



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

SIMSAFADIM-CLASTIC: Modelización 3D de transporte y sedimentación clástica subacuática

Òscar Gratacós Torrà



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial – CompartirIgual 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – CompartirIgual 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0. Spain License.**

Universitat de **Barcelona**
Grup de **Geodinàmica i Anàlisi de Conques**
Departament de **Geodinàmica i Geofísica**

**SIMSAFADIM-CLASTIC: Modelización 3D de transporte
y sedimentación clástica subacuática**

Memòria presentada per:

Òscar Gratacós Torrà

Per optar al grau de Doctor en Geologia

Aquesta tesi s'ha realitzat dins del programa de Ciències de la Terra, bienni 2000/2002, de la Universitat de Barcelona, sota la direcció del Dr. Klaus Bitzer, Dr. Lluís Cabrera Pérez i el Dr. Eduard Roca i Abella.

Barcelona, Octubre de 2004

Dr. Klaus Bitzer

Dr. Lluís Cabrera Pérez

Dr. Eduard Roca i Abella

Esta tesis ha sido posible gracias a la beca predoctoral de Formación de Profesorado Universitario (AP9940993629) otorgada por la Dirección General de Enseñanza Superior e Investigación Científica del Ministerio de Educación y Cultura. Con el soporte del *Grup de Recerca de Geodinàmica i Anàlisi de Conques* (2001SGR-000074), a los proyectos MARCONI (REN2001-1734-C03-03/MAR) y CARES (BTE 2001-3650), y a la *Distinció per a la Promoció de la Recerca Universitària* otorgada al Dr. Eduard Roca Abella por la Generalitat de Catalunya (resolución UNI/2117/2003).

Als meus pares

Índice

Índice	I
Agraïments	V
Resum	VII
Abstract	XIII
Índice de ilustraciones y tablas	XIX
Símbolos y términos	XXV
<u>Capítulo 1. Presentación</u>	1
1.1 Introducción y objetivos	3
<u>Capítulo 2. Conceptos previos y antecedentes</u>	7
2.1 Introducción	9
2.2 Conceptos previos	10
2.3 Metodología de trabajo	15
2.4 Tipos de modelo	17
2.4.1 Modelos descriptivos (<i>Descriptive models</i>)	18
2.4.2 Modelos basados en la estructura (<i>Structure-imitating</i>)	19
2.4.3 Modelos basados en procesos (<i>Process-imitating</i>)	20
2.4.4 Modelos inversos (<i>Inverse models</i>)	21
2.4.5 Modelos híbridos	22
2.5 Antecedentes	23

<u>Capítulo 3. Modelo conceptual y matemático</u>	29
3.1 Introducción	31
3.2 <u>Flujo de fluido</u>	32
3.2.1 Flujo de fluido como proceso geológico	32
3.2.2 Modelo conceptual del flujo de fluido	36
3.2.3 Modelo Matemático del flujo de fluido	38
3.2.3.1 Condiciones iniciales y de contorno para el flujo de agua	39
3.2.3.2 Solución de la ecuación del flujo	40
3.3 <u>Transporte</u>	41
3.3.1 Transporte de materiales en sistemas geológicos	41
3.3.2 Modelo conceptual del transporte	45
3.3.3 Modelo matemático del transporte	48
3.3.3.1 Condiciones iniciales y de contorno para el transporte	51
3.3.3.2 Solución de la ecuación de transporte	51
3.4 <u>Sedimentación</u>	52
3.4.1 Sedimentación clástica en sistemas geológicos	52
3.4.2 Modelo conceptual de sedimentación clástica	58
3.4.3 Modelo matemático de sedimentación clástica	59
3.4.3.1 Condiciones iniciales y de contorno para la sedimentación	61
3.4.3.2 Solución de la ecuación de sedimentación	62
3.5 <u>Producción carbonatada</u>	63
3.6 <u>Profundidad de agua</u>	67
3.7 <u>Limitaciones de los modelos de transporte por difusión pura</u>	69
<u>Capítulo 4. La ecuación de transporte-sedimentación: solución y discusión</u>	79
4.1 Introducción	81
4.2 <u>Discretización espacial y temporal</u>	82
4.2.1 Generación de la malla de elementos finitos	82
4.2.2 Criterios de estabilidad de la solución numérica	84
4.3 <u>Comparación con soluciones analíticas</u>	91
4.3.1 Transporte difusivo	91
4.3.2 Transporte dispersivo	95
4.3.3 Control del balance de masa	100
• Primer experimento: sistema cerrado sin flujo de agua (I)	102
• Segundo experimento: sistema cerrado sin flujo de agua (II)	103
• Tercer experimento: contornos cerrados con flujo de agua entrante (I)	106
• Cuarto experimento: contornos cerrados con flujo de agua entrante (II)	111
• Método para solucionar el error en el balance de masa	114
4.3.4 Efecto de la dimensión	118
4.3.5 Discusión de los resultados	120

<u>Capítulo 5. Esquema de trabajo</u>	123
5.1 Introducción	125
5.2 Preparación Programa NODEMAKER	126
5.3 Cálculo Programa SIMSAFADIM-CLASTIC	128
5.4 Post-procesado Programa VisualizationGOCAD Programa CREATESCRIPTS	133
<u>Capítulo 6. Ejemplos</u>	141
6.1 Introducción	143
6.2 <u>Cuenca del Vallès-Penedès</u>	144
6.2.1 Introducción geográfica y geológica	144
6.2.2 Configuración inicial y parámetros utilizados	147
• Principales simplificaciones	152
6.2.3 Resultados obtenidos	152
• Sistema de flujo	152
• Distribución de sedimentos	154
6.2.4 Discusión de los resultados y conclusiones	168
6.3 <u>Embalse de Camarasa</u>	171
6.3.1 Introducción general	171
• Contexto geológico	172
• Dinámica del embalse	174
6.3.2 Configuración inicial y parámetros utilizados	175
• Principales simplificaciones	177
6.3.3 Resultados obtenidos	179
• Sistema de flujo	179
• Distribución de sedimentos	182
6.3.4 Discusión de los resultados y conclusiones	186
<u>Capítulo 7. Conclusiones y consideraciones finales</u>	191
7.1 Introducción	193
7.2 Conclusiones finales	194
7.3 Futuras líneas de trabajo	198
<u>Capítulo 8. Bibliografía</u>	205

Anexo

I

A Manual para la modelización

1	Introducción	III
2	<u>Preparación</u>	V
2.1	Programa SURFER	V
2.2	Programa NODEMAKER	VII
2.2.1	Ficheros de entrada o lectura	VII
2.2.2	Ficheros de salida	VIII
2.2.3	Posibles errores	IX
3	<u>Cálculo.</u> Programa SIMSAFADIM-CLASTIC	X
3.1	Ficheros de entrada o lectura	X
	Parámetros generales o de control	XI
	Parámetros de sedimentación	XIV
	Condiciones de contorno de la malla	XVII
	Condiciones de contorno para el transporte	XVIII
3.2	Ficheros de salida	XIX
	Ficheros utilizados por otros programas	XX
	Ficheros de control	XXIII
3.3	Posibles errores	XXIV
4	<u>Post-procesado</u>	XXVII
4.1	Programa VisualizationGOCAD	XXVII
4.1.1	Conceptos previos	XXVII
4.1.2	Ficheros de entrada o lectura	XXVIII
4.1.3	Ficheros de salida	XXIX
4.1.4	Posibles errores	XXXII
4.2	Programa CREATESCRIPTS	XXXIII
4.2.1	Conceptos previos	XXXIII
4.2.2	Ficheros de entrada	XXXIV
4.2.3	Ficheros de salida	XXXVI
4.2.4	Posibles errores	XXXVIII
5	<i>Bibliografía citada</i>	XXXVIII

B Códigos de los programas (en CD adjunto)

1	Programa SIMSAFADIM-CLASTIC
2	Programa NODEMAKER
3	Programa VisualizationGOCAD
4	Programa CREATESCRIPTS

Agraïments

Son uns quants anys treballant en la tesi que aquí presento, i, per aquest fet, no em puc oblidar d'agrair l'ajuda de molts que han passat i han estat al meu costat.

Primer de tot vull donar les gràcies al meu director principal de la tesi, el Dr. Klaus Bitzer, de la Universitat de Bayreuth, per introduir-me, recolzar-me i animar-me a tocar un tema que, com a molts geòlegs, era totalment desconegut: la modelització numèrica (quin món!); per les aportacions i discussions científiques que m'han fet obrir els ulls més d'un cop (per no dir sempre); per les crítiques (constructives) sobre el programa i la tesi en general; per la companyia; per donar-me l'oportunitat de conèixer una mica aquest país que per mi era tant desconegut, Alemanya; per deixar-me una habitació quan l'he necessitada, tan a Alemanya com a La Cierva; per... per tot el que es pot arribar a aprendre al seu costat!!! He de dir que sense la seva aportació i ajuda no crec pas que hagués arribat a acabar la tesi... qui ho hagués dit fa quatre anys! També agrair a la Christiana les converses, l'ajuda, la companyia i aquells menjars tant bons! i al Kiko, per alegrar les hores de feina amb les seves gràcies.

