

# Estratigrafía secuencial de sistemas deltaicos en cuencas de antepaís: ejemplos de Sant Llorenç del Munt, Montserrat y Roda (Paleógeno: cuenca de antepaís surpirenaica)

Miguel López Blanco

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

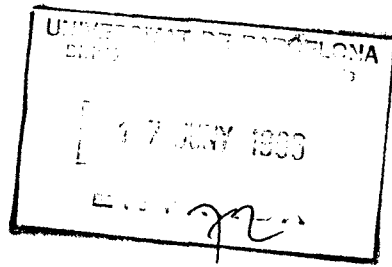
**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tesisenred.net](http://www.tesisenred.net)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT DE BARCELONA

Departament de Geologia Dinàmica,  
Geofísica i Paleontologia



Facultat de Geologia  
Zona Universitària de Pedralbes  
Tel. 402 13 76  
Fax 402 13 40  
08071 Barcelona

## ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL DE SISTEMAS DELTAICOS EN CUENCAS DE ANTEPAIS: EJEMPLOS DE SANT LLORENÇ DEL MUNT, MONTSERRAT Y RODA (Paleógeno, cuenca de antepaís surpirenaica)

Memoria realizada por Miguel LÓPEZ BLANCO en el Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia de la Facultat de Geologia de la Universidad de Barcelona, dirigida por los doctores Mariano Marzo Carpio, del mencionado departamento y Luís Pomar Goma del Departament de Ciències de la Terra de la Universitat de les Illes Balears, para optar al grado de Doctor en Geología.

Barcelona, Junio de 1996

Los directores:

Mariano Marzo Carpio

Luis Pomar Goma

El doctorando, Miguel López Blanco

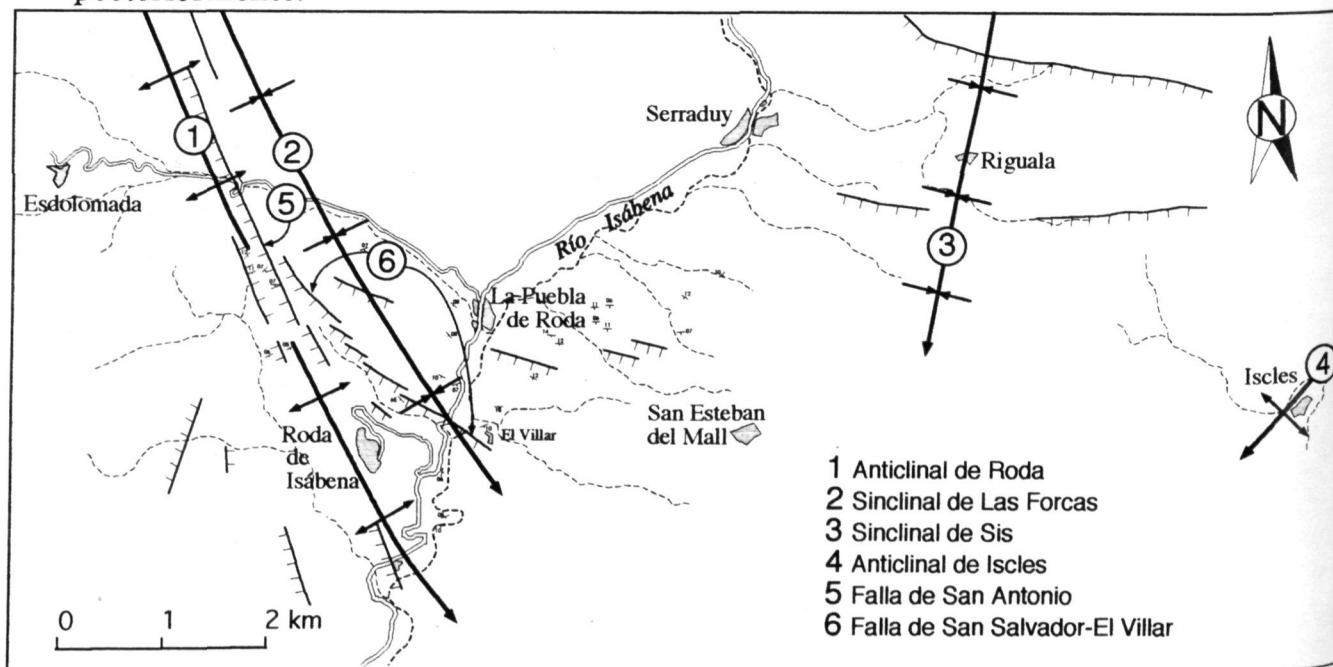
## 6) RELACIONES ENTRE LA SEDIMENTACIÓN Y LA ACTIVIDAD TECTÓNICA

### 6.1) ESTRUCTURA LOCAL

A grandes rasgos la cuenca de Graus-Tremp es un vasto sinclinorio de eje ESE-WNW. La estructura de este gran sinclinorio es compleja ya que en éste existen una serie de fallas y pliegues menores que, como se verá posteriormente, influyen en la sedimentación local

Concretamente, la Arenisca de Roda se encuentra en el flanco norte del sinclinorio. En esta zona existen una serie de anticlinales y sinclinales laxos. Los pliegues más importantes de la zona son el anticlinal de Roda (Turbón), sinclinal de las Forcas, y sinclinal de Sis (figura R.37).

El *anticlinal de Roda*, situado en la zona occidental de los afloramientos estudiados, es un pliegue de eje curvilíneo que en la zona de Roda varía su orientación de NNW-SSE (al norte) a NW-SE (al S). Hacia el norte, donde este anticlinal afecta a materiales progresivamente más antiguos y ya fuera de la zona de estudio, éste se hace cada vez más agudo, mientras que su eje se orienta N-S en la zona del Turbón. Hacia el sureste, hasta llegar al río Noguera Ribagorzana, se hace cada vez más suave y se orienta de WNW-ESE. Este pliegue es un anticlinal asimétrico vergente al SW y su zona axial se encuentra complicada por la presencia de una serie de fallas que trataremos posteriormente.



**Figura R.37.** Mapa estructural del área estudiada, donde se representan los principales pliegues y fallas.

*Structural map of the study area where the main folds and faults are represented.*

## 6) Relaciones entre la sedimentación y la actividad tectónica.

El *sinclinal de las Forcas* se sitúa a un kilómetro (aproximadamente) al NE del anticlinal de Roda. Presenta variaciones de orientación similares a las descritas para éste (ver figura R.37), siendo también más agudo hacia el NW.

Hacia el este, y separado del sinclinal de las Forcas por una zona estructurada en una serie de anticlinales y sinclinales muy laxos y orientados NNW-SSE (ver figura R.37), se encuentra el sinclinal de Sis. El eje de este pliegue está orientado de NNE a SSW, y es una estructura asimétrica de vergencia W.

Las fracturas, salvo excepciones, son subverticales, orientadas entre E-W y ESE-WNW y con un desplazamiento vertical de métrico a decamétrico.

Al E del río Isábena, las principales fracturas se orientan entre E-W y ESE-WNW. Al W del río Isábena, a medida que nos aproximamos al anticlinal de Roda, la orientación de las fallas principales varía de ESE-WNW (al E) hasta ponerse paralelas al eje del anticlinal en las zonas más próximas a éste. Al SW del pliegue, las fracturas se orientan entre SSE-NNW y SSW-NNE. Así, el trazado cartográfico de estas fallas se asemeja a un abanico o haz donde el eje o ápice se encontraría en la zona axial del anticlinal de Roda.

La *falla de San Antonio* se encuentra a unos cien metros al E del anticlinal de Roda. Es una falla subvertical que buza al NE y con un juego inverso de varias decenas de metros.

La *falla de San Salvador-El Villar* se encuentra al E de la de San Antonio, orientada ligeramente oblicua con respecto a ésta. Cabe destacar que no se trata de una falla única sino que consiste en un sistema en relevo de fallas subverticales menores que hunden los bloques situados al SW. El salto vertical observado es de varias decenas de metros.

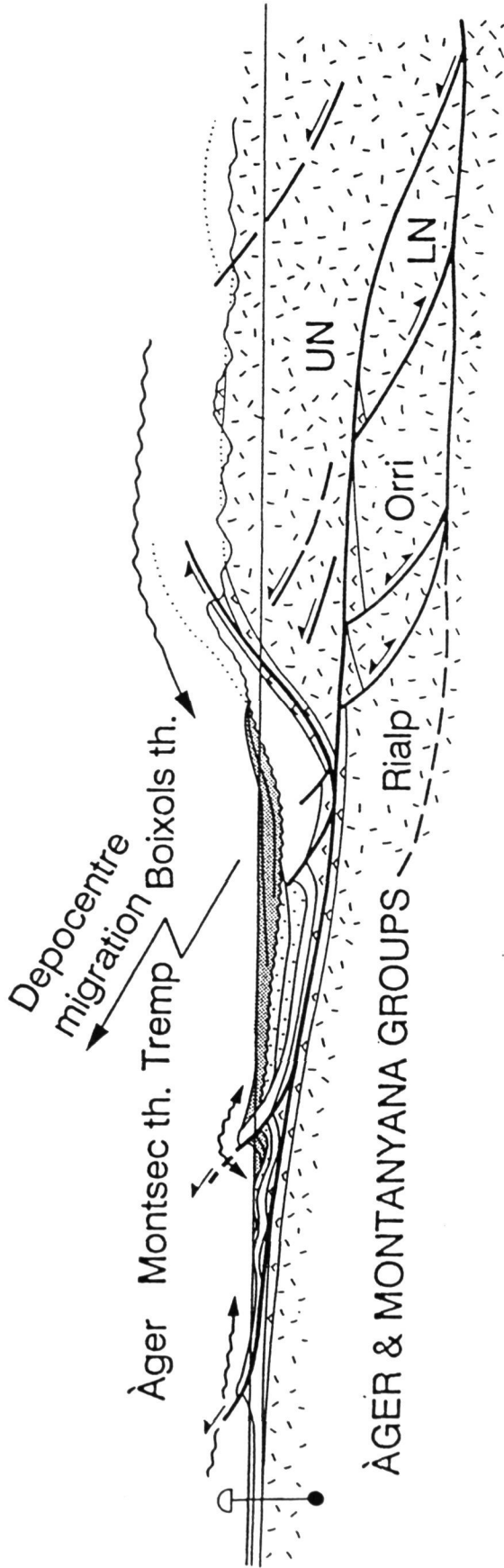
Las estructuras de plegamiento descritas se pueden interpretar como el reflejo en superficie de estructuras profundas que, en este caso, se corresponderían con rampas laterales y oblicuas de las unidades cabalgantes de la Unidad Central Surpirenaica.

La fracturación observable en la zona es posterior al plegamiento y acentúa algunos de ellos. La disposición en abanico, a partir del anticlinal de Roda de una parte de las fallas, la componente inversa y el hundimiento de los bloques SW en algunas de ellas, sugieren una relación, por lo menos parcial, con el reajuste tardío de las estructuras profundas anteriormente citadas.

