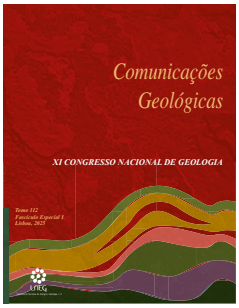
Comunicações Geológicas

Comunicações Geológicas (2025) 112, Especial I, 113-117
ISSN: 0873-948X; **e-ISSN**: 1647-581X

Reavaliação estratigráfica da Formação de Coimbra (Sinemuriano) através de dados de radiação gama em sondagens

Stratigraphic re-evaluation of Coimbra Formation (Sinemurian) through gamma-ray in wells



J. M. Sousa[1*], L. V. Duarte[2], S. L. R. Sêco[3]

DOI: https://doi.org/10.34637/ea2v-6z14
Recebido em 29/09/2023 / Aceite em 01/02/2024
Publicado online em abril de 2025
© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP

Artigo original
Original article

Resumo: Os dados litostratigráficos de subsuperfície da Bacia Lusitânica apresentam uma grosseira resolução e interpretação, sendo a conceptualização da evolução da bacia substanciada principalmente por afloramento. A espectrometria de radiação gama tem demonstrado ser uma grande utilidade na correlação entre unidades geológicas em afloramento e subsuperfície, reconhecimento de fácies margosas ricas em matéria orgânica, e análise sequencial. Nesta investigação, este método é aplicado à Formação de Coimbra registada em 19 sondagens onshore e offshore da bacia sendo feita uma reinterpretação litostratigráfica e uma análise da evolução sequencial desta unidade.

Palavras-chave: Formação de Coimbra, radiação gama, sedimentos carbonatados, margas ricas em matéria orgânica, Bacia Lusitânica

Abstract: Subsurface stratigraphic data on the Lusitanian Basin present a coarse interpretation and resolution, and the conceptualization of its evolution is mostly constrained to outcrop studies. Gamma-ray spectrometry has shown promise in the subsurface of organic marly successions by correlating geological units, identifying marly and organic-rich intervals, and providing sequence analysis. In this investigation, this method is applied to the Coimbra Formation, wich is recorded in 19 onshore and offshore wells, providing new insights into this unit's stratigraphy and its sequential evolution.

Keywords: Coimbra Formation, gamma-ray, carbonates, organic-rich marls, Lusitanian Basin.

[1] MARE – Universidade de Coimbra. Portugal
[2] Universidade de Coimbra, MARE e Departamento de Ciências da Terra, Coimbra, Portugal
[3] Universidade de Coimbra, IDL e Departamento de Ciências da Terra, Coimbra, Portugal

[*] Corresponding author / Autor correspondente: joaomiguelsousa007@gmail.com

1. Introdução

Sendo uma das poucas bacias sedimentares jurássicas, peri-atlânticas, com extensa exposição superficial de unidades carbonatadas, a Bacia Lusitânica (BL) beneficia de um conhecimento estratigráfico bastante detalhado em onshore (*e.g.* Hiscott *et al*., 1990; Wilson, 1989; Azerêdo *et al*., 2003; Kullberg *et al*., 2013). No entanto, este conhecimento contrasta com os dados disponíveis de subsuperfície, tanto nas conhecidas dificuldades cronostratigráficas, como na definição geral litostratigráfica, que é, por vezes, extremamente restrita, desde uma resolução grosseira dos limites estratigráficos, a erros associados à interpretação faciológica das unidades, e falta de revisões ou atualizações nas unidades litostratigráficas. Apesar destas limitações, estudos baseados na análise de Radiação Gama Total (RGT) e radioelementos têm revelado um enorme potencial na definição estratigráfica de sucessões margo-calcárias e, em especial, de unidades margosas ricas em matéria orgânica, como é o caso das unidades do Jurássico Inferior da BL (*e.g.* Correia *et al.*, 2012; Sêco *et al.*, 2018, 2019). A espectrometria de radiação gama é uma técnica baseada nos espectros de radiação emitidos pelos radioelementos K-40, Th-232 e U-238. As maiores concentrações de K e Th estão associados a sedimentos silto-argilosos e sedimentos terrígenos em ambientes hemipelágicos, e o U associado a ambientes redutores/anóxicos onde frequentemente se acumulam grandes concentrações de matéria orgânica (*e.g.* Bábek *et al*., 2013; Simicek e Bábek, 2015; Gama e Schwark, 2022). Trata-se de uma técnica útil em análise de bacias sedimentares, correlação entre afloramento e dados subsuperficiais, e estratigrafia sequencial, permitindo ainda a caracterização indireta de rochas com potencial de geração de hidrocarbonetos (ver referências acima citadas). Considerando o sucesso desta metodologia, o presente trabalho tem como objetivos reinterpretar os limites litostratigráficos da Formação (Fm) de Coimbra, registada em 19 sondagens onshore e offshore da BL (Figura 1 A) e identificar os seus intervalos mais margosos, consoante a variação dos padrões radiométricos, e a sua subsequente análise sequencial. Um dos intuitos deste estudo é também o reconhecimento dos intervalos ricos em matéria orgânica registados nesta unidade, essencialmente na porção mais ocidental da bacia (*e.g.* Duarte e Soares, 2002; Duarte *et al*., 2010, 2022; Sêco *et al.*, 2018).

