forats es farien passar dues abraçadores que subjectarien el Vectrino. Per la part superior de la placa es fixaria una segona peça metàl·lica en angle recte que permetria el desplaçament del sistema al llarg d'una barra de ferro fixada al carro del canal. El desplaçament es faria cargolant i descargolant una femella situada a la part inferior de la peça en angle recte, i la fixació es faria gràcies a la pressió exercida per aquesta femella i una altra situada a la part superior de la peça.

Una vegada construït el sistema es va procedir a instal·lar el Software del Vectrino en el PC. A continuació es va comprovar el correcte funcionament d'aquest seguint la guia del Vectrino. D'acord amb la Figura 2, el *prove check* ensenya com la senyal varia amb l'abast. Les lletres A, B i C corresponen a:

- A: El pols emès pel transductor central genera una petita amplitud d'ona.

<sup>5</sup> El molinet OTS dona el mòdul de la velocitat en un punt determinat.

- B: L'amplitud de la freqüència de so és màxima perquè és la distància on es troba el volum de control, i per tant des d'on els receptors reben la velocitat del so de les partícules.
- C: El fons o els laterals més propera a l'aparell generen un eco, que té una certa amplitud d'ona. Aquest eco actua com a una interferència, i en cas de ser important pot arribar a confondre's amb el pols rebut des del volum de control, donant com a resultat uns valors de velocitat erronis.

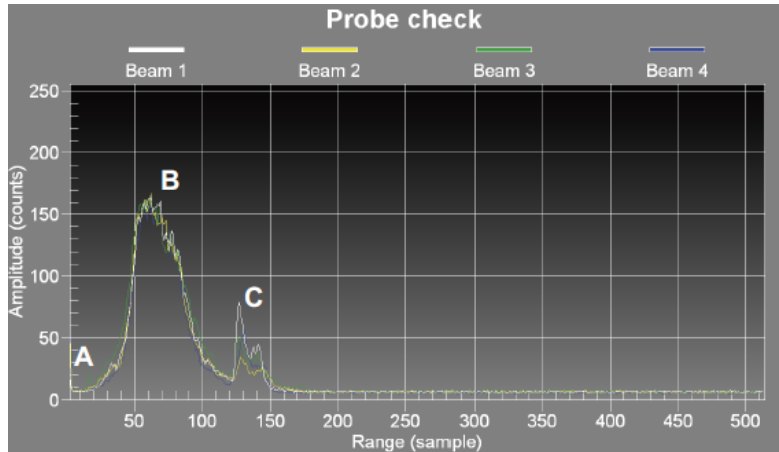


Figura 2. Gràfica que verifica el correcte funcionament de l'aparell.

En el laboratori es va observar que col·locant el transductor central perpendicular al flux i encarat cap al fons del canal (tal i com s'havia previst) es produïen moltes interferències (Figura 3). En canvi, col·locant el transductor paral·lel al flux i a una distància molt propera a les parets laterals del canal (Figura 4) aquestes interferències s'aconseguien eliminar.

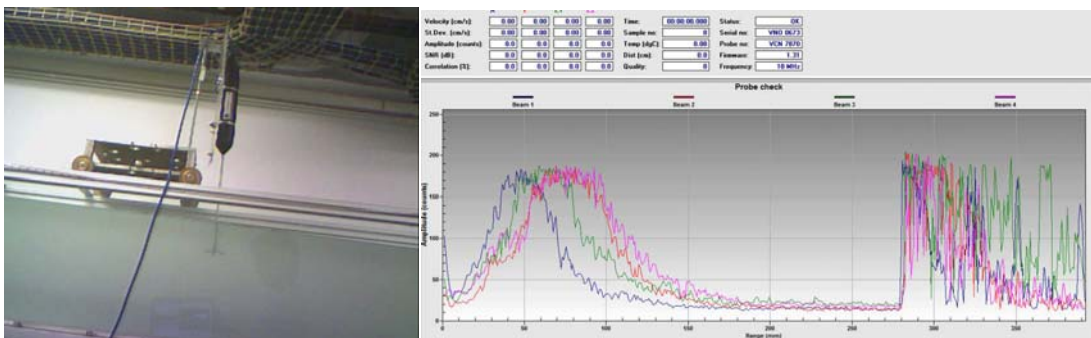


Figura 3. Col·locació del Vectrino perpendicularment al fons del canal amb el respectiu probe check.

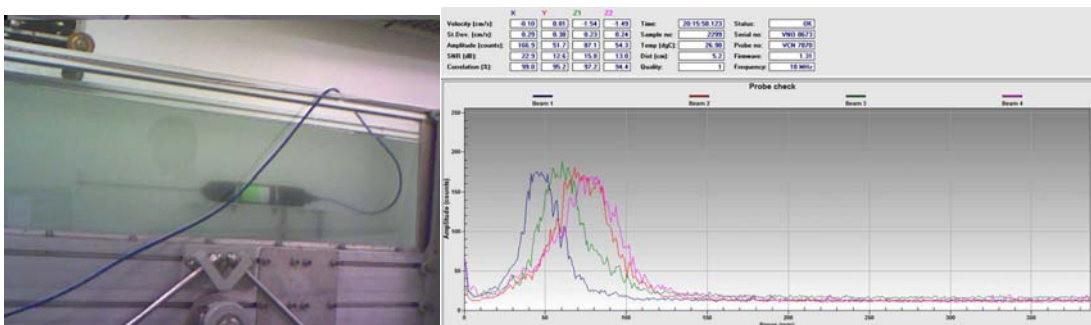


Figura 4. Col·locació del Vectrino paral·lel al flux del canal amb el corresponent probe check.

D'aquesta manera es va veure que la proximitat del fons metàl·lic al volum de control generava un excés d'interferències. Per altra banda, tot i que en el prove check de la Figura 5 no es detecten interferències, el pols rebut per cadascun dels receptors es troba en un volum de control diferent, ja que les senyals rebudes pels receptors estan desfasades les unes amb les altres. Això ens indicava que degut a algun accident els receptors no estaven equidistants entre ells.

La solució per als dos problemes va ser encarregar un nou sensor acústic; en comptes de col·locar el transductor central encarat al fons del canal (*down looking*) el transductor formaria 90° amb l'eix de l'ADV i aniria encarat al centre de la secció del canal (*side looking*). Així el volum de control estaria a més distància del fons del canal i se seguiria prenent la mesura en el centre de la secció transversal; el centre és el punt on la intersecció entre el vidre de les parets laterals i el flux d'aigua és més reduïda, i per tant les velocitats es veuen menys afectades per les condicions de contorn. En l'annex es mostren les dimensions dels dos models de sensor acústic.

En relació a la idoneïtat d'un tipus de sensor o d'un altre per a la presa de mesures, el sensor *down looking* és més sensible a les variacions de la component  $z$  de la velocitat, mentre que el sensor *side looking* és més sensible a les variacions de la component  $y$  del vector velocitat. Utilitzant el sensor *down looking* s'obté una mesura redundant de la component  $z$  de la velocitat, cosa que pot ser útil en la detecció d'errors. Això no és així quan s'utilitza el sensor *side looking* degut a la seva geometria. No obstant, aquest últim permet arribar fins a calats inferiors, ja que el volum de control es troba al mateix calat que el transductor central, i això és clarament una avantatge en experiments com els nostres, en els que el calat màxim només arriba fins als 8,75cm.

En relació a la col·locació del Vectrino, va caldre desplaçar la peça metàl·lica una distància tal, que l'aparell es trovés a 5 cm del centre de la secció transversal. Per evitar que el pes del Vectrino produís un moment en l'eix de les "x", es va optar per fixar una tercera peça metàl·lica en el lateral de la placa. Aquesta, gràcies al seu contacte amb la paret de vidre podria mantenir la placa en la seva vertical. En la Il·lustració 7.b es pot veure la peça metàl·lica recolzada en el vidre i el vectrino lleugerament desplaçat cap al lateral esquerre. Mentre que en la Il·lustració 7.a es mostra el sistema de subjecció del Vectrino, amb la peça en angle recte. Entre la placa i el carro es va afegir una fusta que impedisís el moment exercit pel pes de l'aparell en l'eix de les "y". En tornar a realitzar el *prove check*, els resultats van ser òptims.



Il·lustració 9. a) Sistema de subjecció del Vectrino b) Col·locació del Vectrino en el canal.



## 2.4. EFECTE DE LA CAPA LÍMIT I COL·LOCACIÓ DELS INSTRUMENTS DE MESURA

Quan un fluid entra en contacte amb una superfície sòlida, el moviment del fluid és pertorbat per la força de fregament que li exerceix la superfície. La condició de no lliscament, és a dir, que no existeixin moviments relatius entre el fluid i la superfície, implica que la velocitat del fluid en contacte amb la placa sigui nul·la i que per tant, apareixin gradients de velocitat entre la frontera i el flux. La capa límit és la regió on els gradients de velocitat són suficientment grans com per produir esforços viscosos significatius i una considerable dissipació d'energia mecànica.

A la vora de la capa límit l'acció viscosa tendeix a retenir la corrent lliure i a augmentar-ne la regió de baixa velocitat. A mesura que el flux continua aigües avall l'espessor de la capa límit creix degut a que les capes més lentes exerceixen fricció a les més ràpides i cada vegada més flux es desaccelera (Smits, 2003). Com a conseqüència l'espessor de la capa límit tendeix a augmentar aigües avall i l'estat asimptòtic del perfil de velocitats no s'assoleix fins que aquesta està totalment desenvolupada.

Com que en aquesta tesina interessa trobar un perfil de velocitats, els aparell de mesura es col·locaran passat el punt on els efectes de la capa límit afecten les velocitats. Per a fer aquest càlcul, caldrà doncs estudiar el comportament del flux en el canal.

Per l'estudi del flux en canals és necessari considerar les forces d'inèrcia, les forces de gravetat i les forces de viscositat. La raó entre les forces d'inèrcia i les forces de viscositat (per unitat de volum en una secció donada i en un determinat instant) és coneguda com el número de Reynolds:

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad Eq[12]$$

On:

$U$ : Velocitat característica, generalment la velocitat mitjana del flux en una secció.

$L$ : Longitud característica.

$\nu$ : Viscositat cinemàtica del fluid.

Per a valors petits de Reynolds les trajectòries estan ben definides i el flux és laminar. Per valors de Reynolds elevats les trajectòries deixen d'estar ben definides, produint-se fluxos turbulents.

Els fluxos turbulents varien contínuament al voltant d'un valor mitjà. És usual concebre el moviment turbulent com un moviment aleatori no organitzat sobreposat a un moviment mitjà.

Per a un flux turbulent es poden aplicar les següents fórmules:

$$\delta = \frac{0,37 \cdot x}{Re^{1/5}} \quad i \quad Re = \frac{U \cdot x}{\nu} \quad Eq[13,14]$$

On:

$\delta$ : Coordenada y de la capa límit.

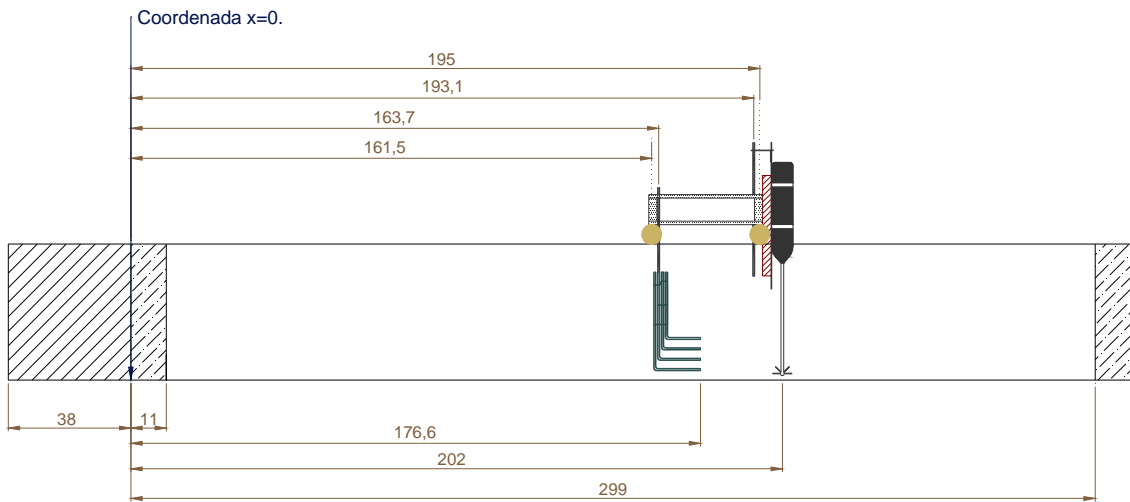
$x$ : Coordenada x de la capa límit.

Imposant que la coordenada y de la capa límit sigui igual al calat es pot obtenir la distància x a partir de la qual la capa límit ja està completament formada. Utilitzant els valors de calat i velocitat determinats a partir del cabal de 0,009 m<sup>2</sup>/s i la viscositat calculada a partir dels 19°C s'obté que la capa límit es forma

a una distància de 3,74 m des d'aigües amunt del canal i que el número de Reynolds és de  $1,05 \cdot 10^6$ , i aquest valor correspon efectivament a un flux turbulent.

Per evitar que els efectes de la capa límit poguessin afectar a les mesures de velocitat, es va decidir fixar la zona de treball aigües avall del canal. Tenint en compte que la longitud efectiva del canal és de 15,13 m, i sabent que la capa límit està totalment desenvolupada a partir dels 3,74 metres respecte aigües amunt, es pot afirmar que agafant una zona de treball propera a aigües avall la capa límit no exerceix cap influència en les velocitats del flux. En aquesta zona de treball s'hi col·locaria el carro amb els diferents instruments de mesura; els sifons per fer els mostrejos i un aparell per a prendre dades de velocitat. Tot i que ja s'ha justificat que l'aparell més precís és el Vectrino, en els primers experiments caldria utilitzar el molinet, pel fet de no disposar encara de l'ADV.

Els diferents punts en que es troben els aparells de mesura s'han definit a partir de la coordenada  $x=0$ , situada aigües avall del canal. En la Il·lustració 10 es mostren les coordenades dels aparells així com les coordenades necessàries per a poder situar el carro. Finalment es resumeixen les coordenades en la Taula 8.



**Il·lustració 10.** Situació del carro i dels aparells de mesura en el primer mòdul del canal (coordenades en cm).

Aparell/Instrument	Coordenada (m)
Sifons	1,766
Vectrino	2,020
Molinet	1,931

**Taula 8.** Resum de les coordenades de la localització dels aparells.

## 2.5. NÚMERO DE FROUDE

Com ja s'ha vist el número de Reynolds és un paràmetre fonamental per modelar el comportament del flux. Però hi ha altres paràmetres, com el número de Froude, ja definit segons l'Equació 1, que té una gran importància en fluxos amb velocitats elevades com és el cas de fluxos turbulents en làmina lliure, on els efectes viscosos són menyspreables.

Per una velocitat de 0,29 m/s i un calat de 8,66 cm el número de Froude obtingut és de 0,3, que correspon a un règim lent. Aquest és el règim desitjat, ja que la majoria dels rius presenten règim lent.

## 2.6. GRANULOMETRIA I SEDIMENTACIÓ

### 2.6.1. Granulometria del material

Per a la realització dels experiments es va escollir un material tal que la seva mida fos el més petit possible. D'aquesta manera es podria reproduir el comportament de fluxos amb sediment fi procedent de la càrrega de rentat de les conques.

El sediment escollit va ser Síclce-10 un producte format per  $\text{SiO}_2$  en un percentatge superior al 97% i d'una mida inferior a les 20 micres pel 99% del material. En l'Annex es mostren les seves característiques.

La manera més comú d'analitzar la distribució de les mides d'una mostra és fer-la passar per un tamís i pesar la fracció que passa per cadascun dels tamisos però és retinguda en el següent. La representació gràfica d'aquestes fraccions en un histograma és una versió discreta d'una funció de densitat de probabilitat de les mides. Per tal d'obtenir la corba granulomètrica cal construir una gràfica acumulada on es representa la fracció en tant per cent en pes menor que una mida determinada, que és el resultat de sumar els pesos de totes les classes inferiors.

Per a mides tan petites no existeixen tamisos. Per aquest motiu la determinació de la mida de les partícules es va fer amb un aparell de mesura de granulometries anomenat Malvern Mastersizer 2000, que utilitzava una tècnica làser. Els resultats obtinguts es mostren en les Figures 5 i 6.

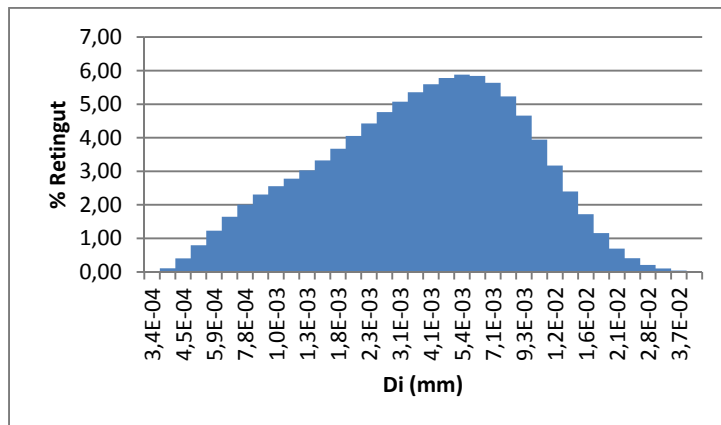


Figura 5. Distribució discreta de les mides.

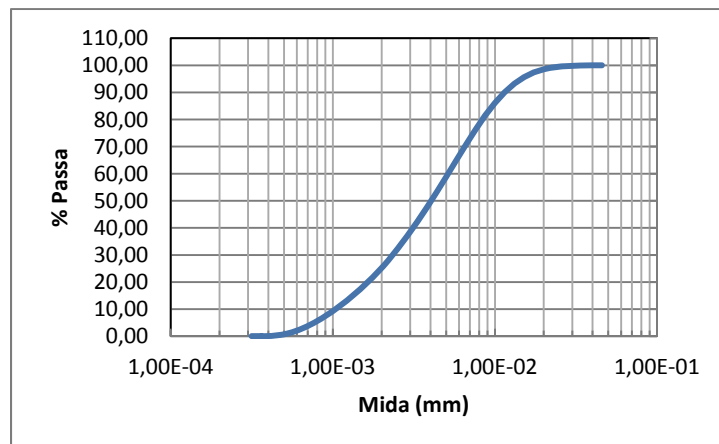


Figura 6. Corba granulomètrica acumulada i continua.

En la Figura 6 s'entén que  $D_n$  és la mida tal que el % del pes del material és menor que ell. En termes estadístics interessa caracteritzar la distribució granulomètrica per unes mesures de posició i dispersió. D'acord amb Martín Vide (2009) si  $D_i$  és el centre de classe d'una mostra i  $\Delta_i$  la fracció unitària de pes de la classe, la mesura de posició anomenada mitjana aritmètica és el diàmetre mitjà  $D_m = \sum D_i \cdot \Delta_i$ , i la mesura de dispersió més important és la varianza  $\sigma^2 = \sum \Delta_i \cdot (D_i - D_m)^2$ . S'utilitza molt  $D_{50}$ , que és la mediana de la distribució de la mida, i en ocasions pot substituir el diàmetre mitjà. També s'utilitza molt com a mesura de dispersió el paràmetre adimensional  $\sigma_g = \sqrt{D_{84}/D_{16}}$ , anomenat desviació típica granulomètrica.

Els resultats per la nostra mostra de sediment són: un valor  $D_{50}$  igual a 4,04 micres i una desviació típica de 1,29.

Les partícules en les que  $D_{50}$  és menor a 0,004 mm s'anomenen argiles, entre 0,004 mm i 0,062 mm s'anomenen llims, entre 0,062 i 2 mm s'anomenen sorres i entre 2 i 64 mm s'anomenen graves (Martín Vide, 2009). Segons aquesta classificació la nostra mostra pertany a la categoria de llims. Aquestes partícules també s'adeqüen a les mides de les partícules considerades com a càrrega de rentat, ja que per nomenclatura en la literatura es defineixen com aquelles que tenen una mida  $D_{50}$  inferior a 0,064 mm, i en aquest cas es compleix.

Inicialment es van comprar 10 sacs de 25kg cadascun d'ells. Amb aquesta quantitat, i tenint en compte el volum de l'aigua circulant pel canal es podria assolir una concentració màxima de 43,86 kg/m<sup>3</sup>. Per arribar a concentracions com les de rius altament carregats<sup>6</sup>, caldria fer un segon encàrrec de 10 sacs més.

### 2.6.2. Anàlisi de la possibilitat que les partícules sedimentin

Per a comprovar que la mida del material no indueix a sedimentacions es pot utilitzar el número de Rouse, que estableix que la velocitat de tall de les partícules ha de ser superior a la seva velocitat de caiguda:

$$\frac{v^*}{w_s} \gg 1 \quad Eq[15]$$

La velocitat de caiguda de les partícules s'ha calculat aplicant la relació de Dietrich (1982). Aquesta relació és aplicable pel cas de partícules no esfèriques ja que va ser obtinguda a partir de l'anàlisi de la velocitat de caiguda de partícules naturals d'acord amb l'Equació 16.

$$R_f = e^{\{-b_1 + b_2 \cdot \ln(Rep) - b_3 \cdot [\ln(Rep)]^2 - b_4 \cdot [\ln(Rep)]^3 + b_5 \cdot [\ln(Rep)]^4\}} \quad Eq[16]$$

Sent:

$$Rep = \frac{\sqrt{gRD} \cdot D}{\nu} \quad i \quad R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad Eq[17,18]$$

On:

$$b_1 = 2,8913494; b_2 = 0,95296; b_3 = 0,056835; b_4 = 0,002892; b_5 = 0,000245$$

<sup>6</sup> Com el riu Pilcomayo comentat en l'apartat de Motivació.

$\nu$  = viscositat cinemàtica de l'aigua, calculada a partir de la següent relació i tenint en compte que la mitjana de temperatures en les que es trobava l'aigua al llarg de l'experiment seria de 19°C:

$$\nu = \frac{1,79 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,03368T + 0,00021T^2} = 1 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Finalment substituint el valor de  $R_f$  a l'equació proposada per Garcia (2008) (Eq 19) s'obté la velocitat de caiguda de les partícules.

$$R_f = \frac{w_s}{\sqrt{g \cdot R \cdot D}} \quad Eq[19]$$

$R_{ep}$	$R_f$	$w_s$ (m/s)
0,030835	0,001186	1E-05

**Taula 9.** Valor de la velocitat de caiguda de les partícules.

La velocitat de tall per a règim uniforme es determina a partir de la següent expressió:

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g \cdot R_H \cdot i} \quad Eq[20]$$

La velocitat de tall depèn del calat uniforme, el qual varia en funció del cabal que circula pel canal. En la Taula 10 es pot veure que la velocitat de tall de les partícules és sempre superior a la seva velocitat de caiguda. Per tant, per aquesta mida del sediment, les partícules no haurien de sedimentar.

$Q_{teòric}$ (l/h)	$Q_{real}$ (m <sup>3</sup> /s)	$H_{uniforme}$	$i$	$R_h$	$v^*$ (m/s)	$v^*/w_s$
8850	0,0118	9,64	0,000424	0,0634	0,0162	1701
8500	0,0112	9,50	0,000424	0,0628	0,0161	1693
8000	0,0108	9,29	0,000424	0,0618	0,0160	1680
7500	0,0102	9,02	0,000424	0,0606	0,0159	1664
7000	0,0093	8,66	0,000424	0,0590	0,0157	1641
6500	0,0086	8,48	0,000303	0,0581	0,0131	1378

**Taula 10.** Relació entre la velocitat de tall i la velocitat de caiguda de les partícules en funció del cabal utilitzat.

## 2.7. CRITERIS EMPÍRICS DE LES CONFIGURACIONS DEL FONTS

Prèviament a la realització dels experiments es va intentar preveure quina configuració de fons s'obtidria per al sediment utilitzat. Cardoso (1998) presenta diferents criteris de configuracions de les formes de fons. Aquests criteris són importants per a la previsió de la resistència al flux. A continuació se'n presenten els primers.

Com a base dels resultats d'un treball experimental desenvolupat per estudiar les arrugues, Liu (1957) va determinar gràficament una relació entre els paràmetres  $u^*/w_s$  i  $Re$ , on:

$$Re = \frac{v^* \cdot D}{\nu} \quad Eq[21]$$

El resultat va ser una gràfica que correspon a la condició d'inici de formació de les arrugues. Posteriorment a la feina desenvolupada per Liu, Albertson (1958) va establir un primer criteri de previsió de configuracions de fons, partint de la idea de que si existia una frontera per a representar els dominis d'existència d'arrugues i de llit pla sense moviment també hi havia d'haver fronteres semblants per a separar els dominis d'existència entre les altres configuracions de fons. En l'Annex es mostren els criteris de Liu i Albertson. En el primer cas, els valors de  $u^*/w_s$  arriben fins a 1,0 mentre que en el segon criteri els valors arriben fins a 800. En canvi, els quocient que s'obté pel nostre sediment amb les condicions de cabal i calat emprades, és molt superior a aquests valors. Això és degut a que la velocitat de caiguda dels sòlids és molt petita en relació a la velocitat que porten les partícules en el sentit del flux ja que tenen un diàmetre micromètric.

$Q_{\text{teòric}}$ (l/h)	$Q_{\text{real}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$H_{\text{uniforme}}$	$i$	$v^*$ (m/s)	$v^*/w_s$	Re
7000	0,0093	8,66	0,000424	0,0157	1641	0,062613

**Taula 11.** Relació entre la velocitat de tall i la velocitat de caiguda pel sediment utilitzat.

Els sediments amb diàmetres tan petits queden exclosos dels criteris empírics existents que permeten caracteritzar el fons, és a dir, pel sediment que tenim cap dels diagrames convencionals serveix. En efecte, aquests criteris empírics es basen en establir dominis a partir de la ocurrència de varies configuracions de fons, i donat que el nombre d'investigacions amb sediment tan petit són escasses no existeixen criteris que englobin aquest tipus de sediment. Per aquest motiu el fons s'estudiarà fent fotografies que permetin calcular les seves dimensions així com el seu desplaçament i utilitzar l'estadística per a obtenir valors mitjans representatius.

## CAPÍTOL 3

---

## 3. Metodologia i observacions

### 3.1. DESCRIPCIÓ DEL PRIMER EXPERIMENT (19/11/12)

#### 3.1.1. Objectius

L'objectiu principal d'aquesta primera fase experimental era obtenir un interval de valors de concentració entre els quals a el sediment comencés a dipositar-se al fons. I, una vegada assolit aquest valor, seguir afegint sediment per obtenir un segon interval de concentracions entre les quals tot el fons del canal estigués cobert de sediment amb les formes de fons completament formades.

Per tal d'aconseguir aquests intervals es tractaria d'anar incrementant la concentració de sediment del canal amb un mateix cabal d'aigua i règim uniforme.

En segon lloc, es volia determinar el perfil de concentracions i velocitats en una secció del canal. Per a fer-ho caldria prendre mostres de les concentracions al llarg del calat i mesures de velocitat per a cadascuna de les concentracions.

#### 3.1.2. Procediment

En primer lloc es va calcular la quantitat d'aigua circulant en el sistema; tenint en compte el canal, el decantador, els quatre dipòsits, i les dimensions de les conduccions es va concloure que el volum d'aigua era de  $5,7 \text{ m}^3$ . Per a aquest volum d'aigua es va calcular la quantitat de sediment necessari que s'havia d'afegir en el sistema per tal d'assolir una determinada concentració, anomenada concentració teòrica.

L'experiment es va dividir en diferents fases. La fase inicial partia de condicions d'aigua clara, és a dir d'un flux d'aigua sense sediment, de manera que el sediment afegit i el sediment acumulat en el sistema havia de ser el mateix. En les altres fases per tal de calcular el sediment a afegir caldria tenir en compte el sediment acumulat en el sistema degut a les fases anteriors.