### 6.2) INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD TECTÓNICA EN LA SEDIMENTACIÓN DE LA ARENISCA DE RODA

Como ya se indicó en el capítulo introductorio, la sedimentación de la Arenisca de Roda tuvo lugar durante la segunda etapa evolutiva de la cuenca de

S-N  
stage II



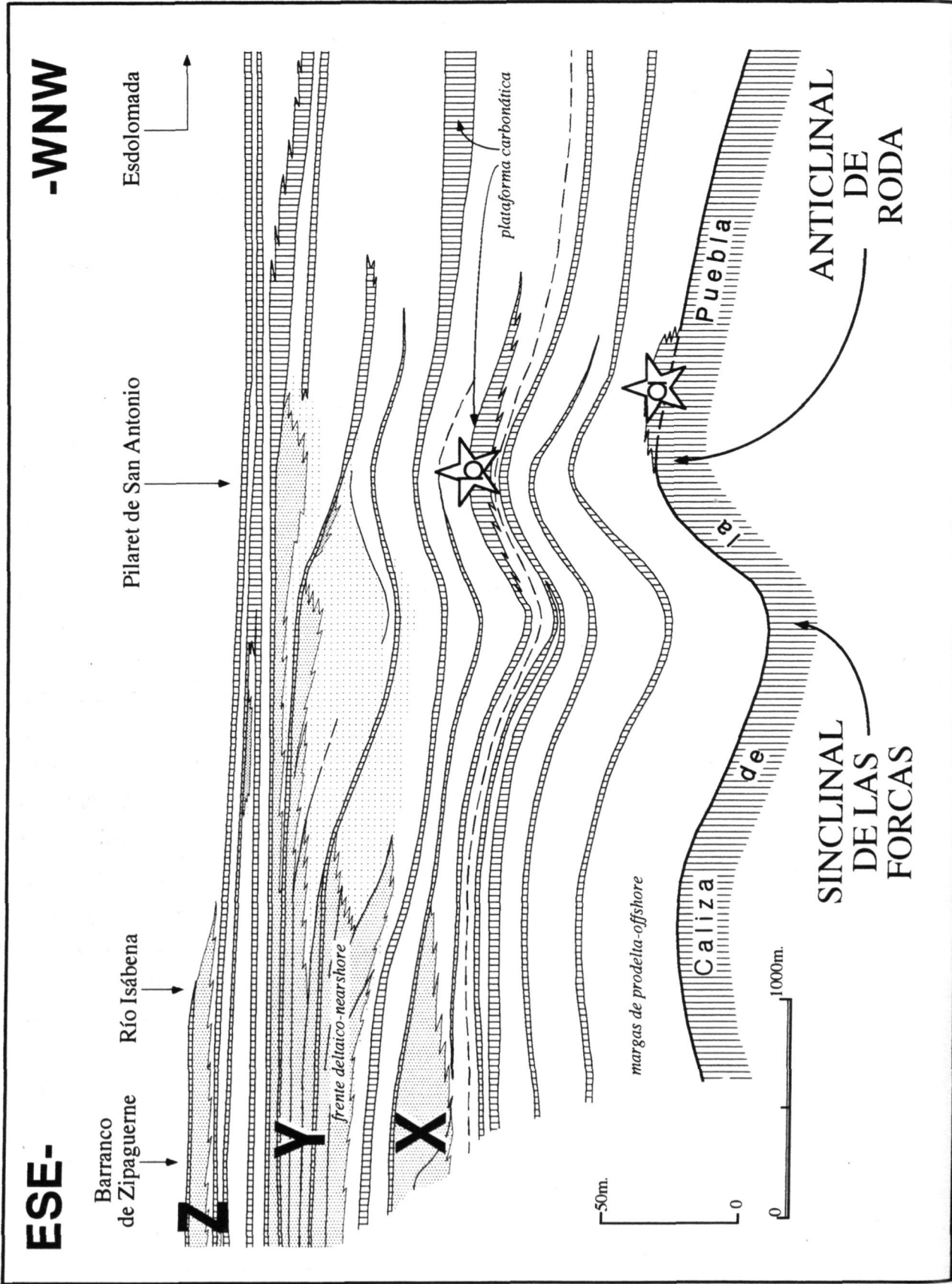
**Figura R.38.** Corte geológico de la vertiente sur de los Pirineos en el que se muestra el episodio II de Puigdefàbregas *et al.* (1989). Los sedimentos sintectónicos relativos a este episodio se indican con una trama gris.

*Southern Pyrenees cross-section showing stage II of Puigdefàbregas et al. (1989). The syntectonic sediments related to this episode are represented in grey.*

antepaís surpirenaica (Puigdefàbregas *et al.*, 1989) en un contexto caracterizado por el desarrollo de las estructuras esquematizadas en la figura R.38. Tal y como reconocen la mayoría de los autores precedentes, la naturaleza sintectónica de la Arenisca de Roda queda registrada en su carácter fundamentalmente terrígeno-arcósico, relacionado con la emersión y desmantelamiento de relieves graníticos, originados al norte de la zona estudiada durante las fases iniciales del apilamiento antiformal de la zona axial (figura R.38). Por otra parte Yang y Nio (1989) destacan que la sedimentación de la Arenisca de Roda estuvo controlada por un aumento de la subsidencia de la cuenca, en respuesta a la carga tectónica acumulada a lo largo de su margen norte. Dicho incremento de la subsidencia, no sólo habría controlado la posición del depocentro de la formación estudiada, sino que además habría producido un ascenso relativo del nivel del mar y un aumento de la descarga mareal ("tidal discharge").

Complementando estas conclusiones de tipo general, este trabajo ha permitido detallar la influencia sobre la sedimentación de la Arenisca de Roda del crecimiento de parte de las estructuras tectónicas mostradas en la figura R.37. Dicha influencia se deduce a partir del corte R.39, los mapas de isopacas de la figura R.40, los mapas de distribución de fauna de alveolinas y discocyclinas de la figura R.41 y los mapas de paleocorrientes de la figura R.42.

Uno de los hechos que inducen a pensar en la existencia de una actividad tectónica local relacionada con el crecimiento de pliegues, es la variación en la potencia de diferentes cuerpos sedimentarios. El corte de la figura R.39 discurre de ESE a WNW, desde el barranco de Zipaguerne hacia Esdolomada, y está construido a partir de la correlación de una serie de columnas estratigráficas, tomándo como "datum" o nivel horizontal uno de los tramos transgresivos dentro de la unidad Z. Pese a haber restituido a la horizontal uno de los niveles más altos estratigráficamente, se puede apreciar que la mayor parte de la serie está afectada por el sinclinal de Las Forcas y el anticlinal de Roda. Este hecho nos indica la existencia de una intensidad de plegamiento no uniforme para las diferentes unidades.



**Figura R.39.** Corte de la Arenisca de Roda desde el Barranco de Zipaguerne a las inmediaciones de Esdolomada. X, Y y Z son los principales cuerpos arenosos. a) plataforma carbonática desarrollada sobre el anticlinal de Roda y la Caliza de la Puebla. b) plataforma carbonática desarrollada sobre el anticlinal de Roda (Caliza de la Santa Creu).

*Roda Sandstone cross-section from Zipaguerne to the surroundings of Esdolomada. X, Y and Z are the main sandbodies. a) carbonate platform developed over the Roda anticline and "La Puebla" Limestone. b) Carbonate platform developed over the Roda anticline (Santa Creu limestone).*

Esta intensidad de plegamiento parece mayor cuanto más bajos en la serie son los niveles, lo que es coherente con la existencia de un plegamiento sinsedimentario. La formación o movimiento de estos pliegues se refleja en aumentos de potencia en la zona del sinclinal de Las Forcas y adelgazamiento de la serie en el Anticlinal de Roda-Turbón. Este hecho también queda patente en los mapas de isopacas de la figura R.40, sobre todo en los de la unidad U+V, X, Y e Y3. Los niveles más altos de la serie, como Y4 y Z no muestran variaciones de potencias relacionables con el movimiento de estos pliegues, por lo que se deduce que la actividad de éstos durante la deposición de Y4 y Z fue nula o muy poco importante.

La figura R.41 consta de una serie de mapas en los que se muestra la distribución de la fauna de alveolinas y discocyclinas en los niveles transgresivos. La presencia de uno u otro tipo de foraminífero resulta, a grandes rasgos, un indicador paleobatimétrico. Las alveolinas se corresponden con zonas someras, mientras que las discocyclinas se corresponden con batimetrías mayores. Hasta que no se llega a la unidad Y la fauna no refleja el plegamiento ya que los pliegues se hallan en zonas demasiado profundas de la cuenca, dominadas por las facies de discocyclinas (figura R.41a, b y c). Dentro de la unidad Y, más concretamente en Y1 e Y3 (figuras R.41d y e), encontramos afloramientos con alveolinas en zonas situadas sobre o cerca del anticlinal de Roda. Estos afloramientos están limitados, tanto al SW como al NE, por facies de discocyclinas. Este hecho nos indica la posible existencia de zonas de menor batimetría sobre el anticlinal en crecimiento. En la unidad Y4 (figura R.41f), al igual que se observa en el mapa de isopacas, parece ser que la actividad del plegamiento se ha atenuado, ya que la fauna no indica la existencia de estos posibles paleoaltos sobre el anticlinal.

Otro dato que apoya la idea de la existencia del crecimiento del anticlinal de Roda la encontramos en la presencia de facies arrecifales o de plataforma carbonática fuertemente desarrolladas sobre su vertical. En toda la sucesión se han detectado dos casos: uno es el pequeño arrecife desarrollado sobre la Caliza de la Puebla, y el otro es el nivel que se ha denominado Caliza de la Santa Creu (figura R.39). En el mapa de la figura R.40 se muestran las isopacas de caliza de



**Figura R.40.** Mapas de isopacas. a) Situación de las principales columnas estratigráficas a partir de las cuales se han confeccionado los mapas de isopacas. b) Isopacas de la unidad U. c) Isopacas de las unidades V y W. d) Isopacas de la unidad X. e) Isopacas de la unidad Y. f) Isopacas de la unidad Z. g) Isopacas de la unidad Y3. h) Isopacas de la unidad Y4. i) Isopacas de la unidad de Calizas de la Santa Creu.

*Isopach maps. a) Location of the main stratigraphic logs used in the map construction. b) Isopachs of unit U. c) Isopachs of the V+W units. d) Isopachs of unit X. e) Isopachs of unit Y. f) Isopachs of unit Z. g) Isopachs of unit Y3. h) Isopachs of unit Y4. i) Isopachs of unit "La Santa Creu" Limestones.*

**Figura R.41.** Mapas del contenido en alveolinas y discocyclinas en los intervalos transgresivos. a) Unidad U. b) Unidad W. c) Unidad X. d) Unidad Y1. e) Unidad Y3. f) Unidad Y4.

*Maps of alveolina and discocyclina content on the transgressive intervals. a) Unit U. b) Unit W. c) Unit X. d) Unit Y1. e) Unit Y3. f) Unit Y4.*

**Figura R.42.** Mapas de paleocorrientes. a) Unidad X3. b) Unidad Y1. c) Unidad Y2. d) Unidad Y3. e) Unidad Y4. f) Unidad Z4.

*Paleocurrent maps. a) Unit X3. b) Unit Y1. c) Unit Y2. d) Unit Y3. e) Unit Y4. f) Unit Z4.*

esta unidad, y en él se puede apreciar como los valores de potencias máximas se hallan sobre la cresta del anticlinal, disminuyendo rápidamente hacia el SW y mas suavemente hacia el NE. La deposición de estas facies carbonáticas podría estar ligada a la existencia de un paleoalto submarino (fig. R.43), en el que las condiciones para el establecimiento de la fauna que acabó dando lugar a estas microplataformas eran más favorables que en las zonas adyacentes más deprimidas.

En la figura R.42 se recogen los mapas de paleocorrientes correspondientes a las unidades X3, Y1, Y2, Y3, Y4 y Z4. En todos estos mapas se observa (con mayor o menor claridad) que las corrientes inicialmente van dirigidas hacia el S o SW (afloramientos del NE), posteriormente evolucionan a otras dirigidas hacia el NW (afloramientos del SW), que representan los últimos episodios de la progradación. Las paleocorrientes dirigidas hacia el S y SW representan la progradación deltaica inducida por los aportes procedentes directamente del continente. Las paleocorrientes dirigidas hacia el NW representan el retrabajamiento mareal. Estas corrientes orientadas hacia el NW guardan un cierto paralelismo con la orientación del anticlinal de Roda y el sinclinal de las Forcas. Cabe la posibilidad de que estas corrientes mareales o de deriva litoral estuviesen "canalizadas" o influenciadas en su orientación por el crecimiento de el anticlinal, que daría lugar a un paleoalto elongado de NNW a SSE que compartimentaría la cuenca. Otra explicación, que no implica el

6) Relaciones entre la sedimentación y la actividad tectónica.

