

Análise de proveniência por composição detrítica e sua importância na exploração de hidrocarbonetos

PROVENANCE ANALYSIS BY DETRITAL COMPOSITION AND ITS IMPORTANCE ON HYDROCARBON EXPLORATION

ANDREAS PAULI DE CASTRO¹, CARLOS CONFORTI FERREIRA GUEDES²

1 - MESTRE EM GEOLOGIA EXPLORATÓRIA, PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, CURITIBA, PR, BRASIL.

2 - PROFESSOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, CURITIBA, PR, BRASIL

E-MAIL: ANDREASGEOLOGIA@GMAIL.COM, CARLOS.GUEDES@UFPR.BR

Abstract: Introduction. The sedimentary provenance analysis encompasses the restoration of existing links between the sedimentary rock and the respective sediment source areas.

Objective and Methodology. The detrital sedimentary composition is the fundamental unit. However, the detrital composition does not reflect just the composition of the rocks of the source areas, but also the overlapping of several agents and processes, interdependent, modifiers of the signature of provenances, acting from the formation and weathering of the source rock to diagenetic processes during the burial. **Results.** By didactic criteria, these factors and agents can be summarized in: tectonics and sedimentary recycling, nature and composition of source areas, climate, relief, sedimentary transport and diagenesis. **Conclusion.** It should not be assumed that the detrital composition solely reflects the composition of the source rock, but it is the product of this complex set of interdependent factors. Provenance analysis is a very useful tool in hydrocarbon exploration, especially in terms of predictive characterization of the petrophysical qualities of reservoirs.

Resumo: Introdução. A análise de proveniência sedimentar abrange a restauração dos elos existentes entre a rocha sedimentar e suas respectivas áreas fonte de sedimento. **Objetivo e Metodologia.** A unidade fundamental é a composição sedimentar detrítica. Entretanto, a composição detrítica não é reflexo unicamente da composição das rochas das áreas fontes, mas também da sobreposição de diversos agentes e processos, interdependentes, modificadores da assinatura de proveniências, atuantes desde a formação e o intemperismo da rocha fonte até processos diagenéticos durante o soterramento. **Resultados.** Por critérios didáticos, estes fatores e agentes podem ser sumariados em: tectônica e reciclagem sedimentar, natureza e composição das áreas-fonte, clima, relevo, transporte sedimentar e diagênese. **Conclusão.** Não se deve pressupor que a composição detrítica reflita, unicamente, composição da rocha fonte, mas ela é o produto desse conjunto complexo de fatores interdependentes. A análise de proveniência constitui uma ferramenta muito útil na exploração de hidrocarbonetos, principalmente em termos de caracterização preditiva das qualidades petrofísicas de reservatórios.

Introdução

O estudo de proveniência sedimentar compreende, em síntese, a reconstrução das relações existentes entre o depósito/rocha sedimentar e suas respectivas áreas fonte, o que abrange os mecanismos modificadores da composição e textura dos sedimentos. Para a reconstituição destas relações, os sedimentólogos, frequentemente, utilizam o uso integrado de dados mineralógicos e geoquímicos, uma abordagem potencialmente confiável para investigar a variabilidade da composição sedimentar (Garzanti et al., 2010) e suas relações com o contexto tectônico das áreas fonte de sedimento (Bathia, 1983, Dickinson et al., 1983, Roser & Korsch, 1986, 1988, Garzanti, 2016). A abordagem integrada de

Citation/Citação: Castro, A. P. de, & Guedes, C. C. F. (2023). Análise de proveniência por composição detrítica e sua importância na exploração de hidrocarbonetos. *Terræ Didática*, 19(Publ. Contínua), 1-19, e023005. doi: 10.20396/td.v19i00.8671519.



Artigo submetido ao sistema de similaridade

Keywords: Source area, Provenance signature, Diagenesis, Reservoir quality.

Palavras-chave: Área fonte, Assinatura de proveniência, Diagênese, Qualidade de reservatório.


Manuscript/Manuscrito:

Received/Recebido: 24/11/2022

Revised/Corrigido: 28/12/2022

Accepted/Aceito: 03/01/2023

Editor responsável: Celso Dal Ré Carneiro 

Revisão de idioma (Inglês): Hernani Aquini Fernandes Chaves 



proveniência sedimentar também auxilia elucidar aspectos climáticos (e.g. Suttner et al., 1981, Nesbitt & Young, 1982, 1984.), fisiográficos (e.g. Petti-john et al., 1987, Haughton et al., 1991, Johnsson, 1993) e o sistema de rotas sedimentares (e.g. Allen, 2008, 2017, Caracciolo et al., 2020), que abrange o tempo de trânsito e as trajetórias percorridas por cada partícula sedimentar desde a erosão da área fonte até sua deposição (Allen, 2008).

No entanto, a reconstituição da composição da rocha mãe está longe de ser simples, pois envolve um conjunto complexo de fatores interdependentes responsáveis pela modificação da assinatura de proveniência durante o intemperismo da área fonte, transporte nos sistemas distributários e processos

pós-deposicionais durante o soterramento (Johnson, 1993, Allen, 2008, 2017). Além disso, ao contrário das paragêneses ígneas ou metamórficas, as assembleias detríticas não respeitam regras de fase, o que impossibilita sua determinação a partir da distribuição dos elementos entre um conjunto fixo de minerais e regras predefinidas, o que dificulta estabelecer, de forma confiável, padrões de modos detríticos correspondentes a cada cenário geológico.

A análise de proveniência sedimentar é rotineiramente utilizada em análise de bacias e, principalmente, na caracterização de reservatórios (Remus et al., 2008, Zaid, 2013, Tobin & Schwarzer, 2014). Isto ocorre devido ao controle dos processos diagenéticos que promovem a redução, geração e redistribuição da porosidade e modificações na permeabilidade, determinantes da qualidade permoporosa de um reservatório, pela composição detrítica, esta última definida, entre outros fatores, pela proveniência sedimentar (e.g. Nagtegaal, 1978, Zuffa, 1985, Bloch, 1991, 1994, Wilson, 1994, Morad et al., 2000, 2010, Dias Lima & De Ros, 2002, Caracciolo et al., 2014). Assim, o estudo da composição de reservatórios terrígenos e sua relação com a proveniência provou ser útil na exploração de hidrocarbonetos (Dickinson & Suczek, 1979, Haughton et al., 1991, De Ros, 1996, Tobin & Schwarzer, 2014).

Apesar do grande interesse nos estudos de proveniência com propósito acadêmico ou exploratório, normalmente, a proveniência sedimentar é abordada de forma secundária e superficial nas disciplinas de sedimentologia e petrografia devido sua complexidade, pois demandaria muito tempo para a compreensão das diversas variáveis atuantes e suas interações. Portanto, este trabalho propõe fornecer uma síntese, em uma perspectiva integrada, da proveniência sedimentar e dos agentes e processos responsáveis na determinação da assinatura composicional detrítica, assim como a sua importância na exploração petrolífera, especialmente no estudo de reservatórios.

Breve histórico dos estudos de proveniência sedimentar

O estudo de proveniência sedimentar é documentado desde o século XIX (e.g. De Filippi, 1839, Retgers, 1895 apud Caracciolo, 2020), estes primeiros trabalhos tiveram o objetivo de servir a exploração mineral e desvendar as possíveis rochas fonte dos sedimentos (Weltje & Von Eynatten, 2004).

No entanto, só na primeira metade do século XX o estudo de proveniência se consolidou, quando surgiram os principais fundamentos da análise de proveniência, que buscaram compreender a proveniência em duas abordagens, a quantitativa e a qualitativa (Pettijohn et al., 1972, Johnsson, 1993)

Por intermédio dos diversos trabalhos de Krynine e Pettijohn durante as décadas de 1940 e 1950 (e.g. Krynine, 1948, 1956, Pettijohn, 1954, 1957), foram esboçados os primeiros esquemas das atuais classificações mundialmente utilizadas de arenitos. Os modelos reconheceram o controle tectônico na geração e modificação do sedimento (Weltje & Von Eynatten, 2004). Porém, apenas com o surgimento do paradigma da Tectônica de Placas e a integração com os processos modificadores da composição do sedimento, desenvolveu-se a abordagem utilizada até os dias atuais (Garzanti & Andò, 2007), que examina a interdependência da Tectônica com os diversos mecanismos modificadores na composição das suítes areníticas.

Nos estudos de proveniência sedimentar, aliada à configuração tectônica, destacam-se duas ferramentas indicadores de proveniência: o estudo de modos detríticos (e.g. Dickinson & Suczek, 1979, Dickinson & Valloni, 1980, Dickinson et al., 1983, Ingersoll et al., 1984, Dickinson, 1970, 1980, 1985, 1988, Ingersoll, 1990, Garzanti et al., 2003, Garzanti et al., 2019); e a geoquímica de sedimento/rocha sedimentar (e.g. Nesbitt & Young, 1982, Bhatia, 1983, McLennan, 1983a, 1983b, Bhatia & Crook, 1986, Roser & Korsch, 1986, 1988, Harnois, 1988, Taylor & McLennan, 1995, Armstrong-Altrin et al., 2005, 2015). As técnicas, quando aplicadas em conjunto, têm grande potencial na investigação da variabilidade da composição de sedimentos (Garzanti et al., 2012) e aplicabilidade na exploração de hidrocarbonetos (Smyth et al., 2014).

Para Weltje & Von Eynatten (2004) e Garzanti (2016), o registro sedimentar fornece apenas uma imagem distorcida da real geologia dos terrenos de origem, pois os sedimentos passam por uma história complexa, na qual atuam uma variedade de agentes modificadores, desde sua origem até sua deposição (*source-to-sink*). Logo, deve-se deixar de lado a ilusão que a composição mineralógica e química do material terrígeno seja controlada estritamente pela composição mineral e ambiente tectônico da área fonte, mas por um complexo conjunto de fatores e processos interdependentes (Johnsson, 1993, Cox & Lowe, 1995). Reconhecê-los permite identificar as modificações impostas

ao sedimento e reconhecer a composição mais fidedigna da rocha mãe.

Fatores controladores da composição do sedimento

A análise de proveniência sedimentar consiste na avaliação da assinatura composicional dos sedimentos. Logo, é imprescindível compreender de que forma os agentes alogênicos (externos) e autogênicos controlam o sinal de proveniência (Deffontaines & Chorowicz, 1991, Caracciolo, 2020), e que os fatores não são independentes, mas inter-relacionados compondo um sistema único (Fig. 1). Portanto, os fatores devem ser compreendidos como um todo (Johnsson, 1993, Trimble, 1995, Jones, 2000) para uma interpretação precisa de proveniência.

Este conjunto complexo de elementos e processos que controlam a composição do sedimento, desde a gênese e erosão da rocha fonte de sedimento até os processos pós-deposicionais abrange: a composição da área fonte, modificações impostas pelo intemperismo físico e químico, erosão, seleção hidrodinâmica, geração de minerais autigênicos, processos diagenéticos e a reciclagem sedimentar a partir de rochas sedimentares/metassedimentares preexistentes (Fig. 1). Estes elementos e processos são controlados pela configuração tectônica, ambiente deposicional, paleofisiografia, as rotas de preenchimento e o tempo de residência na zona de transição (*Sediment-routing systems*, Allen, 2008),

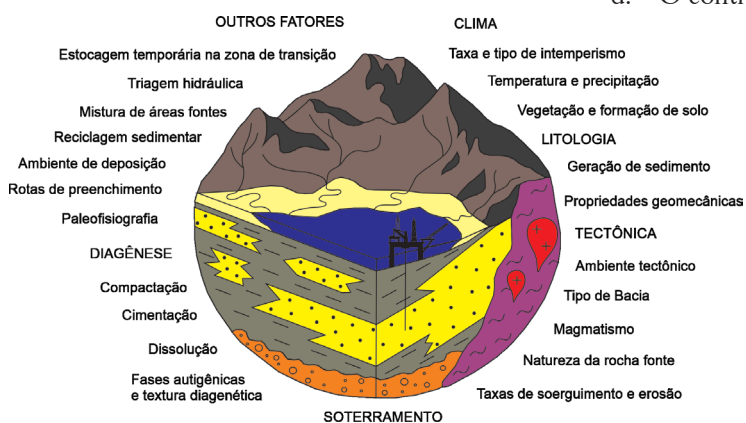


Figura 1. Representação da interdependência dos fatores alogênicos e autigênicos atuantes no controle da assinatura de proveniência sedimentar, desde a composição das rochas que compõem as áreas fonte, alterações na composição e textura do sedimento durante sua permanência no sistema distributário ou em estocagem temporária até processos atuantes após sua deposição definitiva, como o soterramento e a diagênese. Modificado de Caracciolo (2020)

paleoclima, natureza dos sistemas de transporte, deposição e soterramento (Blatt, 1967, Basu, 1976, 1985, Johnsson, 1993, Nesbitt et al., 1997, Allen, 2008, 2017, Garzanti et al., 2010, 2014, 2015b, 2018, Caracciolo et al., 2016, Caracciolo, 2020).