També vull agrair als directors de la tesi (per part catalana), el Dr. Lluís Cabrera i el Dr. Eduard Roca, per donar-me la possibilitat de realitzar aquest treball, confiant en mi i en la meva feina, no tan sols durant la tesi, sinó també durant l'etapa final de la carrera; per les revisions crítiques de la tesi; per les sortides de camp (camp?... què és això?);... i, sobretot, per l'experiència de tots i cadascun d'ells que han aportat!

Una part important de tot aquest temps ha estat compartit amb llargues i contínues estades a la Universitat de Bayreuth (Alemanya) en la qual també hi he trobat un gran suport per part de molta gent, però d'entre la qual vull destacar en Richard Regner, tècnic del departament de Geologia de la Facultat de Geo-ecologia: per buscar-me lloc per dormir (important); per moure tota la paperassa necessària per fer les estades; per ajudar-me en els problemes burocràtics i lingüístics; per acompanyar-me a qualsevol lloc quan ho necessitava; per la seva companyia, alegria i amistat, i... *danke für alles Richard!* Ah! I per l'esquiada als Alps... un somni complert! També voldria agrair la companyia i l'ajuda dels meus companys de Bayreuth: al Luismi, per les llargues i agradables xerrades sobre la vida en general durant tantes tardes de fred hivern i pels seus arrossos; als físics sevillans: la Carmen (gracias por la habitación!), l'Alberto i l'Alejandro, per aquells sopars sempre especials, per les discussions sobre física i per les crítiques aportades al programa; al David de Sabadell, per la companyia, l'amistat i l'ajuda, i, sobretot, per poder trobar un tros de casa en un país desconegut i poder parlar la meua llengua! I a tots els Erasmus i gent diversa que han passat en algun moment o altre pel Bayreuth i he tingut la sort de conèixer. Ah! I a la Maissel's que ha amenitzat, amb molt bon gust, cadascuna de les converses i festes del Bayreuth!

A tots els de la colla que han estat sempre al meu costat, s'han interessat per la meua feina i no els ha importat escoltar els meus sermons geològics i han aguantat com el que son, els meus amics! (Albert G., Mireia -Jana-, Albert J., Aurora, Manu, Eva, Espi -Pies-, Berta -& co.-, Carol, Toni, Adriana... i a tots els que, segur, em deixo, no volent, és clar!).

A tots els becaris/precaris que corren pel departament de Geodinàmica i Geofísica de la facultat, els quals, de segur, es deuen alegrar de que hagi, per fi, acabat... ja no us donaré més la pallissa! També als físics del departament i a les companyes del despatx 222 (Ana M, Claudia, Dra. Pilar Queralt, Ana G, etc...) que m'han ajudat en els moments de saturació per Fortran, i a la Bea, per les estones de tren perdudes revisant la tesi i per les aportacions en general realitzades. Al despatx 226 (Oscar F, Pau A, Oriol Ferrer, Oriol Falivene, etc...) per deixar-me els ordinadors i ajudar-me amb els problemes informàtics (gràcies Microsoft per fer difícil la feina més fàcil!).

Als companys de carrera que sempre m'han recolzat i animat a arribar al punt actual (Ester, Jesús, Ana, Oriol, Bet, Xavi, Dolo, Glòria, Montse, Pau F,...).

Als meus pares, Joan i Rosa, que m'han ensenyat a ser el que sóc i per ser els millors pares que hi poden haver, que m'han recolzat durant tants i tants anys d'estudi i que han confiat sempre en que algun dia arribaria aquest moment. Al meu germà, Joan i al meu fillol Joan (com no!), que ha renovat amb sang jove la família i m'ha omplert d'alegria. I a tota la família, que ha estat sempre pendent de les meves evolucions científiques.

Al Gabriel i la Carme, per recolzar-me i interessar-se per mi i la meva feina, per fer de les estones lliures petites estones d'esbarjo, per l'alegria i la vitalitat que m'han transmès, per les inquietuds geològiques, pels menjars tant ben preparats, per la Montsarra, ... però sobretot, per fer-me sentir com a casa!

Tampoc no em vull oblidar de l'Indi i la Pruna que han estat al costat bona part d'aquest temps i que de ben segur ara deuen estar contents (allí on estiguin) de que jo hagi acabat...

I, per finalitzar, però no per això la última, a tu Esther... uf!, per infinitat de coses: per recolzar-me i escoltar-me en tots aquells moments tan difícils; per aguantar tots els meus estats anímics sin-tesis, que no han estat fàcils, ho sé; per estimar-me; per confiar en mi; per la teva alegria i els ànims que m'has transmès; per tots els moments que has estat al meu costat, tant els bons com els dolents; per les excursions i caminades que hem fet i descobert plegats; per aguantar uns anys sense "vacances" i uns caps de setmana "de feina"; per les nostres il·lusions que de mica en mica anem complint; i, sobretot, per aguantar les meves contínues i llargues estades fora (que no han estat poques) i la companyia inestimable que m'has donat a Bayreuth, tant en persona com per telèfon!

Ah!... i m'oblidava de tu que, com a mínim, has fet l'esforç de llegir fins aquí, però que no sé si continuaràs... no ho vols intentar?

Resum

La principal limitació que ha condicionat i que encara condiona en la actualitat (tot i que en menor grau) qualsevol estudi geològic, és la realitat tridimensional amb la qual es presenta la natura i la seva diversitat. Aquesta tridimensionalitat, sovint difícil d'observar (tot i que no d'imaginar) en el terreny, no permet fer aproximacions de l'estructura i composició reals sense realitzar estudis alternatius. Aquestes aproximacions poden tenir com a objectiu principal la representació geomètrica en 3D del que s'observa en el terreny o, per altre banda, poden intentar reproduir el procés que ha generat aquella geometria observada.

Centrada en l'estudi i anàlisi del rebliment de conques sedimentàries, la modelització numèrica ha estat, des dels anys 70, l'objectiu principal de diferents autors (Harbaugh i Bonham-Carter, 1970; Allen, 1978; Bitzer i Harbaugh, 1987; Hardy i Gawthorpe, 1998; Haupt *et al.*, 1999; Bitzer i Salas, 2002), ja que pot proporcionar informació sobre la distribució espacial i temporal dels diferents cossos sedimentaris i de les diferents relacions existents entre ells, així com de les seves característiques físiques, químiques i petrològiques. Aquesta és una informació molt valuosa en el camp de la prospecció d'hidrocarburs i d'altres substàncies d'interès per a l'home degut al seu aprofitament i explotació.

Molts dels models realitzats fins l'actualitat s'han centrat en les dues dimensions de l'espai (Komar, 1973; Bridge i Leeder, 1979; Strobel *et al.*, 1989; Bitzer i Harbaugh, 1987; Hardy *et al.*, 1994; Syvitski i Hutton, 2001) degut, principalment, a limitacions informàtiques i matemàtiques. Aquest fet comporta una limitació important en la geometria i distribució dels cossos sedimentaris obtinguts, tenint en compte que depenen dels processos que els generen i que aquests actuen, bàsicament, en les tres dimensions de l'espai.

Tenint en compte la diversitat de fàcies que poden reblir una conca sedimentària, hi ha models que s'han centrat en la modelització de sediments carbonatats (Read *et al.* 1986; Goldhammer *et al.* 1987; Bosence i Waltham 1990; Bice 1991) i, d'altres, en sediments terrígens (Lawrence *et al.*, 1990; Martínez i Harbaugh, 1994; Flemings *et al.*, 1996a, 1996b; Hardy i Gawthorpe, 1998), però pocs han intentat una modelització conjunta d'ambdós tipus o ho han fet centrant-se en les 2D. Com a conseqüència, es redueix el seu camp d'aplicació i, per exemple, s'obvia l'efecte que provoca sobre els organismes productors de carbonats la presència de sediments clàstics en suspensió. A

més a més, la majoria d'ells utilitzen lleis empíriques que, tot i extreure resultats realistes, no tenen en compte els processos reals que han actuat.

Per aquest motiu, l'objectiu principal d'aquesta tesi s'ha centrat en l'elaboració d'un programa informàtic capaç de modelitzar, en les tres dimensions de l'espai (3D), el transport i sedimentació de diferents materials clàstics (terrígens i carbonatats) i la seva interferència sobre la producció carbonatada produïda per diferents associacions d'organismes. Aquest fet permetrà establir les relacions espacials i temporals dels diferents cossos sedimentaris generats i obtenir una distribució en 3D de diferents paràmetres característics de cada cos sedimentari.

Concretament, es presenta un nou model informàtic 3D de transport i sedimentació clàstica que s'ha incorporat al model de sedimentació carbonatada de Bitzer i Salas (2001) i la corresponent extensió a las 3D en el codi anomenat SIMSAFADIM (Bitzer i Salas, 2002). Respecte al seu precursor, la nova versió, anomenada SIMSAFADIM-CLASTIC, incorpora el transport i sedimentació de sediments clàstics i la seva interacció amb organismes productors de carbonat.

A part d'aquest, altres objectius lligats al principal han estat l'elaboració d'un algoritme coherent per a la sedimentació de materials clàstics, així com per a la discretització temporal i espacial utilitzada, i la incorporació d'un mètode de control del volum de sediment, que eviti l'error ocasionat per la component advection de l'equació del transport en els casos on aquesta component domina.

