



LA INTERACCIÓN DE CLIMA, TECTÓNICA Y ACTIVIDADES HUMANAS EN LA EVOLUCIÓN DE LAS ZONAS COSTERAS MEDITERRÁNEAS: EL REGISTRO HOLOCENO DEL LAGOON DE BUTRINT (ALBANIA)



M. Morellón^(1,2), D. Ariztegui⁽³⁾, F.S. Anselmetti^(2,4), B. Wagner⁽⁵⁾

- (1) Instituto de Geociencias (CSIC, UCM), Calle José Antonio Nováis, 2. Facultad de Ciencias Geológicas, Univ. Complutense. 28040-Madrid. mario.morellon@igeo.ucm-csic.es
- (2) Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Ueberlandstrasse 133, CH-8600-Dübendorf (Suiza).
- (3) Section of Earth Sciences. University of Geneva. Rue des Maraîchers 13. CH-1205 Ginebra (Suiza).
- (4) Institute of Geological Sciences and Oeschger Centre of Climate Change Research, University of Bern. Baltzerstrasse 1. CH-3012-Berna (Suiza).
- (5) Department of Geology and Mineralogy, University of Cologne. Zùlpicher Str. 49a. 50674-Köln (Alemania).

Abstract (The interplay of climate, tectonics and human activities in the evolution of coastal Mediterranean regions: The Holocene record of Butrint Lagoon (Albania)): The multi-proxy analysis (sedimentology, geochemistry) of a 12 m long laminated sediment core from Butrint Lagoon (SW Albania), dated by 7 AMS ¹⁴C dates, allows reconstruction of environmental changes in the central Mediterranean region during the last ~4.5 cal kyrs BP. The progradation of the Pavlo river delta, favoured by increasing farming, led to the progressive isolation of this system, from an open bay to a restricted lagoon. An abrupt increase in mass-wasting activity during 1515-1446 BC, likely caused by a seismic crisis, led to the accumulation of up to 24 homogenites. Maximum water salinity and bioproductivity occurred during the Roman Warm Period (500 BC-0 AD) and Medieval Climate Anomaly (800-1400 AD). Conversely, lower salinity, more oxic conditions and higher clastic input occurred during 1400-500 BC, the Late Roman period and the Dark Ages (0-800 AD) and during the Little Ice Age (1400-1800 AD). Hydrological fluctuations correlate with NAO variability. This record demonstrates the complex interplay of climate variability, tectonics and human impact in the evolution of coastal Mediterranean regions.

Palabras clave: Holoceno Tardío, Mediterraneo Central, lagoon, sedimentos laminados

Key words: Late Holocene, Central Mediterranean, lagoon, laminated sediments

INTRODUCCIÓN

Las costas del Mar Mediterráneo han sido densamente pobladas desde épocas prehistóricas, proporcionando recursos esenciales y actuando como nexos de comunicación entre las principales civilizaciones de la región (Marriner y Morhange, 2007). Durante esta larga historia de ocupación humana, estas zonas han estado sometidas a fluctuaciones climáticas, con un impacto particularmente importante en el ciclo hidrológico (Fletcher y Zielhofer, 2013). Por lo tanto, esta región destaca como una de las mejores para estudiar las complejas interacciones entre variabilidad climática y actividades humanas.

La transgresión Holocena inundó amplias zonas costeras mediterráneas, formando numerosas bahías y lagoons. Los sedimentos depositados en estas lagunas proporcionan importantes archivos de cambios ambientales, frecuentemente caracterizados por una compleja interacción entre variabilidad climática (Fletcher y Zielhofer, 2013), fluctuaciones eustáticas, actividad sísmica (Vött, 2007) e impacto humano. Sin embargo, el número de registros investigados en estas zonas son relativamente escasos (ej., Shkodra, Albania (Zanchetta et al., 2012); Amvrakikos, Grecia (Avramidis et al., 2014), entre otros) y, excluyendo antiguos puertos (Marriner y Morhange, 2007), la mayor parte de la información paleoambiental procede de sondeos marinos o de registros continentales de zonas interiores, frecuentemente sometidas a diferentes condiciones.

