



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

Astrocronología y evolución de la sedimentación marina del margen Atlántico del Corredor Bético y su relación con la crisis de salinidad del Mesiniense

Memoria presentada por **Bastiaan Cornelis Johannes van den Berg** para optar al grado de **Doctor en Ciencias Geológicas** por la **Universidad de Salamanca**

Directores de la Tesis:

Dr. Francisco Javier Siero Sánchez

Catedrático del Departamento de Geología (Paleontología)
Facultad de Ciencias
Universidad de Salamanca

Dr. José Abel Flores Villarejo

Catedrático del Departamento de Geología (Paleontología)
Facultad de Ciencias
Universidad de Salamanca

Salamanca, 2016

Resumen

Esta Tesis Doctoral brinda una visión general y plantea nuevas consideraciones para entender la evolución de los canales interoceánicos Atlántico-Mediterráneo durante el Mioceno tardío, se enfoca particularmente en la evolución del corredor Bético. La investigación se adelantó en dos etapas:

- Inicialmente, se construyó un modelo de edad de alta resolución para el margen Atlántico del corredor Bético y se relacionaron los cambios en el ambiente de sedimentación de la cuenca del Guadalquivir con la evolución del corredor, y con los eventos regionales ocurridos durante el Mioceno tardío en el Atlántico Norte y en el Mediterráneo.
- Adicionalmente, se mejoró el marco cronoestratigráfico para los sedimentos acumulados durante el Mioceno tardío en la región Bética occidental, y se correlacionaron los cambios en el ambiente de depósito con la evolución del corredor.

Durante el Mioceno tardío, cuando el Estrecho de Gibraltar posiblemente aún no existía, la conexión entre el océano Atlántico y el mar Mediterráneo se estableció a través de dos canales: el corredor Bético a lo largo del sur de España, y el corredor Rifeño en el norte de Marruecos. La restricción progresiva y finalmente el cierre de dichos canales interoceánicos produjo importantes cambios tanto en la salinidad como en el nivel del Mediterráneo. Este evento se conoce como la Crisis de Salinidad del Mesiniense (CSM). A pesar de décadas de investigación enfocadas en entender la evolución geológica de los corredores, el momento exacto del cierre, su geometría y los patrones de interconexión de aguas aún son inciertos.

En el primer capítulo de esta Tesis se hace una revisión general de la evolución de dichos canales en el Mioceno tardío y la naturaleza de la conexión Atlántico-Mediterránea, con base en estudios enfocados en la caracterización de los sedimentos preservados dentro de los corredores y en la correlación estratigráfica con cuencas adyacentes. Además se discute el posible impacto que tuvo el intercambio de aguas en el clima Mediterráneo y global. Finalmente, se presentan los retos que supone investigar los patrones de intercambio Atlántico-Mediterráneo del pasado.

Los siguientes capítulos de esta Tesis se enfocan en el corredor Bético. La región oriental del corredor Bético se dividió en varias ramificaciones oceánicas, las cuales se cerraron una a una durante el Tortonense tardío debido al relleno sedimentario y al levantamiento tectónico. Sin embargo, aún se desconoce el momento del cierre de la ramificación más occidental del corredor Bético. Esta ramificación se conoce como la cuenca de Guadalhorce y fue posiblemente la última conexión activa del corredor. Hacia al occidente, el corredor Bético está formado por la cuenca del Guadalquivir. Debido a que las masas de aguas que cruzaron el corredor Bético debieron cruzar a través de esta cuenca, se espera que cualquier cambio en la geometría del corredor haya influenciado (indirectamente) los patrones de circulación de aguas y por consiguiente los procesos sedimentarios propios de la cuenca. En tal virtud, se considera que esta cuenca es el eslabón perdido en la investigación de la evolución del corredor Bético durante el Mioceno tardío.

En los capítulos 2 y 3 se presenta el modelo de edad de alta resolución que se construyó para el Mesiniense de la cuenca del Guadalquivir. Para construir este modelo, se utilizaron los cambios cíclicos detectados en la composición elemental de los sedimentos, los cuales se obtuvieron mediante fluorescencia de rayos X (XRF). El marco cronoestratigráfico resultante es producto de la calibración de los ciclos en la composición elemental con las curvas astronómicas de referencia, empleando como puntos de amarre diferentes datos magnetobioestratigráficos. Con base en el modelo de edad propuesto, se realizaron las siguientes consideraciones con respecto a la evolución de la cuenca, y su relación con eventos Atlánticos o Mediterráneos de escala regional y/o global.

- Se encontraron dos cambios significativos en la tasa de sedimentación. El primero ocurrió hace 5.55 Ma y coincidió con el inicio de la etapa final de la CSM y con una fuerte deglaciación. El segundo cambió ocurrió hace 5.33 Ma y corresponde con la transición del Mioceno-Plioceno y el fin de la CSM asociado con el total restablecimiento de las condiciones marinas del Mediterráneo. Esto sugiere que los eventos de la CSM, no solamente afectaron la cuenca Mediterránea, sino que probablemente influenciaron el margen Atlántico español. Hasta el momento, no es posible detallar claramente las causas o mecanismos que generaron los mismos patrones entre cuencas; no obstante, es posible sugerir que procesos tectónicos y/o cambios en las corrientes oceánicas generaron cambios sincrónicos en los procesos de sedimentación de ambas cuencas.
- El registro isotópico de oxígeno bentónico se correlaciona bien con registros previamente publicados para Ain el Beida, Loulja y la perforación ODP 982. Esta relación indica que durante la sedimentación del Mesiniense, existió una influencia directa del Agua Noratlántica Central, pero no así de la masa de Agua Mediterránea (Mediterranean Outflow Water-MOW). Sin embargo, se observa una desviación entre los registros de isótopos de oxígeno bentónicos del margen Atlántico español y del margen marroquí durante el último período glacial de Mesiniense (5.9 a 5.5 Ma) y coincidiendo con las primeras etapas de la crisis. Esta desviación podría ser el resultado de la disminución/cesación de los flujos de MOW en la región del Estrecho de Gibraltar.
- Se reconoció un cambio gradual en la naturaleza de las fluctuaciones de la composición elemental de los sedimentos. Dicha variación se asoció con una somerización de los ambientes de depósito producto de la progresiva colmatación de la cuenca del Guadalquivir. Cuando la sedimentación tuvo lugar en zonas más distales, el carbonato biogénico fue diluido debido al influjo cíclico de material detrítico; mientras que en zonas proximales, la sedimentación tuvo mayores aportes continentales y por tanto estuvo dominada por el influjo cíclico de partículas de grano más grueso.

