

# Caracterização mineralógica por DRX de materiais silto-argilosos das formações de Lucula e Chela (pré-sal da Bacia do Baixo Congo, Angola)

## Mineralogical characterization by XRD of silt-clay materials from the Lucula and Chela formations (pre-salt of the Lower Congo Basin, Angola)

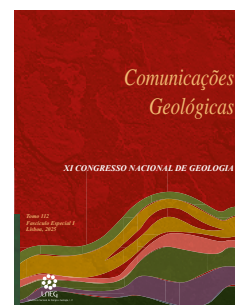
J. Constantino<sup>1\*</sup>, P. A. Dinis<sup>2</sup>, V. Machado<sup>1</sup>, C. Landgraf<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.34637/0vw2-g913>

Recebido em 20/10/2023 / Aceite em 26/01/2024

Publicado online em abril de 2025

© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original  
Original article

**Resumo:** As unidades siiciclásticas do pré-sal na Bacia do Baixo Congo, de idade mesozoica, são pouco conhecidas. Este trabalho está focado na mineralogia, por difração de raios X, obtida com frações finas das formações de Lucula (pré-rift) e Chela (transição para pós-rift) interceptadas em poços profundos (*onshore* e *offshore*) e extraídas em afloramentos. A fração argilosa é geralmente dominada por illite, mas também se encontram quantidades significativas de caulinite, esmectite ou clorite, sobretudo em arenitos. Ambas as unidades foram alimentadas de regiões com características climáticas e orográficas pouco favoráveis à alteração química. Parte da diversidade composicional é justificada por proveniência heterogênea. A abundância de esmectite em amostras enriquecidas em plagioclase sugere a exumação local de rochas com importante componente máfica. Transformações diagenéticas, em profundidade e à superfície, concorrem para o enriquecimento em caulinite a partir da alteração de feldspatos e outros minerais argilosos em depósitos porosos.

**Palavras-chave:** Abertura do Atlântico Sul, Associações de minerais de argila, Proveniência, Meteorização, Evolução diagenética.

**Abstract:** The pre-salt sand-conglomerate units of the Lower Congo Basin, of Mesozoic age, need to be better known. This work presents mineralogical results obtained by X-ray diffraction for fine-grained fractions of Lucula (pre-rift) and Chela (transition to post-rift) formations intercepted in deep wells (*onshore* and *offshore*) and from outcrops. The clay fraction is in general dominated by illite, although kaolinite, smectite and chlorite can also be abundant, in particular in coarse-grained sediments. Both units were sourced from regions where climatic and orographic features did not favor chemical weathering. Part of the observed compositional variability is ascribed to diverse provenance. Smectite abundance in sediments that are also enriched in plagioclase point to local exhumation of rock with significant mafic component. Diagenetic transformations at the surface and during burial are responsible for kaolinite enrichment due to weathering of feldspar and other clay minerals in porous sediments.

**Keywords:** Opening of the South Atlantic, Clay mineral assemblages, Provenance, Weathering, Diagenetic evolution.

### 1. Introdução

Devido à escassez de afloramentos no *onshore* e às profundidades a que se encontra no *offshore*, o pré-sal da Bacia do Baixo Congo é um dos intervalos mais mal conhecidos do enchimento mesozoico da Bacia do Baixo Congo, na margem ocidental de África. Sabe-se que este intervalo integra dois conjuntos detriticos com boas condições de reservatório para armazenamento de hidrocarbonetos, designadamente, as formações de Lucula e Chela (Braccini *et al.*, 1997). Mas desconhecem-se detalhes sobre as condições ambientais associadas à sua deposição, designadamente no que respeita à evolução dos afluxos detriticos, determinados sobretudo pela natureza das áreas de alimentação e condições climáticas coevas, bem como às condições de subsidência e evolução diagenética posterior. No presente trabalho apresentam-se os primeiros resultados composicionais obtidos por Difração de Raios X (DRX) para frações de grão fino (argilosas e silto-argilosas) de unidades maioritariamente detriticas pertencentes às formações de Lucula e Chela.

