

PKS

PUBLIC
KNOWLEDGE
PROJECT

REVISTA DE
GEOGRAFIA

Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPE

OJS

OPEN
JOURNAL
SYSTEMS

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia>

Marcadores geoquímicos na distinção estratigráfica e suas aplicações em geomorfologia

Daniel Rodrigues de Lira¹ - <https://orcid.org/0000-0001-9559-2480>
Antonio Carlos de Barros Corrêa² - <https://orcid.org/0000-0001-9578-7501>
José Danilo da Conceição Santos³ - <https://orcid.org/0009-0007-6830-5803>
Drielly Naamaa Fonseca⁴ - <https://orcid.org/0000-0002-1374-8697>

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil *

² Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brasil **

³ Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brasil ***

⁴ Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile ****

Artigo recebido em 31/10/2024 e aceito em 05/11/2024

RESUMO

A geoquímica focada na paisagem surgiu na Rússia na metade do século XX, visando entender a dinâmica das formações superficiais por meio da análise de elementos químicos. Esses elementos, afetados por intemperismo, oferecem insights sobre a evolução da paisagem. A pesquisa consistiu em uma revisão bibliográfica de teses e artigos, abordando a geoquímica das formações superficiais, a assinatura geoquímica de materiais transportados e a utilização de índices geoquímicos para identificar proveniência e grau de intemperismo. As formações superficiais, são produtos do intemperismo e suas reações químicas variam conforme as condições ambientais e a composição mineralógica. A mobilidade dos elementos durante o intemperismo é influenciada pela lixiviação, com elementos maiores sendo mais móveis que os traços. Cada paisagem apresenta uma assinatura geoquímica específica, refletindo a mineralogia local, os elementos marcadores se distribuem de forma a indicar o grau de intemperismo e a proveniência dos materiais. A análise de relações molares entre elementos permite caracterizar o intemperismo e o ambiente deposicional. Vários estudos demonstraram que mudanças nas relações de elementos como Ti/Zr indicam transporte de materiais e condições paleoambientais. A geoquímica se mostra fundamental para a geomorfologia do Quaternário, permitindo a identificação de processos de formação e transporte de materiais, além de fornecer informações sobre a proveniência, intemperismo e ambientes deposicionais, contribuindo para reconstituições paleoambientais no Brasil, especialmente no Nordeste.

Palavras-chave: índices geoquímicos; geomorfologia do Quaternário; formações superficiais; ambientes deposicionais; geoquímica da paisagem.

* Professor do Departamento de Ciências Geográficas da UFPE. E-mail: daniel.rlira@ufpe.br

** Professor do Departamento de Ciências Geográficas da UFPE. E-mail: antonio.correa@ufpe.br

*** Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPE. E-mail: jose.danilo@ufpe.br

**** Professora do Departamento de Industria da UTEM (Chile). E-mail: dfonseca@utem.cl

Geochemical markers in the stratigraphic distinction and its applications in geomorphology

ABSTRACT

Landscape-focused geochemical emerged in Russia in the mid-20th century, aiming to understand the dynamics of surface formations through the analysis of chemical elements. These elements, affected by weathering, provide insights into landscape evolution. The research consisted of a bibliographic review of theses and articles, addressing the geochemical of surface formations, the geochemical signature of transported materials, and the use of geochemical indices to identify the provenance and degree of weathering. Surface formations are products of weathering, and their chemical reactions vary according to environmental conditions and mineralogical composition. The mobility of elements during weathering is influenced by leaching, with major elements being more mobile than trace elements. Each landscape exhibits a specific geochemical signature, reflecting local mineralogy, and marker elements are distributed in a way that indicates the degree of weathering and the provenance of materials. Analyzing molar relationships between elements allows for the characterization of weathering and depositional environments. Various studies have demonstrated that changes in element ratios, such as Ti/Zr, indicate the transport of materials and paleoenvironmental conditions. Geochemical proves essential for Quaternary geomorphology, enabling the identification of processes of material formation and transport as well as providing information on provenance, weathering, and depositional environments, contributing to paleoenvironmental reconstructions in Brazil, especially in the Northeast.

Keywords: geochemical indices; Quaternary geomorphology; surface formations; depositional environments; landscape geochemistry.