Fase	Concentració teòrica (Kg/m <sup>3</sup> )	Sediment acumulat en el sistema (kg)	Sediment afegit (Kg)
1	0,5	2,85	2,85
2	1	5,7	2,85
3	2	11,4	5,7
4	4	22,8	11,4
5	8	45,6	22,8
6	12	68,4	22,8
7	16	91,2	22,8
8	20	114	22,8
9	24	136,8	22,8

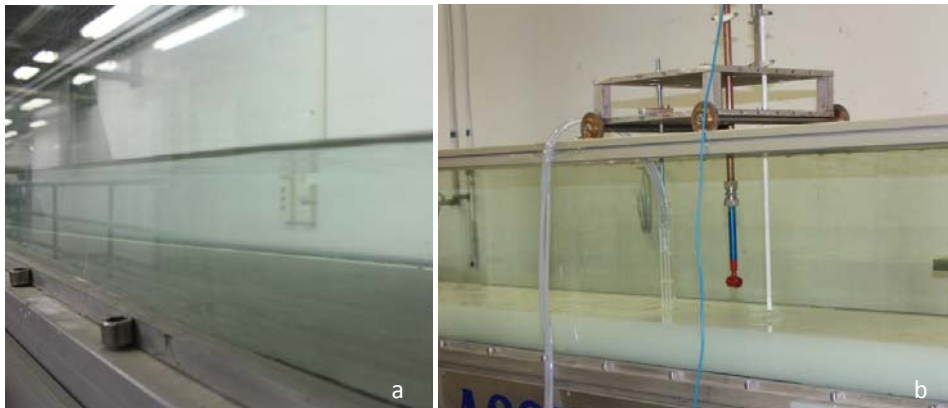
**Taula 12.** Concentracions teòriques, sediment acumulat i afegit en el sistema.



L'experiment es va realitzar durant un període de temps continuat de 8hores i 55 minuts, al llarg del qual es va mantenir un cabal de  $0,0093 \text{ m}^3/\text{s}$  i una pendent de  $0,000424$ . Amb aquestes condicions el calat inicial aigües avall era de  $8,818\text{cm}$ .

L'experiment va tenir 9 fases, cadascuna de les quals s'iniciava en el moment en que s'afegia la nova quantitat de sediment. El procediment consistia en afegir el sediment corresponent durant un cert temps i esperar dues vegades aquest temps abans de prendre les mesures de concentració i velocitat. D'aquesta manera en asseguràvem que a tot el sediment afegit li havia donat temps de passar dels dipòsits al canal i que les propietats del flux tornaven a ser uniformes. Tot seguit, s'observava el fons, es prenen les fotografies corresponents i s'iniciava la següent fase. En la Taula 13 es resumeix el procés realitzat al llarg de l'experiment i algunes observacions fetes.

Les mesures de velocitat es van prendre amb el molinet OTS, donat que encara no disposàvem del sensor *side looking* del Vectrino. Tan el molinet com els sifons estaven col·locats al centre d'una secció transversal del canal.



**Il·lustració 11.** a) Condicions inicials d'aigua clara. b) Instruments de mesura; d'esquerra a dreta els sifons, el molinet i un limnítmetre per mesurar el calat.

Les mostres de concentració es van prendre mitjançant potets de vidre de  $100\text{ml}$ , tot i que la mostra era aproximadament entre  $20$  i  $40 \text{ ml}$ . Cadascun dels sifons estava col·locat a  $1,2\text{cm}$ ,  $4,4\text{cm}$  i  $7,6\text{cm}$  del fons. En primer lloc obríem la pinça del tub del sífó corresponent al calat d' $1,2\text{cm}$ , deixàvem baixar l'aigua per assegurar-nos que l'aigua que circulava corresponia a la nova concentració i que les restes de sediment acumulades a la part inferior del tub de plàstic ja havien sortit, i finalment introduïem el pot. Es realitzava el mateix procediment per als altres dos calats.

En total es van utilitzar  $36$  pots;  $3$  pots per a cada concentració teòrica diferent. A més es van realitzar les següents preses de mostra addicionals:

- Pel cas de la concentració de  $4 \text{ g/l}$  es va fer una segona presa de mostres després de  $2$  minuts d'haver fet la primera per veure si les concentracions variaven amb el temps.
- Pels  $20 \text{ g/l}$  es van prendre mostres dels calats d' $1,2$  i  $4,4\text{cm}$  aigües amunt per assegurar-nos que les concentracions eren uniformes al llarg del canal.
- Pels  $24 \text{ g/l}$  es va fer una repetició de cadascuna de les mostres.

Els pots de vidre es van portar al forn del laboratori de mecànica del sòl i es van deixar durant tres dies per tal d'evaporar l'aigua i poder obtenir la concentració real de sediment per a cada calat i cada concentració teòrica afegida.

Fase	Concentració teòrica (g/l)	Temps des de l'inici	Procés
0	0	00:00	Inici de l'experiment. $Q_{teòric}=7000 \text{ l/h}$ o equivalentment $Q_{real}=0,009 \text{ m}^3/\text{s}$ . $i_{teòric}=0,002$ o equivalentment $i_{real}=0,000424$ .
		00:34	Mesura del calat en la coordenada habitual $H_{avall} = 8.818$ . Mostreig: pots número 1 i 2 amb mostres d'aigua clara.
1	0	00:47	Inici de la introducció de 2,85 kg de sediment.
		00:57	Final de la introducció del sediment.
		01:07	Mostreig: pots 3,4,5.
2	0,5		Mesures de velocitat.
		01:17	Inici de la introducció de 2,85 kg de sediment.
		01:26	Final de la introducció del sediment.
3	1	01:35	Mostreig: pots 6,7,8.
			Mesures de velocitat.
		01:44	Inici de la introducció de 5,7 kg de sediment.
4	2	01:57	Final de la introducció del sediment.
		02:10	Mostreig: pots 9,10,11.
			Mesures de velocitat.
4	4	02:18	Inici de la introducció de 11,4 kg de sediment.
		02:40	Final de la introducció del sediment.
		03:01	Mostreig: pots 12,13,14.
		03:03	Mostreig: pots 15,16,17 per veure la diferència 2 min més tard.
5	8		Mesures de velocitat.
		03:13	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment.
		03:34	Final de la introducció del sediment.
		03:38	No sembla haver cap acumulació.
6	12	03:53	Mostreig: pots 18,19,20.
			Mesures de velocitat.
		04:02	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment.
		04:24	Final de la introducció del sediment.
7	16	04:40	Sembla que el sediment segueix circulant en suspensió. S'observa el desplaçament dels vòrtexs generats per la turbulència a la superfície de l'aigua. El color en els primers 2 cm és més clar. És a dir, no hi ha transport de fons.
		04:44	Mostreig: pots 21,22,23.
			Mesures de velocitat.
		05:00	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment.
		05:27	Final de la introducció del sediment.
		05:45	S'observen les primeres formes. No estan presents al llarg de tota la longitud del canal. En tota la longitud del canal s'hi observen formes de fons, però entre elles hi ha espais on no s'observa cap acumulació.
05:50	Sembla que hi ha més formes al lateral esquerre.		
8	16	05:58	Mostreig: pots 24,25,26.
			Mesures de velocitat.
		06:13	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment.
		06:38	Final de la introducció del sediment.

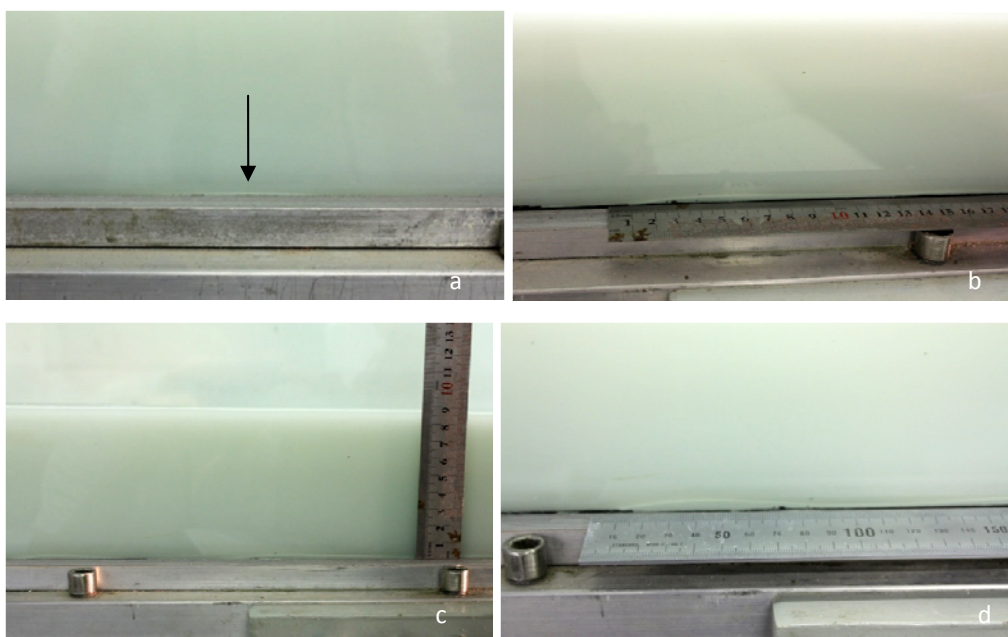
		07:02	Mostreig: pots 27,28,29. Mesures de velocitat.
		07:15	Es mou el carro per fer mesures aigües amunt.
		07:35	Mesures de concentració aigües amunt. $H_{\text{amunt}} = 8,708\text{cm}$ .
		07:43	Mostreig aigües amunt: pots 30,31. Mesures de velocitat aigües amunt.
9	20	07:46	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment.
		07:54	$H_{\text{avall}} = 8,748$ .
		07:59	Final de la introducció del sediment.
		08:14	Mostreig: pots 32,33,34. Mostreig: pots 35,36. Mesures de velocitat.
	24	08:55	Final de l'experiment.

Taula 13. Metodologia seguida al llarg del primer experiment.

### 3.1.3. Observacions

Des de la fase 1 fins a la fase 6 l'aigua era cada vegada més blanca, però tot el material afegit circulava en suspensió. Durant la fase 7, mentre s'abocava el sediment corresponent a la concentració de 16 g/l es van poder observar les primeres formes de fons a través del vidre. Això indicava quins podrien ser els límits entre els quals es podria trobar la primera concentració limitant; els 12 i els 16 g/l.

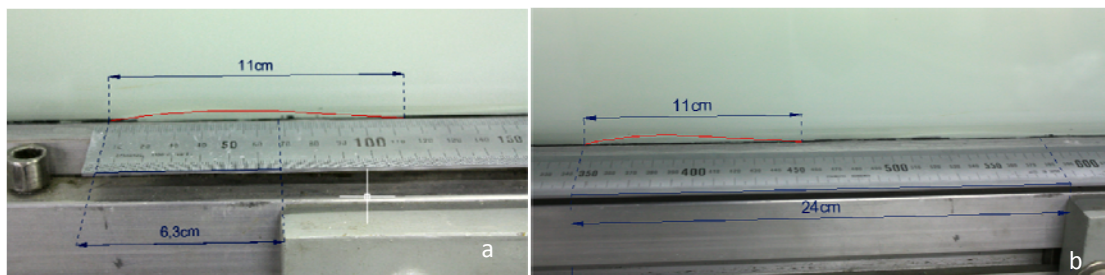
Les primeres formes de fons van aparèixer després de 5 hores i 27 minuts d'haver començat l'experiment; des de la meitat del canal fins a aigües avall. En relació a la seva geometria, la part d'aigües avall era arrodonida i aixecada mentre que la part d'aigües amunt acabava en punxa i a cota del fons del canal. Pel que fa a les dimensions, la longitud de la forma de la Il·lustració 12.a feia 8 cm. Algun altre exemple n'és la forma que es mostra en les Il·lustracions 12.b i 12.c, en les quals es pot apreciar que la longitud és aproximadament de 10 cm i l'altura del pic és d'uns 0,2 mm.



Il·lustració 12. a) Una de les primeres formes de fons b) i c) Longitud i altura d'una altra forma de fons segons més tard d) Forma de fons a 53 cm del primer mòdul del canal.

Després de 18 minuts d'observació (després de 5 hores i 45 minuts des de l'inici) hi havia formes en tota la longitud del canal, tot i que estaven separades per espais on no hi havia cap acumulació. Aigües avall i a una distància de 53cm respecte el final de l'últim mòdul del canal la forma de fons feia 11 cm i la seva altura era lleugerament superior a 0,2mm.

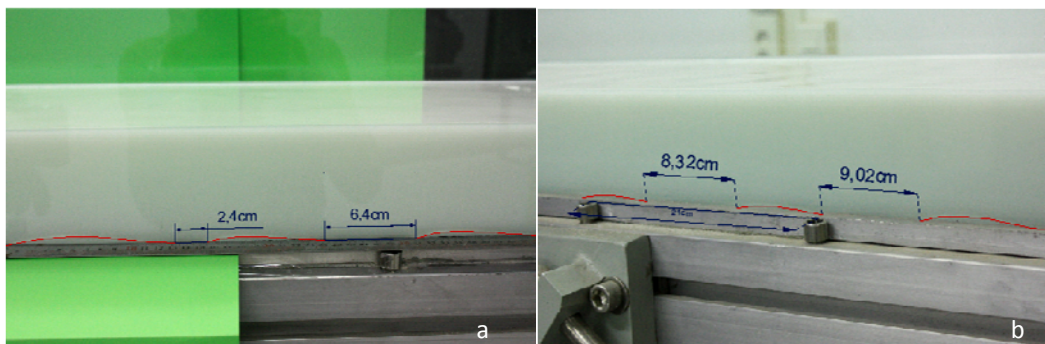
A la fase 8, després d'haver afegit el sediment corresponent als 20 g/l i haver esperat 24 minuts es va tornar a observar la forma de fons de la Il·lustració 8.d. Es va poder veure que tot i que la seva longitud s'havia mantingut aproximadament constant, aquesta forma s'havia desplaçat una distància de 17,7cm aigües avall. Tenint en compte que l'interval de temps entre fotografia i fotografia va ser de 1 hora i 3 minuts, la velocitat de desplaçament de la forma de fons és:



**Il·lustració 13.** a) Forma de fons després dels 16 kg/m<sup>3</sup> b) Forma de fons després dels 20kg/m<sup>3</sup>.

A la fase 9, després d'haver afegit el sediment corresponent als 24 g/l i haver esperat 15 minuts es van anotar les coordenades de quatre formes de fons situades a la part central del canal. Després de 5 minuts i 20 segons es va tornar a anotar la seva posició. El resultat va ser que dues d'elles s'havien mogut 1cm mentre que les altres dues d'havien desplaçat 1,5cm. Les velocitats de desplaçament són de 0,19 cm/min i 0,28 cm/min respectivament.

Es va observar que les formes de fons augmentaven la seva alçada a mesura que s'afegia sediment i es desplaçaven aigües avall, però la distància entre elles no disminuïa, és a dir, no es veia un fons totalment cobert de sediment (Il·lustració 14).



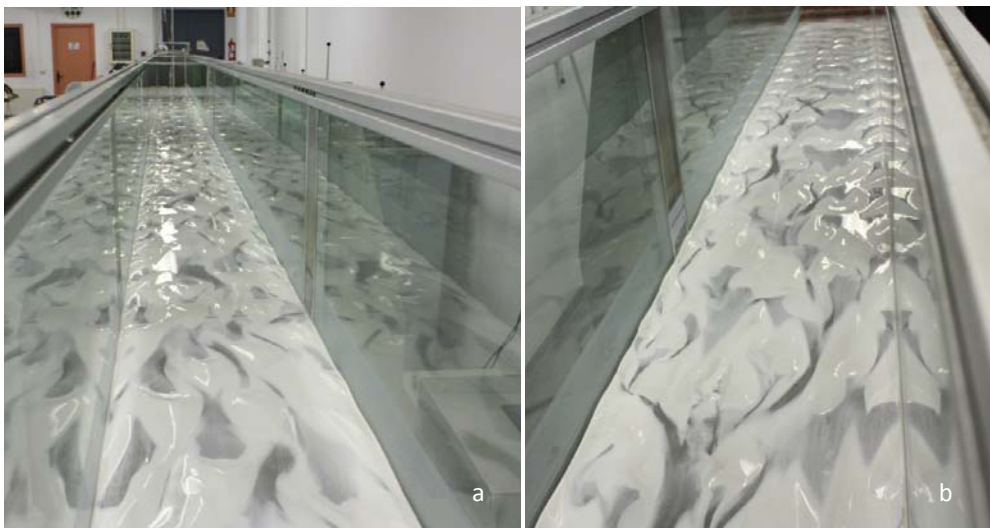
**Il·lustració 14.** a) Formes de fons situades al segon mòdul del canal, després de 17 minuts d'haver observat la primera b) Formes de fons situades al quart mòdul del canal després d'haver afegit la concentració corresponent als 24 g/l.

Tot seguit es mostren dues imatges on es pot apreciar la diferència entre les altures de les formes de fons al llarg del temps de l'experiment:



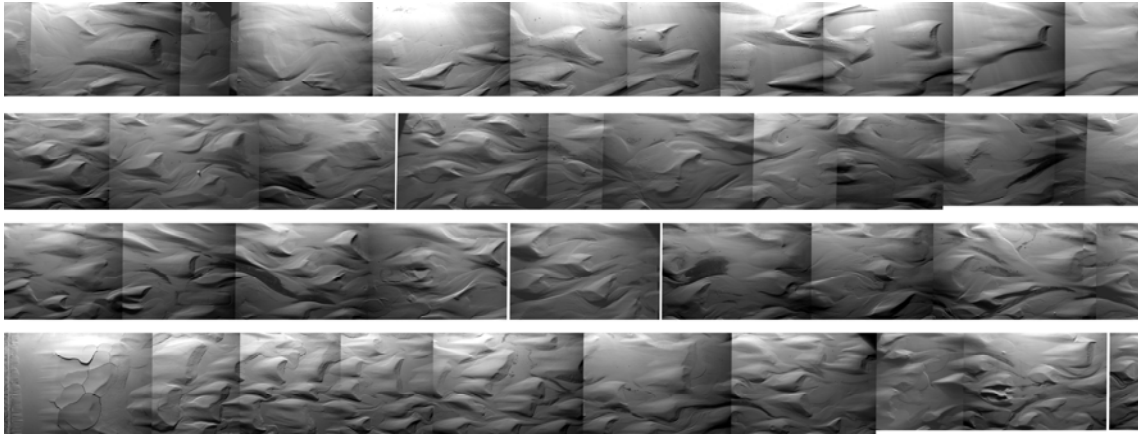
**Il·lustració 15.** a) Formes del segon mòdul després d'1 minut d'haver observat la primera forma de fons ( $16 \text{ kg/m}^3$ ).  
b) Formes del quart mòdul després de 2 hores i 25 minuts d'haver observat la primera forma ( $24 \text{ kg/m}^3$ ).

Així doncs es va aturar l'experiment a la concentració de  $24 \text{ g/l}$  i es va buidar l'aigua del canal. Finalment es van obtenir el fons que es mostra en la Il·lustració 16. Es pot apreciar el fons del canal metàl·lic en diferents parts del canal.



**Il·lustració 16.** Formes de fons en buidar el canal a) Aigües avall i b) Aigües amunt.

Es va deixar el fons en repòs durant quatre dies i a continuació es van realitzar un seguit de fotografies des de l'alçada del carro del canal que permetessin visualitzar totes les formes de fons i analitzar-les. A continuació es mostra la imatge obtinguda després d'ajuntar totes les fotografies. En aquesta, les formes de fons corresponents a aigües amunt es troben a l'esquerra de l'últim tram de la imatge, mentre que el fons d'aigües avall correspon a la dreta del tram superior. Així doncs la seqüència es mou d'esquerra a dreta i de baix a dalt.



**Il·lustració 17.** Formes de fons des d'aigües amunt a aigües avall (anant de baix a dalt i d'esquerra a dreta).

Per a poder fer una anàlisi de les magnituds de les formes de fons es va mesurar la longitud real d'una de les formes d'elles. Aquesta longitud serviria per a aplicar un factor d'escala a les mesures calculades amb Autocad.

## 3.2. DESCRIPCIÓ DEL SEGON EXPERIMENT (29/11/12)

### 3.2.1. Objectius

El principal objectiu d'aquest segon experiment era arribar a la segona concentració limitant. Es partiria de l'última concentració teòrica del primer experiment (24 g/l) i s'aniria afegint sediment fins a poder percebre el fons totalment cobert de sediment. Caldria preparar el sistema per tal d'obtenir unes condicions semblants a les assolides al final del primer experiment.

En segon lloc, es volia veure si les formes de fons obtingudes en el primer experiment es tornaven a formar immediatament després de posar en funcionament la bomba del canal. Així doncs, seria necessari posar en suspensió tot el material que havia quedat sedimentat.

### 3.2.2. Procediment

Inicialment es van engegar les bombes de cadascun dels dipòsits per tal de generar una certa turbulència, i amb l'ajuda d'un mecanisme d'agitació manual es va intentar evitar que tot el llim sedimentat al fons (després de 10 dies de romandre a l'interior dels dipòsits) pogués bloquejar les bombes. Es va fer el mateix en els mòduls del decantador.

A continuació es va incrementar el pendent del canal i amb l'ajuda d'una mànega externa es va fer recircular el material corresponent a les antigues formes de fons. Pocs segons després es va engegar la bomba que dona pas a l'aigua del canal. Durant un període de temps de 8 hores i 23 minuts, el cabal i la pendent del canal es van mantenir constants i només es va anar variant la concentració de sediment.

L'experiment es va dividir en diferents fases, les quals s'iniciaven cada vegada que s'afegia concentració als dipòsits. En la següent Taula 12 es mostra el sediment que calia afegir al sistema en funció de la concentració teòrica.

Fase	Concentració teòrica (kg/m <sup>3</sup> )	Sediment total al sistema (kg)	Sediment afegit (kg)
10	24	136,8	0
11	28	159,6	22,8
12	32	182,4	22,8
13	36	205,2	22,8
14	40	228	22,8
15	44	250,8	22,8
16	48	273,6	22,8
17	52	296,4	22,8
18	56	319,2	22,8
19	60	342	22,8

**Taula 14.** Concentracions teòriques i sediment afegit.

La fase 10 serviria per comprovar que la concentració real en el flux era igual a la concentració real assolida al final del primer experiment. Vam esperar 1 hora des de l'encesa de la bomba del canal i vam prendre les mesures de concentració dels 3 calats definits per la col·locació dels sifons. En aquest cas, el sifó més proper a la solera del canal estava a  $0,05 \cdot H$  del fons. Com que el calat uniforme feia 8,54cm, els tubs extreien aigua amb sediment a les altures de 0,427cm, 3,627cm i 6,827cm.

Es van utilitzar un total de 37 potets; 3 pots per a cada mostreig. Els potets contenien el sediment obtingut en el primer experiment. Per tant la nova tara dels potets seria el pes del pot més el sediment anterior. Com en l'altre experiment, es van prendre les següents mostres addicionals:

- Pels 36 g/l es van prendre mesures a una alçada igual a l'alçada del fons metàl·lic del canal.
- Pels 60 g/l es van prendre mostres amb pots nets per veure si la presència de sediment a l'interior del potet podia tenir algun tipus d'afectació. Després de 40 minuts d'haver pres les primeres es va realitzar una tercera presa de mostres, per tal de veure si la concentració variava amb el temps.

Les dades de velocitat es van tornar a prendre amb el molinet OTS.

Fase	Concentració teòrica (g/l)	Temps des de l'inici	Procés
<b>10</b>	24	00:00	Inici de l'experiment. $Q_{teòric}=7000$ l/h, $i_{teòric}=0,02$ , $T_a=19,4^\circ\text{C}$ .
		00:39	$T_a=19,7^\circ\text{C}$ .
		01:00	$H_{avall}=8,540$ cm. Variació màxima observada en el calat de 0,044 cm.
		01:04	Mostreig: pots número 1,2 i 3. Mesures de velocitat. $T_a=20,4^\circ\text{C}$ .
		01:20	$T_a=20,3^\circ\text{C}$ .
<b>11</b>	24	01:28	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment.
		01:35	Final de la introducció del sediment.
		01:42	Mostreig: pots 4,5,6. Mesures de velocitat. $T_a=20,4^\circ\text{C}$ .
<b>12</b>	28	01:58	No s'observa cap dipòsit. $T_a=20,0^\circ\text{C}$ .
<b>12</b>	28	01:59	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment.
		02:07	Final de la introducció del sediment. $T_a=20,3^\circ\text{C}$ .
		02:17	Mostreig: pots 7,8,9.

	32		Mesures de velocitat. Ta=20,4°C.	
13	32	02:29	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment.	
		02:37	Final de la introducció del sediment. S'observen les primeres formes de fons. Són molt petites. Ta=20,6°C.	
		02:49	Mostreig: pots 10,11,12. Mostreig: pots 13,14 a una altura igual a la cota del fons del canal (solera metàl·lica). Mesures de velocitat. Ta=20,8°C.	
	36	03:02	Les formes de fons estan a tota la longitud del canal. Són petites, però van creixent	
14	36	03:05	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment. Ta=20,9°C.	
		03:13	Final de la introducció del sediment.	
		03:22	Mostreig: pots 15,16,17. Mesures de velocitat. Ta=20,8°C. Les formes de fons van creixent.	
	40	03:32	Final de la presa de mesures. Ta=20,9°C.	
15	40	03:34	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment.	
		03:42	Final de la introducció del sediment.	
		03:54	Mostreig: pots 18,19,20. Mesures de velocitat.	
	44	04:08	Final de la presa de mesures. Ta=20,9°C.	
16	44	04:09	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment. Ta=20,9°C.	
		04:15	Fi de la introducció del sediment. El velocímetre no arriba a tocar el fons.	
		05:22	Mostreig: pots 21,22,23. Mesures de velocitat. Ta=21,1°C.	
		05:34	Final de la presa de mesures.	
	48		El velocímetre no arriba a tocar el fons clarament (Ta 21.1)	
17	48	05:37	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment.	
		05:45	Final de la introducció del sediment.	
		05:58	Mostreig: pots 24,25,26. Mesures de velocitat. Ta=21,7°C.	
18	52	06:08	Inici de la introducció de 22,8 kg de sediment. Sembla que la Ta baixa quan s'introdueix el sediment i torna després d'un temps.	
		06:16	Final de la introducció del sediment.	
		06:28	Mostreig: pots 27,28,29. Mesures de velocitat.	
	56	06:39	Final de la presa de mesures. Ta=21,6°C.	
19	56	07:07	Inici de la introducció de sediment. Ta=21,7°C.	
		07:17	Final de la introducció del sediment.	
		07:30	Fotografies	
		07:35	Mostreig: pots 30,31,32. Mesures de velocitat.	
				Mostreig: pots 38,39 amb pots nets.
		07:45	Final de la presa de mesures. Ta= 22,0°C.	
		08:15	Mostreig: pots 37,40,41 amb pots nets. Ta=22,4°C.	



60	08:23	Final de l'experiment.
----	-------	------------------------

**Taula 15.** Metodologia seguida al llarg del segon experiment.

### 3.2.3. Observacions

L'experiment partia d'una concentració inicial superior a la concentració limitant de 12-16 g/l, per tant s'esperava poder observar ràpidament la formació de les formes de fons a través del vidre. Però no va ser fins després d'haver afegit la concentració de 36 g/l que es van apreciar les primeres formes de fons. Aquestes van tardar 2 hores i 37 minuts en aparèixer. Així, es va veure que el valor de la primera concentració limitant era diferent a la del primer experiment.

