UB, Facultat de Geologia, Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines

CARACTERITZACIÓ PETROFÍSICA I RECONSTRUCCIÓ DE LA GEOMETRIA DE COSSOS SEDIMENTARIS MITJANÇANT LA TÈCNICA LIDAR, APLICAT A UN SECTOR DEL VENTALL FLUVIAL D'OSCA

Rubén Calvo Tortajada Juliol de 2008

Directors: Emilio Ramos i Pau Arbués

<u>ÍNDEX</u>

Pàgina

Resum	3
1- Introducció	4
2- Objectius	6
2.1- Metodològics	6
2.2- Geològics	6
3- Context geològic	7
3.1- Història sintètica del sector central	
de la Conca de l'Ebre	7
3.2- El Ventall Fluvial d'Osca	10
3.2.1- Història del ventall	10
3.2.2- Consideracions paleoclimàtiques i	
paleogeogràfiques	11
3.2.3- Dades de paleocorrents i estimació	
de l'àpex del sistema	11
3.2.4- Arquitectura sedimentària:	
els cossos sorrencs	12
3.2.5- Arquitectura fluvial a l'aflorament	
De Montearagón	14
4- Metodologia LIDAR	16
4.1- Principis físics del LIDAR	16
4.2- Instrumentació emprada a la campanya	
d'adquisició	18
4.3- Adquisició de dades	20
4.3.1- Dades LIDAR	20
4.3.2- Dades sedimentològiques	22
4.4- Processat de les dades	22
5- Resultats	27
5.1- Metodològics	27
5.2- Geològics	29
6- Discussió i conclusions	32
Bibliografia	34
Annex	36

<u>RESUM</u>

Els avenços tecnològics i l'evolució de la ciència estan estretament relacionats, i la incorporació de noves eines en els diferents camps d'investigació es dona contínuament. La tècnica que motiva aquest treball és el LIDAR (Ligh Detection And Ranging), i es mira d'incorporar en l'estudi de cossos sedimentaris amb l'objectiu de modelitzar anàlegs aflorants de reservoris d'hidrocarburs.

Els principis físics i de funcionament de la tècnica són molt senzills. Un emissor genera polsos de raig làser que viatgen fins a la superfície d'estudi, s'hi reflecteixen i retornen cap a un receptor. Per obtenir la distància entre el punt de la superfície i la posició de presa de dades el temps total d'anada i tornada es divideix entre dos i es multiplica per la velocitat de la llum. L'escàner làser va escombrant la superfície i acabem obtenint un núvol compost de milions de punts que representa, amb precisió centimètrica i posició georeferenciada, la geometria de l'objecte escanejat.

Aquest treball té dos clars objectius. Per una banda busca el desenvolupament d'una metodologia òptima per l'anàlisi e interpretació de dades LIDAR en afloraments de sèries detrítiques i, per altra banda, pretén utilitzar aquesta metodologia, tot integrant dades geomètriques i sedimentològiques, per realitzar un estudi arquitectural de l'aflorament de Montearagón, situat uns 11 Km al NE d'Osca i pertanyent al Ventall Fluvial d'Osca.

El primer que s'ha fet és intentar aïllar els cossos sorrencs de la resta dels materials de l'aflorament sense informació d'interès per aquest treball. Per aconseguir-ho s'han digitalitzat sobre fotografies, i amb el suport visual dels núvols de punts, els cossos sorrencs i posteriorment s'han seleccionat els punts que els representen al núvol, eliminant la resta. Aquesta digitalització no és una feina trivial, i la diversa problemàtica patida es comenta al treball. Per tal de no generar un model purament geomètric, s'han aixecat diverses columnes estratigràfiques a cossos de totes les tipologies presents. La integració dels diferents tipus de dades ha servit per, en primer lloc, classificar tots els cossos sorrencs en diverses tipologies seguint la classificació que va establir Hirst (1991) i que respon a característiques geomètriques i, en segon lloc, realitzar una avaluació sedimentològica del seu potencial com a reservori d'hidrocarburs.

Ha quedat aquí demostrat que el LIDAR és una tècnica molt útil i amb un futur força prometedor en la modelització d'afloraments de cossos sedimentaris. Mitjançant futures campanyes i un software més especialitzat pel tractament geològic de núvols de punts, la metodologia LIDAR de ben segur oferirà grans prestacions analítiques en un futur proper.

<u>1. INTRODUCCIÓ</u>

Històricament, els grans avenços en el camp de l'exploració del subsòl s'han donat en paral·lel al desenvolupament de noves tecnologies, les quals han permès disposar de noves eines i metodologies que han millorat e incrementat el grau de coneixement de les condicions geològiques del subsòl. És per aquest motiu que la irrupció d'una nova tecnologia desperta, generalment, un gran interès dins la comunitat científica per buscar la seva possible aplicació en diferents camps. No obstant, qualsevol nova eina o metodologia deu ser testada prèviament a la seva aplicació sistemàtica, i es fa necessari testejar-la en zones suficientment conegudes amb el fi de comprovar si els resultats obtinguts concorden, o no, amb els esperats.

Com acostuma passar quan s'intenten implantar nous avenços tècnics, segurament hi ha molta gent acostumada als mètodes tradicionals i que no veuen amb gaire bons ulls que la tecnologia s'ocupi de feines que normalment han ocupat al geòleg. Aquests prejudicis ja es donaven fa uns 150 anys, quan els geòlegs debatien sobre si les observacions de camp s'havien d'enregistrar en forma de text (llibreta de camp), com s'havia fet sempre, o de forma gràfica (mapes geològics). Més d'un segle desprès, al 1975, Wallace va emfatitzar sobre la importància dels mapes geològics amb paraules: "No existeix substitut aquestes un per als mapes i talls geològics...absolutament cap. Mai ha existit i mai existirà.". Aquest fet ens il·lustra sobre com és de difícil l'acceptació inicial de noves metodologies encara no plenament esteses.

Queda clar que els temps van canviant i les ments dels experts també s'han d'anar adaptant a les noves tècniques que es van desenvolupant. En la majoria dels casos, però, l'acceptació de noves tecnologies requereix d'un gran esforç previ en forma de desenvolupament d'una metodologia eficient i de resultats clarament contrastats i fiables.

La tècnica que motiva aquest treball, la qual es tracta d'incorporar en l'estudi de cossos sedimentaris, és el LIDAR (LIght Detection And Ranging). Es tracta d'una tècnica que va néixer als anys 60 i que es va començar a utilitzar en l'estudi d'aerosols atmosfèrics degut a la seva alta resolució. A partir de llavors, la seva popularitat va créixer i es va començar a aplicar en molts altres camps, com són la construcció, les ciències forenses, captura i arxiu de monuments i zones històriques, mineria, planificació urbana i enginyeria civil, entre d'altres. Aquest èxit en camps tan diversos es deu a la seva capacitat de digitalitzar i situar perfectament dins de l'espai tridimensional qualsevol objecte o zona, possibilitant treballar amb aquests en un PC sense gairebé pèrdua de cap tipus d'informació de l'original.

En el camp de la geologia la presa de dades d'afloraments extensos seguint els mètodes tradicionals es tradueix en llargues, i per tant costoses, campanyes de camp

on, a més, gran part de la informació que es pot extreure de l'aflorament no queda enregistrada a les notes, mapes geològics, talls, fotos i mostres recollides per falta de temps. Per tant no és d'estranyar que la possibilitat de digitalitzar en unes poques hores la geometria d'un aflorament amb una precisió centimètrica i poder treballar amb ell des de qualsevol ordinador sigui una opció bastant a tenir en compte pels geòlegs. Atenent a aquest propòsit es va començar a aplicar en geociències durant els anys 90. Actualment hi ha molts grup de geòlegs que treballen en desenvolupar aquesta tècnica amb diversos objectius: creació models digitals d'afloraments (DOM: Digital Outcrop Model) i d'elevació del terreny (DEM: Digital Elevation Model), monitorització de zones amb perill d'esllavissaments o de l'abombament dels vessants previ a l'erupció de volcans, l'estudi de falles actives...i d'altres que de ben segur s'aniran incorporant amb el pas dels anys.

Tanmateix, la metodologia LIDAR encara presenta diversos inconvenients. El treballar amb grans volums de dades, com els que típicament s'associen a un núvol de punts, requereix l'ús d'un software especialitzat (PolyWorks, CloudWorks,...) ja que els programes CAD convencionals no permeten una correcta visualització. A més, els programes especialitzats per treballar amb núvols de punts incorporen eines d'anàlisi pròpies de disciplines enginyerils, de forma que no existeixen eines específiques per a resoldre problemes geològics.

Aquest treball busca, principalment, desenvolupar una metodologia LIDAR que permeti extreure informació geològica de profit del núvol de punts, així com experimentar amb aquesta metodologia en un cas pràctic.