### 2. Contexto Geológico

A Bacia do Baixo Congo é uma das bacias de tipo rift associadas a sistemas petrolíferos que se desenvolveram ao longo das margens continentais, entre as placas tectónicas Sul Americana e Africana, em associação com a abertura do Atlântico Sul (Lehner e Ruitter, 1977; Konyukhov, 2008; Marcano *et al.* 2013). A fragmentação associada às fases iniciais de abertura do Atlântico Sul foi acompanhada pela deposição de unidades detriticas sobre um substrato ígneo e metamórfico Precâmbrio do Complexo de Mayombe, que também as alimentou (Behar *et al.*, 2021).

O enchimento da Bacia do Baixo Congo pode ser organizado nas fases de pré-rift, sin-rift I, sin-rift II e pós-rift (Brice *et al.*, 1982). Por sua vez, o sin-rift de Brice *et al.* (1982) foi dividido nas fases de “*fault*” e “*sag*” de McHarge (1990). A fase de pré-rift durou desde o Jurássico Superior até à transição para o Cretácico basal enquanto a de sin-rift (I e II) decorre do “Neocomiano” até ao Barremiano-Aptiano (Braccini *et al.*, 1997). As primeiras incursões marinhas registadas à escala da bacia tiveram lugar durante o sin-rift II. O início da fase de pós-rift está marcado pela evolução de deposição em ambiente de água-doce para condições salobras culminando com a deposição de uma espessa sucessão de evaporitos (Braccini *et al.*, 1997; Cole *et al.*, 2000). As unidades salíferas correlativas têm expressão para além dos limites da Bacia do Baixo Congo, encontrando-se presentemente desde a zona

<sup>1</sup> Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Sonangol S. A., Luanda. Angola

<sup>2</sup> Universidade de Coimbra, MARE – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente e ARNET – Rede de Investigação Aquática, Departamento de Ciências da Terra.

<sup>3</sup> Universidade de Coimbra, Departamento de Ciências da Terra, Coimbra. Portugal

\* Corresponding author/Autor correspondente: joao.constantino@sonangol.co.ao / jctino12@gmail.com

sul de Angola até à latitude dos Camarões. As formações de Lucula e Chela são unidades sedimentares siliciclásticas anteriores à sucessão salífera da Bacia do Baixo Congo, aqui designada como Formação de Loeme ou Loeme salífero (Figura 1). Estas unidades apresentam-se como bons reservatórios de hidrocarbonetos em estruturas seladas:

A Formação de Lucula (até 450 m de espessura), com conglomerados, arenitos e lutitos, que se tornam mais abundantes para o topo da unidade, assinala o início do enchimento da Bacia do Baixo Congo. Esta sucessão regista deposição por leques aluviais, passando superiormente a sistemas fluviais, e tem sido atribuída ao Titoniano e *Neocomiano* (Bracken, 1994; Braccini *et al.*, 1997). Os sistemas deposicionais de Lucula têm sido associados às fases tectónicas do pré-rift e início do sin-rift na Bacia do Baixo Congo (Burwood *et al.*, 1990; Cole *et al.*, 2000).

A Formação de Chela (Aptiano) é constituída maioritariamente por arenitos quartzosos brancos a acinzentados, localmente argilosos, de grão muito fino a grosseiro, com intercalações

lutíticas e conglomeráticas, incluindo também níveis carbonatados e evaporíticos. A unidade tem grande continuidade lateral, com espessura máxima de ~ 90 m no *offshore*. As associações de fácies da Formação de Chela apontam para deposição em ambiente costeiro com intervalos sob influências fluviais e lacustres (Bracken, 1994; Braccini *et al.*, 1997). Os estratos superiores da Formação de Chela (5 a 10 m no *onshore*) são compostos por lutitos e carbonatos argilosos com algumas intercalações de anidrite. Este conjunto parece evoluir verticalmente para a unidade salífera de Loeme (Aptiano superior), tendo sido depositado sobre uma superfície aplanada de gênese incerta, mas responsável pela erosão de paleorelevos criados por movimentos verticais durante as fases de *rifting* e geralmente relacionada com a descontinuidade de *break-up* na Bacia do Baixo Congo (Cole *et al.*, 2000; Marcano *et al.*, 2013). A Formação de Chela assinala a transição para a fase de pós-rift (Marcano *et al.*, 2013).

### 3. Materiais e métodos

Foi analisado um conjunto de 25 amostras colhidas em sondagens profundas (até ~ 4500 m), de testemunhos (*core samples*) e *cuttings*. Destas, 12 são atribuídas à Formação de Lucula e 13 à Formação de Chela. Foi ainda possível aceder a afloramentos da Formação de Lucula, de onde se colheram mais 7 amostras. A localização dos pontos de amostragem dos materiais estudados está representada na Figura 2.