En este estudio investigamos una secuencia sedimentaria continua y laminada que registra los principales cambios ambientales de una zona costera del Mediterráneo central durante los últimos ~4.5 años cal. El análisis multidisciplinar

(sedimentología, geoquímica, y sílice biogénica) de sondeos recuperados en el Lagoon de Butrint (Albania) refleja una influencia gradual de los cambios geomorfológicos en la cuenca de drenaje, modulados por la neotectónica y las actividades humanas en la cercana ciudad antigua de Butrint. Estos factores, junto con el impacto de la variabilidad climática, constituyen los principales mecanismos de cambio ambiental. Los sedimentos laminados de Butrint permiten identificar sus diferentes componentes, depositados estacionalmente y asociados a diferentes fuentes y variables ambientales. Además, la correlación con otros registros permite reconstruir la variabilidad espaciotemporal de los cambios registrados y la influencia de teleconexiones climáticas.

ÁREA DE ESTUDIO

Butrint (39°47'N, 20°1'E) es el lagoon costero más meridional de la costa del Mar Jónico en Albania (Fig. 1A). La cuenca lacustre ocupa un graben extensional N-S formado en el Pleistoceno (Aliaj et al., 2001). El sustrato está compuesto por: calizas (Jurásico medio – Cretácico medio), en Ksamili y el sur de las montañas Milë, y flysch paleoceno en el norte del lagoon (Tsabaris et al., 2007). Butrint se encuentra cerca del límite entre la placa europea y la micropalaca adriática, una de las zonas tectónicamente más activas del Mediterráneo (Aliaj et al., 2001).

Por otro lado, Butrint es el único lagoon costero de Albania conectado directamente con el Mar Jónico, a través del Canal de Vivari (Fig. 1B). El Río Bistrice en el norte y el Río Pavlo constituyen las principales fuentes de agua dulce, mientras que el agua marina penetra ocasionalmente durante episodios de marea alta (Negroni, 2001). Por lo tanto, los aportes de



Fig. 1: A. Localización del área de estudio dentro del Mediterráneo central. B. Lago de Butrint y zonas adyacentes.

agua dulce (y ocasionalmente de agua marina) junto con las pérdidas a través del Canal de Vivari y la evaporación controlan las variaciones en la salinidad del lago. Los fuertes gradientes de temperatura y salinidad en la columna de agua (máxima profundidad: 21.4 m) dan lugar a estratificación permanente en: i) un epilimnion de ~8 m con temperaturas de entre 14 y 25 °C, condiciones óxicas y salinidad moderada (13-26 PSU) y ii) un hipolimnion anóxico de ~13 metros con temperaturas constantes de ~17 °C y mayor salinidad (30-36 PSU) (Negroni, 2001).

En una península actualmente rodeada por el Canal de Vivari se encuentran los restos arqueológicos de la antigua Ciudad de Butrint, fundada por los griegos en siglo II AC y poblada de forma variable pero continua hasta finales del siglo XVIII (Hodges et al., 1996).

METODOLOGÍA

Se recuperaron dos sondeos (BUT-12-1 y BUT-12-2), de 12 y 9 m de longitud, respectivamente, en la zona más profunda del lago con un equipo de percusión flotante. La parte más superficial de la secuencia se reconstruyó con el sondeo de gravedad BUT-00-2. La secuencia compuesta de 11.61 m se construyó mediante la correlación litoestratigráfica de los 3 sondeos. Todos ellos se cortaron longitudinalmente en 2 mitades y se escanearon con cámara digital Jai CV L105 3 CCD. Las facies sedimentarias se definieron mediante la descripción visu de las secciones y la observación de frotis con microscopio petrográfico. La composición elemental se midió con un core scanner AVAATECH XRF a 1 mm de resolución. Los sondeos se muestrearon cada 4 cm para Carbono Total (TC), Carbono Orgánico Total (TOC), Carbono Inorgánico Total (TIC), Nitrógeno Total (TN), composición mineralógica y sílice biogénica (BiSi). TC y TN se analizaron con HEKAtech Euro EA y el TIC por titrado colorimétrico (Coulometric Inc., 5011 CO₂-Coulometer). El TOC se calculó como TOC = TC-TIC. La mineralogía se caracterizó por difracción de rayos X con un Bruker-AXS D5005 (condiciones de trabajo: Cu ka, 40 kV, 30 mA y graphite