En el capítulo 4, se presenta una actualización del marco cronoestratigráfico de la cuenca de Ronda y la región de Antequera. Estas zonas son clave para entender la evolución del corredor de Guadalhorce, ya que son adyacentes y son áreas que probablemente conformaron la zona más septentrional del dicho corredor. El registro sedimentario de ambas áreas indica una somerización hacia el tope de la secuencia, que se identifica por el cambio de margas profundas a calcarenitas someras. La datación bioestratigráfica de las margas señaló en todos los casos una edad Tortoniense, anterior a 7.58 Ma. Estas nuevas edades sugieren que la cuenca de Guadalhorce probablemente se cerró durante el Tortoniense tardío-Mesiniense temprano. Los resultados encontrados concuerdan con los obtenidos para la cuenca de Arcos y el cierre de la cuenca de Granada durante el Tortoniense tardío. En consecuencia, se sugiere que el Tortoniense tardío correspondió con un periodo de levantamiento tectónico de la región Bética oriental, el cual inicialmente ocasionó el cierre de las ramificaciones orientales del corredor, y posteriormente continuó hacia el oeste y generó el levantamiento de la región Bética occidental. Este evento tectónico resultó en el cierre del corredor Bético durante el Tortoniense tardío-Mesiniense temprano, mucho antes del inicio de la Crisis de Salinidad del Mesiniense.

Introducción

Investigación sobre la evolución de los estrechos marítimos

Los estrechos marítimos han tenido una influencia importante en el clima y los océanos a lo largo de la historia geológica. La apertura y cierre de estos estrechos ha dado lugar a importantes reorganizaciones de las corrientes oceánicas, cambios en las características del agua de mar, la evolución biológica y el clima. Por ejemplo, la apertura del pasaje de Drake entre Sudamérica y la Antártida durante el Eoceno dio lugar a la aparición de la corriente Circumpolar Antártica, y además coincidió con aumentos en la productividad biológica, un enfriamiento brusco y el crecimiento de las capas de hielo de la Antártida (Livermore et al., 2007 ; Scher y Martin, 2006). Más recientemente el cierre del estrecho Panamá activó la circulación termohalina del Atlántico norte y probablemente promovió la intensificación de las glaciaciones del hemisferio norte (Bartoli et al., 2005 ; Haug y Tiedemann, 1998). Estos ejemplos demuestran que para entender el planeta Tierra y sus procesos, es fundamental comprender y reconstruir la evolución de los pasados estrechos marítimos y su impacto a escala regional y/o global. En consecuencia, a lo largo de esta Tesis Doctoral se estudia la evolución del corredor Bético, uno de los antiguos estrechos marítimos que conectó el Mar Mediterráneo con el Océano Atlántico durante el Mioceno tardío (Fig. 1).



Figura 1. Reconstrucción de los estrechos Mediterráneos durante el Mesiniense (etapa final del período Mioceno superior). En rojo se muestra la línea de costa actual (modificado de Duggen et al., 2003).

Crisis de Salinidad del Mesiniense (CSM)

En el Mioceno tardío, hace 8 millones de años, el estrecho de Gibraltar probablemente no existía. La conexión entre el océano Atlántico y el mar Mediterráneo ocurría a través de dos corredores: el Corredor Bético a lo largo del sur de España, y del Corredor del Rifeño en el norte de Marruecos (Benson et al., 1991 ; Santisteban y Taberner, 1983; figura 2). Como consecuencia de la colisión entre las placas Africana y la Euroasiática, y del levantamiento tectónico del Arco de Gibraltar, se produjo la progresiva restricción y posterior cierre de estos corredores, lo que conllevó a una disminución e incluso al eventual cese del intercambio de aguas Atlántico-Mediterráneo (Hsu et al., 1973). Dicho cierre provocó importantes cambios tanto en el nivel del mar y como en la salinidad del mar Mediterráneo. Este evento, conocido como la Crisis de Salinidad del Mesiniense, generó además la precipitación de largas cantidades de sal marina, un 26% del total mundial, en los fondos marinos del Mediterráneo (McKenzie, 1999). Durante este evento, además, la vida casi dejó de existir en las aguas del Mediterráneo y éste experimentó un descenso de nivel de, al menos, unos cientos de metros. En la última etapa de la CSM - después de la fase evaporítica - el Mar Mediterráneo pasó de condiciones hipersalinas a tener aguas salobres, como lo evidencian los diferentes depósitos no marinos. Este período es conocido como la fase Lago-Mare (Figura 3), y fue seguido por la apertura o profundización del Estrecho de Gibraltar ocurrida durante la transición del Mio-Plioceno (inundación Zancleana, 5.33 Ma), en la cual se restauró el intercambio de aguas entre el Atlántico y el Mediterráneo (Blanc, 2002).



Figura 2. Impresión artística de la Crisis de Salinidad del Mesiniense

A pesar de décadas de investigación, el momento exacto de cierre, la geometría, y los patrones de interconexión a través de los corredores aún permanecen inciertos. Uno de los aspectos más desconcertantes de la CSM está relacionado con el intercambio de aguas marinas a través de los estrechos Atlántico-Mediterráneo, ya que dichas conexiones debieron haber estado severamente restringidas con el fin de generar las condiciones adecuadas para la deposición de evaporitas en el fondo del Mediterráneo (hipersalinidad), pero al mismo tiempo éstas debieron facilitar el suministro de compuestos necesarios para formar una secuencia de sal de por lo menos 1 km de espesor. Por lo tanto, es evidente que la historia de estos corredores debe haber sido más compleja de lo que se conoce actualmente. Las diferentes etapas de la CSM, según las definen los modelos de evolución más recientes, están resumidas en la Figura 2, donde además se ilustra el marco estratigráfico actual para el Mesiniense.