Marcadores geoquímicos en distinción estratigráfica y sus aplicaciones en geomorfología

RESUMEN

La geoquímica centrada en el paisaje surgió en Rusia a mediados del siglo XX, con el objetivo de entender la dinámica de las formaciones superficiales a través del análisis de elementos químicos. Estos elementos, afectados por la meteorización, ofrecen perspectivas sobre la evolución del paisaje. La investigación consistió en una revisión bibliográfica de tesis y artículos, abordando la geoquímica de las formaciones superficiales, la firma geoquímica de materiales transportados y la utilización de índices geoquímicos para identificar la proveniencia y el grado de meteorización. Las formaciones superficiales son productos de la meteorización y sus reacciones químicas varían según las condiciones ambientales y la composición mineralógica. La movilidad de los elementos durante la meteorización está influenciada por la lixiviación, siendo los elementos mayores más móviles que los traza. Cada paisaje presenta una firma geoquímica específica, reflejando la mineralogía local; los elementos marcadores se distribuyen de tal manera que indican el grado de meteorización y la proveniencia de los materiales. El análisis de relaciones molares entre elementos permite caracterizar la meteorización y el ambiente de deposición. Varios estudios han demostrado que cambios en las relaciones de elementos como Ti/Zr indican el transporte de materiales y condiciones paleoambientales. La geoquímica se revela fundamental para la geomorfología del Cuaternario, permitiendo la identificación de procesos de formación y transporte de materiales, además de proporcionar información sobre la proveniencia, la meteorización y los ambientes de deposición, contribuyendo a reconstrucciones paleoambientales en Brasil, especialmente en el Nordeste.

Palabras clave: índices geoquímicos; geomorfología del Cuaternario; formaciones superficiales; ambientes de deposición; geoquímica del paisaje.

INTRODUÇÃO

A geoquímica focada na paisagem teve início em meados do século XX na Rússia, com o objetivo de compreender a dinâmica das coberturas superficiais do modelado terrestre através da análise do comportamento dos elementos químicos frente aos processos de intemperismo, permitindo a compreensão evolutiva da paisagem (Mirlean *et al.*, 2006). O termo cobertura superficial busca evitar a conotação estritamente geológico-estratigráfica da expressão “Formações superficiais” e refere-se a uma designação geral para todos os materiais superficiais sobrepostos à rocha sã, que compreendem desde o manto de intemperismo “*in situ*” até material alóctone transportado, resultante de determinadas formas de transportes, em condições morfogenéticas específicas (Ab’Saber, 1969).

A análise geoquímica vem sendo uma aliada no que tange aos estudos geomorfológicos e tem sido desenvolvida em materiais superficiais de diferentes origens, destacando-se os sedimentos fluviais, de encosta e dunas (Lira, 2014; Tavares, 2020; Silva, 2024; Santos, 2024; Fonsêca *et al.*, 2024), onde seus arcabouços químicos podem fornecer informações a respeito de sua proveniência, grau de intemperismo, ambiente deposicional e contexto tectônico (Bastia *et al.*, 2020; Parthasarathy *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022; Chauhan *et al.*, 2022; Fazal *et al.*, 2022; Tapía *et al.*, 2022).

Sua aplicação é pautada no princípio dos elementos maiores (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti e P) e traços (Zr, Ba, Cu, Ga, Nb, Ni, Pb, S, Sr, V, Zn), ou seja, a partir dos processos de lixiviação e intemperismo os elementos maiores tendem a serem mais móveis, enquanto os elementos traços, imóveis. Assim, esses elementos podem servir como uma memória da paisagem (Fonsêca *et al.*, 2024), os quais através da utilização de índices geoquímicos, por meio de suas relações binárias e ternárias, fornecem pistas sobre a origem, diferenciação estratigráfica e grau de alteração química das formações superficiais quaternárias.

Contudo, tendo em vista a crescente utilização da análise geoquímica e sua importância para os estudos geomorfológicos, principalmente a partir da utilização de índices geoquímicos, a presente contribuição tem por objetivo realizar uma revisão do estado da arte sobre a geoquímica das coberturas superficiais, abordando o papel da assinatura geoquímica na caracterização dos materiais transportados, assim como a utilização de índices geoquímicos como indicadores de proveniência, grau de intemperismo, além de ambiente e hiato deposicional, este último de grande relevância para a identificação de páleo-superfícies expostas correntemente inumadas, sobretudo aquelas cujas estruturas sedimentares não permitem a identificação direta de discontinuidades deposicionais na escala dos afloramentos.

METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo proposto a pesquisa realizou uma revisão bibliográfica pautada nas leituras de teses e dissertações, assim como de artigos científicos nacionais e internacionais. As pesquisas bibliográficas foram realizadas baseadas nas palavras-chave: “Geoquímica”, “Assinatura Geoquímica”, “Coberturas Superficiais”, “Índices Geoquímicos”, “Índices de Proveniência”, “Índices de Intemperismo Químico” e “Índices Geoquímicos de Paleoambiente”. Em seguida, foram organizados tópicos que discutiram a geoquímica das coberturas superficiais, assinatura geoquímica na caracterização dos materiais transportados e índices geoquímicos como indicadores de proveniência, grau de intemperismo e ambiente deposicional. Assim, no tópico sobre a geoquímica das coberturas superficiais buscou-se abordar a mobilidade dos elementos químicos frente aos processos de intemperismo. Enquanto na seção sobre a assinatura geoquímica na caracterização dos materiais transportados, objetivou-se discutir de maneira aprofundada os princípios sobre os elementos móveis e imóveis. Por fim, no último tópico, procurou-se evidenciar a utilização de índices geoquímicos como indicadores de proveniência, grau de intemperismo e ambiente deposicional dos materiais superficiais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Geoquímica das Coberturas Superficiais

Os materiais que compõem as coberturas superficiais são produtos do intemperismo da rocha exposta às condições ambientais, em flagrante desequilíbrio em termos de temperatura e pressão em relação às suas condições originais de formação (Birkeland, 1984; Ollivier & Pain, 1996). Dentre os fatores que alteram a estrutura e composição primária dos estoques litológicos, o intemperismo químico constitui-se no processo pelo qual os agentes atmosféricos, hidrosféricos e biosféricos agindo e reagindo com os minerais constituintes das rochas, na superfície da crosta, produzem novas fases mineralógicas, relativamente mais estáveis face às condições ambientais vigentes, pelo processo de trocas químicas: remoção dos componentes mais solúveis, adição de hidroxilas, CO₂ e O₂.

As alterações que ocorrem durante o intemperismo químico levam à alteração dos minerais das rochas através de complexas e variadas reações que dependem das composições químicas e mineralógicas do material de origem e das condições do intemperismo, (Bigarella *et al.*, 1994).

Os materiais decompostos através do intemperismo são removidos do sistema por lixiviação ou reagem com outros constituintes formando uma variedade de produtos cristalinos e amorfo. De

acordo com Birkeland (1984) os produtos mais comumente observados das reações são os minerais de argila e oxi-hidróxidos de alumínio e ferro.

Butt *et al* (2000) resumizam por meio de um quadro-síntese a distribuição dos elementos de acordo com sua lixiviação e retenção durante o intemperismo e a transformação dos minerais (Quadro 1). Esses autores ressaltam, contudo, que esse sumário é uma simplificação e que, portanto, deve-se ter em mente que nenhum metal é inteiramente inalterado pelo intemperismo, ao passo que nenhum elemento é inteiramente lixiviado de qualquer horizonte do regolito e que nenhum elemento é inteiramente imóvel.

Quadro 1 - Mobilidade dos elementos durante o intemperismo sobre condições predominantemente úmidas

Mobilidade sobre condições predominantemente úmidas		
Minerais que contêm os elementos	Lixiviados	Parcialmente retidos em minerais secundários
<i>Liberados na frente do intemperismo</i>		
Sulfetos	As, Au, Cd, Co, Cu, Mo, Ni, Zn, S	As, Cu, Ni, Pb, Sb, Zn (óxidos de Fe; sulfatos, arsenatos, carbonatos, alunita-jarosita)
Carbonatos	Ca, Mg, Fe, Mn, Sr	
<i>Liberados no saprólito inferior</i>		
Aluminossilicatos	Ca, Cs, K, Na, Rb	Si, Al (caulinita); Ba (barita)
Ferromagnesianos (piroxênio, olivina, anfibólios, clorita, biotita)	Ca, Mg	Fe, Ni, Co, Cr, Ga, Mn, Ti, V (óxidos de Fe e Mn)
<i>Liberados no saprólito superior</i>		
Aluminossilicatos (muscovita)	Cs, K, Rb	Si, Al (caulinita)
Ferromagnesianos (clorita, talco, anfibólio)	Mg, Li	Fe, Ni, Co, Cr, Ga, Mn, Ti, V (óxidos de Fe)
Esmectitas	Ca, Mg, Na,	Si, Al (caulinita)
<i>Liberados nas zonas mosqueada e ferruginosa</i>		
Aluminossilicatos (muscovita, caulinita)	K, Rb, Cs	Si, Al (caulinita)
Óxidos de Fe; ouro	Elementos traço; Au	
<i>Retidos em minerais estáveis</i>		
B, Cr, Fe, Hf, K, Nb, Rb, REE, Th, Ti, V, W, Zr, Au		

Fonte: Butt *et al* (2000)

Taylor & Enggleton (2001) e Thornber (1992) chamam atenção para o fato de que elementos insolúveis podem ter certa mobilidade como partícula coloidal, ou seja, através do processo de neoformação de argilos minerais. Como exemplo, cita-se que o titânio (Ti), considerado imóvel, mas que pode se movimentar como partícula coloidal como anatásio, mineral secundário formado pela precipitação do titânio. Paton (1978) afirma que a sílica e o alumínio são imóveis podendo se mover somente sobre curtas distâncias como partículas coloidais. Uma pequena quantidade de sílica, na forma de H_4SiO_4 , pode se mover sobre grandes distâncias. Entretanto o ferro, em áreas da superfície altamente oxigenadas sobre a forma férrea Fe^{3+} , resulta altamente imóvel e inerte.