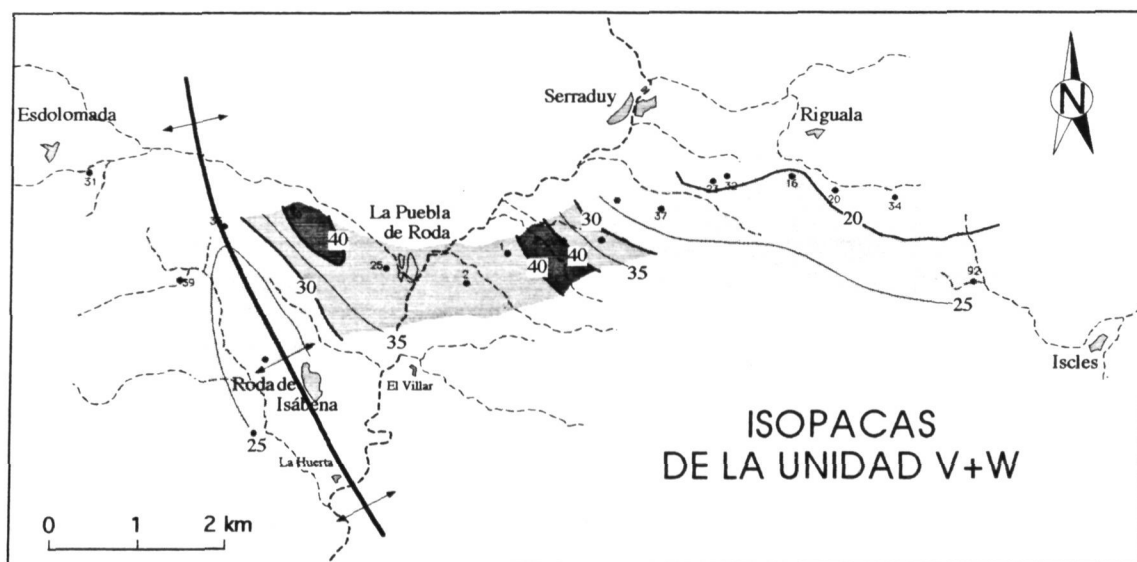
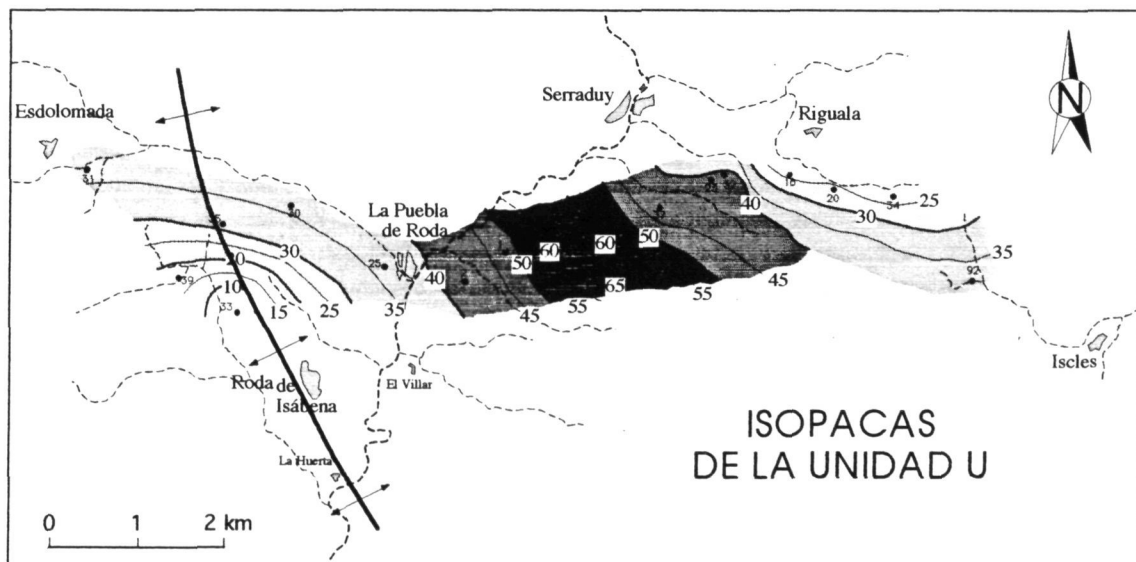
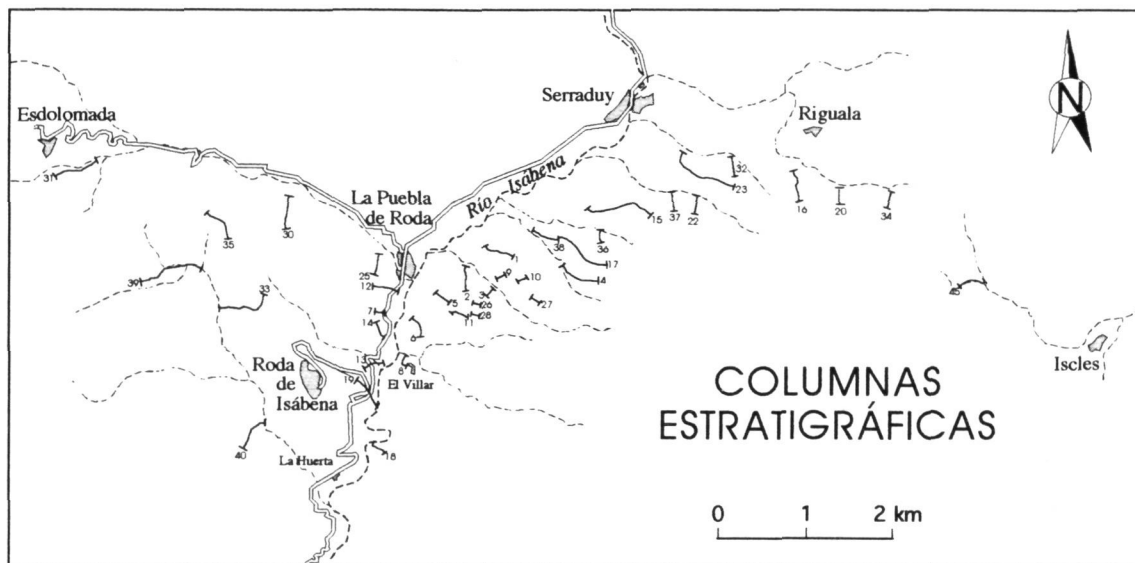


Figura R.40 a, b y c.

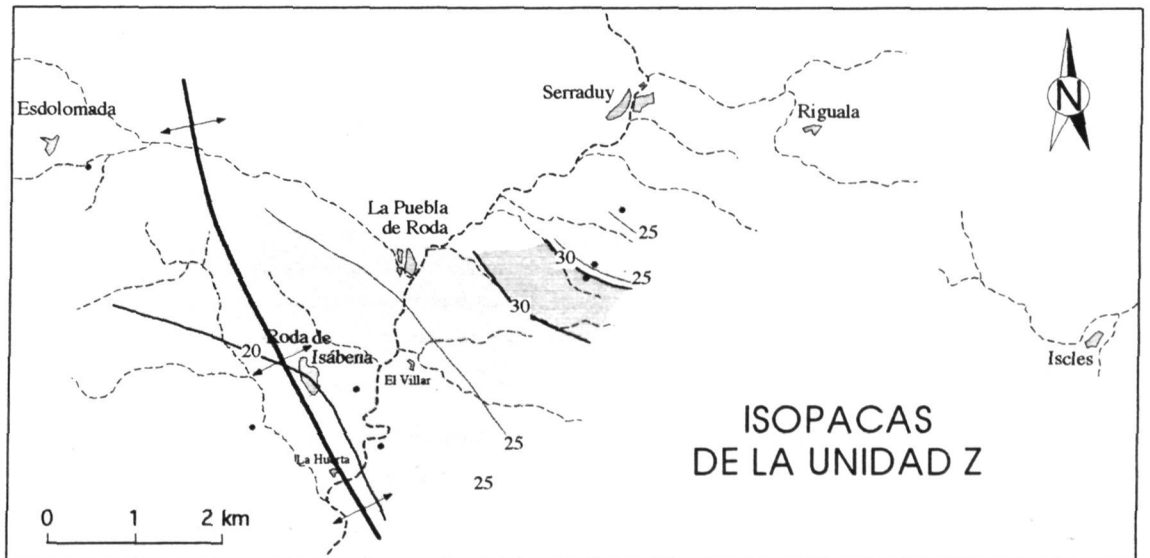
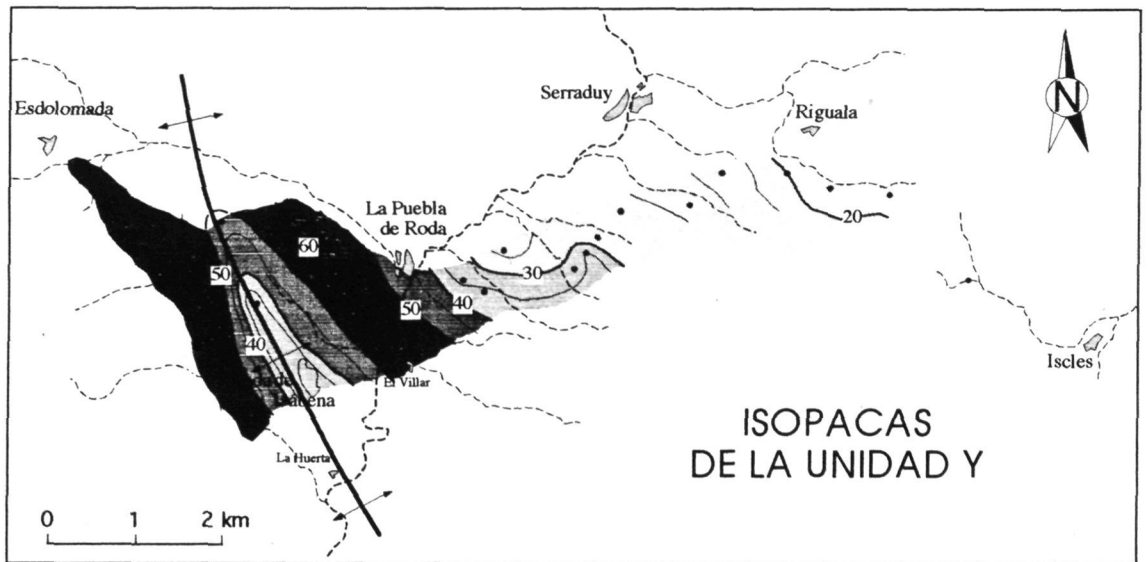
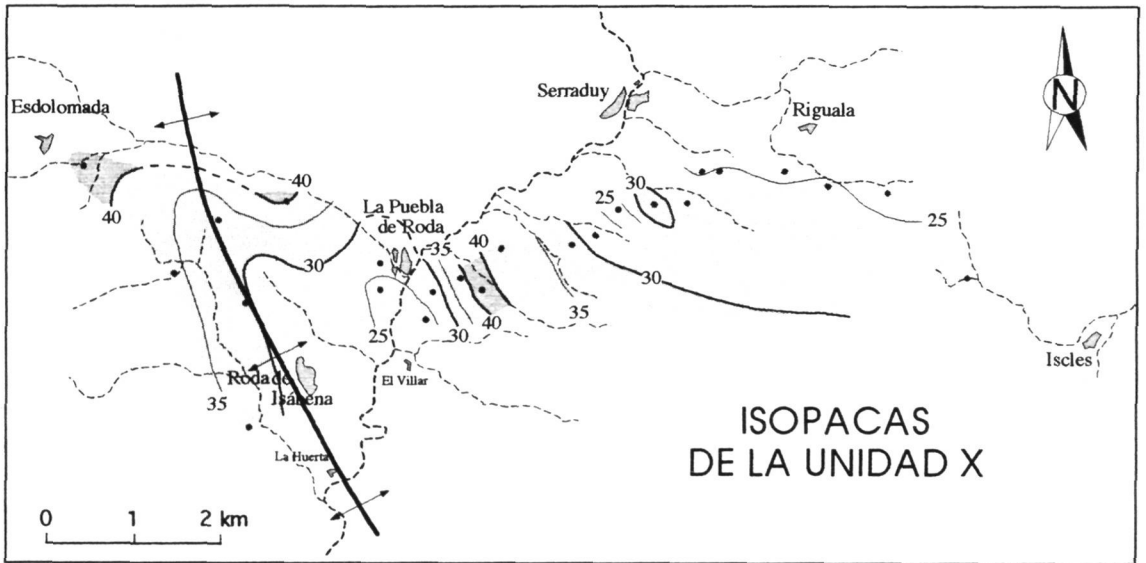