monochromator) y la abundancia relativa de cada mineral, según (Chung, 1974a, b). La BiSi se midió por digestión en húmedo combinada con ICP-AES.

La cronología de la secuencia está basada en: i) datación mediante ¹³⁷Cs en el sondeo BUT-00-2 y ii) 7 ataciones AMS ¹⁴C en los sondeos BUT-12-1 y 2, analizadas en el ETH-Zürich. Las dataciones se calibraron con Calib 6.0 usando la curva INTCAL13 en el intervalo de probabilidad 2σ. El modelo de edad se construyó mediante interpolación lineal (Fig.2).

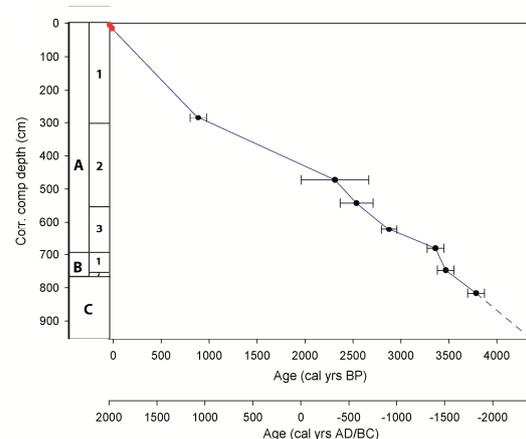


Fig. 2: Modelo de edad final de la secuencia de Butrint (excluyendo las homogéinitas depositadas instantáneamente). Los puntos negros con barras de error representan las dataciones radiocarbónicas y los rojos los máximos de actividad en ¹³⁷Cs.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han definido 5 facies sedimentarias, que pueden agruparse en masivas y laminadas. El primer grupo incluye facies versicolores finamente (facies 1) a ligeramente (facies 2) laminadas. Estas facies se componen de láminas de espesor variable: i) amarillas, de calcita autigénica, ii) rojizas y marrones, ricas en materia orgánica y iii) grises de composición detrítica. El modelo de depósito de estas facies laminadas se describe en Ariztegui et al. (2010). Las facies masivas incluyen: i) limos grises y marrones de grano fino (facies 3), ii) limos versicolores finos organizados en secuencias granodecrescentes (facies 4) y iii) limos grises-verdosos con bioturbación y escafópodos (facies 5). Las facies 4 y 5 se interpretan como homogéinitas (turbiditas relacionadas con movimientos en masa) y se intercalan como intervalos discretos dentro de las facies laminadas. De acuerdo con esta distribución en facies, la secuencia sedimentaria de Butrint se ha dividido en tres unidades sedimentarias (Fig. 3):

La *Unidad C* (1161.5 – 974.1 cm; 2421 – 1619 AC), constituida por facies 5 y el mayor contenido en siliciclásticos de la secuencia, representa condiciones marinas someras.

La *Unidad B* (974.1 – 767.9 cm; 1619 – 1430 AC) está dividida en dos intervalos diferenciados. En la parte inferior (*subunidad B2*, 974.1 - 944.6 cm; 1619-1515 AC) está caracterizada por facies ligeramente laminadas 2, la desaparición de los escafópodos y un aumento en pirita, todos indicativos de mayor anoxia. Por otro lado, el aumento en carbonatos y la presencia de halita reflejan un incremento en la salinidad. En conjunto, ambos factores reflejan

condiciones más restringidas, que coinciden con una primera fase de acreción de la Llanura de Vrina. (Hounslow y Chepstow-Lusty, 2004).