Produtos residuais do intemperismo são agrupados comumente sob a forma de minerais resistentes ou resistatos. Além do quartzo, Taylor & Enggleton (2001) destacam outros minerais resistentes que ocorrem como componentes traços na rocha de origem, mas que são concentrados por depleção durante o processo de intemperismo. Os mais comuns são o zircão, rutilo, ilmenita, granada e magnetita (e outros espinélios), turmalina e monazita. Alguns minerais podem ser ainda intemperizados em fases secundárias como, por exemplo, a hematita, a goethita e a gibsitita, que são mais estáveis em condições de alteração superficial, se mantendo também como minerais resistentes.

Assinatura Geoquímica na Caracterização dos Materiais Transportados

Taylor & Enggleton (2001) afirmam que as associações entre elementos marcadores e a mineralogia resultam em uma distribuição geoquímica dentro do perfil de intemperismo em vários ambientes, tendo cada um destes ambientes uma característica mineralógica, e consequentemente, uma assinatura geoquímica.

Butt *et al* (2000) apresentam de forma simplificada uma sequência da evolução do manto de intemperismo em zonas tropicais, mostrando a evolução geoquímica dos materiais. Na parte inferior o processo de intemperismo causa a destruição de feldspatos e minerais ferromagnesianos. Sódio (Na) e Cálcio (Ca) são lixiviados de forma que Sílica (Si) e Alumínio (Al) ficam retidos como caulinita e halloysita, sendo que as esmectitas podem ser produtos intermediários. Na parte média e superior do saprólito ocorre a alteração de todos os minerais primários, mas a maioria dos minerais se mantém, enquanto minerais secundários menos estáveis, como as esmectitas.

Taylor & Enggleton (2001) acrescentam que por definição a parte superior do saprólito mantém a estrutura do material de origem (isoalterita), contudo, poucos minerais primários se mantêm inalterados. A isalterita apresenta características morfológicas herdadas da rocha e características químicas e mineralógicas parcialmente herdadas e parcialmente oriundas dos controles de alteração,

desta forma resulta em uma alteração isovolumétrica, ou seja, onde o volume do material parental é mantido na paisagem, mas com perda de matéria; ou seja, diminuição da densidade total (Chatelin, 1974; Boulangé, 1984).

A maioria dos minerais primários maiores remanescentes, exceto o quartzo, são comumente destruídos na parte superior do perfil logo acima do saprólito. A principal característica dessa zona é a predominância da Si, Al e Fe, na forma de caulinita, quartzo e óxidos de ferro (hematita e goethita) e gibsitita. As distribuições de vários elementos menores e traço são controlados totalmente ou em parte por esses elementos maiores devido à substituição ou co-precipitação. Assim o cromo, entre outros elementos tende a se acumular com óxidos de ferro e é derivado principalmente de minerais ferromagnesianos, sendo também associado com caulinita neoformada (Butt *et al*, 2000).

Para Campy e Macaire (1989) a seção superior do perfil é designada de aloalterita, e apresenta características morfológicas em função da pedoturbação. As características químicas e mineralógicas já decorrem da pedogênese, com perda substantiva da estrutura e volume original da rocha, destruição progressiva das feições de sustentação das estruturas primárias, e remobilizações importantes, geralmente de caráter argiloso.

Muitos elementos “imóveis” também tendem a se concentrar com óxidos de ferro em horizontes lateríticos embora, para a maioria, interações químicas não sejam envolvidas. Desse modo, a distribuição de Cromo (Cr), Potássio (K), Zircônio (Zr), Titânio (Ti) entre outros se relacionam totalmente, ou em parte, às suas inércias durante o intemperismo, a qual ocorre devido as suas imobilidades químicas relativas (exemplo, Ti) e/ou à estabilidade de seus minerais primários e/ou secundários que os contêm (exemplo, Zr no zircão; Ti no rutilo e anatásio; Cr na cromita; K na muscovita) (Butt *et al*, 2000).