Deu-se especial atenção às frações mais finas, que se espera refletirem melhor as condições de meteorização química nas áreas fonte dos sedimentos e posteriores transformações diagenéticas. A mineralogia da fração argilosa (<2 µm) e de frações silto-argilosas (<63 µm de níveis arenosos e <32 µm de lutitos) foi determinada por DRX, recorrendo-se a um equipamento Aeris da Malvern PanAlytical com radiação K-alpha de cobre, sendo os dados de difração fornecidos pelo software HighScore. Depois de pulverizadas a menos de 15 µm, agregados não orientados das frações silto-argilosas foram sujeitos

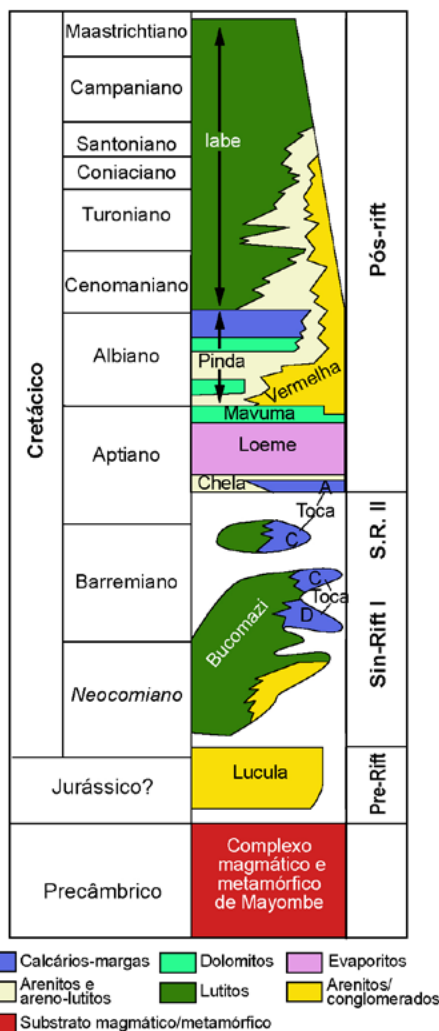


Figura 1. Representação esquemática da sucessão estratigráfica do Jurássico-Cretácico na Bacia do Baixo Congo com indicação das principais unidades litostratigráficas e associação a diferentes fases evolutivas da bacia. Modificado de Da Costa *et al.* (2001).

Figure 1. Schematic representation of the Jurassic-Cretaceous stratigraphic succession in the Lower Congo Basin with indication of the main lithostratigraphic units and association with different evolutionary phases of the basin. Modified from Da Costa *et al.* (2001).

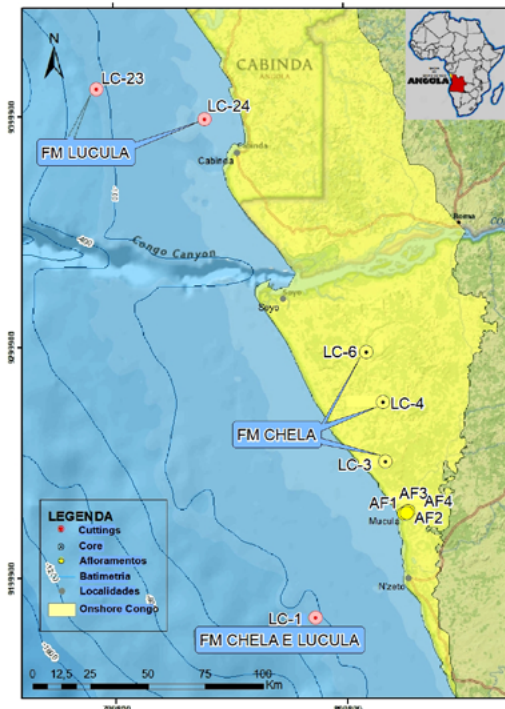


Figura 2. Localização dos poços e afloramentos selecionados para o presente estudo.

Figure 2. Location of wells and exposures selected for the present study.

a RX na gama 2-60°. As estimativas de proporções minerais foram obtidas com o software Profex, recorrendo-se a refinamento de Rietveld (Doebelin e Kleeberg, 2015).