2. OBJECTIUS

Els objectius d'aquest treball es poden dividir en dos categories, metodològics i geològics.

2.1 Metodològics

El LIDAR és una eina per la que recentment s'ha apostat dins del grup de Geodinàmica i Anàlisis de Conques, primer amb l'adquisició d'un escàner làser i,des de llavors, amb la intenció de promoure la seva aplicabilitat dins dels diferents camps de la geologia. En aquesta línia, aquest treball és la primera pedra en el desenvolupament d'una metodologia LIDAR que ens permeti generar, de la forma més ràpida i realista possible, un model geomètric 3-D d'anàlegs de reservoris sedimentaris, amb el fi últim de la seva aplicació en el camp de la prospecció d'hidrocarburs.

2.2 Geològics

Per altra banda, aquest treball pretén ser la primera pedra d'un projecte més ambiciós que busca modelitzar, com a anàleg de reservori d'hidrocarburs, el Ventall Fluvial d'Osca. Amb aquest propòsit s'ha integrat la metodologia LIDAR amb el treball de camp "clàssic", que ha consistit en una caracterització sedimentològica, mitjançant l'aixecament de perfils estratigràfics, dels cossos susceptibles d'actuar com a reservoris de fluids. En futures campanyes altres afloraments seran escanejats per, finalment, integrar-los en un model de tot el ventall.

3. CONTEXT GEOLÓGIC

3.1. Història sintètica del sector central de la Conca de l'Ebre

La convergència i subducció de la placa Ibèrica sota la Europea, amb un escurçament mínim de 120 Km, va provocar l'estructuració de la Serralada Pirinenca durant el Paleogen i, conseqüentment, la creació de dos conques d'avantpaís, la d'Aquitània al N i la de l'Ebre al S. Contemporàniament a l'estructuració dels Pirineus també es van començar a estructurar les Serralades Costaneres Catalanes i la Serralada Ibèrica, acabant per definir aquestes tres serralades els marges de la Conca de l'Ebre. La conca es va anar omplint amb materials provinents de les tres serralades limítrofes i originats pel desmantellament de conques mesozoiques invertides, tot i que l'aportació dels Pirineus va ser la més significativa.



Figura 1. Reconstruccions paleogeogràfiques de la Serralada Pirinenca per dos intervals significatius del Paleogen inferior. Cal tenir en compte que mostren un golf més estret del que va existir en el Paleogen al estar basades en la posició actual dels afloraments.

Notar la important transgressió de l'Ilerdià Inferior.

Requadres A, B i C = àrees representatives de, respectivament, el domini de transició continent-mar, la zona de transició plataforma-talús i la conca hemipelàgica (de Vera, 2004).

En el període entre el Maastrichtià superior i l'Ilerdià inferior es va donar una transgressió generalitzada a tota la conca que va propiciar la proliferació, durant l'Eocè inferior-mig, d'ambients transicionals fluviolacustres, d'extenses plataformes carbonatades (Calcària d'Alveolines) i la deposició, a la zona més occidental, de sediments marins hemipelàgics (Figura 1). A l'Eocè superior l'ambient deposicional va esdevenir més somer i predominava l'acumulació de terrígens en fàcies continental i marina somera.

La continuada convergència entre les plaques Ibèrica i Europea va provocar, finalment, el tancament respecte al mar de la Conca de l'Ebre, donant com a resultat

l'acumulació en tota la conca d'extensos dipòsits de sal, alguns amb espessors de fins 2.500 m. Aquests dipòsits de sal van servir com a nivell de desenganxament pels encavalcaments resultants de deformacions posteriors, que van acabar per generar les Serres Exteriors. A la part N de la conca, la més pròxima als Pirineus, l'avenç cap al S del front d'encavalcaments va provocar la incorporació a l'orogen de parts de la Conca de l'Ebre, donant lloc a la formació de les conques tipus *piggy-back* de Jaca i de Graus – Tremp, limitades pel N i S pels Pirineus i per les Serres Exteriors respectivament. En aquestes conques la sedimentació va continuar després de quedar aïllades (Puigdefàbregas, 1975) i el seu registre és, en part, contemporani amb la sedimentació a la Conca de l'Ebre.



Figura 2. Esquema paleogeogràfic de la Conca Surpirenenca Central durant el Cuisià i Lutecià Inferior (de Vera, 2004).

Més endavant, durant tot l'Oligocè i fins el Miocè inferior, la subsidència tectònica va ser important, però la colmatació progressiva de la conca va donar lloc a la generació d'ambients de sedimentació endorreica continental. L'aixecament continu de les tres serralades va provocar la migració dels depocentres cap a zones més internes de la conca, generant extensos sistemes clàstics progradants des dels fronts orogènics. Aquests extensos (fins a 60 Km de radi) sistemes fluvials distributaris, o megaventalls fluvials, terminaven interdigitant-se amb sediments lacustres carbonatats a la seva part més distal, com mostra la Figura 2.

L'orogènia es va aturar a l'Oligocè superior - Miocè inferior, tot i que queden enregistrats petits episodis de deformació fins al Miocè superior (Figura 3). Aquest cessament en la creació de relleu va induir un descens en les taxes d'aport de materials clàstics, que van anar omplint la conca de forma passiva fins al Miocè superior. El final de l'ompliment sedimentari es va produir degut a un buidat erosiu iniciat per la captura, fa entre 12,5 i 8,5 Ma, del sistema radial existent a la conca tancada de l'Ebre per part d'un dels rius que drenaven cap al Mediterrani (segons García-Castellanos *et al.*, 2003).



Figura 3. Evolució paleogeogràfica de la Conca de l'Ebre de l'Eocè mig al Miocè superior. Distribució de fàcies i paleocorrents (de Vera, 2004).

Llegenda:

1: Conglomerats, sorres y lutites. Sectors proximals de ventalls fluvials i al·luvials; 2: Lutites i sorres. Sectors distals de ventalls fluvials i al·luvials i ventalls deltaics (plana i front deltaic); 3: Calcàries i margues. Sistemes lacustres i palustres carbonatats; 4: Calcàries, margues i sorres. Sistemes lacustres amb afinitat marina; 5: Calcàries oncolítiques i tobàcies. Sistemes fluviolacustres; 6: Guixos i margues. Sistemes lacustres evaporítics; 7: Lutites, sorres i calcàries. Àrea d'expansió-retracció dels sistemes lacustres; 8: Margues. Prodeltes i plataformes marines externes; 9: Calcàries i margues. Plataformes carbonatades.



Figura 4. Composició d'una imatge de satèl·lit i un mapa de carreteres de la zona d'Osca mostrant la localització de la zona d'estudi. Imatge obtinguda mitjançant Google Earth.

3.2. El Ventall Fluvial d'Osca

La zona de treball es situa al marge N de la Conca de l'Ebre, a uns 11 Km al NE d'Osca. Es tracta de l'aflorament de Montearagón, situat en el vessant de solana del Barranco Hondo (Figura 4), pertanyent al Ventall Fluvial d'Osca.

- 3.2.1. Història del ventall

El ventall es va començar a formar a l'Oligocè superior (Catià), quan l'activitat del Mantell de Guarga va elevar les conques de Jaca i de Graus – Tremp, incorporantles a les àrees font de la Conca de l'Ebre (Serres Exteriors). El sistema fluvial longitudinal existent, amb flux cap al NW i que va quedar representat estratigràficament per la la Fm. Campodarbe, es va veure reemplaçat per un sistema de ventalls radials fluvials i al·luvials, representats pels conglomerats de la Fm Uncastillo (Soler i Puigdefàbregas, 1970) i Fm Sarinyena (Quirantes, 1969), que van acabar per fossilitzar les làmines de les Serres Exteriors i l'anticlinal de Barbastro (Figura 5). Tots aquests sistemes radials, i d'altres procedents dels altres marges de la conca, descarregaven en un extens sistema lacustre, que es desplaçava cap al S o N en funció de la relació aports/subsidència.



Figura 5. Distribució de les fàcies Oligo-Miocenes a la part W de la Conca de l'Ebre. Les dades de paleocorrents dels Ventalls Fluvials de Luna i Osca estan basades en un total de 668 mesures I s'han agrupat en 26 àrees geogràfiques. El nombre de mesures de cada area ve indicada al costat de la fletxa que indica la mitja de paleocorrents (de Nichols i Hirst, 1998).