Per a la visualització dels resultats, s'han desenvolupat diferents programes informàtics (Visualization GOCAD i CREATESCRIPTS) que permeten automatitzar la seva visualització mitjançant el programari GOCAD®.

Programa SIMSAFADIM-CLASTIC:

Les principals característiques i simplificacions dels processos que inclou el programa son els següents:

- **Sistema de flux:** per al càlcul del sistema de flux s'utilitza un model bidimensional per potencial en estadi transitori que s'ha extret del programa anterior anomenat SIMSAFADIM de Bitzer i Salas (2002). Es considera un flux laminar i un fluid amb viscositat igual a zero (figura 3.4 i 3.6). Aquest és un

model simple que no contempla processos de curta durada (per exemple, la refracció de les onades o l'efecte del vent en la superfície) i que manté en un mateix punt la velocitat del flux igual en tota la columna d'aigua. Però és eficaç per a reproduir el sistema de flux a escala geològica en temps de càlcul molt acceptables.

- **Transport:** l'equació utilitzada per al càlcul del transport inclou les components advection-difusiva-dispersiva del mateix (equació 3.23). El model utilitzat considera que el sediment es manté uniformement barrejat en tota la columna d'aigua (figura 3.8) i que es transporta bàsicament en suspensió d'acord amb el sistema de flux present i per processos de difusió i dispersió. Els processos de transport a petita escala (acció de les onades, etc.) es consideren com a processos difusius i dispersius. Les simplificacions realitzades en el model de transport també permeten un càlcul relativament ràpid del transport de sediment a escala geològica amb resultats molt realistes.

Fins l'actualitat, el programa té en compte el transport de tres fraccions granulomètriques de sediments clàstic-terrestres diferents, i un quart tipus de sediment clàstic-carbonat que prové de les diferents espècies productores de carbonat.

- **Sedimentació:** el model que calcula la sedimentació parteix de la velocitat de deposició de les diferents partícules considerades (equacions 3.19, 3.20 i 3.21). Aquesta velocitat de deposició dependrà del diàmetre de les partícules i es veurà modificada en funció de la velocitat lineal del flux i d'un valor crític d'aquesta velocitat a partir del qual el sediment és susceptible de ser sedimentat (figura 3.13). També es considera que no existeix sedimentació en la zona d'acció de les onades degut a la alta alternança entre processos deposicionals i erosius i provocant moviments caòtics de les partícules en temps molt petits.

Aplicació del programa

La part més aplicada del treball d'investigació realitzat s'ha centrat en tres aspectes relacionats amb el programa desenvolupat:

1. El primer aspecte s'ha centrat en la comparació de dos mètodes de transport de sediments diferents, un mitjançant un transport per difusió pura i l'altre (utilitzat en el codi que aquí es presenta) mitjançant un transport per advecció-difusió-dispersió. En aquesta comparació es posa de manifest l'error que es genera en el transport de sediment si s'utilitza un mètode purament difusiu, ja que la difusió es produeix en totes les direccions de l'espai, produint un transport de sediment contrari, en direcció i sentit, al del flux predominant que s'intenta modelitzar (figures 3.17, 3.18 i 3.19). També s'introdueix la dificultat que existeix amb aquests mètodes difusius per modelitzar el transport de sediments amb diàmetres més grans, ja que són els que, precisament, contenen una component difusiva més baixa, fins i tot negligible.
2. El segon es basa en la comparació dels resultats obtinguts mitjançant el programa SIMSAFADIM-CLASTIC amb els respectius resultats analítics per a poder comprovar i controlar els possibles errors que es puguin produir. D'aquesta comparació se'n pot deduir que els errors produïts pel programa SIMSAFADIM-CLASTIC en el transport de sediment segons la component dispersiva i difusiva del mateix són mínims o dins dels límits acceptables (figures 4.6 i 4.8). No així per a la component advectorial de l'equació del transport, en la que sí que es produeix un error important i degut, principalment, al caràcter hiperbòlic d'aquesta component que domina en situacions on la velocitat del flux és alta (valors del nombre de Grid-Peclet superiors a 2) i que el mètode *Eulerià* utilitzat no redueix (figures 4.17, 4.18, 4.20 i 4.21). Aquest error, conegut àmpliament dins la comunitat científica, es pot reduir utilitzant els denominats mètodes *Lagrangians* (un recull dels diferents mètodes existents es pot trobar a Ewing i Wang, 2001) els quals no presenten cap limitació al nombre Grid-Peclet, tot i que, per contra, requereixen temps de càlcul elevats que poden limitar els models realitzats. En el programa SIMSAFADIM-CLASTIC es combina el mètode *Eulerià* per a resoldre l'equació del transport amb un nou mètode (Bitzer, 2004, inèdit sense publicar, figura 4.22) que ajusta automàticament el volum de sediment que entra dins del sistema a través d'un control del sediment que entra, surt i roman dins del sistema en cada interval de temps per a minimitzar l'error produït. D'aquesta manera s'obtenen errors molt acceptables pròxims al 0% (figures 4.23 i 4.24).
3. El tercer i últim aspecte té en compte la comparació dels resultats obtinguts amb dades reals extretes d'exemples estudiats sobre el terreny.

3.1 El primer d'ells s'ha centrat en la conca del semigraben del **Vallès-Penedès** (zona central de les Cadenes Costaneres Catalanes, Catalunya, NE d'Espanya). Aquest és un bon exemple per a comprovar els resultats obtinguts pel programa SIMSAFADIM-CLASTIC, degut a la transgressió marina del Langhià que provocà la coexistència de sediments terrígens i carbonatats en la mateixa conca (figures 6.1, 6.2 i 6.3). Per a aquest exemple s'han considerat tres fraccions granulomètriques de sediments clàstic-terrígens diferents i dues associacions d'organismes productors de carbonat (una per a bivalves, moluscs, algues i coralls solitaris, i l'altre per als coralls biohermals, tenint present les associacions descrites per Permanyer, 1990).

Observant la distribució final de fàcies siliciclàstiques i carbonatades (figures 6.8 a 6.15 i 6.19), s'aprecia el desenvolupament de sistemes deltàics en el marge NE i NW de la conca lligats, principalment, a l'activitat de la falla principal (falla del Vallès-Penedès) i al transport axial dins de la conca (figura 6.17). En el marge SE s'hi desenvolupen plataformes carbonatades damunt dels alts estructurals del Horst del Garraf, amb un basculament suau cap el NW i que provoca la progradació d'aquests sistemes carbonatats cap a l'eix central del semigraben (figura 6.16).

Tot i les limitacions que conté l'exemple generat, els resultats obtinguts s'aproximen a la realitat i reproduïxen prou fidelment les geometries dels cossos sedimentaris observats en el camp. En aquest sentit, l'arquitectura deposicional i la distribució de fàcies dels sistemes carbonatats observats en el model, respon perfectament a la presència dels sediments clàstics en suspensió que provoca un aïllament de les plataformes carbonatades en el marge SE i una disminució en la seva potència en direcció NE a mesura que augmenta la proporció de sediments clàstics.

3.2 Per al segon exemple s'ha utilitzat un llac artificial, l'embassament de **Camarasa** (Lleida, NW de Catalunya, figures 6.20 i 6.21) degut al gran nombre de dades que es tenen pels estudis realitzats per membres del GRC-Geociències Marines de la Universitat de Barcelona i per membres de la UAB. L'experiment s'ha centrat en la part terminal de l'embassament considerant un nivell de l'aigua estàtic i introduint dins de la conca tres sediments clàstic-terrígens diferents (figures 6.23 i 6.24).

Dels resultats obtinguts se'n pot deduir una limitació important del model en la actualitat al no poder considerar una estratificació de la columna

d'aigua, que és observable en la realitat (figura 6.22). Tot i això, els resultats s'aproximen molt bé al transport de sediment que es produeix en l'embassament degut a la dinàmica de la capa més profunda i que transporta gran part del sediment que entra en l'embassament (figures 6.27 i 6.28). La distribució de fàcies obtinguda (bimodal) permet veure la presència d'un sediment dominant (el més fi) que ocupa gran part de la conca i que es complementa amb el sediment mitjà. Tot i això, la distribució final de les dues fraccions de sediments està condicionada per la obertura o el tancament de la presa (figura 6.28). El sediment més groller és el menys present i es concentra a la zona d'entrada de l'aigua. Les taxes de sedimentació obtingudes en el model en la Zona de La Massana (figura 6.30) són molt similars a les obtingudes per Costa (2003) en la mateixa zona. No és així en les altres zones més properes a la presa, on el model proporciona taxes de sedimentació més baixes que les reals degut, principalment, a una activitat orgànica més alta de les capes d'aigua més superficials que no s'han pogut modelitzar en l'exemple.

Per finalitzar, destacar que els resultats obtinguts en els exemples han complert amb els objectius marcats i han permès corroborar l'algoritme utilitzat en el programa per a la interacció entre sediments carbonatats i clàstics, obtenint geometries i distribucions de facies similars a les observades en la realitat. Les distribucions i geometries obtingudes en l'embassament també són bastant realistes, tot i que ens permeten veure la limitació existent en el programa actual davant de sistemes complexes amb variacions de flux tridimensionals, que poden condicionar el transport de sediments.