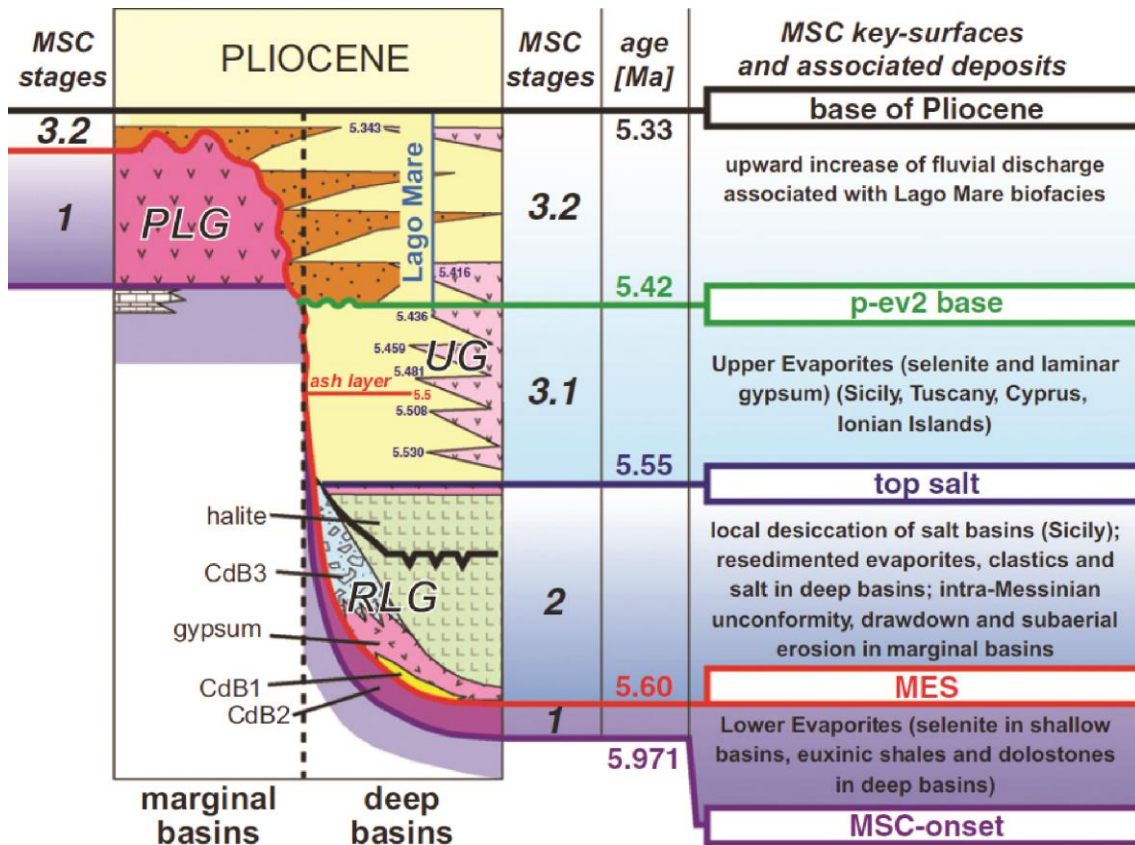


Figura 3. Marco estratigráfico de la Crisis de Salinidad del Mesiniense de acuerdo al CIESM (Manzi et al., 2013)

Un proyecto para estudiar las crisis de Salinidad del Mesiniense: MEDGATE

En 2011, la Unión Europea financió el proyecto MEDGATE, el cual hace parte de la red inicial de formación (Initial Training Network) y es financiado por las becas Marie Skłodowska-Curie. El fin último del proyecto MEDGATE era estudiar este extraordinario evento conocido como la Crisis de Salinidad del Mediterráneo. Los objetivos principales eran intentar reconstruir en detalle la evolución de los corredores del Mioceno, y entender cómo los cambios físico-químicos de las aguas Mediterráneas impactaron al clima a nivel local, regional y global. Un objetivo adicional, era promover el desarrollo de múltiples habilidades científicas en los investigadores, integrando diferentes disciplinas y destrezas que son altamente requeridas por la industria y la academia. El equipo MEDGATE se integró con nueve estudiantes de doctorado y un investigador post-doctoral, reuniendo expertos de universidades y empresas del Reino Unido, los Países Bajos, España, Francia y Marruecos, e incluyendo diversas áreas de investigación como geoquímica, micropaleontología, modelamientos, y geología regional. El Capítulo 1 brinda una descripción general del estado del arte sobre la investigación de las conexiones Atlántico-Mediterráneas durante el Mioceno tardío (Flecker et al., 2015).

El Corredor Bético

Esta tesis forma parte del proyecto MEDGATE y se centra en la evolución del corredor Bético. Este corredor conectó el Mediterráneo con el Atlántico por el sur de España durante el Mioceno tardío. La región oriental del corredor Bético se dividió en varias ramificaciones oceánicas, las cuales se cerraron una a una, debido al llenado sedimentario y al levantamiento tectónico, restringiendo progresivamente el intercambio Atlántico-Mediterráneo (Flecker et al, 2015.; Fig. 3;. Martín et al, 2014). La ramificación más septentrional, conocida como el estrecho del Norte Bético se cerró hace 7.8 Ma (Krijgsman et al., 2000), mientras que la ramificación que pasa a través de la cuenca de Granada se cerró alrededor de

hace 7.3 Ma (Corbí et al., 2012). Los sedimentos marinos más recientes en la ramificación que pasa a través de la cuenca de Guadix se acumularon hace 7.85 Ma, sin embargo a continuación existe un hiato de más de 2 Ma por lo que es posible que el cierre haya sido posterior. Además, investigaciones anteriores han sugerido que la última ramificación en cerrarse dentro del estrecho Bético es el ramal mas occidental conocido como el corredor Guadalhorce (Martín et al., 2001), el cual se habría cerrado hace 6.18 Ma (Pérez-Asensio et al., 2012). No obstante, esta conclusión está basada en evidencia indirecta asociada con cambios en la señales isotópicas de oxígeno bentónico proveniente de la cuenca del Guadalquivir, las cuales registran cambios de valores Mediterráneos a valores más característicos del Océano Atlántico, sugiriendo así el cierre del último estrecho activo dentro del corredor Bético.