Neste tópico serão aprofundados os principais agentes modificadores da composição do sedimento e suas interações, com destaque no seu impacto na análise de proveniência sedimentar.

Tectônica e reciclagem sedimentar

A Tectônica, que tem sido apontada como principal controle na composição dos sedimentos (Pettijohn et al., 1972, Blatt et al., 1980, Dickinson, 1988), é reconhecida por condicionar amplamente todos os demais fatores (Dickinson, 1985, Johnsson, 1993), como:

- A natureza das rochas fonte de sedimento (Crook, 1974, Schwab, 1975, Dickinson & Suczek, 1979, Dickinson, 1985, Johnsson, 1993, Cullers, 1995).
- A taxa de soerguimento e erosão do terreno (Allen et al., 2013, 2017, Riebe et al., 2015).
- O tempo de exposição dos sedimentos aos agentes meteóricos, o relevo e a declividade do terreno, bem como o sistema deposicional e as principais rotas de sedimentação (Dickinson, 1988, Allen, 2008, Marconato, 2010, Garzanti et al., 2014, Caracciolo, 2020).
- O controle da taxa de transferência e permanência do sedimento em ambientes de armazenamento temporário e a evolução de bacias sedimentares (Bhatia & Crook, 1986, Roser & Korsch, 1986, Caracciolo, 2020).
- As condições climáticas que interferem na taxa de intemperismo químico e físico (Johnsson, 1993, Nesbitt & Markovics, 1997).

f. Nos processos pós-deposicionais como a taxa de soterramento, condições de pressão e temperatura e entrada de fluidos, os quais impactam na evolução diagenética (Dickinson, 1970, 1985, Blatt, 1985, Bhatia & Crook, 1986, Johnsson, 1993, Garzanti et al., 2018b).

Além de condicionar os demais

agentes modificadores, a tectônica também é responsável por reconduzir o sedimento a um novo ciclo deposicional, segundo Blatt & Jones (1975) e Garrels (1986 apud Johnsson 1993), 80% de todo material terrígeno global são reciclados. Ou seja, grande parte do sedimento disponível é resultado de inúmeros ciclos de exumação, erosão, transporte, deposição e soterramento (Blatt, 1967). Em cada ciclo sedimentar, o material adquire maior maturidade composicional e textural, se torna mais esférico, arredondado, minerais instáveis se tornam mais escassos ou inexistentes, dentro do espectro de minerais pesados ocorre a concentração relativa dos minerais ultraestáveis (e.g. zircão, rutilo e turmalina), e normalmente constituem arenitos quartzosos (Johnsson, 1993, Bernet et al., 2007, Garzanti et al., 2019).

Pettijohn (1957, 1963), Folk (1968 apud Folk 1980), Hunter (1967) e Blatt (1967) geraram grandes avanços no conhecimento da reciclagem do sedimento e do reconhecimento destes processos na determinação de suítes areníticas. Para Cox & Lowe (1995) e Garzanti et al. (2016), é desafiador avaliar a abundância de detritos do primeiro ciclo e policíclicos. Porém, há mecanismos para auxiliar na distinção como: - Altas razões de índices de intemperismo químico (CIA/WIP; *Chemical Index of Alteration / Weathering index of Parker*), que quantifica o grau de esgotamento dos componentes móveis em relação aos imóveis durante o intemperismo; - abundância e a coexistência de minerais pesados com diferentes susceptibilidades químicas aos processos digenéticos; - elevado índice ZTR (zircão + rutilo + turmalina) em relação à assembleia de minerais pesados; - razões de Zr/Sc em geoquímica de rocha total; - fragmentos líticos na fração detrítica; - feições texturais; - e o reconhecimento de sobrecrecimento em grãos de quartzo (Hubert, 1962, McLennan et al., 1993, Johnsson, 1993, Bernet et al., 2007, Garzanti et al., 2013b, 2014, Limonta et al., 2015)

Natureza litológica da área fonte

A composição mineralógica é uma característica intrínseca de cada rocha fonte, e determinará a fertilidade de cada mineral para os sistemas sedimentares (Flowerdew et al., 2020, Chew et al., 2020). O conceito de fertilidade mineral pode ser definido como a proporção dos minerais gerados pela erosão de uma determinada rocha fonte (Moecher & Samson, 2006). A determinação da fertilidade mineral das rochas fonte de sedimento pode ser abordada de

duas maneiras: a partir de estudos de sistemas sedimentares no registro geológico, entretanto é limitada pois implica em diversas suposições (Chew et al., 2020); ou através de sedimentos recentes onde a informação sobre a fertilidade mineral das áreas fontes e mecanismos de triagem hidráulica estão disponíveis (e.g. Garzanti et al., 2015b, Malusà et al., 2016). A fertilidade mineral, devidamente reconhecida, permite interpretações geológicas mais assertivas (Malusà et al., 2016).

O viés gerado pela fertilidade mineral tem severo impacto nas fases minerais acessórias (Malusà et al., 2016), principalmente quando se trata da análise de um mineral específico (*single grain analysis*), como a análise geocronológica em zircão ou apatita (Dickinson, 2008, Garzanti, 2016, Chew et al., 2020). Por exemplo, a ocorrência média de zircão nos sedimentos é de 200 ppm na crosta continental superior (Taylor & McLennan, 1995), ou seja, 2 grãos em cada 10 mil. Isso significa que, ao se restringir a análise das propriedades do zircão, estamos negligenciando 99,98% do restante da amostra (Garzanti, 2016). Assim, inferências obtidas a partir de um único mineral não devem ser extrapoladas para todo o sedimento. Os perigos gerados pelos efeitos da fertilidade mineral na análise restrita aos minerais acessórios, especialmente a partir de um único mineral, salientado por Garzanti (2016) são sumariados no caso geológico, teórico, representado na Figura 2, baseado em fundamentos apresentados em estudo de fertilidade mineral realizados por Garzanti & Andò (2007) e Malusà et al. (2016).

Também devemos recordar que a composição e a textura (granulometria) de uma área fonte é são amplamente determinadas pela configuração tectônica regional (Dickinson & Valloni, 1980, Dickinson, 1985, 1988). Portanto, em condições climáticas e tectônicas compatíveis, diferentes rochas produzem diferentes proporções de cascalho, areia, silte, argila (índice de geração de areia), bem como diferentes proporções de minerais (fertilidade mineral) e fragmentos líticos (Palomares & Arribas, 1993, Le Pera et al., 2001, Arribas & Tortosa, 2003, Caracciolo et al., 2012a, Weltje et al., 2018, Garzanti, 2019).

Cada litotipo tem respostas distintas à atuação do clima, tectônica, erosão e processos de transporte sedimentar (Harel et al., 2016), isso ocorre de acordo com as propriedades reológicas da rocha, suas resistências a fragmentação mecânica e alterações químicas (Johnsson et al., 1991). Rochas de naturezas distintas como rochas ígneas (vulcânicas

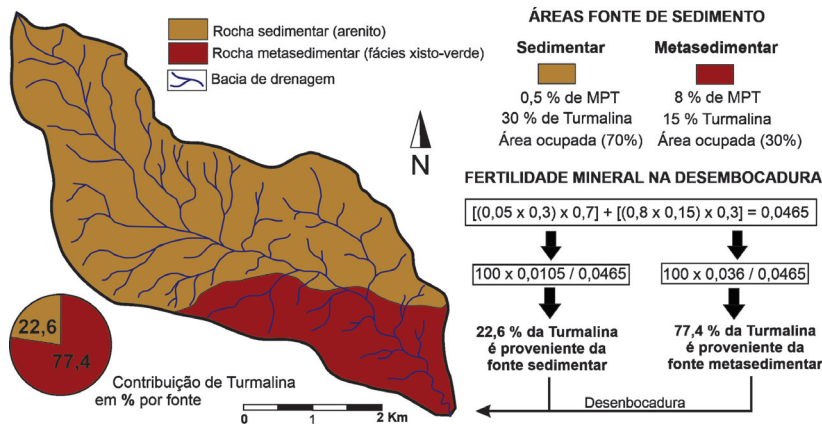


Figura 2. Caso geológico teórico de uma bacia de drenagem com duas áreas fonte de sedimento. A área fonte sedimentar abrange 70% da área da bacia e possui elevada fertilidade de turmalina (30%) dentre minerais pesados translúcidos (MPT) e a área fonte metassedimentar (fácies xisto-verde), no qual ocupa apenas 30% da área, tem 5% de turmalina dentre os MPT. Entretanto, se ponderar a fertilidade dos minerais pesados translúcidos para todo o sedimento percebe-se que a fertilidade mineral da turmalina é mais elevada para a rocha fonte metassedimentar em relação a fonte sedimentar. Negligenciar a fertilidade dos MPT para todo o sedimento pode resultar a falsa impressão do maior aporte sedimentar de terrenos metassedimentares quando analisadas restritamente sob perspectiva de um único mineral pesado. O caso geológico também permite reconhecer que a fonte sedimentar mesmo ocupando maior parte da bacia de drenagem, devido sua baixa fertilidade mineral, contribui com menor percentual de fragmentos de turmalina no sistema sedimentar. Para contornar os efeitos da segregação mineral e simplificar o modelo, a ilustração se limita a uma única faixa granulométrica para todo o sedimento e a análise restrito a um tipo mineral, a turmalina, modelo baseado em Garzanti & Andò (2007)

e plutônicas), metamórficas (baixo e alto grau) e sedimentares (terrígenas e químicas) possuem propriedades reológicas próprias definidas principalmente pela assembleia mineral e granulação (Caracciolo et al., 2012a, von Eynatten et al., 2012, 2016, Weltje et al., 2018).

O controle da maturidade mineralógica exclusivamente pela estabilidade físico-química intrínseca a cada mineral é questionado por Garzanti et al. (2017). O autor afirma que a durabilidade do mineral terrígeno não depende unicamente da sua natureza, mas também das condições físico-químicas do sistema de rotas sedimentares no qual está inserido. Ou seja, há uma dependência das condições ambientais nos quais o mineral/fragmento lítico está inserido durante a erosão, transporte e diagênese, e sua durabilidade (Garzanti et al., 2010). Diversos estudos de caso (e.g. Potter, 1978, Caracciolo et al., 2012b, Garzanti, 2013a, 2015a) analisam como as variações das condições físico-químicas do meio podem alterar a maturidade mineralógica.

Assim, pode se dizer que a interação das características litológicas de cada área fonte com as condições físico-químicas de um sistema de rotas

sedimentares (Allen, 2008) condicionará: a taxa do aporte sedimentar (von Eynatten et al., 2012, 2016, Weltje et al., 2018), a resistência dos fragmentos detríticos aos processos modificadores durante a erosão, transporte e diagênese (Basu, 1976, Johnsson, 1993, Allen et al., 2013, 2017, Harel et al., 2016, Garzanti et al., 2018a) e a composição modal das suítes areníticas.

Condições climáticas e paleotemperismo

O clima, juntamente com a tectônica, governa as taxas de erosão e transferência de sedimento para as bacias. A transferência ocorre de forma periódica, e o sedimento permanece a maior parte do tempo em zonas de estocagem temporária, até que alcance a bacia de deposição definitiva (Basu, 1985,

Johnsson, 1993, Allen, 2008). No percurso, o clima tem papel fundamental na modificação da composição do sedimento; a importância é tão grande que suítes areníticas derivadas de uma mesma área fonte, submetidas a climas distintos, geram areias com composições distintas (Suttner et al., 1981). Pela análise de areias holocênicas de uma mesma área fonte de composição plutônica e metamórfica de baixo e alto grau, Suttner et al. (1981) constatou que estes sedimentos tinham distintas proporções modais de quartzo, feldspatos e fragmentos líticos, (QFL) plotados no gráfico ternário (Fig. 3), quando submetidas a clima úmido e árido. O autor reforça que a assinatura climática pode ser recuperada em sedimentos de um primeiro ciclo sedimentar, assumindo-se que a maturidade composicional não seja resultado dos processos diagênicos.