2. A Formação de Coimbra

A Fm de Coimbra insere-se no contexto evolutivo da BL como a primeira unidade dominantemente carbonatada, dolomítica e calcária, de idade sinemuriana (Jurássico Inferior), que se sobrepõe a uma unidade argilo-evaporítica (Hettangiano) e antecede uma espessa sucessão margo-calcária, rica em matéria orgânica, do Sinemuriano superior e da base do Pliensbachiano, a Fm de Água de Madeiros (*e.g.* Duarte e Soares 2002; Duarte *et al.*, 2010; Dimuccio *et al*., 2016). Genericamente, é composta por um membro dolomítico na base, e um membro calcário no topo (Azerêdo *et al.*, 2003). A unidade é também descrita em vários perfis detalhados de afloramento, entre os de maior destaque, Dimuccio *et al*. (2016) na região de Coimbra; e na margem

ocidental da BL, em S. Pedro de Moel, onde se apresentam 8 subunidades de acordo com a transição de fácies e critérios sedimentológicos e paleontológicos, sumeriamente organizadas de unidade A à unidade H (Azerêdo *et al.*, 2010; Duarte *et al.*, 2022) (Figura 1 B).

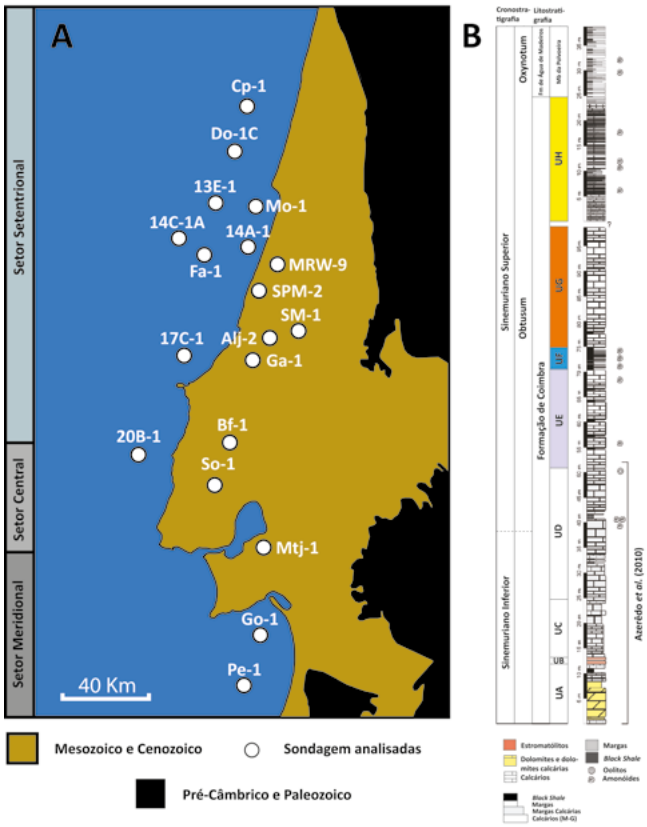


Figura 1. A – Localização geográfica das sondagens analisadas na BL enquadradas na subdivisão proposta por Rocha e Soares (1984) e delimitação da BL com o soco Ibérico (adaptado de Rasmussen et al., 1998). B – Perfil litostratigráfico da Fm de Coimbra em S. Pedro de Moel demarcando as subunidades estratigráficas identificadas em Azerêdo et al. (2010) e Duarte et al. (2022) (adaptado de Duarte et al., 2022).

Figure 1. A – Geographical location of the analyzed well boreholes on the Lusitanian Basin, accommodated on the structural organization of the Lusitanian Basin presented by Rocha and Soares (1984) (adapted from Rasmussen *et al.*, 1998). B – Coimbra Fm lithostratigraphic log in the S. Pedro de Moel outcrop, delineating stratigraphic subunits identified in Azerêdo *et al.* (2010) and Duarte *et al.* (2022) (adapted from Duarte *et al.*, 2022).

3. Metodologia

A reinterpretação da Fm de Coimbra, a partir dos relatórios de sondagem e diagrafias disponibilizados pela Entidade Nacional para o Mercado de Combustíveis - Unidade de Pesquisa e Exploração de Recursos Petrolíferos, envolveu a observação detalhada das características litológicas, e dos padrões de variação de RGT. Foram selecionadas 19 sondagens onshore e offshore de prospeção petrolífera, abrangendo todos os setores bacinais propostos por Rocha e Soares (1984) (Figura1). Os limites da Fm de Coimbra foram definidos: a partir da última ocorrência de fácies evaporíticas (anidrite), em que os valores de RGT se aproximam do limite inferior da técnica que contrastam, muitas vezes, com grande variação nas margas/argilitos nos quais se intercalam; e o término, no instante de crescimento exponencial dos valores de RGT, na transição para as margas e calcários margosos da base da Fm de Água de Madeiros (Figura 2). Posteriormente, analisou-se a variação do padrão do RGT na Fm de Coimbra, nos principais intervalos margosos identificados em Duarte *et al.* (2022), alguns deles ricos em matéria orgânica, bem como na interpretação sequencial da sucessão estratigráfica, à semelhança do preconizado em Sêco *et al.* (2018, 2019).