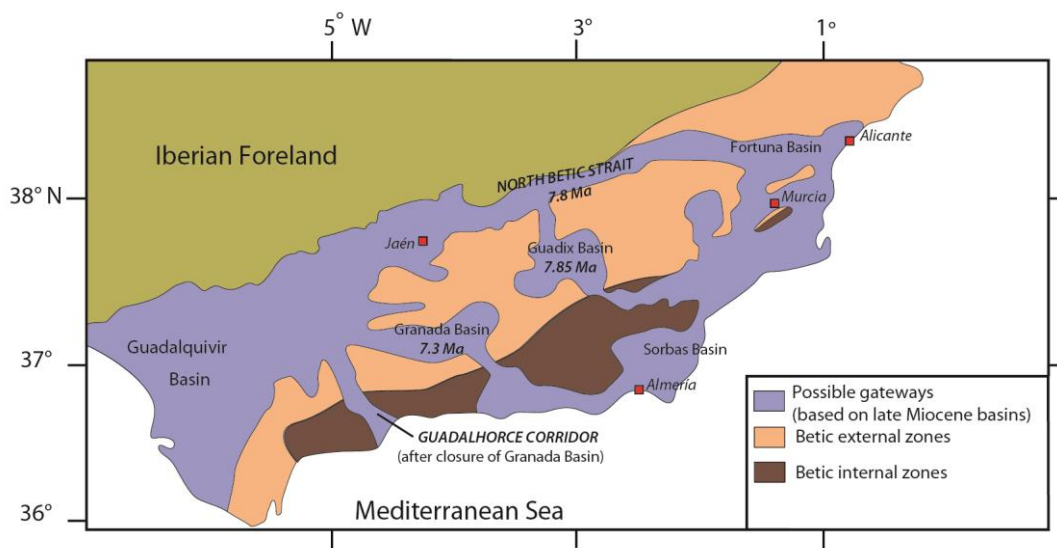


Figura 4. Mapa Detallado del corredor Bético con edades de cierre para las diferentes ramificaciones.

Determinar el momento de cierre de un corredor es complejo, debido a que la evidencia preservada a lo largo del corredor es escasa y muchas veces inexistente. Cuando un corredor se someriza, sedimentos de grano grueso típicos de ambientes marinos poco profundos se comienzan a depositar. Estos sedimentos por lo general son muy difíciles de datar usando métodos bioestratigráficos. Adicionalmente, cuando el corredor se cierra, los últimos sedimentos marinos que fueron depositados y que por tanto registran momentos previos al cierre del corredor, son los primeros que son afectados por los subsecuentes procesos erosivos. En consecuencia, determinar el momento de cierre del corredor utilizando sedimentos provenientes directamente del corredor es un proceso complejo, en el cual la ambigüedad en las dataciones es un problema frecuente. Una alternativa es analizar la evolución del corredor mediante el estudio de los sedimentos acumulados en cuerpos de agua cercanos y evaluar estas observaciones a la luz de la evolución propia del corredor.

La cuenca del Guadalquivir

En el caso del corredor Bético, la cuenca del Guadalquivir es el cuerpo de agua más prometedor. Esta cuenca de antepaís, que se encuentra en el suroeste de España, constituyó el margen Atlántico del corredor Bético durante el Mesiniense (Fig. 3). Las masas de aguas que cruzaron el corredor Bético debieron pasar a través de esta cuenca, por lo que cualquier cambio en la geometría del corredor debió influir (indirectamente) en la circulación de las aguas y en los procesos sedimentarios de la cuenca del Guadalquivir. Como se ilustra en la figura 4, esta cuenca se constituye como el eslabón perdido en la

investigación de la evolución del corredor Bético durante el Mioceno tardío. Ambos extremos del corredor Rifeño y el margen mediterráneo del corredor Bético han sido investigados, sin embargo los estudios del margen Atlántico aún son insuficientes.

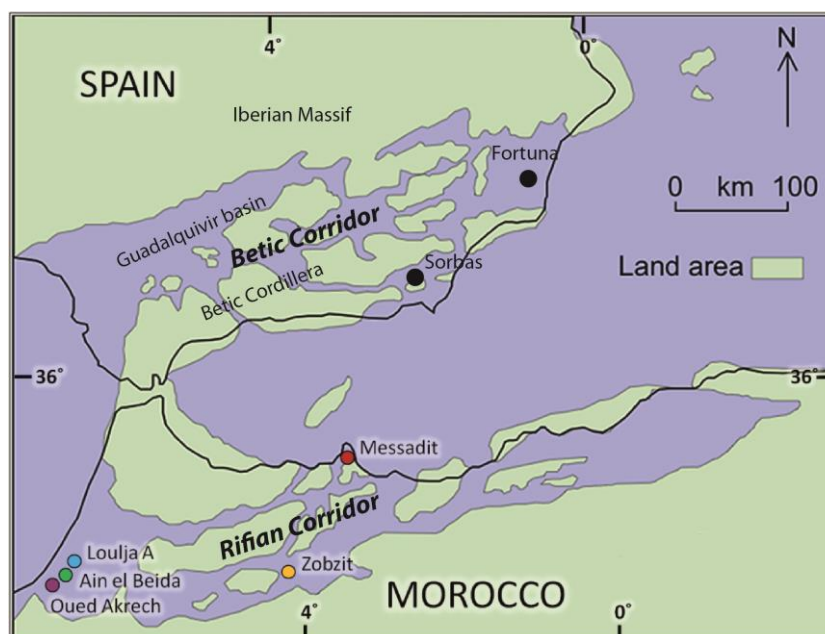


Figura 4: Mapa del Mediterráneo occidental en el Mesiniense con las zonas clave. La línea de color negro es la costa actual. Es evidente que el lado Atlántico del corredor Bético carece de secuencias sedimentarias.