O clima é o fator predominante na determinação da taxa de intemperismo físico, químico e da taxa de erosão na área fonte, bem como na zona de transferência até que o sedimento atinja o local de deposição. Pelo controle da temperatura média, pluviosidade e a ocorrência de vegetação, o clima provocará a desagregação mecânica da rocha (redu-

ção volumétrica) e alteração química de minerais instáveis (geração de argila), além da dissolução (Potter, 1978, Blum & Törnquist, 2000, Frostick & Jones, 2002, Weltje & Von Eynatten, 2004, Garzanti et al., 2014, Caracciolo, 2020), tornando o sedimento disponível para os sistemas sedimentares.

A combinação de fatores climáticos e hidrodinâmicos controlaram as características físicas e químicas dos sedimentos na zona de transferência, principalmente a relação de dependência composicional ao controle textural (Basu, 1976). A duração e a influência do intemperismo na alteração do sedimento são determinadas pela resistência físico-química do sedimento aos processos intempéricos e, principalmente, pelo fator tempo, condicionado pelo período que o sedimento permanece temporariamente em planícies aluviais (Johnsson, 1993, Caracciolo, 2020). O tempo de permanência é determinado pelo ângulo de repouso das encostas (fator paleofisográfico), ocorrência de solos (processos pedogenéticos), o grau de consolidação do sedimento/solo e sua resistência aos agentes erosivos e o clima atuante sobre os sistemas sedimentares, somados, muitas vezes, à influência da ecologia (principalmente a presença de vegetação) os quais podem aumentar o tempo de residência do sedimento. Estes agentes, em última análise, são influenciados pela condição tectônica da região (Suttner et al., 1981, Johnsson, 1993).

Modificações na assinatura de proveniência

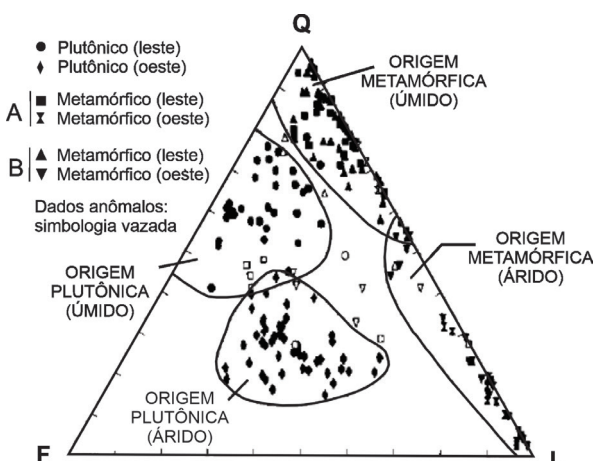


Figura 3. Diagrama ternário, com os vértices representados pelos feldspatos (F), quartzo (Q) e fragmentos líticos afaníticos (L), contem areias originadas, restritamente, no primeiro ciclo de sedimentação. O diagrama revela o aumento relativo da proporção de quartzo sobre fragmentos líticos e feldspatos, em clima úmido, para fontes plutônicas e metamórficas de baixo (A) e alto (B) grau. Modificado de Suttner et al. (1981)

são, muitas vezes, entre outros fatores, decorrente das condições paleoclimáticas e paleointempéricas, cuja caracterização é fundamental para o diagnóstico de proveniência sedimentar (Johnsson, 1993). Com isso, diversos índices geoquímicos foram elaborados para o reconhecimento das condições paleointempéricas da área-fonte e de maturidade para silicatos (Tab. 1), baseados na seletiva remoção e solubilização de elementos móveis, bem como o enriquecimento relativo de elementos imóveis e insolúveis durante o intemperismo (Bugge et al., 2011).

Os índices (Tab. 1) foram originalmente desenvolvidos para sedimentos finos (Nesbitt & Young, 1982, Cox et al., 1995, Fedo et al., 1995). Entretanto, também são usualmente aplicados em *wackes* e arenitos (e.g. Cullers, 2000, Pinto et al., 2004, Armstrong-Altrin et al., 2004, Jinliang & Xin, 2008, Zaid, 2013, Ikhane et al., 2014, Madukwe & Obasi, 2015, Baiyegunhi et al., 2017). Em razão das perturbações nas proporções elementares geradas pela sobreposição de processos geológicos, recomenda-se o uso integrado de diversos índices (e.g., WIP, CIA, CIW, PIA, CPA e ICV) o que permite reconhecer o viés e as limitações intrínsecas de cada método.

Os principais índices de intemperismo são: O WIP (Parker, 1970) no qual examina a mobilidade individual dos elementos (Na, K, Ca e Mg), contudo o índice é limitado por se basear restritivamente no conteúdo de álcalis. O CIA (Nesbitt & Young, 1982), no qual avalia a alteração progressiva de plagioclásio e feldspatos potássicos para argilominerais, com o decréscimo de Ca, Na e K em função do aumento do intemperismo (Nesbitt & Young, 1984). O CIW (Harnois, 1988) e o PIA (Fedo et al., 1995) são propostas alternativas e independentes dos efeitos do metassomatismo potássico pós-deposicional, para avaliação do intemperismo. O CPA (Bugge et al., 2011) se distingue dos demais índices (CIA, CIW e PIA) por não estar sujeito às incertezas da separação do Ca de carbonatos com Ca de silicatos, além de permitir a avaliação da homogeneidade do material de origem sobre os minerais hospedeiros, quando confrontado com os outros índices (Bugge et al., 2011).

Para os índices paleointempéricos, valores próximos a 50 estão relacionados a rochas-fonte sãs e perto de 100 a forte alteração (Nesbitt & Young, 1982, Fedo et al., 1995), exceto para WIP com valores próximos a 100 para rocha sã e a 0 para elevado intemperismo químico (Parker, 1970). Diversos

Tabela 1. Índices paleointerpéricos e de maturidade química-textural e suas rações paleointerpéricas e diage-
respectivas equações

PRINCIPAIS ÍNDICES PALEOINTEPÉRICOS		
WIP	$[(2xNa_2O/0,35) + (MgO/0,9) + (2xK_2O/0,25) + (CaO/0,7)] \times 100$	Weathering index of Parker; Packer (1970)
CIA	$[Al_2O_3/(Al_2O_3 + Na_2O + CaO^* + K_2O)] \times 100$	Chemical Index of Alteration; Nesbitt & Young (1982)
CIW	$[Al_2O_3/(Al_2O_3 + Na_2O + CaO^*)] \times 100$	Chemical Index of Weathering; Harnois (1988)
PIA	$[(Al_2O_3 - K_2O)/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)] \times 100$	Plagioclase Index of Alteration; Fedo et al. (1995)
PCA	$[Al_2O_3/(Al_2O_3 + Na_2O)] \times 100$	Chemical Proxy of Alteration; Buggle et al. (2011)
ÍNDICES DE MATURIDADE QUÍMICA-TEXTURAL		
ICV	$Al_2O_3/(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO)$	Index of Compositional Variability; Cullers (2000)
RSA	SiO_2/Al_2O_3	Índice de maturidade textural; Armstrong-Altrin (2015)

autores (e.g. Suttner & Dutta, 1986, Potter et al., 2005) confrontaram esses índices paleointerpéricos, em gráficos discriminantes binários, junto aos índices de maturidade química e razões elementares (Fig. 4A - D), que possibilitou a representação gráfica das condições paleointerpéricas, paleoclimáticas e tendências evolutivas das condições paleointerpéricas com áreas fontes ígneas.

A utilização do gráfico ternário ACNK (Fig. 4 E) aliada aos índices paleointerpéricos e a petrografia, muitas vezes, permite a distinção das alte-

(Fedo et al., 1995), o incremento de potássio ao processo de ilitização ou à segregação mineral, resultado do enriquecimento seletivo (McLennan et al., 1993, Nesbitt et al., 1996). Outra vantagem do uso do gráfico ACNK é que permite reconhecer a composição da rocha mãe a partir da projeção linear paralelo ao eixo CN-A (Fedo et al., 1995).

Para permitir melhor reconstituição da assinatura de proveniência e outras inferências sobre as condições paleointerpéricas, do tempo de residência dos sedimentos em estocagem temporária

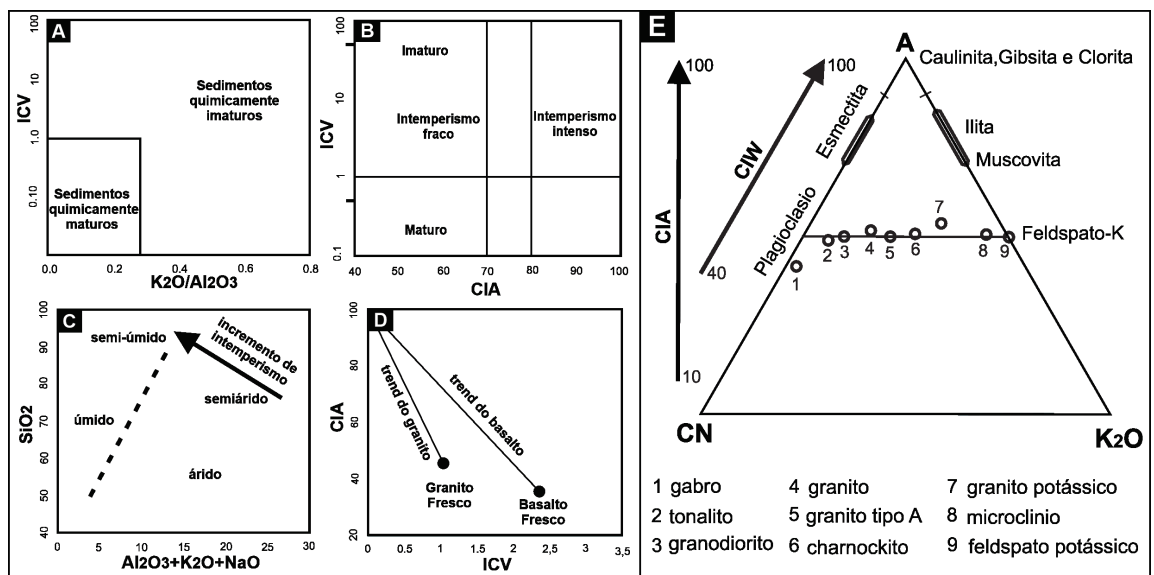


Figura 4. Diagramas discriminantes das condições paleointerpéricas e de maturidade química-textural. A) Gráficos de maturidade química do sedimento de A) Cox et al. (1995) e B) Nesbitt & Young (1984); C) Gráfico discriminante das condições paleoclimáticas de Suttner & Dutta (1986) e D) Gráfico de variação intempérica para protólitos ígneos de Potter et al. (2005), E) Gráfico ACNK (Nesbitt & Young, 1982, McLennan et al., 1993)

e de reciclagem sedimentar recomenda-se também o uso de índices de maturidade química ICV e textural $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Cullers, 2000, Armstrong-Altrin, 2015).

Valores maiores que 1 para o ICV indicam arenitos imaturos quimicamente (Cox et al., 1995), frequentemente, resultado do predomínio de minerais granulares sobre argilominerais secundários (Jinliang & Xin, 2008) condição que sinaliza elevada contribuição de sedimentos de primeiro ciclo em área de tectônica ativa (Pettijohn et al., 1987, van de Kamp & Leake, 1985). Já a ocorrência de valores menores que 1 para ICV apontam para arenitos quimicamente maduros, o que sugere presença de sedimentos policíclicos (retrabalhados) ou em um primeiro ciclo de sedimentação sob intenso intemperismo químico ou sob longos período de residência no sistema distributário ou em estocagem temporária, até atingir a deposição (Jinliang & Xin, 2008).

Paleofisiografia e Seleção hidráulica

As características composicionais e texturais dos fragmentos gerados pela desagregação da rocha fonte dos sedimentos são modificadas por abrasão e alterações químicas no decorrer do transporte. Durante os períodos de armazenamento, o sedimento tem a alteração química (agente climático) como fator modificador predominante (Johnsson & Meade, 1990). No entanto, durante o trânsito, a segregação mecânica é o principal agente modificador. Os minerais detríticos e fragmentos de rochas são segregados e classificados durante o transporte conforme sua dimensão, densidade e forma/hábito, por diferentes agentes: água, gravidade e vento; e mecanismos de transporte: rolamento, arrasto, saltação e suspensão (Garzanti et al., 2008, 2009, Andò et al., 2009). Segundo Allen & Heller (2012), o fluxo de sedimento não é unicamente segregado segundo as características da partícula, mas também pela topografia e regime hidráulico.