4. Resultados

Na análise dos dados demonstrou-se que entre as sondagens estudadas, a Fm de Coimbra apresenta valores de RGT que podem variar entre os 4 e os 110 API, com grande variação dos valores médios entre todas as sondagens; nas sucessões carbonatadas, os valores oscilam entre os 5 e os 60 API, e nas sucessões margosas, entre os 20 e os 110 API (Figura 2). Uma vez que os dados das perfurações e respetivos relatórios datam de uma época em que a litostratigrafia da BL não estava devidamente formalizada, são assinalados os primeiros limites litostratigráficos da Fm de Coimbra nas sondagens Cp-1, Go-1, Pe-1, MRW-9, SPM-2, SM-1, So-1 e Mtj-1; observam-se ainda erros nos limites litostratigráficos, na ordem das dezenas de metros, nas sondagens 14C-1A, SM-1 e Ga-1 e Bf-1 (Figura 2). Demonstram-se correlações entre quatro principais intervalos margosos identificados em Duarte *et al.* (2022): o 1º e o 2º intervalo, na base da Fm de Coimbra, e relacionados com as sucessões margosas das unidades A e D ou seus respetivos equivalentes laterias (23-112 API e 31-80 API, respetivamente), que podem ser indistintos ou inexistentes em localização proximal (Alj-2, Ga-1, So-1) ou no limite sul da BL (Mtj-1, Go-1 e Pe-1) (Figura 2). A unidade margosa mais representativa, o 3º intervalo margoso, que corresponde à unidade F no NW da BL, encontra-se distintamente presente em todas as sondagens, sendo o intervalo margoso consistentemente com maior espessura e com os maiores registos de RGT de todas as sondagens (38-100 API) (Figura 2). Próximo do limite com a unidade superior, encontra-se o 4º intervalo margoso (unidade H ou o seu equivalente) entre as sucessões calcárias que caracterizam o topo da Fm de Coimbra, com correlação direta entre todas as sondagens analisadas (24-100 API) (Figura 2) Na região norte da BL, a Fm de Coimbra contacta por descontinuidade com as unidades do Cretácico Inferior, nas sondagens Cp-1 e 14C-1A; e na região sul, o topo da Fm de Coimbra contacta por descontinuidade com as unidades do Jurássico Médio nas sondagens Mtj-1, Go-1 e Pe-1 (Figura 2). Excluindo estas sondagens, e de acordo com a variação de padrão de RGT entre a UG e UH e na porção em falta apresentada em Duarte *et al.* (2022), a Fm de Coimbra apresenta no setor Norte da bacia, em média, uma espessura máxima aparente de 140 metros (ver também a correlação superfície-subsuperfície em Sêco *et al.*, 2018).

