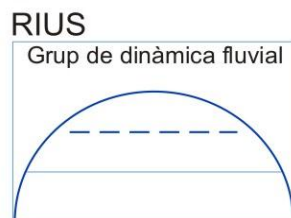


QUADERNS
DMACS nº 38



Riu Ebre, 22-10-2002

MESURA I MOSTREIG DE VARIABLES GEOMORFOLÒGIQUES



Universitat de Lleida

ÍNDEX

FITXA TÈCNICA	3
1. INTRODUCCIÓ	4
2. VARIABLES HIDROLÒGIQUES	5
2.1. Precipitació	
2.2. Hidràulica: Velocitat, Profunditat, Cabal	
3. VARIABLES SEDIMENTÀRIES	14
3.1. Granulometria del llit del riu	
3.2. Sediment en suspensió	
3.3. Càrrega de fons	
4. VARIABLES MORFOLÒGIQUES	46
4.1. Geometria hidràulica	
4.2. Morfologia	
5. REFERÈNCIES AL TEXT	53
6. PROJECTES I PUBLICACIONS	56

FITXA TÈCNICA

Descripció: Aquest quadern s'ha preparat a partir de la documentació generada en relació amb l'informe corresponent a la Tasca 1 del Mòdul 3 del Projecte Principal del conveni entre el Centre Tecnològic Forestal de Catalunya i l'Agència Catalana de l'Aigua (CTFC-ACA CV08000251). Aquest informe es va lliurar el 31 de desembre de 2009 i, posteriorment, es va rebre l'autorització per part de l'ACA per a la seva publicació-difusió.

Elaboració: Damià Vericat i Ramon J. Batalla (RIUS - Fluvial Dynamics Research Group, UdL-CTFC-ICRA). www.fluvialdynamics.com

Data d'edició: 04 juliol de 2012

ISBN: 84-616-0933-6

1. INTRODUCCIÓ

La mesura de variables hidrosedimentàries i morfològiques utilitzant sistemes comuns i homologats internacionalment és fonamental a l'hora de portar a terme projectes científics en el camp de la hidrologia i la geomorfologia fluvial, i també com a base per al disseny i realització de pràctiques de conservació, control i restauració de trams fluvials en els nostres rius. En aquest treball es presenta un recull de tècniques i productes àmpliament utilitzats en aquest camp que poden ser d'utilitat en qualsevol de les branques d'aquestes disciplines científiques i afins (e.g. ecologia de rius). És important assenyalar la importància, d'una banda, de fer servir les mateixes tècniques de mesura per a poder comparar i interpretar els resultats posteriors, especialment si els treballs els porten a terme diferents equips d'observadors, i en segon lloc, la importància d'intentar mantenir una continuïtat temporal en les mesures, especialment en **conques experimentals** (normalment més estables), però també en conques sotmeses a canvi, que beneficiaran tant la reavaluació periòdica dels objectius científics a les primeres i de gestió a les segones, així com l'alimentació, calibració i validació de models de predicció a llarg termini.

L'objectiu d'aquest treball és, per tant, la redacció d'un **document de guia** per a la **mesura** i el **mostreig** de variables hidrosedimentàries i morfològiques en base amb l'experiència obtinguda en l'ús de les instal·lacions de la conca experimental de la Ribera Salada, així com de l'experiència del personal del CTFC-UdL adquirida durant la seva etapa professional en el camp de la geomorfologia fluvial i la hidrologia. Es descriuen les variables a mesurar i/o controlar per a la realització de caracteritzacions de caràcter **hidrològic, sedimentari i morfològic**. Per a cadascuna d'elles es descriu la informació tècnica de la instrumentació a emprar i els mètodes de mesura i mostreig a seguir amb exemples gràfics. S'inclouen tant aspectes relacionats amb la mesura directa com també la descripció d'aparells automàtics que mesuren i registren dades autònomament, amb exemples sobretot de la **Ribera Salada**, en la que es treballa des de 1998. S'indiquen, així mateix, projectes i publicacions que mostren l'experiència dels autors en la temàtica i proporcionen eines de consulta i exemples. El document posa un èmfasi especial en el **mostreig i mesura directe** per part d'un observador. En aquest sentit, al final de cada apartat i a mode de guia es fan una sèrie de **recomanacions** bàsiques que cal tenir en compte per a portar a terme l'activitat concreta. En el nostre cas ens hem centrat en recomanacions sobre: 1) mesura del cabal, 2) mostreig granulomètric, 3) mostreig de sediment en suspensió, 4) mostreig de càrrega de fons, i 5) geometria hidràulica.

La mesura de fenòmens altament variables en l'espai i el temps no és una tasca senzilla. El transport de sediments ens ofereix un exemple clàssic en aquest sentit. La quantificació del transport de sediments és fonamental per entendre la dinàmica fluvial en general, però també per a caracteritzar i modelitzar processos fluvials associats, com l'hàbitat de peixos i invertebrats, l'estabilitat d'infraestructures, la qualitat de l'aigua, la sedimentació en embassaments, entre d'altres; inclòs el suport tècnic a projectes de rehabilitació de trams i de llarg sectors en rius degradats. Aquest tipus d'informació a llarg termini és especialment valuosa en àrees climàticament contrastades que estan sotmeses a continus canvis en el usos del sòl i l'aigua. Les conques de muntanya Mediterrània són un exemple d'aquest tipus d'àrees hidroclimàtiques, on la informació sobre dinàmica fluvial i sobretot sobre transport de sediments és encara molt escassa, però alhora altament important.

2. VARIABLES HIDROLÒGIQUES

2.1. Precipitació

2.1.1. Definició

El procés de precipitació inclou tot tipus d'aigua que es diposita sobre la superfície terrestre, ja sigui en forma líquida o sòlida. En aquest protocol ens referirem al primer dels casos.

2.1.2. Objectius de mesura i aplicacions

La mesura terrestre de la precipitació és un objectiu clàssic en el camp de hidrologia. Es tracta d'obtenir dades amb la màxima resolució temporal i espacial possible que permetin quantificar les entrades d'aigua a una conca i establir d'aquesta manera les relacions necessàries amb les processos que la pluja genera (e.g. escolament, erosió, etc.). La densitat de mesures hauria d'estar en relació a les característiques del terreny (i.e. magnitud del relleu), tot i que sovint prevalen altres factors com l'accessibilitat, la seguretat, i la disponibilitat pressupostària. Les principals variables dels hietogrames d'interès per a la hidrologia són normalment la intensitat, la durada, la distribució temporal i el volum total de l'episodi plujós; tot i així, la precipitació també té derivades de tipus climàtic com la recerca de períodes plujosos i secs, les tendències temporals, l'estacionalitat del fenomen, el tipus de precipitació i el seu origen i l'anàlisi de la probabilitat d'ocurrència.

2.1.3. Mostreig i mesura

La mesura de la precipitació sobre una conca es basa en la recollida de pluja en un col·lector anomenat pluviòmetre. La precipitació es mesura per volum o pesada i el seu registre es realitza per lectura directa (pluviòmetres totalitzadors) o per registre gràfic (paper) i/o electrònic. Cal tenir en compte que elements propers als aparells (e.g. arbres, construccions) poden distorsionar la mesura i augmentar-ne l'error. Per aquest motiu es necessari tenir en compte la presència d'aquests elements alhora d'ubicar un pluviòmetre (veure manuals per a la seva correcta ubicació). També cal tenir en compte que la distribució espacial de la pluja dins una conca pot ser molt irregular, especialment durant episodis tempestuosos i locals; una major densitat de pluviòmetres o pluviògrafs pot ajudar a detectar i corregir aquesta situació. Els aparells obtenen dades quinzeminutals que posteriorment es processen per a treure'n intensitats horàries, diàries, volums de precipitació, etc. Se'n ha de fer un manteniment i revisió periòdics. Els aparells de mesura que habitualment utilitza l'equip del CTFC-UdL tenen les següents característiques:

- Mesura continua (i.e. quinzeminutal) de pluviometria amb un pluviòmetre ARG100 amb un diàmetre de captació de 254 mm i un ajust estàndard de 0,2 mm de pluja per cada bolc del balancí.
- Registre en data-logger Campbell CR10X
- Alimentació mitjançant placa solar

En ocasions aquests pluviòmetres poden formar part d'una estació meteorològica completa com la que es presenta a la Figura 1.



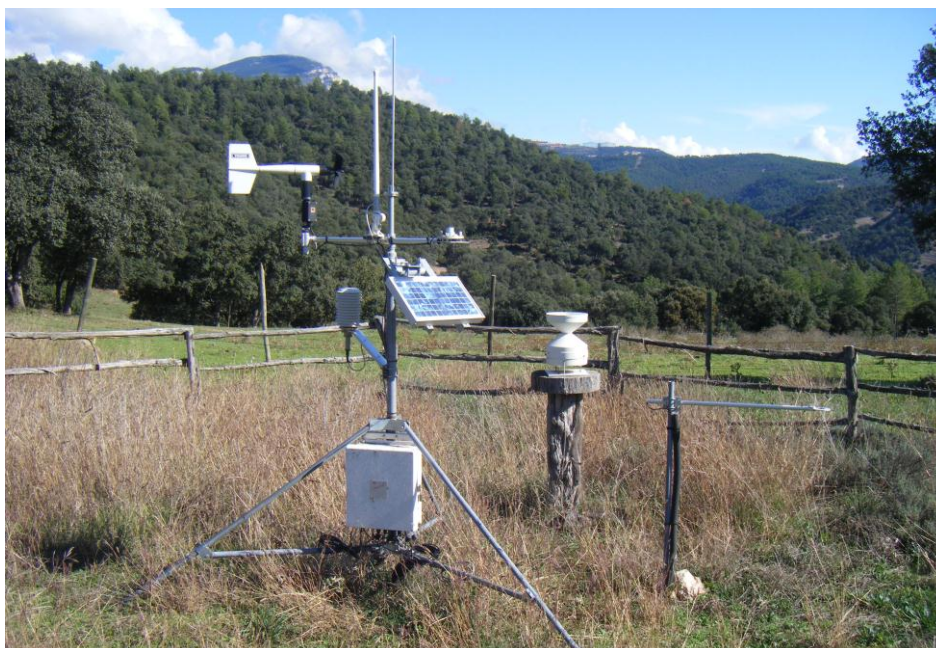


Figura 1. Estació meteorològica completa (inclòs pluviògraf) a Lladurs, conca de la Ribera Salada, en funcióment des de 1998 (CTFC-UdL).

2.1.4. Calibració

La calibració, neteja i anivellament dels pluviògrafs es fa un cop cada any. La calibració consisteix en comprovar la mesura del balancí mitjançant una quantitat (volum) coneguda d'aigua. La neteja i anivellament són necessàries deguts a l'acumulació de brossa a la boca de mesura i a l'interior de l'aparell, i als desplaçaments que l'aparell hagi pogut patir degut al vent i altres inclemències del temps.

2.1.5. Resultats

Els resultats que s'obtenen dels pluviògrafs es sintetitzen en els hietogrames de pluja que representen la intensitat de la precipitació al llarg de l'episodi plujós. Les dades que es descarreguen dels data-loggers estan en fitxers tipus .dat els camps dels quals han estat prèviament definits per cada usuari, i que són directament convertibles a formats de treball com fulls de càlcul .xls o similars. La Figura 2 presenta un exemple de dades en brut juntament amb un hietograma típic elaborat a partir de les dades de camp.

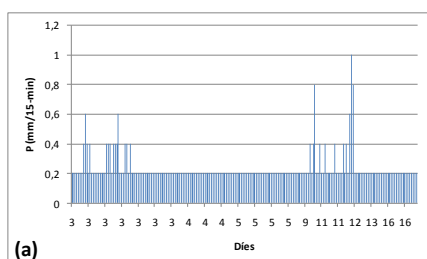
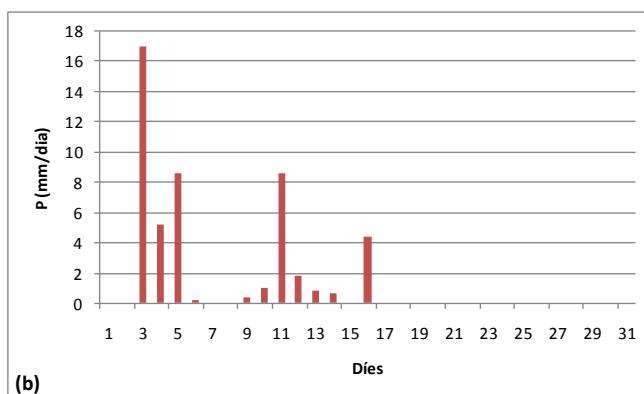


Figura 2. (a) Dades quinzeminutals de precipitació recollides directament del pluviògraf de Ramonet a la Ribera Salada el mes de gener de 2008. (b) Hietograma de precipitació diària elaborat a partir de les dades anteriors.



2.2. Hidràulica: Velocitat, Profunditat, Cabal

2.2.1. Definició

El cabal és el volum d'aigua que circula per unitat de temps per una secció de riu determinada. Les unitats de mesura habituals són m^3/s o l/s . La mesura i el registre del cabal són un element fonamental en la recerca hidrològica i en la planificació hídrica d'un país. La mesura i el registre es realitzen normalment en estacions d'aforament que formen part de xarxes hidromètriques oficials. La mesura del cabal es realitza també en estacions experimentals de recerca i en moments puntuals per avaluar, per exemple, pèrdues de canals de reg o embassaments, recessions d'avingudes, etc. Des del punt de vista fluvial, el coneixement dels cabals és fonamental per a estimar les càrregues sedimentàries que transporten els rius, caracteritzar l'hàbitat de peixos a través de corbes de preferència, i altres com el disseny d'obres de drenatge i protecció, etc.

2.2.2. Objectius de mesura i aplicacions

La mesura del cabal a través de les seves variables hidràuliques associades (profunditat, velocitat), i és especialment important en conques experimentals on no es disposa habitualment de seccions fixes de control, com per exemple estacions d'aforament. En molt casos els sensors mesuren l'altura de l'aigua en llits mòbils i per tant són necessàries mesures directes per a l'establiment de relacions h/Q (calat¹/cabal) i les seves variacions en el temps. El cabal i les variables associades s'utilitzen per al càlcul de paràmetres hidràulics bàsics per a definir el transport de sediment com la tensió de tall (i.e. *shear stress*), la velocitat de tall (i.e. *shear velocity*), l'energia del flux (i.e. *stream power*), etc.

2.2.3. Mesura i calibració

Existeixen nombrosos manuals d'hidrometria i llibres d'hidràulica i hidrologia amb seccions dedicades específicament a la mesura del cabals en un ampli rang de condicions fluvials (torrents, rius de muntanya, grans rius). Ens limitarem en el nostre cas a exposar les pràctiques que es porten a terme habitualment per al control del cabal d'aigua a les conques integrades de la Ribera Salada. En aquesta conca es controla l'altura d'aigua en continu en tres seccions diferents i aquestes dades es transformen posteriorment a cabal a través de mesures reals i aproximacions teòriques. Els instruments i variables mesurades són:

a) Cogulers: E 372344 / N 4661478 (UTM Fus 31N, ED50)

- Sobreeixidor compost triangular de làmina fina de 90° i rectangular (Figura 3a)
- Mesura d'altura d'aigua en continu mitjançant un sensor de nivell Druck PTX-510
- Registre en data-logger Campbell CR10X i alimentació mitjançant placa solar

(b) Canalda: E 371528 / N 4661466 (UTM Fus 31N, ED50)

- Llit mòbil de graves i còdols de 6 metres d'ample (cabals baixos) (Figura 3b)
- Mesura d'altura d'aigua en continu mitjançant un sensor de nivell Druck PTX-510
- Registre en data-logger Campbell CR10X i alimentació mitjançant placa solar

(c) Inglabaga: E 370332 / N 4658287 (UTM Fus 31N, ED50)

- Llit mòbil de graves i còdols d'11 metres d'ample (cabals baixos) (Figura 3c)
- Mesura d'altura d'aigua en continu mitjançant un sensor de nivell Druck PDCR-1730
- Registre en data-logger Campbell CR10X i alimentació mitjançant placa solar

¹ Calat, equivalent a altura o profunditat d'aigua en una vertical d'una secció determinada.



Figura 3. (a) Sobreexidor compost a Cogulers; (b) Secció hidromètrica de control a Canalda sobre llit mòbil de graves; (c) Secció hidromètrica de control a Inglabaga sobre llit mòbil de graves, Ribera Salada.

Donat que es tracta d'una estació fixa, la relació h/Q a l'estació de Cogulers ve definida per una corba teòrica (Figura 4a). El mateix tipus de relació a Canalda i Inglabaga s'ha definit també teòricament mitjançant càlculs hidràulics i s'ajusta amb mesures directes de camp (Figura 4b).

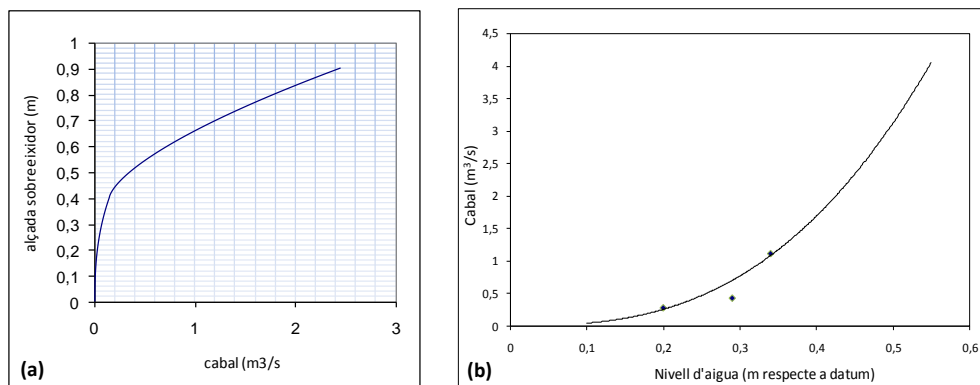


Figura 4 (a). Corba teòrica pel sobreexidor de Cogulers, Ribera Salada (per la secció triangular de 90° es segueix l'equació de tarat $0,315 \times \sqrt{2g} \times h^{5/2}$, on g és la gravetat i h és l'altura d'aigua a l'aforador des del vèrtex); (b) Corba teòrica i aforament directes per la secció d'Inglabaga en llit mòbil. La relació és vàlida per a $0 > d < 0.6$ metres, on d és la profunditat màxima de la secció.

Per a definir aquestes relacions es necessari obtenir mesures de velocitat per diferents calats. La **velocitat** mitjana del flux que circula per un riu és la mesura de la distància recorreguda per l'aigua per unitat de temps, expressada generalment en m/s, i mesurada a 0,6 de la fondària des de la superfície, o com la mitjana dels punts 0,2 i 0,8 de la fondària. Quan es parla de velocitat de l'aigua en un curs fluvial no s'ha d'entendre, doncs, que ens referim a la velocitat

que té lloc en un punt determinat, sinó a una velocitat mitjana per al conjunt del flux en aquella secció determinada. Al final de la secció es presenten una sèrie de recomanacions a l'hora de mesurar la velocitat de l'aigua d'un riu.

Per a la mesura directa de la velocitat en el camp s'utilitzen molinets hidràulics i/o sensors electromagnètics. El protocol de mesures mínim indica que s'han de prendre mesures de calat i velocitat amb repetició i a distàncies regulars l'espaiat de les quals no superi el 10% de l'amplada de la secció. A ser possible, es prendran de 2 a 3 lectures en cada punt. Trenta segons són suficients per a obtenir una estimació de la velocitat mitjana en una vertical, excepte quan les velocitats són molt baixes, que són necessaris 60 segons. Quan es prenen lectures en més de quatre punts en una vertical, el temps de mesura es pot reduir a 10 segons. En el cas de la Ribera Salada s'empren un molinet OTT C-2² i un sensor electromagnètic Valeport 801 (Figura 5).

Per al càlcul indirecte de la velocitat s'utilitzen habitualment fórmules de resistència al flux de manera directa a partir de dades físiques del tram d'estudi. La fórmula empírica més comunament utilitzada és la de Manning que necessita dades de pendent o gradient d'energia, rugositat (i.e. granulometria de partícula i de forma) i radi hidràulic (i.e. geometria hidràulica) (per a més detalls veieu seccions 3.1. i 4.1.):

$$v = 1/n (R^{2/3} \times s^{1/2})$$

on v és la velocitat en m/s, n és un paràmetre adimensional de rugositat, R és el radi hidràulic (en m) i s és el pendent (m/m). Igualment s'utilitza WinXSPRO® per a modelitzar els cabals, sobretot de crescuda on la incertesa de les fórmules i la manca de dades directes és més habitual. Aquest programa de distribució lliure (distribuït pel *Stream Systems Technology Centre, USDA Forest Service* -Departament d'Agricultura del Estat Units-) permet el càlcul de variables hidràuliques amb base a la geometria hidràulica (incloent el pendent longitudinal) i valors de rugositat de seccions transversals.

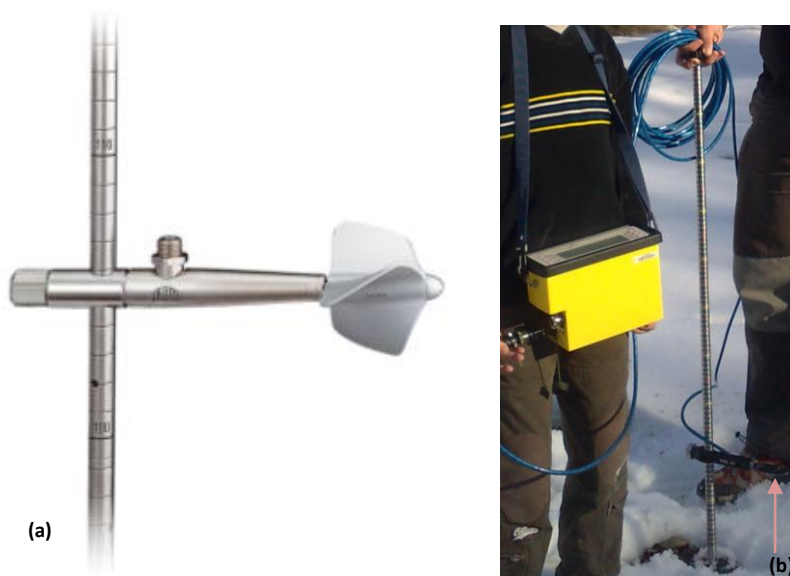


Figura 5. (a) Molinet hidràulic OTT C-2; (b) Sensor electromagnètic Valeport

² El molinet hidràulic és un instrument de precisió que s'utilitza per a mesurar la velocitat del flux d'aigua. El valor resultant de la mesura ve donat en número de voltes per un temps determinat. Cal transformar, doncs, aquest valor per obtenir la velocitat del flux en m/s. La fórmula de conversió pren la forma: $v = [(c / t) \times a] + b$; on v és la velocitat del flux, c és el número de voltes, t és el temps de mesura en segons, i a i b són constant empíriques de depenen de l'aparell utilitzat.

2.2.6. Resultats

La mesura de la velocitat i la profunditat al camp (i.e. aforar) permet calcular el cabals i conèixer la variabilitat d'aquest paràmetres en la secció de control i la relació entre ells. La figura 6 mostra un exemple de dades obtingudes durant un aforament a l'estació d'Inglabaga. La repetició dels aforaments és la base per a l'elaboració i re-avaluació de les corbes de tarat h/Q per a les seccions de control de la conca.