La subunidad B2 (944.6 – 767.9 cm; 1515-1430 BC) está formada por facies 1 constituidas únicamente por láminas grises-clásticas y amarillas-calcíticas con un gran número de homogeinitas intercaladas (facies 5), de espesor variable (2.5 a 17 cm). Estas capas se depositaron en un periodo relativamente corto (~60 años) y su depósito coincide con aumentos de MS, S y Fe. Probablemente son el resultado de movimientos en masa inducidos por eventos sísmicos que provocaron temblores en la cuenca lacustre y con ello, la liberación de H₂S y la mezcla de la columna de agua, extendiendo la anoxia y favoreciendo la precipitación de sulfuros. De hecho la liberación ocasional de H₂S hacia la zona superficial ha causado crisis distróficas durante el siglo XX en Butrint (Peja et al., 1996). El depósito de estas homogeinitas coincide con un fuerte terremoto (M = 6.8) registrado en Corfu (Grecia) entre 1500 y 1050 AC, situado a menos de 6 km de Butrint y que provocó tsunamis en el NO de Grecia (Vött, 2007). Considerando las incertidumbres cronológicas, este único evento documentado podría reflejar una crisis sísmica regional de mayor extensión temporal que podría haber reducido la estabilidad de los márgenes del lago y los deltas de los ríos Pavilos y Bistrica, desencadenando los movimientos en masa.

En la Unidad A (767.9 – 0 cm; 1430 AC – 2000 DC), predominan las facies laminadas. La parte inferior (subunidad A3, 767.9 – 627.9 cm, 1430-645 BC) está formada por la alternancia entre facies ligeramente (2) y finamente (1) laminadas, que indican condiciones ligeramente más óxicas. Por otro lado, el aumento en siliciclásticos y descenso en carbonatos refleja aguas menos concentradas, probablemente

debido a condiciones más húmedas, tal y como reflejan otros registros de los Balcanes en este periodo (e.g., Lago Prespa (Leng et al., 2013)).

La Subunidad A2 (627.9 – 361.6 cm; 645 AC – 894 DC) está compuesta por facies 1, lo que, junto con el aumento en pirita, indica condiciones más restringidas. Hacia la mitad de esta subunidad aumenta la concentración en carbonatos, indicando mayor salinidad, y aumentan TOC y Fe/Mn, reflejando condiciones más anóxicas. Este periodo (400-0 AC) coincide con una etapa árida en el E del Mediterráneo (Bar-Matthews et al., 2003), pero contrasta con condiciones más húmedas en los Balcanes (Lacey et al., 2014; Zanchetta et al., 2012). La parte superior de esta subunidad refleja condiciones menos salinas, tal y como demuestra el descenso en carbonatos y condiciones más óxicas (menor Fe/Mn). El aumento en TOC/TN indica mayor aporte de materia orgánica terrestre, lo que, junto con el aumento de detríticos indicaría una mayor escorrentía. Este periodo coincide con la expansión de la ciudad antigua de Butrint durante el siglo I DC hacia la Llanura de Vrina y la puesta en cultivo de esta zona (Hounslow y Chepstow-Lusty, 2004), probablemente responsable de este aumento en el aporte de sedimentos detríticos. Además, este periodo coincide con el final del Periodo Cálido Romano (PCR) y las llamadas "Dark Ages (DA)", caracterizadas por condiciones más frías y húmedas, tal y como reflejan otros registros Mediterráneos (Magy et al., 2013; Moreno et al., 2012).