Les grans dimensions del Ventall Fluvial d'Osca es deuen, principalment, a tres factors: la gran zona que drenava el sistema fluvial que alimentava el ventall (alta productivitat de material detrític), l'elevada taxa de subsidència de la conca

d'avantpaís (creació d'espai disponible) i el fet de que es tractés d'una conca tancada (baixa capacitat de remobilitzar el material acumulat). A més, al llarg del marge de la conca es van anar formant petits ventalls, generats per rius que drenaven petites àrees, els materials dels quals apareixen interdigitats amb zones perifèriques del Ventall d'Osca. Les parts més proximals del ventall es troben deformades per l'Anticlinal de Barbastro (Figura 6), generat durant el Miocè per moviments associats al desplaçament cap al S del Mantell de Gavarnie, i que presenta al seu nucli unitats evaporítiques (Fm Barbastro) que, per la seva elevada capacitat de deformar-se, doten a l'anticlinal d'uns flancs de sorres Oligocenes quasi verticals. Aquest anticlinal provoca que les fàcies més proximals del ventall hagin sigut deformades i/o erosionades, el que fa que quasi tots els treballs previs realitzats es centrin en les zones més distals del ventall.

- 3.2.2. Consideracions paleoclimàtiques i paleogeogràfiques

Pel que fa al paleoclima, durant el Terciari mig la Península Ibèrica es trobava uns 6-7° més al S de la seva posició actual, fent que la paleotemperatura fos tan càlida, o més, que els 30° C de mitja actuals dels mesos estivals (Nichols i Hirst, 1998). No obstant, les característiques dels paleosòls, així com les comunitats de fòssils d'animals i plantes trobats, suggereixen que el clima deuria ser més humit que l'actual. Un altre indicador paleoclimàtic és la presència de dipòsits de guix a les parts terminals d'alguns ventalls al·luvials, on s'evaporaven les aigües riques en sulfats de calci provinents dels dipòsits Triàsics de les Serres Exteriors, indicant unes condicions de flux efímer. Les esquerdes de dessecació dels dipòsits d'ompliment de canal (citades per Nichols, 1987b) són una evidència de flux efímer als canals i de l'existència de períodes de relativa aridesa. Aquest paleoclima que es dedueix a partir de les observacions es deu considerar com hidràulicament deficitari (l'evaporació neta a la conca és major que la precipitació directa més els aports hídrics des del Pirineu), el que contribueix a la naturalesa distributaria terminal del Ventall Fluvial d'Osca. Els processos fluvials al marge de la conca es van donar en un ambient d'events efímers i catastròfics de precipitació que varen resultar en processos deposicionals de flux laminar no canalitzat.

En aquest context es va anar desenvolupant el Ventall Fluvial d'Osca, que va esdevenir en un sistema distributari radial amb uns 60 Km de radi, que ocupa una extensió aproximada de 5.000 Km² i té un espessor màxim d'uns 1.000 m (Hirst and Nichols, 1986; Hirst, 1991; Nichols and Hirst, 1998).

- 3.2.3. Dades de paleocorrents i estimació de l'àpex del sistema

Nombroses dades de paleocorrents, preses en diferents localitzacions, van ser tractades estadísticament per Jupp *et al.* (1987) i va veure que aquestes seguien un

patró radial. No obstant, i tot i seguir un patró, les paleocorrents es podien classificar en 3 grups: a les zones pròximes al marge de la conca presenten una tendència cap al NW, a mesura que ens allunyem d'aquest marge (cap a S) la tendència es va tornant cap a l'W, per acabar predominant, finalment, una orientació SW de les paleocorrents en els sectors de més cap al S (Figura 6). Aquestes variacions en les paleocorrents han sigut interpretades per Hirst (1991) com el producte d'un sistema fluvial que va evolucionar lentament durant l'Oligocè terminal i el Miocè inferior. Per tal d'establir la posició aproximada de l'àpex del sistema fluvial primer es va crear un datum, a la regió més proximal del ventall i aproximadament concèntric amb la terminació distal, per tal de mesurar la posició radial relativa respecte a ell de cada localització. Posteriorment, i un cop ben situades, es van tractar les dades de paleocorrents de les diferents localitzacions per, finalment, obtenir unes regions de confiança de la situació de l'àpex, que coincideixen amb les zones amb els dipòsits més grollers que es troben.



Figura 6. Distribució de les paleocorrents en diferents localitzacions del sistema d'Osca (de Hirst, 1991). L'àpex i les regions de confiança han sigut calculades estadísticament per Jupp *et al.* (1987). La línia discontínua representa el datum utilitzat com a origen pel càlcul de les posicions radials de les localitzacions.

Abreviatures:

F: riu Flúmen, Y: Yequeda, MA: Montearagón, G:Galocha, C: Canal del Cinca, AB: Albero Bajo, LS: La Serreta, A: Angues, P: Pertusa, SL: San Lorenzo, J: San Juan, M: Manzorrabal.

- 3.2.4. Arquitectura sedimentària: els cossos sorrencs

Els elements més distintius del Ventall Fluvial d'Osca, i l'objecte d'estudi d'aquest treball, són la multitud de cossos sorrencs inclosos en sediments fins que es poden apreciar en els diversos afloraments. Per tal de referir-nos a aquests cossos sorrencs cal aplicar una terminologia que serveixi tant per classificar-los segons la seva geometria com per fer referència al seu origen. Aquí s'ha triat la terminologia utilitzada per Hirst (1991) per a una zona d'estudi similar, i que es pot veure il·lustrada a la Figura 7.

- Els <u>cossos ribbon</u> (Figura 7A) es formen quan els paleocanals s'omplen de sediments abans de qualsevol migració lateral significant de la cicatriu erosiva (*scour*) original. L'elongat cos sorrenc resultant presenta una morfologia en planta que va de pràcticament rectilínia a bastant sinuosa. Els *ribbon* han sigut definits com cossos amb una relació W/T (amplada/potència) < 15 (Riba *et al.*, 1967; Friend *et al.*, 1986), i en el sistema d'Osca els valors típics per a aquest tipus de cossos varia entre 5 i 10. Normalment es pot observar un augment en la quantitat d'aquests cossos en les parts més distals dels ventalls fluvials, com a conseqüència de l'augment de l'estabilitat dels cursos d'aigua per pèrdua d'energia i, per tant, de capacitat d'erosionar, fent-se més freqüents les avulsions i els fluxos efímers.
- Els <u>cossos tabulars</u> (sheet sandstones) (Figures 7 B, C, D i E). Tenen relacions W/T > 15 i de vegades > 100. Es poden subdividir en tres subtipus depenent de la forma de la superfície d'erosió basal i del desenvolupament de *cutbanks*.

1) <u>Cossos tabulars de flux canalitzat</u> (Figures 7B i 7C). Es caracteritzen per uns *cutbanks* ben desenvolupats, que indiquen que van ser dipositats per un flux ben canalitzat (Figura 7B). En contrast amb els paleocanals estables que es colmaten per acabar donant cossos *ribbon*, els que dipositen aquestes extenses unitats són paleocanals lateralment inestables. Les estructures internes



Figura 7. Geometries distintives dels COSSOS sorrencs presents al Ventall Fluvial d'Osca, mostrant les seves estructures internes més característiques i la seva relació W/T (de Hirst, 1991).

indiquen, en molts cassos, una migració lateral considerable. Algunes unitats presenten històries complexes, amb canals que migren d'un costat cap a l'altre molts cops, acabant per generar cossos tabulars multiepisòdics (Figura 7C).

2) <u>Cossos tabulars de flux poc canalitzat</u> (Figura 7D). Un flux poc canalitzat es defineix com un flux amb un curs sense *cutbanks* ben desenvolupats. Internament poden no presentar estructures o presentar una laminació horitzontal. Els fluxos poc canalitzats han sigut descrits com a terminacions distals de canals terminals (Higgins, 1983), i al sistema d'Osca s'associen amb *terminal splays*.

3) <u>Cossos tabulars de flux per desbordament</u> (Figura 7E). Els trets distintius són la seva gran amplada respecte la seva potència (típicament menys de 1.5 m i molts cops per sota dels 0.5 m) i l'absència de *cutbanks*. L'extensió total d'aquests canals difícilment es pot observar, ja que solen estar tapats per material caigut o erosionats per altres paleocanals posteriors. Internament solen presentar laminacions horitzontals amb alternances de sorres i sediments més fins. Probablement són el producte de petits canals que s'incideixen al començament dels episodis de desbordament.

• Els <u>complexos amalgamats</u> (Figura 7F). Són conjunts de cossos sorrencs molt propers que interfereixen i s'amalgamen entre ells fins a un punt en que no es poden discernir els diferents cossos components.

- 3.2.5. Arquitectura fluvial a l'aflorament de Montearagón

Segons Hirst (1991), a l'aflorament de Montearagón el percentatge de materials d'ompliment de canal (*in-channel component*) és aproximadament del 15%. S'identifiquen dos petits horitzons de calcàries lacustres i nòduls aïllats de guix, que es desenvolupen tant en les fàcies fluvials com en les lacustres. Predominen les morfologies *ribbon* (85% dels cossos), moltes d'elles ben desenvolupades, que es presenten com cossos simples, multiepisòdics o, fins i tot, mostrant una migració lateral incipient. També es troben nombrosos cossos resultants de fluxos laminars no confinats i d'altres dipositats per petits complexos de canals de desbordament anastomosats. Els cossos resultants de canals lateralment inestables són pocs en quantitat però importants volumètricament parlant.