[Índice](#) 

Abstract

Prediction of sedimentary facies distribution and geometric architecture of sedimentary basins by process-oriented numerical models has become an important tool in geological studies with the advent of computers and computer methods (Harbaugh and Bonham-Carter, 1970; Allen, 1978; Bitzer and Harbaugh, 1987; Hardy and Gawthorpe, 1998; Haupt *et al.*, 1999; Bitzer and Salas, 2002). Computer-based prediction models relate to spatial distribution of physical, chemical and petrophysical characteristics within sedimentary bodies.

Various sedimentary modelling programs have been developed, most of them considering either clastic material (Lawrence *et al.*, 1990; Martínez and Harbaugh, 1994; Flemings *et al.*, 1996a, 1996b; Hardy and Gawthorpe, 1998) or carbonate sediments (Read *et al.*, 1986; Goldhammer *et al.*, 1987; Bosence and Waltham, 1990; Bice, 1991). Only a few models have attempted to consider mixed carbonate-clastic sedimentation. Moreover, most programs are designed in two dimensional space (Komar, 1973; Bridge and Leeder, 1979; Strobel *et al.*, 1989; Bitzer and Harbaugh, 1987; Hardy *et al.*, 1994; Syvitski and Hutton, 2001), which is a major restriction as geologic processes work in three dimensional space, resulting in a great variety of sedimentary facies types and complex 3D architecture of sedimentary bodies.

Lithologic heterogeneity within sedimentary basins needs to be represented by three-dimensional models. Furthermore, the interaction between different types of sediments, such as clastic and carbonate materials, needs to be represented within an integrated multiprocess model.

In this work, a 3D forward mathematical simulation model for clastic sediments has been developed and added to the 3D carbonate sedimentation model SIMSAFADIM, which was developed by Bitzer and Salas (2002). The new extended model SIMSAFADIM-CLASTIC, simulates clastic transport and sedimentation including processes of carbonate production, transport and sedimentation in three dimensions.

Other results of this thesis are the creation of a coherent algorithm for clastic sediment deposition and the discretization of time and space. A new method for mass balance control (Bitzer, 2004 unpublished) was coupled to the new program too.

New programs have been developed to visualize the results (Visualization GOCAD and CREATESCRIPTS) that allow the automatic visualization by means of the GOCAD® commercial program.

Program SIMSAFADIM-CLASTIC:

The main characteristics of the conceptual and mathematical model used in the program are:

- **Fluid flow:** The fluid flow model used in SIMSAFADIM-CLASTIC is identical to the model developed by Bitzer and Salas (2002), called SIMSAFADIM. This model assumes that (figure 3.4)
 - flow can be considered as irrotational and viscosity of water can be ignored,
 - variations of flow due to changes in density, temperature and salinity are negligible,
 - velocity and direction of flow can be considered to be uniform with depth leading to a 2D flow model,
 - a transient potential flow model can thus be applied (equation 3.6).
- **Transport and sedimentation:** For transport and sedimentation of clastic sediments the model assumes that:
 - all sediment particles are transported in suspension and suspended sediment is uniformly distributed in the water column (figure 3.8),
 - sediment is transported due to diffusion, dispersion, and advection (equation 3.23),
 - sedimentation depends primarily on the settling velocity of particles (equations 3.19, 3.20 and 3.21),
 - settling velocity depends on grain size and shear forces imposed by turbulent flow. As SIMSAFADIM-CLASTIC does not consider turbulent flow we assume a lineal dependence of settling velocity with flow velocity (figure 3.13)

- small-scale transport and deposition processes (wave action, etc.) are considered to be diffusive and dispersive processes.

The flow field is solved in a finite element model (Bitzer and Salas, 2002) as transport that is solved for individual clastic sediment types using a finite element scheme. The model considers four different clastic sediment types, one of them being clastic-carbonate. The equation for the population density of carbonate-producing organisms (Bitzer and Salas, 2002) contemplates the poisoning due to the presence of clastic sediments that may affect the carbonate producing organisms (equation 3.24).

Initial and boundary conditions for fluid flow are provided by initial sea level position, inflow and outflow specification and fixed potential conditions. For transport model, initial and boundary conditions are provided by null concentration nodes in the basin and an inflow sediment rate.

Application of the program

In order to test the predictive capability of the program, it was applied to three different aspects:

1. The first is the comparison between a model that uses a diffusion transport model and a model with a diffusion-dispersion-advection transport model (like the model used by SIMSAFADIM-CLASTIC program). The results denote an error in the diffusion model due to the transport in all space directions (figures 3.17 and 3.18). This kind of transport would even lead to an opposite way transport of the main fluid flow velocity (figure 3.19).
2. The second aspect is based on the comparison with analytical data for diffusion-dispersion-advection transport. The results for diffusion and dispersion transport are coherent and range within acceptable results (figures 4.6 and 4.8). On the other hand, the results give important errors for advective-dominated transport systems (Grid-Peclet numbers up to 2) due to the hyperbolic type of this component (figures 4.17, 4.18, 4.20 and 4.21). Until now, a satisfactory solution over the full practical range of Peclet numbers is only possible with Lagrangian methods (Ewing and Wang, 2001) but a large amount of computer time (CPU) is required. The Eulerian methods have an advantage due to the fast sparse matrix algorithms, but have a limit in high Grid-Peclet numbers. SIMSAFADIM-CLASTIC program combines an Eulerian method to solve the transport equation and a new method (based on Bitzer, 2004, unpublished, figure 4.22) that adjusts the

amount of sediment supplied in every time step by the control of sediment that inflows, outflows and remains inside the system (deposited or in suspension). It provides an easy method with very acceptable errors close or equal to 0% (figures 4.23 and 4.24).

3. The third aspect, includes the experiments that are based on real case studies:

- 3.1 **Mixed siliclastic-carbonate sedimentation in the Neogene Vallès-Penedès half-graben:** In order to test the capabilities of SIMSAFADIM-CLASTIC, it was applied to an experiment involving the evolution of a carbonate deposition under the presence of clastic-terrigenous sedimentation. The example represents the three-dimensional distribution of the three different types of clastic-terrigenous sediments and two types of carbonate producing organism associations (molluscs, bivalves, and algae in one association and biohermal corals in the second one, based on the description by Permanyer, 1990), which were deposited in the Vallès-Penedès basin (Catalunya, NE Spain) during part of the early Langhian time (20.000 years). This basin is a good example due to a marine transgression that caused a complex carbonate and terrigenous deposition during Langhian time (figures 6.1, 6.2 and 6.3).

The results of the Vallès-Penedès simulation experiment show facies distributions and depositional architectures which are similar to observed patterns in the field (figures 6.8 to 6.15 and 6.19). The deltaic systems developed in NE and NW margins are related to the main activity of the Vallès-Penedès fault and an axial transport on the basin (figure 6.17). The poisoning effect from terrigenous sediments on carbonate producing organisms can explain the observed distribution of reefs deposits (figure 6.16) with a decreasing thickness in NE direction due to an increasing clastic sediment percentage.

- 3.2 **Camarasa:** for a present example, the program is applied to an artificial lake, the Camarasa reservoir (Lleida, NW Catalunya, figures 6.20 and 6.21). The experiment was localized in the downstream part of the reservoir, near the dam, considering a static water level and three different grades of clastic-terrigenous sediments (figures 6.23 and 6.24).

The results obtained denote an important limitation in the model that can't consider a stratified water column, as is observable in the reservoir water column (figure 6.22). Even so, the results are very similar to the observed transport pattern linked to the deeper water layer flow (figures 6.27 and 6.28). This layer transports more than 50% of sediment that is supplied to the reservoir.

Facies distribution model shows a bimodal sediment distribution (the finest and the middle grained sediment sizes). The final distribution pattern is conditioned in the reservoir by the successive opening and closing of the dam (figure 6.28).

The sedimentation rate modeled in the La Massana zone (figure 6.30) is very similar to the data obtained by Costa (2003). But this isn't so in the zones closer to the dam due to more organic productivity in the upper water column layers that can not be modelled with the program in its present configuration.

To conclude, SINSAFADIM-CLASTIC is a powerful process-based simulation code for 3D prediction of stratigraphic architecture and facies distribution in sedimentary basins. The results obtained with the experiments fulfill their main objectives. The modelled depositional architectures and facies distributions are similar to the naturally observed patterns. Simulated facies distributions present a high complexity in geometry and facies distributions. Therefore, the program presented can be applied to several fields of geology, hydrogeology or petroleum exploration including fluid flow modelling at a basin scale and for the prediction of petrophysical parameters.