5. Discussão

5.1. Agentes de controlo e variabilidade do RGT

Sendo a Fm de Coimbra uma unidade essencialmente carbonatada (dolomítica e calcária), e à semelhança do que se conhece em onshore (*e.g.* Dimuccio *et al.*, 2016; Duarte *et al.*, 2022), confirma-se que existe uma variação dos dados de RGT registados, intrinsecamente influenciados pela contribuição siliciclástica: **a)** variação face à proximidade com o maciço Ibérico, onde se registam valores de RGT mais baixos, e onde por vezes ocorrem grandes picos associados a acarreios sedimentares de origem continental, como se verifica na base da Fm de Coimbra nas sondagens 17C-1 e Mtj-1; **b)** variação face à deposição de sedimentos silto-argilosos e matéria orgânica,

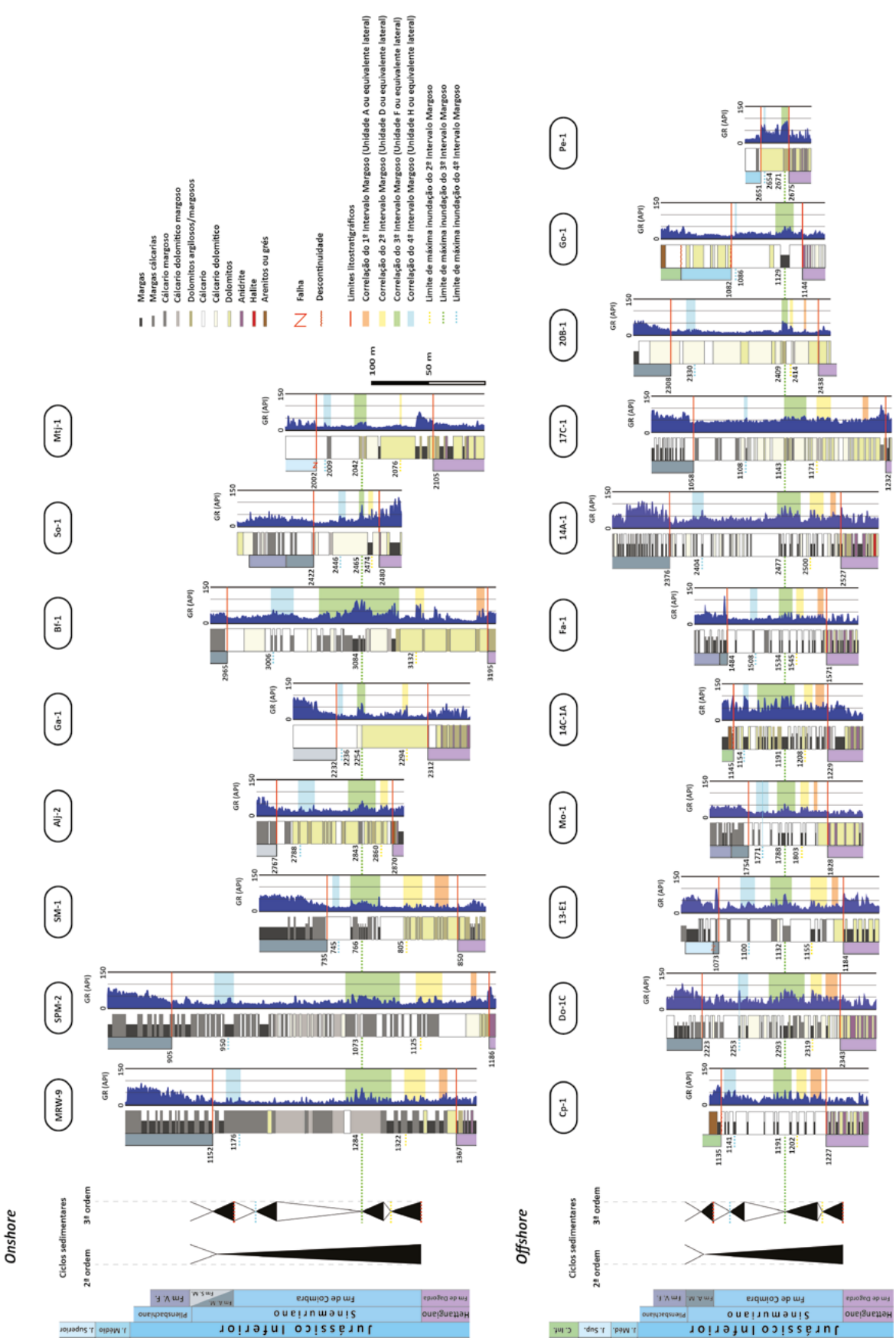


Figura 2. Logs litostratigráficos e diagrafias de RGT da Fm de Coimbra nas 19 sondagens analisadas; identificação dos limites litostratigráficos e dos quatro intervalos margosos principais (unidades A, D, F e H, ou os seus equivalentes laterais de fácies) segundo dados litostratigráficos e da variação de RGT; interpretação sequencial de 2ª e 3ª ordem, onde são indicadas as profundidades em que ocorrem as alterações dos ciclos T-R de 3ª ordem.

Figure 2. Coimbra Fm lithostratigraphic logs and GR diagraphs of 19 analyzed wells; lithostratigraphic limits identification of units A, D, F, and H according to lithostratigraphic data and RGT variation; sequential interpretation of 2 nd and 3 rd order T-R cycles, indicating depth of their alteration.