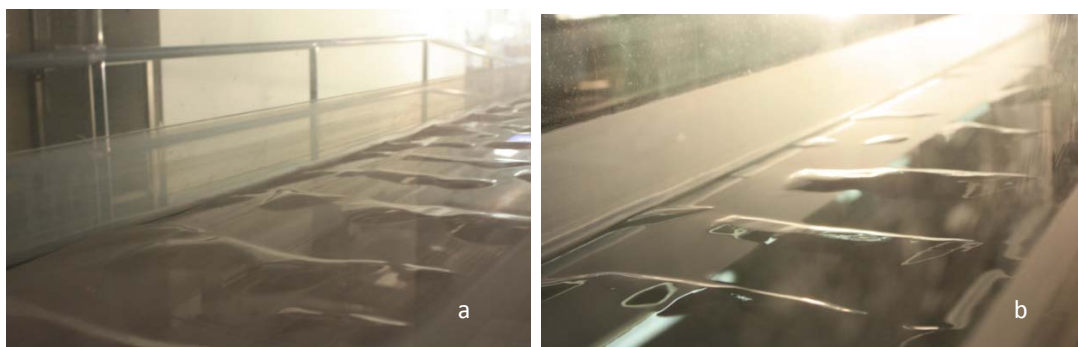
Després de 3 hores i 2 minuts d'haver iniciat l'experiment les formes de fons ja estaven presents al llarg de tota la longitud del canal, tot i que eren de dimensions petites. Les seves dimensions van anar creixent fins al final de la fase 18, a partir de la qual les formes de fons semblaven desplaçar-se però no incrementar les seves dimensions.

Finalment, i després d'haver afegit la concentració corresponent als 60 g/l es va poder observar que la distància entre forma i forma quedava reduïda pràcticament a zero, cosa que ens indicava que el fons ja deuria estar tot cobert.



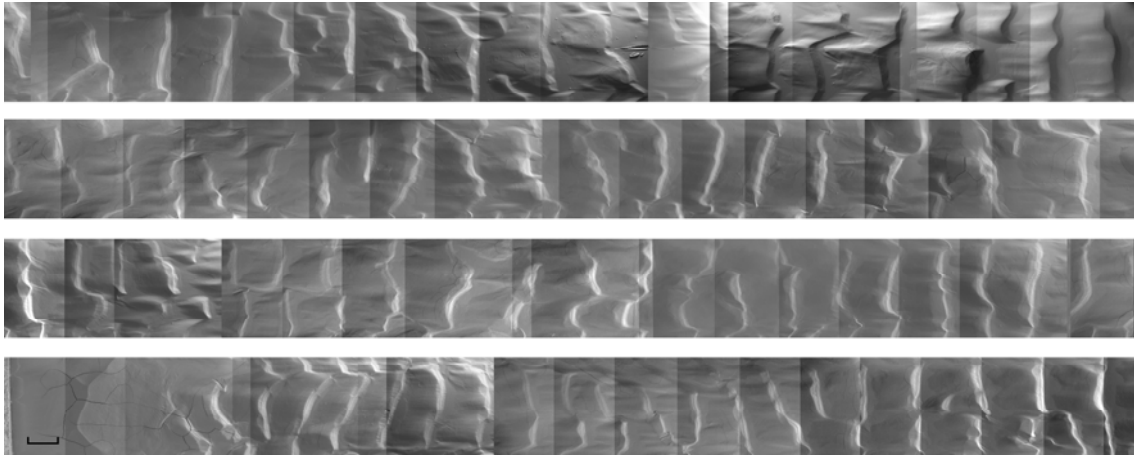
**Il·lustració 18.** Perfil de les formes mentre es buidava l'aigua del canal; després de 6 hores i 35 minuts d'haver iniciat l'experiment.

Mentre es feia el buidatge del canal es va poder percebre que les formes del canal ja no tenien la forma de fulla observada en el buidatge del primer experiment sinó que eren làmines que anaven de punta a punta del canal; amb més alçada aigües avall que aigües amunt.



**Il·lustració 19.** Geometria de les formes de fons a) Fotografia aigües amunt després de 6 hores i 39 minuts d'haver iniciat l'experiment b) Un minut més tard aigües avall.

Les formes de fons en planta obtingues quan tota l'aigua ja s'havia evaporat van ser les següents:



**Il·lustració 20.** Formes de fons amb el sediment sec.

Després de 7 dies d'haver realitzat l'experiment el material va quedar cohesionat al fons. L'evaporació de l'aigua va causar la retracció del fons, de manera que es van originar unes esquerdes que dividien tot el fons en formes, i aquestes s'aixecaven per les seves parts més externes d'acord amb la Il·lustració 21.



**Il·lustració 21.** Retracció del fons.

Aquesta tendència que tenia el sediment a cohesionar-se implicava que a l'hora de netejar el fons per a tornar a posar en suspensió totes les partícules calia un mitjà que funcionés a pressió, ja que el simple fet de deixar circular l'aigua pel canal només convertia el material en una pasta. Amb l'ajuda d'una manguera el fons desapareixia i el sediment es tornava a posar en suspensió.



**Il·lustració 22.** a) Formació d'una pasta en deixar circular l'aigua provinent de la bomba b) Posada en suspensió del sediment que forma el fons.

### 3.3. DESCRIPCIÓ DEL TERCER EXPERIMENT (5/12/12)

#### 3.3.1. Objectius

L'objectiu d'aquest experiment era determinar el temps que trigava en observar-se els dipòsits mòbils del fons una vegada assolides les mateixes condicions que en el segon experiment. Es tractaria de fer un assaig amb una concentració teòrica constant de 60 g/l i observar el comportament del fons.

#### 3.3.2. Procediment

La preparació del sistema va ser similar a la del segon experiment. Es va fer circular el cabal teòric de 7000 l/h durant 3 hores i 15 minuts amb la mateixa pendent que en els altres experiments.

El calat uniforme era de 8,652cm aigües amunt i 8,722cm aigües avall. El centre del sífó corresponent al calat més baix es va col·locar a una distància de 0,75 cm respecte el fons, per tal d'evitar que pogués influir en la formació dels dipòsits mòbils.

Es van utilitzar un total de 9 potets; 3 per a cada mostreig. Els potets contenien el sediment obtingut en el primer experiment i el segon experiment. Per tant la nova tara dels potets seria el pes del pot més el sediment anterior.

Concentració (g/l)	Temps des de l'inici	Procés
Preparació de l'experiment	00:00	Ruixem aigües amunt i aigües avall amb una manguera. $i_{teòric}=0,02$ .
	00:03	Bombes en funcionament.
	00:08	Agitació del sistema amb mecanismes manuals.
	00:13	$i_{teòric}=1,00$ . $Q_{teòric}=7000\text{l/h}$ .
	00:38	$i_{teòric}=0,02$ .
Es produeix una inundació degut a que la bomba 1 no bombeja suficientment bé.		
60	01:48=00:00:00	Inici de l'experiment. $Q_{teòric}=7000\text{ l/h}$ , $i_{teòric}=0,02$ , $T_a=18,8^\circ\text{C}$ .
	00:05	Connectem les bombes.
	00:48	$H_{amunt} (x = 1325) = 8,652$ ; $H_{avall} = 8,722$ .
	01:20	El fons es comença a formar.
	01:50	Les formes de fons estan a tota la longitud del canal.
	02:00	Mostreig: pots 1,2,3.
	02:42	Mostreig: pots 4,5,6.
	03:08	Mostreig: pots 7,8,9.
03:15	Final de l'experiment. $T_a=19,4^\circ\text{C}$ .	

Taula 16. Metodologia seguida al llarg del tercer experiment.

#### 3.3.3. Observacions

La primera forma de fons no va ser observada fins 1 hora i 20 minuts després d'haver posat en funcionament la bomba del canal però no va ser fins a les 1 hora i 50 minuts que es van poder observar formes al llarg del canal. Aquest temps va ser inferior al temps obtingut en el segon experiment de

3h02', i el fet que la quantitat de sediment dipositat al fons després de realitzar l'experiment semblava inferior a l'observat en el segon experiment ens feia pensar en la possibilitat que el temps necessari per a l'aparició de formes de fons pogués venir determinat per la concentració de sediment present al flux.

### 3.4. DESCRIPCIÓ DEL QUART EXPERIMENT (10/12/12)

#### 3.4.1. Objectius

En el quart experiment es tractava de tornar a repetir l'anterior experiment per veure si els nous resultats s'ajustaven a la hipòtesi feta a partir de les observacions dels resultats obtinguts en els primers experiments. Així doncs consistiria en una prova per a verificar la repetitivitat dels fenomen estudiat.

En segon lloc, i tenint en compte que acabava d'arribar el nou sensor side looking, es volia contrastar les dades de velocitat obtingudes a través del molinet amb les dades que podia mesurar el Vectrino.

#### 3.4.2. Procediment

En aquest experiment calia pensar en un mecanisme capaç de controlar el desplaçament del Vectrino al llarg de tot el calat mesurable amb l'aparell; el Vectrino pot arribar fins a una profunditat de 5,9mm i a una distància de la làmina d'aigua de 2,359 cm. A un calat més proper a la superfície les potes encarades cap amunt estan pràcticament al descobert. Aquesta cota superior es va prendre en relació al calat uniforme de l'experiment, corresponent a 8,706cm.

Donat que el desplaçament del Vectrino es pot controlar amb una femella enroscada en la barra de ferro del canal es va calcular l'equivalència entre el número de voltes de la femella i els centímetres de desplaçament de l'aparell. Es va fer una mitjana de tres resultats diferents, i es va obtenir que 1 volta equivalia a 0,152 cm de desplaçament.

Degut a que el dipòsit del canal format el dia 5 de desembre presentava força cohesió i resultava difícil la seva destrucció, va ser necessari utilitzar la manguera externa al sistema de recirculació durant un període de temps llarg. Per tal de no afectar al volum d'aigua present en el sistema es va extreure aigua dels dipòsits, tenint en compte que una galleda equivalia aproximadament a uns 10 segons de ruixar el canal amb la manguera.

La resta de la preparació del sistema va ser similar als altres experiments; es va agitar els dipòsits i el decantador, es va engegar la bomba del canal amb el cabal habitual teòric de 7000 l/h i amb un pendent inicial superior a l'existent per acabar d'eliminar tot el sediment del fons.

Al llarg de l'experiment es va mantenir el Vectrino en la mateixa coordenada de la longitud del canal i es va anar variant la seva altura. Amb les dades obtingudes es podria construir els perfils de velocitat.

Finalment es va prendre mostres de concentració seguint el mateix procediment que en els anteriors casos. Es van utilitzar 6 pots, dos per a cada calat.

Concentració (g/l)	Temps des de l'inici	Procés
Preparació de l'experiment	10:35	Posem en funcionament el cabal del canal un pendent elevat de 0.8 (segons el panell) i $Q_{teòric} = 7000$ l/h. $T_a=18^\circ\text{C}$ .
	00:09	Aturem el cabal del canal i ruixem amb la manguera (10 segons manguera màxim = extreure 1 galleda d'aigua).
	00:21	Final de l'extracció d'aigua amb les galledes.
	00:22	Inici agitació; posem en funcionament totes les bombes excepte una del decantador.
	00:30	Posem en funcionament el cabal del canal amb $Q_{teòric}=7000$ l/h i un pendent elevat $i_{teòric}=0,8$ .
60	00:51:00=00:00	Inici de l'experiment. $Q_{teòric}=7000$ l/h, $i_{teòric}=0,02$ . Es posa en funcionament el Vectrino a 1,061 cm del fons.
	02:06	S'observen les primeres formes de fons.
	02:49	Les formes de fons estan a tota la longitud del canal. Són petites, però van creixent
	04:42	Mostreig: pots 10,12,13. $T_a=19^\circ\text{C}$ .
	04:49	Mostreig: pots 14,15,16.
	04:54	Final de l'experiment.

**Taula 17.** Metodologia seguida al llarg del quart experiment.

### 3.4.1. Observacions

Després de 2 hores i 6 minuts d'haver engegat la bomba del canal es va observar les tres primeres formes de fons. Les formes de fons es van fer visibles al llarg de tot el canal després de 2 hores i 49 minuts d'haver iniciat l'experiment, un temps pràcticament igual al del segon experiment. Caldria comprovar la concentració real per veure si els resultats tenen alguna similitud.



**Il·lustració 23.** Formes de fons 7 dies després d'haver realitzat l'experiment.

### 3.5. DESCRIPCIÓ DEL CINQUÈ EXPERIMENT (17/12/12)

#### 3.5.1. Objectius

L'objectiu d'aquest experiment era analitzar el comportament de les partícules en un punt del calat al llarg del temps. Donat que s'intuïa que la presència de formes de fons podria causar fenòmens de turbulència a les partícules, i per tant una modificació del vector velocitat, es col·locaria el Vectrino a un punt proper a la solera del canal.

L'altre objectiu seria tornar a observar per a quin temps es produïa la concentració limitant. I per tant, fer un assaig de repetitivitat igual que en el quart experiment.

#### 3.5.2. Procediment

Es va intentar aconseguir la manera òptima de preparar el sistema per tal de posar en suspensió la màxima quantitat de sediment possible. El procediment va ser el que es mostra en la Taula 18.

En relació a la presa de mostres, es van utilitzar 6 pots; tres dels quals es van agafar 2 hores i 7 minuts després dels primers indicis de la presència de formes de fons i els altres 18 minuts més tard.

Concentració (g/l)	Temps des de l'inici	Procés
Preparació de l'experiment	00:00	Extracció de 13 galledes d'aigua.
	00:02	Agitació dels dipòsits i el decantador mitjançant bombes i mecanismes manuals.
	00:35	Es fa circular el cabal del canal. $Q_{teòric} = 7000 \text{ l/h}$ , $T_a = 19,5^\circ\text{C}$ , $i = 0,0$ per tal de retirar el sediment..
	00:41	Es deixa baixar l'aigua per arrossegar les formes de fons. $i = 0,2$ segons el panell.
	00:53	S'ajuda a fer baixar el sediment amb un mecanisme extern al sistema
	00:58	S'atura el cabal del canal per veure que el fons ha quedat net. Es puja el pendent i s'acaba de netejar amb la manguera $i = 0,4$ Preparació del Vectrino. Es col·loca a una distància de 1,06 cm respecte el fons.
	01:16	Es posa en funcionament el cabal. $Q_{teòric} = 7000 \text{ l/h}$ . $i = 0,4$
	01:20	$Q = 5000 \text{ l/h}$ .
	01:22	$Q = 7000 \text{ l/h}$ . $i = 0,0$ .
60	01:26=00:00	Inici de l'experiment. $Q_{teòric} = 7000 \text{ l/h}$ . $i_{teòric} = 0,02$ , $T_a = 19,9^\circ\text{C}$ .
	00:34	Primera forma de fons al final del segon mòdul.
	00:59	$T_a = 20^\circ\text{C}$ .
	02:04	Formes de fons en tota la longitud del canal. Encara no han assolit l'alçada màxima.
	02:41	Mostreig: pots 17,18,19. $T_a = 20,03^\circ\text{C}$ .
	03:00	Mostreig: pots 20,21,22.

Taula 18. Metodologia seguida en el cinquè experiment.

### 3.5.3. Observacions

Els primers indicis de formes de fons van ser 30 minuts després d'iniciar l'experiment. Després de 2 hores i 4 minuts les formes de fons ja estaven presents a tota la longitud del canal. Les formes eren altes i allargades.



**Il·lustració 24.** Formes de fons 2 hores i 14 minuts després d'haver iniciat l'experiment.

## 3.6. DESCRIPCIÓ DEL SISÈ EXPERIMENT (19/12/2012)

### 3.6.1. Objectius i preparació

Els objectius eren els mateixos que en l'anterior experiment; veure el comportament de les components de la velocitat al llarg del temps utilitzant el Vectrino.

La preparació també va ser la mateixa que en l'anterior experiment. No obstant, a l'hora de posar en funcionament la bomba 1 el cabal circulat era inferior a l'habitual degut probablement a la obstrucció que li provocava el sediment assecat inicialment i situat al conducte d'entrada. Tot i que finalment es va aconseguir el cabal habitual, el sediment posat en suspensió inicialment ja començava a dipositar al fons en el moment de posar en funcionament el Vectrino, de manera que en aquest experiment no es va partir de condicions d'aigua clara. El règim era uniforme i el calat mesurat era de 9,2 cm.

Concentració (g/l)	Temps des de l'inici	Procés
Preparació de l'experiment	00:00	Agitació dels dipòsits i el decantador mitjançant bombes i mecanismes manuals. Fotografies.
	00:10	Es fa circular el cabal del canal. $Q_{teòric} = 7000 \text{ l/h}$ , $T_a = 19,7^\circ\text{C}$ , $i = 0,2$ per tal de retirar el sediment.
	00:35	S'atura la bomba del canal. S'ajuda a fer baixar el sediment amb un mecanisme extern al sistema
Problema amb la bomba 1		
60	01:20=0:00	Inici de l'experiment. $Q_{teòric} = 7000 \text{ l/h}$ . $i_{teòric} = 0,02$ , $T_a = 19,9^\circ\text{C}$ . Es posa en funcionament el Vectrino.
	00:29	$H_{avall} = 8,8 \text{ cm}$ .
	03:07	Mostreig: 23,24,25.
	04:23	Mostreig: 27,28,29.
	06:20	Mostreig: 30,31,32. $H_{avall} = 8,732 \text{ cm}$ .
	07:30	Mostreig: pots 37,38,39.

**Taula 19.** Metodologia seguida al llarg del sisè experiment.

### 3.7. DESCRIPCIÓ DEL SETÈ EXPERIMENT (21/12/12)

En aquest experiment també es tractava d'analitzar les components de la velocitat al llarg del temps i obtenir un perfil de velocitats.

Es va deixar el Vectrino 4 hores en funcionament a una cota de 0,76 cm. Per fer el perfil de velocitats es va col·locar inicialment al fons. Cada 15 s es feien 3 voltes per saber la velocitat al llarg del calat. Es van obtenir dades de velocitat en 17 cotes diferents durant un temps de 12 minuts.

Concentració (g/l)	Temps des de l'inici	Procés
Preparació de l'experiment	00:00	Agitació dels dipòsits i el decantador mitjançant bombes i mecanismes manuals. Fotografies.
	01:10	Extracció de 5 galledes d'aigua.
	01:57	Es posa en funcionament el Vectrino a 0,758 cm. $i_{teòric}=0,2$ Manguera al voltant del Vectrino.
60	02:00:00=00:00	Inici de l'experiment. $Q_{teòric}=7000$ l/h. $i_{teòric}=0,02$ , $T_a=19,9^{\circ}\text{C}$ .
	03:33	S'observen les primeres formes de fons però no n'hi ha pet tot el canal.
	04:00	Formes de fons en tota la longitud del canal. Mostreig: pots 1,2,3. Mostreig: pots 4,5,6. Col·locació del Vectrino a 0,455 cm del fons.
	04:15	Cada 30 segons es fan 3 voltes (1volta=0,15151cm) per obtenir la velocitat al llarg del calat.
	04:27	Fi de l'experiment. $T_a=23,26^{\circ}\text{C}$ .

Taula 20. Metodologia seguida al llarg del setè experiment.

### 3.8. OBTENCIÓ DELS RESULTATS DE CONCENTRACIÓ

Prèviament a la realització dels experiments, es van portar 41 pots de vidre al Laboratori de Mecànica del Sòl per calcular-ne la seva tara.

Després d'agafar les mostres corresponents a cadascun dels experiments es van tornar a pesar i es van introduir al forn durant 3 dies. Una vegada evaporada tota l'aigua de la mostra es va tornar a pesar el pot per tal de poder determinar el percentatge de sediment en la mostra.

Finalment es van calcular les concentracions en pes, volum, parts per milió i g/l.

### 3.9. TAULA-RESUM DE LES CARACTERÍSTIQUES DELS EXPERIMENTS



CARACTERISTIQUES DELS EXPERIMENTS																												
Data	Duració	Calat			Temperatura (°C)		Mostres de la concentració de llims present al flux							Mesures de velocitat					Fotografies									
		Coordenada habitual		Aigües amunt	Inicial	Final	Num. de mostres	Mostres realitzats en la coordenada i posició habitual cada vegada que es canvia la concentració teòrica				Mostres addicionals			Mesures amb el molinet		Mesures amb el vectrino			Formes de fons en planta	Formes de fons en alçat (o planta no a escala)	Desplaçament de les formes de fons						
		Inicial	Final					Cota (cm)	Codi	Num. de pots per cada cota	Total de pots	Objectiu	Num. de pots	Cotes	Num. de perfils	Cota (cm)	Perfils		Velocitat puntual									
				Cota inicial (cm)	Cota final (cm)	Cota (cm)																						
EXPERIMENTS	1r	19/11/2012	8h 55 m	8,818	8,748	8,708	-	-	9	1,2	Inferior (I)	1	3	27	Determinació del residu sòlid en aigua clara	2	I, C	9	1,1				-	-	-	x	x	x
								4,4	Central (C)	1		Variació d'una mateixa concentració després d'un petit increment de temps (2 min)			3	I,C,S	1,764											
								7,6	Superior (S)	1		Variació d'una mateixa concentració aigües amunt			2	I, C	5,291											
												Repetitivitat	2	I, C	7,054													
	2n	29/11/2012	8 h 23 m	8,54	-	-	19,4	22,4	10	0,427	Inferior (I)	1	3	30	Influència de l'altura en que es pren la mostra	2	I, C	10	1,1	-	-	-	x	x	-			
										3,627	Central (C)	1				Mesures amb pots nets	2		I,C							1,708		
										6,827	Superior (S)	1				Variació d'una mateixa concentració després d'un cert temps (40 min)	3		I,C,S							5,124		
																			6,832									
	3r	05/12/2012	3 h 15 m	8,722	-	8,652	18,8	19,4	3	0,75	Inferior (I)	1	3	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
										3,95	Central (C)	1																
										7,15	Superior (S)	1																
	4t	10/12/2012	4 h	-	8,706	-	18 (17,4 °C segons el Vectrino)	19 (19,5 °C segons el Vectrino)	2	Aguantem els sifons manualment en una cota inferior propera al fons			2-3	5	-	-	-	-	-	0,59	8,165	-	-	x	-			
										Inferior (I)	1-1																	
										Central (C)	1-1																	
											Superior (S)	0-1																
	5è	17/12/2012	3 h	-	-	-	19,5 (19,8°C segons el Vectrino)	20,3 (20,9 °C segons el vectrino)	2	Aguantem els sifons manualment en una cota inferior propera al fons			3	6	-	-	-	-	-	-	-	-	1,061	-	x	-		
										Inferior (I)	1																	
										Central (C)	1																	
											Superior (S)	1																
	6è	19/12/2012	7h 30 m	8,8	8,732	-	19,7 (21°C segons el Vectrino)	22 (24°C segons el Vectrino)	4	Aguantem els sifons manualment en una cota inferior propera al fons			3	12	-	-	-	-	-	-	-	-	1,061	-	x	-		
										Inferior (I)	1																	
										Central (C)	1																	
											Superior (S)	1																
	7è	21/12/2012	4h 30 m	-	-	-	(22 °C segons el Vectrino)	23,65	2	Aguantem els sifons manualment en una cota inferior propera al fons			3	6	-	-	-	-	-	0,59	7,862	0,758	x	-	-			
										Inferior (I)	1																	
										Central (C)	1																	
											Superior (S)	1																

Taula 21. Comparativa entre les característiques dels diferents experiments.

## CAPÍTOL 4

---

## 4. Resultats i discussió

### 4.1. CONCENTRACIONS

Tot seguit es mostren els valors de concentració obtinguts en el primer i el segon experiment en les tres cotes des de les que es van extreure mostres (sent la cota I la més baixa, C la central i S la superior). En aquesta primera taula no s'han incorporat els valors de les mostres addicionals que es van prendre en alguns casos, ja que seran analitzades posteriorment. No obstant, per a fer les mitjanes de les concentracions que s'han tingut en compte totes les mostres preses.

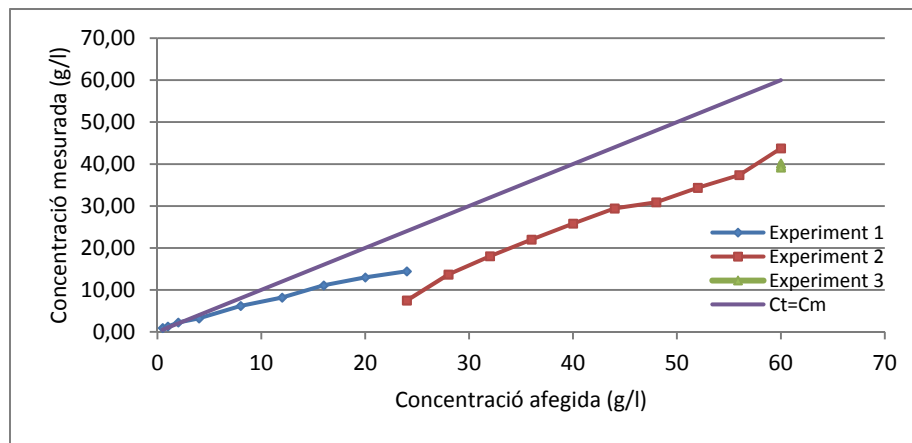
Cota	1r experiment			2n experiment		
	Concentració afegida (g/l)	Concentració mesurada (g/l)	Mitjanes (g/l)	Concentració afegida (g/l)	Concentració mesurada (g/l)	Mitjana (g/l)
I	0	0,00		24	7,89	7,47
C	0	0,46		24	7,34	
S				24	7,18	
I	0,5	0,75	0,92	28	13,92	13,66
C	0,5	1,18		28	13,61	
S	0,5	0,82		28	13,44	
I	1	1,17	1,28	32	17,91	18,02
C	1	1,14		32	18,52	
S	1	1,52		32	17,63	
I	2	2,18	2,23	36	22,06	22,00
C	2	2,08		36		
S	2	2,44		36	21,60	
I	4	3,36	3,22	40	26,10	25,81
C	4	3,40		40	25,92	
S	4	3,24		40	25,42	
I	8	6,07	6,17	44	30,55	29,42
C	8	6,22		44	29,03	
S	8	6,22		44	28,69	
I	12	8,51	8,17	48	31,19	30,88
C	12	7,98		48	31,02	
S	12	8,01		48	30,44	
I	16	11,29	11,07	52	34,67	34,34
C	16	10,96		52	34,37	
S	16	10,95		52	33,98	
I	20	13,31	12,98	56	38,17	37,38
C	20	12,92		56	37,21	
S	20	13,31		56	36,77	
I	24	14,78	14,42	60	44,48	43,74
C	24	14,26		60	43,72	
S	24	14,11		60	43,45	

Taula 22. Concentració afegida, mesurada i concentració mesurada mitjana.

### 4.1.1. Limitacions de la instal·lació

Els valors de concentració experimentals obtinguts en cadascun dels calats de la secció transversal mesurada són inferiors als valors de concentració teòrics en el sistema a partir de concentracions teòriques de 2 g/l. Això és degut a que les partícules tenen tendència a sedimentar en punts del canal on no es pot controlar l'agitació, com ara a les canonades o racons dels dipòsits. Per tant, tot i que les bombes milloren el rendiment de la instal·lació és difícil que el flux pugui assolir la concentració teòrica.

En la Figura 7 es compara la concentració teòrica amb la concentració real circulant en el canal en els tres primers experiments. Els valors de la concentració mesurats són les mitjanes dels tres calats per a cada instant de temps en que es pren la mostra d'una determinada concentració afegida. Si el sistema de recirculació fos perfecte i part del sediment introduït en les diferents fases no es quedés dipositat en racons de la instal·lació, la concentració teòrica hauria de ser igual a la concentració mesurada. És a dir, les dades mesurades s'haurien d'ajustar a la diagonal de la Figura 8 fins al moment en que s'assolís la primera concentració limitant; temps pel qual el sediment comença a dipositar al fons. Però degut a les limitacions del sistema, les dades obtingudes estan per sota de la diagonal  $C_t=C_m$ .