Para Caracciolo (2012b e 2020), os processos de transporte sedimentar são os principais mecanismos de segregação do sedimento nos sistemas sedimentares. Os sedimentos podem ser afetados por dois modelos de evolução composicional durante sua permanência na zona de transferência: O princípio de fracionamento (Potter, 1978, Duller et al., 2010) se baseia na segregação progressiva da composição do sedimento pela seleção hidráulica (Michael, 2013), que acarretará a redução da diversidade composicional com o distanciamento

da área fonte (Fig.5A), enquanto o princípio da mistura (Ingersoll, 1990, Ingersoll et al., 1993, Weltje & Von Eynatten, 2004, Weltje, 2012, Garzanti et al., 2015b) é fundamentado na contribuição de múltiplas fontes, a partir da captação de diversas drenagens (Fig. 5B), ou de outros aportes como o eólico. Inicialmente cada contribuição exibe características composicionais e texturais particulares. No entanto, com o avanço a jusante, o sedimento se torna uma mistura de composição estável, a qual reflete a média volumétrica da contribuição litológica das áreas fonte de sedimento (Caracciolo, 2020). Esses princípios são complementares, preveem tendências evolutivas divergentes, mas comumente ocorrem simultaneamente (Fig. 5C).

Também deve se ter em mente que a segregação mineralógica, em decorrência da seleção hidráulica, modificará a assinatura química do sedimento/depósito sedimentar (McLennan et al., 1993, Ohta, 2004), pois cada espécime mineral contém elementos químicos em proporções distintas, definidas pelas suas propriedades mineralógicas. Para melhor entendimento das modificações impostas pelos processos de segregação mineral, é preciso compreender quais elementos estão contidos, preferencialmente, em quais componentes detríticos para, assim, evitar o viés gerado pela classificação mecânica durante o transporte.

Por exemplo, em um sistema distributário, desconsiderando os efeitos do intemperismo químico, com ocorrência de quartzo (SiO_2 , 2,6g/cm³), feldspato ortoclásio (KAlSi_3O_8 , 2,7g/cm³) e zircão (ZrSiO_4 , 4,7g/cm³), entre outros minerais, à medida que o sedimento se distancia da área fonte, em uma análise geoquímica, há uma redução de ZrO_2 em relação ao aumento relativo de SiO_2 e Al_2O_3 e K_2O devido a segregação mineral (por densidade) pela seleção hidráulica. A compreensão deste viés (efeito da segregação mineral sobre a geoquímica sedimentar) permite calcular corretamente as contribuições relativas de múltiplas fontes de sedimento, taxas de aporte e erosão das respectivas áreas fonte (Garzanti et al., 2010).

O sedimento também pode receber aporte composicional intrabacinal como bioclastos (e.g. foraminíferos, ostracodes, diatomáceas) e grãos aloquímicos (e.g. oóides, oncóides, esferulitos, pelóides) e de natureza não detrítica, antes da diagênese, como a precipitação de minerais autigênicos, por exemplo a glauconita e fosforita (Weltje & Von Eynatten, 2004, Morad et al., 2010), modificando ainda mais a assinatura composicional das rochas

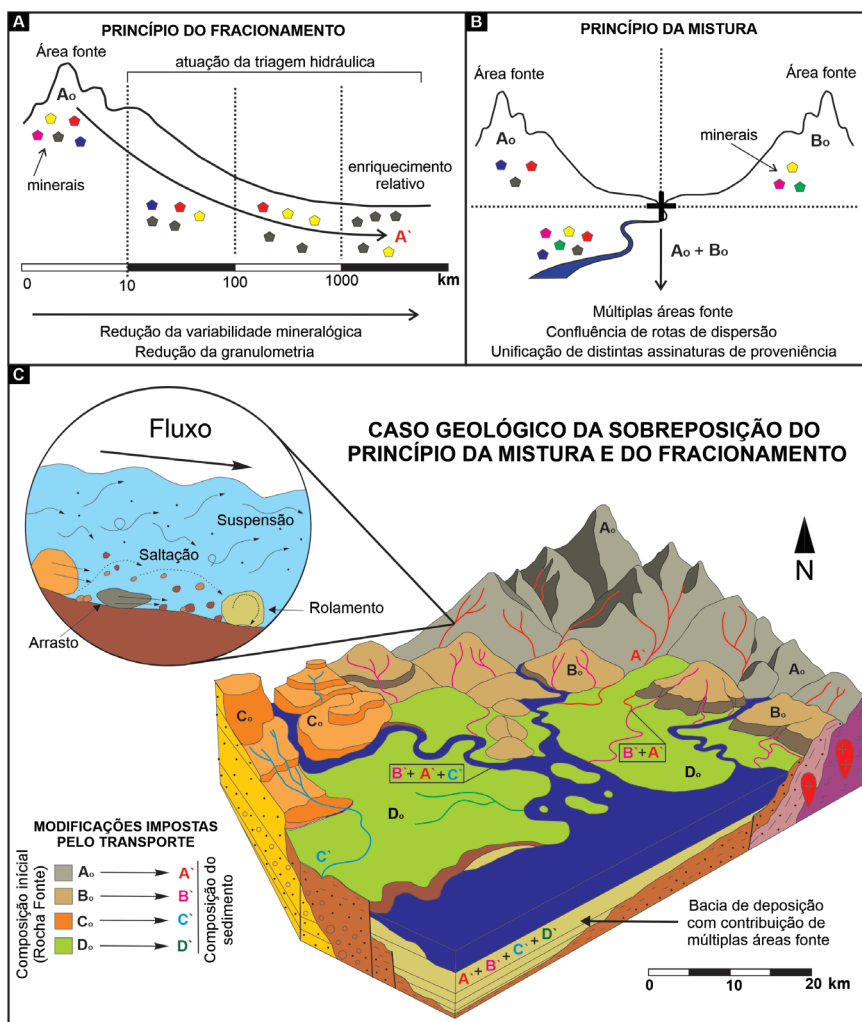


Figura 5. A) Ilustração do princípio do Fracionamento; B) do princípio da mistura; C) Bloco diagrama com a representação do princípio de fracionamento durante o transporte sedimentar, no qual a composição original da área fonte representado por: A_0 , B_0 , C_0 , D_0 , é modificado pelos processos de seleção hidráulica e terá como resultado composições modais distintas no percurso e no local de deposição, representada pelas siglas: A' , B' , C' e D' . Já o princípio de mistura pode sobrepor as assinaturas de proveniência de áreas fonte distintas, pela coalescência de rotas de transporte, por exemplo: $(B' + A' + C')$

fontes de sedimento. Assim, o reconhecimento destes componentes intrabaciais é primordial para evitar equívocos na interpretação geoquímica.

Processos Diagenéticos

Os processos diagenéticos são os que mais modificam a composição e textura dos sedimentos clásticos (Caracciolo, 2020). Os principais mecanismos que alteram a assinatura original de proveniência são: infiltração de argila, cimentação, dissolução e alterações mineralógicas pós-deposicionais (Gazzi, 1965, McBride, 1985, Milliken et al., 1989, Morad et al., 2010, Garzanti et al., 2018b). Estes mecanis-

mos são controlados principalmente:

I. Pela composição e textura dos sedimentos terrígenos, como a distribuição granulométrica, morfologia detrítica e estabilidade química de cada fase mineral (Dickinson, 1970, De Ros et al., 1994, Garzanti et al., 2018b);

II. A presença de fluidos não intrínsecos ao pacote de sedimento, como fluidos meteóricos ou hidrotermais nos processos diagenéticos (Morad et al., 2010, Biondi, 2015);

III. A composição dos fluidos diagenéticos, controlados principalmente pela migração de fluidos dentro da bacia e dissolução de minerais instáveis (Giles, 1997, Worden & Morad, 2000, Caracciolo et al., 2012b);

IV. Grau de empacotamento sedimentar e permeabilidade

intraestratal (Weltje & Von Eynatten, 2004, Caracciolo, 2020);

V. Pelo histórico de soterramento, que abrange as taxas de subsidência, temperatura e duração dos processos diagenéticos (Giles, 1997, Morad et al., 2010, Worden et al., 2018);

A intensidade dos processos diagenéticos sobre a composição e a textura dos sedimentos está diretamente associada com a circulação de fluidos pós-soterramento. Com isso, as rochas de maior permeabilidade, a depender da sua composição, têm reduzida preservação da assinatura de proveniência inicial. Para rochas de baixa permeabilidade se apli-

ca o raciocínio oposto, por tais motivos sedimentos finos tem maior preservação da composição original. Mesmo com maior preservação de minerais instáveis em rochas pelíticas, estes não são imunes às modificações diagenéticas, que acarretam a alteração e redução de minerais instáveis e feldspatos com o aumento do soterramento (Blatt, 1985).

Com base em estudos de estabilidade química de minerais detríticos durante o soterramento, Garzanti et al. (2018) propôs sequências de estabilidade mineralógica com intensidade de soterramento:

- I. Para minerais acessórios: Zircão > rutilo \geq turmalina, (espinélio Cr) \geq apatita > monazita > cloritóide > granada, (cianita) > titanita > estauroлита > epidoto > anfibólio > clinopiroxênio > olivina;
- II. Para componentes principais: Quartzo > fragmentos de rocha vulcânica/metamórfica de baixo grau de composição félsica > feldspatos > fragmentos de rocha vulcânica/metamórfica de baixo grau de composição máfica. Se comparada com minerais acessórios, o quartzo possui estabilidade equivalente ao do zircão, turmalina e rutilo em sua resistência aos processos diagenéticos.

Conforme o padrão de Garzanti et al. (2018), pode-se perceber o incremento relativo da população de quartzo às custas da redução dos feldspatos e fragmentos líticos (Mack, 1984, McBride, 1985, Garzanti et al., 2018b) Concomitante a esta evolução composicional, é comum a precipitação de fases autigênicas (Odin, 1985) oriundas de fluidos gerados da destruição química dos minerais instáveis. Diante disso, deve-se tomar cuidado especial na aplicação da análise química de rocha total, pois a assinatura de proveniência pode ser severamente modificada (Weltje & Von Eynatten, 2004, Caracciolo, 2020).

Importância da proveniência sedimentar na qualidade de reservatórios

A análise de proveniência sedimentar tem grande utilidade em todas as fases da exploração de hidrocarbonetos, desde a identificação da configuração tectônica regional, padrões de dispersão de sedimento até o impacto da composição dos sedimentos na diagênese de reservatório (Dickinson, 1970, Zuffa, 1985, Tobin & Schwarzer, 2014, Smyth et al., 2014). Estes conhecimentos são de grande importância na identificação e distribuição de um reservatório petrolífero, bem como na sua

qualidade permo-porosa (Dickinson & Suczek, 1979, De Ros, 1996, Morad et al., 2010, Weltje et al., 2018). No qual permite estabelecer a arquitetura estratigráfica e o zonamento dos reservatórios (Smyth et al., 2014), apoiando, assim, a tomada de decisões nas investigações de campo e de sub-superfície e estabelecer critérios preditivos para exploração e exploração.

Um exemplo prático da importância do entendimento da proveniência sedimentar na tomada de decisão na produção petrolífera é o comportamento dinâmico do reservatório durante a produção, no qual a variação de porosidade e, principalmente, da permeabilidade, na compartimentação da rocha reservatório, depende dos efeitos diagenéticos controlados pela assinatura de proveniência, impactando na capacidade de produção e no desempenho do poço.

Compactação mecânica e química, dissolução de minerais instáveis, precipitação de cimentos, substituição mineralógica de grãos instáveis e formação de argilas autigênicas (ilita, caulinita, esmectita, clorita) estão entre os processos que são afetados pela composição do sedimento e alteram a porosidade e permeabilidade de um reservatório (Fig. 6, McBride, 1985, Milliken et al., 1989, Morad et al., 2010, Okunuwadje et al., 2020). Deste modo, a principal contribuição da proveniência sedimentar na qualidade de reservatório é seu controle sobre a composição dos sedimentos (Fig. 7), que terão diferentes respostas durante a diagênese, induzidas pelo soterramento, composição e pressão de fluidos, estresse efetivo e temperatura, estabelecendo variações na qualidade de reservatório (Nagtegaal, 1978, Dickinson, 1985, Bloch, 1991, Dias Lima & De Ros, 2002, Arribas et al., 2014, De Ros, 1996, Weltje et al., 2018). Estes processos diagenéticos, responsáveis pela alteração da qualidade dos reservatórios, são interdependentes. Além disso, a sequência dos eventos é de suma importância para a determinação da qualidade do reservatório. Por exemplo, a cimentação precoce por carbonatos ou sulfatos durante fases iniciais da diagênese pode evitar a compactação preservando o espaço intergranular, posteriormente com o avanço da diagênese o cimento pode ser dissolvido gerando porosidade secundária, assim elevando a qualidade do reservatório. Caso haja apenas a cimentação tardia, a compactação gerada pelo soterramento pode reduzir significativamente a porosidade.