Figura R.40 d, e y f

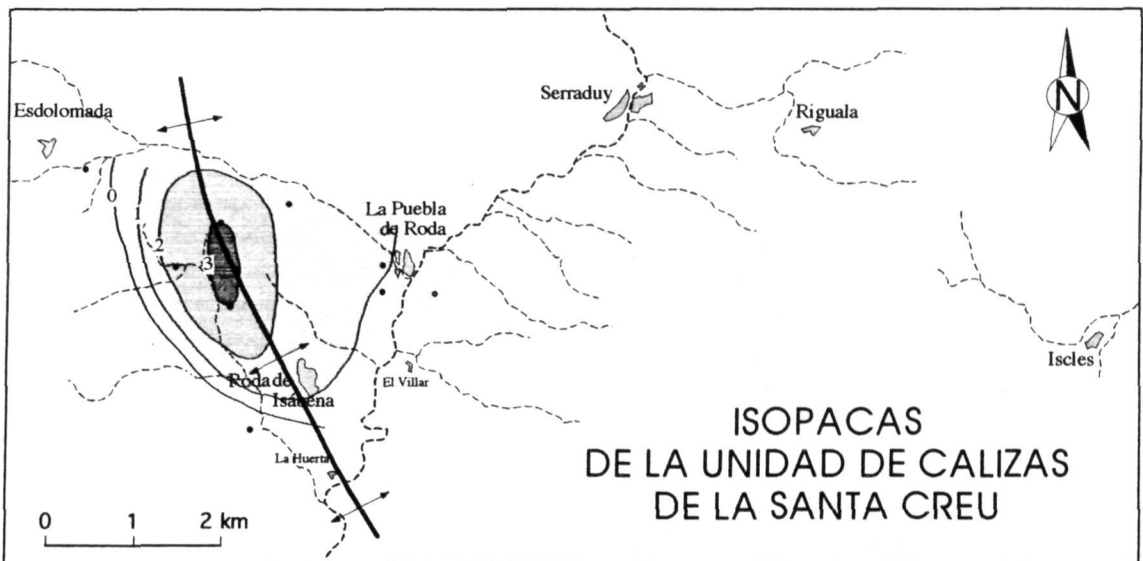
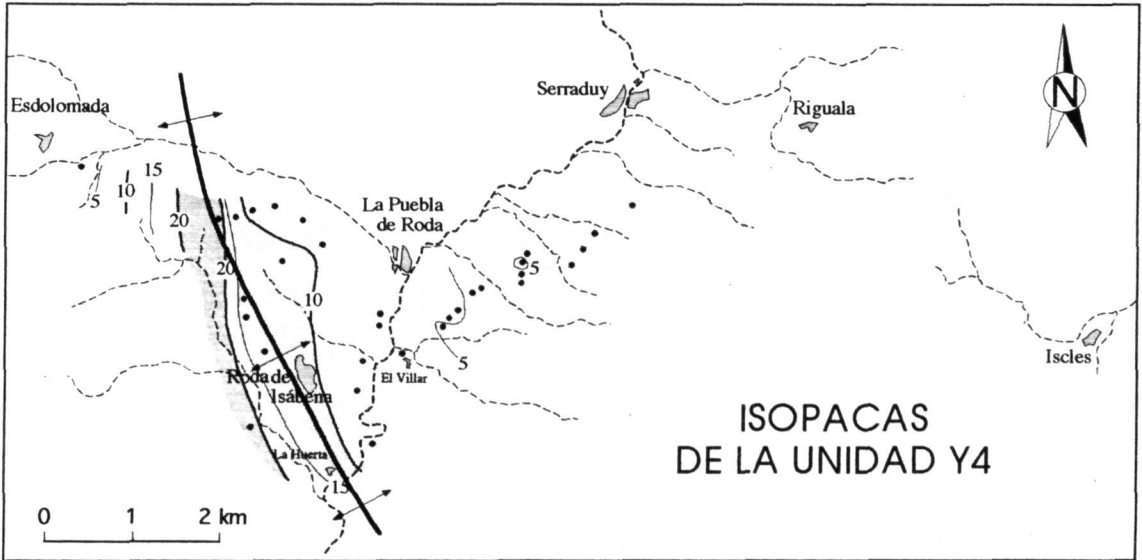
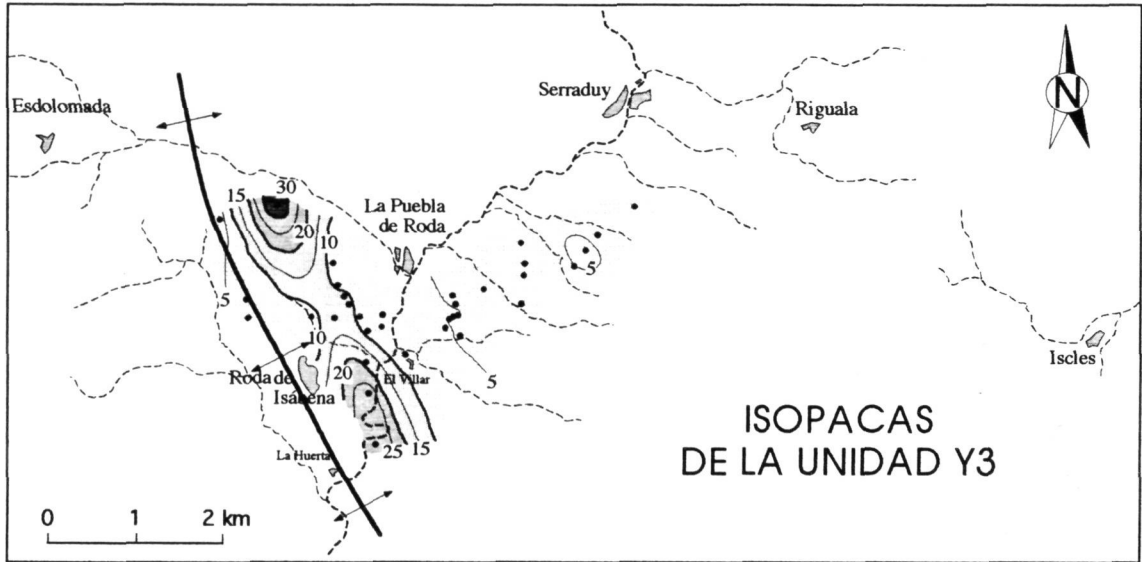


Figura R.40 g, h e i

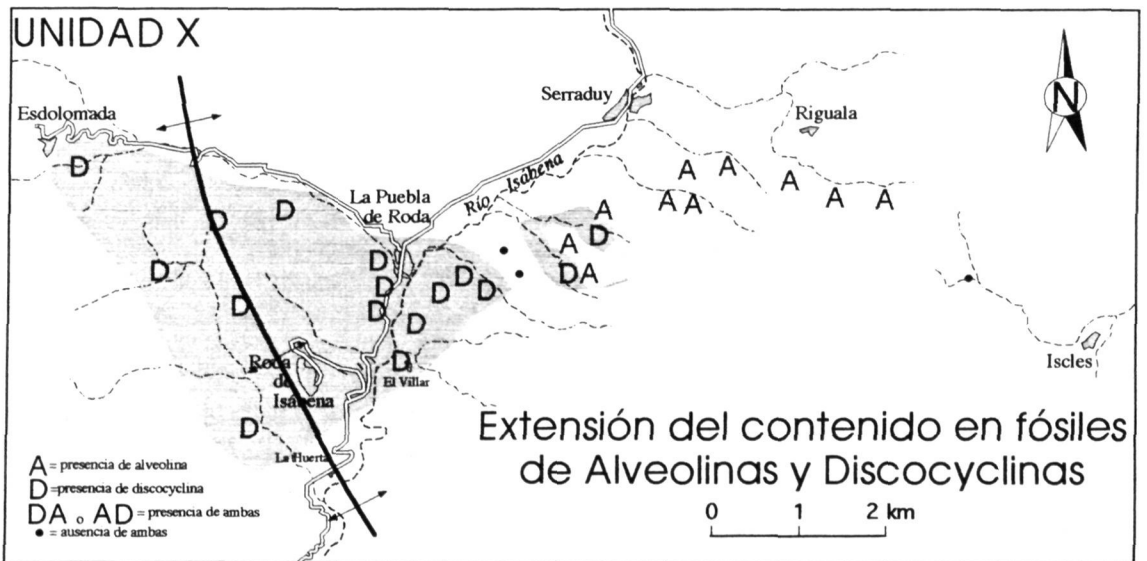
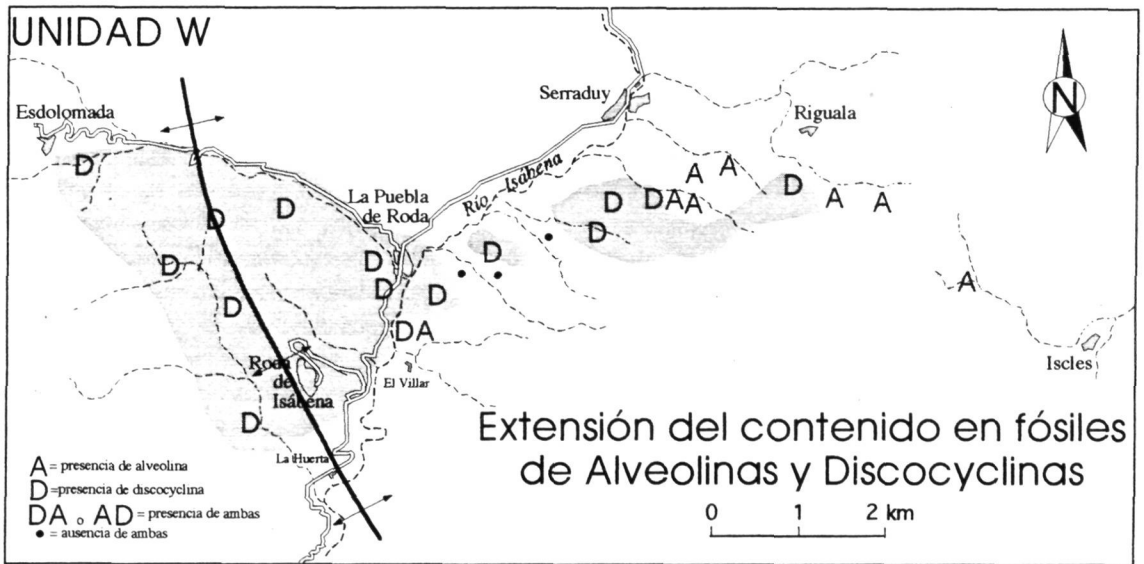
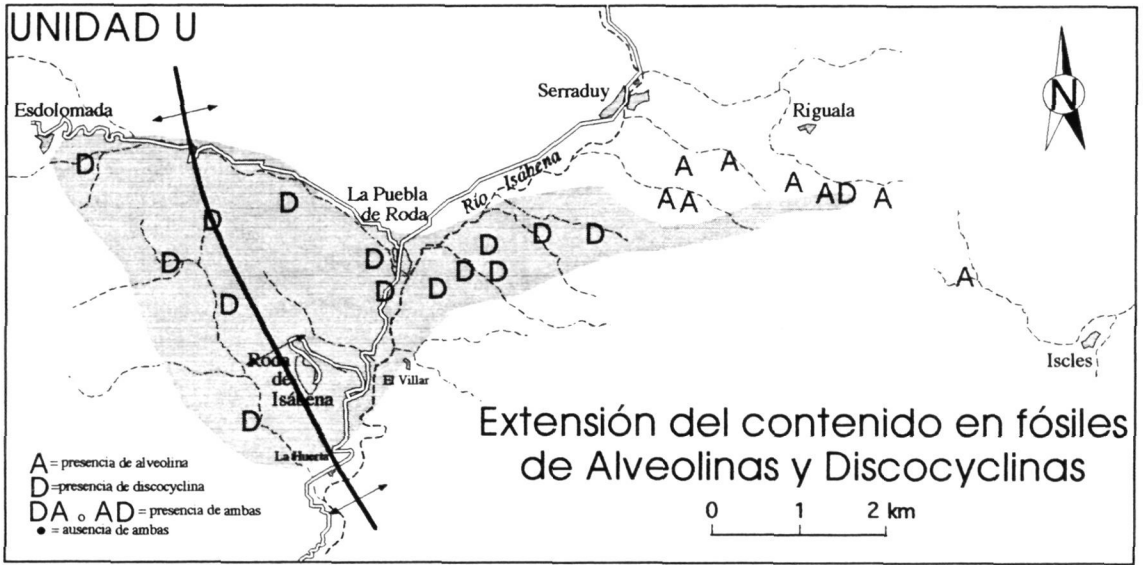