**Figura 7.** Comparació de la concentració teòrica amb les concentracions reals mesurades en els tres primers experiments.

Les limitacions de la instal·lació de treball s'accentuen una vegada s'atura l'experiment i l'aigua queda en repòs, ja que el material que queda dipositat al fons de les zones de difícil accés en les que no es pot tornar a posar en suspensió. Això queda reflectit en la concentració teòrica de 24 g/l, per la qual s'assoleix una concentració mesurada mitjana de 14,42 g/l al final del primer experiment en front a una concentració de 7,47 g/l a l'inici del segon experiment. Es produeix el mateix fenomen entre el final del segon experiment i l'inici del tercer (per la concentració teòrica de 60 g/l).

### 4.1.1. Perfils de concentració experimentals

Cadascuna de les sèries de dades obtingudes en un mostreig s'han representat en unes gràfiques adimensionals en les que l'eix d'abscisses representa la concentració relativa de partícules al llarg del calat en relació a la concentració en un punt de referència situat en el calat més baix a partir del qual es van extreure mostres. L'eix d'ordenades representa la distància des del nivell de referència fins a la superfície. Cada mostreig queda definit per la concentració mitjana calculada a partir de les dades de les tres cotes i se li ha associat un perfil, d'acord amb la Taula 23.

1r experiment		2n experiment	
Concentració mitjana mesurada	Número de perfil	Concentració mitjana mesurada	Número de perfil
0,92	1	7,47	10
1,28	2	13,66	11
2,23	3	18,02	12
3,22	4	22	13
6,17	5	25,81	14
8,17	6	29,42	15
11,07	7	30,88	16
12,98	8	34,34	17
14,42	9	37,38	18
		43,74	19

**Taula 23.** Concentracions mitjanes i perfils associats per al primer i el segon experiment.

No s'han considerat les concentracions corresponents a les concentracions teòriques de 0,5 g/l, 1 g/l, 2 g/l ja que presenten un cert error: les respectives concentracions mesurades són superiors a la màxima concentració assolible pel flux. Això és degut al residu sòlid de l'aigua, que queda retingut al fons dels pots conjuntament amb el sediment una vegada evaporada l'aigua dels pots. Al laboratori es van prendre dues mostres de l'aigua clara que recircula pel canal abans d'afegir la concentració teòrica de 0,5 g/l. Els resultats van ser de 0 g/l en un cas i 0,46 g/l en el segon. El fet d'obtenir un valor nul en un dels casos fa pensar que les tècniques utilitzades per a quantificar valors tan petits de concentració de sòlids en l'aigua no són adequades, i per tant el fet d'aplicar un valor mitjà d'aquestes dues concentracions (0,23 g/l) també comportaria un error. Per altra banda, tot i que el residu sòlid es troba sempre present en l'aigua, i per tant també afecta a les mesures de concentració real més grans, l'error relatiu és inferior a mesura que creix la concentració. A la Taula 24 es mostren els errors relatius de les concentracions mitjanes en les tres cotes mesurades respecte la concentració mitjana que s'obtidria si es tingués en compte un valor de residu sòlid de 0,23 g/l.

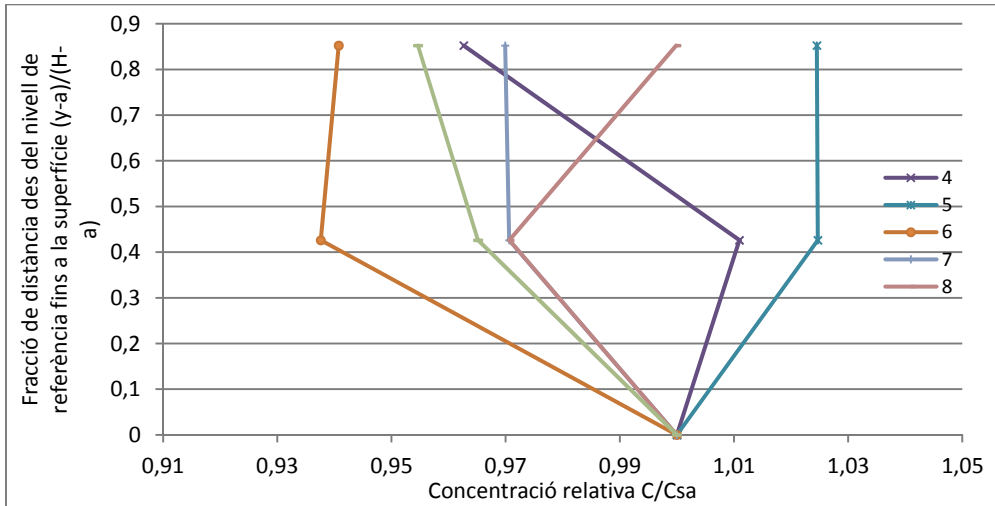
Concentració teòrica (g/l)	Concentració mitjana mesurada (g/l)	Er (%)
0,5	0,92	33,43
1	1,28	21,98
2	2,23	11,47
4	3,22	7,70
60	43,74	0,53

**Taula 24.** Errors relatius de les mitjanes tenint en compte un valor mitjà del residu sòlid de l'aigua.

Així doncs, podríem afirmar que per a concentracions petites, les tècniques de mostreig utilitzades no són prou acurades. I per tant els tres primers valors, que superen la concentració teòrica màxima assolible no s'han tingut en compte en l'anàlisi de resultats.

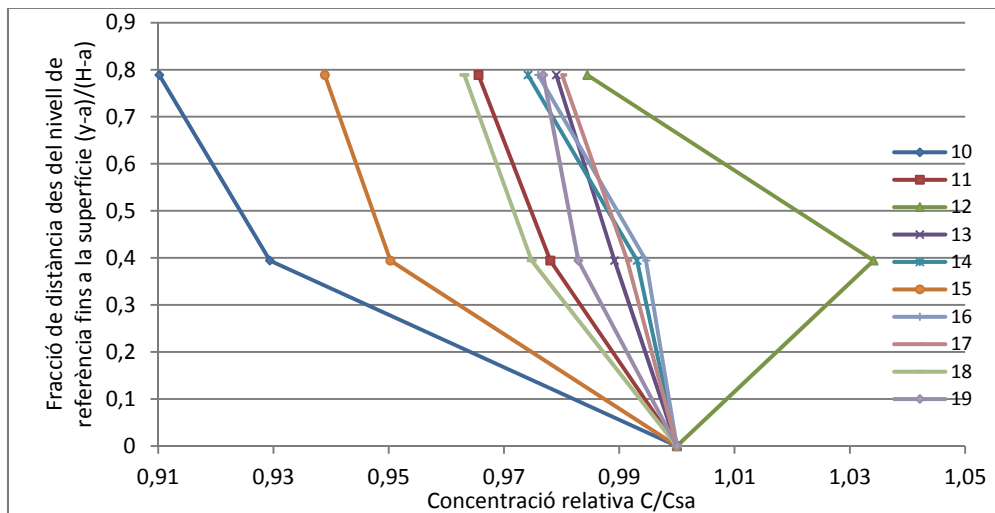
En relació a la forma dels perfils, definim com a perfils convexes aquells que tenen un màxim de concentració en la cota central, mentre que els perfils còncaus seran aquells que tinguin un mínim en la cota central. En la Figura 8 es mostren els perfils del primer experiment. En ella es pot apreciar que hi ha dos perfils (4 i 5) que tenen una distribució diferent a la que normalment presenten els perfils de

concentració teòrics estudiats per diferents autors. Particularment, mitjançant l'equació de Rouse<sup>7</sup> s'obtenen perfils còncaus que es caracteritzen per portar més concentració per fons que per la superfície, tal i com passa en els perfils 6,7,8 i 9. En canvi, els perfils 4 i 5 tenen una forma convexa i el calat central presenta una concentració relativa superior a la del calat del fons i a la del calat més proper a la làmina d'aigua.



**Figura 8.** Distribució del sediment en suspensió al llarg del primer experiment en base a les dades experimentals.

En la Figura 9 es presenten els perfils obtinguts amb les dades del segon experiment. En aquest cas també es pot observar que els perfils 12,14 i 16 tenen una forma convexa.



**Figura 9.** Distribució de sediment en suspensió al llarg del segon experiment en base a les dades experimentals.

En el primer experiment hi ha un canvi de tendència entre el perfil 5 i el 6, mentre que en el segon experiment el canvi de tendència es produeix entre el perfil 12 i el 13. Al perfil 5 li correspon una concentració mitjana de 6,17 g/l i en el perfil 12 li corresponen 18,02 g/l. Aquestes dues concentracions pertanyen a la fase anterior a les que es va començar a detectar les primeres formes de fons, tan pel

<sup>7</sup> L'equació de Rouse és la més simple i les més utilitzada en l'estudi de la distribució del sediment en suspensió

primer com pel segon experiment. Amb aquests resultats sembla doncs que abans que es produeixi la concentració limitant, la concentració que hi ha al fons és inferior a la concentració que hi ha en cotes més altes.

#### 4.1.2. Perfils de concentració teòrics

La distribució teòrica de concentracions en un llit pla es pot obtenir a través de diferents enfocaments. Garde (1985) presenta els mètodes de Navonof, McTigue, Willis, Itakura i Kishi i Rouse.

En aquest apartat s'ha utilitzat un dels mètodes anteriors per a representar uns perfils de concentració teòrics i poder establir una comparació amb els perfils experimentals obtinguts en l'apartat anterior. L'equació de Rouse és la més simple i les més utilitzada en l'estudi de la distribució del sediment en suspensió. Així doncs els perfils de concentració teòrics s'han obtingut ajustant les dades de mostreig amb l'equació de Rouse. Aquesta s'obté com a resultat de fer l'equilibri entre el material que sedimenta degut a la velocitat de caiguda i el material que es posa en suspensió degut a les fluctuacions turbulentes. L'equació és la següent:

$$\frac{C_S}{C_{sa}} = \left( \frac{H-y}{y} \cdot \frac{a}{H-a} \right)^Z \quad Eq[22]$$

Sent:

$$Z = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{w_s}{K \cdot u^*}$$

On:

$C_S$  = Concentració de sediment a una distància "y" del fons.

$C_{sa}$  = Concentració de sediment de referència a una distància "a" del fons.

$a$  = Gruix de la capa de transport de fons que s'agafa com a cota de referència per a quantificar la concentració inicial. Cardoso (1998) defineix aquest valor com  $a = 0,05 \cdot H$ , tot i que no tots els autors el quantifiquen de la mateixa manera.

$w_s$  = Velocitat de caiguda de les partícules. Calculada aplicant la relació de Dietrich (1982) (Apartat 2.2)

$K$  = Constant universal de Prandtl-von Kármán, que acostuma a ser invariable, de manera que s'ha agafat 0,4; el valor per aigua clara.

$\beta$  = Factor de proporcionalitat entre el moment de difusió pel sediment i la viscositat cinemàtica o moment de difusió pel fluid. S'ha fet la hipòtesi que aquest factor és 1.

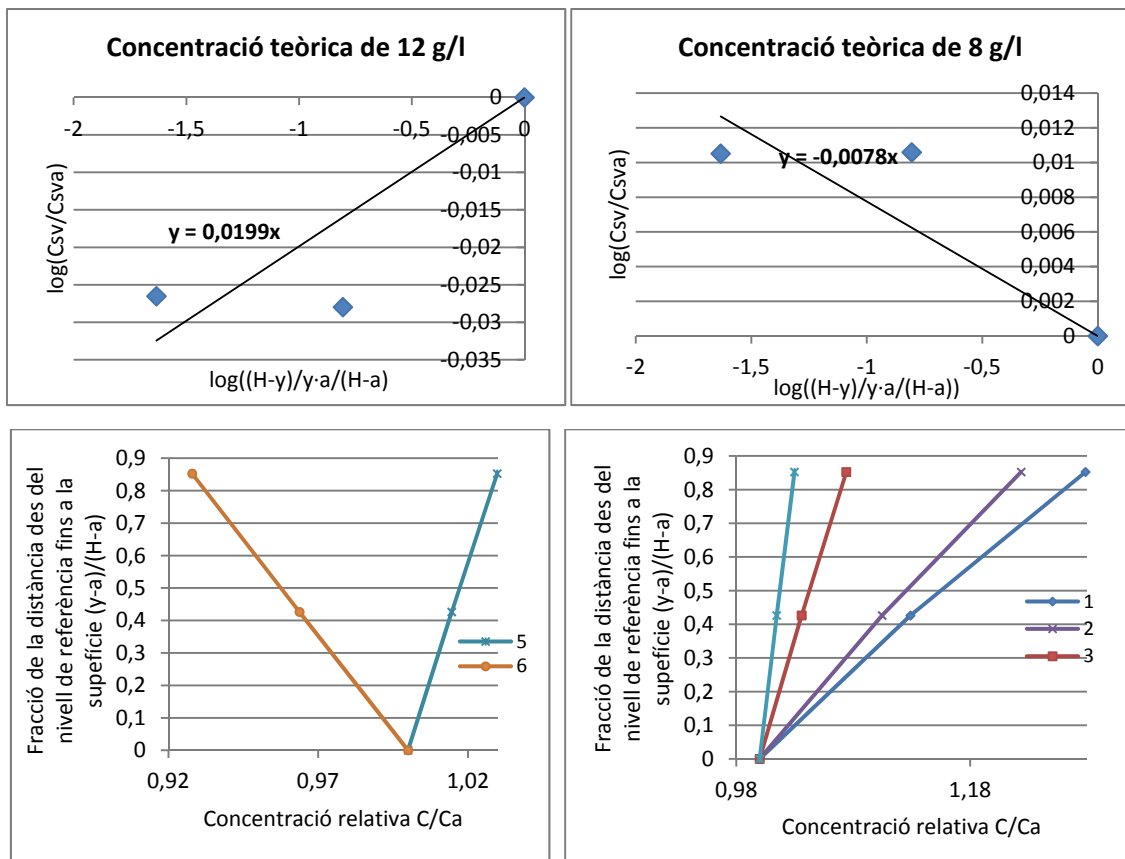
$u^*$  = velocitat de tall (Apartat 2.2)

Inicialment s'ha fet un ajust logarímic per a cadascun dels tres valors del calat corresponents a una mateixa concentració teòrica. En l'eix de les "x" s'ha representat el logaritme de l'equació de Rouse i en l'eix de les "y" s'ha representat el logaritme de les concentracions en volum relatives a la concentració de referència en la cota "a". Amb aquest ajust s'obté l'equació d'una recta amb un determinat pendent i una ordenada a l'origen. El pendent és el valor de Z i l'ordenada a l'origen compren el producte de constants tal i com mostren les Equacions 23 i 24.

$$m = Z \quad ; \quad n = Z \cdot \log \left( \frac{a}{H-a} \right) \quad Eq[23,24]$$

Donat que d'aquesta manera s'obtenen dos valors pel paràmetre  $Z$  s'ha imposat que la recta passi per l'origen, de manera que per a cada concentració la recta proporciona un valor de  $Z$ , amb el qual es pot determinar  $u^*$ .

El valor de  $Z$  ha de ser estrictament positiu, ja que és un producte de paràmetres positius. No obstant, en realitzar els ajustos s'han obtingut  $Z$  negatives per a les concentracions associades als perfils 1,2,3 i 5 en el primer experiment, i 12 en el segon experiment. En aquests casos la concentració procedent de la cota més superficial és superior a la de la cota propera al fons. En canvi, la concentració definida per l'equació de Rouse és zero a la superfície i infinit al llit, sent aquest últim valor físicament impossible i el primer probablement cert en el cas en que el flux circuli sobre un llit de sediment gruixut a una baixa tensió de fons. Donat que la forma de la corba seria contrària a la forma que té la distribució donada per Rouse, les equacions no són aplicables. En la Figura 9 es pot comparar la diferència entre un perfil obtingut amb un valor de  $Z$  positiu (perfil 6 equivalent a 12 g/l) i un de negatiu (perfil 5 equivalent a 8 g/l).



**Figura 10.** Comparació entre la tendència dels perfils de concentració per a  $Z$  positives (12g/l) i  $Z$  negatives (altres casos exposats).

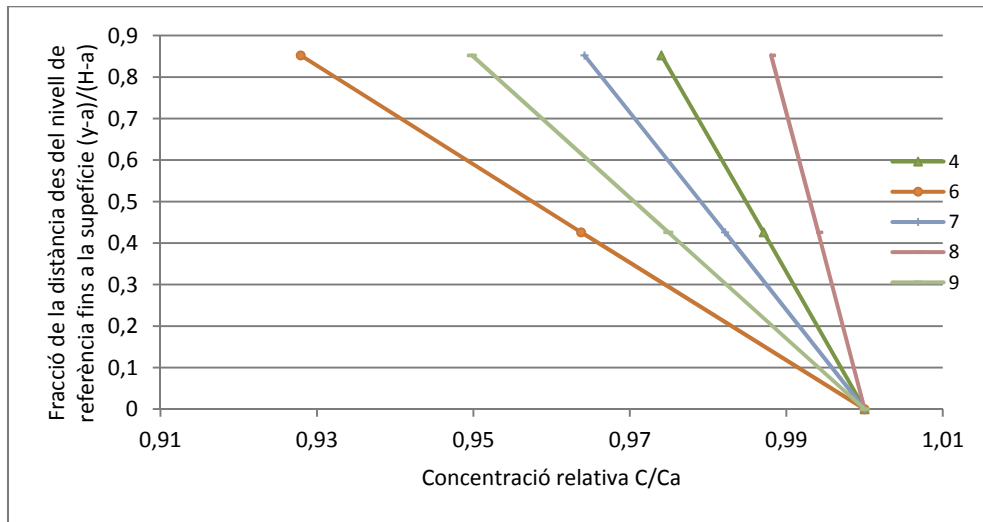
Així doncs cap dels perfils que poden ser obtinguts amb  $Z$  negatives no s'han representat en les consecutives gràfiques teòriques.

Els perfils 5 i 12 no incorrecs, sinó que no s'ajusten a l'equació de Rouse. En canvi els perfils 1,2 i 3 a més de no ajustar-se a les equacions, presenten un error elevat (Apartat 4.1.1), de manera que no s'han considerat.

En la Figura 11 es pot observar que els perfils més uniformes són el 4 i el 8, mentre que els menys uniformes són el 12 i el 24, justament sent aquests dos valors els consecutius a 4 i 8. Sembla doncs, que



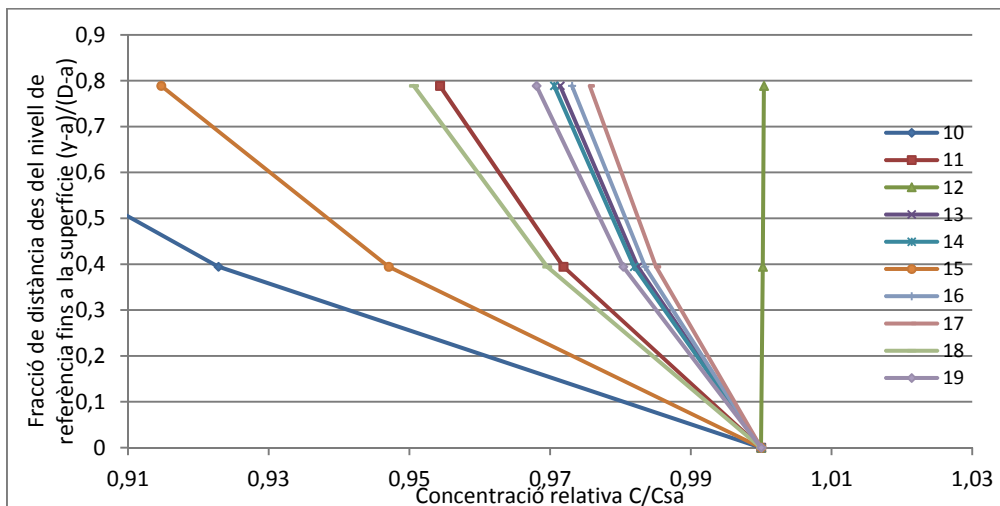
la uniformitat pugui variar amb la concentració de manera cíclica i que en aquests cicles la distribució del sediment en suspensió es vagi fent més uniforme a mesura que s'afegeix concentració, fins a un determinat punt límit que causa el fenomen contrari; menys uniformitat amb més concentració. A partir d'aquí s'assoleix un segon límit, i la concentració fa que el sediment en suspensió es torni a distribuir de manera més uniforme.



**Figura 11.** Distribució del sediment en suspensió al llarg del primer experiment en base a l'equació de Rouse.

Si ens fixem en la Figura 11, els cicles detectats són els següents:

- Des del perfil 10 al 15, sent el 13 el perfil més uniforme.
- Des del perfil 15 al 18, sent el 17 el més uniforme.
- Des del perfil 18 al 19, a partir del qual ja no es va afegir més sediment.



**Figura 12.** Distribució del sediment en suspensió al llarg del segon experiment en base a l'equació de Rouse.

D'acord amb Garde (1985) el canvi d'uniformitat ve donat pels diferents valors de  $Z$  de l'equació de Rouse. Si  $Z$  és molt petit, s'obté que la concentració no varia gaire al llarg de la vertical mentre que valors grans de  $Z$  generen canvis considerables de concentració al llarg de les  $y$ . Els valors petits de  $Z$  s'assoleixen quan el material en suspensió té una velocitat de caiguda petita o la tensió de fons és elevada.

### 4.1.3. Anàlisi del fenomen de ciclicitat en els perfils experimentals

En relació al primer experiment i pels perfils experimentals que s'ajusten als perfils teòrics de Rouse, s'observa que la concentració relativa de la cota més superficial és sempre superior al valor esperat en els perfils teòrics. Des de la cota central fins a la superficial, els perfils no segueixen cap ordre ni seqüència. En canvi, les parts inferior dels perfils (des de la cota propera al fons fins a la cota central) sí que tendeixen a ser més uniformes a mesura que hi ha més concentració. Concretament, des del perfil 6 fins al 8 tendeixen a ser més uniformes i des del 8 al 9 la uniformitat decreix.

En relació al segon experiment també es pot veure que a la cota més superficial hi ha més concentració que l'esperada segons els perfils teòrics, i la tendència cíclica seria la mateixa si en els perfils 12, 14 i 16 no es produís un canvi de tendència.

### 4.1.4. Mostrejos addicionals

#### Primer experiment

Tal i com s'ha explicat en l'apartat 3.4.2 després de realitzar el mostreig per a la concentració teòrica de 4 g/l es van prendre 3 mostres addicionals, cadascuna per una cota diferent. Es tractava de comprovar si la concentració variava després d'un període curt de temps (2 minuts). D'acord amb la Taula 25 i la Figura 13.2 es pot observar que després d'aquests 2 minuts la concentració disminueix, i aquesta disminució s'accentua a mesura que la cota és més propera a la superfície. En segon lloc, i d'acord amb la Figura 13.1 es pot apreciar que el perfil de concentracions es fa menys uniforme. No obstant, no es pot afirmar que la concentració pugui disminuir amb un període tan petit de temps només havent tingut en compte dos mostrejos.

Cota (cm)	$\Delta C$ (g/l)
1,2	-0,09
4,4	-0,26
7,6	-0,33

Taula 25. Variació de la concentració després de dos minuts d'haver fet el primer mostreig.

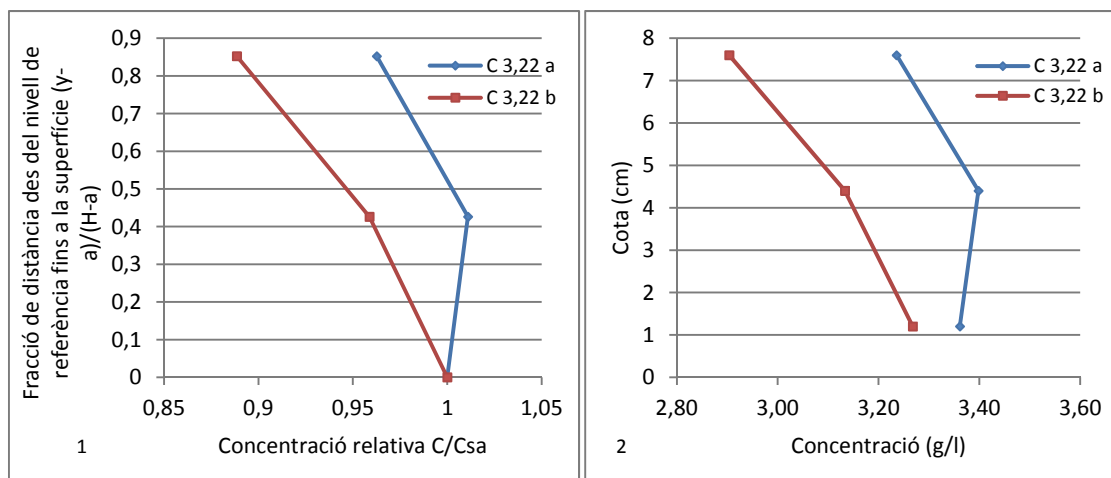
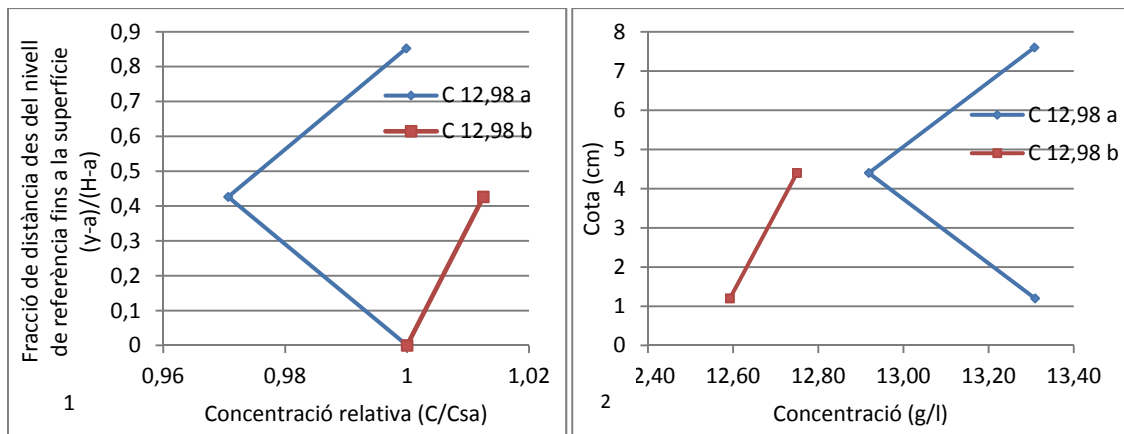


Figura 13. A l'esquerra es mostra els perfils de concentració experimentals abans (3,22 a) i després (3,22 b) de 2 minuts d'haver fet el primer mostreig. A la dreta concentracions mesurades en funció de la cota.

El segon mostreig adicional que es va fer va ser pels 20 g/l teòrics. En primer lloc es van prendre les mostres en el punt de mesura habitual d'aigües avall. Després de 30 minuts es va traslladar el carro aigües amunt del canal i es va comprovar que el calat fos el mateix que aigües avall. Es va observar que el calat era de 8,708 cm en comptes del calat inicial de 8,818 cm, i tot i que la disminució només era de 1,1 mm el sífó més superficial no va poder extreure la mostra.

Els resultats de concentració es mostren en la Figura 14. La concentració aigües amunt és lleugerament inferior a la d'aigües avall en les dues cotes analitzades. Pel que fa a la uniformitat del perfil, aigües amunt el perfil no s'ajusta al perfil teòric de Rouse, ja que el valor de la Z és també negatiu.