Por fim, a cimentação ou precipitação de argilas autigênicas tardia pode obstruir grande parcela

dos poros até então preservados (e.g. Shanmugam, 1985, Morad et al., 2010, Caracciolo et al., 2014, Vincent et al., 2014, Lan et al., 2016). Quando há a precipitação precoce destas argilas ou de óxidos e hidróxidos de ferro em forma de películas recobrimdo grãos de quartzo, muitas vezes, pode inibir o crescimento de cimento de quartzo durante a mesodiagenese (Fig. 6A), sendo um importante fator de preservação de porosidade (Ehrenberg, 1993, Worden & Morad, 2000). Atualmente, há boa compreensão sobre a resposta diagenética dos principais componentes das suítes areníticas (e.g. Worden & Burley, 2003, Morad et al., 2010), que serão discutidas separadamente.

Petrofácies ricas em quartzo - Normalmente estão associadas aos reservatórios de maior qualidade (Nagtegaal, 1978, Bernet et al., 2007), fornecem rigidez à compactação química/mecânica, mantendo o espaço intergranular durante o sepultamento (Bloch, 1991, Tobin & Schwarzer, 2014). Segundo Beard & Weyl (1973) e Andrew et al. (1996), para reservatórios em quartzo arenitos o controle textural (classificação e granulação) tem grande importância no controle da porosidade e permeabilidade, pelo fato dos agentes químicos não serem tão efetivos nas modificações destas rochas.

Os grãos de quartzo não sofrem alteração mineral, mas podem sofrer corrosão e dissolução por pressão (Fig. 6B), sobretudo em arenitos mais finos (Houseknecht, 1988, Bjørlykke & Egeberg, 1993, James et al., 1986, De Ros, 1996), em resposta a uma intensa diagênese, sob profundidades superiores a 2500-3000 m de soterramento e temperaturas acima de 80-90°C (Worden & Morad, 2000, Bloch et al., 2002, Dias Lima & De Ros, 2002). Entretanto, nem todo cimento quartzoso gerado é em decorrência da dissolução por pressão de grãos de quartzo. Alterações químicas em feldspatos e argilominerais (ilitização/cloritização da esmectita), dissolução/corrosão de sílica amorfa, fontes externas (hidrotermais) e contribuição de sílica biogênica podem resultar em saturação de sílica nos fluidos diagenéticos e posteriormente a precipitação de cimento silicoso, favorecido em condições de Ph e salinidade elevada (Worden & Morad, 2000). A ocorrência do cimento quartzoso decresce das fácies areníticas ricas em quartzo para fácies ricas em feldspatos, em fragmentos líticos e em grãos ultramáficos (Worden & Morad, 2000, Tobin & Schwarzer, 2014).

Petrofácies ricas em feldspato - Possui comporta-

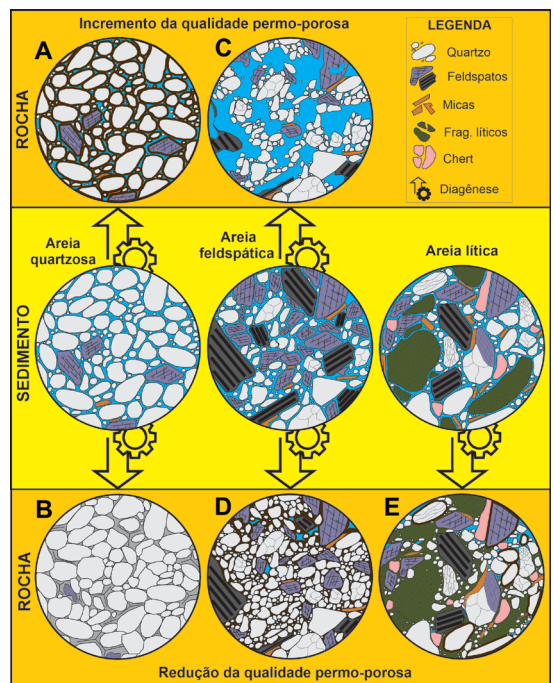


Figura 6. Sumário da evolução diagenética a partir de areia quartzosa, areia feldspática e areia lítica, e o impacto na qualidade permo-porosa. Em A) formação precoce de película de argilominerais/óxidos de ferro envolvendo os grãos (quartzo e feldspatos) inibindo a formação de cimento de quartzo e/ou feldspato (e.g. albitização); B) formação de cimento quartzoso decorrente da dissolução por pressão em grãos de quartzo; C) Dissolução tardia dos grãos de feldspatos (plagioclásio e ortoclásio) com a formação de porosidade secundária (e.g. mórdica e intragranular); D) Formação de cimento de argilominerais (e.g. esmectita e ilita) decorrente a alteração diagenética em feldspatos; E) Formação de pseudomatriz pela deformação mecânica de fragmentos líticos dúcteis e secundariamente de argilominerais pela presença de fragmentos instáveis à diagênese. A ilustração permite reconhecer o controle da composição detrítica sob os processos diagenéticos, estes últimos responsáveis pelas características permo-porosas dos reservatórios siliciclásticos

mento similar aos quartzosos em relação a compactação mecânica, mantendo o espaço intergranular durante o soterramento (Nagtegaal, 1978, Bloch, 1991, Tobin & Schwarzer, 2014). Além disso, feldspatos são frequentemente dissolvidos em estágios mais avançados de soterramento, principalmente a profundidades superiores a 3350 m (Nagtegaal, 1978), gerando maior porosidade secundária (Fig. 6C), que pode melhorar a qualidade do reservatório (Schmidt & McDonald, 1979, Arribas et al., 2014, Caracciolo et al., 2014, Kettanah et al., 2014), sobretudo se houver circulação de fluido ácido durante

o soterramento (Worden & Morad, 2000, Ketzer et al., 2003, Worden & Burley, 2003, BjØrlykke, 2014, Ma et al., 2017a, 2017b).

Os feldspatos, de certo modo, são propensos a se alterarem para argilas e minerais mais estáveis durante a diagênese (Fig. 6CD), principalmente pelos processos de ilitização, caulinitização, sercicitização, albitização e calcitização (Kettanah et al., 2014), responsáveis por reduzir a qualidade do reservatório. Tobin & Schwarzer

(2014) sugerem que, em tais fácies, muitas vezes, não há significativa melhoria na qualidade do reservatório com o soterramento, pois modelos indicam que a geração de porosidade secundária e a geração de subprodutos autigênicos como resultado da dissolução são, normalmente, diretamente proporcionais.

Petrofácies ricas em fragmentos líticos - Sobre tudo os que contêm fragmentos de filitos, xistos, fragmentos vulcânicos, intraclastos de silte e argila são frágeis à deformação mecânica, assim reduzindo o espaço intragranular (Fig. 6E), muitas vezes inibindo à cimentação precoce (Caracciolo et al., 2014). Os fragmentos líticos também constituem os menos estáveis quimicamente durante a diagênese, sofrem com facilidade a dissolução e alteração, sendo responsáveis pela geração de diversas argilas autigênicas (Fig. 6E) e cimentos (carbonatos, pirita, argilominerais, clorita, zeólita, feldspatos, óxidos e hidróxidos). Por tais motivos, estes arenitos possuem baixo potencial de reter porosidade e permeabilidade em profundidade (Nagtegaal, 1978).

Pela resposta físico-química dos principais componentes detríticos, pode se associar qualidade permo-porosa de reservatórios com a natureza das rochas fontes de sedimento (Fig. 7). Nesse critério, Arribas et al. (2014) sugerem que sedimentos provenientes de fontes recicladas condiciona os reservatórios de maior qualidade, seguido por rochas fontes de natureza plutônica e metamórficas (Nagtegaal, 1978, Andrew et al., 1996), os de origem vulcânica e metapelitos que fornecem elevados teores de fragmentos líticos, normalmente estão associados às rochas siliciclásticas de baixa qualidade para reservatórios (Dickinson & Suczek, 1979, Andrew et al., 1996).

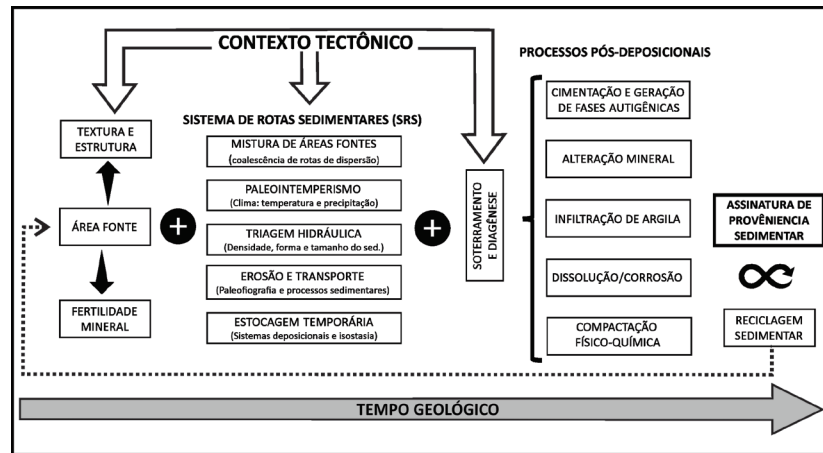


Figura 7. Quadro sinótico com os principais agentes controladores da composição sedimentar e das sucessivas alterações impostas sobre a assinatura de proveniência sedimentar

Considerações Finais

Este artigo surgiu com a proposta de resumir, em língua portuguesa, os avanços dos estudos sobre a proveniência sedimentar, nos quais se percebeu a necessidade da compreensão integrada dos agentes e processos modificadores da assinatura composicional. Atualmente, reconhecer que a composição do registro sedimentar é uma imagem distorcida da composição dos terrenos de origem, resultado da sobreposição de diversos fatores modificadores inter-relacionados não é uma alternativa, mas sim uma assertiva fundamental para uma compreensão mais ampla do sistema sedimentar e uma interpretação mais fidedigna do cenário de proveniência sedimentar, principalmente, com sua crescente aplicação na indústria petrolífera, com destaque na caracterização da qualidade permo-porosa de reservatório.

Com isso, a síntese que inter-relaciona os diversos fatores modificadores e controladores da composição, consiste em um complemento didático da abordagem convencional em proveniência sedimentar, com o privilégio da compreensão multidisciplinar e integrada dos agentes geológicos. Também permite fixar, aos recém-chegados ao estudo de proveniência, que o sistema sedimentar deve ser questionado como um todo bem como sua relevância e aplicabilidade na exploração de hidrocarbonetos, principalmente no impacto na qualidade de reservatórios.

Agradecimentos

Os autores agradecem o encorajamento e as sugestões recebidas do geólogo Almério Barros

França para a elaboração deste artigo, aos demais que de alguma forma contribuíram para a confecção do texto e ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bio-

combustíveis (PRH-ANP), suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015, que viabilizou a pesquisa.

Taxonomia CRediT: • Reconhecimentos: Agradecimentos ao geólogo Almério Barros França. • Financiamento: Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP). • Conflitos de interesse: Os autores certificam que não têm interesse comercial ou associativo que represente um conflito de interesses em relação ao manuscrito. • Aprovação ética: Não aplicável. • Disponibilidade de dados e material: Disponível no próprio texto. • Contribuições dos autores: Conceitualização; Curadoria de dados; Análise formal; Investigação; Metodologia; Administração do projeto; Recursos; Supervisão; Validação; Visualização; Escrita – rascunho original; Escrita – revisão & edição: Andreas Pauli de Castro, Carlos Conforti Ferreira Guedes.