Figura R.41 a, b y c

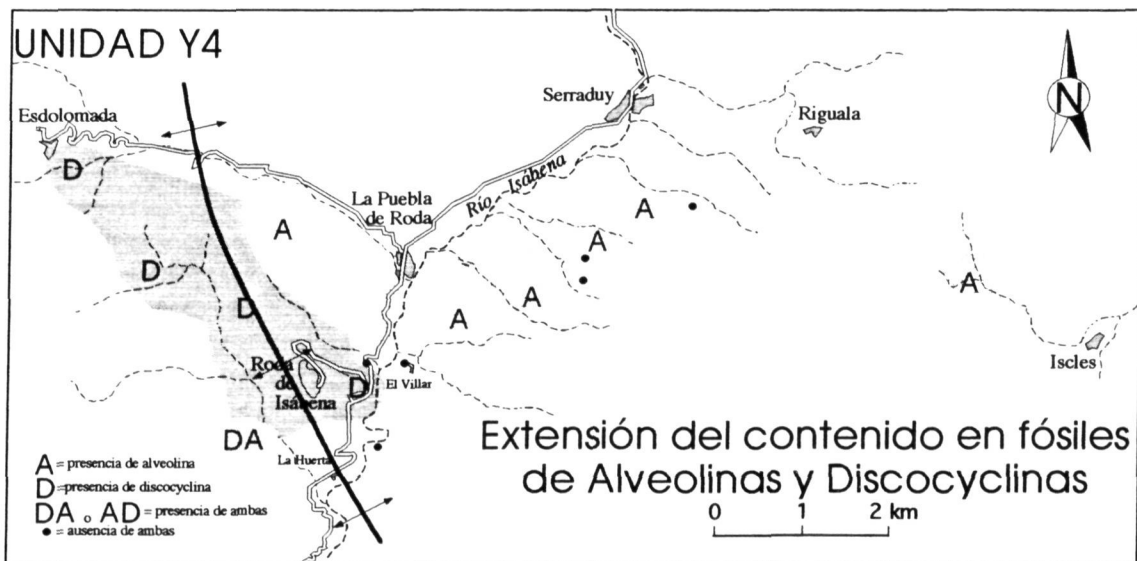
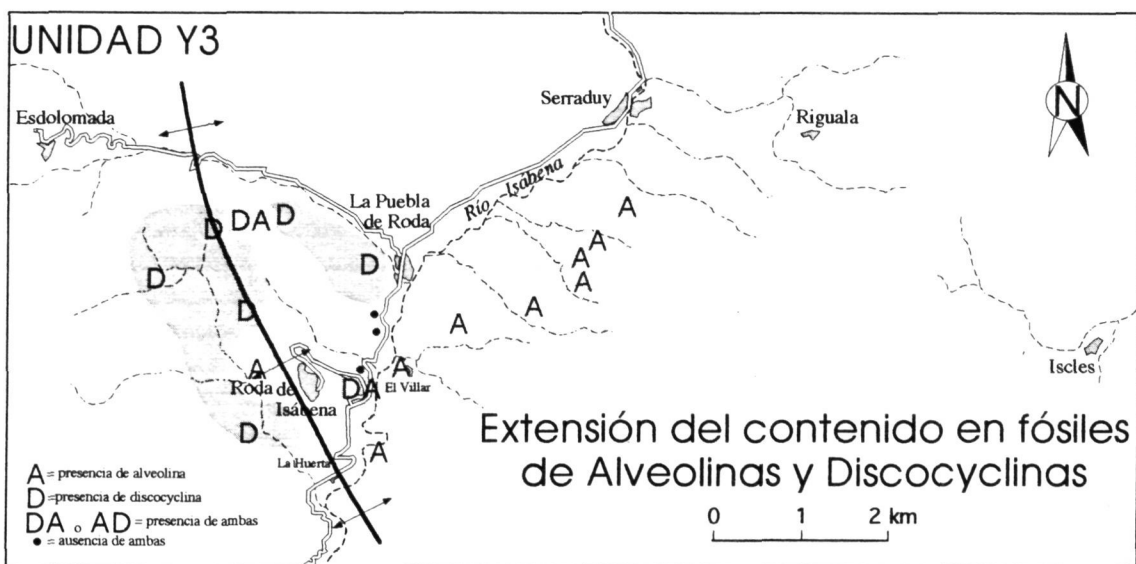
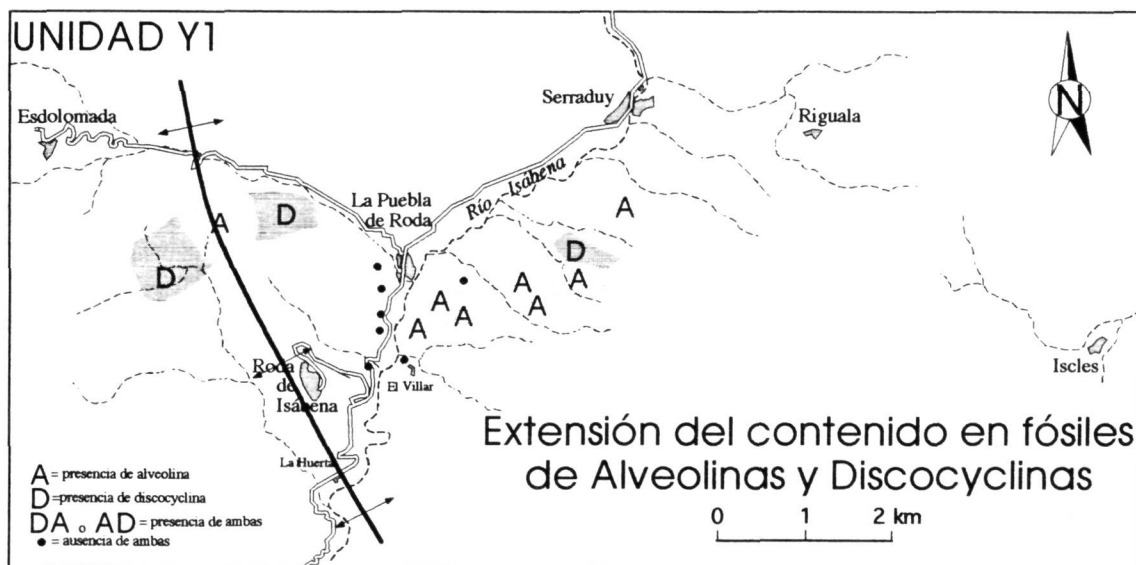
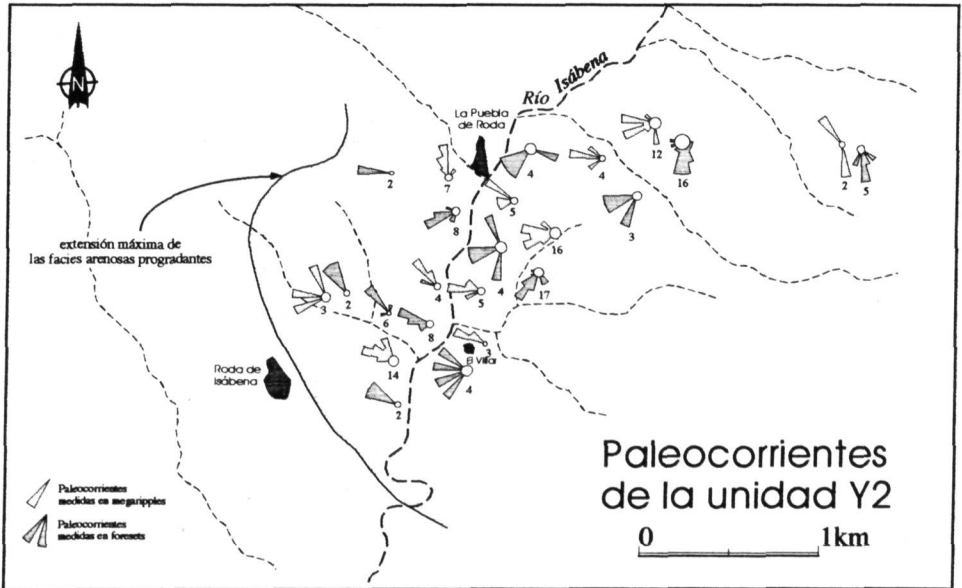
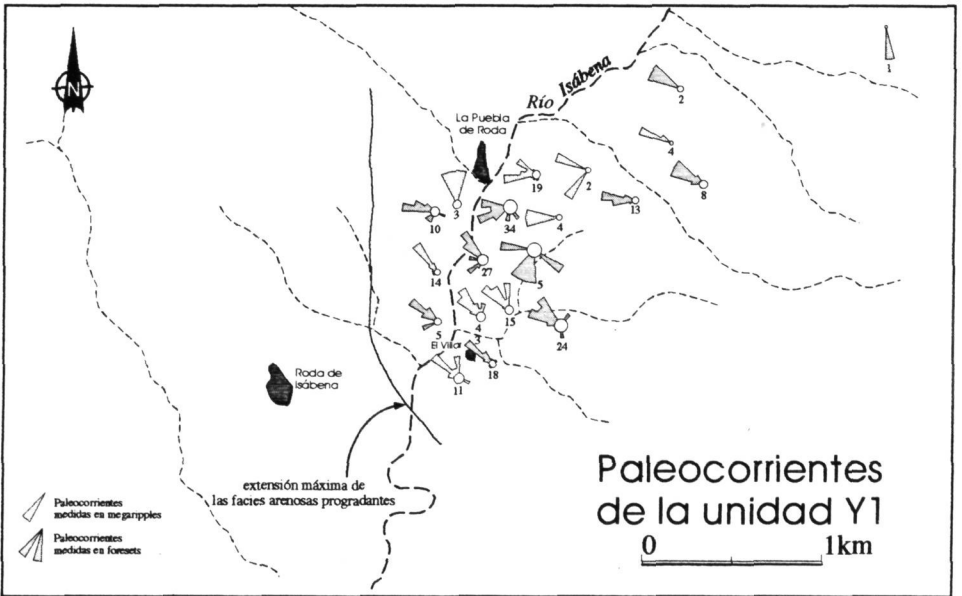
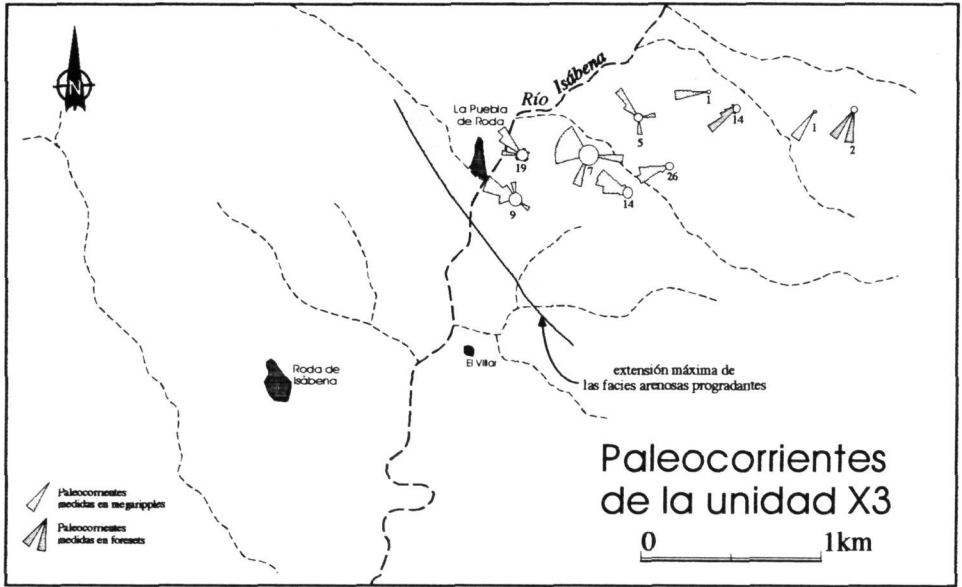


Figura R.41 d, e y f

Figura R.42 a, b y c



6) Relaciones entre la sedimentación y la actividad tectónica.