La subunidad A1 (361.1-0 cm, 894 – 2000 AD) comienza con un aumento en la frecuencia y el espesor de las láminas de calcita, entre 340 y 300 cm, tal y como reflejan los aumentos en calcita y TIC. Este aumento en la salinidad coincide con un aumento en BiSi, que indica mayor bioproductividad,

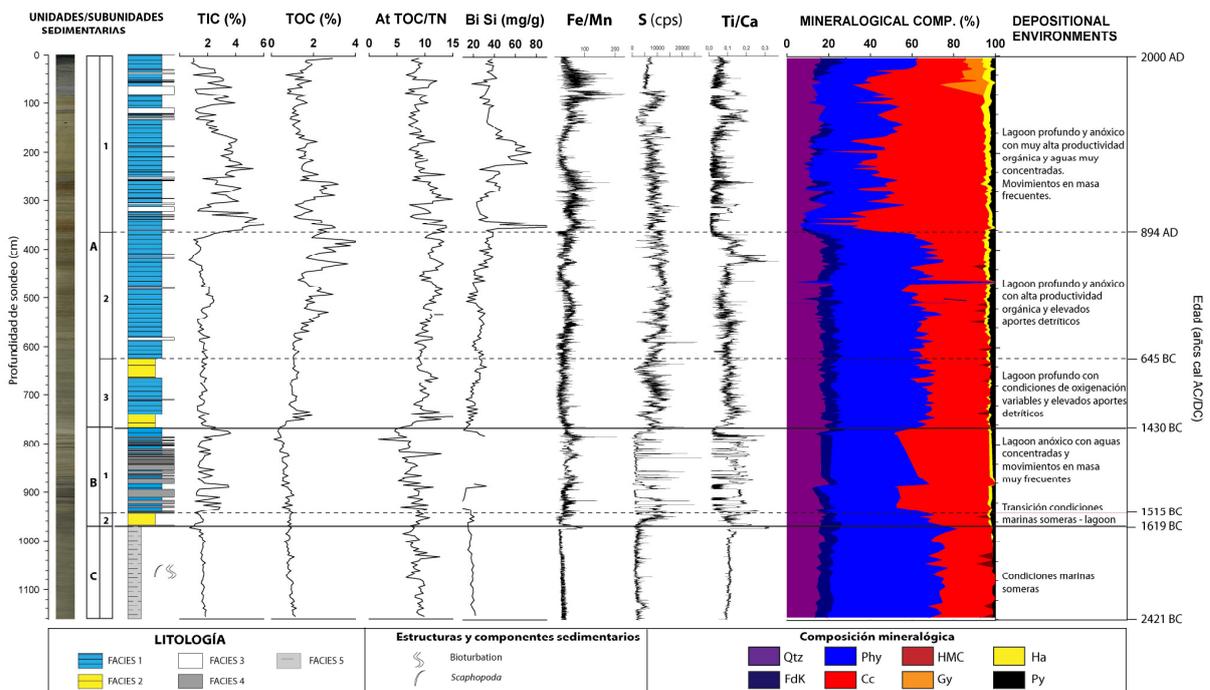


Fig. 3: Secuencia sedimentaria del Lagoon de Butrint con los diferentes indicadores analizados y la reconstrucción de ambientes sedimentarios correspondiente en la parte derecha.

y con condiciones más anóxicas (aumento en Fe/Mn). El aumento en la temperatura de las aguas habría favorecido la proliferación de diatomeas y la precipitación bioinducida de calcita. Este periodo (850-1350 AD) coincide con la Anomalía Climática Medieval (ACM), caracterizada por un aumento global en las temperaturas, y condiciones más áridas en el oeste del Mediterráneo (Moreno et al., 2012), en contraste con la mayor humedad registrada en el Este del Mediterráneo (Roberts et al., 2012). En la parte media de esta subunidad se produce un ligero descenso en el contenido en carbonatos y un aumento en los silicatos, que indicarían aguas menos concentradas; y un descenso en Fe/Mn, que refleja condiciones más óxicas. Este intervalo coincide con la Pequeña Edad de Hielo (PEH) (1350-1800 DC), caracterizada por un enfriamiento generalizado y mayor humedad en el oeste y zona central del Mediterráneo. Por el contrario, se produjo un aumento en la humedad al Este de los Balcanes. Tras este periodo, diversas modificaciones en el Lago de Butrint y el aumento global de temperaturas y del nivel del mar han contribuido a una progresiva salinización y eutrofización en el sistema (Ariztegui et al., 2010).