Referências

- Allen, P. A. (2008). From landscapes into geological history. *Nature*, 451, 274-276. doi: 10.1038/nature06586.
- Allen, P. A. (2017). *Sediment Routing Systems. The fate of sediments from source to sink*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781316135754.
- Allen, P. A., Armitage, J. J., Carter, A., Duller, R. A., Michael, N. A., Sinclair, H. D., Whitchurch A.L. & Whittaker, A. C. (2013). The Qs problem: Sediment volumetric balance of proximal foreland basin systems. *Sedimentology*, 60(1), 102-130. doi: 10.1111/sed.12015.
- Allen, P. A., & Heller, P. L. (2012). Dispersal and preservation of tectonically generated alluvial gravels in sedimentary basins. In Busby, C., & Pérez, A. A. (Eds.). *Tectonics of sedimentary basins: Recent advances* (pp. 111-130). Chichester, UK: Wiley-Blackwell. doi: 10.1002/9781444347166.ch6.
- Allen, P. A., Michael, N. A., D'Arcy, M., Roda-Boluda, D. C., Whittaker, A. C., Duller, R. A., & Armitage, J. J. (2017). Fractionation of grain size in terrestrial sediment routing systems. *Basin Research*, 29(2), 180-202. doi: 10.1111/bre.12172.
- Andò, S., Bersani, D., Vignola, P., & Garzanti, E. (2009). Raman spectroscopy as an effective tool for high-resolution heavy-mineral analysis: examples from major Himalayan and Alpine fluvio-deltaic systems. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 73(3), 450-455. doi: 10.1016/j.saa.2008.11.005.
- Andrew, A. S., Whitford, D. J., Hamilton, P. J., Scarano, S., & Buckley, M. (1996, October). Application of chemostratigraphy to petroleum exploration and field appraisal: An example from the Surat Basin. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference*, OnePetro. doi: 10.2118/37008-MS.
- Armstrong-Altrin, J. S., Lee, Y. I., Verma, S. P., & Ramasamy, S. (2004). Geochemistry of sandstones from the Upper Miocene Kudankulam Formation, southern India: implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Journal of sedimentary Research*, 74(2), 285-297. doi: 10.1306/082803740285.
- Armstrong-Altrin, J. S., Machain-Castillo, M. L., Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Sanchez-Cabeza, J. A., & Ruiz-Fernández, A. C. (2015). Provenance and depositional history of continental slope sediments in the Southwestern Gulf of Mexico unraveled by geochemical analysis. *Continental Shelf Research*, 95, 15-26. doi: 10.1016/j.csr.2015.01.003.
- Armstrong-Altrin, J. S., & Verma, S. P. (2005). Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings. *Sedimentary Geology*, 177(1-2), 115-129. doi: 10.1016/j.sedgeo.2005.02.004.
- Arribas, J., González-Acebrón, L., Omodeo-Sale, S., & Mas, R. (2014). The influence of the provenance of arenite on its diagenesis in the Cameros Rift Basin (Spain). *Geological Society, London, Special Publications*, 386(1), 63-73. doi: 10.1144/SP386.12.
- Arribas, J., & Tortosa, A. (2003). Detrital modes in sedimenticlastic sands from low-order streams in the Iberian Range, Spain: the potential for sand generation by different sedimentary rocks. *Sedimentary Geology*, 159(3-4), 275-303. doi: 10.1016/S0037-0738(02)00332-9.
- Baiyegunhi, C., Liu, K., & Gwavava, O. (2017). Geochemistry of sandstones and shales from the Ecça Group, Karoo Supergroup, in the Eastern Cape Province of South Africa: Implications for provenance, weathering and tectonic setting. *Open Geosciences*, 9(1), 340-360. doi: 10.1515/geo-2017-0028.
- Basu, A. (1976). Petrology of Holocene fluvial sand derived from plutonic source rocks; implications to paleoclimatic interpretation. *Journal of Sedimentary Research*, 46(3), 694-709. doi: 10.1306/212F7031-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Basu, A. (1985). Influence of climate and relief on compositions of sands released at source areas. In Zuffa, G. G. (Ed.). *Provenance of arenites* (pp. 1-18). Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-94-017-2809-6_1.
- Beard, D. C., & Weyl, P. K. (1973). Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. *AAPG Bulletin*, 57(2), 349-369. doi: 10.1306/819A4272-16C5-11D7-8645000102C1865D.
- Bernet, M., Kapoutsos, D., & Bassett, K. (2007). Diagenesis and provenance of Silurian quartz arenites in south-eastern New York State. *Sedimentary Geology*, 201(1-2), 43-55. doi: 10.1016/j.sedgeo.2007.04.006.

- Bhatia, M. R. (1983). Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6), 611-627. doi: 10.1086/628815.
- Bhatia, M. R., & Crook, K.A.W. (1986). Trace elements characteristics of greywacke and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2), 181-193. doi: 10.1007/BF00375292.
- Biondi, J. C. (2015). *Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros* (2° ed.). São Paulo, SP: Oficina de Textos.
- Bjørlykke, K. (2014). Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 301, 1-14. doi: 10.1016/j.sedgeo.2013.12.002.
- Bjørlykke, K., & Egeberg, P. K. (1993). Quartz cementation in sedimentary basins. *AAPG Bulletin*, 77(9), 1538-1548. doi: 10.1306/BDF8EE8-1718-11D7-8645000102C1865D.
- Blatt, H. (1967). Provenance determinations and recycling of sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 37(4), 1031-1044. doi: 10.1306/74D71825-2B21-11D7-8648000102C1865D.
- Blatt, H. (1985). Provenance studies and mudrocks. *Journal of Sedimentary Research*, 55(1), 69-75. doi: 10.1306/212F8611-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Blatt, H., & Jones, R. L. (1975). Proportions of exposed igneous, metamorphic, and sedimentary rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 86(8), 1085-1088. doi: 10.1130/0016-7606(1975)86<1085:POEIMA>2.0.CO;2.
- Blatt, H., Middleton, G. V., & Murray, R. (1980) *Origin of Sedimentary Rocks* (2° ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. doi: 10.1002/esp.3290060115.
- Bloch, S. (1991). Empirical prediction of porosity and permeability in sandstones (1). *AAPG Bulletin*, 75(7), 1145-1160. doi: 10.1306/0C9B28E9-1710-11D7-8645000102C1865D.
- Bloch, S. (1994). Effect of detrital mineral composition on reservoir quality. In Wilson, M. D. (Ed.). *Reservoir quality assessment and prediction in clastic rocks*. (v. 30, p. 61-182). Tulsa, Okla: Society for Sedimentary Geology (SEPM).
- Bloch, S., Lander, R. H., & Bonnell, L. (2002). Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstones reservoirs: Origin and predictability. *AAPG Bulletin*, 86(2), 301-328.
- Blum, M. D., & Törnqvist, T. E. (2000). Fluvial responses to climate and sea level change: a review and look forward. *Sedimentology*, 47, 2-48. doi: 10.1046/j.1365-3091.2000.00008.x.
- Buggle, B., Glaser, B., Hambach, U., Gerasimenko, N., & Marković, S. (2011). An evaluation of geochemical weathering indices in loess-paleosol studies. *Quaternary International*, 240(1-2), 12-21. doi: 10.1016/j.quaint.2010.07.019.
- Caracciolo, L. (2020). Sediment generation and sediment routing systems from a quantitative provenance analysis perspective: Review, application and future development. *Earth-Science Reviews*, 209, 103226. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103226.
- Caracciolo, L., Arribas, J., Ingersoll, R. V., & Critelli, S. (2014). The diagenetic destruction of porosity in plutoniclastic petrofacies: The Miocene Diligencia and Eocene Maniobra formations, Orocopia Mountains, southern California, USA. *Geological Society, London, Special Publications*, 386(1), 49-62. doi: 10.1144/SP386.9.
- Caracciolo, L., Chew, D., & Andò, S. (2020). Sediment generation and sediment routing systems. *Earth Science Reviews*, 207, 103221. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103221.
- Caracciolo, L., Garzanti, E., Von Eynatten, H., & Weltje, G. J. (2016). Sediment generation and provenance: processes and pathways. *Sedimentary Geology*, 336, 1-2. doi: 10.1016/j.sedgeo.2016.03.015.
- Caracciolo, L., Tolosana-Delgado, R., Le Pera, E., Von Eynatten, H., Arribas, J., & Tarquini, S. (2012a). Influence of granitoid textural parameters on sediment composition: implications for sediment generation. *Sedimentary Geology*, 280, 93-107. doi: 10.1016/j.sedgeo.2012.07.005.
- Caracciolo, L., Von Eynatten, H., Tolosana-Delgado, R., Critelli, S., Manetti, P., & Marchev, P. (2012b). Petrological, geochemical, and statistical analysis of Eocene-Oligocene sandstones of the Western Thrace Basin, Greece and Bulgaria. *Journal of Sedimentary Research*, 82(7), 482-498. doi: 10.2110/jsr.2012.31.
- Chew, D., O'Sullivan, G., Caracciolo, L., Mark, C., & Tyrrell, S. (2020). Sourcing the sand: Accessory mineral fertility, analytical and other biases in detrital U-Pb provenance analysis. *Earth-Science Reviews*, 202, 103093. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103093.
- Cox, R., Lowe, D. R. (1995). A conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediments and the coevolution of continental blocks and their sedimentary cover. *Journal of Sedimentary Research*, 65 (1), 1-12. doi: 10.1306/D4268009-2B26-11D7-8648000102C1865D.
- Cox, R., Lowe, D. R., & Cullers, R. L. (1995). The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14), 2919-2940. doi: 10.1016/0016-7037(95)00185-9.
- Crook, K. A. W. (1974). Lithostratigraphy and Geotectonic: The Significance of Composition Variation in Flysch arenites (Graywackes). In Dott, R. H., & Shaver, R. H. (Eds). *Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation* (v. 19, p. 304-310). Tulsa, Okla: SEPM. doi: 10.2110/pec.74.19.0304.
- Cullers, R. L. (2000). The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos*, 51(3), 181-203. doi: 10.1016/S0024-4937(99)00063-8.
- Deffontaines, B., & Chorowicz, J. (1991). Principles of drainage basin analysis from multisource data: Application to the structural analysis of the Zaire Basin. *Tectonophysics*, 194(3), 237-263. doi: 10.1016/0040-1951(91)90263-R.
- De Ros, L. F. (1996). Compositional controls in sandstone diagenesis. Acta Universitatis Upsaliensis. *Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology*. 198, 1-24.
- De Ros, L. F., Morad, S. & Paim, P. S. G. (1994). The