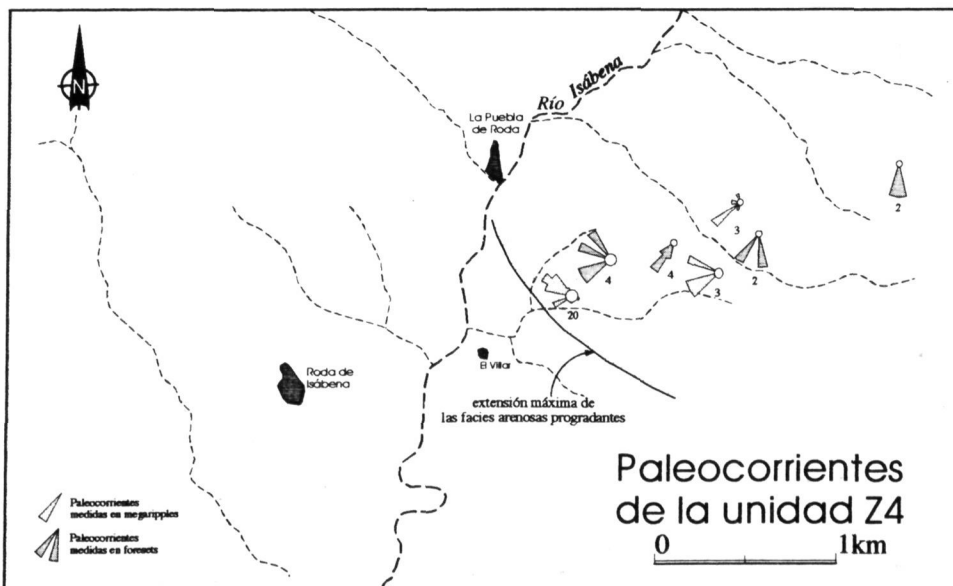
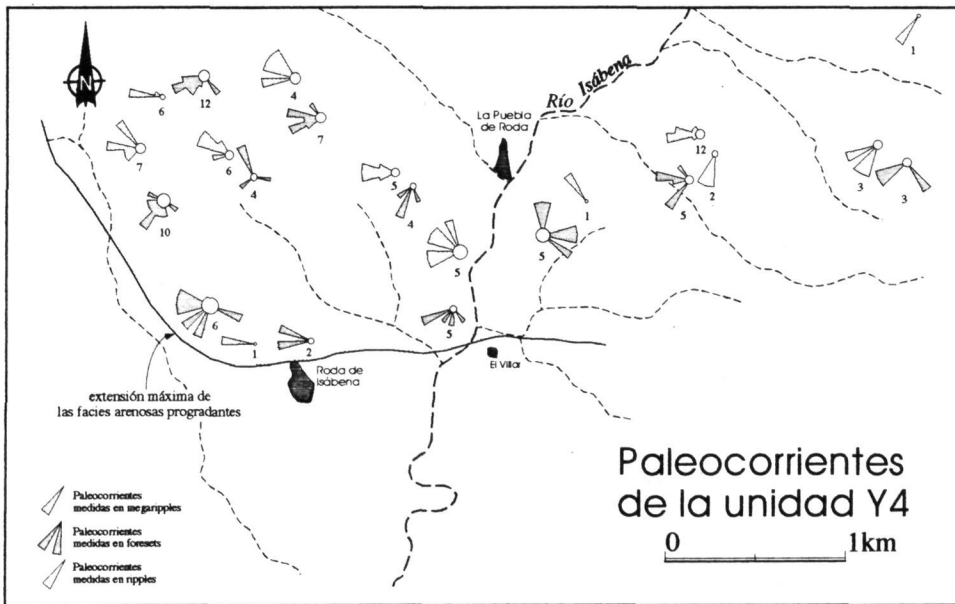
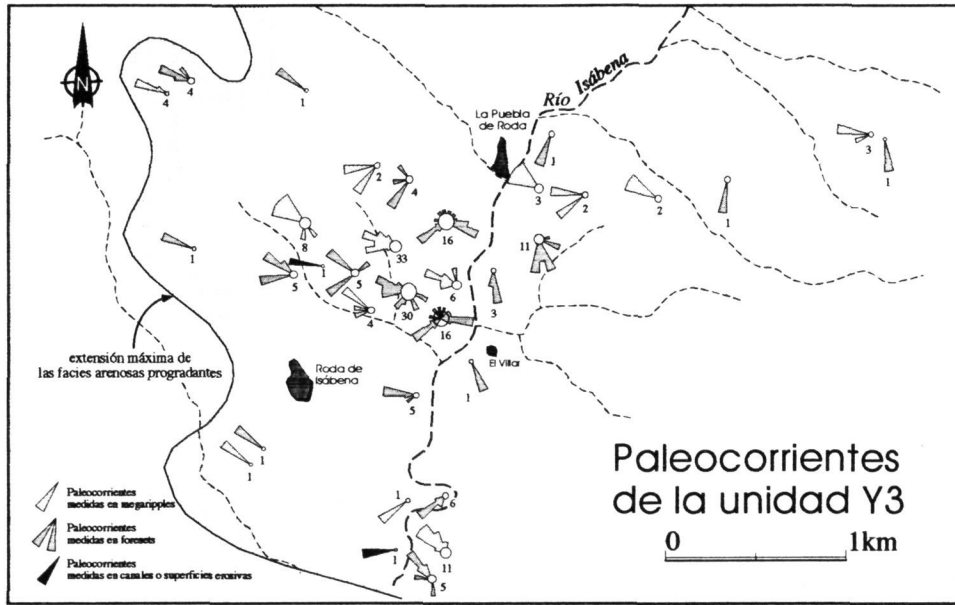
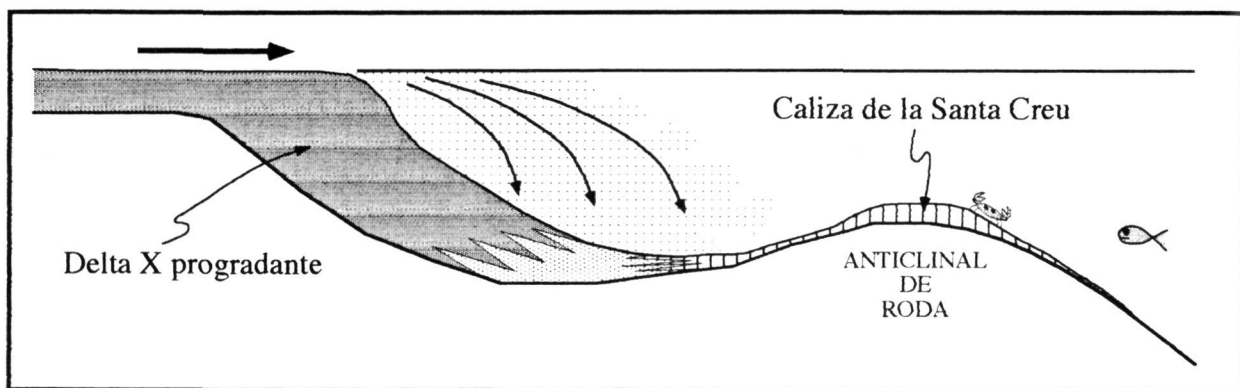


Figura R.42d, e y f





**Figura R.43.** Esquema del crecimiento de una plataforma carbonática en un alto submarino alejado de los aportes detríticos.

*Scheme of the growing of a carbonate platform on a submarine high, protected (away) from clastic input.*

crecimiento del anticlinal de Roda, es que estas corrientes estén (como es normal) orientadas paralelamente a la antigua línea de costa. La paleolínea de costa que se deduce de la cartografía de los diferentes lóbulos arenosos estaría orientada de NW a SE.

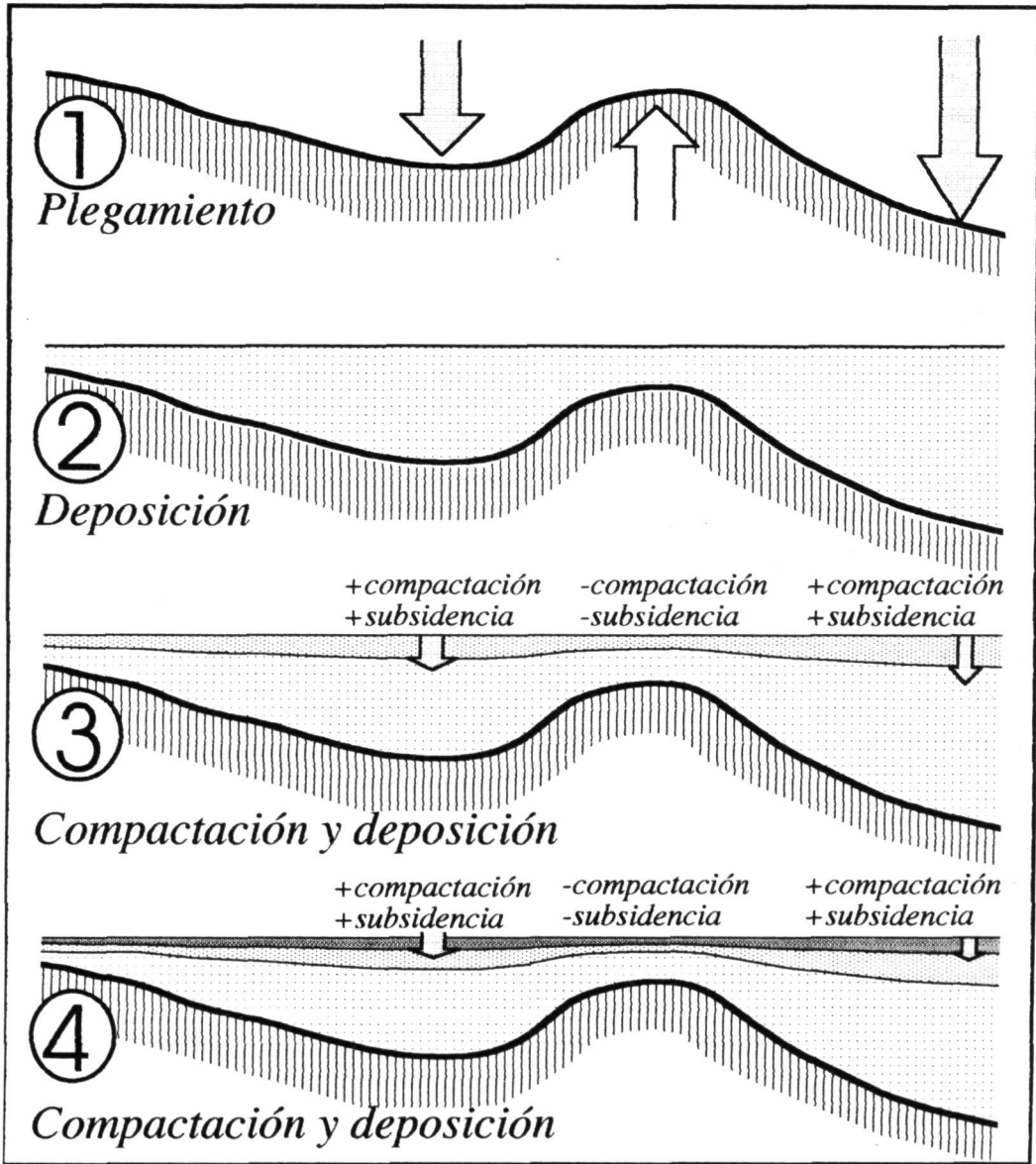
Como ya se ha apuntado anteriormente, el flujo sedimentario terrígeno-arcósico está relacionado con la emersión y desmantelamiento de relieves graníticos originados al norte de la zona estudiada durante las fases iniciales del apilamiento antiformal de la Zona Axial. Según Samsó y Tosquella (1988) este flujo sedimentario venía conducido y suministrado por un paleovalle de orientación NNE-SSW que coincidía con la actual situación de la sierra de Sis. Como se puede apreciar en la figura R.37, orientado NNE-SSW y coincidente con la mencionada sierra, existe un pliegue de tipo sinclinal con plunge hacia el SSW que afecta con diferente intensidad a los materiales terciarios. Cabe la posibilidad de que este pliegue fuese activo durante la deposición de la Arenisca de Roda y que este sinclinal fues utilizado como "canal" o paleovalle que condujera los aportes procedentes del desmantelamiento de la zona axial.