com maiores registos de RGT em determinados setores da bacia (14A-1, Do-1C, MRW-9 e Bf-1); **c)** variação devido a condições de águas rasas, onde só terá ocorrido sedimentação silto-argilosa, e onde os registos de RGT se encontram concentrados (So-1 e Pe-1). Fatores de incertezas podem estar associados aos equipamentos de medição e planos de leitura (como camadas com maiores inclinações, etc) que podem levar a leituras de radiação gama diluídas.

5.2. Interpretação sequencial

Em sucessões margo-calcárias, a variação decrescente e os valores mais baixos de RGT, estão associados a intervalos regressivos, e os valores mínimos tendem a corresponder a limites de sequência. Por outro lado, a variação crescente de RGT está associada a intervalos margosos, com a possibilidade de acumulação de matéria orgânica, e interpretados como intervalos transgressivos, com os valores mais altos a corresponderem a intervalos de máxima inundação (Sêco *et al.*, 2018). Como referido anteriormente, intercalam-se quatro principais intervalos margosos (incluídos nas unidades A, D, F e H, definidas em Duarte *et al.*, 2022) (Figura 2). Enquadrando estes intervalos, definem-se três ciclos T-R de 3º ordem, inseridos num ciclo transgressivo de 2ª ordem, com a sua expressão máxima no topo da Fm de Água de Madeiros, tal como o definido em Duarte *et al.* (2010, 2022) (Figura 2). No **3º intervalo** margoso (Figura 2), ocorrem as sucessões margosas, geralmente mais espessas, e os maiores registos de RGT em todas as sondagens. Como tal, onde se constituem os intervalos de maior importância na acumulação de matéria orgânica.