- role of detrital composition and climate on the diagenetic evolution of continental molasses: evidence from the Cambro-Ordovician Guaritas Sequence, Southern Brazil. *Sedimentary Geology*, 92(3-4), 197-228. doi: 10.1016/0037-0738(94)90106-6.
- Dias Lima, R., & De Ros, L. F. (2002). The role of depositional setting and diagenesis on the reservoir quality of Devonian sandstones from the Solimoes Basin, Brazilian Amazonia. *Marine and petroleum geology*, 19(9), 1047-1071. doi: 10.1016/S0264-8172(03)00002-3.
- Dickinson, W. R. (1970). Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Research*, 40(2), 695-707. doi: 10.1306/74D72018-2B21-11D7-8648000102C1865D.
- Dickinson, W. R. (1985). Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In Zuffa, G. G. (Ed.). *Provenance of arenites* (pp. 333-361). Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-94-017-2809-6_15.
- Dickinson, W. R. (1988). Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of sedimentary basins. In: *New perspectives in basin analysis* (pp. 3-25). Springer, New York, NY. doi: 10.1007/978-1-4612-3788-4_1.
- Dickinson, W. R. (2008). Impact of differential zircon fertility of granitoid basement rocks in North America on age populations of detrital zircons and implications for granite petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(1-2), 80-92. doi: 10.1016/j.epsl.2008.08.003.
- Dickinson, W. R., Beard, L. S., Brakenridge, G. R., Erjavec, J. L., Ferguson, R. C., Inman, K. F., ... & Ryberg, P. T. (1983). Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geological Society of America Bulletin*, 94(2), 222-235. doi: 10.1130/0016-7606(1983)94<222: PONAPS>2.0.CO;2.
- Dickinson, W. R., & Suczek, C. (1979). Plate tectonics and sandstone compositions. *AAPG Bull.*, 63(12), 2164-2182. doi: 10.1306/2f9188fb-16cc-11d7-8645000102c1865d.
- Dickinson, W. R., & Valloni, R. (1980). Plate settings and provenance of sands in modern ocean basins. *Geology*, 8(2), 82-86. doi: 10.1130/0091-7613(1980)8<82:PSAPOS>2.0.CO;2.
- Duller, R. A., Whittaker, A. C., Fedele, J. J., Whitchurch, A. L., Springett, J., Smithells, R., ... & Allen, P. A. (2010). From grain size to tectonics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F3022). doi: 10.1029/2009JF001495.
- Ehrenberg, S. N., Aagaard, P., Wilson, M. J., Fraser, A. R., & Duthie, D. M. L. (1993). Depth-Dependent Transformation of Kaolinite to Dickite - Sandstones of the Norwegian Continental Shelf. *Clay Minerals*, 28(03), 325-352. doi: 10.1180/claymin.1993.028.3.01.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1995). Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance. *Geology*, 23(10), 921-924. doi: 10.1130/0091-7613(1995)023<0921: UTEOPM>2.3.CO;2.
- Flowerdew, M. J., Fleming, E. J., Morton, A. C., Frei, D., Chew, D. M., & Daly, J. S. (2020). Assessing mineral fertility and bias in sedimentary provenance studies: examples from the Barents Shelf. *Geological Society, London, Special Publications*, 484(1), 255-274. doi: 10.1144/SP484.11.
- Folk, R. L. (1980). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, Tex: Hemphill publishing company.
- Frostick, L. E., & Jones, S. J. (2002). Impact of periodicity on sediment flux in alluvial systems: grain to basin scale. *Geological Society, London, Special Publications*, 191(1), 81-95. doi: 10.1144/GSL.SP.2002.191.01.06.
- Garzanti, E. (2016). From static to dynamic provenance analysis - Sedimentary petrology upgraded. *Sedimentary Geology*, 336, 3-13. doi: 10.1016/j.sedgeo.2015.07.010.
- Garzanti, E. (2019). Petrographic classification of sand and sandstone. *Earth-science reviews*, 192, 545-563. doi: 10.1016/j.earscirev.2018.12.014.
- Garzanti, E., Ando, S., Vezzoli, G., & Dell'era, D. (2003). From rifted margins to foreland basins: investigating provenance and sediment dispersal across desert Arabia (Oman, UAE). *Journal of Sedimentary Research*, 73(4), 572-588. doi: 10.1306/101702730572.
- Garzanti, E., & Andò, S. (2007). Heavy mineral concentration in modern sands: implications for provenance interpretation. *Developments in Sedimentology*, 58, 517-545. doi: 10.1016/S0070-4571(07)58020-9.
- Garzanti, E., Andò, S., & Vezzoli, G. (2008). Settling equivalence of detrital minerals and grain-size dependence of sediment composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1-2), 138-151. doi: 10.1016/j.epsl.2008.06.020.
- Garzanti, E., Andò, S., & Vezzoli, G. (2009). Grain-size dependence of sediment composition and environmental bias in provenance studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(3-4), 422-432. doi: 10.1016/j.epsl.2008.11.007.
- Garzanti, E., Andò, S., Vezzoli, G., Lustrino, M., Boni, M., & Vermeesch, P. (2012). Petrology of the Namib Sand Sea: Long-distance transport and compositional variability in the wind-displaced Orange Delta. *Earth-Science Reviews*, 112(3-4), 173-189. doi: 10.1016/j.earscirev.2012.02.008.
- Garzanti, E., Andò, S., Padoan, M., Vezzoli, G., & El Kammar, A. (2015b). The modern Nile sediment system: Processes and products. *Quaternary Science Reviews*, 130, 9-56. doi: 10.1016/j.quascirev.2015.07.011.
- Garzanti, E., Andò, S., Limonta, M., Fielding, L., & Najman, Y. (2018b). Diagenetic control on mineralogical suites in sand, silt, and mud (Cenozoic Nile Delta): Implications for provenance reconstructions. *Earth-Science Reviews*, 185, 122-139. doi: 10.1016/j.earscirev.2018.05.010.
- Garzanti, E., Dinis, P., Vermeesch, P., Andò, S., Hahn, A., Huvi, J., ... & Vezzoli, G. (2018a). Dynamic uplift, recycling, and climate control on the petrology of passive-margin sand (Angola). *Sedimentary Geology*, 375, 86-104. doi: 10.1016/j.sedgeo.2017.12.009.

- Garzanti, E., Ghassemi, M. R., Limonta, M., & Resentini, A. (2019). Provenance of Karakum desert sand (Turkmenistan): lithic-rich orogenic signature of central Asian dune fields. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 125(1), 77-89. doi: 10.13130/2039-4942/11059.
- Garzanti, E., Limonta, M., Resentini, A., Bandopadhyay, P. C., Najman, Y., Andò, S., & Vezzoli, G. (2013b). Sediment recycling at convergent plate margins (Indo-Burman ranges and Andaman-Nicobar Ridge). *Earth-Science Reviews*, 123, 113-132. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.04.008.
- Garzanti, E., Padoan, M., Andò, S., Resentini, A., Vezzoli, G., & Lustrino, M. (2013a). Weathering and relative durability of detrital minerals in equatorial climate: sand petrology and geochemistry in the East African Rift. *The Journal of Geology*, 121(6), 547-580. doi: 10.1086/673259.
- Garzanti, E., Resentini, A., Vezzoli, G., Ando, S., Malusa, M. G., Padoan, M., & Paparella, P. (2010). Detrital fingerprints of fossil continental-subduction zones (Axial Belt Provenance, European Alps). *The Journal of Geology*, 118(4), 341-362. doi: 10.1086/652720.
- Garzanti, E., Resentini, A., Andò, S., Vezzoli, G., Pereira, A., & Vermeesch, P. (2015a). Physical controls on sand composition and relative durability of detrital minerals during ultralong distance littoral and aeolian transport (Namibia and southern Angola). *Sedimentology*, 62(4), 971-996. doi: 10.1111/sed.12169.
- Garzanti, E., Vermeesch, P., Padoan, M., Resentini, A., Vezzoli, G., & Andò, S. (2014). Provenance of passive-margin sand (Southern Africa). *The Journal of Geology*, 122(1), 17-42. doi: 10.1086/674803.
- Gazzi, P. (1965). On the heavy mineral zones in the geosyncline series, recent studies in the Northern Apennines, Italy. *Journal of Sedimentary Research*, 35(1), 109-115.
- Giles, M. R. (1997). *Diagenesis: A Quantitative Perspective—Implications for Basin Modelling and Rock Property Prediction*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishing. doi: 10.1017/S0016756899241775.
- Harel, M. A., Mudd, S. M., & Attal, M. (2016). Global analysis of the stream power law parameters based on worldwide 10 Be denudation rates. *Geomorphology*, 268, 184-196. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.05.035.
- Harnois, L. (1988). The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55(3-4), 319-322. doi: 10.1016/0037-0738(88)90137-6.
- Haughton, P. D. W., Todd, S. P., & Morton, A. C. (1991). Sedimentary provenance studies. *Geological Society, London, Special Publications*, 57(1), 1-11. doi: 10.1144/gsl.sp.1991.057.01.01.
- Houseknecht, D. W. (1988). Intergranular pressure solution in four quartzose sandstones. *Journal of Sedimentary Research*, 58(2), 228-246. doi: 10.1306/212F8D64-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Hubert, J. F. (1962). A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones. *Journal of Sedimentary Research*, 32(3), 440-450. doi: 10.1306/74D70CE5-2B21-11D7-8648000102C1865D.
- Hunter, R. E. (1967). The petrography of some Illinois Pleistocene and Recent sands. *Sedimentary Geology*, 1, 57-75. doi: 10.1016/0037-0738(67)90052-8.
- Ikhane, P. R., Akintola, A. I., Bankole, S. I., & Oyiboade, Y. T. (2014). Provenance studies of sandstone facies exposed near Igbile southwestern Nigeria: *Petrographic and geochemical approach*, 6(2), 47. doi: 10.5539/jgg.v6n2p47.
- Ingersoll, R. V. (1990). Actualistic sandstone petrofacies: Discriminating modern and ancient source rocks. *Geology*, 18(8), 733-736. doi: 10.1130/0091-7613(1990)0182.3.CO;2.
- Ingersoll, R. V., Bullard, T. F., Ford, R. L., Grimm, J. P., Pickle, J. D., & Sares, S. W. (1984). The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *Journal of Sedimentary Research*, 54(1), 103-116. doi: 10.1306/212F83B9-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Ingersoll, R. V., Kretchmer, A. G., & Valles, P. K. (1993). The effect of sampling scale on actualistic sandstone petrofacies. *Sedimentology*, 40(5), 937-953. doi: 10.1111/j.1365-3091.1993.tb01370.x.
- James, W. C., Wilmar, G. C., & Davidson, B. G. (1986). Role of quartz type and grain size in silica diagenesis, Nugget Sandstone, south-central Wyoming. *Journal of Sedimentary Research*, 56(5), 657-662. doi: 10.1306/212F8A03-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Jinliang, Z., & Xin, Z. (2008). Composition and Provenance of Sandstones and Siltstones in Paleogene, Huimin Depression, Bohai Bay Basin, Eastern China. *Journal of China University of Geosciences*, 19(3), 252-270. doi: 10.1016/S1002-0705(08)60044-8.
- Johnsson, M. J. (1993). The system controlling the composition of clastic sediments. *Geological Society of America, Special Paper*, 284, 1-19. doi: 10.1130/spe284-p1.
- Johnsson, M. J., & Meade, R. H. (1990). Chemical weathering of fluvial sediments during alluvial storage; the Macuapanim Island point bar, Solimoes River, Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, 60(6), 827-842. doi: 10.1306/212F9296-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Johnsson, M. J., Stallard, R. F., & Lundberg, N. (1991). Controls on the composition of fluvial sands from a tropical weathering environment: Sands of the Orinoco River drainage basin, Venezuela and Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 103(12), 1622-1647. doi: 10.1130/0016-7606(1991)103<1622: COTCOF>2.3.CO;2.
- Jones, A. P. (2000). Late quaternary sediment sources, storage and transfers within mountain basins using clast lithological analysis: Pineta Basin, central Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 34(3-4), 145-161. doi: 10.1016/S0169-555X(00)00004-0.
- Kettanah, Y. A., Kettanah, M. Y., & Wach, G. D. (2014). Provenance, diagenesis and reservoir quality of the upper Triassic Wolfville formation, Bay of Fundy, Nova Scotia, Canada. *Geological Society, London, Special Publications*, 386(1), 75-110.