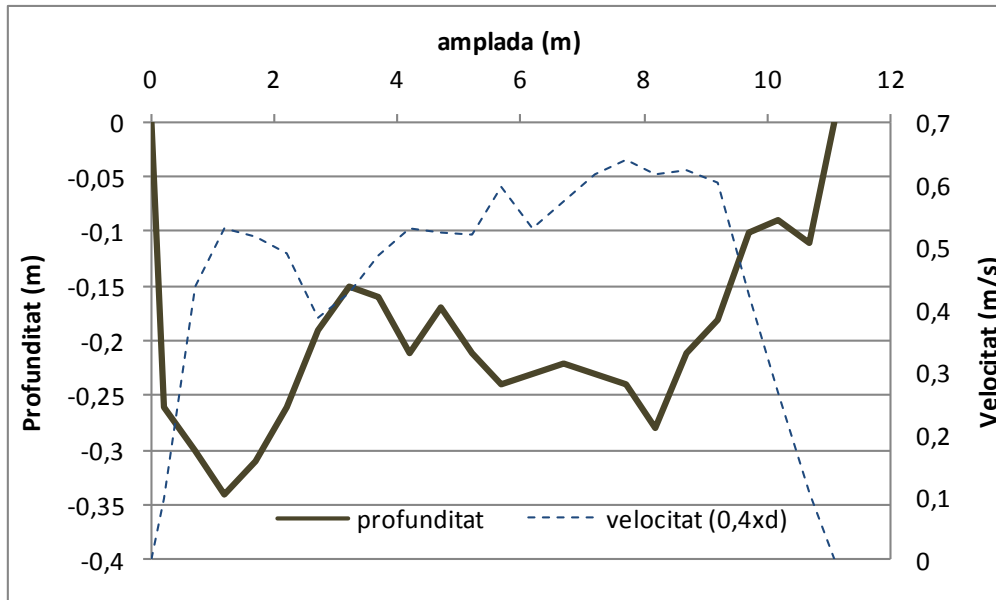


Figura 6. Velocitat i profunditat obtingudes durant un exercici de mesura del cabal a la secció d'Inglabaga

El **cabal** es calcula, generalment, a partir de la fórmula següent:

$$Q = A \times v$$

on Q és el cabal (m^3/s), A és l'àrea de la secció (m^2 , extreta de la topografia), i v és la velocitat (m/s). En el cas d'un riu amb el llit poc uniforme es pot emprar el mètode del càlcul de cabal per subseccions per a fer un càlcul més exacte, a partir de la fórmula (Figura 7):

$$Q_T = \sum_{i=1}^{i=n} (Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n)$$

on Q_T és el cabal total i Q_i és el cabal en cada subsecció (excepte el primer i el últim que es calculen de manera més senzilla) a partir de:

$$Q_i = [(v_i + v_{i+1}) / 2] \times [(d_i + d_{i+1}) / 2] \times w$$

on Q_i és el cabal per la subsecció i , v_i és la velocitat mitjana del panel i , v_{i+1} és la velocitat mitjana de la subsecció $i+1$, d_i és la fondària mitjana de la subsecció i , d_{i+1} és la fondària mitjana de la subsecció $i+1$, i w és l'amplada de cada subsecció, idèntica per a totes elles.

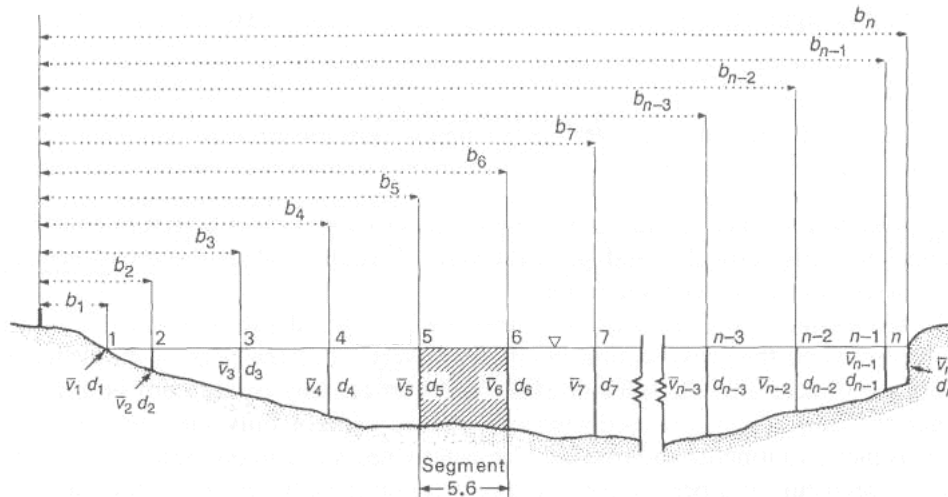


Figura 7. Mètode de càlcul de cabal per subseccions. A l'exemple el cabal a la subsecció (segment) 5-6 és el resultat d'aplicar $Q_{5-6} = [(v_5 + v_6) / 2] \times [(d_5 + d_6) / 2] \times w$ (adaptat de Shaw, 1994)

Hi ha, així mateix, altres mètodes directes i indirectes per a la determinació del cabal d'aigua d'un riu en el camp. Entre les tècniques de tipus directe cal citar el de la mesura volumètrica mitjançant el mètode de la galleda. Aquesta és una tècnica que s'utilitza per cabals petits, normalment no superiors a 10 l/s i és molt pràctic en cas de petits sobreixidors. Malgrat la seva aparença senzilla és, com tots els mètodes volumètrics, molt exacte. Com el seu nom indica es tracta de mesurar el cabal d'aigua recollint tota l'aigua que circula pel canal fluvial en un recipient amb un volum conegut durant un període de temps determinat, o bé mesurant el temps necessari per a omplir el recipient utilitzat.

Entre els mètodes indirectes cal assenyalar el mètode de dilució. Aquest mètode es basa en mesurar la concentració obtinguda en el curs d'aigua després d'haver injectat una solució salina concentrada en un punt aigües amunt; el cabal serà proporcional a la relació entre les concentracions. El mètode s'anomena d'integració i es basa en la injecció instantània en un punt del curs fluvial d'un volum conegut d'una solució concentrada; en una secció del riu situada aigües avall del punt d'injecció i a una distància suficient per a que es produeixi una bona barreja, es prendran mesures de concentració durant tot el temps de pas del núvol salí. El cabal el calcularem a partir de l'equació:

$$Q = V \times C_1 / C_2 \times t$$

on Q és el cabal, V és el volum injectat, C_1 és la concentració de la solució injectada, C_2 és la concentració mitjana ponderada (integrada) i t és el temps, tenint en compte que a l'aplicar aquesta equació es considera una condició de bona barreja en tota la secció de recollida. S'utilitza un conductímetre per a estimar la concentració de sal al riu, essent solament necessari establir la relació entre conductivitat i concentració per a cada cas. El mètode de càlcul del cabal a partir de les dades de conductivitat es basa en la premissa de que la conductivitat d'una mostra és una funció lineal de la seva concentració en sal; d'aquesta manera prenent mesures de conductivitat directament del curs fluvial durant el pas del núvol de sal i coneixent la relació entre concentració i conductivitat, podem obtenir les dades de concentració de sal sense haver de realitzar cap tipus d'anàlisi.

Per a obtenir la solució salina que serà injectada afegirem 1 kg de sal comú a 5 litres d'aigua del mateix riu. Les lectures de conductivitat durant el pas del núvol de sal es poden realitzar a

intervalos de 3 a 5 segons. Per a realitzar la calibració és necessari prendre una mostra d'aigua del curs fluvial (1 litre), mesurar la temperatura i la conductivitat, i afegir successivament volums coneguts (0,1 ml) de la mateixa solució salina que hem utilitzat per a la injecció en la que seguidament mesurarem la conductivitat. És necessari realitzar aquesta operació com a mínim 10 vegades per a la calcular la recta de regressió, procurant que els valors de conductivitat mesurats durant el pas del núvol de sal quedin dins el rang de valors de calibració. A partir de la recta de calibració determinarem en primer lloc la concentració per a cada conductivitat mitjana en el curs i posteriorment integrarem les concentracions per a obtenir el cabal. És convenient mesurar la temperatura i la conductivitat del curs abans de realitzar l'experiment i després d'acabar-lo, per a obtenir les dades de base del riu i poder corregir els efectes de possibles canvis de temperatura durant l'experiment.

La mesura i registre de cabals permet obtenir informació bàsica per al control dels recursos hídrics i la dinàmica fluvial en conques experimentals i en general en conques de drenatge. Les sèries de cabals poden donar lloc a elaborar, per exemple, corbes de freqüències de cabals que són útils per a detectar canvis de tendència en la producció d'escolament d'una conca i que es fan servir també per al càlcul de càrregues sòlides mitjançant el mètode de *rating curve* o relació cabal – concentració de sediment (Walling, 1984). A la figura 8 es presenta un exemple de Corba de Freqüències de Cabal obtinguda a partir de la sèrie de dades horàries de l'estació de Canalda a la Ribera Salada (1998-2008).

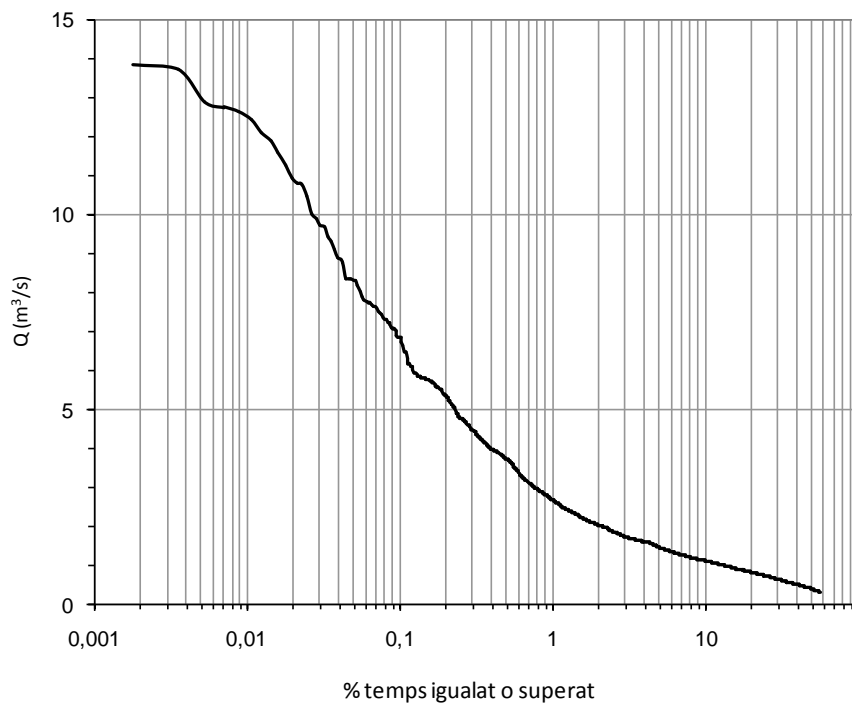


Figura 8. Corba de Freqüències de Cabals a l'estació de Canalda (1998-2008), Ribera Salada, a partir de la sèrie horària de cabal.

RECOMANACIONS BÀSIQUES PER A LA MESURA DE LA VELOCITAT DE L'AIGUA

- 1) El **canal** ha de ser **recte** i la secció transversal i el pendent uniformes. Quan la longitud recte és escassa, el tram d'aigües amunt del punt de mesura ha de ser el doble del d'aigües avall.
- 2) La fondària ha de ser suficient per a que l'aparell de mesura (e.g. molinet hidràulic) quedi submergit totalment en l'aigua.
- 3) El canal ha d'estar net i **lliure d'obstacles** com arbres i plantes aquàtiques.
- 4) S'hauran d'evitar els punts on es produeixin vorticitats, remolins o aigües mortes.
- 5) Quan s'hagin de prendre mesures prop d'un pont és preferible fer-les aigües amunt, excepte en els casos en els que l'acumulació de troncs, gel o altres obstacles ho desaconselli.
- 6) En el cas de molinets hidràulics cal triar correctament l'hèlix a emprar en la mesura (i.e. el pas de rosca de l'hèlix ha d'englobar el rang de velocitats de la secció).
- 7) S'han de prendre mesures de calat i velocitat amb **repetició** i a distàncies regulars l'espaiat de les quals no superi el 10% de l'amplada de la secció (2 a 3 lectures en cada punt).
- 8) Trenta segons són suficients per a obtenir una estimació de la velocitat mitjana en una vertical; quan la velocitat és molt baixa es recomanen 60 segons.
- 9) La velocitat es mesura a 0,6 de la fondària des de la superfície (**0,6×d**), o com la mitjana dels punts 0,2 i 0,8 de la fondària des de la superfície $[(0,2 \times d) + (0,8 \times d)] / 2$
- 10) En el cas de disposar de lectures directes de velocitat (i.e. sensor electromagnètic) es recomana repetir la mesura si aquesta supera la desviació estàndard de les lectures; en el cas de que persisteixi la desviació, cal anotar la mesura i marcar-la com a efecte directe de la turbulència i, per tant, de la variabilitat de la velocitat a la secció.

3. VARIABLES SEDIMENTÀRIES

3.1. Granulometria del llit del riu

3.1.1. Definició

Els rius de graves i còdols es distingeixen dels rius de sorres i blocs principalment per la distribució granulomètrica dels seus sediments. La distribució granulomètrica del llit d'un riu proporciona una caracterització de la mida (i forma) dels sediments. Els rius de graves i còdols presenten sovint una capa de material superficial més grollera que el material subsuperficial. Aquesta capa s'anomena cuirassa. Tot i que les raons de formació d'aquesta capa són diverses, hi destaquen els processos de rentat del material fi durant les recessions de les crescudes. Aquests processos poden ser més accentuats en medis en els que la transferència de sediment des d'aigües amunt ha estat alterada degut, per exemple, a la construcció d'embassaments (e.g. Vericat et al., 2006) o a l'extracció d'àrids. Les superfícies cuirassades són estables durant crescudes de baixa magnitud. El trencament de la cuirassa durant crescudes de major magnitud controla el subministrament de sediment groller. Pel contrari, aquestes característiques estructurals no s'observen en rius en els que hi domina principalment la fracció sorra. Per tant, és necessari adequar els objectius de mesura (i la tècnica) a les característiques estructurals del llit del riu.

3.1.2. Objectius de mesura i aplicacions

L'objectiu principal d'aquesta caracterització és la mesura de la mida dels sediments del llit del riu d'una unitat morfo-sedimentaria determinada. Per tant, és necessari que la població utilitzada per fer aquesta mesura (nombre de partícules, volum de partícules etc.) sigui representativa de la unitat morfològica que s'està caracteritzant. Els límits de representativitat vindran determinats per la tècnica utilitzada per portar a terme la caracterització (veure punt 2.1.3.). De la mateixa manera, també és necessari identificar el tipus de material que es vol caracteritzar. Tal i com s'ha indicat anteriorment, la majoria dels rius de graves i còdols presenten una cuirassa que disposa de característiques granulomètriques diferents a les del material subsuperficial. Conseqüentment, la caracterització del material superficial i subsuperficial és necessari que es faci de manera independent. En la majoria dels rius de sorres no hi ha diferència entre la capa superficial i la subsuperficial; per tant, no és necessari caracteritzar independentment ambdues unitats.

La gradació de mides utilitzada per caracteritzar granulomètricament el material del llit d'un riu en el camp de la geomorfologia fluvial tendeix a seguir l'escala de Wentworth. Aquesta escala relaciona la mida de partícula (e.g. 2 mm) amb la seva descripció (e.g. sorres), i s'utilitza per a establir intervals granulomètrics que seran els utilitzats per calcular les freqüències de la distribució granulomètrica (veieu exemples a l'apartat 2.1.4.). Un cop obtinguda la distribució de freqüències (i.e. caracterització granulomètrica) es poden extreure percentils granulomètrics. Els percentils granulomètrics descriuen la distribució de mides dels sediments de la unitat caracteritzada. Per exemple, un percentil 50 correspon al valor central de la distribució; la mida de partícula resultant per aquest percentil proporciona la mitjana estadística (*mediana*) de la distribució. Els percentils es poden abreviar com a D_i , on i representa el percentil de la distribució. Aquests percentils poden ser utilitzats per a calcular índexs que ajuden a determinar la forma de la distribució, com és el cas de l'índex de dispersió granulomètrica. De la mateixa manera, la comparació de les distribucions superficials i subsuperficials permet calcular el grau de cuirassament. Per exemple, quan el quocient entre el valor mig de la distribució granulomètrica superficial i la subsuperficial és superior a 2 es considera que el material del llit del riu presenta una cuirassa relativament estable. Les distribucions granulomètriques també es poden utilitzar per a calcular valors de rugositat de

partícula que són necessaris per a realitzar modelitzacions hidràuliques bàsiques, i també són claus per a l'aplicació de models de càrrega de fons.

3.1.3. Mostreig i mesura

En aquest protocol la descripció del mostreig granulomètric s'estructura en relació al material a caracteritzar (superficial i/o subsuperficial). Només es descriuen mètodes per a la caracterització granulomètrica en base a la mida de partícula, i no s'inclouen mètodes per a caracteritzar la forma de les partícules. Per últim, és necessari esmentar que si l'objectiu és la comparació de distribucions granulomètriques realitzades en diferents punts o durant diferents períodes de temps és imprescindible que aquestes es facin sobre unitats morfo-sedimentaries equivalents (i.e. cap o cua de barra).

El **material superficial** es pot caracteritzar mitjançant mètodes directes i/o mètodes indirectes. Els més utilitzats dintre dels directes són a) el mètode dels transectes lineals (Wolman, 1954) i b) el mètode àrea per pes (Lane i Carlson, 1953). El c) mètode fotogràfic es considera un mètode indirecte. L'anàlisi es basa en la mesura del eix *b* de les partícules (l'eix perpendicular a l'eix de més longitud, eix *a*). L'eix *b* defineix l'amplada de la partícula (Figura 9), i de manera general, es considera l'eix sobre el que es basa la seva mobilitat.

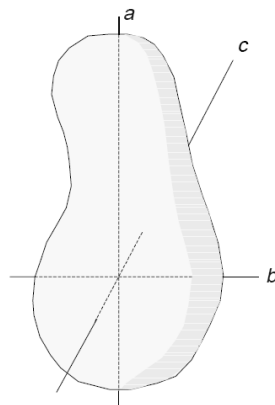


Figura 9. Esquema d'una partícula en el que es distingeixen els tres principals eixos que es poden identificar (extret de Bunte i Abt, 2001).

- El **mètode dels transectes lineals** o també conegut com mètode de Wolman (1954) es basa en la mesura de l'eix *b* d'un mínim de 100 partícules localitzades al llarg de la unitat morfològica a caracteritzar. En cas de que es vulgui tenir una mostra representativa dels valors extrems, es recomana que el número de partícules a mesurar sigui de 400 (Rice i Church, 1996). El mètode consisteix en seguir una línia recta imaginària al llarg d'una secció fent passes a distàncies regulars (habitualment 1 metre). A cada passa (≈ 1 metre), es recull i mesura la partícula situada a la punta de la sabata. Per tal d'evitar possibles errors es recomana no mirar a la superfície del llit en el moment en que s'agafa la partícula. Tot i això, una manera de reduir aquesta font d'error és utilitzar un mètode de selecció menys subjectiu. Per això es pot utilitzar una cinta mètrica. És necessari definir l'interval o distància regular a la que es vol recollir cada partícula que ha de ser mesurada. Per tal de determinar aquest interval s'ha de tenir en compte la partícula més grollera que hi ha al dipòsit. Es recomana que l'interval sigui tres cops la mida de l'eix *b* de la partícula, evitant, així, que una mateixa partícula sigui seleccionada dos cops. Aquest mètode té un límit de mida inferior de

partícula. Es considera que les partícules més petites de 8 mm (ample del dit d'una persona) queden descartades de la caracterització (Rice, 1995). Per aquest motiu es recomana utilitzar aquest mètode en els casos en que el percentatge de partícules inferiors a 8 mm sigui baix. Les partícules es mesuren amb un metre de fuster, un peu de rei o una plantilla granulomètrica (Figura 10) dividida en intervals $\frac{1}{2} \phi_i$ ($\phi_i = -\log_2 i$, on i són els mm d'una partícula determinada). L'ús d'una plantilla granulomètrica no permet la mesura de l'eix b però permet calcular la freqüència de partícules que queden entre intervals granulomètrics.



Figura 10. Plantilla granulomètrica dividida en intervals $\frac{1}{2} \phi_i$ ($\phi_i = -\log_2 D_i$).

Un cop obtingudes les mesures o el nombre de partícules que queden entre intervals granulomètrics se'n calculen les freqüències. El càlcul de les freqüències es fa en base a intervals granulomètrics $\frac{1}{2} \phi_i$ (segons l'escala de Wentworth, de 8 a 11,3 mm, de 11,3 a 16 mm, de 16 a 22,6 mm etc., veieu Bunte i Abt, 2001 per una descripció detallada). En el cas de que s'hagin obtingut mesures directes de l'eix b s'ha de calcular el nombre de partícules que hi ha per cada interval. En el cas de que s'hagi utilitzat una plantilla granulomètrica s'obté directament el nombre de partícules dins de cada interval. Per últim, la caracterització granulomètrica es presenta mitjançant una corba de freqüències acumulades que relaciona la mida de partícula i el percentatge acumulat 'més fi que' (veieu 2.1.4. per a més detalls).

- El **mètode d'àrea per pes** consisteix en definir l'àrea mínima que cal analitzar per obtenir una mostra representativa superficial de la unitat morfo-sedimentaria que es vol caracteritzar en base a la partícula màxima (més grollera) exposada ($D_{m\grave{a}x}$). L'àrea a mostrejar es pot definir a partir de la següent equació (segons Fripp i Diplas, 1993):

$$A = 400 \times D_{m\grave{a}x}^2$$

on $D_{m\grave{a}x}$ equival a la mida de la partícula màxima (en metres) i A és l'àrea a mostrejar en m^2 . La partícula més grollera ha de ser representativa de l'àrea a caracteritzar.

Un cop delimitada l'àrea mínima a mostrejar, cal diferenciar el material superficial del material subsuperficial. Amb aquest propòsit es pot utilitzar pintura en esprai (e.g. Lane i Carlson, 1953). Per tal de minimitzar la possible percolació de la pintura a capes inferiors s'ha d'utilitzar pintura d'assecat ràpid i s'ha de pintar a una distància suficient per a prevenir l'excés de pintura i reduir-ne la infiltració. Un cop pintada l'àrea, tot el material que ha quedat total o parcialment pintat es considera que correspon a la capa

superficial. Amb molta cura s'extreu el material superficial dipositant-lo en algun recipient (e.g. cubell, sac, etc.). Aquest material s'ha de garbellar seguint intervals granulomètrics estàndards ($\frac{1}{2} \phi_i$). El sediment retingut en cadascun dels sedassos es pesa per tal de calcular-ne la seva freqüència. El garbellat es pot realitzar en el camp mitjançant un granulòmetre de camp (Figura 11a) o al laboratori amb una torre granulomètrica (Figura 11b). En el cas de que el garbellat s'hagi de fer al laboratori és necessari etiquetar al camp cadascuna de les mostres, indicant: a) la data, b) inicials del responsable mostreig, c) el lloc, d) el riu, i e) el material que es tracta (seguint algun criteri de nomenclatura indicat prèviament a la llibreta de camp).



Figura 11. (a) Granulòmetre de camp i (b) Torre granulomètrica de laboratori per al garbellat de mostres de sediments.