Los sedimentos de la cuenca del Guadalquivir no afloran bien, por tanto la mayoría de estudios se basan en análisis de datos sísmicos, sondeos y registros eléctricos (Berástegui et al., 1998 ; Fernández et al., 1998 ; Larrasoña et al., 2008 ; Ledesma, 2000 ; Pérez . -Asensio et al, 2012a ; Riaza y Martínez del Olmo, 1996). Estos estudios han señalado que la sucesión comprende sedimentos marinos y continentales, depositados desde el Tortoniense al reciente (González-Delgado et al., 2004 ; Ledesma, 2000 ; Sierro et al., 1996). Tras el cierre del estrecho del Norte Bético, la cuenca del Guadalquivir se estableció como una bahía amplia abierta al Atlántico (Pérez-Asensio et al., 2012a) y la sedimentación marina ocurrió durante el Tortoniense tardío, Mesiniense y el Plioceno. Estudios anteriores de los sedimentos del sondeo Montemayor-1 permitieron establecer un marco magnetobioestratigráfico (Larrasoña et al., 2008), el cual fue posteriormente integrado con el análisis de la evolución paleo-ambiental basado en foraminíferos bentónicos (Pérez-Asensio et al, 2012b. ; Pérez-Asensio et al, 2012a. ; Pérez-Asensio et al., 2013) y con reconstrucciones de la vegetación y los cambios del nivel del mar (Jiménez-Moreno et al., 2013). Sin embargo, dicho marco cronoestratigráfico se basó en una extrapolación aproximada de las tasas de sedimentación a partir de los puntos de amarre magnetoeestratigráficos. Por tanto, éste marco cronoestratigráfico necesita un revisión que permita generar un modelo de edad de mayor resolución, a partir del cual se pueda visitar las dataciones y las reconstrucciones paleoambientales anteriores y, posteriormente, se pueda relacionar con más precisión dichos eventos a la evolución Mesiniense del margen Atlántico y/o el Mediterráneo.

En esta tesis, por lo tanto, se hace una evaluación de la evolución del corredor Bético usando dos perspectivas: un enfoque indirecto mediante la construcción de un modelo de edad de alta resolución de dos sondeos en la cuenca del Guadalquivir y la interpretación de los cambios en la sedimentación

(Capítulo 2 y 3), y un enfoque directo, mejorando el marco cronoestratigráfico y la reinterpretación de los sedimentos en el corredor del Guadalhorce y cuencas adyacentes (capítulo 4).

Información general de los capítulos

El capítulo 1 de esta tesis se presenta el texto de un artículo publicado, en el cual se hace una síntesis detallada el estado del arte de la investigación de las conexiones Atlántico-Mediterráneas durante el Mioceno tardío (Flecker et al., 2015). Esta síntesis recibió contribuciones de todos los miembros del equipo de MEDGATE, para así hacer una revisión exhaustiva de los diferentes aspectos relacionados con el tema.

El capítulo 2 se centra en el sondeo Montemayor-1. En este capítulo se presenta un modelo de edad de alta resolución del Mesiniense tardío establecido a partir de correlaciones cicloestratigráficas de los cambios en la composición elemental, visualizados por XRF. Este modelo de edad se utiliza para mejorar la datación del registro isotópico de oxígeno y las abundancias de foraminíferos bentónicos. Posteriormente estos registros se reinterpretan en términos de la evolución de la cuenca del Guadalquivir, el clima regional y la evolución del flujo de Agua Mediterránea que llega al Atlántico (Mediterranean Outflow Water-MOW). Este capítulo ha sido publicado en la revista *Global and Planetary change* (van den Berg et al., 2015).

El capítulo 3 está enfocado en el análisis del sondeo Huelva-1. Para este sondeo también se estableció un modelo de edad de alta resolución, el cual también fue construido utilizando cicloestratigrafía. Los resultados indican que los sedimentos de sondeo fueron acumulados desde el Tortoniense tardío hasta el Mesiniense. Posteriormente, se relacionaron los cambios observados en la sedimentación con los eventos que afectaron el Mediterráneo durante el Mesiniense. Este capítulo se encuentra en revisión en la revista *Newsletters on Stratigraphy*.

En el capítulo 4 se presenta un nuevo marco cronoestratigráfico para las cuencas de Arcos, Ronda y la región de Antequera. El nuevo modelo de edad está basado en bioestratigrafía y se constituye en un intento de mejorar la datación de la fecha de cierre de la ramificación más occidental del canal Bético, el corredor del Guadalhorce.

Conclusiones

Los estrechos marítimos tienen una influencia importante tanto en los ambientales locales como en el clima regional y global. Un buen ejemplo del impacto que estos sistemas de conexión oceánica pueden llegar a tener lo brindan los estrechos marítimos Bético y Rifeño que durante el Mioceno tardío conectaron el Mar Mediterráneo con el Océano Atlántico. A partir del estudio de los sedimentos conservados en los corredores Bético (en el sur de España) y Rifeño (en el norte de Marruecos) se puede avanzar en el conocimiento sobre los procesos físicos y el impacto regional/global que tuvo el cierre de dichos estrechos.

A través de la construcción de un modelo de edad de alta resolución para el Mesiniense de la cuenca del Guadalquivir, la cual está localizada en el margen Atlántico del corredor Bético, se consiguió datar con alta precisión los cambios ambientales ocurridos en esta parte del corredor, así como evaluar su relevancia en un marco global. Dicho modelo de edad fue construido a partir de la calibración de los ciclos sedimentarios (cicloestratigrafía) presentes en los sedimentos de los sondeos Montemayor-1 y Huelva-1, que fueron perforados en el noroeste de la cuenca de Guadalquivir. Las margas aparentemente homogéneas que predominan en ambos sondeos, impidieron que la calibración de los ciclos con las curvas astronómicas se hiciese por inspección visual. Por lo tanto, se emplearon los cambios en la composición elemental de los sedimentos, los cuales se detectaron con fluorescencia de rayos X (XRF) a través del análisis de 1383 muestras. El método de XRF se calibró para detectar y quitar valores atípicos y para garantizar la reproducibilidad y fiabilidad de los valores elementales obtenidos con una pistola manual. Además se realizó una calibración extra mediante XRF convencional para comprobar que los cambios relativos en la composición geoquímica adquiridos manualmente son robustos. Finalmente, el modelo de edad se construyó calibrando dichas variaciones elementales con las curvas astronómicas, empleando como puntos de amarre varias dataciones magnetobioestratigráficas.