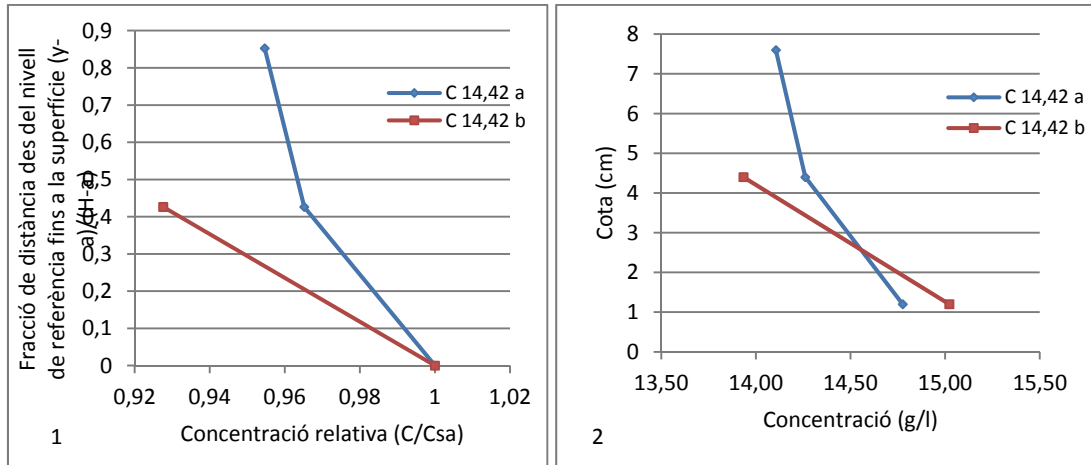


**Figura 14.** A l'esquerra es mostren els perfils de concentració experimentals aigües avall (12,98 a) i aigües amunt (12,98 b).

Finalment es va fer una duplicació de mostres per veure en quin error es trobaven les mesures de concentracions obtingudes. En la Taula 18 es mostren les variacions de concentració en funció de la cota. En un terme mitjà es podria dir que l'error dels valors es troba dins d'un rang de  $\pm 0,29$  g/l. No obstant, aquesta tolerància és aproximada, ja que només ens hem basat amb dos valors de variació per a fer-ne la mitjana. Per altra banda l'error relatiu d'aquestes mesures és molt petit, cosa que indica que la metodologia seguida sembla vàlida.

Cota (cm)	$C_a$ (g/l)	$C_b$ (g/l)	$\Delta C$ (g/l)
1,2	14,78	15,02	-0,25
4,4	14,26	13,93	0,33
7,6	14,11	-	-

**Taula 26.** Variacions de concentració

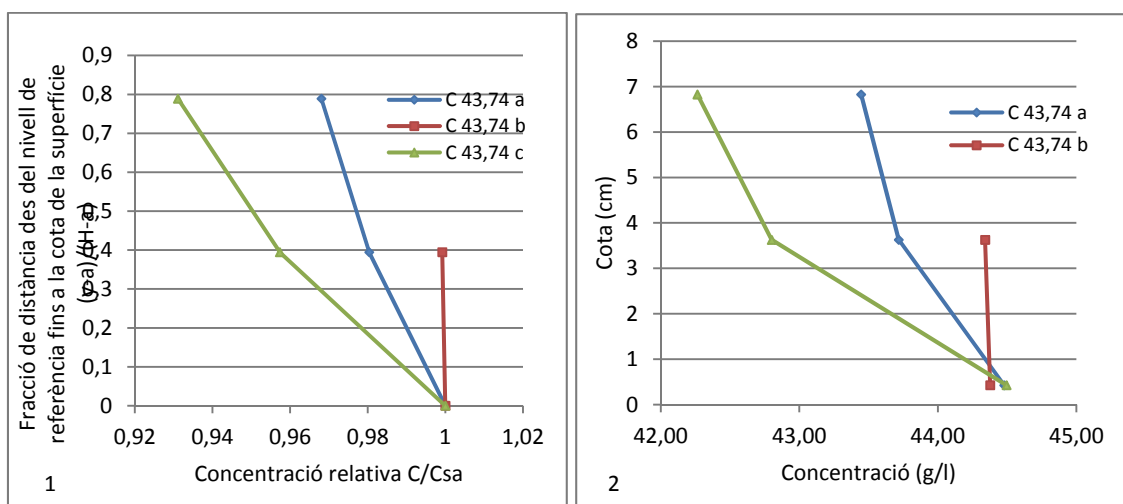


**Figura 15** A l'esquerra es mostren els perfils de concentració experimentals adimensionals de les mostres primeres (14,42 a) i segones (14,42 b). A la dreta les concentracions mesurades en funció de la cota.

### Segon experiment

En el segon experiment es van prendre dues mostres addicionals per a la concentració teòrica de 60 g/l per veure si el fet de prendre les mostres del segon experiment amb els pots que contenien el sediment del primer experiment causava errors, tot i tenir en compte que la nova tara era la del pes del pot més l'antic sediment dipositat al fons. Les dues noves mostres es van prendre amb pots nets. Després d'haver deixat passar un temps (40 minuts) es van prendre tres mostres més per veure què passava amb els perfils teòrics d'una mateixa concentració quan es deixava passar un període llarg de temps. Els resultats han estat els següents:

Després de 40 minuts d'espera sembla que la concentració en el calat més baix es manté pràcticament constant (Figura 17.2) però decreix amb l'increment de cota. Donat que l'augment a la cota més profunda és només de 0,02 g/l aquesta tendència a la sedimentació es podria trobar en zones on hi ha menys turbulència, com en les canonades o en els racons dels dipòsits. El segon efecte que produeix el temps és la disminució d'uniformitat del perfil de concentracions (Figura 17.1).

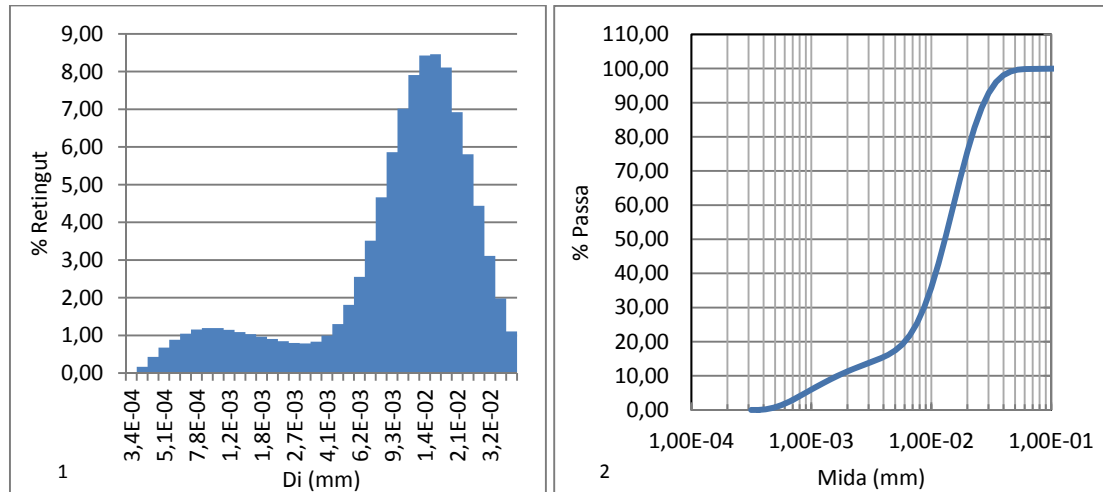


**Figura 16.** 1) Perfils de concentració experimentals adimensionals per a les mostres inicials (43,74 a), mostres amb pots nets (43,74 b) i mostres amb pots nets després de 40 minuts (43,74 c). 2) Concentracions en funció de la cota.

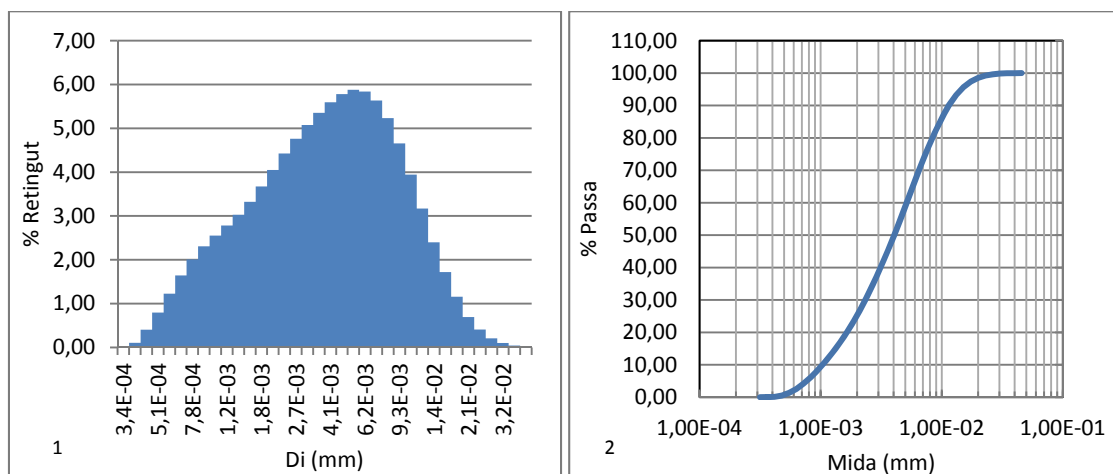
## 4.2. FORMES DE FONTS

### 4.2.1. Granulometria del llim que queda dipositat al fons

Per tal de veure si la granulometria dels sacs de sediment coincidia amb la granulometria del material dipositat al fons es va agafar una mostra una vegada acabat l'experiment i haver buidat l'aigua del canal. Els resultats obtinguts es mostren en la Figura 17.



**Figura 17.** Anàlisi granulomètric del material del sediment que forma les formes de fons. 1) Distribució discreta de les mides. 2) Corba granulomètrica acumulada i continua.



**Figura 18.** Anàlisi granulomètric del material del sediment original present als sacs. 1) Distribució discreta de les mides. 2) Corba granulomètrica acumulada i continua.

Comparant les Figures 17.2 i 18.2 es pot observar que la mida  $D_{50}$  del sediment acumulat al fons és lleugerament superior a la del material original que s'introdueix al sistema. Per altra banda la desviació típica també és superior, cosa que indica que la dispersió de les mides respecte el valor promig també és més gran. A la Taula es mostren les característiques de les dues mostres.

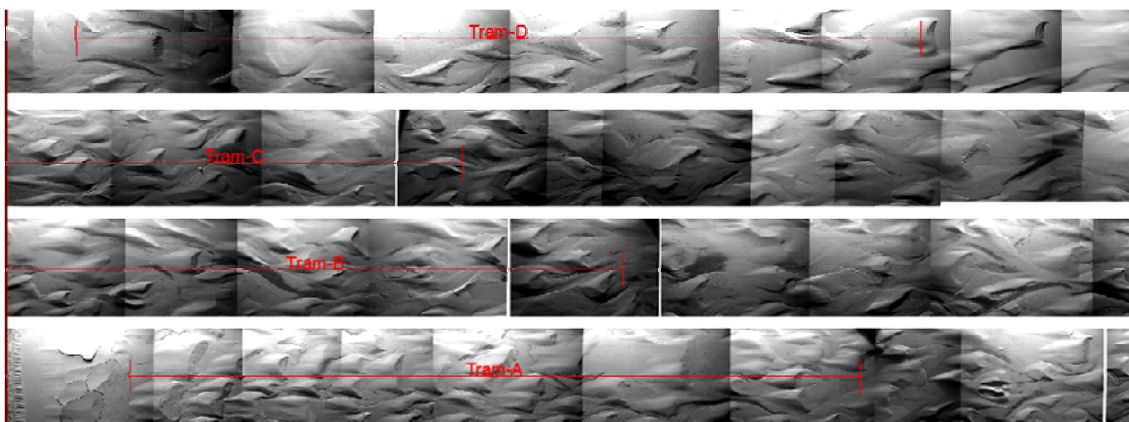
Mostra	$D_{50}$ (micres)	$\sigma$
Sac	4,04	1,29
Fons	13,01	1,49

**Taula 27.** Mediana de la distribució de la mida i desviació típica de les mostres.

Així doncs, la mediana de les mides de les partícules que acaben sedimentant són una fracció més grollera que la mediana de les mides del material que va en suspensió.

#### 4.2.2. Característiques de les formes de fons del primer experiment

Per a concentracions petites com les del primer experiment (14,42 g/l) les formes que queden dipositades al fons presenten poques regularitats, tan a nivell de disposició com a nivell de magnituds. En la Figura 19 es mostren les altures de les formes de fons cada 21 cm des d'aigües avall del canal fins a aigües amunt. Les altures corresponen a les mesures preses pel centre del canal i pels marges dret i esquerre. Si bé és cert que és difícil detectar regularitats en el marc global de tot el canal, si l'anàlisi es fa per trams es pot observar que l'altura té tendència a disminuir en els trams centrals del canal. Aquests trams s'han definit a partir de la Il·lustració 25, en que es veuen zones on les formes de fons tenen les mateixes característiques.



Il·lustració 25. Determinació dels diferents trams en funció de la similitud de les característiques del fons.

El primer tram correspon a la part d'aigües amunt del canal, mentre que el quart tram correspon a aigües avall del canal. Per a cada tram s'ha fet un promig dels pics obtinguts amb les mesures de la Figura 19. No obstant, cal dir que les mesures es van fer cada 21 cm, i per tant pot ser que alguns dels pics representats siguin màxims relatius en comptes de màxims absoluts, és a dir, punts de cota màxima respecte la mesura anterior i posterior. És per aquest motiu, que les mitjanes que es mostren en la Taula 21 en realitat són lleugerament superiors.

L'anàlisi per trams també s'ha fet per a la seva forma en planta; en el primer tram les formes són petites i perfectament definides. Entre el segon i el tercer tram hi ha una zona on el fons presenta poques regularitats, i el mateix passa entre el tercer i el quart tram. Cap a aigües avall, les formes es van fent una mica més grans i es troben més separades.

Comparant els dos mostrejors fets aigües amunt i aigües avall en el mateix instant de temps (apartat 4.1.4) ja s'ha vist que la concentració aigües amunt és lleugerament inferior a la d'aigües avall, així mateix, la diferència entre calats és de 1,1mm, denotant que les condicions hidràuliques fixades inicialment es veuen lleugerament modificades amb el temps. Caldria fer més experiments per poder concloure si el fet que les dimensions de les formes de fons siguin més grans aigües avall podria ser degut a que les condicions no siguin del tot uniformes, o bé el motiu rau en altres variables.

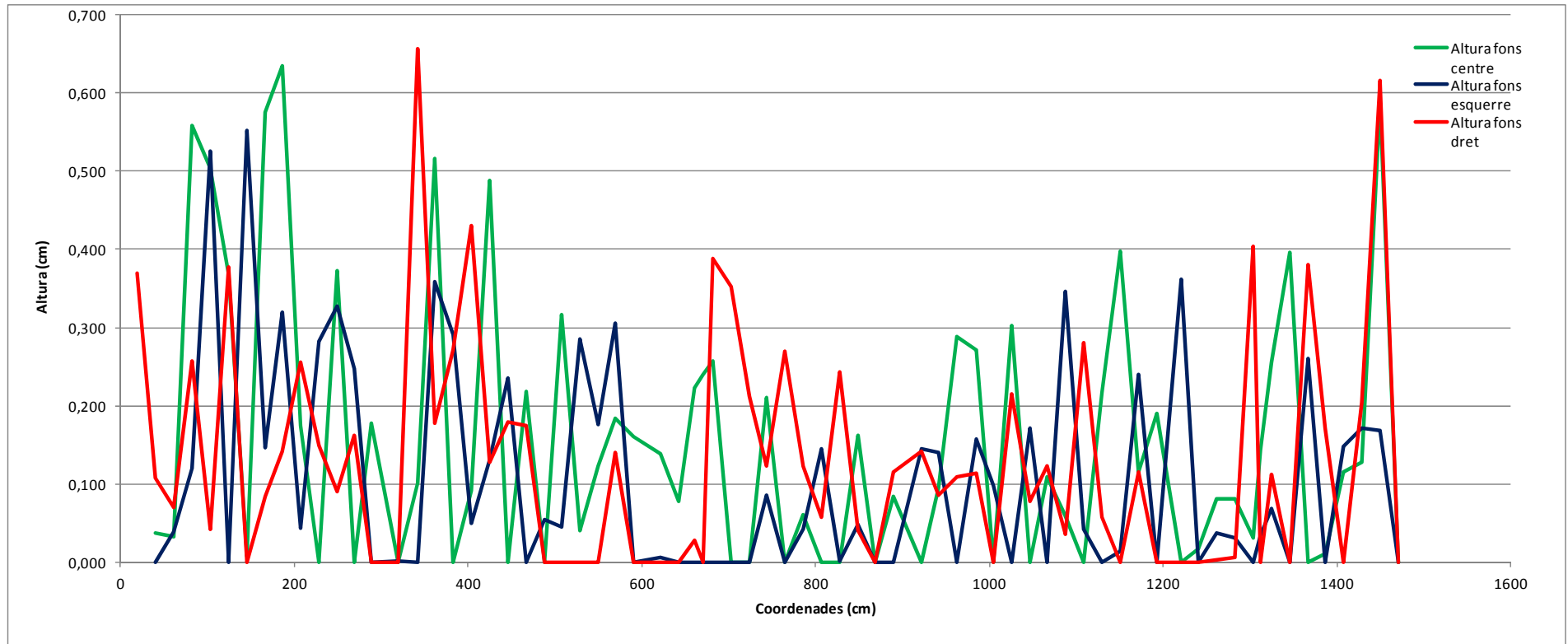
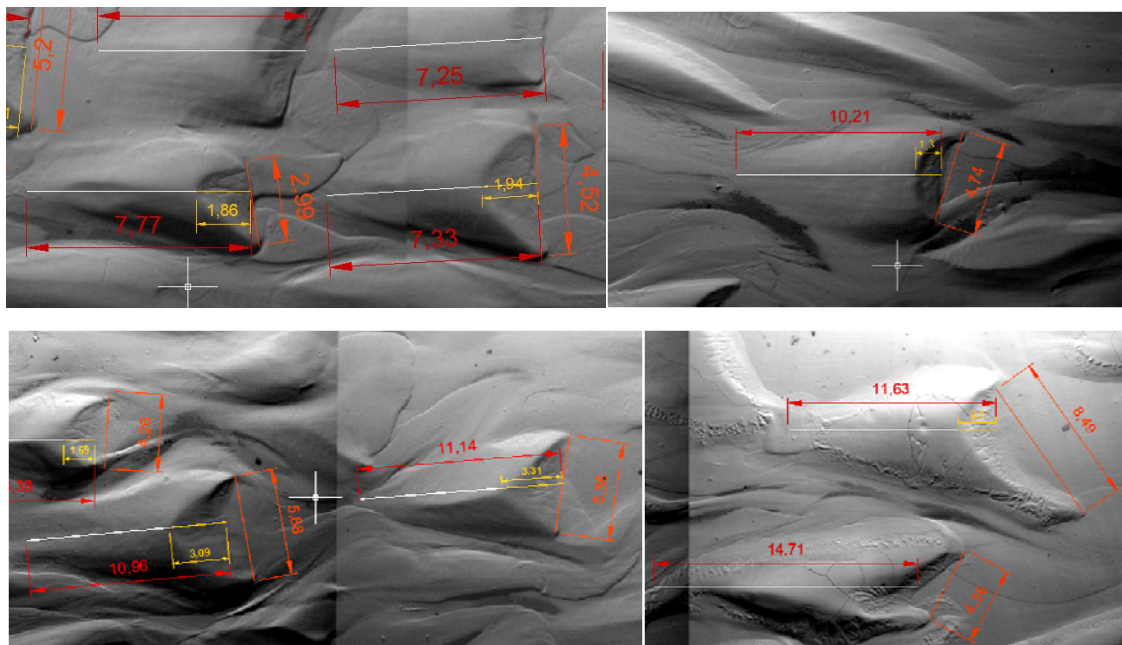


Figura 19. Alçada<sup>8</sup> de les formes de fons en funció de la coordenada del canal.

<sup>8</sup> Alçada mesurada independentment de si hi havia pics o no, de manera que probablement alguns dels pics representats en la Figura no correspongui a un pic real, i alhora aquest no hagi estat representat.

Per a tenir una idea quantitativa de les magnituds de les formes de fons en cada tram s'ha mesurat aquelles formes que presentaven una silueta clara i similar a la forma típica descrita anteriorment. Amb l'ajuda de l'Autocad s'ha mesurat un total de 64 longituds. Donat que les amplades costava més de veure-les definides, s'han pres mesures de 32 formes. Per saber a quina distància es troba el pic de l'extrem més ample de la forma de fons també s'han pres 32 mesures. A la Il·lustració 26 es poden apreciar algun exemples de mesures per a cadascun dels quatre trams.



Il·lustració 26. Magnituds de les formes de fons corresponents als trams 1, 2, 3, 4 (de dalt a baix i d'esquerra a dreta).

A continuació s'ha aplicat un factor d'escala, calculat a partir de la dimensió d'una forma i la magnitud que marcava l'Autocad. Els resultats mitjans obtinguts són els que es mostren en la Taula 28.

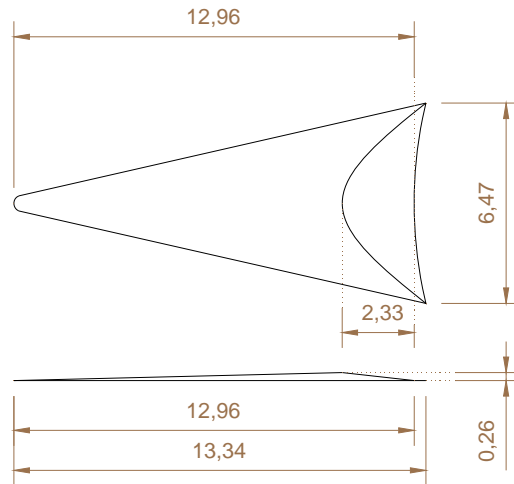
Tram	Coordenades (cm)	Longitud (cm)	Amplada (cm)	Distància entre pic i un extrem <sup>9</sup> (cm)	Altura (cm)
A: aigües amunt	1217,94-1460	11,91	5,15	2,15	0,24
B	924,16-1127	12,64	6,14	2,35	0,18
C	605,3-756	13,35	7,92	3,58	0,15
D: aigües avall	82,23-360,2	16,24	8,07	1,66	0,42
Mitjanes		12,96	6,47	2,33	0,26

Taula 28. Magnituds de les formes per trams i mitjanes.

En la Il·lustració 27 es mostra una forma de fons tipus amb les magnituds mitjanes obtingudes. Es pot observar les formes són arrodonides i que el seu extrem d'aigües avall és més ample, mentre que l'extrem d'aigües amunt acaba en punta.

<sup>9</sup> Correspon a l'extrem més ample d'aigües avall.





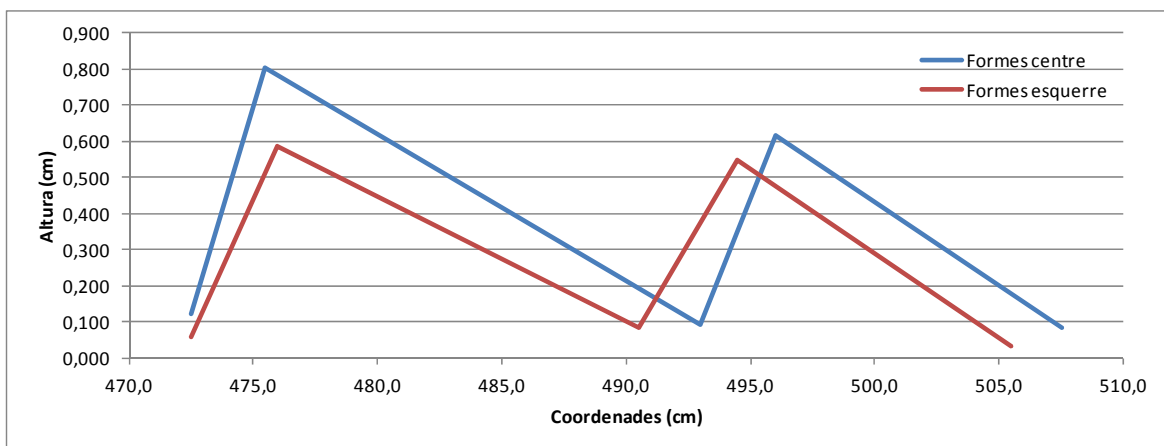
**Il·lustració 27.** Planta i alçat de la tipologia de forma tipus del primer experiment amb les magnituds mitjanes.

#### 4.2.3. Característiques de les formes de fons del segon experiment

Per concentració final tres vegades més gran que la obtinguda en el primer experiment ( 43,74 g/l) ja no es poden detectar formes individuals col·locades una al costat de l'altra. Sembla que la diferència de sediment dipositat al fons entre els dos queda dipositat entre forma i forma, de manera que les formes del primer experiment deixen d'existir per convertir-se en una tipologia de dunes que ocupen tota l'amplada del canal. Aquestes dues es troben al llarg de tota la longitud del canal, i igual que en el primer experiment es caracteritzen per tenir l'extrem d'aigües avall més alt que l'extrem d'aigües amunt. No obstant, donat que ara es tracta d'ondulacions, ja no es parlarà de pics sinó de crestes.

En les Figures 20,21 i 22 es mostren les altures i longituds de les formes de fons en tres trams diferents del canal:

- El Tram-I es troba al segon mòdul del canal entre les coordenades 470 i 510 cm.
- El Tram-II es troba al tercer mòdul del canal entre les coordenades 770 i 840 cm.
- El Tram-III es troba al cinquè mòdul del canal entre les coordenades 1285 i 1460 cm. Aquest tram coincideix amb una part del Tram-A definit al primer experiment.



**Figura 20.** Altures de les formes de fons mesurades en el Tram I.

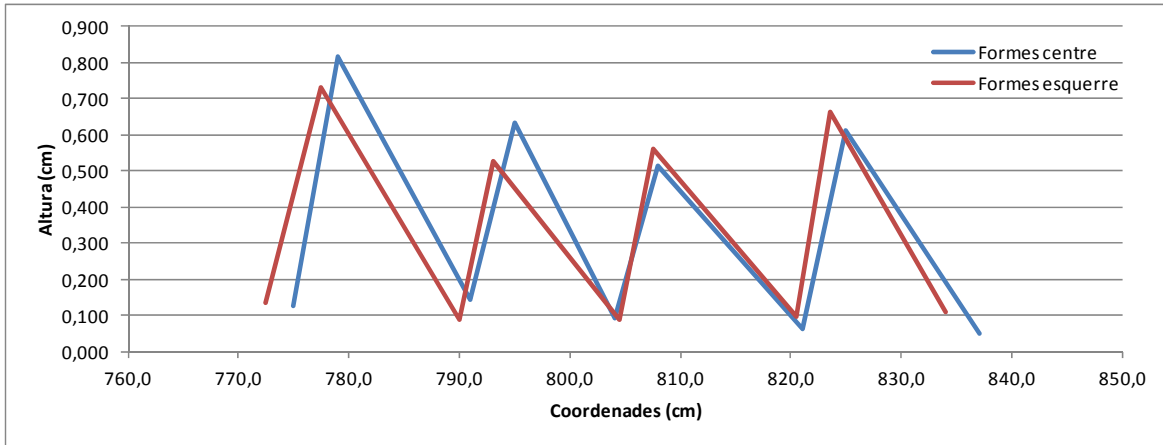


Figura 21. Altures de les formes de fons mesurades en el Tram II.