L'aflorament de Montearagón es troba en una localització perifèrica del ventall, prop del marge de la conca, fent que els petits ventalls procedents del front d'encavalcaments (Serres Exteriors) afectin a la dinàmica de la zona. Aquests petits ventalls podrien haver desviat els cursos d'aigua que passaven per la zona, explicant el fet de que a Montearagón el paleocorrent dominant tingui una component SW anòmala per la seva posició al ventall i que el percentatge de material d'ompliment de canal i la potència dels cossos sorrencs siguin menors que els valors esperats per la seva posició radial respecte el datum. Un altre paràmetre anòmal a Montearagón és la elevada quantitat de cossos *ribbon* tenint en compte que no es tracta d'una zona distal del ventall. Aquest fet es pot explicar amb l'activitat tectònica que es donava al front d'encavalcaments, i que podria haver facilitat que els cursos d'aigua avulsionessin abans de qualsevol migració lateral significativa, donant com a resultat multitud de paleocanals simples incidits tipus *ribbon*.

4. METODOLOGIA LIDAR

4.1. Principis físics del LIDAR

Els principis físics de l'escaneig làser són molt simples: un emissor emet un pols làser que viatja fins a un punt d'interès, s'hi reflexa parcialment i retorna cap a un detector. El temps que triga el pols làser en anar i tornar (temps doble) es divideix entre dos i es multiplica per la velocitat de la llum per trobar la distància exacta entre el punt i l'escàner.



d = distància (m)
v = velocitat de la llum (3x10⁸ m/s)
t = temps doble (s)

Els escàners també enregistren la intensitat (I), que és el nivell d'energia amb el que el pols reflectit arriba al sensor. Aquesta depèn de la freqüència específica del làser, però també de la reflectivitat de l'objecte i d'altres factors externs, com s'explicarà més endavant. Les coordenades geogràfiques de cada punt es calculen segons la posició de l'escàner quan el pols làser s'emet, posició que obtenim mitjançant sistemes GPS Real-Time Kinematic (RTK GPS).

L'escàner làser va escombrant la superfície d'estudi i el que acabem obtenint és un núvol de punts (retorns) totalment georeferenciat i que representa amb gran precisió la superfície d'estudi (Figura 8). Si, a més, representem la intensitat de cada punt amb una escala de grisos s'incorpora un efecte fotogràfic en B/N al núvol.



La resolució és, segons Slob *et al.* (2005), la distància mínima entre els punts mesurats i controla el nivell de detall que pot ser reconegut de l'escenari escanejat. Lichti (2005) va mostrar que aquesta resolució depèn de l'amplada del feix làser, l'espaiat entre els punts i la distància d'escaneig. Va combinar aquests tres paràmetres en l'anomenat EIFOV (Effective Field Of View), el qual defineix la resolució màxima que es pot obtenir des d'una certa distància (Taula 1).

Distància (m)	Interval angular de mostreig (mm)	Amplada del feix làser (mm)	EIFOV (mm)
5	0.13	12.85	11.0
20	0.52	15.14	13.2
50	1.30	20.50	17.7
100	2.60	29.00	25.0
200	5.20	46.00	39.8
500	13.00	97.00	84.2
800	20.80	148.00	128.6

Taula 1. Càlcul de la resolució màxima per l'escàner làser Ilris-3D d'Optech (Lichti, 2004).

Per tal d'una correcta interpretació de les dades obtingudes cal tenir en compte els diversos factors externs que influeixen sobre les mesures preses amb un escàner làser. Aquests són la reflectivitat del material (factor clau), la presència d'aerosols atmosfèrics i el soroll.

- Reflectivitat del material

L'escàner làser funciona com un sensor actiu, és a dir, emet la radiació que interactua amb el material a estudiar. Degut a aquesta interacció, part de l'energia emesa és reflectida, captada i codificada pel sensor. Per tant, la reflectivitat del material escanejat té una gran implicació vers la distància màxima des de la qual es pot treballar. La reflectivitat d'un material depèn bàsicament de dos paràmetres, el contingut en humitat i el seu color, de tal forma que els materials molt humits o amb colors molt foscos tenen una baixa reflectivitat i, per tant, s'han d'escanejar a relativament poca distància (a menys de 500 m aproximadament). Per altra banda, els materials molt reflectants poden saturar de radiació el sensor, impedint la presa de mesures. De totes maneres, rarament es troben materials geològics que donin problemes per la seva reflectivitat.

Aerosols atmosfèrics (Pols i vapor)

Les partícules de pols i vapor d'aigua poden interaccionar amb el feix làser, provocant la seva difracció i, per tant, la recepció d'un senyal més dèbil. Tot i això, mitjançant l'optimització de l'aparell i un tractament adequat de les dades aquestes interferències poden ser eliminades.

– Soroll (radiació de fons)

Els escàners determinen la radiació de fons abans de començar a escanejar per assegurar que aquesta no interfereixi en les mesures.

Per últim caldria remarcar que, com ja s'ha comentat, el LIDAR és una tècnica "d'il·luminació activa", és a dir que, al contrari que càmeres fotogràfiques i molts satèl·lits (sensors passius), genera el senyal que necessita per treballar i, per tant, ho pot fer amb llum o sense.

4.2. Instrumentació emprada a la campanya d'adquisició

L'escàner làser utilitzat en aquest projecte és el model **Ilris-3D**, fabricat per **Optech**. Segons el fabricant, aquesta eina té una velocitat màxima d'adquisició de dades de 2.000 punts per segon, pot treballar en un rang de 3m a 1.500 m de distància a l'objectiu, obté (a 100 m) una precisió en distància i posició de 7 mm i 8 mm respectivament, té un angle d'escombrada de 40° tant en la vertical com en la horitzontal i, a més de la distància, és capaç d'enregistrar la intensitat (I) de la radiació retornada en cada reflexió.



Figura 9. Aspecte extern de l'escàner láser Ilris 3-D.

La longitud d'ona amb que treballa l'eina és de 1.500 nm, per tant la radiació es situa dins del rang espectral de l'infraroig proper. Cal remarcar que com es tracta d'un producte làser de Classe 1 no existeix cap perill per a l'ull humà en cas d'exposició.

El sistema incorpora, tot integrat en el mateix aparell (Figura 9), un emissor de raigs làser, un receptor de radiació reflectida i una càmera fotogràfica digital (sensor CMOS). L'adquisició de dades es

controla i programa mitjançant una PDA equipada amb el software convenient i les dades s'emmagatzemen en un dispositiu de memòria portàtil connectat a un port USB.

Per tal de georeferenciar les mesures s'ha utilitzat un equip receptor RTK GPS de la marca Topcon, concretament el model **Topcon GB-1000** equipat amb una antena **PG-A1**, de la mateixa marca (Figura 10). Aquest sistema obté precisions de posicionament de l'ordre de pocs centímetres tant en alçada com en coordenades



Figura 10. Diversos instruments emprats durant l'adquisició de dades LIDAR. D'esquerra a dreta: RTK GPS Topcon GB-1000, antena Topcon PG-A1, càmera Minolta DiMage7 i PDA HP iPaq 4700.

geogràfiques, permetent la ubicació, amb gran precisió en l'espai tridimensional, de les dades obtingudes.

L'Ilris-3D incorpora una càmera digital per tal d'assignar a cada punt del núvol un color real i generar una imatge fotorealística. No obstant, la qualitat de les imatges obtingudes no és gaire bona en termes de resolució i contrast dels colors, així que es va optar per incorporar al sistema una càmera digital independent. Per aquest efecte s'ha utilitzat una **Minolta DiMage7** (Figura 10), que porta un sensor CCD de 5.24 milions de píxels que genera imatges de dimensions 2560 x 1920. Per tal que les fotos quadrin perfectament amb el núvol de punts un cop es superposin cal un ajust acurat dels paràmetres de la càmera, que es calibren per que tingui exactament la mateixa visió que l'escàner (Figura 11).



Figura 11. Fotografia, presa durant la campanya d'adquisició de dades, on es pot observar tot l'equip muntat i preparat per escanejar i, de fons, l'aflorament de Montearagón. Observar la gran distància entre l'aflorament i el punt d'escaneig (uns 600-700 m).