A abundância destes elementos tende a diminuir em direção a parte superior do perfil devido à gradual perda de outros componentes, que marcam acumulação no resíduo, dentro do qual uma dispersão lateral pode ocorrer por ação de coluvionamento durante o curso da evolução do perfil (Butt *et al* 2000). Taylor e Enggleton (2001) salientam que os produtos residuais do intemperismo contêm progressivamente, grande proporção de cada mineral da rocha de origem em profundidade no perfil. Em virtude disso, em muitas paisagens em que há alguma erosão na superfície, a quantidade absoluta de qualquer mineral residual particular pode crescer na parte inferior ou superior do perfil, mas a variedade desses minerais residuais geralmente decresce na sua parte superior.

Discutindo o grau e o tipo de alteração, Pedro *et al.*, (1975) asseveram que o grau de alteração depende das condições climáticas. Os autores estabelecem diferenças entre os climas úmido e frio, temperado ou árido e climas quentes e úmidos da zona tropical. Sob condições de clima úmido/frio, temperado ou árido, a alteração atinge os minerais mais susceptíveis quimicamente, resultando em uma alteração diferencial “diacrônica”, com discreta neoformação de minerais supérgenos. Os argilominerais são herdados ou transformados e resultantes de uma discreta evolução cristalquímica em fase sólida. Já nos climas quentes e úmidos da zona tropical a alteração atinge todos os minerais primários simultaneamente, o que se denomina de alteração sincrônica. Neste ambiente a neoformação prevalece e os minerais secundários são neoformados.

Essa distribuição dos minerais está baseada no fato de que os depósitos residuais são produtos do intemperismo diferencial e da lixiviação, responsáveis pela remoção de elementos relativamente mais solúveis do perfil de intemperismo, deixando os elementos de mais baixa mobilidade (Birkeland, 1984; Friedrich *et al.*, 1992; Mcfarlane *et al.*, 1994; Taylor & Enggleton, 2001). Desta forma, a tendência de acumulação ou depleção de uma curva de elementos “imóveis” pode seguir um padrão normal, que seria dada pela sequência normal do intemperismo ou o inverso ao comportamento esperado ao longo do perfil, em casos em que houve dispersão lateral do material, considerando que as descontinuidades podem interromper tendências dentro das curvas de concentração, produzindo variações bruscas em seu comportamento.

Taylor & Enggleton (2001) destacam que as propriedades mineralógicas e químicas são comumente utilizadas para determinar a natureza do material de origem do solo e sedimentos, se ele foi formado *in situ*, transportado ou misto. Esses autores explicam que, por exemplo, solos desenvolvidos sobre rochas ígneas ou metamórficas são geralmente enriquecidos de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 .

Resende *et al.* (2002) destaca que uma curva de distribuição de espécies minerais resistentes – ou elementos químicos que os representam, que se apresente suave e contínua deve indicar um intemperismo gradativo, enquanto bruscas variações devem indicar diferenças no material de origem ou diferentes fases de deposição, caso o material seja transportado.

Cruz (2006) ressalta essa colocação ao expor que, ao considerar-se uma acumulação absoluta ou relativa ou depleção de certos elementos tem que se assumir que há alguns minerais que permanecem inalterados durante o intemperismo. Contudo, em determinadas condições, elementos como Zr e o Ti, considerados mais inertes durante o intemperismo, podem se mobilizar.

Associados à composição química dos elementos menos móveis, os minerais pesados também são utilizados na identificação da gênese do material à medida que muitos deles tendem a se conservar durante o intemperismo. Assim esses minerais são utilizados para demonstrar se os solos foram formados de materiais de origem *in situ* ou uniforme em oposição a um material de origem mista (Taylor & Enggleton, 2001).

A maioria dos minerais resistentes é mais denso que muitos minerais silicatados e minerais neoformados. Os minerais pesados por ter alto peso específico tendem a se concentrar como lentes e camadas à medida que eles são erodidos, transportados, selecionados e depositados. Segundo Friedrich *et al* (1992) o grau de intemperismo de minerais pesados geralmente aumenta da parte inferior para a parte superior do perfil *in situ* e a mistura de grãos fortemente intemperizados e menos intemperizados de um mineral pode indicar retrabalhamento e transporte.

Índices Geoquímicos como Indicativo de Proveniência, Grau de Intemperismo e Paleoambiente

A geoquímica também pode servir para caracterizar e medir o grau de intemperismo químico dos materiais sedimentares, como também o ambiente deposicional no qual esses sedimentos foram formados. Isso pode ser alcançado através das relações molares entre os elementos maiores (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti e P) e elementos traço (Zr, Ba, Cu, Ga, Nb, Ni, Pb, S, Sr, V, Zn), viabilizada pela utilização de índices geoquímicos. Neste sentido, destaca-se vários trabalhos que têm utilizado a análise geoquímica com o intuito de estabelecer a origem, grau de intemperismo e o ambiente deposicional das formações superficiais, sobretudo nos materiais coluviais, aluviais e de dunas (Tsai & Chen, 2000; Oliveira & Jiménez-Rueda, 2002; Touni *et al*, 2003; Cruz, 2006; Oliveira *et al.*, 2009; Lira, 2014; Tavares, 2020; Carvalho, 2022; Santos, 2024; Fonsêca *et al.*, 2024).