Les distribucions granulomètriques obtingudes amb el mètode àrea per pes s'han de convertir a valors equivalents a les de Wolman i a les volumètriques (material subsuperficial). Per a més detalls sobre els mètodes de conversió veieu Kellerhals i Bray (1971), Gomez (1983), Anastasi (1984), Diplas i Sutherland (1988), i Diplas (1989).

- El **mètode fotogràfic** consisteix en l'obtenció de la distribució granulomètrica a partir d'una fotografia digital en planta propera al llit del riu (i.e. 1 a 2 metres). Les fotografies del material superficial del llit del riu es prenen sobre una retícula de mesures conegudes (Figura 12), fet que permet la rectificació de la seva projecció. Aquestes imatges s'analitzen mitjançant el programari Digital Gravelometer®. Aquest programa informàtic, ja calibrat, permet extreure la distribució granulomètrica de l'àrea fotografiada, així com paràmetres estadístics dels sediments i la seva estructura.

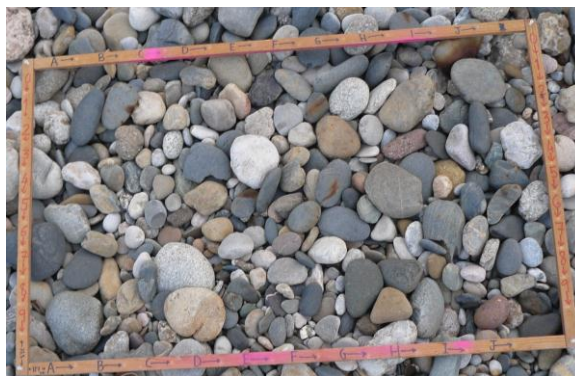


Figura 12. Exemple de fotografia en la que s'observa la retícula utilitzada per a rectificar la imatge i aplicar el mètode fotogràfic amb l'objectiu d'extreure la distribució granulomètrica.

El **material subsuperficial** es pot caracteritzar mitjançant el mètode volumètric o volum per pes (amb extracció prèvia de la capa superficial -seguint criteri explicat en el mètode area per pes-).

- El **mètode volumètric** o volum per pes consisteix en extreure un volum determinat de material subsuperficial, garbellar-lo (sedassos amb distribució de llum $\frac{1}{2} \phi_i$), i pesar el sediment retingut en cadascun dels sedassos. El volum de material a garbellar estarà en funció de la partícula màxima subsuperficial observada ($D_{m\grave{a}x}$) i el grau de precisió que es vulgui obtenir en la caracterització (seguint el criteri de Church et al., 1987). Normalment, el pes de la partícula màxima subsuperficial observada ($D_{m\grave{a}x}$) no ha de representar més del 0,1 % del pes total de la mostra, si bé en els casos en que el $D_{m\grave{a}x}$ està entre 32 i 128 mm, el pes d'aquesta pot arribar a representar l'1 % del pes total de la mostra. Aquest mètode s'utilitza també en rius sense diferències notables entre el calibre del material superficial i subsuperficial (i.e. **rius de sorres**). En aquest cas es considera que el volum caracteritzat és representatiu del conjunt del material. Les mostres que es recullen mitjançant aquest mètode es poden garbellar i pesar directament al camp (Figura 13a). Les mostres que contenen material humit es recomana portar-les al laboratori i assecar-les abans de garbellar i pesar (Figura 13b).

3.1.4. Exemples

A continuació es presenten dos exemples granulomètrics del tram baix del riu Ebre. La taula 1 mostra les dades originals obtingudes a camp així com el tractament que s'ha realitzat per tal d'obtenir les corbes de freqüències acumulades (Figura 14), mitjançant les quals es calculen els percentils granulomètrics (Taula 2). En el cas de que s'utilitzi una plantilla granulomètrica (mètode transectes lineals) la columna 'sedàs' representa la llum de la plantilla més gran on ha quedat retinguda cadascuna de les partícules. En el cas d'obtenir la mesura directa de l'eix b , s'ha de calcular el nombre de partícules entre classes granulomètriques (e.g. de 8 a 11.3 mm, de 11,3 a 16 mm etc.). Pel que fa al material subsuperficial correspon al sedàs on queden retingudes les partícules un cop garbellades. El mètode emprat per acumular i calcular els percentatges 'més fi que' es pot observar a la resta de columnes de la taula 1.

Els valors dels percentils que s'obtenen a partir de les corbes granulomètriques serveixen per a calcular índexs que ajuden a caracteritzar l'estructura sedimentaria del llit del riu. Per exemple, les dades de la taula 2 permeten calcular un índex de cuirassament de 2,6 ($D_{50\text{-superficial}}/D_{50\text{-subsuperficial}}$). El valor d'aquest índex indica que el llit del riu està força cuirassat, procés que limita la disponibilitat de sediment per a la càrrega de fons. De la mateixa manera, la presència d'una cuirassa estable limita els processos d'erosió en medis en els que hi ha dèficit de sediment com a conseqüència dels desequilibri sedimentari causat per l'activitat antròpica (e.g. embassaments).

Taula 1. Exemple de dades granulomètriques obtingudes al tram baix del riu Ebre: material superficial caracteritzat mitjançant el mètode dels transectes lineals (amb plantilla granulomètrica); i material subsuperficial caracteritzat mitjançant el mètode volumètric. Amb negreta les columnes emprades per realitzar les corbes granulomètriques (Figura 14).

Sedàs (mm)	Material superficial			Material subsuperficial		
	Número partícules	Percentatge (%)	Percentatge acumulat més fi que	Pes (kg)	Percentatge (%)	Percentatge acumulat més fi que
0,03				0,02	0,06	0,00
0,05				0,14	0,35	0,06
0,08				0,04	0,10	0,40
0,125				0,06	0,15	0,50
0,177				0,37	0,91	0,65
0,25				0,55	1,37	1,56
0,354				0,40	0,98	2,93
0,5				0,60	1,48	3,91
0,707				0,72	1,78	5,39
1				1,08	2,67	7,17
1,41				1,18	2,91	9,84
2				1,76	4,36	12,75
2,83				1,86	4,59	17,11
4				2,78	6,88	21,69
5,66				2,8	6,92	28,57
8	6	1,50	0,00	4,2	10,38	35,50
11,3	20	5,00	1,50	3,2	7,91	45,88
16	45	11,25	6,50	5,1	12,60	53,78
22,6	59	14,75	17,75	4,5	11,12	66,39
32	51	12,75	32,50	6,3	15,57	77,51
45,3	72	18,00	45,25	2,8	6,92	93,08
64	91	22,75	63,25			100,00
90,5	49	12,25	86,00			
128			98,25			
181			100,00			

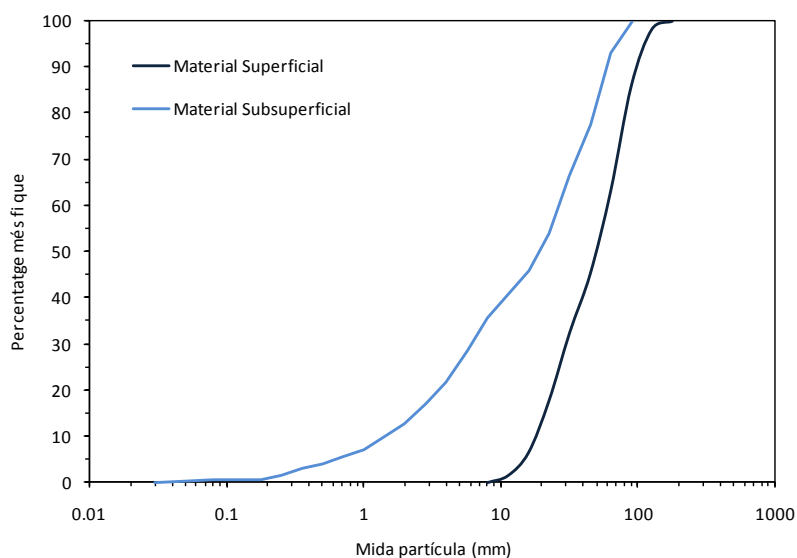


Figura 14. Corba granulomètrica superficial i subsuperficial d'una secció de control del tram baix del riu Ebre. Aquestes corbes han estat elaborades amb les dades (en negreta) presentades a la taula 1.

Taula 2. Percentils granulomètrics de les corbes de la figura 14.

Percentils D_i	Material superficial (mm)	Material subsuperficial (mm)
5	14,41	0.65
16	21,42	2.59
50	49,63	19.16
84	87,79	52.32
95	116,75	70.46

Mitjançant el tractament informàtic de fotografies en planta del llit del riu es poden obtenir distribucions granulomètriques del material superficial. La disponibilitat de paquets informàtics que analitzen aquestes fotografies facilita i agilitza aquest procés. El programa Digital Gravelometer® permet extreure la distribució granulomètrica de l'àrea fotografiada, així com paràmetres estadístics dels sediments i la seva estructura (Figura 15).

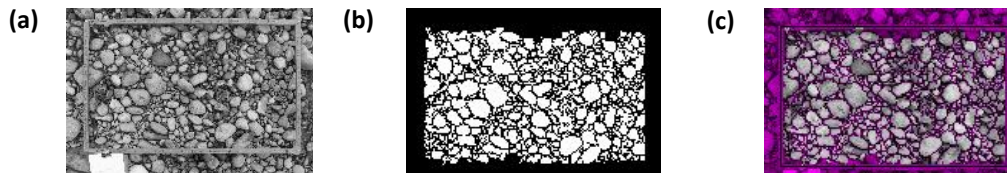


Figura 15. Obtenció de distribucions granulomètriques a partir del mètode fotogràfic i la utilització del Digital Gravelometer®. (a) Fotografia rectificada. (b) Identificació de partícules. (c) Partícules sobreposades a la fotografia rectificada. El programa disposa d'un algoritme que calcula la mida de les partícules identificades a la fotografia. Aquest càlcul permet l'obtenció d'un histograma i de la distribució granulomètrica resultant. Aquestes fotografies provenen d'una secció experimental de la Ribera Salada.

En aquest protocol no es presenten més exemple d'índexs que poden ser calculats a partir de dades granulomètriques. Tot i que s'han anat anomenant al llarg del document (e.g. índex de dispersió) no trobareu aquí exemples numèrics que mostrin el seu càlcul. S'aconsella la revisió del manual de Bunte i Abt (2001, lliure distribució al web del USDA -Departament d'Agricultura del Estat Units-) per a veure exemples de càlcul. Aquest manual es pot descarregar al web www.fs.fed.us/rmrs.

RECOMANACIONS BÀSIQUES PER A LA CARACTERITZACIÓ GRANULOMÈTRICA DEL LLIT DEL RIU

- 1) Selecció de les unitats morfològiques a caracteritzar en base a l'objectiu de l'estudi. Cal recordar que si l'objectiu es comparar distribucions granulomètriques les unitats morfo-sedimentàries han de ser equivalents.
- 2) Identificació de les característiques principals de l'estructura sedimentària del llit del riu de les unitats a caracteritzar, bàsicament a) la presència de cuirassament, i b) el percentatge de material fi (< 8 mm) ajudaran a l'elecció del mètode i els criteris a aplicar.
- 3) En el cas de que **hi hagi cuirassament** (i.e. diferència significativa entre el material superficial i subsuperficial) es necessari caracteritzar ambdues estructures sedimentàries: a) superficial i b) subsuperficial.
- 4) MATERIAL SUPERFICIAL: **(I)** En el cas de que el percentatge de material fi (< 8 mm) no sigui elevat es pot aplicar el mètode dels transectes lineals.
- 5) **(I)** El mètode dels transectes lineals es basa en la mesura de l'eix *b* d'un mínim de 100 partícules localitzades al llarg de la unitat morfo-sedimentària a caracteritzar (es poden mesurar 400 partícules en el cas de que es vulgui obtenir una caracterització amb els extrems estadísticament millor representats). **(a)** Col·locar una cinta mètrica al llarg de la unitat a mostrejar. **(b)** Definir l'interval o distància regular a la que es vol recollir cada partícula. **(c)** L'interval ha de ser tres cops la mida de l'eix *b* de la partícula més grollera, evitant, així, que una mateixa partícula pugui ser seleccionada dos cops. **(d)** Posar de nou, si cal, la cinta mètrica fins arribar al número de partícules necessari. **(e)** Les partícules es mesuren mitjançant un metre de fuster, un peu de rei o una plantilla granulomètrica dividida en intervals $\frac{1}{2} \phi_i$ ($\phi_i = -\log_2 i$), on *i* és la mida (en mm) de partícula. En el cas de que es mesuri directament la longitud de l'eix *b* serà necessari calcular la freqüència de partícules per a cada interval granulomètric (e.g. número de partícules que hi ha entre 8 i 11,3 mm, entre 11,3 i 16 mm, etc.). Nota: aquest mètode té un límit de mida inferior de partícula (8 mm). Es recomana buscar la partícula més grollera superficial ($D_{m\grave{a}x}$) i mesurar independentment el seu eix *b*. Veieu exemple al text.
- 6) **(II)** En el cas de que el percentatge de material fi (< 8 mm) sigui elevat es necessari aplicar el mètode d'àrea per pes. Per aplicar el mètode àrea per pes s'ha de **(a)** definir una àrea representativa de la unitat morfo-sedimentària. La determinació de l'àrea es basarà en la partícula màxima (més grollera) exposada ($D_{m\grave{a}x}$). L'àrea a mostrejar es defineix a partir de la següent equació: $A = 400 \times D_{m\grave{a}x}^2$, on $D_{m\grave{a}x}$ equival a la mida de la partícula màxima (en metres) i *A* és l'àrea a mostrejar en m². **(b)** La partícula més grollera ha de ser representativa de l'àrea a caracteritzar i del règim de crescudes (i.e. competència) actual. **(c)** Un cop delimitada l'àrea mínima a mostrejar, cal diferenciar el material superficial del material subsuperficial utilitzant, per exemple, pintura en esprai. Un cop pintada l'àrea, el material que ha quedat total o parcialment pintat es considera que forma part de la capa superficial. **(d)** S'extreu el material superficial dipositant-lo en algun recipient i etiquetant-lo (data, lloc, responsable mostreig i tipus de material). **(e)** Aquest material s'ha de garbellar seguint intervals granulomètrics estàndards ($\frac{1}{2} \phi_i$ segons escala de Wentworth, e.g. de 8 a 11,3 mm de 11,3 a 16 mm). **(f)** El sediment retingut en cadascun dels sedassos es pesa per tal de calcular-ne la seva freqüència. El garbellat es pot realitzar a camp mitjançant un gravelòmetre de camp o al laboratori amb una torre granulomètrica. Nota: les distribucions granulomètriques obtingudes amb el mètode d'àrea per pes s'han de convertir a valors equivalents de les dels transectes lineal i de les volumètriques (material subsuperficial) per tal de poder ser comparades.

- 7) MATERIAL SUBSUPERFICIAL: per a la caracterització d'aquest material s'aplicarà el mètode volumètric.
- 8) El mètode volumètric consisteix en extreure un volum determinat de material subsuperficial, garbellar-lo (sedassos amb distribució de llum $\frac{1}{2} \phi$), i pesar el sediment retingut en cadascun dels sedassos. **(a)** Abans d'aplicar aquest mètode es necessari remoure la cuirassa. L'extracció de la capa superficial es pot fer seguint el criteri explicat en el mètode d'àrea per pes. **(b)** Un cop extreta la cuirassa es buscarà la partícula més grollera en la capa subsuperficial ($D_{màx}$), es pesarà i s'annotarà la mida de l'eix b . **(c)** El volum de material a garbellar estarà en funció de la partícula màxima subsuperficial observada ($D_{màx}$) i el grau de precisió que es vulgui obtenir en la caracterització (veure text per detalls). **(d)** Les mostres es poden garbellar i pesar directament al camp. Les mostres que contenen material humit s'han de portar al laboratori i assecar-les abans de garbellar i pesar. Recordeu que aquestes mostres també s'han d'etiquetar. Veieu exemple al text.
- 9) En el cas de que **no hi hagi cuirassament** és necessari també obtenir una mostra volumètrica (veieu passos 8 i 9). La mostra correspondrà al conjunt del material del llit del riu i serà representativa de la unitat morfo-sedimentària a caracteritzar. Aquesta situació es típica en rius de sorres.

3.2. Sediment en suspensió

3.2.1. Definició

El transport de material fi es refereix al material de rentat subministrat pel sòl i sobretot per l'erosió dels marges del canal. Aquest material es transporta principalment en suspensió (Figura 16). La càrrega de sediment en suspensió és la taxa de moviment de les partícules de sediment transportades a causa de la turbulència del flux d'aigua dels rius i es mesura com el transport de les partícules sòlides suspeses entre la superfície del llit del riu i la superfície del flux d'aigua. El sediment en suspensió es mou aproximadament a la mateixa velocitat que el flux d'aigua que el transporta i només sedimenta quan la velocitat es redueix considerablement. Està compost per partícules minerals, restes vegetals provinents de medis aquàtics i terrestres, particularment fragments d'algues que creixen a les vores i en el llit del canal, i en rius amb circulació d'aigües lenta o rius que drenen llacs, i organismes microscòpics. La terbolesa de l'aigua reflexa la càrrega de material en suspensió, encara que depèn altament de la mida de les partícules suspeses; per un pes determinat de material, les partícules fines produeixen una terbolesa més alta.

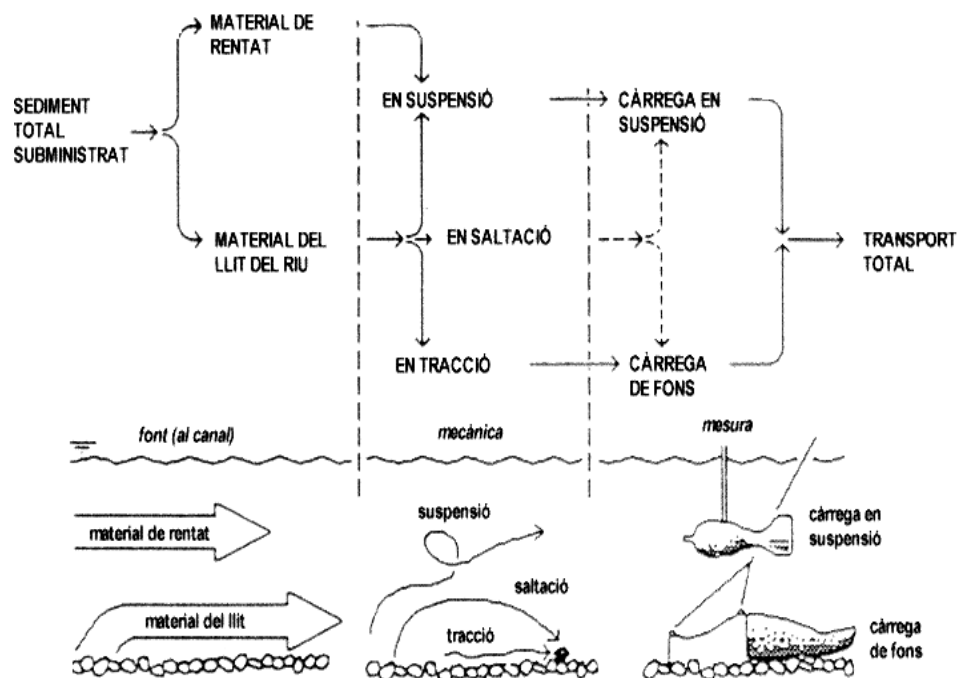


Figura 16. Fonts de sediment, modes de transport de sediment i tècniques de mesura

Les concentracions més elevades de sediment en suspensió es produeixen prop del llit del riu. Una variació considerable en les concentracions pot reflectir també canvis en la distribució de les partícules segons la mida. Les partícules més grosses tenen les concentracions més elevades prop del llit del riu, mentre que la concentració de la fracció argila roman molt més constant al llarg de tota la columna d'aigua.

3.2.2. Objectius de mesura i aplicacions

L'objectiu del mostreig i mesura del sediment en suspensió és obtenir informació de la càrrega fina transportada pels rius. Des d'un punt de vista científic la informació sobre transport de sediment és molt útil per a: a) càlcul de taxes d'erosió, b) avaluació de processos de denudació, c) descripció de la dinàmica fluvial, especialment durant les crescudes i d) avaluació d'impactes ambientals en conques de drenatge. Des d'un punt de vista tècnic, aquesta informació pot ser molt útil en el tractament de problemes relacionats amb l'erosió i deposició de sediments d'interès ecològic, social i econòmic com ara: a) explotacions d'àrids, b) aterrament i vida útil dels embassaments, c) deposició de material sòlid en xarxes urbanes de clavegueram, d) aportació de sediment als deltes i planes al·luvials i e) transport associat de contaminants.

3.3.3. Mostreig i mesura

Tots els passos que es detallen a continuació per a l'obtenció de mostres d'aigua i sediment en el camp s'han de realitzar amb la major cura possible, amb l'objectiu d'obtenir unes dades òptimes per al càlcul dels resultats posteriors. Les mostres d'aigua i sediment obtingudes en punts concrets dels sistemes fluvials intenten reproduir les condicions mitjanes de transport per a cabals determinats. És per això, i per les baixes concentracions que podem arribar a trobar, que els punts de mostreig han de ser seleccionats acuradament i el procés de mostreig realitzat amb les màximes garanties d'ordre i netedat instrumental, per evitar, així, possibles elements contaminants no desitjats.

En condicions poc turbulents la variabilitat vertical de la concentració de sediment en suspensió fa necessària la utilització de **mostrejadors d'integració en profunditat** per a poder obtenir, d'aquesta manera, una mostra de la concentració mitjana del sediment en suspensió. Han estat diversos els instruments de mesura dissenyats per al mostreig integrat en fondària del sediment en suspensió. Tres són les premisses bàsics que compleixen tots ells: a) la velocitat d'entrada de l'aigua en el mostrejador ha de ser la mateixa que al canal, b) han de produir un efecte d'obstacle mínim sobre el flux d'aigua i, c) el mostrejador ha d'estar orientat cap al flux de màxima velocitat tant en el pla vertical com en l'horitzontal. La família de mostrejadors d'integració en profunditat US DH permet l'entrada d'aigua i sediment per un broquet (i.e. segons la velocitat del flux l'entrada pot variar des de 0,32 a 0,48 i 0,64 mm de diàmetre) en un dipòsit col·lector (i.e. generalment una botella d'1 litre de capacitat. El DH48 (Figures 17a i 17b) és el mostrejador manual i disposa d'un mànec per a poder realitzar el mostreig en profunditat. Amb ell s'efectua un desplaçament continu, suau i seguint el mateix ritme des del llit del riu fins a la superfície del flux d'aigua, assegurant d'aquesta manera una recollida de mostra d'aigua i sediment en suspensió en tots els nivells de la columna d'aigua. En el cas dels instruments més grans i de més pes com el DH59 i el DH74 (Figura 17c) (el mostreig s'efectua des de ponts amb una grua i el desplaçament s'ha de fer també a la mateixa velocitat de manera que s'asseguri una recollida de mostra en tota la columna d'aigua).

És important etiquetar convenientment les mostres seguint un model d'etiquetatge similar al següent:

· Número de la mostra _____
· Lloc de mostreig _____
· Data i hora _____
· Responsable _____
· Altura de l'aigua _____
· Anàlisi visual _____
· Observacions _____

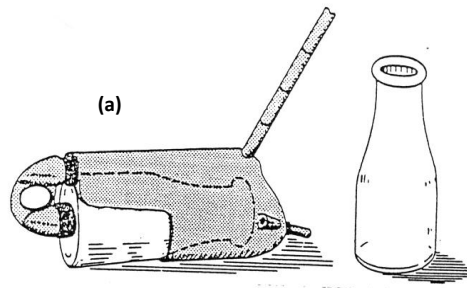


Figura 17 (a) Mostrejador de integració en profunditat US DH48 (dibuix de Sala i Gallart, 1989); (b) Mostrejador manual US DH48; (c) Mostrejador manual US DH74 (versió 30 kg) funcionant des de grua i acoblat a molinet OTT C-32.