Índice de ilustraciones y tablas

Figura 2.1.-	Esquema del procedimiento metodológico seguido y resumido en la presente memoria.	Pag. 16
Figura 2.2.-	Relaciones entre diversos tipos de modelos: conceptual, matemático, de avance e inversos. Modificada de Cross y Harbaugh (1990).	Pag. 17
Figura 3.1.-	Esquema simplificado de los principales procesos incorporados al programa y su relación con los diferentes componentes que ingresan en el sistema. Puede observarse como el sedimento clástico-terrágeno y parte del carbonatado producido, pasan a ser transportados y sedimentados según el sistema de flujo presente.	Pag. 31
Figura 3.2.-	Diagrama esquemático de la circulación termohalina a escala global. Las flechas negras denotan la circulación profunda, y las flechas grises, la circulación principal más superficial. En el corte vertical se observa un esquema de circulación actual de las aguas y corrientes profundas en el Atlántico. En el circuito termohalino el agua superficial se hunde en las latitudes altas. En las cercanías del Ártico se forma la masa de agua densa denominada NADW (North Atlantic Deep Water) y en las cercanías de la Antártida la masa de agua, aún más densa, denominada AABW (Antarctic Bottom Water). Modificada de Bigg (1996).	Pag. 34
Figura 3.3.-	Representación esquemática, correspondiente al hemisferio norte, del efecto combinado de la acción del viento y la fuerza de Coriolis en las corrientes superficiales de los océanos, mares y lagos y su variación en profundidad (espiral de Ekman). Nótar la resultante del transporte neto a 90° de la dirección principal de incidencia. Modificada de Massel (1999).	Pag. 35
Figura 3.4.-	Esquema conceptual del modelo de flujo por potencial utilizado en el programa. W indica la profundidad de agua. Q es el flujo de entrada. Δh es la altura piezométrica. Y x e y son las direcciones del espacio.	Pag. 38
Figura 3.5.-	Diagrama de Hjulström donde se relaciona el transporte, deposición y erosión en función del tamaño de grano y la velocidad de flujo en el caso de un canal llano, uniforme y de profundidad constante de 1 m.	Pag. 41
Figura 3.6.-	Esquema de las fuerzas que actúan sobre una partícula depositada en el fondo. F_l (fuerza de levantamiento); F_d (fuerza de fricción); F_g (fuerza gravitacional); D (diámetro de la partícula). Modificada de Chien y Wan (1998).	Pag. 42
Figura 3.7.-	Representación esquemática de los modos de transporte de partículas (carga de fondo y carga en suspensión). Modificada de Bjørlykke (1989).	Pag. 43
Figura 3.8.-	Conceptualización del transporte de sedimento. A. Representación esquemática del transporte de una partícula por flujos ascendentes (flujo turbulento). Puede observarse la trayectoria caótica de la partícula y la trayectoria lineal resultante (flecha verde) en el paso de tiempo 2. B. Esquema conceptual del transporte considerando un flujo laminar produciendo una distribución heterogénea del sedimento en la columna de agua en función de la velocidad de deposición según el tamaño de grano. C. Esquema conceptual utilizado en el programa SIMSAFADIM-CLASTIC. Se considera una distribución homogénea en la columna de agua debido a un flujo turbulento y a los procesos de mezcla del sedimento.	Pag. 47
Figura 3.9.-	Relación entre la profundidad de agua y el coeficiente de difusión D* para diferentes valores de los coeficientes G₀ y G₁ . Notar como los diversos valores de G ₁ hacen variar la rapidez con la que disminuye el coeficiente de difusión con la profundidad. A valores de G₁=0 , el coeficiente de difusión es constante. La línea gris indica el valor del nivel del mar situado a cero. Modificada de Kaufman <i>et al.</i> (1991).	Pag. 50
Figura 3.10.-	Coefficiente de fricción (C_f) en función del número de Reynolds (R_e). Modificada de Vanoni (1975).	Pag. 54
Figura 3.11.-	Valores teóricos y reales de la velocidad de deposición o <i>settling</i> . A. Valores teóricos establecidos para la velocidad de deposición en agua a 20 °C según el diámetro de las esferas y un factor de la forma de la partícula. B. Comparación de los valores teóricos con los valores observados para partículas reales (diámetro medio). La zona sombreada corresponde a los valores obtenidos para partículas reales. Modificada de Dyer (1986).	Pag. 55
Figura 3.12.-	Variación de la velocidad de deposición para partículas tipo <i>fango</i> en función de la concentración. Nótese la disminución de velocidad en concentraciones altas. Modificada de Dyer (1986).	Pag. 57
Figura 3.13.-	Influencia del factor de deposición f_{ai} en la velocidad de deposición teórica (v_{si}) en función de la velocidad del flujo (v) presente. Nótese que la velocidad de deposición (v_{si}) disminuye a medida que la velocidad de flujo se aproxima a la velocidad crítica de deposición (v_{ci}).	Pag. 60
Figura 3.14.-	Esquema del transporte de sedimento por diferentes procesos en dos pasos de tiempo diferentes. A. En ausencia de flujo dentro del sistema: procesos difusivos. B. Bajo un flujo dominante de izquierda a derecha: procesos advectivos, difusivo-advectivos y dispersivo-advectivos. Nótese como, en el caso B, la componente del transporte difusiva y dispersiva produce un transporte en dirección y sentido contrarios a la dirección y sentido principal del flujo. Modificada de Hinkelmann y Helmig (2002).	Pag. 70

- Figura 3.15.- Esquema del transporte de sedimento considerando: **A.** Un modelo puramente difusivo con un coeficiente de difusión constante en toda la cuenca que sólo depende del tamaño de grano. **B.** Un modelo también difusivo aunque con un coeficiente de difusión variable que disminuye gradualmente con el incremento de la profundidad (Kaufman *et al.*, 1991) y en función del tamaño de la partícula. **C.** Un modelo difusivo-advectivo en el que se incorpora una componente advectiva al transporte de sedimento en función de la velocidad del flujo. En este modelo la componente difusiva del transporte tampoco es constante y varía siguiendo los parámetros supuestos en el modelo B. Nótese como en este caso sólo se ha representado un tamaño de grano. Se considera que existe un flujo de izquierda a derecha. Pag. 72
- Figura 3.16.- Configuración inicial de la cuenca sedimentaria para los dos experimentos realizados. La escala vertical está exagerada 50 veces. La flecha amarilla indica el nodo de entrada del sedimento en la cuenca. Las flechas naranjas, los nodos de entrada del agua para el experimento que considera un transporte advectivo. Las flechas verdes señalan los nodos abiertos o de salida. Pag. 73
- Figura 3.17.- Resultado del experimento considerando un transporte por difusión pura al cabo de 1000 años. La escala de color indica dónde se sitúa la máxima sedimentación. Pag. 74
- Figura 3.18.- **A.** Resultado del experimento considerando un transporte dominado por la advección al cabo de 1000 años. La escala de color indica dónde se sitúa la máxima deposición. **B.** Representación del sistema de flujo en el último paso de tiempo (1000 años) determinado a partir de la superficie potencial representada en la escala de color (valores en metros). El punto azul marca el nodo de entrada del sedimento. Pag. 76
- Figura 3.19.- Corte paralelo a la dirección del flujo de agua (por lo tanto al eje de coordenadas X) representando los resultados de los dos experimentos y realizado en la coordenada Y=600 m. El flujo va de izquierda a derecha. La línea discontinua marca el nodo de entrada de sedimento y la magnitud de las flechas proporciona una idea de la relación volumétrica del sedimento transportado en ambos sentidos. Se ha representado la superficie correspondiente al último paso de tiempo. En azul, se representa el resultado del experimento considerando un transporte por difusión pura y en rojo, por advección-difusión-dispersión. Pag. 77
- Figura 4.1.- Representación del modelo utilizado para numerar la malla de elementos finitos generada con el programa NODEMAKER. En azul se enumeran las columnas, y en verde, las filas. Los puntos rojos indican los nodos y su correspondiente número se indica encima en color negro. Los triángulos delimitan el área de cada elemento y su índice viene señalado dentro de un círculo. Pag. 83
- Figura 4.2.- Representación de diferentes frentes de concentración para un flujo simple y para ilustrar los diferentes tipos de errores numéricos que pueden aparecer en la solución numérica de la ecuación del transporte. **A.** Frente de concentración para un flujo sin dispersión. **B.** Solución “exacta” para un transporte con dispersión. **C.** Solución numérica para el caso B que exhibe una dispersión numérica. **D.** Solución numérica para el caso B pero presentando un comportamiento oscilatorio. Modificada de Konikow (1996). Pag. 85
- Figura 4.3.- Esquema representativo de las distancias máximas que puede recorrer una partícula dentro de un elemento representativo, teniendo en cuenta que la partícula puede viajar tanto en la horizontal como en la vertical en función del proceso dominante: transporte o sedimentación. **d** es la distancia máxima en la horizontal si domina el transporte, y **W** (profundidad de agua) es la distancia máxima vertical si domina la sedimentación. Modificada de Bitzer y Pflug (1990). Pag. 87
- Figura 4.4.- Esquema del avance temporal utilizado en el modelo para el cálculo del flujo, transporte y sedimentación. Véase explicación en el texto. Pag. 89
- Figura 4.5.- Esquema del experimento utilizado para la comparación con los valores analíticos. En él sólo se consideran dos filas de nodos para asimilar el experimento a un ejemplo unidimensional. Pag. 92
- Figura 4.6.- Comparación de la distribución de los frentes de concentración obtenidos en la solución analítica y en el experimento utilizado para verificar la validez del modelo de transporte difusivo propuesto. Los diagramas muestran los resultados en función de los dos coeficientes de difusión utilizados y para cada tiempo total de cálculo. En el eje **y** se indica la relación entre la concentración final (**C**) y la concentración inicial (**C₀**). En el eje **x** se representa la distancia respecto al nodo de entrada (situado en el origen, a cero metros). Nótese el cambio de escala en el eje X para los diferentes tiempos calculados. Pag. 94
- Figura 4.7.- Esquema del experimento utilizado para comparar los resultados mediante un transporte advectivo-dispersivo obtenidos numéricamente con el programa y los obtenidos analíticamente. En el ejemplo sólo se consideran dos filas de nodos para asimilarlo a un ejemplo unidimensional. Pag. 96
- Figura 4.8.- Comparación de la distribución de los frentes de concentración calculados analíticamente y mediante el programa SIMSAFADIM-CLASTIC al final del experimento de la figura 4.7 y considerando un transporte por dispersión. Los cuatro gráficos muestran los resultados para diferentes tiempos de avance determinados a partir de diferentes factores que multiplican al tiempo de avance de Courant. También se representa la diferencia entre los valores analíticos y los obtenidos mediante el programa y el error que supone (en % máximo normalizado a 100 y acumulado). Pag. 97
- Figura 4.9.- Comparación entre el resultado analítico considerando un transporte advectivo-dispersivo utilizando valores de dispersividad de 100 m (línea negra) y los resultados obtenidos por el programa (frentes de concentración) utilizando diferentes tiempos de avance, así como los respectivos errores máximos normalizados al 100% (líneas de colores). Pag. 98