Tsai & Chen (2000), Oliveira & Jiménez-Rueda (2002) e Touni *et al* (2003), utilizando a proposição entre o Zr/Ti dada por: Desvio: $(Ti/Zr_s - Ti/Zr_p)$, onde S: solo e P: material de origem, que comumente exibem tendências similares e uniformes através dos perfis de solo. Entretanto, mudanças abruptas na concentração dos elementos nos contatos do *solum* e horizonte C nos perfis das sequências de solo juntamente com tendências de acréscimo de material em direção ao topo do perfil sugerem transportes de materiais. Assim, a constatação pelos autores de uma mudança abrupta e o aumento na relação Ti/Zr em direção ao topo do solo sugeriram sedimentação de material alóctone associado com um acréscimo de material de outras origens.

Cruz (2006), baseando-se no mesmo princípio da relação Ti/Zr para estudar as unidades coluviais do Rio Grande - Depressão de Gouveia/MG, evidenciou que o material transportado

apresenta características totalmente distintas às da rocha mãe, assim como foram retrabalhados possuem características diferentes das esperadas. Enquanto Oliveira *et al* (2009), na mesma perspectiva em estudo na Ilha Rata, Fernando de Noronha – PE, com a finalidade de quantificar as perdas e ganhos absolutos em relação à rocha mãe durante o processo de alteração intempérica, constataram uma provável origem alóctone dos materiais estudados, evidenciada pelo aumento da razão molar entre o Ti/Zr ao longo do perfil.

Lira (2014), com o objetivo de evidenciar a sequência de atuação do intemperismo, avaliando possíveis descontinuidades dos depósitos coluviais, aluviais e de dunas presentes na bacia do Riacho do Pontal e GI-8 no sub-médio São Francisco, utilizou a razão molar entre $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ (Ki) e a razão entre $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Kr). O autor aponta que, a partir dessas razões, sedimentos com Ki maior que 2,2 e Kr maior que 0,75 são classificados como sialíticos, ricos em Sílica e Alumínio, caracterizados como pouco intemperizados. Já os materiais com a razão Ki menor que 2,2 e Kr maior que 0,75 são considerados alíticos, indicando pouca quantidade de Sílica e alta de Alumínio, sendo classificados como mais intemperizados. Por último, materiais com Ki menor que 2,2 e Kr menor que 0,75 são classificados como Ferralíticos, apresentando baixa quantidade de Sílica e elevadas quantidades de Ferro e Alumínio, caracterizando-se como muito intemperizados.

Desta forma, Lira (2014) constatou que os sedimentos presentes na bacia do Riacho do Pontal e GI-8 no sub-médio São Francisco são poucos intemperizados ao apresentarem razão Ki maior que 2,2 e Kr maior que 0,75, sendo considerados materiais sialíticos, ricos em Sílica e Alumínio, havendo se desenvolvido sob condições hidrolíticas de alteração. Outrossim, o autor assevera que a elevada razão entre Ki e Kr também evidencia que o substrato rochoso da área fonte é rico em Sílica, principalmente na forma de quartzo, indicando a ocorrência de transporte curto.

Tavares (2020), também aplicando as razões Ki e Kr, mediu o grau de amadurecimento geoquímico de três perfis estratigráficos com idades previamente conhecidas (Corrêa, 2001; Tavares, 2015), denominados de perfis Grilo, Jatiúca e São José de Princesa, localizados no Maciço Serra da Baixa Verde -PE. O autor comprovou que as seções estratigráficas mais antigas apresentam maior grau de amadurecimento geoquímico, enquanto os sedimentos com menor grau de amadurecimento são aqueles que ficaram menos tempo em exposição na superfície, sendo inumados pelas camadas mais jovens que acabaram por preservá-los.