Es sabut que la majoria del transport de sediment es produeix durant crescudes i, és per això, que cal centrar els esforços en aquests esdeveniments hidrològics. Sovint és difícil arribar al lloc de mostreig durant la crescuda i fins i tot, en ocasions, accedir-hi. S'han desenvolupat en aquest sentit una sèrie d'aparells que permeten la recollida de mostres automàticament sense ser necessària la presència de l'observador en el camp. Es tracta de **mostrejadors de nivell** (Figura 18a) i **mostrejadors automàtics de succió** (Figura 18b). En el primer dels casos es tracta d'aparells que recullen mostres durant la pujada de la crescuda en botelles situades a diferents nivells; es tracta d'aparells fabricats normalment de manera casolana utilitzats per primer cop per Schick (1967). Els mostrejadors automàtics de succió són programables, funcionen amb bateries internes o externes i permeten estendre la recollida de mostres a les dues branques de l'hidrograma, inclòs el pic de la crescuda.

Quan no es disposa d'un registre continu de concentracions, la càrrega sòlida en suspensió es pot calcular a partir de mostres discretes i utilitzant mètodes d'interpolació o de corba de freqüència de cabals, especialment si les fluctuacions en les concentracions no són gaire acusades. No obstant, cal apuntar que els càlculs fets a partir de mostreig regular però infreqüent (i.e. setmanal, mensual), habitualment comporten una infraestimació de la càrrega de sediments. Diversos estudis han mostrat que la caracterització detallada de les variacions temporals, sobretot durant períodes de crescudes, de les concentracions de sediment en suspensió és essencial per a obtenir una estimació acurada de la càrrega sòlida transportada pels rius. Aquest fet implica fer un mostreig d'alta freqüència, activitat que es porta a terme cada cop més sovint mitjançant **sensors de terbolesa** (Figura 19). Aquests sensors van habitualment acoblats a un data-logger que registra la terbolesa a intervals pre-determinats (e.g. la mesura es fa cada minut i es registren mitjanes cada 15 minuts). Els sensors de terbolesa són generalment de tipus òptic i d'ultrasons i ofereixen diferents rangs de mesura, habitualment des de 1 g/l fins a 300 g/l. Els registres de terbolesa s'han de calibrar amb mostres directes de sediment en suspensió obtingudes, ja sigui a través de mostreigs manuals i/o automàtics (Figura 20). Per tant, l'ús complementari de sensors de terbolesa i mostrejadors d'aigua i sediments és l'estratègia recomanada per a una correcta estimació de la càrrega fina en suspensió en medis fluvials (Walling i Collins, 2000).

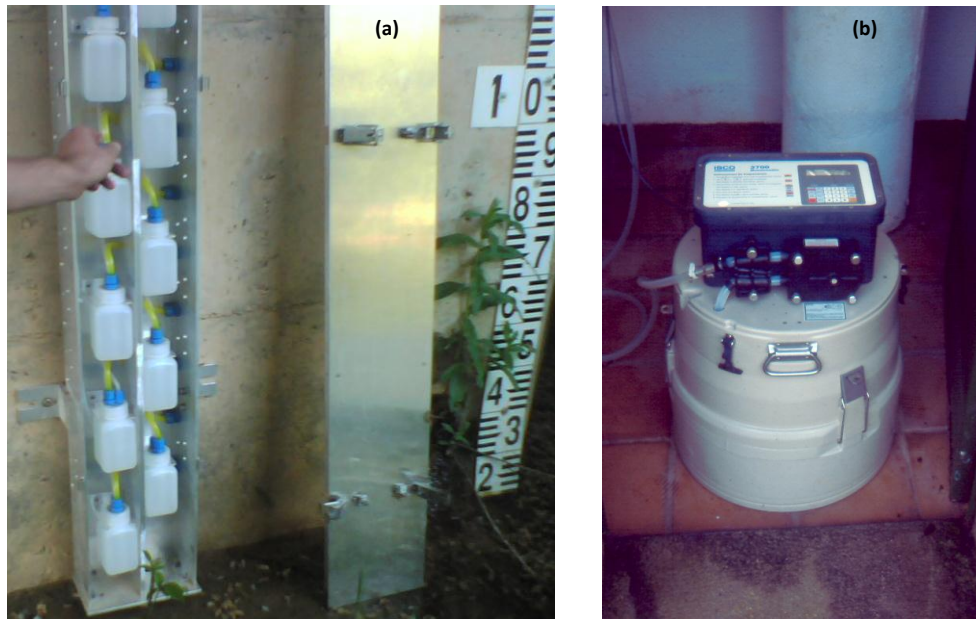


Figura 18. (a) Mostrejador de nivell i (b) Mostrejador automàtic tipus ISCO 3700



Figura 19. Instal·lació d'un sensor de terbolesa (riu Isàbena) òptic tipus MacVann amb escombreta de neteja

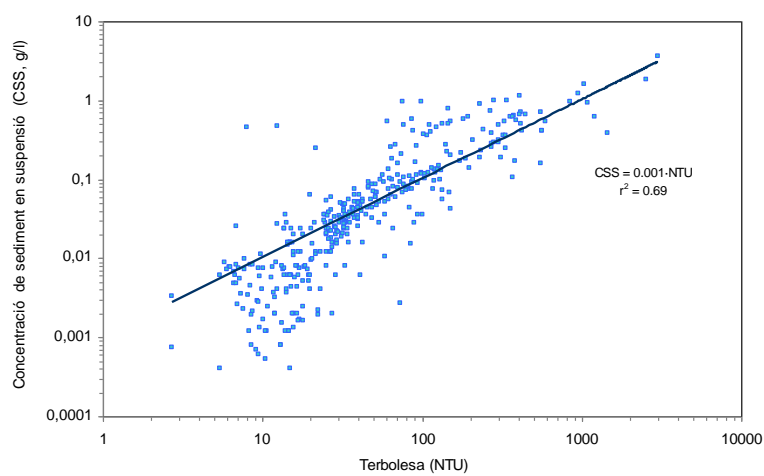


Figura 20. Calibració del sensor de terbolesa instal·lat a la secció d'Inglabaga, Ribera Salada. Es presenten un total de 367 valors obtinguts a través de mostreig directe i automàtic durant el període 2005-2008

Un cop es tenen les mostres d'aigua de riu en el laboratori, cal procedir a separar l'aigua del sediment en suspensió que conté. Per això, filtrem la mostra mitjançant un equip de filtrat. N'hi ha diferents tipus, però habitualment els equips es componen d'una bomba elèctrica, un tub de goma, un filtrador (Figura 21), filtres de cel·lulosa o fibra de vidre de $0,45\ \mu\text{m}$, i pinces. Com a pas previ al filtrat cal tarar els filtres a la balança de precisió. El procediment a seguir és el següent (veieu Figura 21):

1. Descargoleu el cos A del cos B
2. Col·loqueu el filtre, utilitzant les pinces, sobre la plataforma C
3. Enrosqueu de nou la part A i la part B
4. Un cop sacsejada la botella, aboqueu 250 ml d'aigua en el cos de filtrat A
5. Col·loqueu la tapadora D
6. Connecteu el filtrador a la bomba de buit
7. Engegueu la bomba, i espereu el temps necessari perquè tota l'aigua passi del cos del filtrador A a la part B
8. Un cop tota l'aigua s'hagi filtrat, procediu a descarregar la part A de la part B, i a retirar el filtre amb les pinces.
9. Col·loqueu el filtre en el portafiltres corresponent identificat amb el mateix número de la botella de la mostra.
10. Abans de filtrar de nou, netegeu el filtrador, si és possible, amb aigua destil·lada.

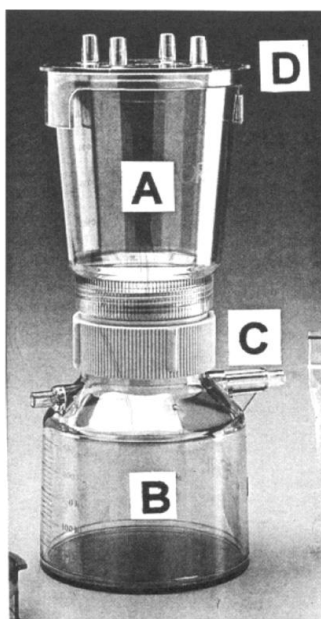


Figura 21. Equip de filtrat (Millipore, model Sterfil)

Un cop l'aigua estigui filtrada es calcularà el volum total filtrat (l). Els filtres s'assecaran (poden utilitzar una estufa a baixa temperatura) i es pesaran (amb precisió). És necessari recordar que els filtres s'han de pesar abans de ser utilitzats (pes filtre sec sense sediment). Un cop els filtres estiguin secs, el pes net dels filtres (pes filtre sec amb sediment - pes filtre sec sense sediment) permetrà determinar la concentració de sediment en suspensió (g/l).

3.3.4. Resultats

Les relacions entre cabal i concentracions de sediment en suspensió, definides a partir de treballs de camp i nombrosos assajos en el laboratori, són generalment positives, és a dir, a més cabal major concentració. Usualment, prenen la forma:

$$C_{ss} = Q^b$$

on C_{ss} és la concentració de Sediment en Suspensió (g/l), Q és el cabal, i a i b són constants derivades empíricament, sovint amb una clara relació amb les característiques de la generació de sediment de la conca corresponent. L'exponent b oscil·la entre 1 i 3 segons els autors. Hi ha, a més, una tendència pels valors de a i b a estar inversament relacionats, i es pot indicar de manera aproximada que els valors baixos de b i els alts de a estan associats amb rius que drenen conques de plana sobre sediments fins, i que valors alts de b i baixos de a corresponen a rius que transporten sediment provinent de conques de muntanya sobre roques més resistents. Un cop calibrats, els registres continus d'aigua i concentració de sediment en suspensió (i.e. terbolesa) permeten examinar la dinàmica temporal de la càrrega sòlida fina dels rius i la seva relació amb la hidrologia de la conca, a part de ser la base per al càlcul de l'exportació de sediments. La figura 22 mostra un exemple d'aquest tipus de registre obtingut amb un turbidímetre ANALITE NEP9530 de McVann Instruments (rang de mesura 0-3000 NTU³) acoblat a un data-logger CR-1000 de Campbell Scientific.

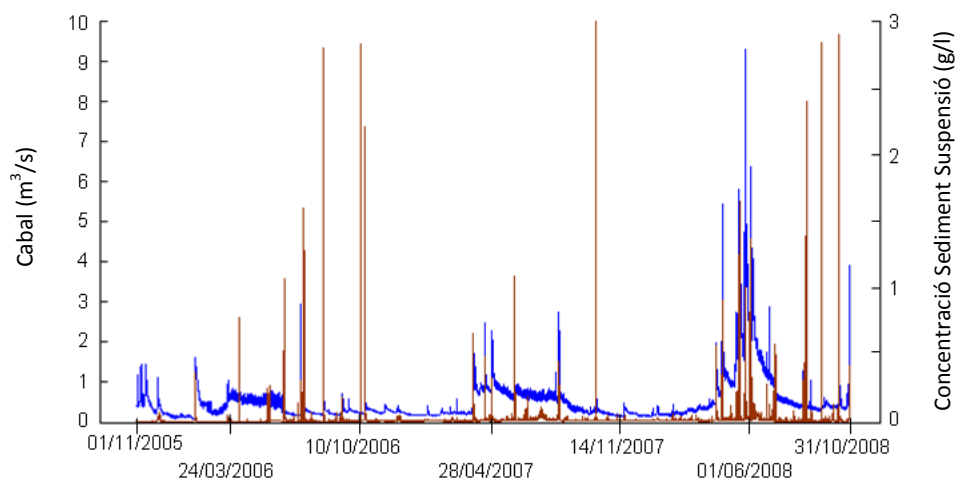


Figura 22. Dinàmica del sediment en suspensió en relació al cabal a l'estació d'Inglabaga a la Ribera Salada 2005-2008 (extret de Vericat i Batalla, 2010)

Les relacions estadístiques entre cabal i sediment en suspensió presenten generalment una dispersió important. Aquesta és una situació típica dels sistemes de transport de sediment relacionat amb possibles causes estacionals i fenòmens d'histèresi durant les crescudes. L'evolució de la concentració de sediment en suspensió i el cabal durant una crescuda no és paral·lela, sinó que pot estar distorsionada per un temps de retard relatiu entre el pic de la concentració i el pic del cabal (Figura 23), o a l'inrevés. Aquest fenomen es coneix com a histèresi:

a) Especialment en conques petites, el pic de la concentració de sediment precedeix sovint el pic del cabal, ja que la producció màxima de sediment es produeix en la primera part de la crescuda. Fins i tot, en alguns casos, la concentració de sediment comença a decreixre quan el cabal encara augmenta. Aquest fenomen es pot adscriure normalment a un exhauriment de les aportacions de sediment al canal, que gairebé sempre ha estat detectat en conques petites (i.e. histèresi horària).

³ Nefelometric Turbidity Units i.e. Unitats Nefelomètriques de Terbolesa, 1NTU \approx 1 g/l

b) En conques més grans, el pic de sediment es produeix més a prop o després del pic del cabal, ja que el sediment prové de fonts allunyades de la sortida de la conca i s'allibera al canal principal de manera més o menys continua al llarg de la crescuda (i.e. histèresi antihorària). L'efecte d'exhauriment del material disponible per al transport pot veure's incrementat a mesura que l'estació avança i es van produint crescudes més o menys importants.

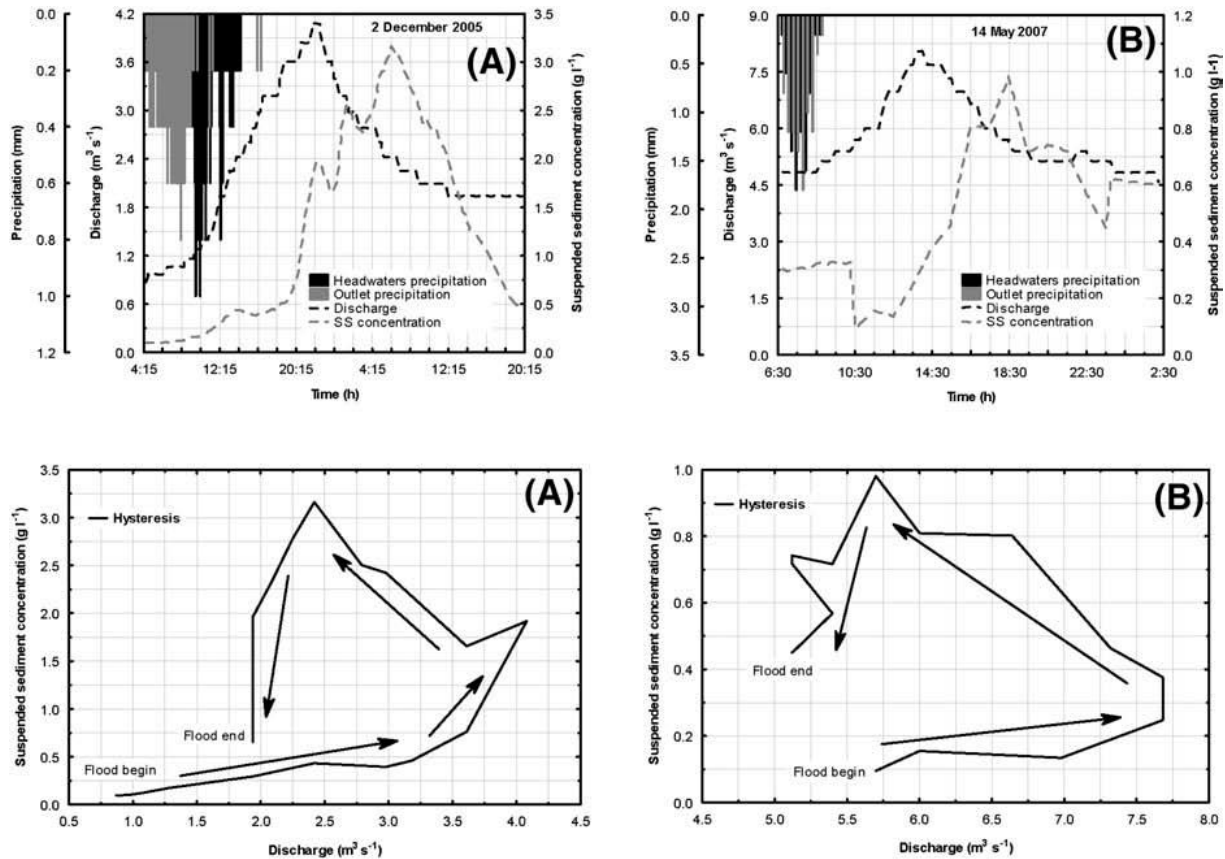


Figura 23. Exemples de d'histèresi antihorària en la resposta del sediment en suspensió respecte al cabal (A) 2 de desembre de 2005; (B) 14 de maig de 2007 (extret de López-Tarazón et al., 2009).

RECOMANACIONS BÀSIQUES PER AL MOSTREIG INTEGRAT DEL SEDIMENT EN SUSPENSÍO

- 1) Seleccioneu el **tipus de mostrejador** en funció de la mida del riu (e.g. DH48 per al mostreig manual directe a l'aigua, i DH59 i/o DH74 per al mostreig des de ponts).
- 2) Seleccioneu la **mida del broquet** d'entrada d'aigua en funció de la profunditat i la velocitat de l'aigua (veieu manual d'instrucció de cada aparell).
- 3) Netegeu la botella amb la mateixa aigua del riu abans d'agafar la mostra.
- 4) Si la secció és estreta, agafeu la mostra en el punt de major turbulència de la secció, per assegurar d'aquesta manera una major barreja del sediment a la columna d'aigua; si la secció és ampla, agafeu com a mínim mostres a tres verticals diferents, de cara a avaluar la variabilitat de la concentració i estimar-ne una mitjana.
- 5) **Verifiqueu** que la botella està plena (o gairebé); sinó és així, vol dir que el temps de mostreig o el broquet emprats no són adequats per cobrir tota la columna d'aigua i, per tant, es recomana repetir el mostreig.
- 6) Agafeu cada mostra amb repetició
- 7) **Etiqueteu** acuradament cada mostra seguint la codificació corresponent (vegeu suggeriment d'etiquetatge en aquesta mateixa secció).

3.3. Càrrega de fons

3.3.1. Definició

El transport de sediments grollers (sorres, graves, còdols) en un riu ocorre episòdicament durant moments d'alta energia (crescudes), en els quals els cabals circulants per la llera són suficientment competents per a mobilitzar i transportar els materials. S'anomena càrrega de fons al sediment groller transportat en contacte amb el llit del riu (Figura 16). Tot i que el percentatge de la càrrega de fons sobre el total de la càrrega sòlida en rius de graves tendeix a no sobrepassar el 20% (e.g. McPherson 1971, Dietrich i Dunne 1978), pot determinar i controlar la majoria dels processos morfo-sedimentaris que hi ocorren. La dinàmica conjunta d'aigua i sediments a les lleres fluvials controla, a més de la seva morfologia i les característiques sedimentàries, el fràgil equilibri entre els elements abiòtics (morfologia de la llera) i biòtics (hàbitat ictícola).

3.3.2. Objectius de mesura i aplicacions

El mostreig de la càrrega de fons permet controlar la fracció grollera (transportada en contacte amb la llera) del transport sòlid en rius (veieu figura 16). En molts de casos, degut a la complexitat associada al mostreig, es tendeix a no mesurar la càrrega de fons. Si el percentatge d'aquesta sobre el total de la càrrega sòlida és mínim la sobreestimació de la càrrega total sedimentària pot ser no rellevant. Tot i això, si l'objectiu es relacionar els canvis morfo-sedimentaris amb la magnitud i freqüència de les crescudes és necessari quantificar i caracteritzar convenientment la càrrega de fons. A més a més, la caracterització de la càrrega de fons (e.g. mida del sediment transportat, dispersió granulomètrica) permet aprofundir en la relació entre els processos biòtics i abiòtics que es donen al riu.

3.3.3. Mostreig i mesura

La descripció del mostreig i mesura de la càrrega de fons s'estructura en relació a la tècnica utilitzada. Es descriuen detalladament els tipus d'aparells (i instal·lacions) que són utilitzats per l'equip del CTFC-UdL: a) mostrejadors tipus Helley-Smith i b) trampes de càrrega de fons. També s'esmenten altres tècniques que poden ser utilitzades per a la mesura de la càrrega de fons però que han estat menys utilitzades pel nostre equip.

Les mesures de camp de càrrega de fons es basen en tècniques de medició i control com els **mostrejadors tipus Helley-Smith** (Helley i Smith, 1971). Aquests instruments presenten les següents característiques: boca d'entrada de 76 o 152 mm, capacitat de la bossa variable en relació al model (a partir de 15 kg), i llum de la xarxa de la bossa de 0,45 mm (Figura 24).

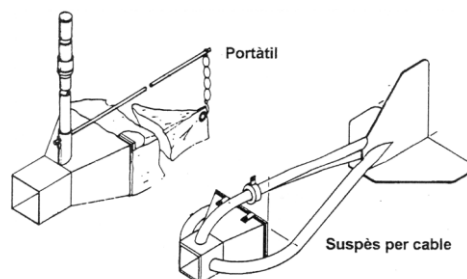


Figura 24. Mostrejador tipus Helley-Smith: Esquema d'un mostrejador de 76 mm portàtil i suspès per cable.

El mostrejador Helley-Smith va ser dissenyat per a treballar en rius de sorres amb fraccions de grava fina. Tal i com s'explica a l'apartat 3.3.4 té una fiabilitat del 100% per partícules amb un diàmetre entre 0,5 i 16 mm. Per partícules més grans de 16 mm la fiabilitat es redueix (veieu més detalls a l'apartat 3.3.4).

Hi ha diferents tipus de mostrejadors Helley-Smith. Segons la manera en que s'utilitzen es poden dividir en a) portàtils i b) suspesos per cable (Figura 24). L'ús d'un tipus o d'un altre vindrà determinat per les característiques del riu en el que s'ha de mostrejar (i també les condicions de cabal en el moment del mostreig). En el cas de rius en els que la profunditat permeti entrar-hi es podrà utilitzar el portàtil (Figura 25), mentre que en rius grans serà necessari utilitzar mostrejadors suspesos per cable (Figures 24 i 26). De la mateixa manera, els mostrejadors Helley-Smith es poden diferenciar per la mida de la boca d'entrada (Figura 27). Tal i com s'ha esmentat anteriorment, bàsicament hi ha mostrejadors de 76 i 152 mm. L'elecció de la mida de la boca del mostrejador estarà relacionada amb la mida del sediment del llit del riu i.e. la distribució granulomètrica del material. Cal tenir en compte que l'ús d'una obertura de 76 mm en rius de graves grolleres pot subestimar les taxes de càrrega de fons calculades a partir de les mostres obtingudes amb el mostrejador. En l'apartat de calibració (3.3.4) es presenta un resum dels treballs de calibració i comparació de mesures de càrrega de fons obtingudes amb diferent tipus de mostrejadors Helley-Smith. S'inclouen alguns criteris d'elecció que poden ser útils a l'hora de dissenyar protocols de mostreig específics.