Con base en el modelo de edad propuesto, se realizaron varias interpretaciones sobre la evolución geológica de la Cuenca del Guadalquivir, y se evaluó su posible importancia regional y global mediante la relación con eventos propios del Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo.

- Se encontraron dos cambios significativos en la tasa de sedimentación en ambos sondeos, Huelva-1 y Montemayor-1. Por lo tanto se consideró que éstos podrían tener una relación con eventos regionales o globales. El primer cambio consiste en un aumento relativamente brusco de la tasa de sedimentación hace aproximadamente 5.55 Ma, el cual coincide con el inicio de la etapa final de la Crisis de Salinidad del Mesiniense (CSM) y con una fuerte desglaciación. El mecanismo más probable para explicar este cambio regional es un evento tectónico, el cual levantaría tectónicamente la región y promovería así un aumento de las tasas de erosión en la cuenca del Guadalquivir, así como la restricción de la conexión marítima Atlántico-Mediterránea. El segundo cambio abrupto en la tasa de sedimentación coincide con el límite Mioceno-Plioceno y con el restablecimiento de las condiciones marinas en el Mediterráneo, concluyendo la CSM. Estos eventos coetáneos pueden estar causados por subsidencia tectónica regional, cambios locales en la circulación oceánica asociados con la apertura y/o profundización del estrecho de Gibraltar.
- El aumento en la amplitud de los ciclos observado en la parte inferior del registro de Huelva-1 coincide con una primera restricción de la cuenca Mediterránea durante el Mesiniense temprano. Es posible que este cambio sedimentario este también relacionado con la restricción del corredor Bético, no obstante, se necesitan nuevos estudios para soportar esta hipótesis.

- Se reconoció un cambio gradual en la naturaleza de las fluctuaciones de la composición geoquímica de los sedimentos. Esta variación se asocia con un cambio paulatino en el ambiente de sedimentación de la cuenca del Guadalquivir, a medida que ésta progresivamente se colmataba. La parte inferior de ambos sondeos muestra una alternancia entre capas de carbonato biogénico y capas de material arcilloso terrígeno. El material terrígeno diluyó el carbonato biogénico durante los períodos de mayor flujo de ríos, inducidos por aumentos en la cantidad de insolación recibida durante los veranos del hemisferio norte. En el intervalo superior del registro, la naturaleza de los ciclos es diferente, probablemente como resultado de la somerización de la cuenca. En este ambiente marino somero, la sedimentación estuvo dominada por influjos de material terrestre de grano más grueso. La contribución de sedimentos limosos de origen detrítico aumentó debido al incremento de las tasas de erosión asociadas con una reducción de la cobertura vegetal durante los mínimos de insolación, lo que finalmente conllevó a la dilución del carbonato biogénico y la arcilla.
- Con base en el nuevo modelo de edad establecido para el sondeo Montemayor-1, se evidenció que el registro isotópico de oxígeno obtenido de foraminíferos bentónicos se correlaciona bien con registros previos del Atlántico, como son Ain el Beida, Loulja y la perforación ODP 982. Así mismo, los periodos glaciales TG12, TG14, TG20 y TG22, así como la deglaciación hacia TG11 y finalmente TG9 se expresan claramente en el registro del sondeo Montemayor-1. Las similitudes en los patrones de los registros isotópicos de oxígeno bentónico y planctónico observadas entre Ain el Beida, Loulja y el sondeo Montemayor-1 reflejan señales típicas de mar abierto, sugiriendo una influencia directa de la masa de Agua Noratlántica Central y la ausencia total de Aguas Mediterráneas (Mediterranean Outflow Water-MOW) durante la sedimentación Mesiniense del sondeo Montemayor-1.
- Sin embargo, se observa una desviación entre los registros isotópicos de oxígeno bentónicos del sondeo Montemayor-1 y Ain el Beida para el último período glacial de Mesiniense (5.9 a 5.5 Ma), coincidiendo con las primeras etapas de la crisis. Esto podría ser el resultado de la disminución/cesación de la MOW en la región del estrecho de Gibraltar. No obstante, esta desviación isotópica también podría ser consecuencia de la presencia de un flujo de MOW más salino o con mayor surgencia. Para entender completamente la evolución de MOW durante la CSM, se necesitan registros adicionales de alta resolución localizados en el margen Atlántico cerca del Estrecho de Gibraltar.

El levantamiento y la erosión resultante de los movimientos tectónicos que promovieron el cierre de los estrechos interoceánicos Bético y Rifeño, ha generado que la preservación de las secuencias sedimentarias dentro de los mismos corredores sea incompleta. No obstante, a partir de la distribución actual de sedimentos del Mioceno tardío en la región, se puede deducir que los principales canales interoceánicos se cerraron completamente antes de la precipitación de grandes volúmenes de halita durante la CSM. Sin embargo, la fecha de cierre del canal más occidental del corredor Bético, conocido como el corredor del Guadalhorce, es aún incierta. La cuenca de Ronda y la región de Antequera hacen parte de la región adyacente al corredor del Guadalhorce, conformando probablemente la zona más septentrional de este canal. En esta región, la secuencia sedimentaria muestra una somerización gradual del ambiente de depósito, identificado en el registro con el paso de margas a calcarenitas. Las nuevas dataciones bioestratigráficas realizadas en las margas señalaron en todos los casos una edad Tortoniense, anterior a 7.58 Ma. En consecuencia, es posible que la somerización de estas cuencas este asociada con una regresión regional durante el Tortoniense tardío, sugiriendo que el Corredor de Guadalhorce probablemente se cerró completamente durante el Tortoniense tardío-Mesiniense temprano.