Per controlar tot el procés d'adquisició s'ha utilitzat una PDA **HP iPaq 4700** (Figura 10) equipada amb el software de control adient (Controller CE d'Optech). Mitjançant la PDA es pot ajustar tot l'entorn operatiu de l'escàner (l'àrea a escanejar, la densitat de punts desitjada,...). Les bateries portàtils de liti estàndards permeten



Figura 12. Grup electrògen Honda EU10i emprat en la campanya d'adquisició.

una autonomia d'escaneig d'unes 2-3 hores. Aquesta curta autonomia és un gran inconvenient quan s'ha de treballar, com en aquest cas, una zona molt extensa i que requereix de la realització de diversos escàners per obtenir un recobriment total. Per solucionar aquest problema s'ha optat per utilitzar un grup electrogen portàtil **Honda EU10i** de benzina (Figura 12) que, si bé suposa una gran càrrega durant el trasllat degut al seu pes (uns 13 Kg sense benzina), proporciona la possibilitat d'escanejar sense descans durant una jornada sencera. Cal remarcar que aquesta solució només és viable si la

zona d'estudi és fàcilment accessible, ja que en zones de difícil accés el transport del grup electrogen pot esdevenir molt esgotador.

4.3. Adquisició de dades

Durant la campanya de camp a Montearagón es van recollir dos tipus de dades, les dades LIDAR i les provinents d'observacions de camp, sintetitzades en perfils estratigràfics. Idealment la forma de treballar és escanejar una superfície i posteriorment aixecar columnes dels cossos sorrencs d'interès que contingui, o al revés, per desprès desplaçar tot l'equip per tal de caracteritzar la superfície contigua. A Montearagón aquest procediment no era l'adequat per dos motius principalment. El primer és que la superfície escanejada era un vessant de vall i les dades s'adquirien des de a l'altre vessant, fent que arribar a l'aflorament comportés prop d'una hora de trajecte (mirar la Figura 13). El segon és que la gran extensió lateral de l'aflorament, uns 900 m, requeria la realització de preses de dades des de vàries posicions bastant allunyades entre si, amb el desplaçament de tot l'operatiu que això comporta. Davant aquesta situació es va optar per utilitzar les primeres jornades per obtindre les dades LIDAR i dedicar-se, en jornades posteriors, únicament a realitzar el reconeixement directe dels cossos sorrencs i a aixecar columnes estratigràfiques.

4.3.1. Dades LIDAR

La campanya d'adquisició LIDAR va requerir d'un dia per la seva realització. El primer a fer va ser determinar els punts d'adquisició amb l'objectiu d'obtenir el màxim recobriment amb els mínims escanejats i desplaçaments possibles. Es va optar per tres punts bastant equidistants entre sí i on la topografia local permetia un fàcil accés i una bona panoràmica de l'aflorament (Figura 13). La distància entre els punts d'adquisició i



Figura 13. Imatge de satèl·lit superposada sobre un model d'elevació del terreny. Es mostra l'aflorament escanejat i les posicions d'escaneig. Imatge obtinguda de Google Earth.

l'aflorament varia en un rang entre els 500 i 600 m, el que, segons la Taula 1, es tradueix en una resolució màxima (EIFOV) d'entre 84 i 100 mm, resolució potser massa gran per l'escala a la que es treballa en aquest treball. A la hora de triar per on començar a escanejar es va tenir en compte com variaven les condicions d'il·luminació al vessant durant el transcurs del dia, amb l'objectiu d'aconseguir la millor llum possible per les fotografies digitals.

Des de cada posició d'adquisició es van fer diverses preses, tot fent rotar l'escàner sobre un trípode, per tal d'adquirir totes les perspectives possibles de l'aflorament des d'aquell punt. S'ha de tenir en compte que entre escàners consecutius s'ha de produir un solapament, en aquest cas proper a un 30%, necessari per posteriorment alinear-los e integrar-los tots en un núvol de punts de tot es vessant. El temps de realització de cada escanejat depèn de la densitat de punts que es vulgui obtenir, directament relacionada amb la resolució que es busqui i de l'àrea recoberta . En el nostre cas el temps mig per presa va ser d'uns 25 min. aproximadament, i es van fer uns 4 escàners per punt d'adquisició.

Suposadament les condicions ambientals no afecten l'aparell, però una exposició directa al Sol durant vàries hores pot provocar que la temperatura de l'escàner arribi prop de 40° (temperatura màxima recomanada) i es faci imprescindible cobrir-lo o, en un cas extrem, parar l'adquisició. També s'ha donat el cas en que una presa surt errònia, però normalment la pantalla LED que incorpora l'escàner informa sobre aquest error i es pot reiniciar l'adquisició. No cal pensar gaire per adonar-se'n del gran problema que suposaria tornar d'una campanya al camp amb la sensació de tenir unes dades que realment no han estat ben preses. És per això que un sistema que detecti els errors a l'instant es fa imprescindible.

4.3.2. Dades sedimentològiques

Quan es va donar per conclosa la fase d'adquisició de dades LIDAR es va procedir a la confecció dels perfils estratigràfics dels cossos d'interès, en aquest cas cossos sorrencs susceptibles d'actuar com a reservoris. Aquest propòsit va comportar un treball de dos jornades senceres degut, principalment, a que els afloraments es troben en un vessant bastant escarpat, inestable e inaccessible. Tot i tenir l'aflorament una extensió lateral considerable, es podrien haver aixecat totes les columnes en una sola jornada de no ser per les circumstàncies abans esmentades.

La caracterització acurada de tots els cossos sorrencs escanejats hagués suposat una campanya de molts dies de duració, així que es va optar per fer una selecció dels més representatius. Aquesta tria es va fer atenent a diversos criteris que busquen l'obtenció d'uns perfils representatius de l'aflorament. Diverses morfologies d'aquests cossos sorrencs són presents a l'aflorament amb diferents freqüències, i totes han de quedar representades a les columnes estratigràfiques. El punt exacte de realització dels perfils es va triar buscant on eren més visibles les propietats i geometria interna dels cossos.

Un cop davant el cos a representar el primer que es va fer és mesurar la seva potència i caracteritzar-lo granulomètricament. Un cop fet, el següent pas va ser buscar discontinuïtats internes (cicatrius erosives, passades de materials fins,...que solen suposar barreres de permeabilitat) i buscar indicadors fiables de paleocorrent (marques de base, ripples, imbricacions,...) per aconseguir deduir la història de formació del dipòsit i per poder predir el comportament d'un suposat flux que travessi el cos.

4.4. Processat de les dades

De la campanya de camp es torna amb un conjunt d'escàners , fotografies i perfils estratigràfics que cal processar, integrar e interpretar.

Pel que fa als escàners, el primer pas és processar les dades *raw* (en brut) per convertir-les en un objecte en format 3D, conversió que efectua el programa Parser subministrat pel fabricant. Cada presa LIDAR té associada una fotografia digital que s'utilitza per, a partir dels seus píxels i mitjançant novament el programa Parser, assignar un color a cada punt i obtenir un efecte fotorealístic pel núvol de punts (Figura 14). El format de sortida d'aquestes dades és un fitxer de text tipus ASCII compost de columnes que donen les coordenades X Y Z de cada punt, així com la intensitat de la reflexió i un color RGB. Cal tenir en compte que un sol escàner pot contenir prop de 3 milions de punts, depenent de la densitat de punts triada i de la



Figura 14. Imatges del núvol de punts obtingut amb un sol escaneig. La imatge de l'esquerra correspon a la visualització del núvol de punts amb tons de grisos utilitzant una font d'il·luminació virtual. La imatge de la dreta és el mateix núvol però els punts colorejats segons la fotografia digital.

distancia, pel que l'ús d'un software especialitzar per tractar-los és imprescindible. Aquí s'ha emprat el programa Innovmetric PolyWorks, que ofereix un gran potencial per visualitzar núvols de punts així com diverses eines pel seu anàlisi.

El següent a fer és fusionar els 10 escàners que es van realitzar per tal d'obtenir una visió global de tot l'aflorament. Amb aquest objectiu PolyWorks incorpora el mòdul IMAlign, que permet identificar els mateixos punts en dos preses consecutives, gràcies al solapament entre aquestes, i crear una matriu d'alineació que permet fusionar amb precisió els dos núvols de punts (Figura 15).

Amb les diferents preses ja alineades s'ha de procedir a georeferenciar tot l'aflorament mitjançant les dades de posicionament dels punts d'escaneig, proporcionades pels RTK GPS. Inicialment els núvols de punts prenen com a sistema de



Figura 15. Visualització de 3 núvols de punts alineats. Cada color representa una presa i es pot observar com es solapen entre ells en un 30% aproximadament.

coordenades el propi de l'escàner però, un cop es situen en sistema UTM les estacions de presa de dades, els punts mesurats queden perfectament localitzats en aquest nou sistema de referència. Aquesta georeferenciació de les dades serà de gran utilitat quan, en posteriors campanyes, es miri de crear un model digital complert del Ventall Fluvial d'Osca a base d'anar integrant escàners de diversos afloraments. El número de punts que conté el model de tot l'aflorament és d'uns 20 milions, i un ordinador convencional, com l'utilitzat en aquest treball, al treballar amb tots alhora no és capaç de moure el conjunt amb suficient agilitat. Per solucionar aquest problema s'ha optat per alleugerir el núvol traient tots els punts que no aporten informació útil per a l'objectiu del treball, que es centra el l'estudi de l'aflorament com a anàleg de reservori. Per tant l'interès es centra en els cossos sorrencs i en les seves propietats internes, així com en la distribució espaial i pautes de evolució temporal d'aquests.