CONCLUSIONES

La secuencia sedimentaria del Lago de Butrint registra el progresivo aislamiento de esta cuenca respecto del Mar Jónico durante los últimos ~4500 años cal, como resultado de una compleja interacción de tectónica, clima y actividades humanas. La progradación del delta del Río Pavlo se aceleró tras la expansión de la ciudad antigua de Butrint hacia la Llanura de Vrina, cerrando progresivamente el Canal de Vivari. Las condiciones marinas someras predominaron hasta 1620 AC, dando paso a las primeras evidencias de condiciones restringidas. Entre 1477 y 1466 AC se produjeron un gran número de movimientos en masa (24 homogeinitas de hasta 17 cm de espesor) probablemente relacionados con una crisis sísmica en la región, documentada en Corfu y el NO de Grecia.

Los periodos de máxima salinidad coinciden con etapas cálidas, como el PCR (500 BC-0 AD), la ACM (800-1400 AD) y después de 1800 AD. Por el contrario las condiciones más húmedas se dieron durante: 1400-500 BC, final del PCR y DA (0-800 AD) y durante la PEH (1400-1800 AD). Este patrón coincide con los registros del oeste del Mediterráneo, lo que sugiere unos mecanismos responsables de la variabilidad climática regional similares en ambas zonas durante el último milenio.

Agradecimientos: Esta investigación se ha financiado con el proyecto HYVARMED (CGL2013-42645-P), concedido por el MINECO. M. Morellón disfruta de un contrato postdoctoral "JAE-DOC" cofinanciado por el CSIC y el Fondo Social Europeo (FSE). Agradecemos el apoyo a nuestra investigación en el Lago de Butrint a Salvatore Bushati (Academia Albanesa de las Ciencias) y a Arben Pambuku, Brunilda Brushulli, Adrian Dimithri y Marenglen Gjoka (Servicio Geológico de Albania).

Referencias bibliográficas

Aliaj, S., Baldassarre, G., Shkupi, D., (2001). Quaternary subsidence zones in Albania: some case studies. *Bulletin*

of Engineering Geology and the Environment 59, 313-318.

Ariztegui, D., Anselmetti, F.S., Robbiani, J.M., Bernasconi, S.M., Brati, E., Gilli, A., Lehmann, M.F., (2010). Natural and human-induced environmental change in southern Albania for the last 300 years: constraints from the Lake Butrint sedimentary record. *Global and Planetary Change* 71, 183-192.

Avramidis, P., Iliopoulos, G., Panagiotaras, D., Papoulis, D., Lambropoulou, P., Kontopoulos, N., Siavalas, G., Christanis, K., (2014). Tracking Mid- to Late Holocene depositional environments by applying sedimentological, palaeontological and geochemical proxies, Amvrakikos coastal lagoon sediments, Western Greece, Mediterranean Sea. *Quaternary International* 332, 19-36.

Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Gilmour, M., Matthews, A., Hawkesworth, C.J., (2003). Sea-land oxygen isotopic relationship from planktonic foraminifera and speleothems in the Eastern Mediterranean region and their implication for paleorainfall during interglacial interval. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67, 3181-3199.

Chung, F.H., (1974a). Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. I. Matrix-flushing method for quantitative multicomponent analysis. *Journal of Applied Crystallography* 7.

Chung, F.H., (1974b). Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. II. Adiabatic principle of X-ray diffraction analysis of mixtures. *Journal of Applied Crystallography* 7, 526-531.

Fletcher, W.J., Zielhofer, C., (2013). Fragility of Western Mediterranean landscapes during Holocene Rapid Climate Changes. *CATENA* 103, 16-29.

Hodges, R., Martin, S., Moreland, J., (1996). Butrint (Albania). A microcosm of Mediterranean History. *Minerva* 7, 9-13.