Una regresión similar a la del Tortoniense tardío descrita para la cuenca de Ronda y la región de Antequera, ocurrió en la cuenca de Arcos, que esta situada hacia al oeste de la cuenca de Ronda. Estas observaciones son contemporáneas con el levantamiento Tortoniense tardío y cierre de la cuenca de Granada, al este de Ronda. Por lo tanto, se sugiere que el periodo de levantamiento tectónico ocurrido durante el Tortoniense tardío en la región Bética oriental y que ocasionó el cierre de las ramificaciones orientales del corredor Bético, continuó hacia el oeste y elevó la región Bética occidental desde la cuenca de Granada hasta la cuenca de Arcos. Estos movimientos tectónicos resultaron en el cierre del corredor Bético durante el Tortoniense tardío-Mesiniense temprano, mucho antes del inicio de la Crisis de Salinidad del Mesiniense. Estos resultados están en concordancia con los sedimentos de la base del sondeo Huelva-1, los cuales muestran que las primeras señales de restricción del corredor Bético ocurrieron durante el Mesiniense temprano.

La ubicación exacta y las dimensiones del canal (canales) que suministró agua del Océano Atlántico al Mar Mediterráneo durante la crisis son aún desconocidas, pero éstas son sólo algunas de las muchas incertidumbres que aún persisten en la investigación de los estrechos marítimos del Mioceno tardío. Estudios recientes basados en registros isotópicos, que buscan identificar el grado de conectividad de las aguas, han intentado reconstruir la presencia de aguas Mediterráneas en el Atlántico, así como las variaciones en el flujo de aguas Atlánticas que llegan al Mediterráneo. Sin embargo, estos nuevos registros tienen aún baja resolución temporal para capturar la variabilidad a escala sub-precesional de los flujos de aguas. Entender dicha variabilidad es fundamental ya que es una característica dominante del sistema hidrológico vigente en la región. La baja resolución de estos valores isotópicos además condiciona la interpretación que los registros sedimentarios pueden proporcionar a los experimentos de modelización que exploran a nivel teórico tanto los procesos que ocurren dentro de los estrechos, como el impacto que las variaciones en el intercambio de aguas tienen en el clima regional y global. La reconstrucción de intercambio en los corredores se ve además limitada por la falta de un indicador de salinidad que sea capaz de medir la amplia gama de salinidades que se produjeron durante la CSM, y que por tanto permita reconstruir los flujos de agua a partir de los contrastes de densidad entre corrientes de origen Mediterráneo o Atlántico. En consecuencia, es evidente que se necesitan nuevas investigaciones que permitan determinar las complejas características del intercambio de aguas Atlántico-Mediterráneas durante el Mioceno tardío.

En resumen, esta tesis brinda una visión general sobre los estrechos interoceánicos Atlántico-Mediterráneo que funcionaron durante el Mioceno tardío, prestando especial atención al corredor Bético, para el cual se presentan nuevos resultados cronoestratigráficos y evidencias en torno a su evolución geológica. Los resultados más notables son que los eventos de la CSM tuvieron también un efecto en el margen Atlántico español, sin embargo las aguas provenientes del Mediterráneo (MOW) probablemente no influenciaron los procesos sedimentarios de la cuenca del Guadalquivir durante el Mesiniense, lo cual concuerda con la hipótesis de cierre del corredor Bético durante el Tortoniense tardío-Mesiniense temprano.

Bibliografía

- Bartoli, G., Sarnthein, M., Weinelt, M., Erlenkeuser, H., Garbe-Schönberg, D. and Lea, D.W., 2005. Final closure of Panama and the onset of northern hemisphere glaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(1–2), 33-44.
- Benson, R.H., Rakic-El Bied, K. and Bonaduce, G., 1991. An important current reversal (influx) in the Rifian Corridor (Morocco) at the Tortonian-Messinian boundary: The end of Tethys Ocean. *Paleoceanography*, 6(1), 165-192.
- Berástegui, X., Banks, C.J., Puig, C., Taberner, C., Waltham, D. and Fernández, M., 1998. Lateral diapiric emplacement of Triassic evaporites at the southern margin of the Guadalquivir Basin, Spain. *Geological Society, London, Special Publications*, 134(1), 49-68.
- Berger, A., 1977. Support for the astronomical theory of climatic change. *Nature*, 269(5623), 44-45.
- Berger, A., 1978. Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements. *Quaternary Research*, 9(2), 139-167.
- Blanc, P.-L., 2002. The opening of the Plio-Quaternary Gibraltar Strait: assessing the size of a cataclysm. *Geodinamica Acta*, 15(5-6), 303-317.
- Corbí, H., Lancis, C., García-García, F., Pina, J.-A., Soria, J.M., Tent-Mancís, J.E. and Viseras, C., 2012. Updating the marine biostratigraphy of the Granada Basin (central Betic Cordillera). Insight for the Late Miocene palaeogeographic evolution of the Atlantic-Mediterranean seaway. *Geobios*, 45(3), 249-263.
- Fernández, M., Berástegui, X., Puig, C., García-Castellanos, D., Jurado, M.J., Torné, M. and Banks, C., 1998. Geophysical and geological constraints on the evolution of the Guadalquivir foreland basin, Spain. *Geological Society, London, Special Publications*, 134(1), 29-48.
- Flecker, R., Krijgsman, W., Capella, W., de Castro Martíns, C., Dmitrieva, E., Mayser, J.P., Marzocchi, A., Modestu, S., Ochoa, D., Simon, D., Tulbure, M., van den Berg, B., van der Schee, M., de Lange, G., Ellam, R., Govers, R., Gutjahr, M., Hilgen, F., Kouwenhoven, T., Lofi, J., Meijer, P., Sierro, F.J., Bachiri, N., Barhoun, N., Alami, A.C., Chacon, B., Flores, J.A., Gregory, J., Howard, J., Lunt, D., Ochoa, M., Pancost, R., Vincent, S. and Yousfi, M.Z., 2015. Evolution of the Late Miocene Mediterranean–Atlantic gateways and their impact on regional and global environmental change. *Earth-Science Reviews*, 150, 365-392.
- Fortuin, A., Krijgsman, W., Hilgen, F. and Sierro, F., 2000. Late Miocene Mediterranean desiccation: topography and significance of the ‘Salinity Crisis’ erosion surface on-land in southeast Spain: Comment. *Sedimentary Geology*, 133(3), 167-174.
- González-Delgado, J.A., Civis, J., Dabrio, C.J., Goy, J.L., Ledesma, S., Pais, J., Sierro, F.J. and Zazo, C., 2004. Cuenca del Guadalquivir. *Geología de España: Madrid, Sociedad Geológica Española, Instituto Geológico y Minero Español*, 543-550.
- Haug, G.H. and Tiedemann, R., 1998. Effect of the formation of the Isthmus of Panama on Atlantic Ocean thermohaline circulation. *Nature*, 393(6686), 673-676.
- Hilgen, F., Krijgsman, W., Langereis, C., Lourens, L., Santarelli, A. and Zachariasse, W., 1995. Extending the astronomical (polarity) time scale into the Miocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 136(3), 495-510.
- Hsü, K., Ryan, W. and Cita, M., 1973. Late Miocene desiccation of the Mediterranean. *Nature*, 242(5395), 240-244.
- Jiménez-Moreno, G., Pérez-Asensio, J.N., Larrasoaña, J.C., Aguirre, J., Civis, J., Rivas-Carballo, M.R., Valle-Hernández, M.F. and González-Delgado, J.A., 2013. Vegetation, sea-level, and climate changes during the Messinian salinity crisis. *Geological Society of America Bulletin*, 125(3-4), 432-444.
- Krijgsman, W., Hilgen, F.J., Raffi, I., Sierro, F.J. and Wilson, D.S., 1999. Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis. *Nature*, 400(6745), 652-655.