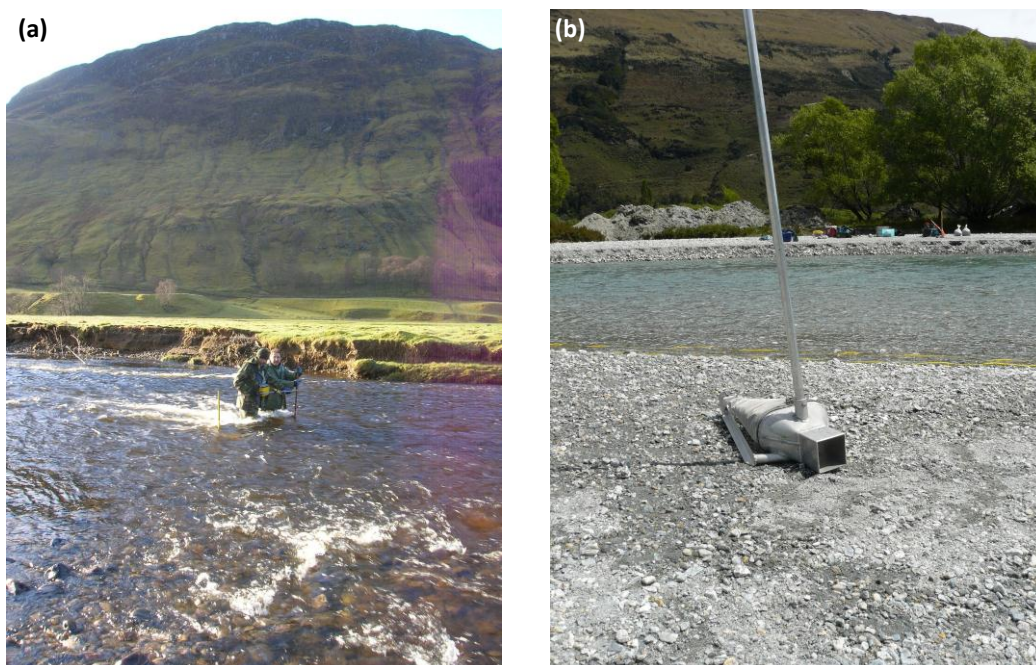


Figura 25. (a) Mostreig de càrrega de fons utilitzant un Helley-Smith portàtil en una secció experimental del riu Lyon (Escòcia). (b) Mostrejador tipus Helley-Smith portàtil al riu Rees (Nova Zelanda).

El mostreig de la càrrega de fons en una secció de riu determinada es realitzarà de manera integrada en amplada per obtenir, d'aquesta manera, una taxa de transport mitjana del conjunt de la secció. La variabilitat espacial i temporal de la càrrega de fons és elevada tal i com indiquen nombrosos estudis. Aquesta variabilitat és inherent al procés i ve condicionada pel subministrament i la disponibilitat de sediment, així com per la complexitat hidràulica de la secció de mostreig. Al mateix temps, aquests condicionants varien al llarg del temps, la qual cosa dificulta la determinació de models estadístics de càrrega de fons amb una certa fiabilitat (i constant all llarg del temps). És per això que és necessària l'obtenció d'elevades quantitats de mostres per tal d'obtenir promitjos que incloguin i suavitzin aquesta variabilitat.



Figura 26. Seqüència fotogràfica durant el mostreig de càrrega de fons: mostrejador de 76 mm de boca d'entrada suspès per cable a la secció de mostreig de Mora d'Ebre, riu Ebre.

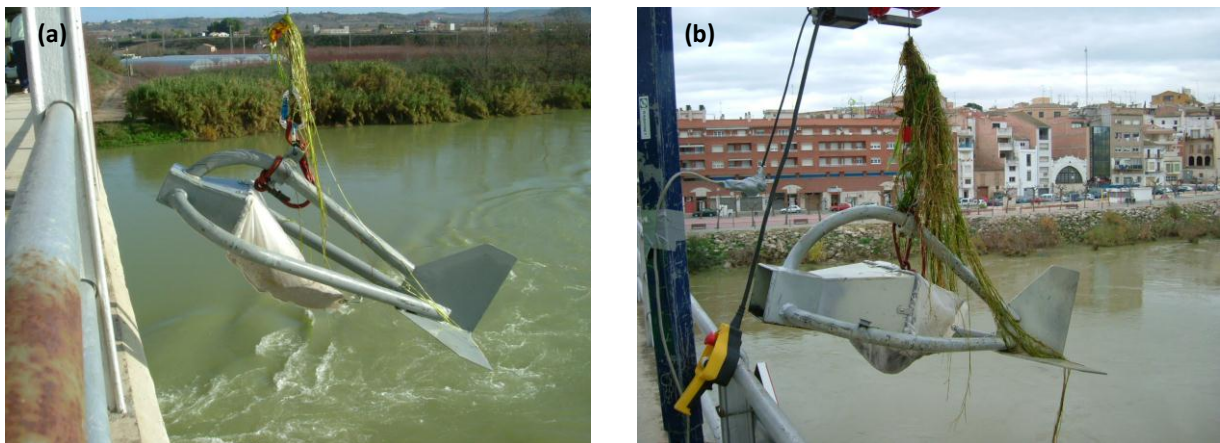


Figura 27. (a) Fotografia d'un mostrejador de 76 mm i (b) 152 mm de boca d'entrada suspès per cable a la secció de mostreig de Mora d'Ebre, riu Ebre. Ambdues fotografies mostren les bosses dels mostrejadors parcialment plenes de grava, però en cap cas sobrepassant el 50% de la seva capacitat.

Una de les opcions a l'hora de determinar el nombre mínim de mostres necessàries en una secció de mostreig és la identificació de 20 verticals o punts de mostreig distribuïts homogèniament al llarg de la secció (e.g. vint segons Leopold and Emmett, 1997). A partir de l'experiència de l'equip del CTFC-UdL, un altre criteri és l'obtenció de mostres en intervals no superiors al 20% del total de l'amplada de la secció objecte d'estudi. S'aconsella obtenir rèpliques per cada mostreig. L'obtenció de com a mínim dues mostres per cadascuna de les verticals facilitarà l'estimació de la variabilitat temporal. Tot i això, és necessari que les condicions hidràuliques entre mostres successives sigui el més similar possible. També és necessari que les condicions de cabal no varien durant el mostreig (íntegre) al llarg de la secció. Cal recordar que l'objectiu és obtenir una taxa mitjana per a unes condicions hidràuliques determinades. Si aquestes varien quan s'està fent el mostreig al llarg de la secció no s'assolirà

l'objectiu, ja que la taxa correspondrà a un promig sota condicions hidràuliques canviants. Caldrà tenir especial cura en alterar el mínim possible el llit del riu amb el mostrejador, especialment en llits amb materials fins fàcilment alterables, com les sorres i les graves fines. El temps de mostreig vindrà determinat pel flux de sediments. És important que la bossa no s'ompli, i en cap cas hauria de superar el 50% de la seva capacitat (Figura 27). Si la bossa s'omple més del 50% es redueix l'eficiència del mostrejador (Habersack i Laronne, 2001).

Les mostres es dipositaran en bosses de plàstic, identificades (etiquetades) amb la següent informació: a) la data i hora, b) inicials del responsable mostreig, c) el lloc, d) el riu, e) el lloc de mostratge, i f) el temps del mostreig, i g) l'altura d'aigua en el punt de mostreig (si es possible). Les mostres es secaran i pesaran per tal d'obtenir el seu pes sec. Posteriorment es garbellaran seguint els mètodes explicats en l'apartat de granulometries (mostres volumètriques). En aquest cas també es mesurarà l'eix *b* de la partícula més grollera de cada mostra. Aquesta mesura és molt important per tal d'estimar la competència del riu durant el període de mostreig. De la mateixa manera, aquesta valors poden ajudar a calibrar equacions que s'utilitzen freqüentment per al càlcul teòric de l'inici de moviment. Un cop obtingut el pes, es pot extreure la taxa de càrrega de fons seguint la fórmula:

$$i_{b-i} = \text{pes mostra} / (w_{HS} \times t)$$

on i_{b-i} és la taxa de càrrega de fons per al període *i* (en kg/sm), w_{HS} és l'amplada de l'obertura del mostrejador Helley-Smith (m), i *t* és el temps de mostreig durant el període *i* (segons).

Les **trampes de càrrega de fons** (Figura 28) registren la pressió que l'aigua i el sediment exerceixen de manera contínua sobre un calaix d'acer inoxidable. L'equip del CTFC-UdL ha dissenyat i calibrat una estació de mesura del transport sòlid que consta de tres trampes. Es tracta de trampes tipus Birbeck (per més detalls veieu Reid et al., 1980; Reid i Laronne, 1995; Garcia et al., 2000). A sota del calaix d'acer hi ha un coixí ple d'aigua connectat a un sensor de pressió (Figura 29). Mitjançant aquests dispositius s'obté un valor de pressió en mil·libars (mbar) que es registra en un data-logger seguint una freqüència determinada (segons programació). En el cas de que no hi hagi transport de càrrega de fons, els valors de pressió corresponen directament al pes de la columna d'aigua circulant per sobre de les trampes. Quan s'inicia el transport, el sediment cau per l'obertura de les trampes (Figura 28), i el sensor registra valors de pressió que inclouen el pes de l'aigua i el pes del sediment. D'aquesta manera, és necessari **calibrar** els valors de pressió per tal de poder extreure el valor associat a la pressió de l'aigua i transformar el valor restant a pes de sediment (i.e. kg), i així poder calcular la taxa de càrrega de fons (pes/temps; veieu calibració a l'apartat 3.3.4). L'obertura de les trampes pot ser variable. S'aconsella que la longitud de l'obertura sigui suficient per a capturar partícules que potencialment puguin ser transportades en saltació. L'amplada de l'obertura ha d'estar relacionada amb la mida de les partícules més grolleres de la llera (D_{max}). Tot i això, si l'objectiu es mostrejar una determinada fracció granulomètrica, es pot utilitzar una obertura menor. En el cas de la Ribera Salada, l'amplada de l'obertura de les trampes de l'estació d'Inglabaga és variable.

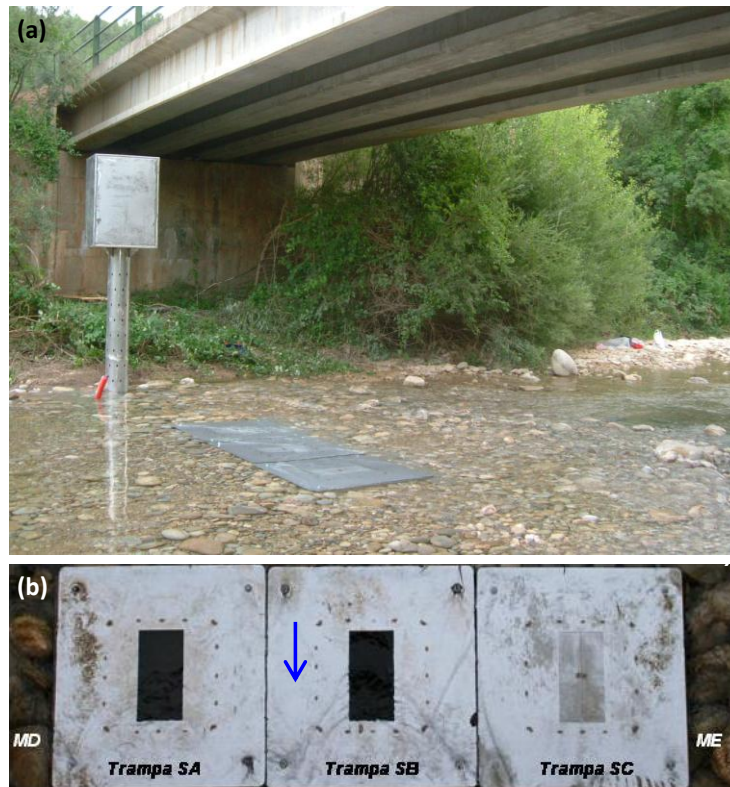


Figura 28. Vista de les trampes de càrrega de fons de la secció d'Inglabaga, Ribera Salada. (a) Vista general amb les trampes tancades. El data-logger està ubicat dintre de la caixa d'acer, mentre que al tub hi ha ubicats els sensors de turbulència, temperatura i pressió. (b) Vista en planta de les tres trampes (dues d'elles obertes i una tancada). ME indica marge esquerre mentre MD marge dret. La fletxa indica la direcció del flux.

Un cop les trampes estan plenes és necessari fer-ne el buidat i el manteniment. Pel que fa al buidat és important extreure el sediment per capes. L'altura de les capes es pot determinar seguint diverses consideracions. La primera correspon a la identificació dels períodes pels quals volem obtenir la caracterització granulomètrica. En aquest cas serà necessari determinar el criteri de selecció (delimitació) de les capes. Un criteri pot ser temporal (e.g. una capa per cada interval de 30 minuts de la riuada). En aquest cas, a mode d'exemple, si la riuada es de 3 hores es determinaran 6 capes que seran caracteritzades granulomètricament (de manera independentment). Un altre criteri pot estar relacionat amb la intensitat del transport (flux) de sediment. Es poden buscar els períodes on hi ha canvis substancials en la magnitud de les taxes de càrrega de fons i delimitar-ne així les capes. Per últim, el criteri pot venir donat per la posició de les capes en el conjunt de la riuada. En aquest cas pot ser interessant obtenir una capa que englobi tot el període d'ascens de l'hidrogràfic de crescuda, una capa que estigui relacionada amb el pic i una última amb el conjunt del sediment transportat durant la recessió de la crescuda. L'altura de cada capa es pot estimar de la següent manera:

$$d = \left[\left(\frac{i_b}{\rho_s} \times p \right) / A_{\text{trampa}} \right] \times t$$

on d és l'altura de la capa a extreure (en metres), i_b és la taxa de càrrega de fons en kg/s, ρ_s és la densitat del sediment en pes sec (kg/m^3), p és la porositat del sediment (adimensional, 1 indica sense porositat), A_{trampa} és l'àrea del calaix d'acer en m^2 (l'àrea de la trampa on queda retintut el sediment), i t és el temps de l'interval per al que es vol extreure la capa de sediments (en segons).

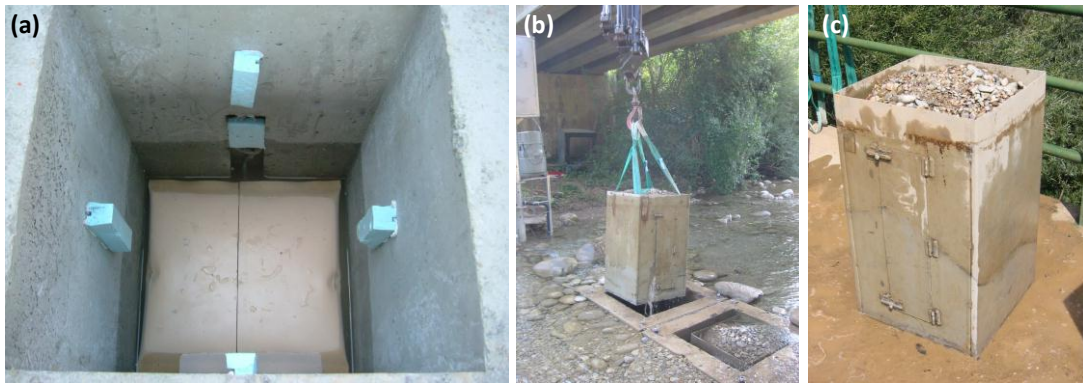


Figura 29. Vista de les parts específiques de les trapes de càrrega de fons de la secció d'Inglabaga, Ribera Salada. (a) Vista interior del calaix de formigó en la que s'observa el coixí ple d'aigua que està connectat a un sensor de pressió. (b) Moment d'extracció d'una de les trapes després d'una crescuda. (c) Calaix d'acer d'una de les trapes ple de sediment (després d'una crescuda).

Cal tenir en compte que l'extracció de les capes es fa de manera inversa a la crescuda. La primera de les capes que s'extreu correspon a l'últim dels episodis de transport. Les caixes poden tenir a més una porta lateral que permet la visió de les diferents capes de sediment (Figura 30). Cadascuna de les capes es garbellarà per tal d'extreure'n la distribució granulomètrica i la porositat. En aquest cas també es mesurarà l'eix b de la partícula més grollera trobada a cada capa. Tal i com s'ha explicat anteriorment, aquesta mesura és molt important per tal d'estimar la competència del riu durant el període de mostreig. Per a l'obtenció de la distribució granulomètrica es seguiran els passos descrits a la secció de granulometries (i.e. mètode volum per pes). És necessari assecar les mostres abans de garbellar-les. Per aquest motiu, un cop identificada l'altura de la capa se'n ha d'extreure el sediment amb cura i guardar-lo en bosses de plàstic resistent. És necessari etiquetar cadascuna de les mostres, indicant: a) la data, b) inicials responsable mostreig, c) el lloc, d) el riu i e) la capa extreta (seguint algun criteri de nomenclatura descrit prèviament a la llibreta de camp).



Figura 30. Calaix d'acer d'una de les trapes de l'estació experimental d'Inglabaga, Ribera Salada; a la foto es veu la porta lateral que permet observar l'estratificació del sediment a l'interior del calaix.

Les tècniques i mètodes descrits fins ara permeten l'obtenció de taxes de transport de sediment a partir de mostres de càrrega de fons. Tot i això, hi ha mètodes indirectes que també poden ser utilitzats per a estimar el transport sòlid (groller). Un d'aquests mètodes és l'anomenat **mètode morfològic**. Aquest mètode es basa en l'aixecament topogràfic d'un tram determinat de riu abans i després d'episodis de transport de sediment. Mitjançant la comparació dels aixecaments es pot obtenir el canvi topogràfic resultant. Aquest càlcul permet obtenir la superfície que s'ha erosionat i la superfície que s'ha sedimentat durant el període entre aixecaments. El valor net de canvi pot ser traslladat entre seccions i així estimar el volum net resultant al tram d'estudi. Aquest volum és un indicador de la dinàmica erosiva o sedimentària durant l'episodi. En el cas de que les observacions topogràfiques permetin l'elaboració d'un model digital del terreny (MDT) no és necessari interpolar els valors de canvi d'àrea entre seccions. Aquest exercici proporciona el canvi volumètric, el volum erosionat i el volum sedimentat en la totalitat del tram durant el període de temps entre aixecaments topogràfics (Figura 31). Aquests càlculs en cap cas proporcionen directament la taxa de càrrega de fons (pes/temps) mitjana de l'episodi. L'aplicació integrada d'aquest mètode requereix l'estimació de l'entrada o de la sortida de sediment del sistema (àrea d'estudi). L'estimació d'un d'aquests volums permet resoldre la simplificació (una dimensió) de l'equació de continuïtat del sediment i així tancar-ne el balanç de sediment:

$$\Delta V = V_i - V_o$$

on ΔV representa el volum net de canvi en l'àrea d'estudi, V_i indica l'entrada de sediment groller a l'àrea d'estudi i V_o indica la sortida de sediment.

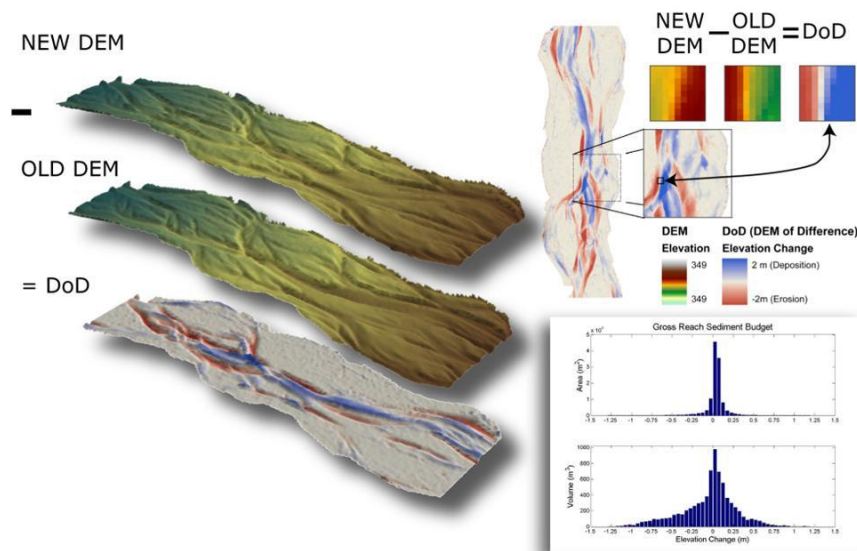


Figura 31. Exemple de càlcul de volums erosionats i sedimentats en un riu trenat a Escòcia (Riu Feshie). L'abreviació DEM es refereix a Model Digital del Terreny, mentre que DoD significa el càlcul resultant de restar del MDT més recent del model més antic (abans de l'episodi de mobilitat). Els valors amb vermell indiquen erosió mentre que els blaus signifiquen sedimentació. Els histogrames presenten la distribució dels canvis en àrea i en volum (dreta sedimentació, esquerra erosió). Exemple cortesia de Joe Wheaton.

La combinació entre la informació que s'obté a partir de **traçadors** i l'estimació del canvi net volumètric en un tram d'estudi després d'un episodi de mobilitat permet obtenir taxes de càrrega de fons (mitjanes durant l'episodi). Quan es parla de traçadors en el camp de la geomorfologia fluvial i, específicament en els estudis de càrrega de fons, es refereix a partícules grolleres (i.e. graves) que es controlen amb l'objectiu de seguir la seva trajectòria

durant episodis de competència. Hi ha diferents tècniques per a traçar sediments (Figura 32): a) radio, b) pintura, c) peces magnètiques. De manera general l'objectiu és conèixer la posició del traçador abans de l'episodi i trobar-lo i ubicar-ne la nova posició després del transport. Aquesta informació permet el càlcul de la distància i també la trajectòria del traçador.



Figura 32. (a) Exemple de traçador amb sistema de radio (RFID). Cada traçador disposa d'un identificador en el que es registren les característiques (incloent codi) de la partícula. Aquests transmissors emeten un senyal. Es poden localitzar mitjançant una antena i un sistema bàsic de lectura RFID. Es poden trobar tot i estar soterrats, la qual cosa facilita l'estudi de la seva dinàmica i.e. trajectòria i posició dintre de l'estructura sedimentària. (b) Traçadors pintats ubicats al tram baix del riu Ebre. Les partícules es mesuren (eixos) i pinten. Després de les crescudes es busquen visualment. (c) Traçadors magnètics. Cadascun dels traçadors té un tros de ferro de dos centímetres al seu interior (veieu cercle negre a cadascuna de les partícules). Es localitzen amb un detector de metalls. Es poden trobar tot i estar soterrats, la qual cosa facilita l'estudi de la seva dinàmica.

El promig de la taxa de càrrega de fons durant un episodi de mobilitat i es pot calcular com:

$$Q_{b-i} = V_e(L_t / L_r) / t$$

on Q_{b-i} és la taxa de càrrega de fons (m^3/s), V_e és el volum net de canvi en el tram d'estudi (m^3) durant el període i , L_t és el promig de la longitud de desplaçament dels traçadors (en metres), L_r és la distancia del tram d'estudi (en metres), i t és el temps durant el que hi ha mobilitat en el transcurs de l'episodi i (en segons).