- Figura 4.10.- Efecto del valor de la dispersividad sobre la situación del frente de concentración al cabo de 10 años para un experimento con una distancia entre nodos de 100 m. La línea gris indica el valor analítico para una dispersividad igual a 100 m. La zona de entrada del sedimento y agua se sitúa en el primer nodo a cero metros (izquierda del gráfico). Sólo se han representado los resultados para una sola fila (nodos 1-50). Pag. 99
- Figura 4.11.- Esquema de las configuraciones utilizadas en los cuatro experimentos realizados para controlar el volumen de sedimento obtenido por el programa, y en el método para solucionar el error en el balance de masa. Pag. 101
- Figura 4.12.- Configuración inicial básica utilizada en los cuatro experimentos realizados para verificar si el programa SIMSAFADIM-CLASTIC cumple con la Ley de conservación de masa. El círculo gris indica la posición del nodo de entrada del sedimento para el segundo y tercer experimentos. La flecha gris señala la posición del nodo definido con la entrada del flujo de agua para el tercer y cuarto experimento, y la entrada del sedimento en el cuarto experimento. Pag. 101
- Figura 4.13.- Volumen de sedimento (depositado y en suspensión) calculado dentro del sistema al final del experimento en función de la velocidad de deposición del sedimento utilizada. Los valores del volumen obtenidos han sido normalizados según el valor analítico (valor igual a 1 en el eje Y). Pag. 103
- Figura 4.14.- Representación del volumen de sedimento dentro del sistema para los dos casos considerados (con y sin sedimentación) en función del coeficiente de difusión utilizado. La línea discontinua indica el valor analítico. Pag. 104
- Figura 4.15.- Esquema explicativo de la diferencia observada entre el volumen de sedimento calculado por el programa en el segundo experimento y el valor analítico (o valor real) correspondiente. **A.** Valores del Coeficiente de difusión muy bajos. **B.** Coeficientes de difusión intermedios. **C.** Coeficientes de difusión bajos. Las líneas discontinuas marcan la interpolación lineal realizada por el programa y que causa un aumento en el volumen de sedimento presente (tanto depositado como en suspensión). La zona gris indica el exceso calculado a causa de la interpolación lineal entre nodos. Para coeficientes de difusión elevados, la interpolación lineal es prácticamente igual que el frente de concentración real (o el sedimento depositado). Pag. 105
- Figura 4.16.- Volumen de agua calculado en el tercer experimento sin considerar entrada de sedimento. La línea continua marca el valor analítico, mientras que las cruces indican el volumen de agua calculado por el programa aplicando diferentes flujos de agua en el nodo de entrada. Pag. 107
- Figura 4.17.- Volumen de sedimento obtenido en el tercer experimento considerando un coeficiente de difusión bajo para los dos casos tratados (con y sin sedimentación) y en función del flujo de agua entrante. En el caso considerando la deposición, el volumen corresponde al volumen total ya que para flujos altos no todo el sedimento queda depositado al final del experimento, y se ha representado la suma de los dos (el depositado más el que queda en suspensión). El valor del volumen igual a 1 marca el valor analítico. Pag. 108
- Figura 4.18.-* Volumen de sedimento obtenido en el tercer experimento considerando un coeficiente de difusión alto para los dos casos tratados (con y sin sedimentación) y en función del flujo de agua entrante. En el caso considerando la deposición, el volumen corresponde al volumen total (línea continua, el depositado más el que resta en suspensión) y al volumen del sedimento depositado (línea discontinua). El valor del volumen igual a 1 marca el valor analítico. Pag. 109
- Figura 4.19.- Magnitud de los errores observados en el tercer experimento para los dos casos tratados (con y sin deposición), y en función del flujo de agua entrante y de los dos coeficientes de difusión utilizados. Pag. 111
- Figura 4.20.- Volumen de sedimento en suspensión (sin deposición) considerando una entrada de sedimento en el mismo nodo de entrada del flujo de agua según diferentes flujos de agua entrantes y para dos coeficientes de difusión distintos. El valor del volumen correspondiente a 1 indica el valor analítico. Pag. 112
- Figura 4.21.- Variación del volumen de sedimento normalizado calculado en el cuarto experimento considerando la deposición del sedimento y una entrada de agua y material en el mismo nodo del contorno. Se han utilizado diferentes valores del flujo de agua y dos coeficientes de difusión distintos. Nótese como para flujos elevados no todo el sedimento queda depositado y una parte del mismo queda en suspensión. Pag. 113
- Figura 4.22.- Esquema metodológico del método propuesto para solventar los errores producidos en el balance de masa derivados de la ecuación del transporte bajo condiciones donde domina la componente advectiva. **A.** Cálculo del **volumen analítico** a partir de la tasa de entrada de sedimento y del flujo de agua. **B.** Cálculo del volumen de sedimento en suspensión (**volumen aparente**) a partir de la concentración de sedimento en suspensión obtenida después del cálculo del transporte. **C.** El **factor de escalamiento** (f_s) obtenido a partir del volumen de sedimento analítico y aparente, permite determinar una nueva concentración de sedimento en suspensión corregida. **D.** La deposición del sedimento provoca una disminución de la concentración de sedimento en suspensión. La suma de este volumen de sedimento en suspensión, más el depositado más el que entra en este nuevo intervalo de tiempo $t+\Delta t$, se utilizan para calcular el nuevo volumen de sedimento **analítico** total que ha entrado en el sistema desde el instante inicial. Pag. 116
- Figura 4.23.- Comparación de los resultados obtenidos utilizando o no el método de escalamiento del volumen de sedimento presente en el sistema. La configuración del experimento es la misma que la utilizada en el cuarto experimento (línea de cruces) utilizando un coeficiente de difusión bajo y sin tener en cuenta la deposición del sedimento. El valor del volumen normalizado correspondiente a 1 indica el valor analítico. Pag. 117