As frações <2 µm foram separadas a partir de suspensões de componentes silto-argilosas, por centrifugação adotando-se tempos determinados pela lei de Stokes, e posteriormente vertidas sobre lâminas de vidro. As lâminas de agregados orientados assim preparadas foram analisadas por DRX após secagem ao ar (gama 2-30°) e depois de se procederem a tratamentos por glicol e aquecimento a 550° C durante 2 horas (para ambos na gama 2-15°). As percentagens de diferentes minerais foram estimadas com base nas áreas de reflexões características, aplicando-se fatores de conversão baseados em padrões (Kahle *et al.*, 2002; Hillier, 2003).

## 4. Resultados e discussão

### 4.1 Formação de Lucula

A fração silto-argilosa das amostras da Formação de Lucula tanto pode estar enriquecida em quartzo (até 82 %) como em filossilicatos (até 67 %), observando-se geralmente quantidades menores de feldspatos (Figura 3). O quartzo é por regra dominante nas frações silto-argilosas das amostras lutíticas, observando-se maior variabilidade composicional nas frações silto-argilosas de depósitos arenosos. As proporções de feldspato potássico são superiores às de plagioclase nos

lutitos, mas os depósitos arenosos menos ricos em quartzo revelam mais plagioclase que feldspato potássico. Observam-se por vezes quantidades significativas de barite (provavelmente derivada de lamias de perfuração) e relativamente baixas de calcite e dolomite.

A fração argilosa das amostras colhidas em sondagens está geralmente enriquecida em ilite (52-92 %, com a exceção dos ~25 % no arenito LC-1.6), seguidos de caulinite (4-37 %), clorite (0-34 %) ou esmectite (0-24 %). Por sua vez, as amostras colhidas em afloramento apresentam um domínio claro de caulinite (63-96 %), seguidas de ilite (2-19 %) ou esmectite (0-35 %). As ilites da Formação de Lucula revelam valores baixos de I(002)/I(001) (relação de intensidade das reflexões de 5 Å e 10 Å maioritariamente inferiores a 0,26). Não se verifica qualquer tendência de variação na largura do pico de 10 Å em função da profundidade das amostras na coluna sedimentar.

Dadas as diferenças nas associações de minerais argilosos das amostras colhidas em afloramento e em sondagem, é de supor que estas estejam fortemente condicionadas por alterações diagenéticas. Ainda que o número de amostras seja reduzido, verifica-se enriquecimento em ilite com a profundidade. Por outro lado, os teores particularmente elevados de caulinite nas amostras de afloramento devem resultar de alteração meteórica associada a processos de lixiviação pós-deposicional (Ketzer *et al.*, 2003). O fato dos teores de quartzo nas amostras colhidas em furos de sondagem tenderem a aumentar com a profundidade também pode resultar de processos diagenéticos relacionados com a alteração química de feldspatos.

Apesar das evidências de transformações diagenéticas, o domínio de ilite ou ilite+clorite (a caulinite em rochas enriquecidas neste mineral será diagenética) e a baixa relação I(002)/I(001), apontando para enriquecimento em Mg na posição octaédrica das ilites, característico de grãos detríticos (Gingele, 1996), sugerem que as condições climáticas/orográficas associadas à deposição da Formação de Lucula eram pouco favoráveis à alteração química.