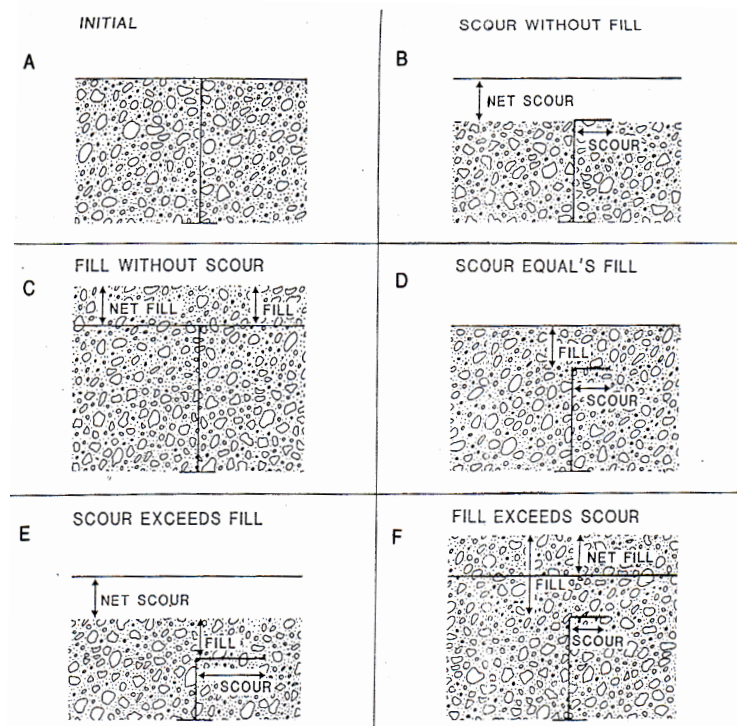
El volum de canvi en el tram d'estudi es pot obtenir mitjançant la comparació de models digitals del terreny o seccions de control tal i com s'ha explicat anteriorment. En el cas de que no es disposi de dades topogràfiques es pot obtenir mitjançant cadenes d'erosió (Leopold et al., 1964 i 1966). Les cadenes d'erosió (Figura 33) permeten l'estudi dels processos erosius i sedimentaris en seccions de control. Mitjançant la instal·lació de diverses cadenes al llarg d'una secció experimental es pot extreure el paquet de material erosionat i/o sedimentat. Els valors es poden extrapolar pel conjunt de l'àrea activa (i.e. secció que ha estat mobilitzada). Per últim és necessari extrapolar els valors entre seccions de control per tal d'obtenir el volum net de canvi al conjunt del tram d'estudi. El càlcul del paquet de material erosionat i/o sedimentat es realitza en base al canvi de la longitud de la cadena exposada i al material que es trobi sedimentat a sobre de la cadena. Aquestes dues situacions donen diferents escenaris que s'il·lustren a la figura 34. En el cas de disposar de dades suficients per a poder fer un càlcul de la longitud de desplaçament dels traçadors per fraccions (f_i) es pot calcular Q_{b-i} per a diferents mides de partícula (Q_{b-i-f_i}). En aquest cas s'haurà de suposar que les fraccions granulomètriques de la càrrega de fons segueixen les mateixes proporcions que les del material del llit del riu. La suma dels càlculs per a totes les fraccions donaria la taxa de càrrega de fons mitjana per al conjunt de l'episodi. Aquests mètodes indirectes permeten l'obtenció de taxes mitjanes de càrrega de fons però no proporcionen informació sobre les característiques granulomètriques del transport sòlid. Per últim cal destacar que hi ha altres tècniques indirectes que no s'han descrit en aquest document i que s'utilitzen per a la control i mesura

de la càrrega de fons. En aquest cas cal anotar l'ús de **mètodes acústics** i també de **vídeo** per a l'estimació de taxes de càrrega de fons durant episodis de mobilitat.



Figura 33. (a) Instal·lació d'una cadena d'erosió al tram baix del riu Ebre. (b) i (c) Cadena d'erosió al tram baix del riu Ebre un cop instal·lada. Els canvis en la longitud de la cadena exposada i/o la presència de material a sobre del tram de cadena exposada abans d'episodis de crecuda permet el càlcul puntual del material erosionat i/o sedimentat (Figura 34). La instal·lació de diverses cadenes en diferents seccions de control permet el càlcul (promig) del gruix de material erosionat i/o sedimentat. L'extrapolació d'aquest valor al conjunt de l'àrea activa de cadascuna de les seccions permet calcular l'àrea erosionada i/o sedimentada. Aquests valors es poden interpolar entre seccions per tal d'extreure el volum de canvi en el tram d'estudi.

Figura 34. (A) Situació inicial: la cadena no està exposada. Possibles escenaris posteriors a l'episodi d'erosió i/o sedimentació: (B) la fletxa indica el gruix de sediments erosionats. Aquesta longitud ha de ser igual a la de la cadena exposada. (C) Procés de sedimentació. Les fletxes indiquen el paquet de material sedimentat. (D) Erosió i sedimentació: la longitud de la cadena exposada indica el gruix de l'erosió mentre que des del punt en el que es troba la cadena fins a la superfície correspon al material sedimentat. En aquest cas hi ha equilibri. (E) Procés d'erosió dominant. Tot i haver sedimentació la longitud exposada de la cadena és superior al paquet de material sedimentat. (F) Procés de sedimentació dominant. Tot i haver erosió, la longitud del paquet de material sedimentat a sobre de la cadena és superior a la longitud de la cadena exposada. Si les cadenes estan soterrades es necessari l'ús d'un detector de metalls per a poder localitzar-les. Veure exemples reals a la figura 33. Esquemes de Hassan (1990).



3.3.4. Calibració

En el cas dels **mostrejadors Helley-Smith** no és necessari realitzar cap tipus de calibració estrictament parlant. Ara bé, degut a que molts d'aquests mostrejadors s'utilitzen sense tenir en compte les seves limitacions, moltes mostres porten associades incerteses de mostreig que poden generar errors de càlcul considerables. Cal destacar tres estudis que presenten calibracions i comparacions de camp per aquest tipus de mostrejadors: a) Emmett (1980), presenta la primera calibració de camp d'un mostrejador Helley-Smith de 76 mm d'obertura (de boca); Sterling i Church (2002), presenten la comparació de taxes obtingudes amb un mostrejador Helley-Smith de 76 mm i una trampa de càrrega de fons; i Vericat et al. (2006) presenten la comparació dels resultats obtinguts amb mostres parells utilitzant dos mostrejadors Helley-Smith de 76 mm i 152 mm. En aquest darrer estudi els autors identifiquen dos possibles font d'error durant el mostreig de la càrrega de fons referits a a) l'obstrucció de la boca del mostrejador per part de partícules immòbils i b) l'efecte de la rugositat de les partícules sobre el posicionament del mostrejador al llit del riu (Figura 35). Aquestes fonts d'error justifiquen l'estudi del mostrejador a utilitzar abans de realitzar el mostreig. Tal i com es detallarà a continuació és important adaptar la boca d'entrada del mostrejador a les característiques sedimentològiques del llit del riu objecte d'estudi. En resum, aquestes calibracions indiquen que l'eficiència del mostrejador original (76 mm) és l'adequada per a rius de sorres i graves i per a partícules entre 0,5 i 16 mm (eix b). Si l'objectiu és mostrejar la càrrega de fons en rius de graves és necessari adequar la boca del mostrejador a la mida del material del llit del riu i.e. la mida del material que potencialment podrà ser mobilitzat; de manera general es considera que la boca del mostrejador ha de ser aproximadament 5 cops l'eix de major longitud (eix a, veure Figura 9) de la partícula més grollera ($D_{m\grave{a}x}$) que potencialment pot ser mobilitzada (Vericat et al., 2006). S'aconsella revisar els treballs esmentats per tal d'adequar el mostreig a les característiques sedimentàries del medi a estudiar.

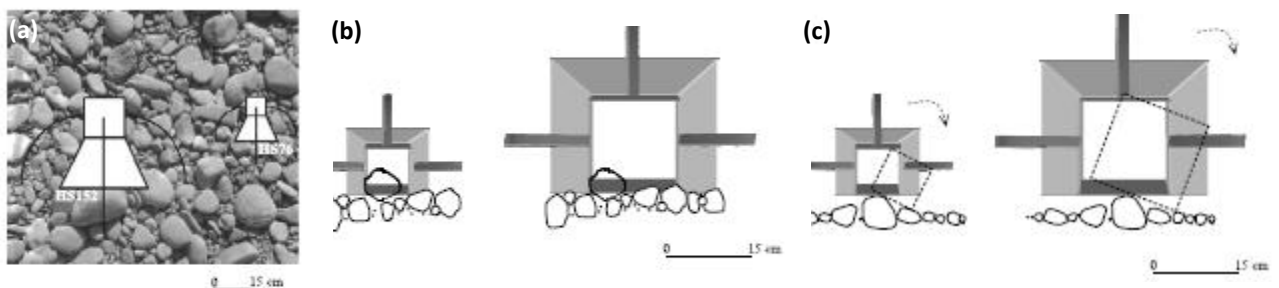


Figura 35. (a) Fotografia en planta d'una secció de riu en la que s'ubiquen dos mostrejadors Helley-Smith, un de 76 i un altre de 152 mm d'obertura de boca. Fonts d'error: (b) obstrucció de la boca dels mostrejadors per partícules immòbil; i (c) efecte de la rugositat de les partícules sobre el posicionament del mostrejador al llit del riu (font: Vericat et al., 2006).

Pel que fa a les **trampes de càrrega** de fons és necessari realitzar una calibració de les instal·lacions. Un cop el cabal assoleix el llindar d'inici de moviment les trampes capturen sediment. En aquest instant, el valor de pressió del coixí correspon a la suma de la pressió que exerceix l'aigua més la pressió del sediment. L'objectiu específic de la calibració de les trampes de càrrega de fons és extreure el valor associat a la pressió de l'aigua i transformar el valor restant a pes de sediment (i.e. kg). Per al càlcul de la pressió que exerceix l'aigua s'utilitza un sensor de pressió que registra de manera contínua l'altura d'aigua en referència a un *datum* conegut (Figura 28). Així, restant el valor de la pressió dels coixins i el valor mesurat pel sensor de nivell s'obté el valor net de pressió, que és la pressió que el sediment exerceix sobre cadascun dels coixins o trampes. L'objectiu de la calibració és, doncs, la transformació de les mesures de pressió (mbar) a pes (kg). La calibració es fa en condicions de no mobilitat.

S'introdueix un pes conegut a l'interior de les trampes i es realitzen lectures consecutives fins a que s'estabilitza el senyal. El volum de material introduït a les trampes ha de ser variable (i conegut). Un cop comprovat que la relació segueix una tendència i ajust robusts es buiden les trampes i es tornen a deixar preparades per a mostrejar durant la propera crescuda. S'aconsella realitzar calibracions periòdiques (i.e. després esdeveniments) per tal de re-ajustar la recta de calibració a cadascuna de les condicions (aigua en el coixí, desgast dels tubs, etc.). Les trampes es calibren de manera independent. Els ajustos de les calibracions tendeixen a ser molt alts degut a la linearitat de la resposta (e.g. Figura 36).

Un cop obtingut el pes associat a cada valor net de pressió es pot calcular la taxa de càrrega de fons com:

$$i_{b-i} = \text{pes} / (w_{\text{trampa}} \times t)$$

on i_{b-i} és la taxa de càrrega de fons per al període i (en kg/sm), w_{trampa} és l'amplada de l'obertura de la trampa (m), i t és el temps de mostreig durant el període i (en segons).

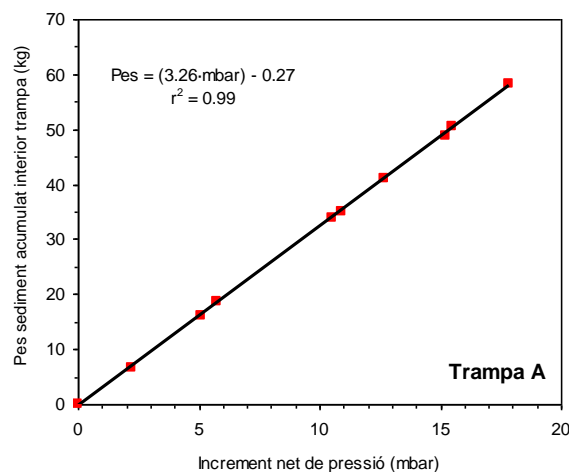


Figura 36. Calibració d'una de les trampes de càrrega de fons de l'estació experimental d'Inglabaga a la Ribera Salada. La figura 29 mostra la Trampa A.

3.3.5. Resultats

Tot i que la variabilitat espacial i temporal de les taxes de càrrega de fons és elevada, degut a que en la majoria dels casos no es disposa d'un registre continu de transport sòlid, s'intenta establir relacions estadístiques entre cabal (o alguna variable hidràulica e.g. tensió de tall) i taxa de càrrega de fons per al càlcul de la càrrega sòlida grollera. Aquestes relacions tendeixen a tenir una elevada dispersió, fet que reflecteix l'alta variabilitat del procés (Figura 37). Un dels mètodes utilitzats per aquest càlcul es el mètode la corba de freqüència de cabals (Walling, 1984). Aquest mètode també s'utilitza freqüentment en el cas del sediment en suspensió i consisteix en associar una taxa de càrrega de fons a cada valor de cabal competent (utilitzant la relació estadística resultant e.g. Figura 37) i multiplicar aquest cabal per la seva freqüència durant el període de temps objecte d'estudi. S'aconsella revisar la publicació original on es presenta i s'explica el mètode així com també algunes de les publicacions dels membres del CTFC-UdL en les que s'ha aplicat aquest mètode (veure llista de treballs al final del quadern).

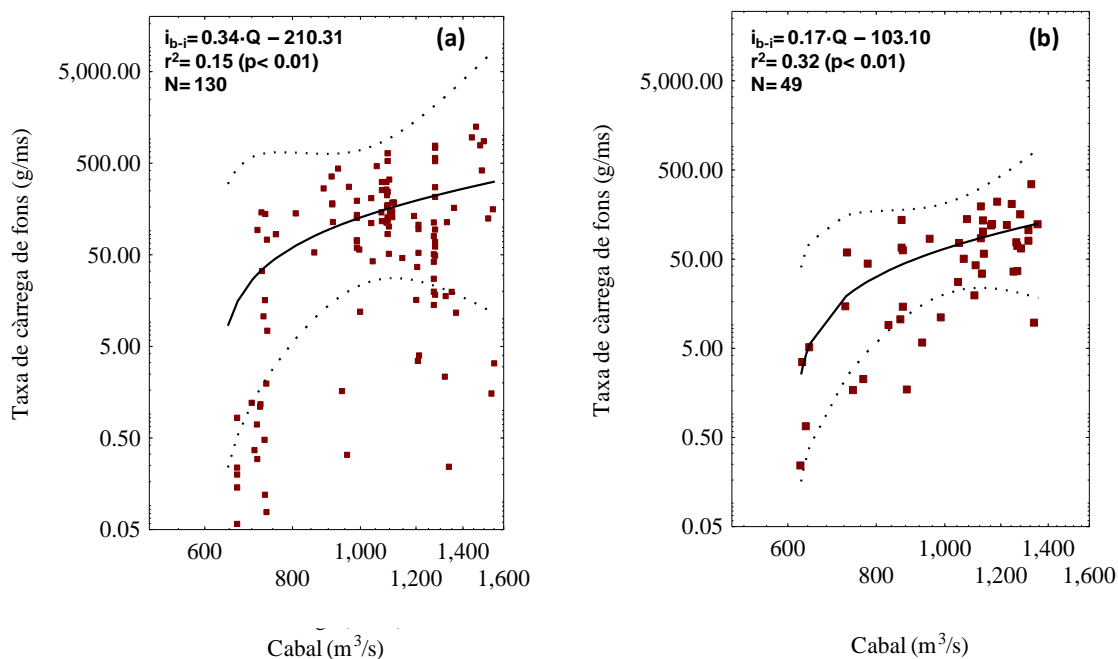


Figura 37. Relacions estadístiques entre cabal (Q) i taxa de càrrega de fons (i_b-i) a la secció de mostreig de Mora d'Ebre del tram baix del riu Ebre per al conjunt de l'any hidrològic (a) 2002-2003 i (b) 2003-2004 (dades publicades a Vericat i Batalla, 2006). Es presenta la relació estadística i el grau d'ajust. Els embolcalls defineixen els intervals de confiança de la relació estadística.

Una de les avantatges de les trapes de càrrega de fons es l'obtenció de registres continus de transport sòlid. La única limitació és que no registren un cop estan plenes. Aquesta situació pot ocórrer en el cas de crescudes llargues o en aquelles en les que el transport sòlid és elevat en relació al volum de les trapes. La figura 38 mostra un exemple de registre continu per a un període de tres anys a les trapes de l'estació de transport de sediments d'Inglabaga, a la conca experimental de la Ribera Salada. També s'ha afegit el sedimentograma resultant del registre de terbolesa (veieu secció de sediment en suspensió per a més detalls) i el cabal. Es tracta de dades molt poc freqüents i que alhora són molt interessants per a quantificar processos sedimentaris en conques de drenatge.

Els mètodes directes permeten extreure les característiques granulomètriques de la càrrega de fons. La variabilitat granulomètrica de les mostres de càrrega de fons es pot comparar amb les distribucions granulomètriques del material superficial i subsuperficial del llit del riu (e.g. Figura 39). Aquesta comparació possibilita estudiar del paper de cadascun d'aquests dipòsits en el transport sòlid, i relacionar-los amb la magnitud de les taxes. Aquesta comparació no es pot fer en el cas que s'utilitzin mètodes indirectes.

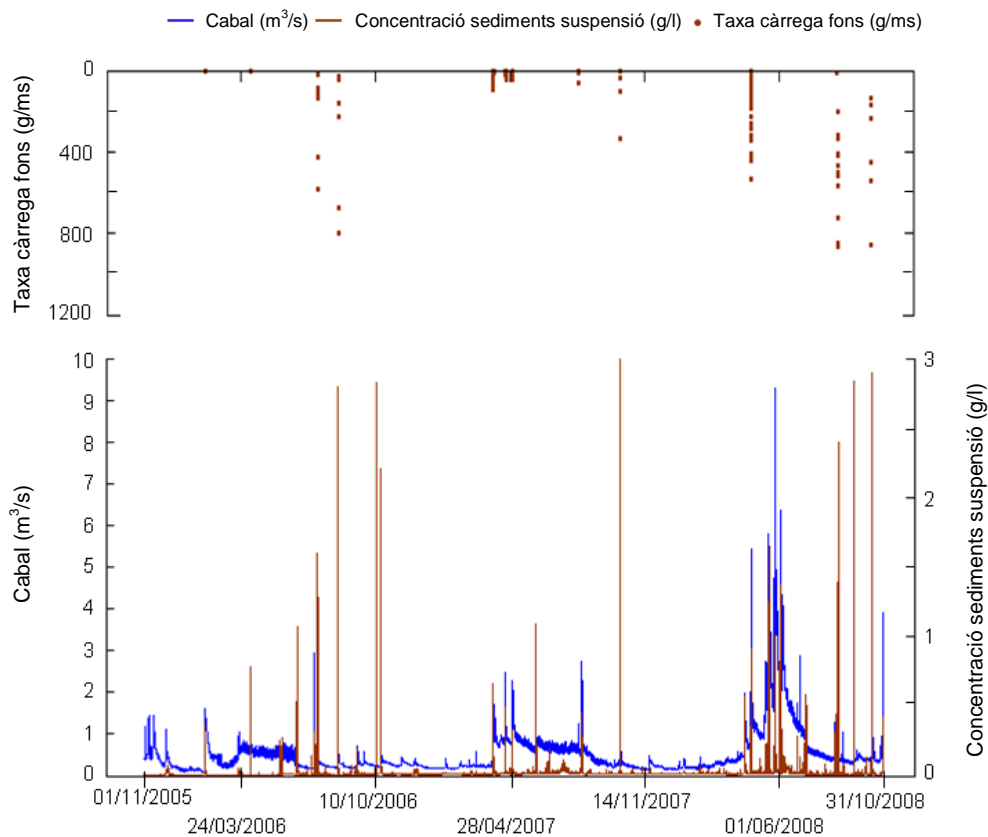


Figura 38. Registre continu de cabal i transport de sediment a la secció experimental d'Inglabaga, Ribera Salada (dades publicades a Vericat i Batalla, 2010)

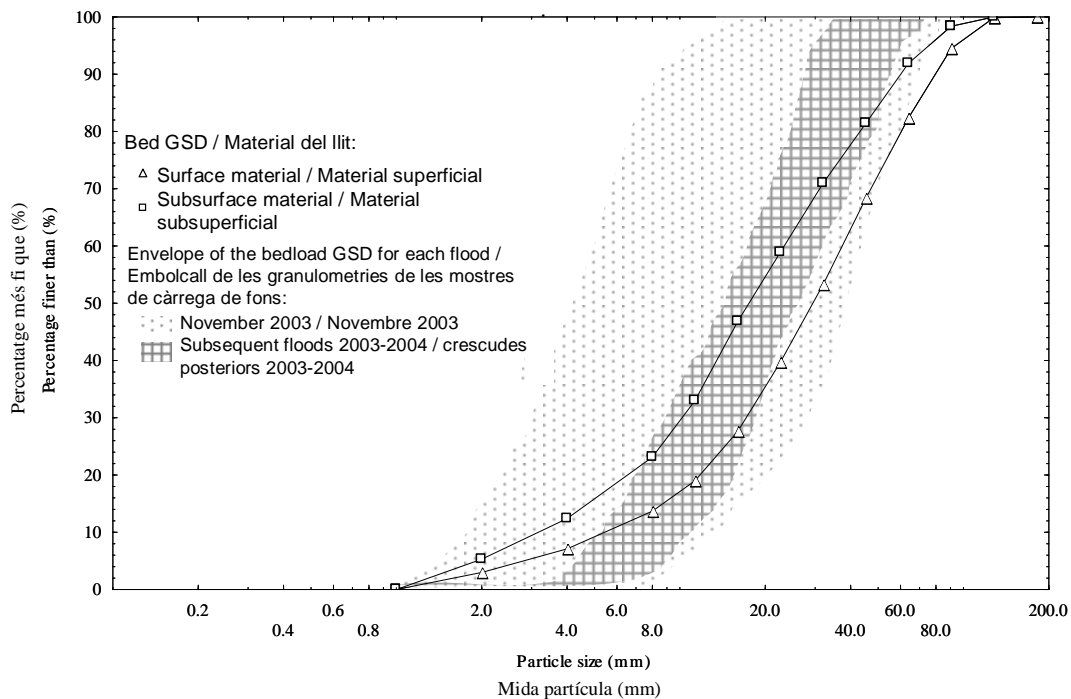


Figura 39. Granulometria de les mostres de càrrega de fons obtingudes a la secció de mostreig de Mora d'Ebre, tram baix del riu Ebre en comparació a les distribucions granulomètriques del material del llit del riu.

La figura 40 mostra el desplaçament de traçadors després d'una crescuda de baixa magnitud però d'alta freqüència al riu Rees (Nova Zelanda). En aquest exemple es van utilitzar traçadors pintats. Es van pintar i localitzar un total de tres àrees d'aproximadament 1 m². Un cop va finalitzar la crescuda es van localitzar els traçadors i.e. còdols pintats provinents de les àrees i se'n va mesurar l'eix *b* de cadascun d'ells. Aquesta mesura permet obtenir la granulometria dels traçadors (veure distribució granulomètrica al peu de la figura). També permet calcular distàncies per a grups granulomètrics determinats (e.g. seguint intervals $s \frac{1}{2} \phi_i$, veieu secció de granulometries per a més detalls). La localització dels traçadors després de la crescuda facilita també el càlcul de la distància recorreguda per les partícules. Es presenta el desplaçament mínim (e.g. 2 metres) i el màxim (e.g. 131 m) pel conjunt dels traçadors.