Por último habría que añadir las geometrías "en abanico" y los depósitos de "topset" basculados y erosionados mencionados en el capítulo anterior (figuras R.31 y R.32) que indican la existencia de una subsidencia diferencial, posiblemente ligada al crecimiento de estos pliegues.

Existe la posibilidad de que no toda la subsidencia diferencial reconocible en la zona del anticlinal de Roda y el sinclinal de Las Forcas esté relacionada con la actividad tectónica. El hecho de tener una zona deprimida (sinclinal) y una

## 6) Relaciones entre la sedimentación y la actividad tectónica.

elevada (anticlinal) condiciona la localización de los depocentros. Así, tenemos una mayor cantidad de depósitos en la zona del sinclinal. Si la actividad tectónica cesa, seguirá habiendo una mayor subsidencia en la zona del sinclinal. Al ser mayor la potencia sedimentaria en ella, el efecto de la compactación dará lugar a un mayor hundimiento de la cuenca en esta zona (figura R.44). En cualquier caso,, para producir este efecto se necesita una actividad previa de estas estructuras .



**Figura R.44.** Sección imaginaria en la que se muestra la existencia de una subsidencia diferencial por compactación (2, 3 y 4), heredada de una geometría plegada original (1).

*Imaginary section showing a differential subsidence due to compaction (2, 3 & 4) inherited from an original folded geometry.*

## 7) CONCLUSIONES

• En la sucesión de la Arenisca de Roda se ha determinado la presencia de dos sistemas sedimentarios: uno clástico, muy desarrollado, y otro carbonático, de menor importancia volumétrica.

• El sistema clástico es un complejo de abanico costero con influencia mareal que consta de cinco asociaciones de facies diferentes (llanura deltaica-abanico aluvial, "lagoon"-bahía, frente deltaico-"nearshore", sandwaves, prodelta-"offshore") no necesariamente coetáneas durante toda la evolución del sistema y que marcan una polaridad proximal-distal de NE a SW.

• La asociación de facies de llanura deltaica-abanico aluvial se caracteriza por la presencia de depósitos subaéreos de tipo "debris flow" y facies de relleno de canal, que aparecen intercaladas entre facies lutítico-arenosas de llanura de inundación y/o palustres, sometidas a procesos edáficos.

• Las facies lagunares o de bahía se caracterizan por secuencias arenosas, grano y estratocrecientes, originadas por la progradación de pequeños deltas, que lateralmente pasan a depósitos lutíticos de zonas costeras relativamente protegidas.

• La asociación de facies de frente deltaico-"nearshore" se caracteriza por facies predominantemente arenosas diferenciándose facies progradantes y de abandono.

• Dentro de la asociación de facies de frente deltaico progradante han se diferencian dos tipos principales: tipo "Codoñeras" y tipo "Roda".

El frente deltaico de tipo "Codoñeras" se desarrolla en las unidades inferiores de la sucesión, presentándose como secuencias grano- y estratocrecientes, producto de la progradación de un frente deltaico afectado por el oleaje.

El frente deltaico de tipo "Roda" está constituido por ocho facies principales, las cuales no son todas coetáneas. Así, se reconocen principalmente: facies de "topset" arenoso, que incluyen depósitos de barra de desembocadura, canal y "bypass"; facies de "megaforesets" arenosos, producto de la progradación de deltas de tipo "Gilbert" que pueden presentar cierta influencia mareal; "bottomsets" arenosos bioturbados; y facies arenosas con clinofomas suaves que muestraban una rápida evolución a facies margo-arenosas, que marcan el tránsito al "offshore".

• Las facies de abandono de frente deltaico-"nearshore" están caracterizadas por una abundante bioturbación que, en ocasiones, enmascara

un fuerte retrabajamiento previo por corrientes costeras y/o tormentas. Estas facies pueden pasar transicionalmente a las de plataforma carbonática.

- Las facies de sandwave se pueden localizar tanto adosadas al frente deltaico, como desenganchadas de éste (englobadas en facies de "offshore"). Son depósitos arenosos producto de la progradación y desarrollo de barras arenosas submareales ("shoals") de 3 a 10 metros de altura, inducidas por la acción de corrientes mareales, fuertemente asimétricas y orientadas de SE-NW.

- Las facies de prodelta-"offshore" están constituidas por depósitos margosos, gris-azulados con fauna marina.

- Los depósitos de plataforma carbonática están constituidos por carbonatos bioclásticos, muy bioturbados, con abundante fauna de nummulites, alveolinas, operculinas, discocyclinas, corales, briozoos, gasterópodos y bivalvos. Son facies de plataforma abierta, generalmente relacionadas con periodos de actividad baja o nula del sistema deltaico.

- El complejo de la Arenisca de Roda se caracteriza por una arquitectura deposicional compleja que comprende tres órdenes principales de ciclicidad de tipo transgresivo-regresivo (secuencias fundamentales, secuencias compuestas y megasecuencias compuestas).

- Se han diferenciado 19 secuencias fundamentales, que son las secuencias de tipo transgresivo-regresivo de menor escala diferenciadas. Estas secuencias constan de un tramo transgresivo inferior y de un tramo regresivo superior.

El tramo transgresivo está formado por: facies de plataforma carbonática, frente deltaico retrabajado y bioturbado y, en ocasiones, depósitos mareales. Estas facies se sitúan sobre una superficie de máxima regresión o de transgresión y bajo una superficie de máxima inundación, dando lugar a secuencias de tipo profundizante.

El tramo regresivo está constituido por depósitos de frente deltaico progradante (y sus equivalentes laterales) que dan lugar a secuencias de tipo somerizante.

- Debido a la variedad de facies y de características según el nivel estratigráfico, se han diferenciado cuatro tipos de secuencias fundamentales (Codoñeras, X, Y y Z).

El indicador paleobatimétrico principal utilizado ha sido el paso de facies de "topset" a facies de "foreset".

Las secuencias fundamentales se caracterizan por tener un tramo regresivo constituido por facies de frente deltaico de "tipo Codoñeras" mostrando tendencias de tipo somerizante.

En las secuencias fundamentales de tipo X se han diferenciado tres fases dentro del tramo regresivo (regresión normal inicial, regresión forzada acrecionaria y regresión normal final) en función de la trayectoria ascendente o descendente del indicador paleobatimétrico, relacionada con oscilaciones del nivel del mar relativo.

En las secuencias fundamentales de tipo Y, la complejidad en la arquitectura del término regresivo es muy alta. En dicho tramo se han diferenciado dos fases principales: una inicial, con facies de frente deltaico progradante, y una final, con facies mareales. Dichas fases están relacionadas, en parte, con la fisiografía de la cuenca, condicionada por la topografía creada por las unidades previamente depositadas.

Las secuencias fundamentales de tipo Z presentan una evolución similar a la de las fases iniciales de las de tipo Y.

- Se han diferenciado 4 secuencias compuestas, que son secuencias de tipo transgresivo-regresivo, definidas a partir del apilamiento de las secuencias fundamentales según el corte del río Isábena. Estas secuencias constan de una unidad transgresiva basal con un apilamiento retrogradante, y una unidad regresiva superior, con un apilamiento progradante.

Estas secuencias sólo son válidas para la sección mencionada ya que en otras secciones el apilamiento de las sucesivas secuencias fundamentales es diferente.

- En la Arenisca de Roda se han diferenciado dos megasecuencias compuestas, que son secuencias de tipo transgresivo-regresivo definidas a partir del apilamiento de las sucesivas secuencias compuestas y que consta de una megaunidad transgresiva basal y una megaunidad regresiva superior. Concretamente, la Arenisca de Roda incluye, de base a techo, la megaunidad regresiva de una megasecuencia compuesta y la megaunidad transgresiva de la siguiente.

Estas megasecuencias compuestas son diácronas: las tendencias de apilamiento son similares, pero los cambios de tendencia no se producen simultáneamente en las diferentes secciones.

- Existe cierta incertidumbre sobre la importancia relativa de los factores que controlaron el origen y desarrollo de los tres órdenes de ciclicidad definidos. Ello se debe a la ausencia de datos precisos sobre la evolución de la cuenca (datación, evolución tectónica, evolución climática, subsidencia..).

- La Arenisca de Roda se depositó en una zona tectónicamente activa en la que se iban desarrollando una serie de pliegues laxos. El crecimiento sinsedimentario de estos pliegues queda evidenciado por: 1) variaciones de la potencia de las series sobre los pliegues; 2) la distribución de la fauna de

foráminiferos, indicando una zonación batimétrica ligada al desarrollo de dichos pliegues; 3) variaciones en las paleocorrientes que indicarían una "canalización" de las corrientes mareales paralelamente a los ejes de plegamiento.

## 8) SUMMARY

•On the Roda Sandstone succession the presence of two sedimentary systems has been determined, a volumetrically dominant clastic system and a subordinated carbonate system.

•The clastic system is a tidal-influenced fan-delta complex which consists of five different facies associations (alluvial-delta plain, lagoon-bay, delta front-nearshore, sandwaves and prodelta-offshore). These are not necessarily coeval during the whole evolution of the system. These associations show a NE to SW proximal-distal polarity.

•The alluvial fan-delta plain association is characterized by the presence of sandy-conglomeratic debris flow and channel-fill deposits intercalated among sandy-muddy delta plain and palustrine facies, submitted to edaphic processes.

•The bay-lagoon facies are characterized by coarsening and thickening upwards sandstone sequences, originated by the progradation of small deltas, which laterally pass to muddy facies deposited in relatively protected coastal areas.

•The delta front-nearshore facies are mainly characterized mainly by sandy facies. Two groups of facies (prograding and abandonment facies) have been distinguished.

•Within the prograding delta front type two main sub-types (Codoñeras and Roda type) have been distinguished.

The Codoñeras sub-type has been observed in the lowermost units of the succession and show coarsening and thickening-upwards sequences, product of the progradation of a wave-influenced delta front.

The Roda sub-type is formed by eight main facies, wich are not necessarily coeval. There are: sandy topset facies (including deposits of mouth bar, channel fill and bypass processes); megaforeset facies, product of the progradation of Gilbert type deltas which may show some tidal reworking; sandy and bioturbated bottomsets; and sandy facies showing gentle clinofolds and rapidly evolving distally to muddy-sandy facies deposited in the transitional-offshore environments.

•The abandonment facies are characterized by an intense bioturbation that, sometimes, obliterates a previous reworking by coastal currents or storms. These facies may gradually pass to carbonate platform facies.

•Sandwave facies can be found attached or non-attached to the delta front belt. These facies are sandy deposits produced by the development and

migration of subtidal sandbars (shoals) 3 to 10 meters high, originated by highly asymmetrical, SE-NW oriented, tidal currents.

- Prodelta-offshore facies are constituted by blue-grey carbonate-rich mudstones with marine fauna.

- Carbonate platform deposits are formed by very bioturbated bioclastic limestones with abundant shallow-marine fauna (nummulites, alveolinas, operculines, discocyclines, corals, bryozoans, gasteropoda and bivalvs). They represent open platform facies, generally associated to low or non existent detrital activity.

- The Roda Sandstone is characterised by a complex depositional architecture including three main orders of transgressive-regressive cyclicity (fundamental sequences, composite sequences and composite megasequences) distinguished.