Carvalho (2022), estudando os depósitos coluviais e aluviais do Maciço da Serra Negra, em Poço Redondo – SE, fez uso do índice de Intensidade do Intemperismo – WIP e o Índice de Alteração Química

– CIA (Nesbitt e Young, 1982) com o intuito de medir o grau de lixiviação dos elementos no ambiente de deposição, assim como a intensidade do intemperismo e seu grau de alteração. O índice WIP, foi desenvolvido com base nas proporções dos elementos alcalinos e alcalinos-terrosos (Parker, 1970; Guo *et al.*, 2018). Por sua vez, o índice CIA também concatena as relações molares entre os metais, metais alcalinos e alcalinos-terrosos. Os resultados apontaram que tais sedimentos têm origem nas superfícies saprolíticas pouco intemperizadas das áreas elevadas do maciço, e que sob a ação de eventos climáticos extremos foram carregados e depositados ora em espaços de acomodação situados nas encostas, ou a depender da magnitude dos eventos, foram levados até os níveis da base locais, entulhando os canais.

Em trabalho recente, Fonsêca *et al.*, (2024) aplicaram índices geoquímicos em conjunto com outras técnicas analíticas, a exemplo da granulometria e geocronologia através da luminescência opticamente estimulada – LOE, que permitiu realizar uma reconstituição paleoambiental a partir da análise de sedimentos colúvio-aluviais do setor Norte do Piemonte da Borborema, no estado de Pernambuco. Os autores empregaram os índices de Ruxton – RI, de Alteração Química – CIA e de Paleoambiente de maneira conjunta, os quais possibilitaram evidenciar que os sedimentos analisados apresentam níveis de intemperização distintos, assim como os ambientes deposicionais evidenciam variações paleoambientais entre condições úmidas, semiúmidas, áridas e semiáridas, ocorridas ao longo do Quaternário superior, corroborando estudos já consagrados na literatura que discutem a dinâmica climática quaternária do Nordeste brasileiro (Corrêa *et al.*, 2001; Lira, 2014; Galvão, 2019; Fonsêca, 2018; Lima *et al.*, 2023; Santos, 2024).

Na mesma perspectiva, Santos (2024) também fez uso dos índices de RI, CIA e de Paleoambiente, ao estudar os depósitos colúvio-aluviais da Bacia Hidrográfica do Riacho do Meio (BHRM), alicerçados pelas análises granulométricas e geocronológicas. O autor constatou que os sedimentos presentes na BHRM estão em estágio de amadurecimento geoquímico elevados e que seu ambiente de formação se deu em fases climáticas semiúmidas, áridas e semiáridas ao longo do Quaternário superior, estando em consonância com os resultados apresentado por Fonsêca *et al.*, (2024) e de outros estudos já realizados na região do Nordeste Brasileiro (Missura, 2013; Silva, 2013; Cabral, 2014; Lira, 2014; Galvão, 2019; Lima *et al.*, 2023).

Sob a perspectiva de integração dos estudos de geomorfologia e geoarqueologia em estudo em sítios arqueológicos na região da Serra da Capivara, PI, Moraes *et al.*, (2019) analisaram como atividade humana provoca mudanças e incrementos nas assinaturas físico-químicas das coberturas superficiais, modificando a concentração de determinados elementos por meio do processo de agregação molecular e

alteração de sua composição física, através da adição de elementos alóctones ou substituição de outros pré-existentes.

Neste sentido, o estudo da situação geomorfológica dos depósitos aliado à análise da composição dos sedimentos oriundos de diferentes perfis forneceram indícios relativos à sua origem, bem como função cultural de determinados tipos de substratos ou práticas de ocupação das populações que ocuparam um dado nível estratigráfico ora inumado. A presença humana sobre esses sedimentos, coluviais ou alúvio-coluviais, modificam o ciclo natural de formação do solo, e resultam em uma série de alterações no substrato de ocupação por meio da agregação de resíduos diversos que ao serem incorporados à antiga superfície exposta dos depósitos acabam induzindo a um intemperismo diferencial que modifica física e quimicamente o sítio ocupado (Manzanilla, Barba 1994; Wilson *et al.*, 2008; Villagran e Schaefer, 2011; Moraes *et al.*, 2013). Esses signos de alteração ficam preservados nas sequências estratigráficas e podem recuperados pela análise quimioestratigráfica de perfis detalhados, mesmo quando as estruturas primárias de deposição e discordâncias erosivas não são prontamente discerníveis no afloramento.

As concentrações de fósforo encontradas pelos autores mostraram variação entre os níveis de deposição sedimentar e o material parental como também variação entre os níveis de sedimentação coluvial. Verificou-se ainda que a presença do fósforo em antigas superfícies de ocupação humana poderia associada à presença concomitante de Al, Fe e Ca, cujos teores mais elevados também podem ser atribuídos à ocupação antrópica, o que pode ser corroborado pelo registro já conhecido de materiais arqueológicos para as áreas estudadas, sob a forma de pinturas rupestres, material lítico e fogueiras.