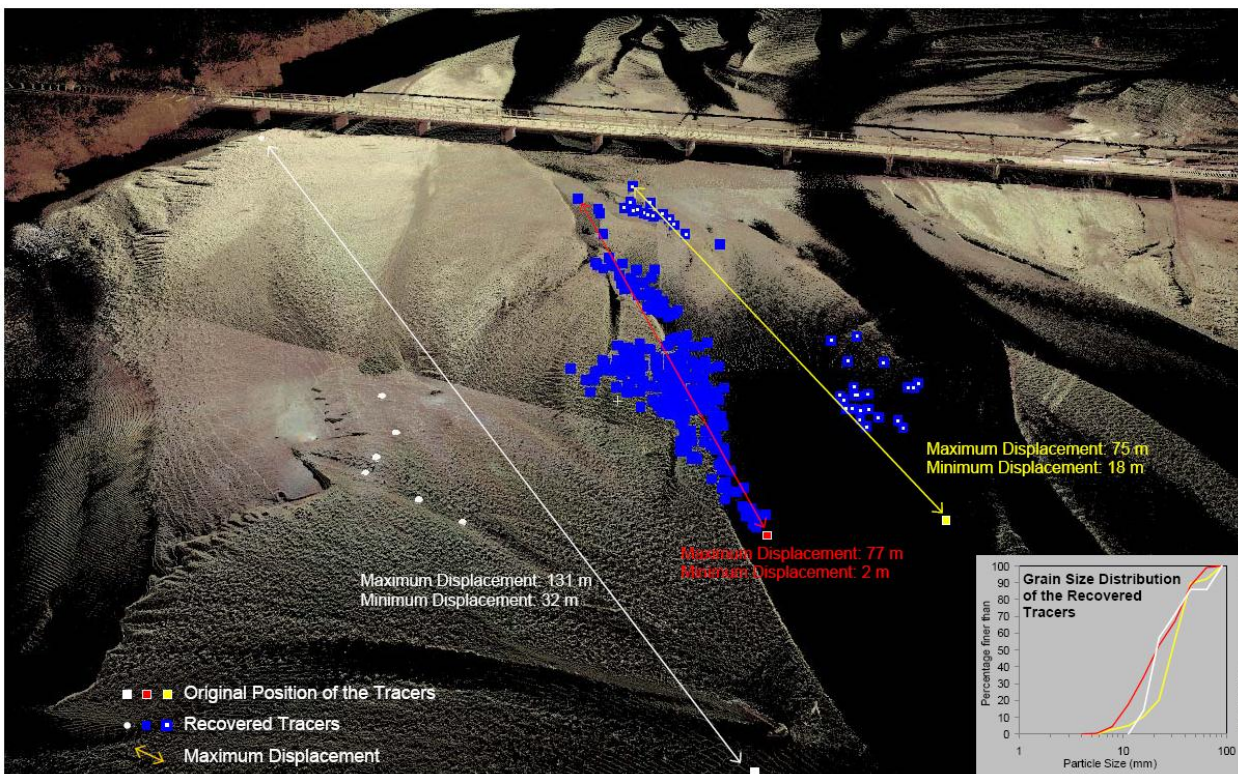
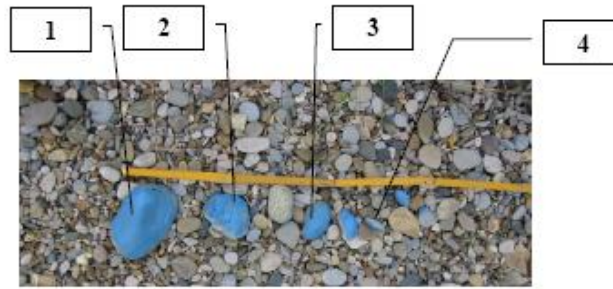


Figura 40. Mobilitat de traçadors pintats al riu Rees (Nova Zelanda). Es presenta la distribució granulomètrica dels traçadors que es van localitzar després de la crescuda. També s'indiquen les trajectòries i els màxims i mínims desplaçaments del conjunt dels traçadors.

En rius on el grau de cuirassament és elevat (veieu definició a l'apartat de granulometries) la mobilitat dels traçadors pot ser mínima. Aquest és el cas del tram baix del riu Ebre. Durant crescudes de magnitud relativament elevada però sota condicions hidràuliques inferiors a les necessàries per poder trencar la cuirassa superficial, la mobilitat dels traçadors és mínima (Figura 41). Tot i això, l'estudi de la mobilitat en aquestes condicions pot ser de gran utilitat per a entendre els canvis en el grau de cuirassament i en l'estructura sedimentària del llit del riu (e.g. *packing*).



↓ After floods

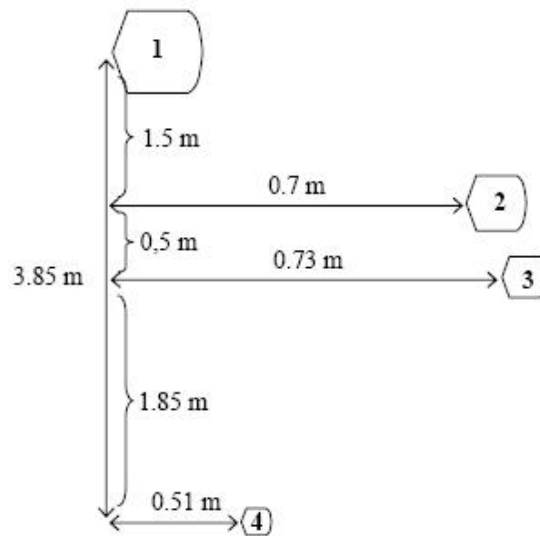


Figura 41. Situació original i mobilitat de traçadors pintats al tram baix del riu Ebre després d'una crecuda amb un cabal pic de $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ durant l'any hidrològic 2002-2003.

RECOMANACIONS BÀSIQUES PER AL MOSTREIG DE LA CÀRREGA DE FONTS AMB HELLEY-SMITH

- 1) **Seleccioneu el tipus de mostrejador** en funció de (a) la mida del material del llit del riu i (b) de l'accessibilitat a la llera del riu en situacions de crescuda. S'aconsella que la boca del Helley-Smith sigui 5 cops l'eix de major longitud de la partícula més grollera ($D_{màx}$) superficial (que sigui representativa del règim de transport actual). En el cas de que es pugui accedir al llit del riu en condicions de transport es podrà utilitzar un mostrejador portàtil. Si pel contrari les condicions hidràuliques ho impedeixen caldrà utilitzar un mostrejador suspès per cable (habitualment operat amb grua des d'un pont).
- 2) Determineu el **número de verticals** (punts de mostreig) al llarg de la secció d'estudi: (a) identificació de 20 verticals o punts de mostreig distribuïts homogèniament al llarg de la secció o (b) obtenció de mostres en intervals no superiors al 20% del total de l'amplada de la secció objecte d'estudi. Nota: si es vol fer un estudi de la variabilitat temporal de la càrrega de fons es pot fer un mostreig continu (en intervals regulars de temps) en una sola vertical.
- 3) S'aconsella obtenir **rèpliques** de cada mostra. L'obtenció de com a mínim dues mostres per a cadascuna de les verticals facilitarà també l'estimació de la variabilitat temporal.
- 4) És necessari que les condicions hidràuliques entre mostres successives sigui el més similar possible. També és necessari que les condicions de cabal no variïn durant el mostreig al llarg de la secció (veieu el text per a més detalls).
- 5) El temps de mostreig variarà i estarà en relació a la magnitud del transport sòlid. La bossa del mostrejador no s'ha d'omplir més del 50% de la seva capacitat. Nota: si el volum de material atrapat és superior l'eficiència del mostrejador decreix notablement.
- 6) Si accediu a la llera intenteu no modificar l'estructura del sediments ja que podria alterar el transport sòlid i, les mostres podrien no ser del tot representatives.
- 7) Buideu el material que queda retingut al mostrejador. Poseu els sediments en una bossa de plàstic dur i etiqueteu la mostra amb la següent informació: a) la data i hora, b) inicials del responsable mostreig, c) el lloc, d) el riu, e) el lloc de mostratge (secció i vertical), f) el temps de mostreig, i g) l'altura d'aigua en el punt de mostreig (si se'n disposa).
- 8) Un cop al laboratori **assequeu i peseu** les mostres per tal d'obtenir el seu pes sec. Posteriorment s'han de garbellar seguint els mètodes explicats en l'apartat de granulometries (mostres volumètriques).
- 9) **Mesureu l'eix b de la partícula més grollera** de cada mostra. Nota: aquesta mesura és molt important per tal d'estimar la competència del riu durant el període de mostreig. I per al càlcul de l'inici de moviment. Un cop obtingut el pes, ja es pot estimar la taxa de càrrega de fons tal i com s'indica al text.

4. VARIABLES MORFOLÒGIQUES

4.1. Geometria hidràulica

4.1.1. Definició

La relació empírica entre característiques hidràuliques del canal i càrrega sòlida proporcionen, en termes semiquantitatius, una explicació lògica de la forma de la llera. D'aquesta manera, la majoria de sistemes fluvials tendeixen a desenvolupar-se d'una certa manera per a produir un equilibri aproximat entre la forma del canal i l'aigua i el sediment que ha de transportar. Aquest equilibri dinàmic sembla existir fins i tot en capçaleres de tributaris sense equilibri aparent i en seccions transversals de lleres de plana, fins i tot, per sobre del nivell de llera plena o *bankfull*.

4.1.2. Objectius de mesura i aplicacions

Per a l'estudi de la dinàmica dels canals fluvials, en relació a l'evolució de la seva forma (geometria hidràulica), un dels mètodes més utilitzats és el de la realització sistemàtica de perfils transversals. Els perfils transversals permeten, així mateix, calcular cabals d'aigua actuals en combinació amb mesures reals de velocitats (veieu 2.2.), o estimar cabals de crescuda a partir de càlculs teòrics de velocitat. El traçat del perfil transversal es basa en la mesura dels desnivells relatius entre diferents punts d'una línia situada transversalment al curs fluvial. El principals elements geomètrics que configuren una secció transversal d'un riu es presenten a la figura 42 i son:

- Amplada (w) en metres
- Fondària (d) en metres
- Perímetre mullat ($P_h \approx 2d+w$) en metres
- Radi hidràulic ($R=A/P$) en metres
- Àrea (A) en m^2

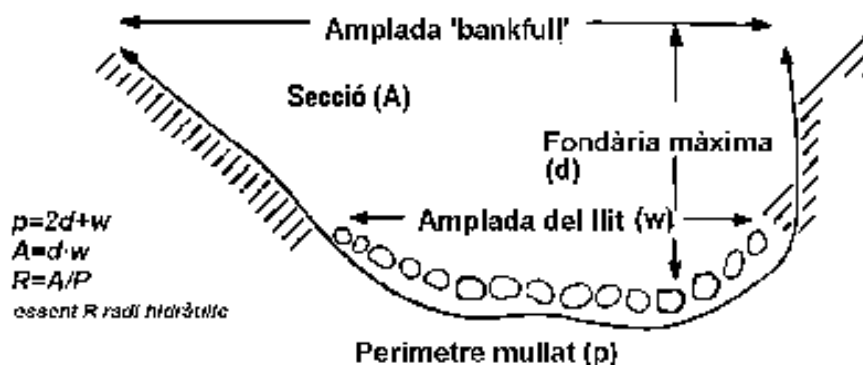


Figura 42. Principals elements que conformen la geometria hidràulica de la secció transversal d'un riu

4.1.3. Tècnica

Si s'han realitzat campanyes anteriors el perfil transversal s'ha d'aixecar exactament en la mateixa posició (mateix *datum*) amb l'objectiu d'assegurar una màxima precisió en la superposició i, per tant, de poder observar les variacions del llit del riu. Les seccions han de tenir un caràcter representatiu de les variacions morfològiques del riu (roca mare, riu de graves, canal encaixat) i cal que intentin reflectir els impactes antròpics sobre la llera (motes, extraccions, etc.). L'aixecament topogràfic de les seccions es realitza amb aparells topogràfics diversos (nivells, teodolits, etc.). En el cas de la Ribera Salada s'utilitza habitualment una Estació Total Geodimeter® 422 (Figura 43). En cada secció es determinen els principals punts de ruptura de pendent, el nivell d'aigua, el nivell actual del llit del riu (i per exemple, si és el cas, el nivell anterior a les extraccions a partir de les observacions de camp per tal d'estimar l'alteració de l'activitat extractiva en la geometria de la llera). Així mateix és important recopilar informació d'interès fluvial com el nivell de l'aigua, la presència de vegetació, la presència de llit rocós, nivells de crescudes recents, etc. Al final de la secció es presenten els passos genèrics i recomanacions que cal seguir a l'hora de realitzar un perfil transversal, un cop seleccionada la secció fluvial que es vol aixecar.



Figura 43. Estacionament de l'Estació Total Geodimeter® 422

És convenient, també, mesurar el pendent (s en %) d'un sector de 100 metres aigües amunt de la secció transversal de treball. Es pot estimar fàcilment el sinus de l'angle, l'angle, i finalment la tangent, és a dir, el pendent expressat en tants per 1, que és com es farà servir a les fórmules. Un exemple de càlcul de pendent sobre una distància de 25,43 metres i 0,8 metres de desnivell entre els dos punts de mesura és el següent:

$$\sin \alpha = 0,8 \text{ m} / 25,43 \text{ m} = 0,03145$$

$$\text{Arcsin } \alpha = 1,8^\circ$$

$$\text{tg } 1,8^\circ = 0,03147 \rightarrow 0,03145 \approx 0,03147$$

(Si α és 0 el sinus de α és igual a la seva tangent)

A l'exemple el pendent resultant és de 0,031 m/m o 3,1%. El pendent és un paràmetre necessari, per exemple, per al càlcul posterior de fórmules que permeten avaluar els cabals

quan no es disposa de mesures directes de velocitat, per estimacions d'inici de moviment del material de la llera, etc.

4.1.4. Resultats

Per a poder comparar les seccions de control es poden calcular les seves característiques geomètriques en situació de llera plena (*bankfull*⁴). En aquest cas cal definir la situació de llera plena com aquella en la que el cabal inunda la totalitat del canal actiu (delimitat pels nivells de barres, terrassa inferior o pels vessants). La mínima relació amplada/fondària en el perfil és un bon indicador del nivell de canal ple. El càlculs es poden fer manualment o mitjançant programes com WinXSPRO®. La figura 44 presenta un exemple d'extracció d'informació *bankfull* a una secció de control.

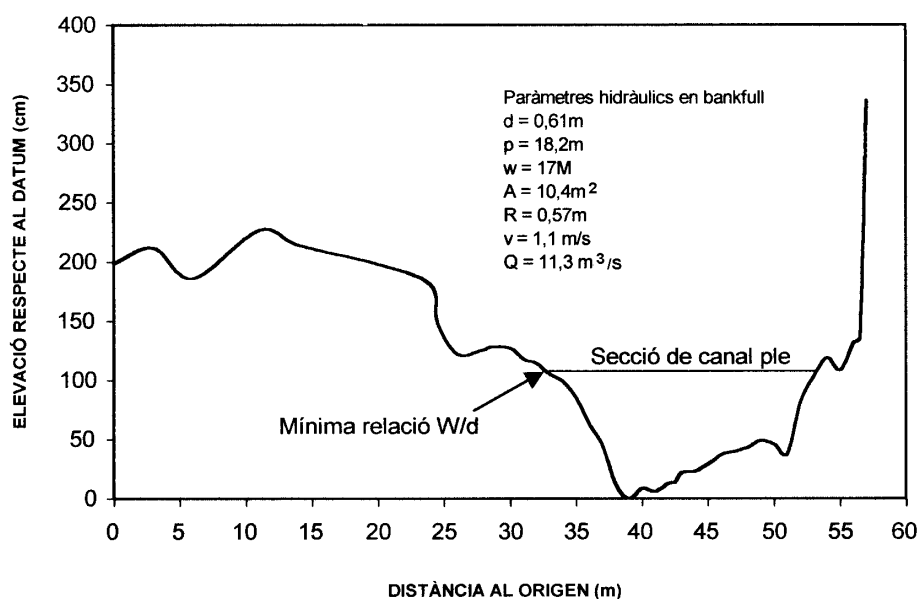


Figura 44. Exemple de perfil transversal a la secció de control de Terrassola de la Ribera Salada i determinació de paràmetres *bankfull*.

RECOMANACIONS BÀSIQUES PER A UN AIXECAMENT TOPOGRÀFIC DE GEOMETRIA HIDRÀULICA

- 1) Prendre les coordenades geogràfiques mitjançant GPS per tenir la localització de la secció.
- 2) **Dibuixar el croquis del perfil** i col·locar elements bàsics com el *datum*, els trencaments de pendent, i el nivell de l'aigua.
- 3) Començar, si es pot, des del marge dret del riu, mirant aigües avall.
- 4) Agafar un punt sobre el *datum* (punt fix).
- 5) Agafar un punt aigües amunt i un aigües avall pel càlcul del pendent.
- 6) Especificar els **límits laterals del flux** d'aigua.
- 7) Mesurar fondàries en intervals no superiors al 10% de l'amplada del perfil.
- 8) Especificar el punt de **màxima fondària**.
- 9) Descriure els trets essencials que conformen el perfil realitzat (forma del canal, tipus i calibre del material del llit, nivell de canal ple, vegetació).
- 10) Descarregar les dades de l'estació i representar els punts (X,Y,Z) obtinguts al camp en un full de càlcul.

⁴ El cabal *bankfull* correspon al cabal que omple el canal del riu fins els marges i marca l'inici de la inundació. El nivell *bankfull* correspon al cabal de crescuda que més incideix en el modelat del canal, és a dir, el que mobilitza gran part del llit fluvial, remou les barres centrals i laterals del canal, produeix o canvia les corbes dels meandres o inflexions del riu i, en definitiva, és el que més treball realitza sobre la morfologia característica del llit. Ha estat definit com el cabal dominant des del punt de vista de la morfologia fluvial i el cabal més efectiu pel que fa al transport de sediment, especialment com a càrrega de fons.

4.2. Morfologia

4.2.1. Definició

Les característiques morfològiques d'un riu són la conseqüència de la transferència de sediments al llarg de la seva xarxa de drenatge i, alhora, en controlen el propi transport. Els rius modifiquen les seves unitats morfològiques al llarg del temps. El patró de la llera canvia en relació a les característiques sedimentàries de la càrrega sòlida i el règim de cabals (especialment durant crescudes). És durant aquests episodis quan el riu disposa d'energia per modificar la forma de la seva llera. Tot i això, en sistemes on el subministrament de sediments és molt elevat el riu pot modificar la seva morfologia fins i tot durant cabals relativament baixos (i.e. cabals amb baixa capacitat de transport però suficient competència per a modelar el canal). Una de les tècniques utilitzades per a l'estudi de la dinàmica morfològica en sistemes fluvials és la comparació de fotografies aèries. Un dels problemes recau en la qualitat de les fotografies. A més, l'escala de les fotografies en determinarà la resolució, i aquesta els límits de les anàlisis. La comparació de fotografies d'abans i després d'episodis de crescuda permet estudiar la dinàmica morfològica d'un riu resultant dels processos sedimentaris produïts durant la mateixa. Molts d'aquests estudis es basen en fotografies aèries preses amb equips fotogramètrics que permeten una posterior restitució, disminuint els errors durant el procés d'ortorectificació. Cal destacar que els avenços en el món de la fotografia digital i en les opcions d'anàlisi que tenen alguns dels programaris fotogramètrics ha possibilitat l'obtenció de fotografies d'alta resolució, baix cost i amb la qualitat suficient per a estudiar la dinàmica morfològica de rius a escala de gra (escala centimètrica).

4.2.2. Objectius i aplicacions

L'objectiu d'aquesta secció és el de presentar tècniques de baix cost per a l'obtenció de fotografies aèries que amb un posterior tractament puguin ser utilitzades per a l'estudi morfològic de trams de rius. La possibilitat d'aconseguir fotografies a baix cost facilita que es puguin obtenir amb més regularitat (freqüència en base al nombre de crescudes). Aquest fet és de gran importància per tal d'estudiar la dinàmica morfològica en relació a episodis de crescuda, i no només la dinàmica a llarg termini com s'ha de fer quan es tracta de l'ús de vols d'institucions públiques o privades, d'elevat cost i logística. Tot i això, aquests vols són de gran utilitat quan l'objectiu és estudiar els canvis morfològics durant períodes de temps prolongats (anys). En aquest sentit cal destacar l'important informació de que disposen tant l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) com la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre (CHE). Molts dels vols d'aquests organismes es poden ser descarregats des del seu web. D'especial interès és la sèrie de Fotoplans de l'any 1927 que hi ha disponible al web de la CHE.

4.2.3. Tècnica

Una de les tècniques de baix cost utilitzada per a l'obtenció de fotografies aèries és l'ús d'una càmera digital convencional acoblada a un globus d'heli, també conegut com a sistema BLIMP (degut al soroll que fa quan es pessiga el globus inflat) (Figura 45). El globus té el suficient volum (i.e. 1.6 m^3) per a sostenir una càmera digital convencional; es condueix amb un cordill d'estel i pot arribar a altures superiors als 400 m (cal demanar permís per a utilitzar aquesta tècnica en corredors aeris -helicòpters-). La càmera fotogràfica ha de tenir intervalòmetre. Aquests permetrà configurar la presa de fotos de manera automàtica (i.e. intervals regulars). És necessari obtenir un elevat nombre de fotografies degut a que moltes no seran útils (per exemple perquè estaran desenfocades o fora de l'àrea d'estudi).

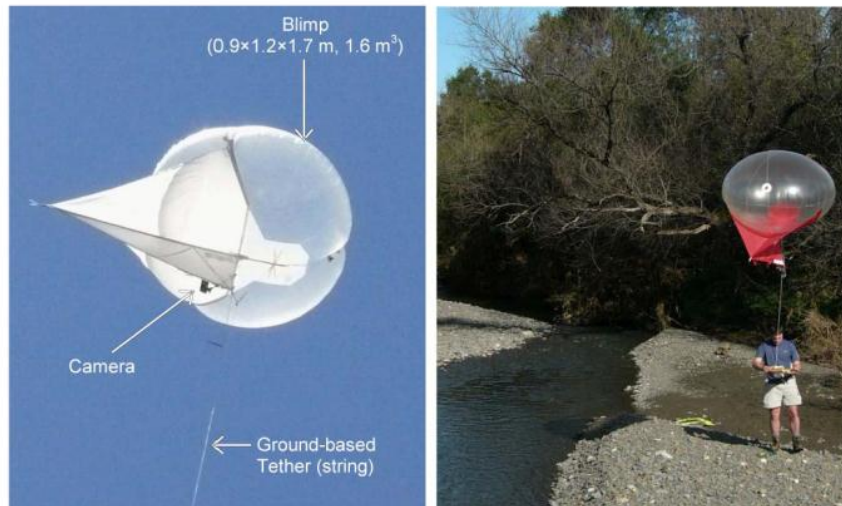
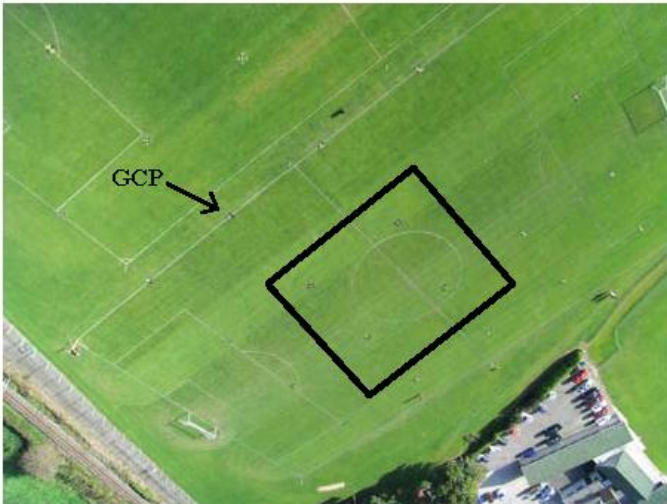


Figura 45. Fotografies d'un globus d'heli en el que s'ha col·locat una càmera digital (BLIMP) per a l'obtenció de fotografies aèries de gran resolució (font: Vericat et al., 2009).