- 19 fundamental sequences have been recognized. These are the smaller-scale transgressive-regressive sequences differentiated and, comprise a lower transgressive and an upper regressive part.

The transgressive part is made by carbonate platform facies, reworked and bioturbated delta front facies and, sometimes, tidal deposits. They overlie a maximum regression surface or a transgressive surface and underlie a maximum flooding surface, showing a deepening-upwards vertical trend.

The regressive part is constituted by prograding delta front deposits (and its lateral equivalents) and shows a shallowing-upwards vertical trend.

- Due to its variability depending on the stratigraphic position, four types of fundamental sequences have been distinguished (Codoñeras, X, Y y Z).

The paleobathymetric indicator used to detect relative sea-level variations has been the passage between topset and foreset facies.

"Codoñeras" type fundamental sequences are characterized by a regressive part made by "Codoñeras" type delta front facies showing shallowing-upwards trends.

From the study of the ascending or descending trajectory of the paleobathymetric indicator, related to relative sea-level variations, three phases (initial normal regression, accretionary forced regression, and final normal regression) have been differentiated within the regressive part of the X type fundamental sequences.

In the Y type, the architecture complexity in the regressive part is very high. In this part two main phases: initial (prograding delta front facies) and final (tidal facies) have been distinguished. These phases are partly related to basin physiography, and particularly to the topography created by the previously deposited units.



The Z type show a similar evolution than the initial phase of the Y type.

- From the study of the stacking pattern of the fundamental sequences in the Isábena valley section four transgressive-regressive composite sequences have been distinguished. These sequences consist of a basal transgressive unit with a retrograding stacking pattern and an upper regressive unit with a prograding stacking pattern.

These sequences are only valid for the mentioned section. In other sections the stacking pattern of successive fundamental sequences is different (due to lateral lobe-shifting).

- Two transgressive-regressive composite megasequences defined from the stacking pattern of successive composite sequences, have been distinguished in the Roda sandstone. They consist of a basal transgressive megaunit with a retrograding stacking pattern and an upper regressive megaunit with a prograding stacking pattern. The Roda Sandstone includes, from base to top, a regressive megaunit and a transgressive megaunit. These megaunits belong to different composite megasequences.

These composite megasequences are diachronous; the stacking-trends are similar, but the trend changes do not occur simultaneously in the different sections.

- A big uncertainty on the relative importance of the factors controlling the origin and development of the three defined orders of cyclicity exists. This is mainly due to the lack of precise data on the basin evolution (chronology, subsidence history, climatic evolution..).

- The Roda Sandstone was deposited in a tectonically active area where a series of folds were being developed. The synsedimentary growth of these folds is proved by: 1) thickness variations; 2) the distribution of foraminifera fauna, indicating paleobathymetric variations; and 3) variations on the paleocurrents, indicating a "funneling" of the tidal currents parallel to the fold axis.

## Láminas del Capítulo III

## **Lámina VII**

• Fotografías de detalle de facies de llanura deltaica, lagunares y de bahía, de la Arenisca de Roda.

1 y 2) Secuencias grano y estratocrecientes de frente deltaico de laguna o bahía (L1). En la foto 2, el frente progradado sobre limos grises de laguna o bahía (L3).

3) Detalle de facies margoarenosas de llanura deltaica afectadas por procesos edáficos que les confieren un moteado característico (PD3 y PD4).

4) Canal arenoso-conglomerático (PD2) incidido sobre una secuencia de frente deltaico de bahía (L1). Potencia del canal =2m.

5) Facies de conglomerados de "debris flow" soportados por la matriz arenosa (PD1).

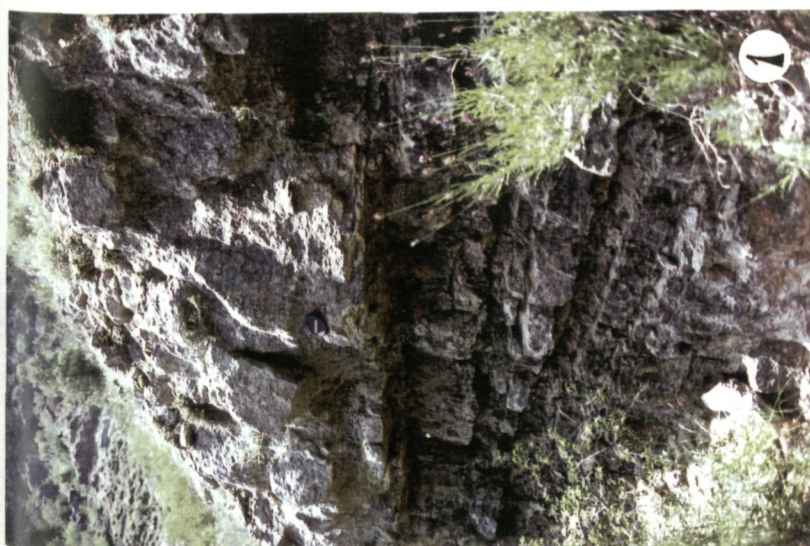
• *Pictures of facies of delta plain, lagoon and bay from the Roda Sandstone .*

1 & 2) *Coarsening and thickening upwards lagoon or bay prograding delta-front sequences (L1). In the picture 2 the sequence starts in lagoonal grey siltstones (L3).*

3) *Detail of marly-sandy facies affected by edaphic processes that give them a characteristic mottling (PD3 & PD4).*

4) *Sandy-conglomeratic channel (PD2) incised on a bay -delta front (L1) . Channel thickness=2m.*

5) *Debris flow conglomerates supported by sandy matrix (PD1).*



## Lámina VIII

Fotografías de facies de frente deltaico progradante de la Arenisca de Roda.

- 1) Secuencia grano y estratocreciente de frente deltaico progradante de "tipo Codoñeras" (FDC) en el que se diferencian las tres subfacies (FDC1, FDC2 y FDC3). Potencia de la secuencia=2m.
- 2) Detalle de facies de "topset" (FDR2) de frente deltaico progradante de "tipo Roda". En este caso las facies arenosas están poco seleccionadas y contienen gánulos y fragmentos de fauna.
- 3) En la zona inferior de la fotografía se observan areniscas arcóscicas masivas, bioturbadas y con nódulos de cementación diferencial (FDR1) de barra de desembocadura proximal de frente deltaico progradante de "tipo Roda" (potencia hasta la planta=3,5m).
- 4 y 5) Facies de frente deltaico "tipo Roda", donde se pueden observar facies de "topset" (FDR2), "foreset" (FDR3) y "bottomset" (FDR8).
- 6) Facies margoarenosas bioturbadas de frente deltaico progradante distal en tránsito a prodelta (FDR7).
- 7) Facies arenosas de "foresets compuestos" (FDR5) de frente deltaico progradante, retrabajado por corrientes mareales y/o litorales.

### • Pictures of prograding delta front facies from the Roda Sandstone.

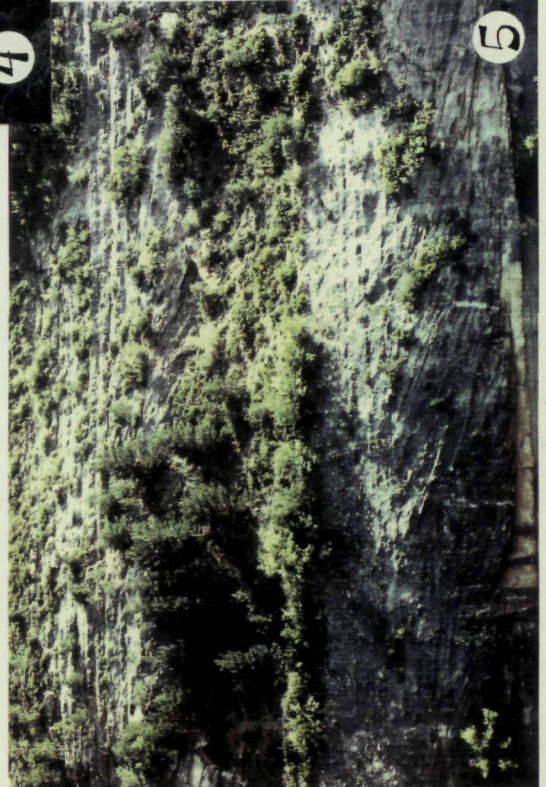
- 1) "Codoñeras" type coarsening and thickening upwards prograding delta front (FDC) sequence, where three subfacies (FDC1, FDC2 y FDC3) can be distinguished (sequence thickness=2m).
- 2) Detail of topset facies (FDR2) from a "Roda" type prograding delta front. Notice that the sandy facies are poorly sorted and include granules and marine fauna fragments.
- 3) In the lower part of the picture massive, arkosic, bioturbated and nodular-cimented proximal mouth-bar sandstones (FDR1) from a "Roda" type prograding delta front are observed (thickness to the small plant=3,5m).
- 4 y 5) "Roda" type prograding delta front facies, where topset (FDR2), foreset (FDR3) and bottomset (FDR8) facies can be distinguished.
- 6) Distal, prograding delta front bioturbated marly sandy facies (FDR7).
- 7) Tidal-to littoral current-reworked, prograding delta front composite foreset facies (FDR5).



7



6



5



4

Lámina VIII



3



2



1

## Lámina IX

•Fotografías de facies de frente deltaico progradante y barras mareales de la Arenisca de Roda.

- 1 ) Secuencia grano y estratocreciente de frente deltaico de "tipo Roda" (FDR6) en las que se observan superficies de reactivación y truncaciones internas.
- 2) Secuencia somerizante de progradación de la Arenisca de Roda en la que se observan margas gris azuladas (P1) de prodelta-"offshore" en la parte inferior y un frente deltaico margarenoso bioturbado (FDR7) que muestra clinofomas tangenciales hacia la base, pasando a facies de "bottomset" (FDR8). En la parte alta afloran facies de "foresets compuestos" (FDR5).
- 3) Facies marginales de barra submareal. De base a techo: facies arenosas con "tidal bundles" (SW2), alternancia de areniscas y lutitas bioturbadas y con estructuras de tipo "flaser" (SW1), facies de frente deltaico progradante distal margo-arenoso (FDR7).
- 4) Secuencia somerizante de progradación de la unidad Y3 de la Arenisca de Roda. De base a techo, facies arenosas con "tidal bundles" (SW2) facies de barra submareal y facies de frente deltaico progradante distal margo-arenoso (FDR7) que evolucionan a facies arenosa de frente deltaico proximal (FDR6)
- 5) Detalle de las facies arenosas de barra submareal con "tidal bundles" (SW2). Espesor de los "sets" =50 cm.
- 6) Barra submareal progradante (SW3) en la que se pueden observar tanto "foresets" como "topsets" y "bottomsets". Potencia de la barra=4,5 m.

•Pictures of prograding delta front and tidal bar facies from the Roda Sandstone.

- 1) Coarsening and thickening upwards "Roda" type delta front sequence (FDR6) showing internal reactivation and truncation surfaces.
- 2) Progradational shallowing upwards sequence of the Roda Sandstone. From base to top, prodelta-offshore blue-grey marls (P1), bioturbated sandy-marly delta front facies (FDR7) showing tangential clinofoms towards the base and passing to bottomset facies (FDR8) are observable. Composite foreset facies (FDR5) crop out at the uppermost part.
- 3) Marginal subtidal bar succession. From base to top: sandstones with tidal bundle structures (SW2), alternation of bioturbated sandstones and mudstones with flaser structures (SW1) and prograding, distal delta-front, bioturbated, sandy-marly facies (FDR7).
- 4) Progradational shallowing upwards sequence of the Y3 unit of the Roda Sandstone. From base to top: subtidal bar sandstones with tidal bundle structures (SW2), and prograding distal delta front bioturbated sandy-marly facies (FDR7) evolving to proximal delta front sandstones (FDR6).
- 5) Detail of subtidal bar sandstones with tidal bundle structures (SW2). Thickness of the sets =50 cm.
- 6) Prograding subtidal bar (SW3) showing foresets, topsets and bottomsets (bar thickness=4,5m).

Lámina IX