El programa PolyWorks no ofereix unes eines de selecció adients per tal d'aïllar els punts que representen un cos sorrenc de la resta, ja que no permet generar una figura geomètrica precisa que englobi tots els punts desitjats. A més, al seleccionar els punts directament sobre núvol, sovint es perd de vista la geometria del cos i no se sap ben bé per on traçar els seus límits. És per aquests motius que es treballa a partir de fotografies per tal de digitalitzar els cossos i posteriorment seleccionar els punts que els representen.

El programa triat per digitalitzar sobre les fotografies és el Microstation v8 de Bentley, el qual proporciona la possibilitat de treballar amb diferents capes. Primer



Figura 16. Instantània de pantalla mostrant l'espai de treball. Es tracta d'una captura simultània dels dos monitors amb els que s'ha treballat. Al monitor de l'esquerra es pot veure el programa PolyWorks amb el qual es manipulen els núvols de punts. Al monitor de la dreta es veu el programa Microstation V8, on es col·loquen les fotografies per tal de digitalitzar els cossos d'interès.

s'agafen totes les fotografies i es col·loquen en una mena "d'escriptori virtual" formant una capa per, posteriorment, crear una altra capa superposada que contingui tots els polígons tancats creats a partir de la delimitació dels cossos sorrencs.

Les fotografies són una eina bastant bona per tal de delimitar geometries, però és necessari que existeixi un contrast marcat de colors entre els materials que vols discriminar per tal de poder digitalitzar amb precisió. A Montearagón tots els materials del vessant tenen un color ocre bastant semblant i, per tant, són difícils de distingir entre ells. Per minimitzar aquest problema s'han incorporat dos criteris addicionals, com són tenir en compte les ombres que projecten el materials més competents (sorres) pel sortint que generen al vessant i treballar amb una fotografia tenint present el seu núvol de punts associat (Figura 16), on modificant la posició de les fonts d'il·luminació artificials es poden fer destacar els cossos d'interès.

Un cop creats tots els polígons s'ha de desactivar la capa de les fotografies per quedar-nos només amb les àrees, prèviament omplertes amb un color, que delimiten cossos d'interès (Figura 17). D'aquesta capa se n'obtindrà una imatge en format JPG que representa a cada fotografia, amb les mateixes dimensions que aquesta, i on només sortiran àrees acolorides. Aquesta imatge s'ha de projectar a sobre del núvol de punts, utilitzant novament el programa Parser, aconseguint que els punts pertanyents a cossos sorrencs quedin aïllats de la resta pel seu color.

Amb el núvol acolorit es poden seleccionar només el punts sense color i eliminar-los, obtenint finalment un núvol de punts alleugerit i on només queden representats els cossos sorrencs objecte d'estudi (Figura 18).



Figura 17. Imatges de Microstation V8 que mostren com queden representats els cossos sorrencs un cop digitalitzats. Es genera una imatge només amb les àrees digitalitzades (dreta) que posteriorment servirà per seleccionar els punts que interessen del núvol de punts i poder eliminar la resta.

Un cop s'han processat tots els escàners de les diferents perspectives de l'aflorament es pot procedir a integrar-los tots per tal d'obtenir-ne una visió global, que en aquest cas sí que podrà visualitzar-se íntegrament en un ordinador convencional, ja que el número de punts que conté el nou núvol és, en aquest cas, una vintena part dels que contenia l'original (s'ha passat de més de 20 milions a 1 milió).



Figura 18. Diferents etapes en el processat dels núvols de punts. A dalt, a l'esquerra, es pot observar el núvol de punts sense modificar. A dalt, a la dreta, es poden veure els punts que formen part dels cossos sorrencs seleccionats, mitjançant la digitalització en Microstation V8. A sota, a l'esquerra, només queden els punts d'interès, la resta han sigut eliminats. A sota, a la dreta, detall de la geometria i l'estructura interna d'un cos sorrenc.

5. RESULTATS

5.1. Metodològics

Com ja s'ha explicat en l'apartat d'objectius, en aquest treball són bàsicament de caire metodològic i estan orientats a desenvolupar una forma de procedir amb la tècnica LIDAR que sigui el més ràpida i profitosa possible. En aquest sentit, diversos procediments han sigut ideats per tal de facilitar les tasques d'adquisició i processat de dades.

Durant l'adquisició, el primer que s'ha de remarcar és la necessitat d'un subministrament energètic suficient per poder escanejar durant una jornada sencera i aprofitar al màxim el temps. Per aquest propòsit es recomana la utilització de grups electrògens de benzina, que poden subministrar l'energia necessària per escanejar sense preocupacions durant un dia sencer. Tot i això, el seu transport pot ser problemàtic en el cas d'afloraments amb un accés complicat. Un altre problema que s'ha trobat al planificar l'adquisició és el que es deriva del moviment del sol al llarg del



Figura 19. Captura de pantalla de Microstation V8 on es mostren dos fotografies de la mateixa perspectiva de l'aflorament, la de l'esquerra està feta amb un valor baix d'exposició per tal de treballar la zona il·luminada i la de la dreta s'ha fet amb un valor alt d'exposició per treballar amb la zona a l'ombra. Es pot veure, a sota, com s'han ajuntat els cossos digitalitzats en cada fotografia per tal d'obtenir una digitalització correcta de tot l'escenari escanejat.

dia, amb la conseqüent variació en les condicions d'il·luminació que comporta. Quan en una fotografia una zona està ben il·luminada i l'altre roman a l'ombra cal un ajust en l'exposició de la càmera per tal que ni les zones il·luminades quedin massa clares ni les zones a l'ombra quedin massa fosques. Com aconseguir aquests dos propòsits amb una mateixa captura fotogràfica no és possible, es va optar en aquests casos per fer dues fotografies des de la mateixa posició, baixant l'exposició en una i augmentant-la en l'altra, per tal d'optimitzar la zona il·luminada i fosca respectivament. Posteriorment es digitalitzen en cadascuna els cossos que es troben en la seva zona optimitzada i s'ajunten els polígons de totes dues fotografies en una mateixa imatge, com es pot veure a la Figura 19.

Durant la fase de processat de dades també van sorgir diverses dificultats, quasi totes degudes a la manca d'un software especialitzat en anàlisi geològic de núvols de punts, que es van haver de superar combinant diferents eines. La primera d'aquestes dificultats es va presentar quan s'intentava treballar a l'ordinador amb totes les preses a la vegada, ja que es requereix un ordinador potentíssim per moure els més de 20



Figura 20. Visualització de la mateixa zona de l'aflorament de Montearagón en dos imatges. La imatge superior correspon a una fotografia digital i la imatge inferior correspon al núvol de punts del mateix sector. Notar com cossos no delimitables a la fotografia queden molt ben definits al núvol de punts.

milions de punts que conformaven el núvol inicial de tot l'aflorament. Davant aquesta adversitat es va optar per reduir el número de punts utilitzant només els que donen informació d'interès, en aquest cas els punts pertanyents als cossos sorrencs. Per aconseguir aquest filtrat de punts es feia necessària una eina precisa de selecció d'àrees, eina que el programa de visualització de núvols de punts PolyWorks no proporciona. Aquest inconvenient es va solucionar utilitzant les fotografies digitals i un programa que permeti digitalitzar-les, en aquest cas el Microstation V8, per tal de desprès exportar aquestes àrees digitalitzades al núvol de punts i, posteriorment, eliminar els punts accessoris.

Tot i això, les fotografies no sempre permeten distingir uns materials dels altres, sobretot si els seus colors són semblants, les condicions de llum no són òptimes o la fotografia es fa des de llargues distàncies. En aquest treball s'han donat tots aquests factors, fent que es necessitessin alguns criteris extra per tal de delimitar els cossos correctament. Aquest criteri extra es va obtenir treballant conjuntament amb les fotografies i els núvols de punts, ja que en aquests queda reflectida la geometria dels cossos i, en cas de dubtes en la fotografia, permeten una digitalització més acurada, com es pot observar a la Figura 20.

El resultat de tot aquest procés és un núvol de punts on hi són representats tots els cossos sorrencs d'interès (Figura 21) i que en aquest cas si que es pot visualitzar i analitzar amb l'ordinador sense problemes.