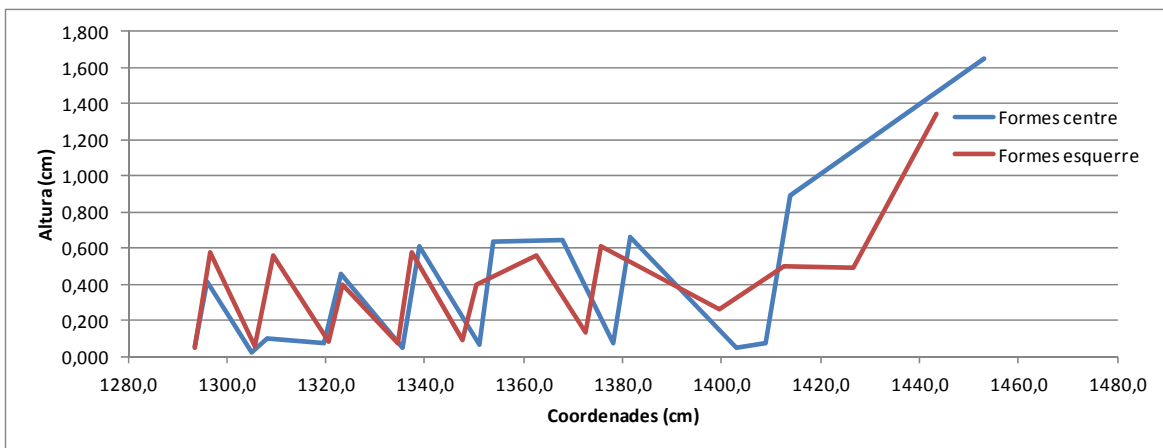
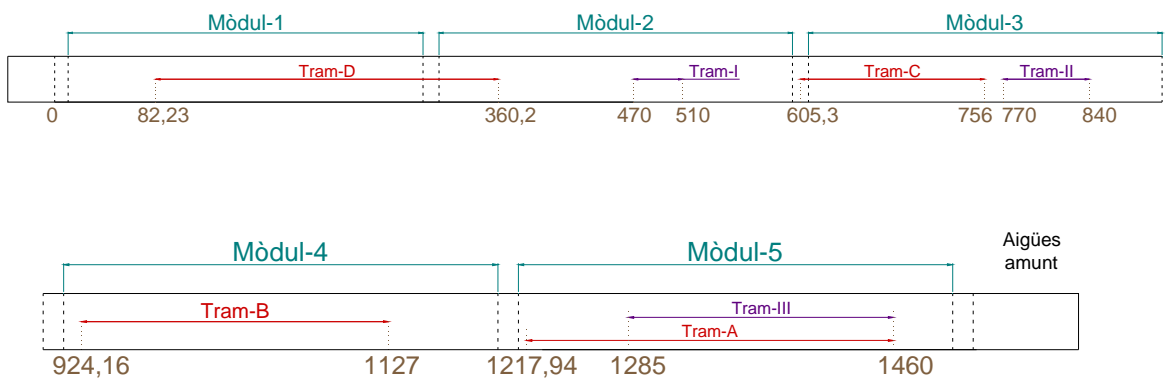


Figura 22. Altura de les formes de fons mesurades en el Tram III.



Il·lustració 28. ubicació dels trams descrits en els apartats 4.2.1 i 4.2.2 en la planta del canal.

Tal i com es pot observar en la Figura 20, en el Tram-I les crestes de les formes de fons situades a la part central del canal tenen altures de 0,804 cm i 0,618 cm i en el marge esquerre fan 0,586 cm i 0,548 cm. Aquestes mesures són semblants en el Tram-II, on les crestes tenen altures que es troben entre els 0,516 cm i els 0,818 cm. En canvi, en el Tram-III l'altura de les crestes disminueix; es troba entre 0,396 cm i 0,662 cm. Excepcionalment, i al final de tot del mòdul 5 s'hi creen formes diferents a la resta degut

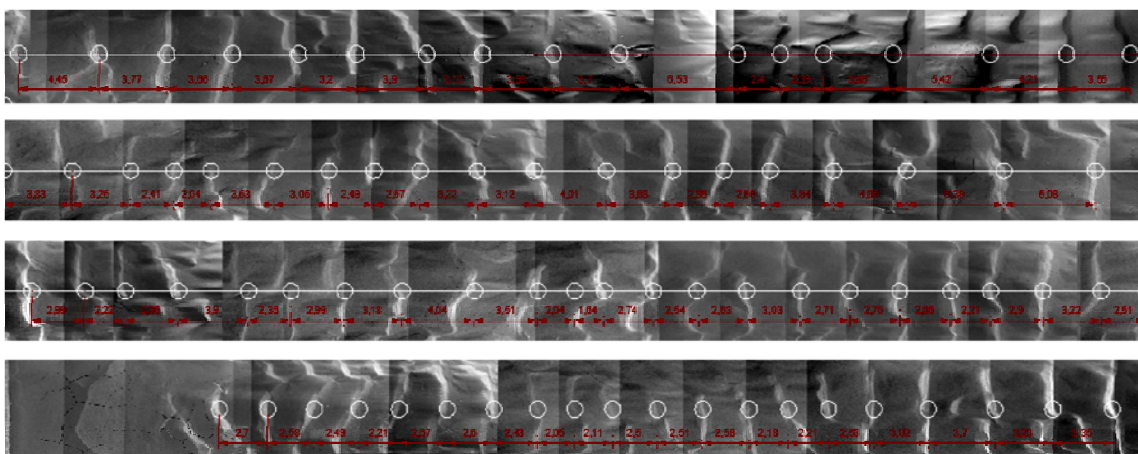
a l'efecte del difusor; en aquesta zona s'han mesurat alçades de 1,650 cm en el centre del canal i 1,344 cm al marge esquerre del canal.

Tram	Centre (cm)	Esquerre (cm)	Mitjana (cm)
I	0,711	0,567	0,639
II	0,645	0,621	0,633
III	0,571	0,523	0,544

**Taula 29.** Mitjanes dels pics per a cadascun dels trams.

Es veu doncs, que tot i que les mitjanes de les altures de les crestes pel Tram-I i pel Tram-II són molt semblants, la tendència és augmentar aigües avall. En el primer experiment també s'ha observat una semblança entre els pics del Tram-C i el Tram-B, tot i que els seus valors són molt inferiors als obtinguts en el segon experiment. També s'ha observat aquesta tendència a augmentar aigües avall, ja que els valors pel Tram-A són clarament superiors. En canvi, a diferència del segon experiment, en el primer experiment les altures del Tram-D són superiors a les dels trams B i C. Això és degut a que les mesures que es van agafar en el primer experiment van ser cada 21 cm, sense distingir si es tractava d'un pic o d'una vall. D'aquesta manera observant la Figura 19 resulta difícil detectar a partir de quin punt comencen les formes irregulars causades per la presència del difusor. Donada aquesta dificultat, a l'hora de fer les mitjanes es van tenir en compte tots els pics més alts.

Tot i que de les Figures 20,21 i 22 també se'n poden extreure longituds, per tal d'obtenir resultats més representatius s'ha optat per a mesurar les distàncies entre les crestes presents en la II·lustració 29. S'han tornat a fer mitjanes per trams. Els trams engloben la totalitat de la longitud del canal excepte el fons d'aigües amunt annexat al difusor. Cada tram representa una línia de la II·lustració 29.



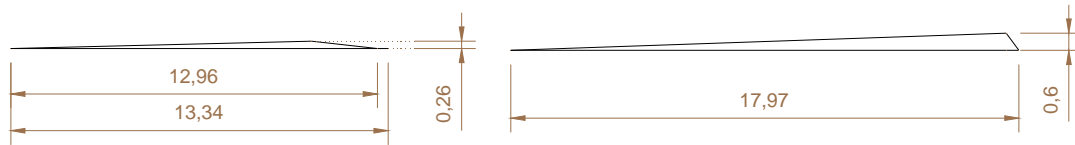
**II·lustració 29.** Distàncies entre pics abans d'haver aplicat el factor d'escala corresponent.

Els resultats obtinguts es mostren en la Taula 23. En aquest cas s'observa també la mateixa tendència a augmentar la longitud aigües avall del canal.

Tram	Coordenades (cm)	Longitud entre pics (cm)
A': aigües amunt	1116-1417,7	14,99
B'	744-1116	15,81
C'	372-744	18,94
D': aigües avall	0-372	21,69
Mitjana		17,97

**Taula 30.** Longitud entre crestes de les formes de fons en cadascun dels trams.

A continuació es mostra un esquema comparatiu entre les magnituds mitjanes verticals i longitudinals dels alçats de les formes de fons del primer i del segon experiment.



**Il·lustració 30.** Comparació de les dimensions en alçat d'una forma de fons del primer experiment (esquerra) amb una forma de fons del segon experiment (dreta).

La longitud mitjana passa de ser de 12,96 cm a ser 17,97 cm per a les concentracions de 14,42 g/l i 43,74 g/l respectivament. Per una concentració de 43,74 g/l la longitud és 2 vegades inferior a la que li correspondria si increment de la longitud de les formes de fons fos proporcional a la concentració present al flux.

En relació als pics, es passa d'una alçada mitjana de 0,26 cm a 0,6 cm. La relació entre increment de concentració i increment d'altura tampoc no és constant, ja que l'altura pels 43,74 g/l és 1,3 vegades inferior a la que li correspondria si fossin proporcionals. Sent conscients que són càlculs aproximats, perquè les alçades en el segon experiment només es van prendre en tres petits trams del canal (I,II, III) un increment de concentració té més afectació en la magnitud vertical de les formes de fons que en la magnitud horitzontal.

### 4.3. RELACIÓ ENTRE L'EVOLUCIÓ DE LES FORMES DE FONTS, LES DADES DE VELOCITAT OBTINGUDES AMB EL VECTRINO I LA CONCENTRACIÓ

#### 4.3.1. Primera concentració limitant

Durant la realització dels diferents experiments es va anar observant que la primera concentració limitant s'assolia per a diferents concentracions teòriques i que el temps necessari per a assolir-lo era variable. Els resultats han estat que per a concentracions més grans, el temps que tarden les formes de fons en dipositar-se al llarg de tot el canal és inferior al temps necessari de formació amb concentracions més petites.

En la Taula 19 es mostra la semblança entre temps i concentracions reals en el moment en que s'observen formes de fons al llarg de tot el canal pels experiments 3 i 5 i pels experiments 2 i 4.

Experiments	Temps de formació del fons		1a concentració limitant observada (kg/m <sup>3</sup> )	
	Primers indicis de formes	Formes a tot el canal	Concentració teòrica	Concentració real
1r	5 hores 27 min	5 hores 45 min	16	11,07
2n	2 hores 37 min	3 hores 2min	36	22,00
3r	1 hora 20 min	1 hora 50 min	60	40,07
4t	2 hores 6 min	2 hores 49 min	60	18,28
5è	34 min	2 hores 04 min	60	36,67

**Taula 31.** Temps en que es formen les primeres formes de fons (per conveni és el temps en que hi ha formes al llarg de tot el canal) i primera concentració limitant observada.

El material transportat en suspensió no comença a dipositar al fons quan s'assoleix una determinada concentració sinó que també depèn del temps que fa que el material està circulant pel flux. En efecte, tot i que la primera concentració limitant es va observar entre els 8,17 i els 11,07 g/l, en el segon experiment, tot i que inicialment hi havia una concentració mitjana de 7,47 g/l les formes de fons van necessitar 3 hores i 2 minuts en formar-se fins a assolir una concentració de 22 g/l. Per tant no hi ha una relació lineal entre la primera concentració limitant i la concentració present al flux sinó que hi ha una segona variable. Així doncs la primera concentració limitant és una funció del temps i de la concentració de partícules que circula en suspensió.

#### 4.3.2. Cinquè experiment

El Vectrino es va col·locar a 1,1 cm del fons i es va mantenir en el mateix calat durant tot l'experiment, de manera que els resultats obtinguts representen el vector velocitat en un punt i al llarg del temps. L'aparell mesura la component  $v_x$  en direcció del flux, la component  $v_y$  en direcció transversal al flux i la component  $v_z$  en vertical. Els valors de  $v_x$  obtinguts són sempre negatius pel fet que es va orientar el Vectrino en direcció aigües amunt, i per tant en contra de la direcció del flux. No obstant, els resultats de  $v_x$  es presenten en la direcció del flux, i per tant, els valors de les velocitats obtinguts són positius.

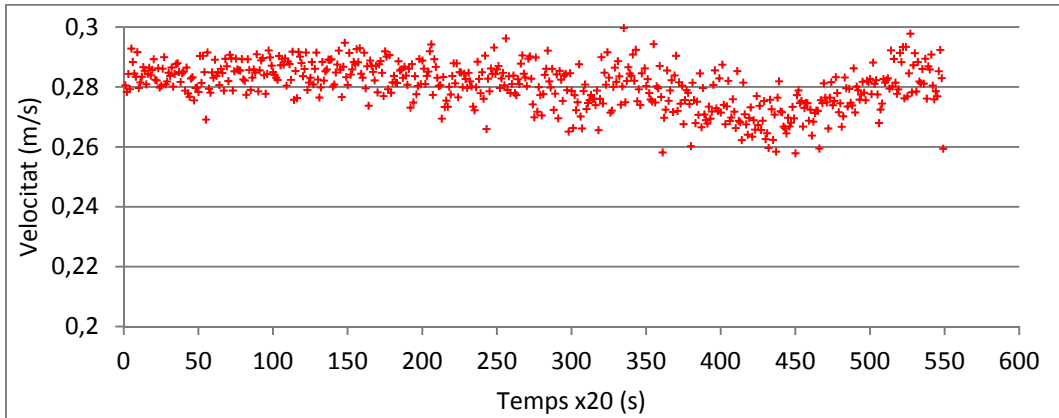
Amb el Vectrino s'obtenen dades a 25 Hz, que equival a dir 25 mesures per segon. Els eixos de les figures s'han ajustat de tal manera que cada punt de la gràfica representi la velocitat mitjana cada 20 s de presa de mesures, obtenint doncs components de velocitat mitjanes i no instantànies.

Les Figures 23, 24, 25 mostren les tres components del vector velocitat;  $x$   $y$  i  $z$  respectivament. En la Figura 23 es pot observar que la component de la velocitat  $v_x$  fluctua al voltant dels 0,28 m/s, augmentant i disminuint constantment. Tot i que es veu que l'amplitud de les fluctuacions augmenta a mesura que passa el temps, la gran variabilitat de les velocitats entre mesures mitjanes puntuals consecutives fa que la detecció d'aquestes fluctuacions sigui poc clara. En canvi aquest fenomen es veu més clar en les dues gràfiques que mostren l'evolució de les components  $v_y$  i  $v_z$ . En elles es pot observar que a partir del punt 175, que correspon a uns 58 minuts després d'haver començat l'experiment, les components  $v_y$  i  $v_z$  comencen a mostrar grans fluctuacions en relació a les variacions que hi havia abans dels 58 minuts.

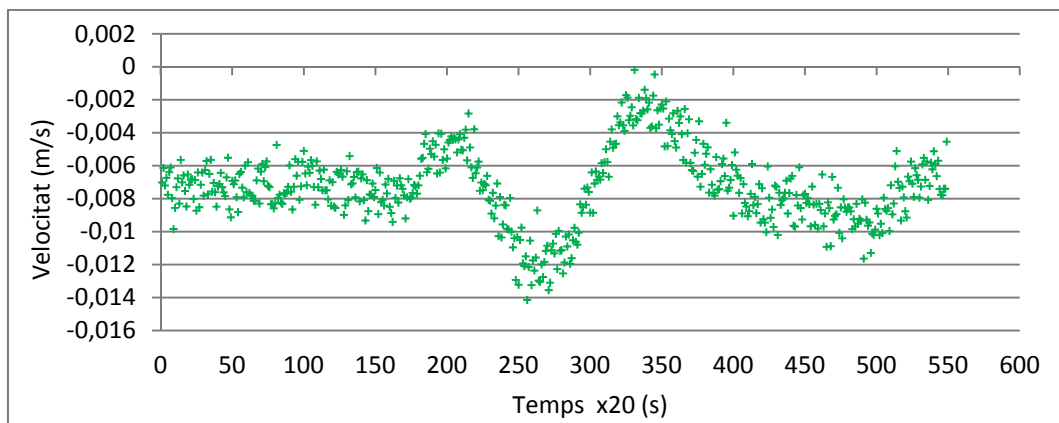
Especialment, les variacions de la component  $z$  del vector velocitat van estretament lligades amb el transport de fons. Sembla que un decrement de l'alçada de les formes de fons pugui suposar una disminució de l'empenta que exerceix el fons a les partícules i per tant que la seva capacitat de posar-se en suspensió sigui menor, disminuint-ne la component vertical del vector velocitat. En canvi, un increment d'alçada actuaria generant una empenta a les partícules incrementant-ne la seva velocitat vertical. Aquest increment i decrement de l'alçada del fons es produeix perquè les formes de fons es desplacen longitudinalment al llarg del canal, i en passar pel volum de control on el Vectrino pren les mesures, aquest és capaç de detectar el canvi de comportament del flux, particularment en relació a la seva component vertical.

Tot i que no es pot dir amb certesa si els pic de la component  $v_z$  es produeixen en el moment en que la cresta de la forma de fons està passant pel volum de control sí que es pot afirmar que entre dos pics de màxima velocitat  $v_z$  haurà passat una forma de fons completa. Per tant, tota una longitud d'ona de la gràfica correspon al temps que tarda una forma de fons en recórrer la seva longitud total.

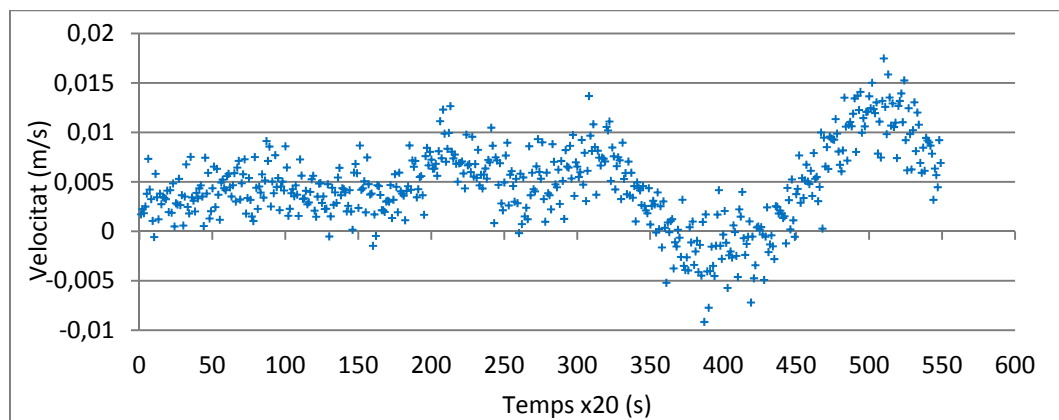
Sembla que aquesta última hipòtesi és acceptable quan comparem la velocitat de desplaçament de les formes de fons calculada mitjançant les observacions exposades en la metodologia amb la velocitat obtinguda a través de les dades del Vectrino i veiem que és semblant. En el primer cas, la velocitat de desplaçament obtinguda va ser de 0,28 cm/min. En el segon cas, una fluctuació clara és la que va des del punt 325 fins a 525, que equival a 67 minuts. Agafant la longitud mitjana de les formes de fons obtinguda en el segon experiment (17,97 cm) obtenim que la velocitat de desplaçament que mesura el Vectrino és de 0,27 cm/min.



**Figura 23.** Component x del vector velocitat al llarg del cinquè experiment.



**Figura 24.** Component y del vector velocitat al llarg del cinquè experiment.



**Figura 25.** Component z del vector velocitat al llarg del cinquè experiment.

Tal i com hem dit, a partir del punt 175, que correspon a uns 58 minuts després d'haver començat l'experiment, les components  $v_y$  i  $v_z$  comencen a mostrar grans fluctuacions en relació a les variacions que hi havia abans dels 58 minuts. Si bé és cert que en el cinquè experiment es van observar formes de fons al llarg de tot el canal després de 2 hores i 14 minuts, les primeres formes a través del vidre es van detectar després d'1 hora d'haver iniciat l'experiment (Taula 19), que és aproximadament igual als 58 minuts. Les dades preses pel Vectrino posen de manifest que encara que sigui difícil apreciar-ho a través del vidre, en el moment en que s'observa una forma de fons pel lateral la solera del canal ja està coberta de formes suficientment representatives com per produir modificacions substancials en les components del vector velocitat.

### 4.3.3. Sisè experiment

En el sisè experiment les fluctuacions es produeixen des del començament de l'experiment degut a la problemàtica amb la bomba 1 exposada en l'apartat de metodologia. El temps que va passar entre la realització inicial de l'agitació i l'inici de l'experiment, va fer que el Vectrino comencés a prendre dades quan al fons ja hi havia una petita capa de sediment, que afecta a la rugositat i a la turbulència modificant-ne els valors de les components del vector velocitat i desenvolupant fluctuacions des de l'inici.

El valor mitjà inicial en la component  $v_x$  experimenta un clar decrement en un període de 75 minuts passant aproximadament des de 0,275 m/s fins a 0,24 m/s. A partir de la coordenada és inferior que el del cinquè experiment ja que el fet de no tenir el fons pla inicial, fa que la velocitat es vegi afectada pel la rugositat del fons. A partir del temps que correspon als 75 minuts es pot observar el següent: en les coordenades 225 i 275 i 625 es produeixen dos màxims relatius de la component  $v_x$ , i a cadascun d'aquests dos màxims li correspon una velocitat  $v_z$  mitjana nul·la. Per tant la velocitat del flux al llarg de les x és més gran quan no es veu afectada per la turbulència, generadors de la component de velocitat  $v_z$ .

En aquest experiment es van prendre mesures en dues cotes diferents; inicialment a 1,1 cm i posteriorment a 1,8 cm. En les Figures 26,27 i 28 es mostra el canvi a partir del moment en que els punts de les gràfiques canvien de color, és a dir en la coordenada 650, que equival a 3 hores i 37 minuts d'haver iniciat l'experiment. Els valors de la component  $v_x$  es veuen incrementats des d'un valor mitjà de 0,25 m/s fins a 0,28 m/s. Aquest increment és lògic tenint en compte que el perfils de velocitat són logarítmics.

Amb la gràfica que representa l'evolució de la component  $v_z$  s'interpreta que a partir del moment en que les formes de fons assoleixen una determinada alçada (2 hores i 30 minuts aproximadament), considerada com alçada màxima, aquesta no es veu pràcticament incrementada amb el temps. Això es veu pel fet que els punts de màxima velocitat assolits es troben sempre a l'entorn dels 0,014 m/s i els punts de mínima velocitat s'assoleixen a -0,01 m/s. Inclús quan el Vectrino es col·loca a una cota superior les velocitats  $v_z$  detectades es van repetint cíclicament. Podríem dir doncs que els efectes de la turbulència són pràcticament constants al llarg del calat.

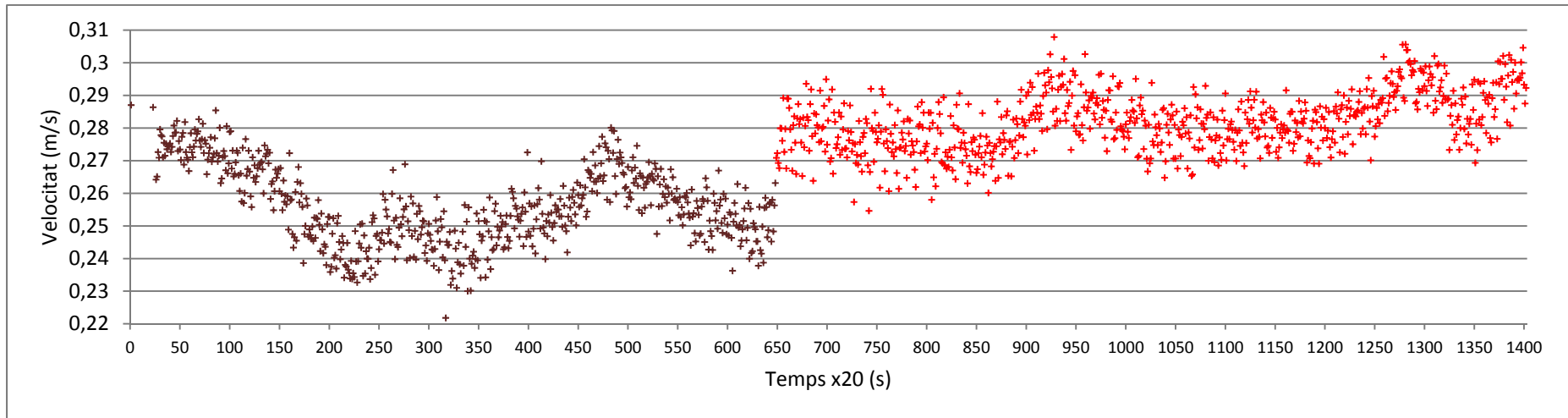


Figura 26. Component x del vector velocitat al llarg del sisè experiment.

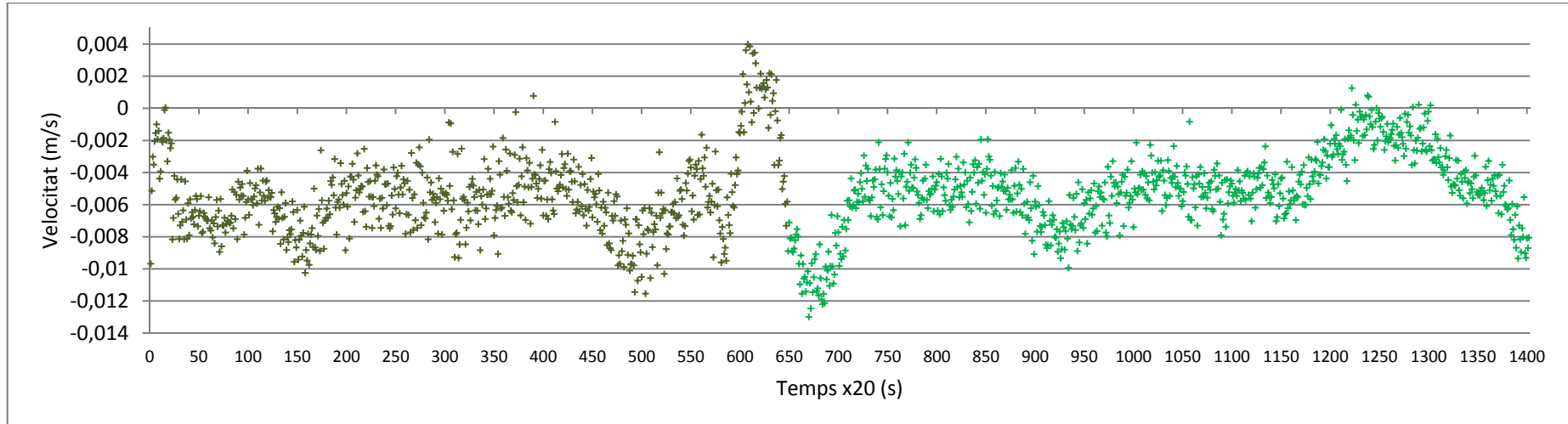
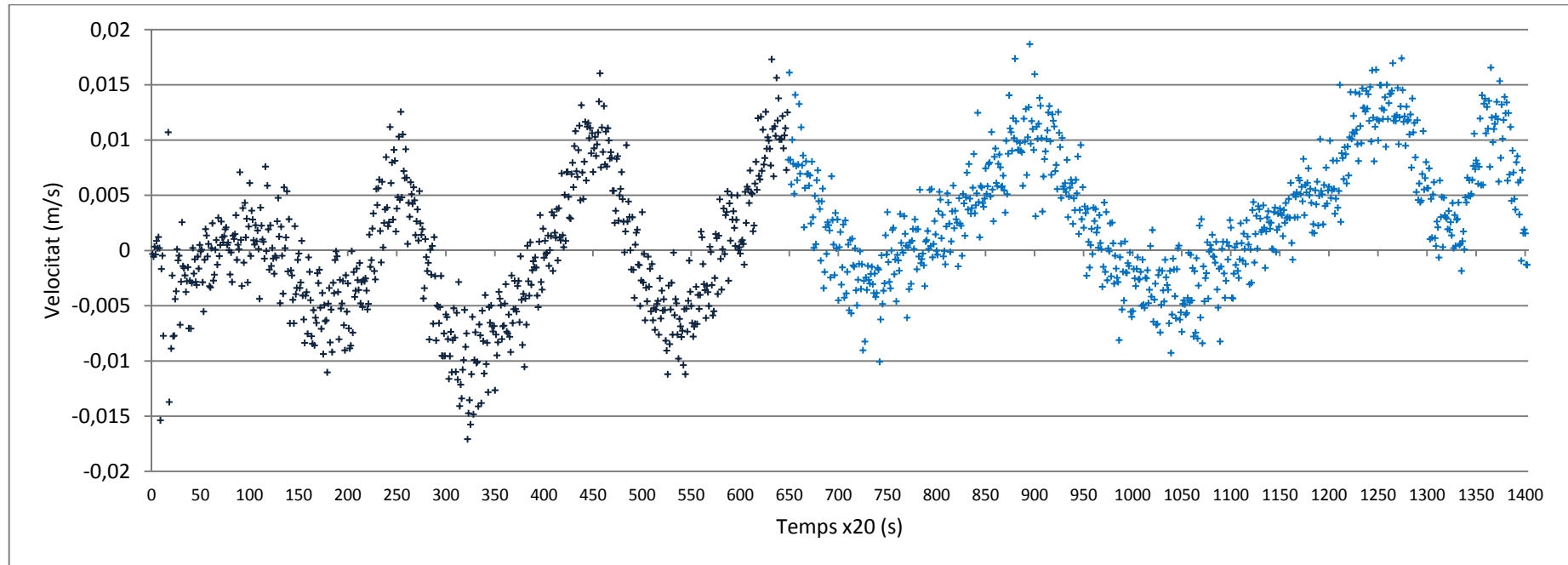


Figura 27. Component y del vector velocitat al llarg del sisè experiment.