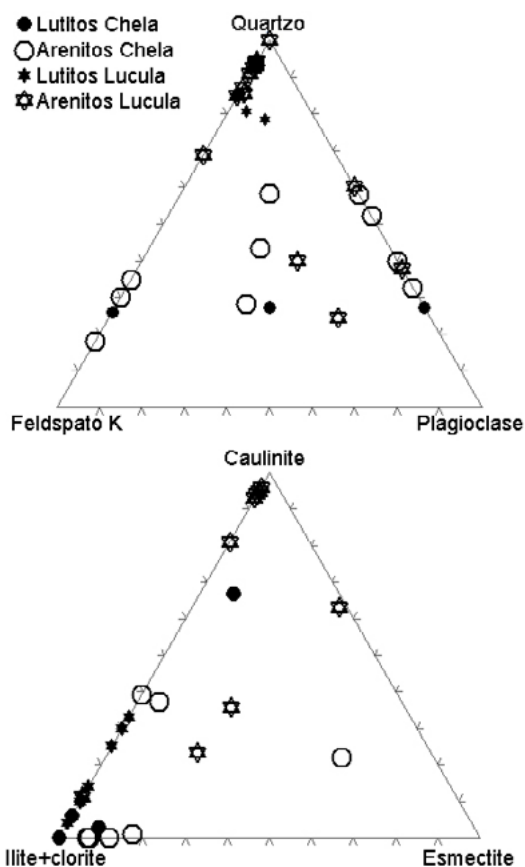


Figura 3. Mineralogia da fração silto-argilosa (topo) e argilosa (base) obtida para amostras das formações de Lucula e Chela da Bacia do Baixo Congo.

Figure 3. Figure 3. Mineralogy of the silt-clay fraction (top) and clay fraction (base) obtained for samples from the Lucula and Chela formations of the Lower Congo Basin.

### 4.2 Formação de Chela

Na Formação de Chela verifica-se geralmente um claro predomínio de filossilicatos (~ 41-89 %), seguidos de feldspatos (7-36 %; até 36 % de feldspato e 31 % de plagioclase) ou quartzo (3-18 %). A relação entre as proporções de feldspato potássico e plagioclase é muito variável. Foram ainda observadas quantidades significativas de sulfatos (gesso, jarosite e barite) e, ocasionalmente, carbonatos (calcite e dolomite).

Na fração argilosa verifica-se geralmente um domínio de ilite, que chega a ser exclusiva em níveis lutíticos. Todavia, a caulinite (0-67 %), esmectite (0-56 %) e clorite (0-40 %) também foram identificadas, sendo ocasionalmente abundantes em níveis mais grosseiros. À semelhança da Formação de Lucula, as ilites apresentam valores baixos de I(002)/I(001) e não se identificam padrões verticais de variação na largura da reflexão de 10 Å.

A presença de unidades evaporíticas na Formação de Chela, testemunhada também pela frequência de alguns sulfatos e dolomite nas amostras estudadas, e a paleolatidade assumida para a Bacia do Baixo Congo durante o Cretácico Inferior (p. ex., Séranne e Anka, 2005) excluem a possibilidade de deposição sob condições climáticas favoráveis a intensa alteração química. Dada a grande diversidade composicional nas frações silto-argilosas e argilosas, as áreas de alimentação da unidade deviam ser geologicamente heterogêneas. A presença de esmectite em depósitos com mais plagioclase que feldspato potássico é reveladora da presença de rochas básicas, mas unidades ígneas ou metasedimentares com maior componente félsica também terão de estar presentes no substrato Precâmbrio para se terem as quantidades observadas de ilite+clorite na fração argilosa e feldspato potássico na fração silto-argilosa.

Tendo em consideração o exposto acima para as condições de meteorização coevas da Formação de Chela, a ocasional abundância de caulinite, em unidades porosas (da LC-1) ou localizadas em posições mais distais da margem da bacia em articulação com níveis dolomíticos (LC-6.2), deve estar relacionada com alteração pós-deposicional. Assume-se um processo genético semelhante ao reportado para a geração de caulinite por alteração diagenética de feldspatos em arenitos fluvio-deltaicos (Ketzer *et al.*, 2003) e a partir de outros minerais argilosos nas proximidades de depósitos de tipo *playa* (Waldman e Gaupp, 2016).

## 5. Conclusões

Os dados composicionais obtidos com as frações finas das formações de Lucula e Chela permitem desvendar algumas condições ambientais associadas à sua deposição e posterior evolução diagenética. As características mineralógicas (frequente domínio de ilite ou ilite mais clorite, sobretudo em depósitos lutíticos) são compatíveis com deposição sob condições climáticas e orográficas pouco favoráveis à meteorização química. Todavia, algumas amostras revelam quantidades significativas de caulinite ou esmectite. A abundância de esmectite em amostras que também comportam mais plagioclase do que feldspato potássico sugere a exumação local de unidades com significativa componente máfica. Alterações diagenéticas serão responsáveis pelo ocasional enriquecimento em caulinite (a par de quartzo) devido à alteração química de feldspatos e outros minerais de argila em estratos porosos.

## Agradecimentos

Os nossos agradecimentos vão para Lumen Sebastião, da Agência Nacional de Petróleo Gás e Biocombustíveis (ANPG, Luanda), pelo apoio nas amostragens de sondagens, e Anselmo de Mendonça Sicato, pelo apoio nos trabalhos de campo.