5.2. Geològics

Un cop assolits els objectius metodològics que van motivar aquest treball es va procedir a l'anàlisi geològic de la informació obtinguda. El treball realitzat ha servit per generar un model digital extremadament precís de l'aflorament de Montearagón, on la geometria aflorant dels cossos sorrencs ha quedat perfectament definida. Un altre tema és la utilitat pràctica de les dades obtingudes. Cal tenir en compte que la introducció d'una tècnica en un camp d'investigació rarament dóna resultats útils i contrastats fins que no s'ha perfeccionat la seva metodologia i, en aquest cas, el software necessari per processar les dades.

Aquí s'ha optat per integrar les dades geomètriques proporcionades pel LIDAR amb columnes estratigràfiques dels cossos més representatius per tal de tenir representada tant la seva geometria com les seves característiques sedimentològiques, amb la finalitat última d'avaluar la seva capacitat per actuar com a possible reservori d'hidrocarburs. Per aquest efecte s'han aixecat 12 columnes estratigràfiques sintètiques, les quals es poden consultar a l'annex adjunt a aquest treball. Els punts de realització de les columnes es pot veure a la Figura 22.



Figura 21. Imatge que mostra tots els cossos escanejats, posteriorment digitalitzats i aïllats de la resta de materials, de l'aflorament de Montearagón.





Figura 22. Situació de les columnes estratigràfiques realitzades a l'aflorament de Montearagón. Es pot observar com les diverses tipologies de cossos presents han quedat totes representades. A l'annex adjunt es poden veure les columnes i el punt exacte de realització de les mateixes.

Figura 23. Visualització dels diferents cossos sorrencs que componen l'aflorament de Montearagón on s'ha inclòs la nomenclatura amb la que es denomina als diferents cossos sorrencs en aquest treball. Remarcar que la numeració correspon a l'ordre de realització de les columnes estratigràfiques, i en cap cas té implicacions temporals o genètiques.

Per tal de caracteritzar els diferents cossos sorrencs s'han utilitzat els criteris geomètrics que va utilitzar Hirst (1991) i dades sedimentològiques provinents de les columnes estratigràfiques realitzades. La Taula 2 és una síntesi d'aquestes observacions.

Els resultats d'aquest anàlisi mostren que de 12 cossos estudiats, 8 tenen morfologia de cos tabular, 4 de cos *ribbon* i 1 es tracta d'un complex amalgamat. Aquests resultats no encaixen amb els que va obtenir Hirst (1991) a la mateixa zona i que afirmaven que la tipologia dominant a Montearagón eren cossos tipus *ribbon*, amb una presència del 85% respecte el total. En l'apartat de conclusions i discussió s'intentarà donar una explicació a aquesta significativa diferencia entre els resultats així com fer una avaluació preliminar de les propietats com a reservori dels diferents tipus de cossos en base a les dades sedimentològiques.

Posició estratigràfica	Cos	Amplada	Potència	Ampla./Pot.	Classificació	Paleocorrents	% sorres > fines
A	7	281.688	2.04	138.0823529	Cos tabular de flux poc canalitzat		38
81	6	70.705	2.95	23.96779661	Cos tabular de flux canalitzat		34
B2	8	125.139	3.523	35.52057905	Cos tabular multiepisòdic	220	21.5
С	9	107.097	2.228	48.06867145	Cos tabular de flux poc canalitzat		36.7
D1	1	237.52	4.817	49.30869836	Cos tabular multiepisòdic	230	24
D2	10	454.944	5.534	82.2088905	Cos tabular multiepisòdic	170, 230	15
E	3	137.963	6.503	21.21528525	Cos tabular multiepisòdic	280, 250, 260, 115	27
F1	2	25.849	2.687	9.62002233	Cos ribbon	300	50
F2	4	13.05	2.533	5.151993683	Cos ribbon		30
F3	11	12.728	3.262	3.901900674	Cos ribbon		37
G	5	38.586	3.121	12.36334508	Cos ribbon		40
н	13	278.882	1.293	215.6860015	Cos tabular de flux per desbordament		
G-I	12	68.524	8.024	8.539880359	Complex amalgamat	245	52.5
						Mitja = 230	

Taula 2. Resultats obtinguts a partir de l'anàlisi geomètric i sedimentològic dels cossos estudiats. Els cossos s'han ordenat segons la seva posició estratigràfica dins l'aflorament, anant dels cossos més antics (A) als més moderns (I). Es mostren també les dades de paleocorrents obtingudes, així com la proporció de sorres amb mida de gra superior a sorra fina. La numeració dels cossos sorrencs no atén a cap criteri objectiu i la correspondència entre número i cos i es pot veure a la Figura 23.

6. DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS

Aplicant la nova metodologia LIDAR aquí desenvolupada s'ha arribat a uns resultats que, com ja s'ha comentat, divergeixen amb els obtinguts per Hirst (1991). Aquesta divergència es pot deure als diferents criteris utilitzats per dictaminar si diversos afloraments contigus pertanyen a un mateix cos sorrenc o es tracta de cossos genèticament independents. Un altre factor que pot influir en aquesta divergència són els mètodes utilitzats per prendre les mesures. Hirst s'havia de basar en mètodes tradicionals, consistents en dades preses directament al camp i fotografies, per mesurar les amplades dels cossos, amb el gran marge d'error que això comporta. Aquí, a part de la campanya de camp, on s'han pogut comprovar in-situ les relacions entre els diferents cossos aflorants, es parteix d'un model digital molt precís que permet mesurar distàncies i dimensions quasi exactes, les quals no es veuen alterades per cap factor extern o de perspectiva. Per tant, es considera que la diferencia de resultats entre aquest treball i el de Hirst (1991) es deu bàsicament als diferents criteris utilitzats per definir quins afloraments pertanyen a un mateix cos sorrenc, amb les implicacions que això comporta al determinar la seva amplada total, i a la diferencia de precisió entre el mètode LIDAR i els mètodes tradicionals.

En quant a l'arquitectura sedimentaria, Hirst atribuïa l'elevada proporció de cossos tipus *ribbon* a que la zona d'estudi es trobava prop del marge actiu de la conca i l'activitat tectònica d'aquest generava inestabilitats en els cursos d'aigua. Com que aquesta inestabilitat en l'ambient deposicional no permetia una evolució "normal" d'aquests cursos fluvials, per la proliferació de fenòmens d'avulsió abans de qualsevol migració lateral significativa, el resultat eren multitud de paleocanals inconnexos i poc desenvolupats. Segons el que suggereixen els resultats d'aquest treball, aquests fenòmens d'avulsió no deurien ser tan freqüents i, per tant, la taxa de deformació del front d'encavalcaments deuria ser més baixa que la necessària per crear un ambient on dominés la deposició de cossos tipus *ribbon*.

En quant a l'evolució del sistema, a la Taula 2 es pot observar com la tendència general és la de trobar major quantitat de cossos *ribbon* en posicions estratigràfiques més elevades, el que podria indicar un augment en l'activitat tectònica al front d'encavalcaments de les Serres Exteriors en els temps més recents que hi han representats a l'aflorament.

En quant a les paleocorrents, la mitja de totes les mesurades és d'uns 230°, pel que es pot concloure que el flux anava predominantment cap al SW. Aquesta direcció de paleocorrent encaixa perfectament amb l'estimada per treballs previs. Tot i això, en afloraments anàlegs de localitzacions properes les paleocorrents tendeixen cap al W-NW. Es considera que aquesta diferència en la direcció del flux es dóna per la influència de petits ventalls provinents del front de les Serres Exteriors i que desviaven el cursos d'aigua a la zona de Montearagón.

Des d'un punt de vista petrolier, els materials que configuren el complex amalgamat són els que tenen, en percentatge, major mida de gra. Aquesta propietat, unida amb una gran interconnexió entre els cossos sorrencs components i unes dimensions considerables, fa que es conclogui que els complexos amalgamats són els millors reservoris d'hidrocarburs presents a l'aflorament de Montearagón. No obstant, observant la variació del percentatge de sorres mitjanes i gruixudes que contenen els cossos, es pot observar que tots els cossos tipus *ribbon* contenen, com a mínim, un 30% de sorres mitjanes/gruixudes. Per tant també és tracta paleocanals amb bones propietats com a reservoris d'hidrocarburs. Tot i això cal tenir en compte que es tracta de cossos amb poca extensió lateral i, per tant, de difícil localització al subsòl per tal d'extreure'n els hidrocarburs que pugin contenir.