- Figura 4.24.- Frentes de concentración obtenidos para tres intervalos de tiempo en un perfil paralelo al eje X y con el origen en la coordenada Y=400 m, donde se sitúa la entrada de agua y sedimento. El eje X sólo se ha representado hasta la coordenada X=2400 m. La escala de la concentración en el tiempo 1 es diferente a la representada en los tiempos 5 y 10. Pag. 118
- Figura 4.25.- Comparación de los dos experimentos A y B, cambiando las dimensiones de los mismos según se puede observar en la tabla adjunta. Para cada experimento se ha representado un perfil paralelo al eje X y situado en la segunda fila correspondiente al nodo de entrada del flujo agua y del material. Sólo se han representado las superficies de dos de los diez intervalos de tiempo calculados (500 y 1000 años). Pag. 119
- Figura 5.1.- Procedimiento de trabajo seguido para generar el fichero `nodes.txt` que contendrá la discretización de la zona en estudio. Véase explicación de cada apartado en el texto. Pag. 127
- Figura 5.2.- Diagrama explicativo del esquema general que sigue el programa SIMSAFADIM-CLASTIC y las diferentes subrutinas que utiliza. Las diferentes tonalidades de gris indican los diferentes niveles (subrutinas) dentro del programa. Pag. 132
- Figura 5.3.- Esquema representativo de un elemento **Sgrid** limitado por dos superficies y discretizado en columnas y filas, en dirección X e Y respectivamente (en este caso, 4 columnas por 3 filas). Cuatro nodos definen una celda. Pag. 134
- Figura 5.4.- Evolución esquemática de tres intervalos de tiempo *jt_i* y de los respectivos Sgrid generados. Nótese la subsidencia causada por carga litostática y la consecuente variación de las diferentes coordenadas que definen cada nodo del Sgrid. Por este motivo, existe un fichero que guarda las coordenadas del Sgrid generado en ese intervalo de tiempo y de los generados anteriormente para cada intervalo de tiempo. La superficie azul representa el nivel del mar (en este caso, sin variación). Pag. 134
- Figura 5.5.- Creación manual de un elemento Sgrid con sus respectivas propiedades. **1.** Se importan los puntos de cada superficie (en este caso, para un Sgrid, se importan los puntos de las dos superficies limitantes). **2.** Se interpolan las superficies que los contienen. **3.** Se genera el Sgrid y se hace proporcional a las superficies correspondientes. **4.** Importación de los datos y creación de las superficies que contienen cada una de las propiedades (aquí solo se visualizan dos superficies, pero existen 11 diferentes, una para cada propiedad). **5.** Se generan las propiedades en el Sgrid (centradas en los nodos) por proyección vertical de cada una de las superficies generadas para cada propiedad en el paso anterior, consiguiendo así representar el valor Z de cada superficie-propiedad como un valor en cada nodo del Sgrid. Pag. 133
- Figura 5.6.- Representación esquemática del orden de utilización y de la principal función que desempeñan los ficheros generados por el programa CREATESCRIPTS. En este ejemplo sólo se visualizan dos propiedades, pero existen 11 ficheros (8 para cada facies, 1 para la facies dominante y 2 para la deposición y tasa de sedimentación). Nótese como existen ficheros que pueden utilizarse en diferentes pasos, por ejemplo, el fichero `A-ShowPropN-timeXXX.script` puede ser utilizado con o sin perfiles. También se puede ver la acción inversa que realizan ciertos ficheros (`E-No-Mesh-Section-TimeXXX.script` o `E-No-Section-timeXXX.script`). Véase la descripción de cada fichero y la notación de los mismos en la Tabla 5.2. Pag. 140
- Figura 6.1.- Situación geográfica y contexto geológico de la cuenca del Vallès-Penedès (**VPb**). Se indica la posición del corte **A-A'** representado en la figura 6.2. El recuadro negro marca la zona de estudio. **GMh**: Horst del Garraf-Montnegre; **Ba**: Barcelona. Modificada de Roca *et al.* (1999). Pag. 144
- Figura 6.2.- Corte geológico a través del margen NE de Catalunya (ver situación del corte A-A' en la figura 6.1), en la parte central de las denominadas Cadenas Costeras Catalanas (CCR) donde se encuentra la cuenca del Vallès-Penedès (recuadro negro). Notar la asimetría de la cuenca y la posición del depocentro cerca del margen NW de la misma, donde se encuentra la falla principal. Modificada de Roca *et al.* (1999). Pag. 145
- Figura 6.3.- Evolución paleogeográfica de la zona central de las Cadenas Costeras Catalanas. El recuadro amarillo indica la localización de la zona de estudio durante el Langhiense. Modificada de Roca *et al.* (1999). Pag. 146
- Figura 6.4.- Litoestratigrafía del relleno sedimentario de la cuenca del Vallès-Penedès y la cuenca sumergida de Barcelona en la adyacente plataforma continental. La flecha negra indica el periodo temporal modelizado. Modificada de Roca *et al.* (1999). Pag. 147
- Figura 6.5.- Propuesta de configuración inicial de la cuenca del Vallès-Penedès a partir de la paleogeografía establecida para el Langhiense. Pag. 148
- Figura 6.6.- (página anterior) Discretización espacial de la zona de estudio. En la parte inferior se han representado los elementos triangulares que componen la malla de elementos finitos. Los límites NW y NE se han situado cerca de la línea de la paleocosta para el Langhiense considerando una situación de HST. La leyenda para el mapa geológico se puede ver en la figura 6.5. La magnitud de las flechas indica el volumen de agua y sedimento que ingresa. **An.** Sant Sadurn d'Anoia; **Ig.** Igualada; **Ma.** Martorell; **Pa.** El Papiol; **Sa.** Sabadell; **Te.** Terrassa; **Ve.** El Vendrell; **Vi.** Vilafranca; **Vg.** Vilanova i La Geltrú. Pag. 150
- Figura 6.7.- (Página siguiente). Representación de la superficie potencial (mapa de contornos) y del sistema de flujo (flechas blancas) obtenidos para los intervalos de tiempo 001 y 020 correspondientes a 1000 y 20000 años respectivamente. Notar el cambio de escala en la superficie potencial (valores en metros). Las cruces verdes indican los nodos que configuran la malla de elementos finitos. Pag. 153

Figura 6.8.-	Mapa de facies (A) y potencia de sedimento total depositado (B) obtenido al cabo de 1000 años (intervalo de tiempo 001). La escala vertical está exagerada 50 veces. Para una mejor localización, se han situado diferentes poblaciones (siguiendo el mismo código de la figura 6.7) y la línea de costa (línea blanca discontinua). En este experimento no se ha considerado una tercera asociación de organismos productores de carbonato (tipo 3).	Pag. 155
Figura 6.9.-	Mapa de facies (A) y potencia de sedimento total depositado (B) obtenido al cabo de 7000 años (intervalo de tiempo 007). La escala vertical está exagerada 50 veces. Nótese el cambio de escala en el mapa de potencias respecto al de la figura anterior.	Pag. 156
Figura 6.10.-	Mapa de facies (A) y potencia de sedimento total depositado (B) obtenido al cabo de 14000 años (intervalo de tiempo 014). La escala vertical está exagerada 50 veces. Nótese el cambio de escala en el mapa de potencias respecto al de la figura anterior.	Pag. 158
Figura 6.11.-	Mapa de facies (A) y potencia de sedimento total depositado (B) al final del experimento (20000 años, intervalo de tiempo 020). La escala vertical está exagerada 50 veces. Nótese el cambio de escala en el mapa de potencias respecto al de la figura anterior.	Pag. 159
Figura 6.12.-	Representación en 3D de la distribución de facies al final del experimento. La escala vertical está exagerada 50 veces.	Pag. 160
Figura 6.13.-	Distribución obtenida para las dos asociaciones de organismos productores de carbonato consideradas en el experimento (A , tipo 1 y B tipo 2). La escala vertical está exagerada 50 veces. La escala de color indica el porcentaje que representa el sedimento considerado en cada punto de la cuenca.	Pag. 162
Figura 6.14.-	Distribución obtenida para el limo carbonatado (A) y el sedimento clástico más fino, tipo 5 (B). La escala vertical está exagerada 50 veces. La escala de color indica el porcentaje que representa el sedimento considerado en cada punto de la cuenca.	Pag. 163
Figura 6.15.-	A . Distribución obtenida para el sedimento clástico medio (tipo 7); B . Distribución para el sedimento clástico más grueso (tipo 8). La escala vertical está exagerada 50 veces. La escala de color indica el porcentaje que representa el sedimento considerado en cada punto de la cuenca.	Pag. 164
Figura 6.16.-	Detalle de la región S (véase localización en la imagen general superior), donde predomina el sedimento carbonatado. Puede apreciarse como la plataforma carbonatada progradada hacia el interior de la cuenca y su potencia disminuye en dirección NE (flechas azules) a medida que aumenta el porcentaje de sedimento clástico terrígeno (flecha amarilla). La escala vertical está exagerada 50 veces.	Pag. 165
Figura 6.17.-	Detalle de la región N (véase localización en la imagen general inferior), donde predomina el sedimento clástico-terrígeno. Se puede apreciar la progradación hacia el interior de la cuenca de los diferentes sistemas deltaicos (flechas verdes) y la arquitectura deposicional resultante de la interacción entre los mismos. También se puede ver como el sedimento clástico-terrígeno fosiliza los sedimentos carbonatados generados en etapas iniciales. La escala vertical está exagerada 50 veces.	Pag. 166
Figura 6.18.-	Distribución de facies para el último intervalo de tiempo (20000 a) obtenida en el experimento sin considerar una entrada de sedimento clástico-terrígeno en la cuenca. Nótese como sólo predominan las dos facies correspondientes a las dos asociaciones de organismos productores de carbonato consideradas. La escala vertical está exagerada 50 veces.	Pag. 167
Figura 6.19.-	Comparación de los resultados obtenidos para la modelización de la cuenca del Vallès-Penedès con la paleogeografía establecida para el Langhiense. Véase explicación en el texto. An. Sant Sadurní d'Anoia; Ma. Martorell; Pa. El Papiol; Pc. Pacs del Penedès; Ve. El Vendrell; Vi. Vilafranca.	Pag. 168
Figura 6.20.-	Situación del Embalse de Camarasa. El recuadro amarillo indica la zona de estudio (ver figura 6.21 y 6.23)	Pag. 172
Figura 6.21.-	Mapa geológico de la zona del embalse de Camarasa. Modificado de Fernández (2004).	Pag. 173
Figura 6.22.-	Esquema tridimensional de la estratificación observada en las aguas del embalse de Camarasa (capas nefeloides) que definen el modelo de transporte y sedimentación según Casamor (1992). Se ha representado la superficie del fondo del embalse (superficie naranja) y la anchura media de cada tramo (en dirección X). Nótese el cambio de pendiente cerca de la zona media del embalse y que provoca la división de la capa más profunda y la formación de la capa intermedia. La densidad de la trama indica la mayor o menor concentración del sedimento en suspensión en cada capa. El tamaño de las flechas representa la magnitud del proceso considerado. Se indica la zona que se ha tenido en cuenta en los experimentos presentados. Modificada de Casamor (1992).	Pag. 174
Figura 6.23.-	Configuración inicial de la zona de estudio, situada en la parte terminal del embalse (véase recuadro amarillo en la figura 6.20). La línea roja y las cruces amarillas marcan el contorno y la discretización utilizada. En el recuadro superior se puede observar la batimetría inicial del embalse. La escala vertical está exagerada cuatro veces.	Pag. 176
Figura 6.24.-	Discretización de la zona de estudio en 5 filas por 33 columnas. En detalle pueden verse las zonas de entrada y de salida (de agua y sedimento) del embalse y los nodos definidos para tal efecto. También se aprecian los contornos definidos sin flujo (cerrados) y los nodos y elementos triangulares de la malla de elementos finitos.	Pag. 178
Figura 6.25.-	Mapa de contornos para el último intervalo de tiempo del primer experimento donde se representa la superficie potencial a partir de la cual se calcula el sistema de flujo (flechas blancas). La escala de color (valores en metros) corresponde a la altura de la superficie potencial. Las cruces verdes marcan los nodos de la malla de elementos finitos. Los círculos amarillos marcan las zonas del embalse donde existen problemas con el sistema de flujo obtenido (véase explicación en el texto).	Pag. 180