## Referências

- Behar, F., Delhaye-Prat, V., & Garel, S. (2021). Detrital input quantification in lacustrine petroleum systems: An example of the pre-salt source rocks from the Lower Congo Basin (Congo). *The Depositional Record*, 7: 147-171.
- Braccini, E., C. N., Denison, J. R., Scheevel, P., Jeronimo, P., Orsolin, V. Barletta, 1997. A revised chrono-lithostratigraphic framework for the pre-salt (Lower Cretaceous) in Cabinda, Angola. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine*, 21, 125-151.
- Bracken, B. R., 1994. Syn-rift lacustrine beach and deltaic sandstone reservoirs—pre-salt (Lower Cretaceous) of Cabinda, Angola, west Africa. In A.J. Lomando, B.C. Schreiber, P.M. Harris (eds.), *Lacustrine reservoirs and depositional systems. SEPM Core Workshop*, 19:173-200.
- Brice, S.E., Cochran, M.D., Pardo, Georges, Edwards, A.D., 1982. Tectonics and sedimentation of the South Atlantic rift sequence, Cabinda, Angola, in Watkins, J.S., and Drake, C.L., eds., *Studies in continental margin geology. American Association of Petroleum Geologists*, 34:5-18.
- Burwood, R., P. J. Cornet, L. Jacobs, J. Paulet, 1990. Organofacies variation control on hydrocarbon generation: a Lower Congo coastal basin (Angola) case history. *Organic Geochemistry*, 16:325-338.
- Cole, G. A., Requejo, A. G., Ormerod, D., Yu, Z., Clifford, A., 2000. Petroleum Geochemical Assessment of the Lower Congo Basin. *AAPG Memoir*, 73:325-339.
- Da Costa, J. L., Schirmer, T. W., Laws, B. R., 2001. Lower Congo Basin, deep-water exploration province, offshore west Africa. *American Association of Petroleum Geologists*, 74:517-530.
- Doebelin, N., Kleeberg, R., 2015. Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN. *Journal of Applied Crystallography*, 48:1573-1580.
- Gingele, F. X., 1996. Holocene climatic optimum in Southwest Africa—evidence from the marine clay mineral record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 122:77-87.
- Hillier, S., Velde, B., 1992. Chlorite interstratified with a 7 Å mineral: an example from offshore Norway and possible implications for the interpretation of the composition of diagenetic chlorites. *Clay Minerals*, 27:475-486.
- Kahle, M., Kleber, M., Jahn, R., 2002. Review of XRD-based quantitative analyses of clay minerals in soils: the suitability of mineral intensity factors. *Geoderma*, 109:191-205.
- Ketzer, J.M., Morad, S., Amorosi, A., 1999. Predictive diagenetic clay-mineral distribution in siliciclastic rocks within a sequence stratigraphic framework. In: Worden, R. and Morad, S. (Eds.) *Clay mineral cements in sandstones*, Int. Assoc. Sedimentol. Sp. Publ., 34:43-61.
- Konyukhov, A.I., 2008. Pericontinental petroliferous basins of the South Atlantic Ocean. *Lithology and Mineral Resources*, 43:203-219.
- Lehner, P., De Ritter, P.A.C., 1977. Structural history of Atlantic margin of Africa. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 61 (7), 961-981.
- McHargue, T. R., 1990. Stratigraphic development of proto South Atlantic rifting in Cabinda, Angola—A petroliferous lake basin, in Katz, B.J., ed., *Lacustrine basin exploration case studies and modern analogs. American Association of Petroleum Geologists*, 50: 307-326.
- Marcano, G., Anka, Z., di Primio, R., 2013. Major controlling factors on hydrocarbon generation and leakage in South Atlantic conjugate margins: A comparative study of Colorado, Orange, Campos and Lower Congo basins. *Tectonophysics*, 604:172-190.
- Séranne, M., Anka, Z., 2005. South Atlantic continental margins of Africa: a comparison of the tectonic vs climate interplay on the evolution of equatorial west Africa and SW Africa margins. *Journal of African Earth Sciences*, 43:283-300.
- Waldmann, S., Gaupp, R., 2016. Grain-rimming kaolinite in Permian Rotliegend reservoir rocks. *Sedimentary Geology*, 335:17-33.