**Figura 28.** Component z del vector velocitat al llarg del cinquè experiment.

#### 4.3.4. Segona concentració limitant

Les formes de fons, a més de fer-se més grans amb l'increment de concentració (tot i que no de manera proporcional) també ho fan amb el pas del temps. Mantenint una concentració teòrica constant, amb el pas del temps, la concentració mesurada disminueix, repercutint en les dimensions de les formes de fons. No s'ha pogut comprovar si el temps afecta a la dimensió horitzontal de les formes, el que sí que es pot afirmar és que el sediment diposita incrementant les magnituds verticals de les formes de fons. Això s'ha pogut comprovar amb l'ajuda de l'evolució de les velocitats puntuals mesurades amb el Vectrino. Particularment, en el sisè experiment, i utilitzant la gràfica que representa l'evolució de la component  $v_z$  s'interpreta que la cresta de les formes de fons va creixent fins a un determinat moment (2 hores i 30 minuts aproximadament en aquest cas particular), a partir del qual la cresta no es veu pràcticament incrementat amb el temps.

Aquestes 2 hores i 30 minuts que determinen el moment a partir del qual es comença a crear el dipòsit de fons seria per definició l'instant en que es produeix la segona concentració limitant. En aquest cas la concentració limitant mitjana es trobaria entre els 39,52 g/l i els 40,69 g/l. Però això no seria generalitzable pel següent motiu:

S'ha vist que com més concentració hi ha i més temps fa que el flux transporta sediment en suspensió menys tarden les formes de fons a formar-se i per tant menys temps serà necessari per assolir-se la primera concentració limitant. Donat que la segona concentració limitant està interrelacionada amb la primera, com a conseqüència menys temps caldrà per assolir la segona concentració limitant.

Com a conclusió es pot dir que tot i que sí que existeix una segona concentració limitant, però possiblement aquesta depèn dels mateixos factors que afecten a la primera concentració limitant.

Una vegada superada aquesta segona concentració limitant, amb el pas del temps i per una concentració teòrica, la concentració present al flux disminueix, però en canvi, l'alçada de les formes de fons no augmenta. El fet que l'alçada de les formes de fons no augmenti es contraposa amb els resultats de concentració obtinguts en aquest experiment. En la Taula 33 es mostra la concentració mesurada per una concentració teòrica constant de 60 g/l, el temps en el que es van realitzar les mostres i les mitjanes per les tres cotes. Podem veure que la concentració mitjana disminueix i per tant, la tendència del flux és a transportar cada vegada menys sediment en suspensió.

Per tant, s'ha extret com a conclusió que aquesta concentració de partícules que ja no es transporta ni en suspensió ni pel fons sedimenta i crea un dipòsit pla a sota de les formes de fons que creix a mesura que passa el temps.

Cota	Concentració afegida (g/l)	6è experiment			
		Temps (h)	Temps des de l'inici	Concentració mesurada (g/l)	Mitjanes (g/l)
I	60	13:27	1h 47min	40,83	40,69
C				40,94	
S				40,30	
I	60	15:03	3 h 23 min	40,20	39,52
C				39,21	
S				39,16	
I				38,31	

C	60	17:00	5 h 20 min	37,59	37,85
S				37,65	
I				36,97	
C	60	15:16	7 h 30 min	36,34	36,42
S				35,96	

**Taula 32.** Concentracions mesurades mitjanes pel sisè experiment i temps transcorregut des de l'inici.

#### 4.3.5. Setè experiment

Les condicions inicials d'aquest experiment van ser més bones que en l'anterior, ja que el temps que va passar entre el moment en que es va començar a agitar el sediment del canal i l'inici de la presa de dades amb el Vectrino va ser similar al del cinquè experiment i inferior al del sisè experiment. Per tant, les grans fluctuacions de les components  $v_y$  i  $v_z$  no es comencen a observar fins passat un cert temps, mentre que la velocitat  $v_x$  inicial es manté força constant fins que l'increment de la rugositat (degut a la presència de grans formes de fons) actua com a mecanisme generador d'alta turbulència. Això passa en la coordenada 275, que equival a 1 hora i 32 minuts després d'haver iniciat l'experiment.

Prèviament a aquesta coordenada ja s'observen petites fluctuacions de la  $v_z$  i clares fluctuacions de la component  $v_y$ , indicant que les línies de corrent experimenten modificacions des de ben abans.

En aquest experiment les mostres de concentració es van agafar una vegada es va considerar que ja hi havia formes de fons al llarg de tota la longitud del canal i que aquestes formes de fons ja eren suficientment grans.

Cota	Concentració afegida (g/l)	5è experiment				7è experiment			
		Temps (h)	Temps des de l'inici	Concentració mesurada (g/l)	Mitjanes (g/l)	Temps (h)	Temps des de l'inici	Concentració mesurada (g/l)	Mitjanes (g/l)
I				37,08				32,69	
C	60	14:07	2h 41 min	36,19	36,67	14:40	3h 36 min	31,63	31,91
S				36,73				31,73	
I				37,07				32,60	
C	60	14:25	2h 59 min	36,64	36,32	14:45	3h 41 min	31,50	31,81
S				35,25				31,33	

**Taula 33.** Concentracions mitjanes pel cinquè i el setè experiment.

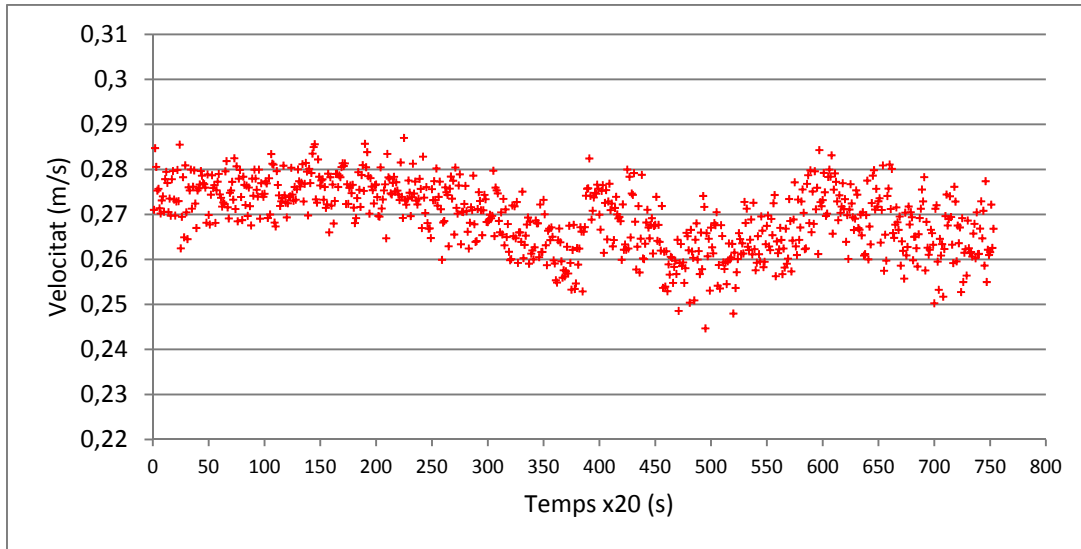


Figura 29. Component x del vector velocitat al llarg del setè experiment.

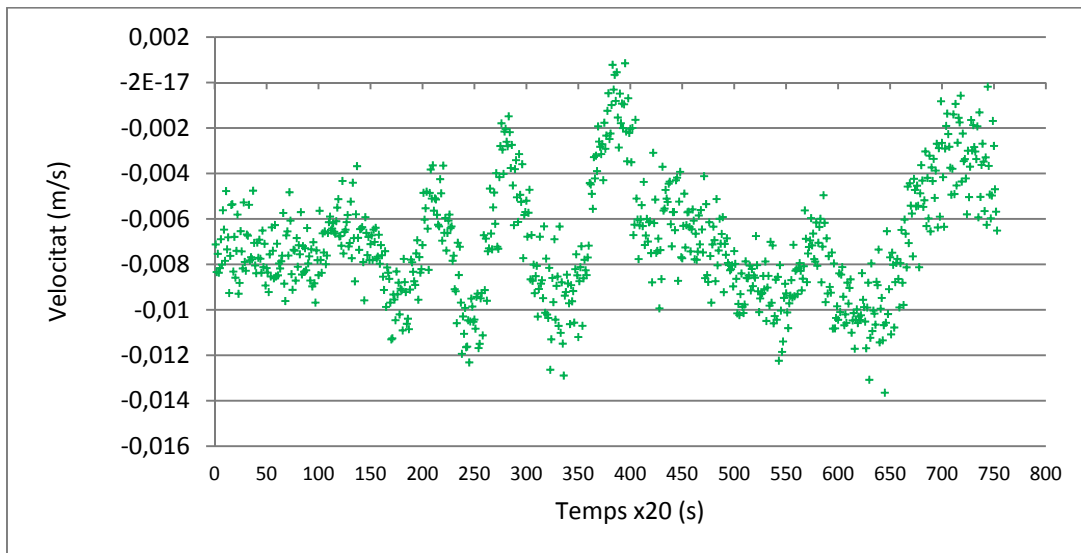


Figura 30. Component y del vector velocitat al llarg del setè experiment.

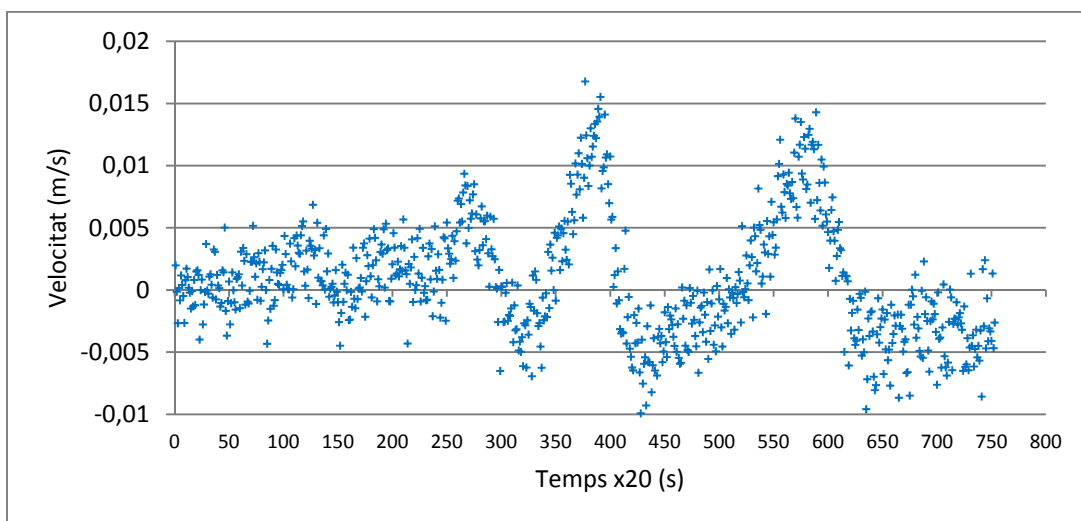


Figura 31. Component z del vector velocitat al llarg del cinquè experiment.

#### 4.4. PERFILS DE VELOCITAT

Tal i com s'ha explicat en l'apartat de metodologia, en el primer i el segon experiment les mesures de velocitat del flux es van fer amb un molinet. Cada vegada que es prenen mostres de concentració es mesurava la velocitat en diferents cotes del calat: a la mínima cota mesurable amb l'aparell, que era de 1,1 cm respecte la solera del fons del canal, i a les cotes que corresponien a un 20%, un 60% i un 80% del calat. Amb els valors obtinguts en les cotes associades a un determinat mostreig es pot construir un perfil de velocitats. Però donat que també interessa veure com varia la velocitat amb l'increment de concentració s'han construït tots els perfils corresponents als diferents mostreigs.

A continuació es presenten les equivalències entre la concentració present en el flux en el moment de fer el mostreig i el número del perfil associat.

Concentració teòrica afegida (g/l)	Concentració mesurada (g/l)	Perfils de velocitat
0,5	0,92	1
1	1,28	2
2	2,23	3
4	3,22	4
8	6,17	5
12	8,17	6
16	11,07	7
20	12,98	8
24	14,42	9
24	7,47	10
28	13,66	11
32	18,02	12
36	22,00	13
40	25,81	14
44	29,42	15
48	30,88	16
52	34,34	17
56	37,38	18
60	43,74	19

**Taula 34.** Equivalències entre la concentració present en el flux en el moment de fer el mostreig i el número del perfil associat.

Tot seguit es mostren els valors de velocitat obtinguts per a cadascun d'aquests perfils. Els valors de la velocitat es mantenen pràcticament constants en cadascuna de les cotes, sobretot en el primer experiment, on les baixes concentracions tenen molt poca incidència en el comportament del flux.

H=8,818	Velocitats relatives a cada cota (m/s)			
	Fons	0.2*H	0.6*H	0.8*H
Perfil	1,1	1,764	5,291	7,054
1	0,27	0,29	0,32	0,32
2	0,28	0,29	0,32	0,32
3	0,28	0,29	0,32	0,31
4	0,27	0,29	0,32	0,31
5	0,26	0,29	0,32	0,32
6	0,28	0,29	0,32	0,32

7	0,28	0,28	0,32	0,32
8	0,27	0,29	0,31	0,32
9	0,25	0,28	0,31	0,32

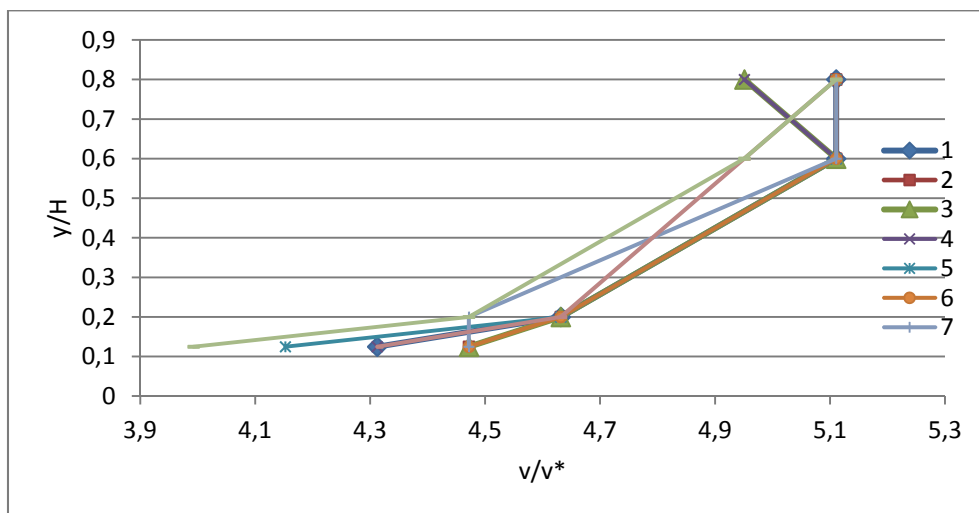
**Taula 35.** Velocitats en funció de les cotes pel primer experiment.

H=8,54	Velocitats relatives a cada cota (m/s)			
	Fons	0.2*H	0.6*H	0.8*H
Perfil	1,1	1,708	5,124	6,832
10	0,27	0,27	0,29	0,31
11	0,26	0,26	0,3	0,32
12	0,26	0,27	0,3	0,32
13	0,25	0,27	0,29	0,31
14	0,24	0,24	0,26	0,32
15	0,24	0,26	0,28	0,32
16	0,26	0,27	0,3	0,32
17	0,24	0,26	0,29	0,32
18	0,24	0,27	0,28	0,31
19	0,21	0,23	0,28	0,31

**Taula 36.** Velocitats en funció de les cotes pel segon experiment.

La representació dels perfils s'ha fet de manera adimensional. Per tal de fer l'adimensionalització s'han dividit totes les velocitats per la velocitat teòrica de tall en el fons, i cadascuna de les cotes s'ha dividit pel valor del calat.

En la Figura 32 es presenten els perfils obtinguts en el primer experiment; es pot observar que les velocitats mesurades són superiors a la superfície que al fons i la forma dels perfils és majoritàriament convexa. Els perfils són pràcticament coincidents fins al perfil 7, en el qual la velocitat disminueix 0,1 m/s en la cota que correspon al 20% del calat (1,76 cm) en relació als altres perfils. El valor que pren es mostra en la Taula 36 i és de 0,28 m/s, que és el mateix que el valor mesurat en la cota més propera a la solera del canal (1,1 cm). Si ens fixem en la concentració que hi havia en les mostres en l'instant en que es van prendre les mesures del perfil 7, veiem que és la de 11,07 g/l, i va ser justament entre els 8,17 g/l i els 11,07 g/l en que es van visualitzar les primeres formes de fons a través dels laterals del canal.



**Figura 32.** Perfils de velocitat pel primer experiment obtinguts amb el molinet.

En la Figura 32 es presenten els perfils obtinguts en el segon experiment. Les velocitats també són superiors en la cota corresponent al 80% del calat que en la resta del calat. Però a diferència dels perfils del primer experiment, la forma d'aquests perfils és còncava.

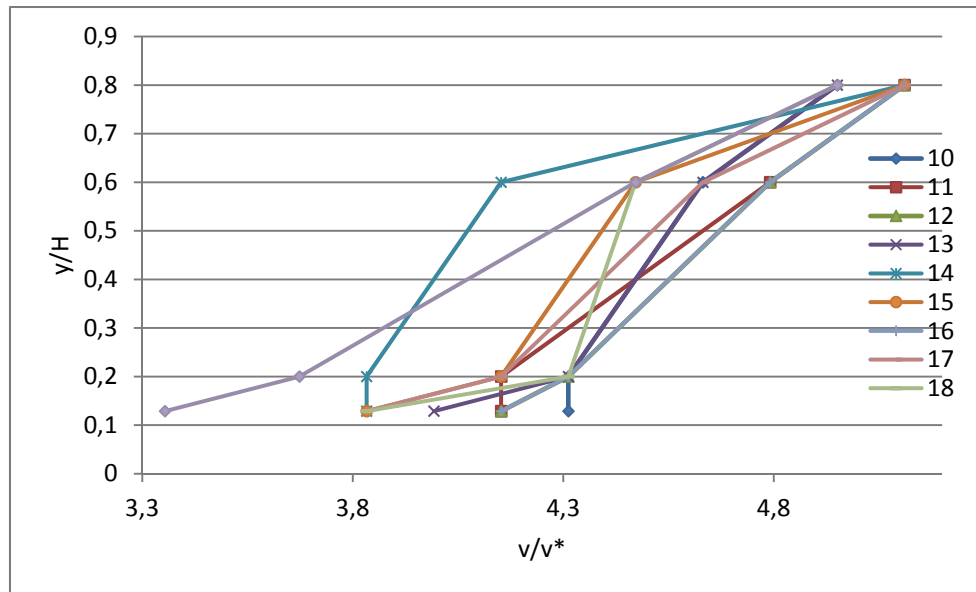


Figura 33. Perfils de velocitat pel segon experiment obtinguts amb el molinet.

#### 4.4.1. Perfils amb el Vectrino

En el quart experiment es van prendre dades de velocitat al llarg del calat per obtenir un perfil de velocitats més precís. Cada 4 minuts aproximadament es pujava 0,455 cm el Vectrino, de manera que després de 3 hores i 40 minuts s'havia cobert un total de 7,57 cm de calat. No obstant, ja les últimes dades no es poden considerar fiables, ja que el Vectrino estava molt a prop de la superfície. Els resultats es mostren en la Figura 34.

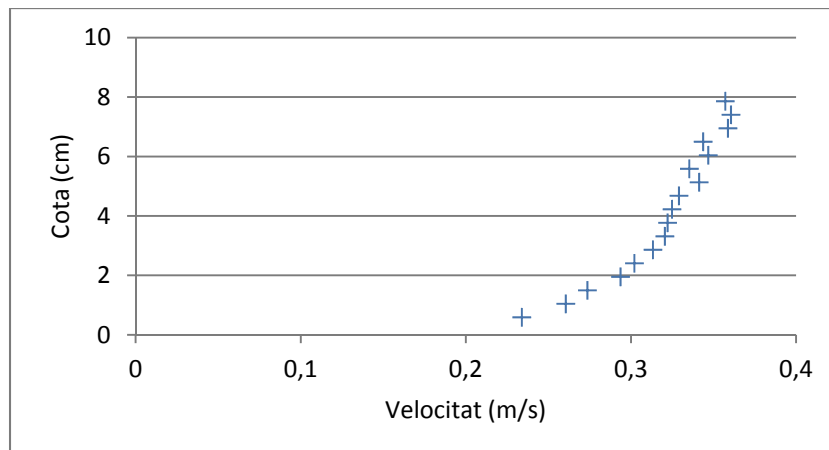


Figura 34. Perfil de velocitats obtingut amb un interval de temps de 3h 40 min.

Per tenir un perfil de velocitats instantani en el setè experiment es van obtenir un total de 17 dades en un interval de temps de 12 minuts, podent dir que el perfil representa pràcticament la velocitat instantània al llarg del calat. Els resultats segueixen una tendència logarítmica fins als 5 cm, a partir dels quals els resultats presenten fluctuen entre 0,33 m/s i 0,34 m/s, fins que per l'última cota es detecta una velocitat de 0,357 m/s.

Aquestes dades es van prendre després de 4 hores i 18 minuts d'haver iniciat l'experiment, poc després d'haver realitzat el segon mostreig. Per tant la concentració mitjana circulant en aquell moment era aproximadament 31g/l. Aquesta concentració és semblant a la que li correspon al perfil 16 obtingut amb el molinet en el segon experiment. Si comparem els dos perfils podem observar que la velocitat màxima assolida amb el molinet a la cota de 6,832 cm és de 0,32 m/s; molt més petita que la velocitat obtinguda amb el Vectrino en la cota més propera mesurada (6,953 cm) que és de 0,359 m/s.

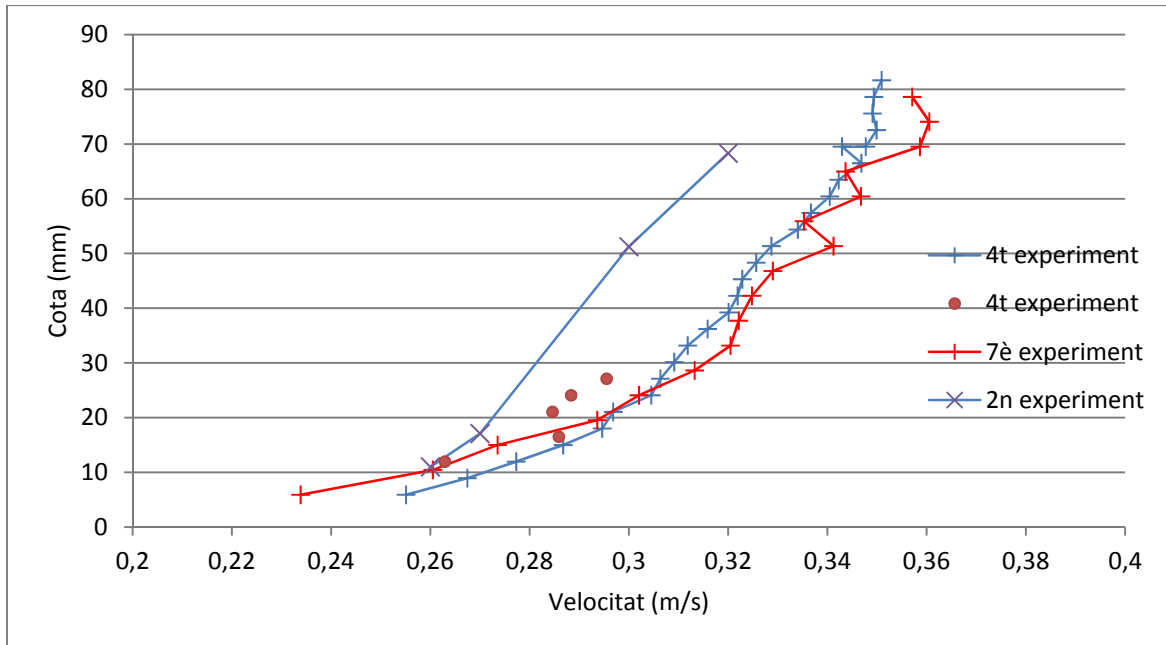


Figura 35. Comparació entre diferents perfils de velocitat.

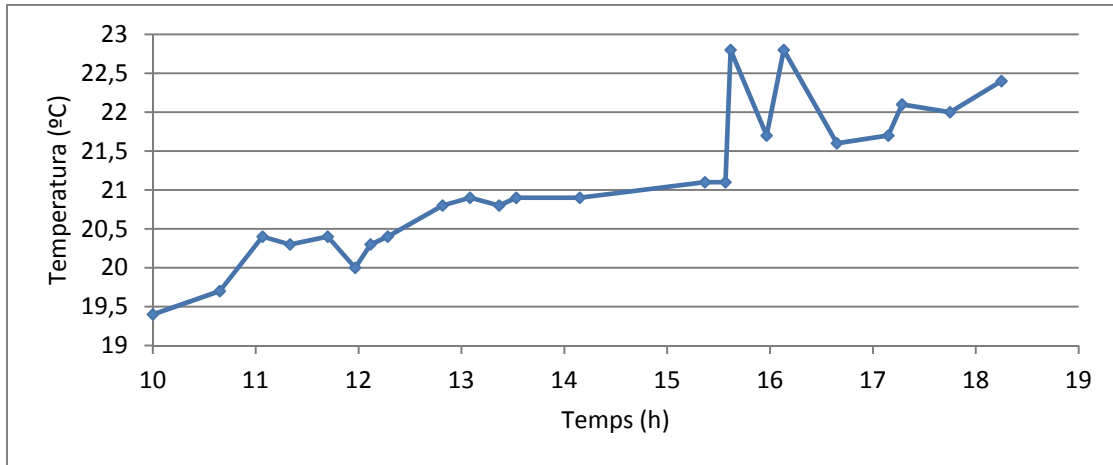
#### 4.5. TEMPERATURA I VISCOSITAT

En l'apartat 2.2.1 ja s'ha comentat una de les limitacions que presenta el funcionament de la instal·lació. Es va explicar que degut a la manca de turbulència al llarg del circuit que permet transportar el flux des d'aigües avall fins a aigües amunt del canal, part del material que hauria de circular en suspensió sedimentava. Per solucionar-ho es va col·locar una bomba a cada dipòsit i a cadascun dels mòduls del decantador. Tot i que encara s'observava sediment dipositat al fons dels dipòsit, les millores van ser substancials.