Del total de fotografies preses es necessari fer la selecció d'aquelles que presenten una major qualitat i que en el conjunt arribin a cobrir el tram objecte d'estudi. Les fotografies necessiten ser rectificades. Per tal de poder rectificar la projecció de les fotografies és necessari obtenir punts de control (punts en el terreny en els que s'obté la seva coordenada geogràfica amb base a un *datum* geogràfic o local). És necessari disposar d'un elevat nombre de punts de control ja que, tot i que el globus està dissenyat per a ser estable (veieu la forma de l'aleta posterior), rarament s'obtenen fotografies amb una perfecta projecció plana (Figura 46a). Mitjançant els punts de control es pot realitzar el procés de rectificació. Aquest procés es pot fer amb software fotogramètric especialitzat o amb software amb funcions de georeferenciació. L'equip del CTCF-UdL disposa d'experiència en ArcMap[®] i Leica ERDAS IMAGINE[®]. La complexitat del procés de rectificació vindrà determinada per la informació que requereix el programa informàtic utilitzat. Es mostra un exemple de fotografia resultant a la figura 46b.

Tot i que aquesta pot ser una de les tècniques més econòmiques per a l'obtenció de fotografies aèries també hi ha altres opcions. És el cas de l'ús d'helicòpters o altres aparells com *ales deltes*. En aquest sentit, l'equip del CTCF-UdL participa en un projecte a Nova Zelanda en el que es realitza un vol amb helicòpter (ca. 600 m d'altitud) després de cada crecuda (Figura 47). Durant aquest vol s'obtenen fotografies aèries d'alta resolució que posteriorment es rectifiquen. Aquestes fotografies serveixen per a l'estudi de la dinàmica morfo-sedimentària del riu objecte d'estudi; en aquest cas concret també s'utilitzen per a extreure la profunditat de l'aigua al llarg de l'àrea d'estudi. Per a realitzar aquestes anàlisis s'obtenen observacions de camp (profunditat) en el mateix moment de presa de les fotos. Aquestes observacions serveixen per a calibrar els valors dels tres canals de la fotografia; d'aquesta manera, mitjançant el valor RGB de cadascuna de les fotografies es pot obtenir la profunditat d'aigua al canal. De la mateixa manera, hi ha que destacar l'estudi de Verdú et al. (2005) en el que presenten tècniques per a l'obtenció de paràmetres granulomètrics a escala de tram de riu mitjançant el tractament de fotografies d'alta resolució obtingudes amb helicòpter.

a)



b)

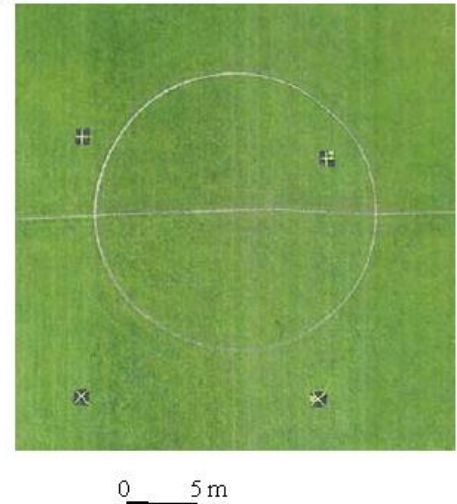


Figura 46. (a) Fotografia aèria original presa amb un BLIMP. S'identifica amb un quadre la secció que serà rectificada a (b). (b) Fotografia aèria rectificada mitjançant els punts de control (creus grogues amb fons negre). Es disposa de les coordenades geogràfiques (relatives a un datum local) de tots els punts de control. S'ha aplicat una transformació de la imatge en base a tots els punts de control i utilitzant una aerotriangulació (Rubber Sheeting). Procés realitzat amb Leica ERDAS IMAGINE[®]. Figura extreta de Vericat et al. (2009).



Figura 47. Exemple d'un mosaic fotogràfic obtingut al riu Rees (Nova Zelanda). Aquestes fotografies s'utilitzen per a estudiar els canvis morfològics després de crescudes i per a l'obtenció de la profunditat d'aigua al llarg de l'àrea d'estudi. Per realitzar aquesta última anàlisi és necessari una calibració entre els valors dels tres canals de la fotografia i observacions directes de camp (profunditat) en el moment de la presa fotogràfica. La direcció de l'aigua és de dreta a esquerra.

4.2.4. Resultats

A continuació es presenten dues figures (Figura 48 i 49) amb alguns exemples obtinguts amb fotografies aèries de baix cost. Ambdós exemples corresponen al riu Feshie (Escòcia). La figura 48 mostra un mosaic de 45 imatges per als anys 2005 i 2007 en els que pot cartografiar la llera de cabals baixos i determinar els canvis en el patró del canal. Per altra banda, la figura 49 presenta la qualitat de les fotografies aèries obtingudes amb la tècnica BLIMP. La resolució de les imatges rectificades permet fins i tot la identificació de còdols.

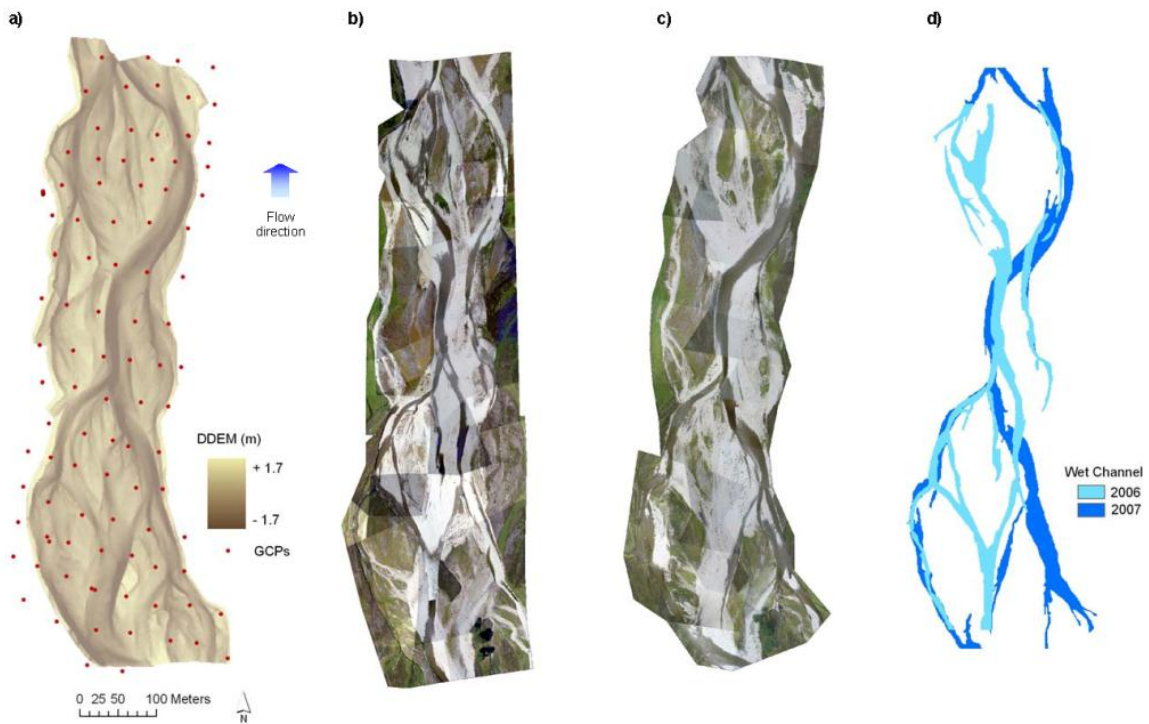


Figura 48. Exemple d'un mosaic fotogràfic obtingut al riu Feshie (Escòcia) l'any 2005 i 2007. (a) Punts de control utilitzats per a la rectificació de les fotografies l'any 2007. Mosaic per a l'any (b) 2005 i (c) 2007. (d) Patró de la llera per a cadascun dels anys.

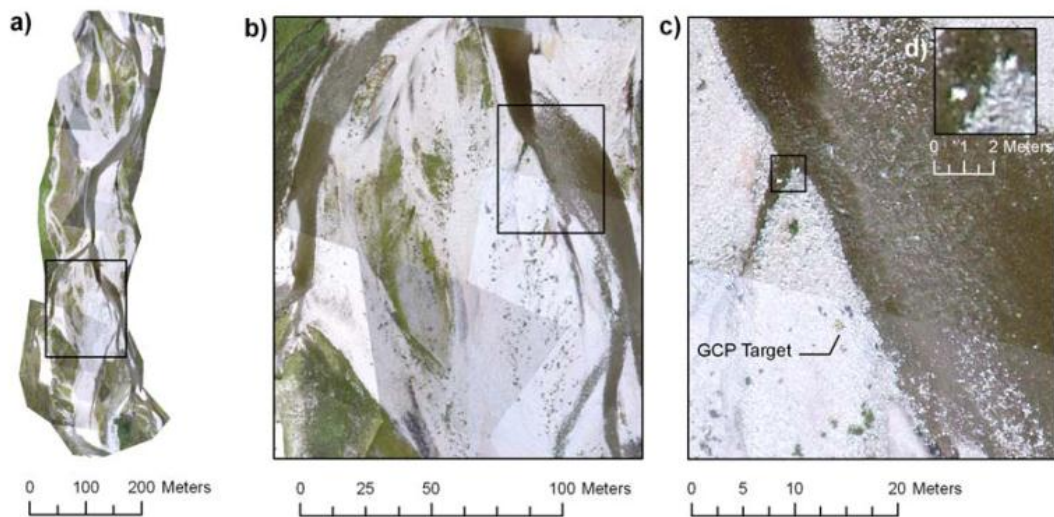


Figura 49. Exemple d'un mosaic fotogràfic obtingut al riu Feshie (Escòcia) l'any 2007. S'observa la qualitat de les fotografies un cop rectificades. La resolució permet la identificació de còdols.

5. REFERÈNCIES AL TEXT

- Anastasi, G., 1984. Geschiebeanalysen im Felde unter Berücksichtigung von Grobkomponenten. [Field grain-size analyses with special attention to coarse material]. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 70.
- Bunte, K., Abt, S.R., 2001. Sampling surface and subsurface. Particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring. U.S. Department of Agriculture, Forest Services, Rocky Mountain Research Station.
- Church, M., McLean, D.G., Wolcott, J.F., 1987. River bed gravels: sampling and analysis. A: Thorne, C.R., Barthurst, J.C., Hey, R.D. (Eds.), *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*. John Wiley and Sons, Chichester, UK, pp. 43–88.
- Dietrich, W., Dunne, Th. (1978): Sediment budget for a small catchment in a mountainous terrain. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd. 29*, Berlin, 191-206
- Diplas, P. (1989): Areal sampling techniques. En: Wang, S.S.Y. (ed.): *Sediment Transport Modeling*, American Society of Civil Engineers, New York, 380-385.
- Diplas, P., Sutherland, A.J., 1988. Sampling techniques for gravel sized sediments. *Journal of Hydraulic Engineering* 114 (5), 484– 501.
- Emmett, W.W., 1980. A field calibration of the sediment trapping characteristics of the Helley-Smith bedload sampler, U. S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1139, 44 pp.
- Fripp, J.B., Diplas, P., 1993. Surface sampling in gravel streams. *Journal of Hydraulic Engineering* 119 (4), 473– 490.
- Garcia, C., Laronne, J.B., Sala, M. 2000. Continuous monitoring of bedload flux in a mountain gravel-bed river. *Geomorphology*, 34, 23-31.
- Gomez, B., 1983. Temporal variations in bed load transport rates: the effect of progressive bed armouring. *Earth Surface Processes and Landforms* 8, 41– 54.
- Habersack, H.M., Laronne, J.B., 2001. Bed load texture in an alpine gravel bed river. *Water Resources Research* 37 (12), 3359–3370.
- Hassan, M.A., 1990. Scour, fill, and burial depth of coarse material in gravel-bed stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 341-356.
- Helley, E. J., and W. Smith (1971), Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler, open file report, Water Resour. Div., U. S. Geol. Surv., Menlo Park, Calif.
- Kellerhals, R., Bray, D.I., 1971. Sampling procedures for coarse fluvial sediments. *Journal of the Hydraulics Division ASCE* 97(HY8), 1165–1180.
- Lane, E.W., Carlson, E.J., 1953. Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials. *Proceedings of the 5th Congress International Association for Hydraulic Research*, Delf, Netherlands.
- Leopold, L. B., M.G. Wolman, J.P. Miller. 1964. *Fluvial processes in geomorphology*. Freeman, San Francisco.
- Leopold, L.B., Emmett, W.W., Myrick, R.M. 1966. Channel and hill slope processes in a semi-arid area, New Mexico. *United States Geological Survey Professional Paper* 352 G, pp. 193-253.
- Leopold, L.B., Emmett, W.W., 1997. Bedload and river hydraulics inferences from the East Fork River, Wyoming. *US Geological Survey Professional Paper* 1583, 52 p.
- Lopez-Tarazon, J.A., Batalla, R.J., Vericat, D., Francke, T., 2009. Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: the River Isábena (Central Pyrenees). *Geomorphology*, 109, 210-222.
- McPherson, H. J. 1971. 'Dissolved, suspended and bedload movement patterns in Two O'clock Creek, Rocky Mountains, Canada, Summer, 1969', *Journal of Hydrology*, 12, 221–233.
- Reid, I., Layman, J.T., Frostick, L.E., 1980. The continuous measurement of bedload discharge. *Journal of Hydraulic Research* 18, 243–249.

- Reid, I., Laronne, J.B., 1995. Bedload sediment transport in an ephemeral stream and a comparison with seasonal and perennial counterparts. *Water Resources Research* 31 3 , 773–781.
- Rice, S. 1995. The spatial variation and routine sampling of spawning gravels in small coastal streams. Research Branch, British Columbia Ministry of Forests, Victoria, B.C., Working Paper 06/1995.
- Rice, S., Church, M., 1996. Sampling surficial fluvial gravels: the precision of size distribution percentile estimates. *Journal of Sedimentary Research* 66 (3), 654– 665.
- Sala, M., Gallart, F. (1988): Métodos y técnicas para la medición de campo de procesos geomorfológicos. Zaragoza, Sociedad Española de Geomorfología, Monografía nº 1.
- Schick, A.P., 1967. Suspended sampler and bedload trap, in field methods for the study of slope and fluvial processes. *Rev. Géomorphologie Dynamique* 17(4).
- Shaw, E.M., 1994. Hydrology in practice. Van Nostrand Reinhold, London, 539 p.
- Sterling, S. M., and M. Church (2002), Sediment trapping characteristics of a pit trap and the Helley-Smith sampler in a cobble gravel bed river, *Water Resour. Res.*, 38(8), 1144, doi:10.1029/2000WR000052.
- Verdu, J.M., Batalla, R.J., Martínez-Casasnovas, J.A. 2005. High-resolution grain size characterization of gravel riverbeds using field samples, image textural analysis and geostatistics. *Geomorphology*, 72, 1-4, 73-93.
- Vericat, D., Batalla, R.J., 2006. Sediment transport in a large impounded river: The lower Ebro, NE Iberian Peninsula. *Geomorphology*, 79, 72-92. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.09.017.
- Vericat, D., Batalla, R.J., Garcia, C., 2006. Breakup and reestablishment of the armour layer in a highly regulated large gravel-bed river: the lower Ebro. *Geomorphology*, 76, 122-136
- Vericat, D., Brasington, J., Wheaton, J., Cowie, M., 2009. Accuracy assessment of georectified aerial photographs acquired using ground-tethered blimp platforms; towards a methodological protocol. *River Research and Applications*, 25, 985-1000.
- Vericat, D., Batalla, R.J., 2010. Total sediment transport from continuous monitoring in a perennial Mediterranean stream. *Catena* (en premsa).
- Walling, D.E., 1984. Dissolved loads and their measurements. A: Hadley, R.F., Walling, D.E. (eds.): *Erosion and sediment yield: Some methods of measurements and modelling*. London, Geo Books.
- Walling, D.E., Collins, A.L. 2000. Integrated assessment of catchment sediment budgets. Technical Manual. University of Exeter, Exeter, UK.
- Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse bed material. *American Geophysical Union Transactions* 35, 951– 956.

6. PROJECTES I PUBLICACIONS

Aquest treball ha estat elaborat a partir de dades obtingudes a la conca experimental de la Ribera Salada així com en d'altres conques on fa recerca l'equip de RIUS. Els principals projectes i publicacions que emmarquen el treball són:

Projectes competitiu relacionats amb aquest quadern:

Projecte: Evaluación de recursos hídricos y transporte sólido en cuencas forestales mediterráneas con distintos usos del suelo: Aproximación regional y experimental, CICYT (HID97 - 0397), Ministerio de Educación y Ciencia, 1997-2000

Projectes (títol genèric de la sèrie): Diseño y aplicación de crecidas generadoras como estrategia de reequilibrio hidro-sedimentario en rios regulados, REN2001-0840-C02-01/HID, CGL2005-06989-C02-02/HID, CGL2006-11679-C02-01/HID, CGL2009-09770, 2002-2012.

Projecte: Sediment Export from large Semi-Arid catchments: Measurements and Modelling SESAM, DGF Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2005-2007

Projecte: Hyperscale Modelling of Braided rivers: Linking Morphology, Sedimentology and Sediment Transport, Natural Environment Research Council (NERC, UK), NE/G0054271, 2009-2011

Projecte: Assessing and predicting effects on water quantity and quality in Iberian rivers caused by global change. (Consolider-Ingenio 2010), CSD2009-00065, Ministerio de Ciencia e Innovación, 2009-2014.

Conveni: Desenvolupament d'una metodologia hidràulico-ambiental per a la gestió del sediment fluvial a Catalunya, ACA, Agència Catalana de l'Aigua, 2005-2007

Publicacions internacionals relacionades amb aquest quadern (en ordre cronològic de publicació):

BATALLA, R.J., GARCIA, C., BALASCH, J.C. (2005): Total sediment load in a Mediterranean mountainous catchment (the Ribera Salada River, Catalan Pre-Pyrenees, NE Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49, 4, 495-514.

VERICAT, D., CHURCH, M., BATALLA, R.J. (2006): Bedload bias: Comparison of measurements obtained using two (76 and 152 mm) Helley-Smith samplers in a gravel-bed river. *Water Resources Research*, 42, 1-13, W01402. DOI: 10.1029/2005WR004025.

VERICAT, D., BATALLA, R.J., GARCIA, C. (2006): Breakup and reestablishment of the armour layer in a highly regulated large gravel-bed river: the lower Ebro. *Geomorphology*, 76, 122-136. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.10.005.

OROZCO, M., POCH, R.M., BATALLA, R.J., BALASCH, J.C. (2006). Hydrochemical balance of Mediterranean mountainous catchments in relation to land uses (The Ribera Salada, Catalan Pre-Pyrenees, NE Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50, 1, 77-94.

BATALLA, R.J., VERICAT, D. MARTÍNEZ, T.I. (2006). River-channel changes downstream from dams in the lower Ebro River. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. B.*, 143, 1-14.

VERICAT, D., BATALLA, R.J. (2006): Sediment transport in a large impounded river: The lower Ebro, NE Iberian Peninsula. *Geomorphology*, 79, 72-92.

VERICAT, D., BATALLA, R.J. (2007): Fractional bedload during small floods in a regulated gravel-bed river. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51, 2, 227-240.

VERICAT, D., BATALLA, R.J., GARCIA, C. (2008): Bed-material mobility in a large river below dams. *Geodinamica Acta*, 21, 1-2, 3-10.

- MÜLLER, E.N., BATALLA, R.J., BRONSTERT, A., GARCIA, C. (2008): Modelling bedload transport rates during small floods in a gravel-bed river. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, 134, 10, 1430-1439.
- VERICAT, D., BATALLA, R.J. GIBBINS, C.N. (2008): Sediment entrainment and exhaustion from patches of fine material in a gravel-bed river. *Water Resources Research*, 44, W11415, DOI:10.1029/2008WR007028.
- LOPEZ-TARAZON, J.A., BATALLA, R.J., VERICAT, D., FRANCKE, T. (2009): Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: the River Isábena (Central Pyrenees). *Geomorphology*, 109, 210-222.
- VERICAT, D., BRASINGTON, J., WHEATON, J., COWIE, M., 2009. Accuracy assessment of georectified aerial photographs acquired using ground-tethered blimp platforms; towards a methodological protocol. *River Research and Applications*, 25, 985-1000.
- VERICAT, D., BATALLA, R.J. (2010): Sediment transport from continuous monitoring in a perennial Mediterranean stream. *Catena* 88, 77-86.
- WILLIAMS, R., BRASINGTON, J., VERICAT, D., HICKS, M., LABROSSE, F., NEAL, M. (2011): Monitoring Braided River Change Using Terrestrial Laser Scanning and Optical Bathymetric Mapping, In: Mike J. Smith, Paolo Paron and James S. Griffiths, Editor(s), *Developments in Earth Surface Processes*, Elsevier, 2011, Vol. 15, 507-532.
- BATALLA, R.J. AND VERICAT D. (2011): An appraisal of the contemporary sediment yield in the Ebro Basin. *Journal of Soils and Sediments* 11, 1070–1081.
- TENA, A., KSIĄŻEK, L., VERICAT, D. AND BATALLA, R. J. (2012): Assessing the geomorphic effects of a flushing flow in a large regulated river. *River Res. Applic.* doi: 10.1002/rra.2572.
- LÓPEZ-TARAZÓN, J.A., BATALLA, R.J., VERICAT, D., FRANKE, T. (2012): The sediment budget of a highly dynamic mesoscale catchment: the River Isábena. *Geomorphology* 138(1): 15-28.
-

Publicacions nacionals relacionades amb aquest quadern (en ordre cronològic de publicació):

- CROZZOLI, L., BATALLA, R.J. (2003): Aplicación de la fotografía al análisis granulométrico de ríos de gravas. *Rev. de Cuaternario y Geomorfología*, 17, 3-4, 29-39.
- VERICAT, D., BATALLA, R.J. (2004): Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. *Rev. de Cuaternario y Geomorfología*, 18, 1-2, 37-50.
- VERICAT, D., GARCÍA, C., BATALLA, R.J. (2006): Variaciones temporales y especiales en la granulometría del tramo bajo del Ebro. *Rev. de Cuaternario y Geomorfología*, 20, 1-2, 47-60.
- VERICAT, D., BATALLA, R.J. (2006): Balance de sedimentos en el tramo bajo del Ebro. *Rev. de Cuaternario y Geomorfología*, 20, 1-2, 79-90.
- VERICAT, D., BATALLA, R.J. GIBBINS, C.N. (2008): Inicio de movimiento de sedimento en patches de arena de un río de gravas. *Medición y experimentación. Cuaternario y Geomorfología*, 22, 3-4, 51-62.