5.3. Variabilidade faciológica e ambiente deposicional

Apesar de se demonstrar uma variabilidade faciológica de tendência geral com domínio da fração dolomítica nas porções mais orientais/proximais e da fração calcária nas porções mais ocidentais/distais (Dimuccio *et al.*, 2016; Duarte *et al.*, 2022), facto também demonstrado neste estudo pelo domínio dolomítico da Fm de Coimbra na sondagem Alj-2, e pela inexistência de dolomite no extremo NW da BL (sondagem Cp-1; Figura 2), observam-se várias particularidades que não estão totalmente de acordo com esta visão global paleogeográfica do Sinemuriano da BL. Este facto é demonstrado não só pelas características litológicas - como a existência de fácies dolomíticas muito acima do que seria de esperar tendo em conta a localização geográfica (*e.g.* 14C-1A, 17C-1, 20B-1; Figura 2) - como também pela dificuldade em diferenciar o **1º**, **2º** e **4º intervalo** margoso em algumas regiões da BL (Figs. 1 e 2). Existe um grande contraste entre o bom reconhecimento faciológico da Fm de Coimbra na região de S. Pedro de Moel e do NW da BL no geral, com o que se observa no resto da bacia. No início da instalação de uma plataforma carbonatada, que se mantém e desenvolve durante todo o Jurássico Inferior e Médio (Azerêdo *et al.*, 2003), a batimetria terá sido controlada por altos estr uturais, de natureza halocinética ou tectónica, que terão condicionado o espaço de acomodação local, o que explica a complexa variabilidade de fácies encontrada na Fm de Coimbra (*e.g.* Rasmussen *et al.*, 1998; Alves *et al*., 2002). De modo a se poder ter um melhor entendimento sobre esta questão, será necessário desenvolver novos estudos sobre a Fm de Coimbra noutros locais da BL.

6. Conclusão

Este trabalho vem demonstrar o sucesso da aplicação da espectrometria de raios gama para a reinterpretação de sucessões carbonatadas com componentes margosas e ricas em matéria orgânica, fornecendo novos dados e questões ao estudo, estratigrafia e evolução da Fm de Coimbra e na Bacia Lusitânica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ENMC/UPEP, atual competência da DGEG, pela disponibilidade dos relatórios das sondagens. À FCT, através dos projetos UIDB/04292/2020, UIDP/04292/2020, e LA/P/0069/2020. Á Ana Cristina Azerêdo e Paulo Fernandes pela leitura crítica do manuscrito.

Referências

Alves, T. M., Gawthorpe, R. L., Hunt, D. H., Monteiro, J. H., 2002. Jurassic tectonosedimentary evolution of the northern Lusitanian basin (offshore Portugal). *Marine Petroleum Geology*, **19**: 727-754.

Azerêdo, A. C., Duarte, L. V., Henriques, M. H., Manuppella, G., 2003. Da dinâmica continental no Triásico aos mares do Jurássico Inferior e Médio. *Cadernos da Geología de Portugal, Instituto Geológico e Mineiro*.

Azerêdo, A. C., Silva, R. L., Duarte, L. V., Cabral, M. C., 2010. Subtidal stromatolites from the Sinemurian of the Lusitanian Basin (Portugal). *Facies,* **56**: 211–230.

Bábek, O., Kalvoda, J., Cossey, P., Šimíček, D., Devuyst, F. X., Hargreaves, S., 2013. Facies and petrophysical signature of the Tournaisian/Viséan (Lower Carboniferous) sea-level cycle in carbonate ramp to basinal settings of the Wales-Brabant massif, British Isles. *Sedimentary Geology*, **284**: 197-213.

Correia, G. Duarte, L. V., Pereira, A., Silva, R. L., 2012. Outcrop Spectral Gamma-Ray applications to the Sinemurian-Pliensbachian organic-rich facies of the Lusitanian Basin (Portugal). *Journal of Iberian Geology*, **38** (2): 373-388.

Dimuccio, L. A., Duarte, L. V., Cunha, L., 2016. Definição litostratigráfica da sucessão calcodolomítica do Jurássico Inferior da região de Coimbra-Penela (Bacia Lusitânica, Portugal). *Comunicações Geológicas*, **103**: 1-19.