No obstant, el fet de tenir en funcionament les bombes al llarg de tota la durada de l'experiment, feia que l'aigua dels dipòsits s'escalfés, provocant un gradient de temperatura entre l'inici i el final de l'experiment.

Aquest increment de temperatura va ser observat al llarg del primer experiment. A partir del segon experiment es va utilitzar un termòmetre per veure el gradient real en funció del temps.





**Figura 36.** Variació de la temperatura en funció del temps durant el segon experiment.

Segons la teoria de mecànica de fluids, el canvi de temperatura té efectes en la viscositat dels fluids. Simons (1996) va analitzar la variació de la viscositat cinemàtica en una barreja d'aigua i bentonita com a funció de la temperatura i la concentració de bentonita. En l'Annex es mostra la Figura. Aquesta s'ha utilitzat per tenir una idea general del comportament de la viscositat en front a les dues variables. No obstant cal tenir en compte que el material utilitzat en els nostres experiments és sílice, que no presenta propietats col·loïdals com la bentonita.

En la Taula 38 es mostren els canvis de temperatura observats en els diferents experiments i en l'Annex es mostren els valors de concentració en pes.

Experiments	Inici	$T_i$ (°C)	Final	$T_f$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta T/\Delta t$ (°C/h)
2n	10:00	19,4	18:15	22,4	3	0,5
3r	15:35	18,8	18:17	19,4	0,6	0,2
4t	10:35	18	16:08	19	1	0,2
5è	10:35	19,5	13:45	20,3	0,8	0,3

**Taula 37.** Gradients de temperatura observats en els diferents experiments.

Segons la gràfics sembla que tot i que el canvi de temperatura té un petit efecte en la variació de la viscositat, el fet d'incrementar la concentració és més significatiu.

La viscositat representa la resistència que presenta un fluid a lliscar. Físicament es pot definir com el coeficient de proporcionalitat entre l'esforç tangencial i el gradient de velocitats, d'acord amb l'equació següent:

$$\mu = \frac{\tau}{\left(\frac{dv}{dy}\right)} \quad Eq[23]$$

On:

$\mu$ : Viscositat

$\tau$ : Tensió tangencial

$\frac{dv}{dy}$ : gradient de la velocitat.

L'aigua té una viscositat molt baixa, és a dir, presenta molt poca resistència a fluir. Segons l'Equació 23 això implica que sota una mateixa tensió tangencial, l'aigua tindrà un gradient de velocitats superior que altres fluids més viscosos. Tal i com s'ha vist, i d'acord amb Garde (1985) el fet d'afegir partícules tan petites com la sílice de  $D_{50}=4\mu\text{m}$  amb un pes específic molt baix, fa que les forces d'arrossegament predominin sobre les forces normals regides per la velocitat de caiguda. De tal manera que les partícules en comptes de caure al fons, circulen solidàriament amb el fluid augmentant-ne lleugerament la viscositat.

A continuació es vol comprovar si els gradients de velocitat són coherents amb l'anterior explicació. En les Taules 30 i 31 es mostren els gradients de velocitat entre dues cotes per a cadascun dels perfils de velocitat de l'apartat 4.4. La Taula 39 correspon als perfils del primer experiment, mentre que la Taula 40 fa referència als perfils del segon experiment. En fer les mitjanes dels gradients per a les tres columnes s'ha pogut observar que a excepció de la última diferència de calats, les mitjanes són superiors en els perfils del primer experiment que en els del segon. Per tant sí que sembla que el flux pugui ser més viscos en el segon experiment que en el primer, que hi havia menys concentració. No obstant, això no passa entre les cotes 0,6·H i 0,8·H. En aquests cas, els gradients de velocitat són superiors, de manera que el seu comportament és més propi al d'aigua clara sense fluid.

H=8,818	$\Delta v/\Delta y$ ( $\text{s}^{-1}$ )		
Perfils	Del fons a 0,2·H	De 0,2·H a 0,6·H	De 0,6·H a 0,8·H
1	0,03014	0,00851	0
2	0,01507	0,00851	0
3	0,01507	0,00851	-0,00567
4	0,03014	0,00851	-0,00567
5	0,04521	0,00851	0
6	0,01507	0,00851	0
7	0	0,01134	0
8	0,03014	0,00567	0,00567
9	0,04521	0,00851	0,00567
Mitjana	0,02512	0,00851	0

**Taula 38.** Gradients de velocitat en cada cota i per a cada perfil (1r exp).

H=8,54	$\Delta v/\Delta y$ ( $\text{s}^{-1}$ )		
Perfils	Del fons a 0,2·H	De 0,2·H a 0,6·H	De 0,6·H a 0,8·H
10	0	0,00585	0,01171
11	0	0,01171	0,01171
12	0,01645	0,00878	0,01171
13	0,03289	0,00585	0,01171
14	0	0,00585	0,03513
15	0,03289	0,00585	0,02342
16	0,01645	0,00878	0,01171
17	0,03289	0,00878	0,01756
18	0,04934	0,00293	0,01756
19	0,03289	0,01464	0,01756
Mitjana	0,02138	0,00790	0,01698

**Taula 39.** Gradients de velocitat en cada cota i per a cada perfil (2n exp).

Com a observació, si ens fixem en els perfils en els que el gradient de velocitats és nul, veiem que succeeix en el primer cas en el perfil 7, que li correspon una concentració mitjana de 11,07 g/l. En aquest instant és quan es va observar la primera concentració limitant (entre 8,17 i 11,07 g/l). En el segon experiment un dels gradients nuls es produeix en el perfil 14, que té una concentració mitjana de 25,81 g/l. En aquest instant és quan es va observar també la primera concentració limitant; moment pel qual tot el fons està ja cobert de formes de fons (entre les concentracions de 22,00 i 25,81 g/l).

Quan es produeixen les concentracions limitants la resistència al flux al fons és molt elevada. Sembla que la viscositat pugui ser un factor en el canvi de comportament del flux al fons del canal. No obstant amb la investigació feta només es pot quedar com a hipòtesi. I probablement, factors com la turbulència i la rugositat del fons puguin tenir més importància.

## CAPÍTOL 5

---

## 5. Conclusions

Els estudis existents que tracten la temàtica del transport de càrrega de rentat són escassos. Si bé és cert que s'han realitzat experiments que analitzen el transport en suspensió de material fi, les mostres utilitzades sempre comprenen mides de sorres, a més de llims i argiles. Així doncs els estudis existents fan referència a un transport de material no uniforme i no tracten la influència que podria tenir un riu que transportés només càrrega de rentat.

Per a dur a terme la caracterització del flux en presència de càrrega de rentat es van fixar diferents objectius en relació a les concentracions, velocitats i formació de les formes de fons. La interrelació entre els tres factors hauria de permetre crear una idea general del comportament del flux i veure si el transport de càrrega de rentat és similar al transport de la càrrega de material provinent de la llera. És a dir, si el coneixement existent en relació al transport de material amb origen a la llera es pot extrapolar al transport de material més fi generalment amb origen a la conca. A continuació s'exposen les conclusions obtingudes en cadascun dels objectius particulars prèviament fixats.

- En primer lloc es tractava de determinar si existia una primera concentració limitant de càrrega de rentat a partir de la qual el material comencés a dipositar al fons. I en cas d'existir, si hi havia un límit a partir del qual el fons estigués completament format. I per altra banda analitzar les característiques del fons en cadascun dels casos.

Les observacions ens permeten concloure que material transportat en suspensió no comença a dipositar al fons quan s'assoleix una determinada concentració sinó que també depèn del temps que fa que el material està circulant pel flux. Així doncs la primera concentració limitant és una funció del temps i de la concentració de partícules que circula en suspensió. És a dir:

$$C_{L1} = f(t_{\text{circulació}}, C_{\text{flux}})$$

Una vegada assolit aquest límit, tot i tenir partícules de llim s'inicia la formació d'un fons mòbil. El fons està format per una fracció de partícules de mides més grans que les partícules que van en suspensió.

Per a concentracions petites es formen formes que tenen un cap arrodonit, ample i alt i un acabament en punta al seu extrem d'aigües amunt. Per a concentracions més grans les formes es fan més llargues i més amples, ocupant tota l'amplada del canal; són una tipologia de dunes, en les que ja no es pot detectar formes individuals col·locades una al costat de l'altra. Per les dues tipologies de formes de fons, les seves dimensions augmenten aigües avall.

Els resultats permeten intuir que un increment de concentració té més afectació en la magnitud vertical de les formes de fons que en la seva magnitud horitzontal, tot i que el l'increment d'aquestes dues magnituds no sembla proporcional a l'increment de concentració. Les formes de fons, a més de fer-se més grans amb l'increment de concentració també ho fan amb el pas del temps; el sediment diposita incrementant les magnituds verticals de les formes de fons.

El Vectrino, a més de permetre la obtenció de mesures instantànies de velocitat sembla que és un bon identificador de la formació d'un fons de llim, i en particular del moment a partir del qual les formes ja estan completament formades. Aquest instant de temps és per definició el moment en que es produeix

la segona concentració limitant. Per tant es pot dir que sí que existeix una segona concentració limitant, tot i que probablement també és una funció i no un únic límit.

Una vegada superada aquesta segona concentració limitant, amb el pas del temps i per una concentració teòrica, el sediment diposita formant un dipòsit que va creixent verticalment i l'únic transport longitudinal és el generat pel desplaçament de les formes de fons cap a aigües avall.

- Vista la relació entre l'increment de concentració i la formació del fons interessava veure quina era la distribució d'aquesta concentració al llarg del calat. A continuació es mostren les conclusions en relació a la metodologia utilitzada, i finalment es comenten les conclusions que fan referència a la distribució i uniformitat de les partícules al llarg del calat.

Els resultats dels perfils experimentals permeten intuir que abans del moment en que es produeix la primera concentració limitant la concentració del fons és inferior a la de la cota central.

A partir dels perfils experimentals i dels perfils teòrics ajustats amb l'equació de Rouse sembla que la uniformitat varia amb la concentració de manera cíclica i que en aquests cicles la distribució del sediment en suspensió es va fent més uniforme a mesura que s'afegeix concentració, fins a un determinat punt límit que causa el fenomen contrari; menys uniformitat amb més concentració.

L'ajust amb l'equació de Rouse no és possible en tots els casos; alguns valors de concentració teòrica no s'adeqüen a la definició de l'equació, però en canvi, els valors de concentració teòrica més petits presenten un cert error a causa del residu sòlid de l'aigua.

Tot i que el residu sòlid es troba sempre present en l'aigua, i per tant també afecta a les mesures de concentració real més grans, l'error relatiu és inferior. Així doncs, podríem afirmar que per a concentracions molt petites, les tècniques de mostreig utilitzades no són prou acurades. Per concentracions més altes sembla que les tècniques de mostreig i el pesatge de les mostres són vàlides ja que els errors relatius són petits.

- De la mateixa manera que s'ha estudiat la distribució de les concentracions al llarg del calat, la tesina també tenia com a objectiu estudiar el perfil de velocitats.

Els perfils de velocitats que s'obtenen amb el Vectrino i el molinet són lleugerament diferents, ja que les velocitats són clarament superiors en el cas del Vectrino. La distribució de les velocitats presentada pel Vectrino sembla més representativa, ja que la distribució del molinet es basa únicament amb 4 mesures.

- Finalment s'avaluen els efectes que presenten les limitacions de la instal·lació així com altres variables que podrien jugar un paper important en relació al comportament del flux en presència de sediment fi en suspensió.

Tot i que la instal·lació de bombes en el sistema comporta millores en l'agitació, el seu funcionament al larg de tot l'experiment genera un gradient de temperatura. Els canvis de temperatura tenen efectes en la variació de la viscositat cinemàtica. Però a nivells aproximats sembla que la reducció de la viscositat pel fet d'incrementar la temperatura sigui molt menys important que l'augment de la viscositat amb l'increment de concentració.

Amb els gradients de velocitat obtinguts a partir de les dades del molinet sembla que la viscositat pugui ser un factor en el canvi de comportament del flux al fons del calat. No obstant amb la investigació feta només es pot quedar com a hipòtesi. I probablement, factors com la turbulència i la rugositat del fons puguin tenir més importància.

La realització d'aquesta tesina ha servit doncs per a caracteritzar el comportament del flux en presència de concentracions de sediment assimilable a les mides de la càrrega de rentat. Tot i que s'han assolit els objectius particulars, cal fer més assajos i estudis per a poder fer una correcta comparació entre el transport del material amb origen a la conca i el material amb origen a la llera.

Les conclusions i hipòtesis plantejades al llarg del document serviran com a una primera base per a una tesis doctoral, la qual donarà continuïtat a la recerca plantejada i contribuirà en un futur en el teixit de coneixement d'una temàtica important i fins ara poc tractada.

## CAPÍTOL 6

---



## 6. Referències bibliogràfiques

---

- Albertson, M.L. et al (1957) Unpublished Note on Wash Load. CSU. Citat en Garde (1985).
- Cardoso, A.H. (1998) "Hidráulica fluvial." Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Coleman, N. L. (1991) "Channel flow with fine sediment suspension." International Symposium on the transport of suspended sediments and its mathematical modeling, IAHR, pp. 95-101.
- Dietrich, W.E. (1982) "Settling velocities of Natural Particles". *Water Resources Research*, **18** (6), 1615-1626 citat en Garcia (2008).
- Einstein, H.A. (1950) "The bed load function for sediment transportation in open channel flows." United States Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 1026. Citat en Khullar (2007).
- Einstein, H.A. i Chien, N. (1955) "Effects of heavy sediment concentration near the bed on the velocity and sediment distribution." Institute of Engineering Research, University of California, Berkeley, California, Usa. Series No. 33, Issue No.2. Citat en Khullar (2007).
- Einstein, H.A, Anderson, A.G. i Johnson, J.W. (1940) "Distinction between bed load and suspended load in natural streams." *Trans. Of Am. Geophy. Union*. **21**. Citat en Khullar (2007).
- Garcia, M.H. (2008) "Sedimentation Engineering; Processes, Measurements, Modeling and Practice." Virginia: American Society of Civil Engineers, pp 21-45.
- Garde, R. J. i Ranga Raju, K. G. (1985) "Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems." New Delhi: Wiley Eastern Limited.
- Khullar, N.K. (2007) "Transport of fines/wash load through channels- A review." *Hydrology Journal*, **30** (3-4) pp. 43-63.
- Khullar, N.K., Kothiyari, U.C. i Ranga Raju, K.G. (2010) "Suspended was load transport of nonuniform sediments." *J.Hydraul. Eng ASCE* **136** 534-543.
- Martín Vide, J.P. (2009) "Ingeniería de ríos". Ediciones UPC.
- Martín Vide, J.P., Amarilla, M., Gamarra, M. i Zárate, F., (2008) "Problema de Sedimentación en el Río Pilcomayo." Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo.
- Partheniades, E. (1977) "Unified view of wash load and bed material load." *J. Hydraul. Eng. ASCE*. **103** (9), 1037-1057. Citat en Khullar (2007).
- Pineda, C (2010) "Transporte en suspensión en una cuenca pirenaica degradada." Tesina, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.
- Shen, H.W. (1970) "Wash load and bed load. River Mechanics." Ed. Publicat per H.W.Shen, Fort Collins, Colorado. Vol I, Capítol II. Citat en Khullar (2007).
- Simons, D.B i Miller, C.R (1966) "Sediment Discharge in Irrigation Canals." Proc. ICID, 6th Congress, Delhi Q.20, R.12. Citat en Garde (1985).

Smits, A.J. (2003) "Mecánica de fluidos. Una introducción física." Mèxic: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V

Woo, H.S, Julien, P.Y. i Richardson, E.V (1986) "Wash load and fine sediment load." *J. Hydraul. Eng.* ASCE. **112**(6), 541-545. Citat en Khullar (2007).

# CAPÍTOL 7

---

## 6.1. LLISTA D'IL·LUSTRACIONS

Il·lustració 1. Vista lateral de les instal·lacions. ....	11
Il·lustració 2. Planta del canal i del seu sistema de recirculació. ....	13
Il·lustració 3. Vista del canal. ....	14
Il·lustració 4. Mòduls del decantador. ....	14
Il·lustració 5. a) Conducció Bomba 2- Dipòsit 2 b) Conducció Decantador- Bomba 2. ....	16
Il·lustració 6. a) Carro metàl·lic b) Detall dels forats. ....	16
Il·lustració 7. A l'esquerra vista en alçat dels sifons (mesures en centímetres). A la dreta imatges de la col·locació dels sifons al canal a) Sifons b) Subjecció de l'instrument de mesura en el centre del canal mitjançant una barra c) Unió dels sifons amb els tubs de plàstic. ....	22
Il·lustració 8. Extracció de mostres d'aigua i sediment a una cota inferior a la solera del canal. ....	22
Il·lustració 9. a) Sistema de subjecció del Vectrino b) Col·locació del Vectrino en el canal. ....	26
Il·lustració 10. Situació del carro i dels aparells de mesura en el primer mòdul del canal (coordenades en cm). ....	28
Il·lustració 11. a) Condicions inicials d'aigua clara. b) Instruments de mesura; d'esquerra a dreta els sifons, el molinet i un limnítmetre per mesurar el calat. ....	35
Il·lustració 12. a) Una de les primeres formes de fons b) i c) Longitud i altura d'una altra forma de fons segons més tard d) Forma de fons a 53 cm del primer mòdul del canal. ....	37
Il·lustració 14. a) Formes de fons situades al segon mòdul del canal, després de 17 minuts d'haver observat la primera b) Formes de fons situades al quart mòdul del canal després d'haver afegit la concentració corresponent als 24 g/l. ....	38
Il·lustració 13. a) Forma de fons després dels 16 kg/m <sup>3</sup> b) Forma de fons després dels 20kg/m <sup>3</sup> . ....	38
Il·lustració 15. a) Formes del segon mòdul després d'1 minut d'haver observat la primera forma de fons (16 kg/m <sup>3</sup> ) . b) Formes del quart mòdul després de 2 hores i 25 minuts d'haver observat la primera forma (24kg/m <sup>3</sup> ). ....	39
Il·lustració 16. Formes de fons en buidar el canal a) Aigües avall i b) Aigües amunt. ....	39
Il·lustració 17. Formes de fons des d'aigües amunt a aigües avall (anant de baix a dalt i d'esquerra a dreta). ....	40
Il·lustració 18. Perfil de les formes mentre es buidava l'aigua del canal; després de 6 hores i 35 minuts d'haver iniciat l'experiment. ....	43
Il·lustració 19. Geometria de les formes de fons a) Fotografia aigües amunt després de 6 hores i 39 minuts d'haver iniciat l'experiment b) Un minut més tard aigües avall. ....	43
Il·lustració 20. Formes de fons amb el sediment sec. ....	44
Il·lustració 21. Retracció del fons. ....	44
Il·lustració 22. a) Formació d'una pasta en deixar circular l'aigua provinent de la bomba b) Posada en suspensió del sediment que forma el fons. ....	44

Il·lustració 23. Formes de fons 7 dies després d’haver realitzat l’experiment. ....	47
Il·lustració 24. Formes de fons 2 hores i 14 minuts després d’haver iniciat l’experiment. ....	49
Il·lustració 25. Determinació dels diferents trams en funció de la similitud de les característiques del fons. ....	64
Il·lustració 26. Magnituds de les formes de fons corresponents als trams 1, 2, 3, 4 (de dalt a baix i d’esquerra a dreta). ....	66
Il·lustració 27. Planta i alçat de la tipologia de forma tipus del primer experiment amb les magnituds mitjanes. ....	67
<b>Il·lustració 28.</b> ubicació dels trams descrits en els apartats 4.2.1 i 4.2.2 en la planta del canal. ....	68
Il·lustració 29. Distàncies entre pics abans d’haver aplicat el factor d’escala corresponent. ....	69
Il·lustració 30. Comparació de les dimensions en alçat d’una forma de fons del primer experiment (esquerra) amb una forma de fons del segon experiment (dreta). ....	70

## 6.2. LLISTA DE FIGURES

Figura 1. Vista frontal i en planta de l’emissor i el receptor d’ones del Vectrino. ....	23
Figura 2. Gràfica que verifica el correcte funcionament de l’aparell. ....	25
Figura 3. Col·locació del Vectrino perpendicularment al fons del canal amb el respectiu probe check. ...	25
Figura 4. Col·locació del Vectrino paral·lel al flux del canal amb el corresponent probe check. ....	25
Figura 5. Distribució discreta de les mides. ....	29
Figura 6. Corba granulomètrica acumulada i continua. ....	29
Figura 7. Comparació de la concentració teòrica amb les concentracions reals mesurades en els tres primers experiments. ....	54
Figura 8. Distribució del sediment en suspensió al llarg del primer experiment en base a les dades experimentals. ....	56
Figura 9. Distribució de sediment en suspensió al llarg del segon experiment en base a les dades experimentals. ....	56
Figura 10. Comparació entre la tendència dels perfils de concentració per a Z positives (12g/l) i Z negatives (altres casos exposats). ....	58
Figura 11. Distribució del sediment en suspensió al llarg del primer experiment en base a l’equació de Rouse. ....	59
Figura 12. Distribució del sediment en suspensió al llarg del segon experiment en base a l’equació de Rouse. ....	59
Figura 13. A l’esquerra es mostra els perfils de concentració experimentals abans (3,22 a) i després (3,22 b) de 2 minuts d’haver fet el primer mostreig. A la dreta concentracions mesurades en funció de al cota. ....	60

Figura 14. A l'esquerra es mostren els perfils de concentració experimentals aigües avall (12,98 a) i aigües amunt (12,98 b).....	61
Figura 15 A l'esquerra es mostren els perfils de concentració experimentals adimensionals de les mostres primeres (14,42 a) i segones (14,42 b). A la dreta les concentracions mesurades en funció de la cota.....	62
Figura 16. 1) Perfils de concentració experimentals adimensionals per a les mostres inicials (43,74 a), mostres amb pots nets (43,74 b) i mostres amb pots nets després de 40 minuts (43,74 c). 2) Concentracions en funció de la cota. ....	62
Figura 17. Anàlisi granulomètric del material del sediment que forma les formes de fons. 1) Distribució discreta de les mides. 2) Corba granulomètrica acumulada i continua. ....	63
Figura 18. Anàlisi granulomètric del material del sediment original present als sacs. 1) Distribució discreta de les mides. 2) Corba granulomètrica acumulada i continua. ....	63
Figura 19. Alçada de les formes de fons en funció de la coordenada del canal.....	65
Figura 20. Altures de les formes de fons mesurades en el Tram I.....	67
Figura 21. Altures de les formes de fons mesurades en el Tram II.....	68
Figura 22. Altura de les formes de fons mesurades en el Tram III. ....	68
Figura 23. Component x del vector velocitat al llarg del cinquè experiment.....	72
Figura 24. Component y del vector velocitat al llarg del cinquè experiment.....	72
Figura 25. Component z del vector velocitat al llarg del cinquè experiment.....	72
Figura 26. Component x del vector velocitat al llarg del sisè experiment.....	74
Figura 27. Component y del vector velocitat al llarg del sisè experiment.....	74
Figura 28. Component z del vector velocitat al llarg del cinquè experiment. ....	75
Figura 29. Component x del vector velocitat al llarg del setè experiment.....	78
Figura 30. Component y del vector velocitat al llarg del setè experiment.....	78
Figura 31. Component z del vector velocitat al llarg del cinquè experiment.....	78
Figura 32. Perfils de velocitat pel primer experiment obtinguts amb el molinet.....	80
Figura 33. Perfils de velocitat pel segon experiment obtinguts amb el molinet.....	81
Figura 34. Perfil de velocitats obtingut amb un interval de temps de 3h 40 min. ....	81
Figura 35. Comparació entre diferents perfils de velocitat.....	82
Figura 36. Variació de la temperatura en funció del temps durant el segon experiment.....	83

### 6.3. LLISTA DE TAULES

Taula 1. Característiques hidràuliques i granulomètriques i concentració resultant de l'experiment de Pineda (2010). ....	8
---	---

Taula 2. Relació entre el pendent del panell de control i el pendent real. ....	12
Taula 3. Volum d'aigua contingut en les conduccions dels dipòsits.....	15
Taula 4. Càlcul del volum d'aigua contingut en les conduccions del sistema. ....	15
Taula 5. Relació entre els cabals, calats i pendents quasi uniformes obtinguts.....	20
Taula 6. Codi del pendent.....	20
Taula 7. Calats, velocitats mitjanes i cabals reals. ....	21
Taula 8. Resum de les coordenades de la localització dels aparells.....	28
Taula 9. Valor de la velocitat de caiguda de les partícules. ....	31
Taula 10. Relació entre la velocitat de tall i la velocitat de caiguda de les partícules en funció del cabal utilitzat. ....	31
Taula 11. Relació entre la velocitat de tall i la velocitat de caiguda pel sediment utilitzat.....	32
Taula 12. Concentracions teòriques, sediment acumulat i afegit en el sistema. ....	34
Taula 13. Metodologia seguida al llarg del primer experiment.....	37
Taula 14. Concentracions teòriques i sediment afegit. ....	41
Taula 15. Metodologia seguida al llarg del segon experiment. ....	43
Taula 16. Metodologia seguida al llarg del tercer experiment.....	45
Taula 17. Metodologia seguida al llarg del quart experiment.....	47
Taula 18. Metodologia seguida en el cinquè experiment. ....	48
Taula 19. Metodologia seguida al llarg del sisè experiment. ....	49
Taula 20. Metodologia seguida al llarg del setè experiment.....	50
Taula 21. Comparativa entre les característiques dels diferents experiments. ....	51
Taula 22. Concentració afegida, mesurada i concentració mesurada mitjana.....	53
Taula 23. Concentracions mitjanes i perfils associats per al primer i el segon experiment. ....	55
Taula 24. Errors relatius de les mitjanes tenint en compte un valor mitjà del residu sòlid de l'aigua.....	55
Taula 25. Variació de la concentració després de dos minuts d'haver fet el primer mostreig. ....	60
Taula 26. Variacions de concentració.....	61
Taula 27. Mediana de la distribució de la mida i desviació típica de les mostres. ....	63
Taula 28. Magnituds de les formes per trams i mitjanes. ....	66
Taula 29. Mitjanes dels pics per a cadascun dels trams.....	69
Taula 30. Longitud entre crestes de les formes de fons en cadascun dels trams. ....	69
Taula 31. Temps en que es formen les primeres formes de fons (per conveni és el temps en que hi ha formes al llarg de tot el canal) i primera concentració limitant observada. ....	70
Taula 33. Concentracions mesurades mitjanes pel sisè experiment i temps transcorregut des de l'inici. 77	

Taula 34. Concentracions mitjanes pel cinquè i el setè experiment. ....	77
Taula 35. Equivalències entre la concentració present en el flux en el moment de fer el mostreig i el número del perfil associat. ....	79
Taula 36. Velocitats en funció de les cotes pel primer experiment. ....	80
Taula 37. Velocitats en funció de les cotes pel segon experiment. ....	80
Taula 38. Gradients de temperatura observats en els diferents experiments. ....	83
Taula 39. Gradients de velocitat en cada cota i per a cada perfil (1r exp). ....	84
Taula 40. Gradients de velocitat en cada cota i per a cada perfil (2n exp).....	84