Figura 6.26.-	Mapa de contornos para el segundo experimento donde se representa la superficie potencial para el último y penúltimo intervalo de tiempo (abierto y cerrado respectivamente). La escala de color (valores en metros) corresponde a la altura de la superficie potencial. Las cruces verdes marcan los nodos de la malla de elementos finitos. Nótese la diferencia entre las dos superficies obtenidas en función de si el contorno está abierto o cerrado.	Pag. 181
Figura 6.27.-	Resultados obtenidos para el primer experimento. Se ha representado la distribución de facies al final del experimento (A), así como la distribución (en porcentaje) de los dos sedimentos clásticos mayoritarios (C y D). No se ha representado el sedimento clástico más grueso ya que su porcentaje es muy bajo. También se incluye la deposición total en el embalse y la tasa de sedimentación que representa (B).	Pag. 183
Figura 6.28.-	(página anterior) Resultados obtenidos para el segundo experimento y para los intervalos de tiempo 009 (arriba) y 010 (abajo) correspondientes a una situación de embalse cerrado y abierto respectivamente. Se ha representado la distribución de facies, así como la distribución (en porcentaje) de los dos sedimentos clásticos mayoritarios para los dos intervalos de tiempo. Igual que en la figura anterior, no se ha representado el sedimento clástico más grueso. También se incluye la deposición total en el embalse y la tasa de sedimentación que representa. La escala de color correspondiente a las facies puede verse en la figura 6.27.	Pag. 184
Figura 6.29.-	Representación del volumen de sedimento acumulado (normalizado) que ha quedado depositado, en suspensión y que ha salido de la zona en cada intervalo de tiempo. A indica un intervalo de tiempo abierto y C , cerrado (sólo para el segundo experimento). Nótese como, en el segundo experimento, los intervalos de tiempo considerando un contorno abierto contienen un volumen de sedimento depositado menor que en los intervalos cerrados y un volumen de sedimento mayor que ha salido, mientras que en el primer experimento la tendencia es lineal sin existir diferencias entre los diferentes intervalos de tiempo.	Pag. 186
Figura 6.30.-	Tasas de sedimentación (en cm/a) obtenidas en los dos experimentos realizados considerando la presa siempre abierta (exp. 1) o abierta-cerrada alternativamente (exp. 2). También se incluyen los valores según Costa (2003) para su comparación.	Pag. 187
Figura 7.1.-	Esquema de evolución de un perfil teórico (A) en función del proceso dominante (erosión o deposición). En función del flujo de agua presente (flecha horizontal) puede existir la deposición o erosión de diferentes tipos de sedimento en un mismo instante. Según si se considera primero la erosión o la deposición el resultado puede ser muy distinto. Opción 1: Si primero se considera la erosión existe una cantidad de arcilla anteriormente depositada que pasa a formar parte del sedimento en suspensión y puede ser transportada. La profundidad puede aumentar (en función de la arena gruesa que se deposite en segundo lugar) y la velocidad de flujo puede disminuir. Opción 2: Si es la deposición el primer proceso que se considera, no existe sedimento anteriormente depositado que pueda ser transportado en suspensión ya que la deposición de la arena gruesa no permite la erosión del sedimento. La profundidad de agua disminuye y la velocidad de flujo puede aumentar. Nótese como, en función del proceso que actúa primero se obtienen perfiles muy diferentes y, por tanto, la evolución del perfil será muy distinta en uno u otro caso, condicionando totalmente el resultado final.	Pag. 199

Listado de tablas

Tabla 4.1.-	Valores introducidos en el experimento considerando un transporte difusivo.	Pag. 93
Tabla 4.2.-	Valores introducidos en el experimento considerando un transporte advectivo-dispersivo.	Pag. 96
Tabla 5.1.-	Relación entre el nombre de la propiedad y el parámetro que visualiza. Los índices XXX indican el valor del intervalo de tiempo <i>jt</i> i considerado.	Pag. 138
Tabla 5.2.-	Relación entre los diferentes ficheros generados por el programa CREATESCRIPITS y la función principal que realizan dentro del programa GOCAD. Para una explicación más extensa y completa, ver el apartado 4.2 del Anexo.	Pag. 139
Tabla 6.1.-	Valores introducidos en el experimento y referentes a los parámetros de sedimentación, transporte y contorno de la malla de elementos finitos. También se incluyen los parámetros que definen las dos asociaciones consideradas de organismos productores de carbonato.	Pag. 151
Tabla 6.2.-	Valores introducidos en los dos experimentos y referentes a los parámetros de sedimentación, transporte y contorno de la malla de elementos finitos.	Pag. 179

Símbolos y abreviaciones utilizadas

a	Factor de crecimiento	(adimensional)
$\alpha_x \alpha_y$	Dispersividad	L
b	Factor de mortandad	(adimensional)
C	Masa de sedimento	M
C_f	Coefficiente de fricción	(adimensional)
C_d	Potencia de sedimento depositado	L
CFL	Número de Courant	(adimensional)
d	Diámetro de una partícula	L
D^*	Coefficiente de difusión	L ² /T
dt_f	Intervalo de tiempo de transporte	T
dt_s	Intervalo de tiempo de deposición	T
$\Delta t_{Courant}$	Intervalo de tiempo de cálculo	T
Δt_{layer}	Intervalo de tiempo definido por el usuario	T
ρ	Densidad del agua	M/L ³
ρ_s	Densidad del sedimento	M/L ³
f_{ij}	Factor de interrelación entre las especies i y j	(adimensional)
F	Número de Froude	(adimensional)
F_g	Fuerza gravitacional	LM/T ²
F_d	Fuerza de fricción	LM/T ²
f_d	Factor de deposición	(adimensional)
F_l	Fuerza de levantamiento	LM/T ²
f_s	Factor de escalamiento	(adimensional)
f_v	Factor de velocidad	(adimensional)
g	Aceleración	L/T ²
$G_o \ G_1$	Constantes para determinar el coeficiente de difusión	(adimensional)
g_i	Factor de influencia por presencia de limo carbonatado	(adimensional)
h	Altura piezométrica	L
j_{iC_k}	Factor de mortandad por presencia de sedimento clástico en suspensión	(adimensional)
jti	Número del intervalo de tiempo definido por el usuario	(adimensional)
k	Conductividad hidráulica	M/T
k_d	Constante de decrecimiento	(adimensional)
$ncol$	Número total de columnas	(adimensional)
nel_i	Número del elemento inferior	(adimensional)
nel_s	Número del elemento superior	(adimensional)
$nnode$	Número del nodo	(adimensional)
nti	Número total de intervalos de tiempo jti	(adimensional)
η	Viscosidad dinámica	L ² /T
Pe_x	Número de Grid-Peclet	(adimensional)
Q	Flujo de fluido	L ³ /T
Q_m	Tasa de entrada	M/T
Re	Número de Reynolds	(adimensional)
S_i	Velocidad de deposición corregida	L/T
t	Tiempo	T
v	Velocidad lineal del flujo	L/T
V_{an}	Volumen analítico	L ³
V_{ap}	Volumen aparente	L ³
v_c	Velocidad crítica de deposición	L/T
v_s	Velocidad de deposición o <i>settling</i> teórica	L/T
W	Profundidad de agua	L
x	Coordenada espacial	L
y	Coordenada espacial	L

Terminología utilizada

<i>Bedload</i>	Carga de fondo
<i>Characteristics method (MOC)</i>	Método de Características
<i>Drag force</i>	Fuerza de fricción
<i>Forward model</i>	Modelo de avance
<i>Fluid flow</i>	Flujo de fluido
<i>Hindered settling</i>	Deposición / sedimentación / decantación obstaculizada
<i>Inverse model</i>	Modelo inverso
<i>Lift force</i>	Fuerza de levantamiento
<i>Random walk method (RW)</i>	Método del Paso-aleatorio
<i>Settling velocity</i>	Velocidad de deposición / sedimentación / decantación
<i>Suspended load</i>	Carga en suspensión
<i>Time-stepping</i>	Discretización temporal

Índice 