Hounslow, M.W., Chepstow-Lusty, A., (2004). A record of soil loss from Butrint, southern Albania, using mineral magnetism indicators and charcoal (AD 450 to 1200). *The Holocene* 14, 321-333.

Lacey, J., Francke, A., Leng, M., Vane, C., Wagner, B., (2014). A high-resolution Late Glacial to Holocene record of environmental change in the Mediterranean from Lake Ohrid (Macedonia/Albania). *International Journal of Earth Sciences*, 1-16.

Leng, M.J., Wagner, B., Boehm, A., Panagiotopoulos, K., Vane, C.H., Snelling, A., Haidon, C., Woodley, E., Vogel, H., Zanchetta, G., Baneschi, I., (2013). Understanding past climatic and hydrological variability in the Mediterranean from Lake Prespa sediment isotope and geochemical record over the Last Glacial cycle. *Quaternary Science Reviews* 66, 123-136.

Magny, M., Combourieu-Nebout, N., de Beaulieu, J.L., Bout-Roumazelles, V., Colombaroli, D., Desprat, S., Francke, A., Joannin, S., Ortu, E., Peyron, O., Revel, M., Sadori, L., Siani, G., Sicre, M.A., Samartin, S., Simonneau, A., Tinner, W., Vannièrre, B., Wagner, B., Zanchetta, G., Anselmetti, F., Brugiapaglia, E., Chapron, E., Debret, M., Desmet, M., Didier, J., Essallami, L., Galop, D., Gilli, A., Haas, J.N., Kallel, N., Millet, L., Stock, A., Turon, J.L., Wirth, S., (2013). North-South palaeohydrological contrasts in the central Mediterranean during the Holocene: tentative synthesis and working hypotheses. *Clim. Past* 9, 2043-2071.

Marriner, N., Morhange, C., (2007). Geoscience of ancient Mediterranean harbours. *Earth-Science Reviews* 80, 137-194.

Moreno, A., Pérez, A., Frigola, J., Nieto-Moreno, V., Rodrigo-Gámiz, M., Martrat, B., González-Sampériz, P., Morellón, M., Martín-Puertas, C., Corella, J.P., Belmonte, Á., Sancho, C., Cacho, I., Herrera, G., Canals, M., Grimalt, J.O., Jiménez-Espejo, F., Martínez-Ruiz, F., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B.L., (2012). The Medieval Climate Anomaly in the Iberian Peninsula reconstructed from marine and lake records. *Quaternary Science Reviews* 43, 16-32.

Negróni, G., (2001). La Laguna di Butrinti. *Il Pesce* 6, 45-49.



- Peja, N., Vaso, A., Miho, A., Rakaj, N., Crivelli, A.J., (1996). Characteristics of Albanian lagoons and their fisheries. *Fisheries Research* 27, 215-225.
- Roberts, N., Moreno, A., Valero-Garcés, B.L., Corella, J.P., Jones, M., Allcock, S., Woodbridge, J., Morellón, M., Luterbacher, J., Xoplaki, E., Türkeş, M., (2012). Palaeolimnological evidence for an east-west climate see-saw in the Mediterranean since AD 900. *Global and Planetary Change* 84-85, 23-24.
- Tsabaris, C., Eleftheriou, G., Kapsimalis, V., Anagnostou, C., Vlastou, R., Durmishi, C., Kedhi, M., Kalfas, C.A., (2007). Radioactivity levels of recent sediments in the Butrint Lagoon and the adjacent coast of Albania. *Applied Radiation and Isotopes* 65, 445-453.
- Vött, A., (2007). Relative sea level changes and regional tectonic evolution of seven coastal areas in NW Greece since the mid-Holocene. *Quaternary Science Reviews* 26, 894-919.
- Zanchetta, G., Van Welden, A., Baneschi, I., Drysdale, R., Sadori, L., Roberts, N., Giardini, M., Beck, C., Pascucci, V., Sulpizio, R., (2012). Multiproxy record for the last 4500 years from Lake Shkodra (Albania/Montenegro). *Journal of Quaternary Science* 27, 780-789.