- doi: 10.1144/sp386.18.
- Ketzer, J. M., Holz, M., Morad, S., & Al-Aasm, I. S. (2003). Sequence stratigraphic distribution of diagenetic alterations in coal-bearing, paralic sandstones: evidence from the Rio Bonito Formation (early Permian), southern Brazil. *Sedimentology*, 50(5), 855-877. doi: 10.1046/j.1365-3091.2003.00586.x.
- Krynine, P. D. (1948). The megascopic study and field classification of sedimentary rocks. *The Journal of Geology*, 56(2), 130-165. doi: 10.1086/625492.
- Krynine, P. D. (1956). Alice in Graywackeland. *Journal of Sedimentary Research*, 26(2), 188-189.
- Lan, C., Yang, M., & Zhang, Y. (2016). Impact of sequence stratigraphy, depositional facies and diagenesis on reservoir quality: A case study on the Pennsylvanian Taiyuan sandstones, north-eastern Ordos Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 69, 216-230. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2015.09.009.
- Le Pera, E., Arribas, J., Critelli, S., & Tortosa, A. (2001). The effects of source rocks and chemical weathering on the petrogenesis of siliciclastic sand from the Neto River (Calabria, Italy): implications for provenance studies. *Sedimentology*, 48(2), 357-378. doi: 10.1046/j.1365-3091.2001.00368.x.
- Limonta, M., Garzanti, E., Resentini, A., Andò, S., Boni, M., & Bechstädt, T. (2015). Multicyclic sediment transfer along and across convergent plate boundaries (Barbados, Lesser Antilles). *Basin Research*, 27(6), 696-713. doi: 10.1111/bre.12095.
- Ma, B., Cao, Y., Eriksson, K. A., Jia, Y., & Gill, B. C. (2017a). Depositional and diagenetic controls on deeply-buried Eocene sublacustrine fan reservoirs in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 82, 297-317. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2017.02.014.
- Ma, B., Cao, Y., & Jia, Y. (2017b). Feldspar dissolution with implications for reservoir quality in tight gas sandstones: evidence from the Eocene Es4 interval, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 150, 74-84. doi: 10.1016/j.petrol.2016.11.026.
- Madukwe, H. Y., & Obasi, R. A. (2015). Classification, Maturity, Provenance, Tectonic Setting and Source-Area Weathering of the Ilubirin Stream Sediments, South West, Nigeria. *International Journal of Sciences*, 4(4), 7-21. doi: 10.18483/ijSci.661.
- Mack, G. H. (1984). Exceptions to the relationship between plate tectonics and sandstone composition. *Journal Sedimentary Research*, 54(1), 212-220. doi: 10.1306/212F83E6-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Malusà, M. G., Resentini, A., & Garzanti, E. (2016). Hydraulic sorting and mineral fertility bias in detrital geochronology. *Gondwana Research*, 31, 1-19. doi: 10.1016/j.gr.2015.09.002.
- Marconato, A. (2010). *A influência da evolução de altos estruturais em sucessões aluviais: exemplos do Ediacarano e do Cambriano da Bacia Camaquã - RS*. (Dissertação de Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.
- Mcbride, E. F. (1985). Diagenetic processes that affect provenance determinations in sandstone. In Zuf-
fa, G. G. (Ed.). *Provenance of arenites* (pp. 95-113). Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-94-017-2809-6.
- McLennan, S. M., Hemming, S., McDaniel, D.K., & Hanson, G.N. (1993). Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 284, 21-40. doi: 10.1130/SPE284-p21.
- McLennan, S. M., Taylor, S. R., & Eriksson, K. A. (1983a). Geochemistry of Archean shales from the Pilbara Supergroup, Western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(7), 1211-1222. doi: 10.1016/0016-7037(83)90063-7.
- McLennan, S. M., & Taylor, S. R. (1983b). Geochemical Evolution of Archean Shales from South Africa. I. The Swaziland and Pongola Supergroups. *Precambrian Research*, 22, 93-124. doi: 10.1016/0301-9268(83)90060-8.
- Michael, N. A. (2013). *Functioning of an ancient sediment routing system, the Escanilla Formation, South-central Pyrenees*. (Doctoral dissertation). Imperial College London, UK. 318p. doi: 10.25560/12633.
- Milliken, K. L. (1989). Petrography and composition of authigenic feldspars, Oligocene Frio Formation, South Texas. *Journal of Sedimentary Research*, 59(3), 361-374. doi: 10.1306/212F8F94-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Moecher, D. P., & Samson, S. D. (2006). Differential zircon fertility of source terranes and natural bias in the detrital zircon record: Implications for sedimentary provenance analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 247, 252-266. doi: 10.1016/j.epsl.2006.04.035.
- Morad, S., Al-Ramadan, K., Ketzer, J. M. & De Ros, L. F. (2010). The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: a review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 94, 1267-1309. doi: 10.1306/04211009178.
- Morad, S., Ketzer, J. M. & De Ros, L. F. (2000). Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. *Sedimentology*, 47, 95-120. doi: 10.1046/j.1365-3091.2000.00007.x.
- Nagtegaal, P. J. C. (1978). Sandstone-framework instability as a function of burial diagenesis. *Journal of the Geological Society*, 135(1), 101-105. doi: 10.1144/gsjgs.135.1.0101.
- Nesbitt, H. W., Fedo, C. M., & Young, G. M. (1997). Quartz and feldspar stability, steady and non-steady-state weathering, and petrogenesis of siliciclastic sands and muds. *The Journal of Geology*, 105(2), 173-192. doi: 10.1086/515908.
- Nesbitt, H. W., & Markovics, G. (1997). Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(8), 1653-1670. doi: 10.1016/S0016-7037(97)00031-8.
- Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major elemental chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885), 715-717. doi: 10.1038/299715a0.
- Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and vol-

- canic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica*, 48(7), 1523-1534. doi: 10.1016/0016-7037(84)90408-3.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., McLennan, S. M., & Keays, R. R. (1996). Effects of Chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies. *The Journal of Geology*, 104(5), 525-542. doi: 10.1086/629850.
- Odin, G. S. (1985). Significance of green particles (glaucony, berthierine, chlorite) in arenites. In Zuffa, G. G. (Ed.). *Provenance of arenites* (pp. 279-307). Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-94-017-2809-6.
- Ohta, T. (2004). Geochemistry of Jurassic to earliest Cretaceous deposits in the Nagato Basin, SW Japan: implication of factor analysis to sorting effects and provenance signatures. *Sedimentary Geology*, 171(1-4), 159-180. doi: 10.1016/j.sedgeo.2004.05.014.
- Okunuwadje, S. E., Bowden, S. A., & Macdonald, D. I. (2020). Diagenesis and reservoir quality in high-resolution sandstone sequences: An example from the Middle Jurassic Ravenscar sandstones, Yorkshire Coast UK. *Marine and Petroleum Geology*, 118, 104426. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104426.
- Palomares, M., & Arribas, J. (1993). Modern stream sands from compound crystalline sources: composition and sand generation index. *Geological Society of America, Special Paper*, 284, 313-322. doi: 10.1130/SPE284-p313.
- Parker, A. (1970). An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*, 107(6), 501-504. doi: 10.1017/S0016756800058581.
- Pettijohn, F. J. (1954). Classification of sandstones. *The Journal of Geology*, 62(4), 360-365. doi: 10.1086/626172.
- Pettijohn, F. J. (1957). *Sedimentary rocks* (2^oed). New York: Harper.
- Pettijohn, F. J. (1963). Chemical composition of sandstones, excluding carbonate and volcanic sands, In: Fleischer, M., ed., *Data of Geochemistry*, sixth edition, U. S. Geological Survey Professional Paper, 440-S, 1-21. doi: 10.3133/pp440s.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. (1972). *Sand and Sandstone*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-1-4615-9974-6
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Silver, R. (1987). *Sand and Sandstone* (2^o ed). Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-1-4612-1066-5.
- Pinto, L., Hérail, G., Moine, B., Fontan, F., Charrier, R., & Dupré, B. (2004). Using geochemistry to establish the igneous provenances of the Neogene continental sedimentary rocks in the Central Depression and Altiplano, Central Andes. *Sedimentary Geology*, 166(1-2), 157-183. doi: 10.1016/j.sedgeo.2003.12.002.
- Potter, P. E. (1978). Petrology and chemistry of modern big river sands. *Journal Geology*, 86(4), 423-449. doi: 10.1086/6497114.
- Potter, P. E., Maynard, J. B., & Depetris, P. J. (2005). *Mud and mudstones: Introduction and overview*. New York: Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/b138571.
- Remus, M. V. D., Souza, R. S., Cupertino, J. A., De Ros, L. F., Dani, N., & Vignol-Lelarge, M. L. (2008). Proveniência sedimentar: métodos e técnicas analíticas aplicadas. *Brazilian Journal of Geology*, 38(2), 166-185.
- Riebe, C. S., Sklar, L. S., Lukens, C. E., & Shuster, D. L. (2015). Climate and topography control the size and flux of sediment produced on steep mountain slopes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(51), 15574-15579. doi: 10.1073/pnas.1503567112.
- Roser, B. P., & Korsch, R. J. (1986). Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *The Journal of Geology*, 94(5), 635-650. doi: 10.1086/629071.
- Roser, B. P., & Korsch, R. J. (1988). Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67(1-2), 119-139. doi: 10.1016/0009-2541(88)90010-1.
- Schwab, F. L. (1975). Framework mineralogy and chemical composition of continental margin-type sandstones. *Geology*, 3(9), 487-490. doi: 10.1130/0091-7613(1975)3<487:FMAC-CO>2.0.CO;2.
- Schmidt, V. & McDonald, D. A. (1979). The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. In Scholle, P. A., Schluger, P. R. (Eds.). *Aspects of Diagenesis*. (v. 26, p. 175-207). Tulsa, Okla: Society for Sedimentary Geology (SEPM) Special Publications. doi: 10.2110/pec.79.26.0175.
- Shanmugam, G. (1985). Types of porosity in sandstones and their significance in interpreting provenance. In Zuffa, G. G. (Ed.). *Provenance of Arenites* (pp. 115-137). Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-94-017-2809-6.
- Smyth, H. R., Morton, A. Richardson, N., & Scott, R. A. (2014). Sediment provenance studies in hydrocarbon exploration and production: an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 386(1), 1-6. doi: 10.1144/sp386.21.
- Suttner, L. J., Basu, A., & Mack, G. H. (1981). Climate and the origin of quartz arenites. *Journal of Sedimentary Research*, 51(4), 1235-1246. doi: 10.1306/212F7E73-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Suttner, L. J., Dutta, P. K. (1986). Alluvial Sandstone Composition and Paleoclimate: I, Framework Mineralogy. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56, 329-345. doi: 10.1306/212F8909-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Taylor, S. R., & McLennan, S. M. (1995). The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2), 241-265. doi: 10.1029/95RG00262.
- Trimble, S.W. (1995). Catchment sediment budgets and change. In: Gurnell, A., Petts, G. Eds., *Changing River Channels* (pp. 207-215). Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Tobin, R. C., & Schwarzer, D. (2014). Effects of sandstone provenance on reservoir quality preservation in the deep subsurface: experimental model-

- ling of deep-water sand in the Gulf of Mexico. *Geological Society, London, Special Publications*, 386(1), 27-47. doi: 10.1144/sp386.17.
- Van de Kamp, P. C., & Leake, B. E. (1985). Petrography and Geochemistry of Feldspathic and Mafic Sediments of the Northeastern Pacific Margin. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 76(4), 411-449. doi: 10.1017/S02635933000106464.
- Vincent, S. J., Hyden, F., & Braham, W. (2014). Along-strike variations in the composition of sandstones derived from the uplifting western Greater Caucasus: causes and implications for reservoir quality prediction in the Eastern Black Sea. *Geological Society, London, Special Publications*, 386(1), 111-127. doi: 10.1144/sp386.15.
- Von Eynatten, H., Tolosana-Delgado, R., & Karius, V. (2012). Sediment generation in modern glacial settings: Grain-size and source-rock control on sediment composition. *Sedimentary Geology*, 280, 80-92. doi: 10.1016/j.sedgeo.2012.03.008.
- Von Eynatten, H., Tolosana-Delgado, R., Karius V., Bachmann, K., & Caracciolo, L. (2016). Sediment generation in humid Mediterranean setting: Grain-size and source-rock control on sediment geochemistry and mineralogy (Sila Massif, Calabria). *Sedimentary Geology*, 336, 68-80. doi: 10.1016/j.sedgeo.2015.10.008.
- Weltje, G. J. (2012). Quantitative models of sediment generation and provenance: State of the art and future developments. *Sedimentary Geology*, 280, 4-20. doi: 10.1016/j.sedgeo.2012.03.010.
- Weltje, G. J., Bertrand, S., & Chew, D. (2018). Introduction to the special issue "Analysis of sediment properties and provenance: Tools for palaeo-environmental reconstruction." *Sedimentary Geology*, 375, 1-4. doi: 10.1016/j.sedgeo.2018.09.006.
- Weltje, G. J., & Von Eynatten, H. (2004). Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook. *Sedimentary Geology*, 171(1-4), 1-11. doi: 10.1016/j.sedgeo.2004.05.007.
- Wilson, M. D. (1994). *Reservoir quality assessment and prediction in clastic rocks*, (Vol. 30). Tulsa, Okla: Society for Sedimentary Geology (SEPM). doi: 10.2110/scn.94.30.
- Worden, R. H., Armitage, P. J., Butcher, A. R., Churchill, J. M., Csoma, A. E., Hollis, C., & Omma, J. E. (2018). Petroleum reservoir quality prediction: overview and contrasting approaches from sandstone and carbonate communities. *Geological Society, London, Special Publications*, 435(1), 1-31. doi: 10.1144/SP435.21.
- Worden, R. H., & Burley, S. D. (2003). Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone. *Sandstone diagenesis: Recent and ancient*, 4, 3-44. doi: 10.1002/9781444304459.ch.
- Worden, R. H., & Morad, S. (2000). Quartz cementation in oil field sandstones: a review of the key controversies. In Worden, R. H., & Morad, S. (Eds.). *Quartz cementation in sandstones* (pp. 1-20). Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Zaid, S. M. (2013). Provenance, diagenesis, tectonic setting and reservoir quality of the sandstones of the Kareem Formation, Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 85, 31-52. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2013.04.010.
- Zimmermann, U., & Bahlburg, H. (2003). Provenance analysis and tectonic setting of the Ordovician clastic deposits in the southern Puna Basin, NW Argentina. *Sedimentology*, 50(6), 1079-1104. doi: 10.1046/j.1365-3091.2003.00595.x.
- Zuffa, G. G. (1985). *Provenance of Arenites*. Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media. 408p.