Duarte, L. V., Soares, A. F., 2002. Litostratigrafia das séries margo-calcárias do Jurássico inferior da Bacia Lusitânica (Portugal). *Comunicações Instituto Geológico e Mineiro*, **89**: 135- 154.

Duarte, L. V., Silva, R. L., Azerêdo, A. C., Comas-Rengifo, M. J., Mendonça Filho, J. G., 2022. Shallow-water carbonates of the Coimbra Formation, Lusitanian Basin (Portugal): Contribution to the integrated stratigraphic analysis of the Sinemurian sedimentary sucessions in the western Iberian Margin. Comptes Rendus. *Géoscience*, **354** (S3): 1-18

Duarte, L. V., Silva, R. L., Oliveira, L. C. V., Comas-Rengifo, M. J., Silva, F., 2010. Organic-rich facies in the Sinemurian and Pliensbachian of the Lusitanian Basin, Portugal: Total Organic Carbon distribution and relation to the transgressive-regressive facies cycles. *Geol. Acta*, **8** (3): 325-340.

Gama, J., Schwark, L., 2022. Lithofacies of early Jurassic successions derived from spectral gamma ray logging in the Mandawa Basin, SE Tanzania. *Arabian Journal of Geosciences*, **15** (16): 1373.

Hiscott, R. N., Wilson, R. C. L., Gradstein, F. M., Pujalte, V., García-Mondéjar, J., Boudreau, R. R., Wishart, H. A., 1990. Comparative stratigraphy and subsidence history of Mesozoic rift basins of the North Atlantic. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, **74** (1): 60–76.

Kullberg, J. C., Rocha, R. B., Soares, A. F., Rey, J., Terrinha, P., Azerêdo, A. C., Callapez, P., Duarte, L. V., Kullberg, M. C., Martins, L., Miranda, R., Alves, C., Mata, J., Madeira, J., Mateus, O., Moreira, M., Nogueira, C. R., 2013. A Bacia Lusitânica: estratigrafia paleogeografia e tectónica. In: Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P. e Kullberg, J. C. (Eds.). Geologia de Portugal, Vol. II. Livraria Escolar Editora: 195-347.

Rasmussen, E. S., Lomholt, S., Andersen, C., Vejbæk, O. V., 1998. Aspects of the structural evolution of the Lusitanian Basin in Portugal and the shelf and slope area offshore Portugal. *Tectonophysics*, **300**: 199-225.

Rocha, R. B., Soares, A. F., 1984. Algumas reflexões sobre a sedimentação jurássica na orla meso- -cenozóica ocidental de Portugal. *Mem. Notícias,* Univ. Coimbra **97**: 133-142.

Sêco, S. L. R., Duarte, L. V., Pereira, A. J. S. C., Silva, R. L., 2018. Field gamma-ray patterns and stratigraphic reinterpretation of offshore well-log data from Lower Jurassic organic-rich units of the Lusitanian Basin (Portugal). *Marine and Petroleum Geology*, **98**: 860-872.

Sêco, S. L., Silva, R. L., Watson, N., Duarte, L. V., Pereira, A. J., Wach, G., 2019. Application of petrophysical methods to estimate total organic carbon in Lower Jurassic source rocks from the offshore Lusitanian Basin (Portugal). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **180**: 1058-1068.

Šimíček, D., Bábek, O., 2015. Spectral gamma-ray logging of the Gres d'Annot, SE France: An outcrop analogue to geophysical facies mapping and well-log correlation of sand-rich turbidite reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, **60**: 1-17.

Wilson, R. C. L., Hiscott, R. N., Willis, M. G., Gradstein, F. M., 1989. The Lusitanian Basin of West 900 Central Portugal: Mesozoic and Tertiary Tectonic, Stratigraphic, and Subsidence History. In: Tankard, A. J., Balkwill, H. (Eds.). Extensional tectonics and stratigraphy of the North Atlantic margins. *AAPG, Memoir*, **46**: 341–361