Tot el treball aquí realitzat ha servit per avaluar el potencial del LIDAR en l'anàlisi d'afloraments sedimentaris. S'ha comprovat la gran rapidesa i precisió amb que la tècnica és capaç de capturar la geometria de la superfície d'estudi. No obstant, existeixen diversos aspectes a millorar, com són la portabilitat de l'equip d'adquisició, el subministrament energètic i la manca d'un software especialitzat en anàlisi geològic de núvols de punts que permeti extreure'n la màxima informació possible de forma automàtica. Tot i això, mitjançant futures investigacions i futurs avenços en la metodologia, software i tecnologia (incorporació de càmeres hiperespectrals), així com la integració d'altres dades (perfils de raigs gamma, porositat, permeabilitat,...), la tècnica LIDAR pot representar una revolució en el camp de l'anàlisi d'afloraments en un futur proper.

<u>Agraïments</u>

Aquest treball ha sigut possible gràcies a l'ajut d'Emilio Ramos i Pau Arbués, codirectors del mateix, i David García, tècnic del LIDAR.

BIBLIOGRAFÍA

Bellian, J. A., Jennette, D. C., Kerans, C., Gibeaut, J., Andrews, J., Yssldyk, B., et al. (2002). 3-Dimensional digital outcrop data collection and analysis using eye-safe laser (LIDAR) technology. *American Association of Petroleum Geologists, Annual Meeting, Programs with abstracts.* Houston.

Bellian, J. A., Kerans, C., & Jennette, D. C. (2005). Digital Outcrop Models: Applications of terrestrial scanning LIDAR technology in stratigraphic modelling. *Journal of Sedimentary Research, Vol. 75*, 166-176.

Fisher, J. A., Nichols, G. J., & Waltham, D. A. (2007). Unconfined flow deposits in distal sectors of fluval distributary systems: Examples from the Miocene Luna and Huesca Systems, northern Spain. *Sedimentary Geology, in press*.

Friend, P. F., Hirst, J. P., & Nichols, G. J. (1986). Sandstone-body structure and river processes in the Ebro Basin of Aragón, Spain. *Cuadernos de Geología Ibérica, Vol. 10*, 9-30.

García-Castellanos, D., Vergés, J., Gaspar-Escribano, J., & Cloetingh, S. (2003). Interplay between tectonics, climate and fluvial transport during the Cenozoic evolution of the Ebro Basin (NE Iberia). *Journal Geophysics Research, Vol.108, B7*.

Higgins, D. T. (1983). End reaches of three ephemeral streams in Sudán. A C. M. Elliot, *River Meandering, Proceedings of the Conference Rivers '83* (p. 170-179). American Society of Civil Engineers.

Hill, R. E., Hasiotis, S. T., & Friedmann, S. J. (1999). Architectural Analysis of an Amalgamated Channel System, Huesca Fluvial Megafan, Ebro Basin, Spain. Exxon Reservoir Geometry & Continuity Division.

Hirst, J. P., & Nichols, G. J. (1986). Thrust tectonic controls on the Miocene alluvial distribution patterns, southern Pyrenees. A P. A. Allen, & P. Homewood, *Foreland Basins* (p. 247-258). International Associations of Sedimentologists, Special Publication, Vol. 8.

Hirst, J. (1991). Variations in alluvial architecture across the Oligo-Miocene Huesca Fluvial System, Ebro basin, Spain. A E. D. Miall, & N. Tyler, *The Three-Dimensiona Facies Architecture of Terrigenous Clastic Sediments and Its Implications for Hydrocarbon Discovery and Recovery*. (p. 111-121). Tulsa Oklahoma: SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology, Vol. 3.

Jupp, P. E., Spurr, B., Nichols, G. J., & Hirst, J. P. (1987). Statistical estimation of the apex of a sediment distribution system from paleocurrent data. *Mathematical Geology, Vol. 19*, 319-333.

Lichti, D. D. (2004). A resolution measure for terrestrial laser scanners. XXth ISPRS Congress: International Archieves of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Istanbul.

McCaffrey, K. J., Jones, R. R., Holdsworth, R. E., Wilson, R. W., Clegg, P., Imber, J., et al. (2005). Unlocking the spatial dimension: digital technologies and the future of geoscience fieldwork. *Journal of Geological Society, London, Vol. 162*, 1-12.

Nichols, G. J. (1987b). Structural controls on fluvial distributary systems-the Luna System, Northern Spain. A F. G. Ethridge, R. M. Flores, & M. D. Harvey, *Recent Developments in Fluvial Sedimentology* (p. 269-277). SEPM, Special Publication.

Nichols, G. J. (1978a). Syntectonic alluvial fan sedimentation, southern Pyrenees. *Geological Magazine, Vol. 124*, 121-133.

Nichols, G. J., & Fisher, J. A. (2007). Processes, facies and architecture of fluvial distributary systems deposits. *Sedimentary Geology, in press*.

Nichols, G. J., & Hirst, J. P. (1998). Alluvial Fans and Fluvial Distributary Systems, Oligo-Miocene, Northern Spain: Contrasting processes and products. *Journal of Sedimentary Research, Vol. 68*, 879-889.

Optech Incorporated. (sense data). *Ilris 3-D Homepage.* Consultat el 2008, a http://www.optech.on.ca/prodilris.htm

Piugdefábregas, C. (1975). La sedimentación molásica en la cunca de Jaca. Pirineos, Vol. 104, 1-188.

Puigdefábregas, C., & Soler, M. (1973). Estructura de la Sierras Exteriores Pirenaicas en el corte del Río Gallego (Provincia de Huesca). *Pirineos, Vol. 109*, 5-15.

Quirantes Puertas, J. (1969). Estudio sedimentológico y estratigráfico del terciario continental de los Monegros. *Universidad de Zaragoza, no publicat.*, 101 p.

Riba, O., Villena, J., & Quirantes, J. (1967). Nota preliminar sobre la sedimentación en paleocanales terciarios de la zona de Caspe-Chiprana (prov. Zaragoza). *Annales Edafología y Agrobiología, Vol. 26*, 617-634.

Slob, S., Van Knapen, B., Hack, R., Turner, K., & Kemeny, J. (2005). Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning . *Transportation Research Board 84th Annual Meeting*. Washington.

Soler, M., & Puigdefábregas, C. (1970). Líneas generales de la Geología del Alto Aragón occidental. *Pirineos, Vol. 96*, 5-20.

Vera, J. A. (2004). Geología de España. Madrid: SGE-IGME.

Vidal, J. R. (1981). El Cuaternario al E. de Huesca. Acta Geológica Hispánica, t. 16, 159-164.

Xu, X., Aiken, C. L., Bhattacharya, J. P., Corbeanu, R. M., Nielsen, K. C., McMechan, G. A., et al. (2000). Creatin Virtual 3-D Outcrop. *The Leading Edge, Vol. 19, no. 2*, 197-202.

<u>ANNEX</u>

Aquest annex és un recull de les geometries dels diferents cossos sorrencs estudiats (del 1 al 13) i que posteriorment han servit per generar la classificació que es pot observar a la Taula 2. S'adjunten les columnes estratigràfiques de cada cos i la seva localització exacta a l'aflorament.

LLEGENDA:



Clastes tous

Localització de la columna estratigràfica



Laminació encreuada

Laminació paral·lela









COS 1

COS 2



			0	1	1	~	-5
	40		4	1	5.4	5	e.0
	00		1			1	1
6 -	F J						
()				÷			_
(4.)	1.10						
	1						
	1.17		[
				-			
0		-	1.				
3		× .	1		1		
	1.5	-		-	-/		
	3 1	- 1	· *.	-		X	
	1.5	<u>e</u>	¢**	-	1	1	
	1	1 -	-		1.		
	1	~	Ň	-	$\dot{}$	$\mathbf{\Psi}$	
		10.00		- 1			
	1.4			- 24		£	II.
				2			
	1.1		1.				
	1 -:	1.	t.	1			
	3.		-	-			
	· · 1	1					
		1		-			
3-	10			-			
	1.		1.	•	1		
	1 - 1	1		1	- /		
	11		1		.1		
	T	\sim		4	-ii		
	11-1						
				•••			
,				-			
4	940	Show		-	X	1	AL.
	1						
	1 1 - 1						
					+++		
	1.1.1		H1				
				•			
1	1.1	++++					
	1	12.4.9.3	1		11		
	111				11		
	l l'	++++		11			
1111	1 1-	****	ŀ	+++	111		
	1 11						



















			<u>s</u> .			
	2.	\$	` \$`f	Ϋ́ς;	6.2	
(m)		····				
2 -						
		0		2	π	
1 -		2		5	ш	
	¥.	-	-1			
0		• • •	Ð			















	1111
25	5

	2·
	0.0.0.0.0
.10	F Prore
100-2	
2 1	1
/	Contraction of the second seco
(m) /	
n h	an p. :
15:	
+13	Ý · · · · ·
14	F
12	
	1 · · · · ·
0 1:	D
6717	
	1 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1.	
I.	F
10.10	Lain the second
12-1	1 2 - 1
1.6	1
1.1	
1.	Pair A
4 -	
1.1	
11.	
19	
N.	
0 L	4
-T	*****



z L ×