- Krijgsman, W., Garcés, M., Agustín, J., Raffi, I., Taberner, C. and Zachariasse, W.J., 2000. The 'Tortonian salinity crisis' of the eastern Betics (Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 181(4), 497-511.
- Larrasoaña, J.C., González-Delgado, J.A., Civis, J., Sierro, F.J., Alonso-Gavilán, G. and Pais, J., 2008. Magnetobiostratigraphic dating and environmental magnetism of Late Neogene marine sediments recovered at the Huelva-1 and Montemayor-1 boreholes (lower Guadalquivir basin, Spain). *Geo-Temas*, 10, 1175-1178.
- Ledesma, S., 2000. *Astrobiocronología y estratigrafía de alta resolución del Neógeno de la Cuenca del Guadalquivir-Golfo de Cádiz*. Ph Degree. Universidad de Salamanca, 464.
- Livermore, R., Hillenbrand, C.D., Meredith, M. and Eagles, G., 2007. Drake Passage and Cenozoic climate: An open and shut case? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(1).
- Martín, J.M., Braga, J.C. and Betzler, C., 2001. The Messinian Guadalhorce corridor: the last northern, Atlantic-Mediterranean gateway. *Terra Nova*, 13(6), 418-424.
- Martín, J.M., Puga-Bernabéu, Á., Aguirre, J. and Braga, J.C., 2014. Miocene Atlantic-Mediterranean seaways in the Betic Cordillera (southern Spain). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 27, 1.
- McKenzie, J.A., 1999. From desert to deluge in the Mediterranean. *Nature*, 400(6745), 613-614.
- Pérez-Asensio, J.N., Aguirre, J., Schmiedl, G. and Civis, J., 2012a. Messinian paleoenvironmental evolution in the lower Guadalquivir Basin (SW Spain) based on benthic foraminifera. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 326, 135-151.
- Pérez-Asensio, J.N., Aguirre, J., Schmiedl, G. and Civis, J., 2012b. Impact of restriction of the Atlantic-Mediterranean gateway on the Mediterranean Outflow Water and eastern Atlantic circulation during the Messinian. *Paleoceanography*, 27(3).
- Pérez-Asensio, J.N., Aguirre, J., Jiménez-Moreno, G., Schmiedl, G. and Civis, J., 2013. Glacioeustatic control on the origin and cessation of the Messinian salinity crisis. *Global and Planetary Change*, 111(0), 1-8.
- Riaza, C. and Martínez del Olmo, W., 1996. S3 depositional model of the Guadalquivir–Gulf of Cadiz Tertiary basin. In: P.F. Friend and C.J. Dabrio (Eds.), *Tertiary Basins of Spain: The Stratigraphic Record of Crustal Kinematics*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 330-338.
- Santisteban, C. and Taberner, C., 1983. Shallow marine and continental conglomerates derived from coral reef complexes after desiccation of a deep marine basin: the Tortonian-Messinian deposits of the Fortuna Basin, SE Spain. *Journal of the Geological Society*, 140(3), 401-411.
- Scher, H.D. and Martin, E.E., 2006. Timing and climatic consequences of the opening of Drake Passage. *Science*, 312(5772), 428-430.
- Sierro, F.J., Delgado, J.A.G., Flores, J.A., Dabrio, C.J. and Civis, J., 1996. S4 Late Neogene depositional sequences in the foreland basin of Guadalquivir (SW Spain). In: P.F. Friend and C.J. Dabrio (Eds.), *Tertiary Basins of Spain: The stratigraphic record of crustal kinematics*, pp. 339.
- van den Berg, B.C.J., Sierro, F.J., Hilgen, F.J., Flecker, R., Larrasoaña, J.C., Krijgsman, W., Flores, J.A., Mata, M.P., Martín, E.B. and Civis, J., 2015. Astronomical tuning for the upper Messinian Spanish Atlantic margin: Disentangling basin evolution, climate cyclicity and MOW. *Global and Planetary Change*, 135, 89-103.
- Van der Laan, E., Snel, E., De Kaenel, E., Hilgen, F. and Krijgsman, W., 2006. No major deglaciation across the Miocene-Pliocene boundary: Integrated stratigraphy and astronomical tuning of the Loulja sections (Bou Regreg area, NW Morocco). *Paleoceanography*, 21(3).