Apesar da ocorrência de fosfatos no solo estar subordinada a diversos fatores, como a proveniência geológica do material parental, a textura dos sedimentos e a solubilidade, em virtude das características físicas e químicas (textura, mineralogia, capacidade de adsorção de ânions, pH, teores de Ca, Mg, P, Fe, Al, etc.) identificadas nos perfis, as concentrações de fosfatos ($PO_{4.3}$) identificadas pelos autores nas coberturas superficiais estudadas (rampas de colúvio e de colúvio-alúvio) demonstraram ser uma ferramenta apropriada na caracterização de depósitos afetados pela ação humana.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os marcadores geoquímicos são fundamentais para entender as interações entre processos geológicos e ambientais, pois eles ajudam a identificar e caracterizar formações geológicas, revelando informações sobre a proveniência, história de transporte de sedimentos e até mesmo a presença eventual de ocupação humana sobre antigas superfícies geomórficas agora inumadas. Além disso, a

utilização de técnicas associadas à aplicação de índices tem ampliado a capacidade de análise de traços químicos, permitindo uma maior resolução nas distinções estratigráficas, uma vez que cada ambiente deposicional possui uma assinatura geoquímica distinta.

Estudos recentes demonstram que as diferenças nas concentrações de elementos como Ti, Zr e REE (Elementos Terras Raras) podem indicar não apenas a origem dos materiais, mas também as condições paleoambientais. Nesse contexto, a interpretação das relações molares entre elementos é crucial para a caracterização dos processos de meteorização e sedimentação, sendo que modelos estatísticos e geomatemáticos são frequentemente aplicados para explorar essas relações de forma mais aprofundada.

Por outro lado, para a caracterização de coberturas superficiais remobilizadas (colúvios e alúvios) associadas à paleo-ocupação humana é mister interpretar com cautela o significado do impacto físico-químico da presença de certos marcadores nas sequências estratigráficas, estabelecendo horizontes de controle associados à rocha mãe (ex: saprólito) a serem confrontados com níveis associados à presença humana no local. Desta forma, pode-se mais eficazmente aferir seus significados geomorfológico, pedológico, vegetacional e cultural. Com efeito, o emprego de marcadores geoquímicos, a níveis estratigráficos previamente escolhidos permite recompor a dinâmica e evolução ambiental das paleopaisagens, como demonstrado em estudos interdisciplinares entre geomorfologia e geoarqueologia mediante o estudo da concentração de fósforo ao longo dos perfis.

Ademais, a geoquímica desempenha um papel vital na compreensão da evolução do relevo, pois a análise de marcadores geoquímicos pode ajudar a identificar eventos tectônicos, mudanças climáticas e processos de erosão que moldaram as paisagens. Por outro lado, os estudos geoquímicos também fornecem insights valiosos sobre a paleoecologia, contribuindo para a reconstrução de ambientes antigos e para a compreensão de como as paisagens responderam a mudanças climáticas ao longo do tempo.

Outrossim, levando em consideração a complexidade nos processos de erosão, transporte e deposição das coberturas superficiais, a exemplo de depósitos coluviais, aluviais e de dunas, conclui-se que a análise geoquímica vem ganhando cada vez mais proeminência e relevância no âmbito da geomorfologia, principalmente na geomorfologia do Quaternário. Pois, a geoquímica baseada na distribuição dos elementos móveis e imóveis e no uso de índices geoquímicos tem ajudado a identificar os processos de formação e transportes desses materiais, assim como a sua proveniência, grau de intemperismo e seu ambiente deposicional, a qual associada a outras técnicas analíticas tem corroborado

para a reconstituição paleoambiental e paleoclimática de algumas regiões do Brasil, principalmente da região do Nordeste Brasileiro. Por fim, compreender a geoquímica das paisagens é crucial não apenas para a gestão de recursos naturais, mas também para a conservação ambiental e a mitigação de riscos geológicos.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário. **Geomorfologia**. n. 18, IG-USP, S. Paulo, 1969.
- ARINE, D. R. **Análise de águas de superfície e sedimentos de rios da região de Iperó, SP, por espectrometria de absorção atômica e por ativação neutrônica**. (Dissertação) – Mestrado em Tecnologia Nuclear – Aplicações. 2000. 138f. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Autarquia associada à Universidade de São Paulo. 2000.
- BASTIA, F. EQUEENUDDIN, S.M. ROY, P.D. Geochemical signatures of surface sediments from the Mahanadi River basin (India): Chemical weathering, provenance, and tectonic settings. **Geol. J.** 55 (7), 2020, 1–14. <https://doi.org/10.1002/gj.3746>.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. V.1, Florianopolis: Ed. UFSC. 425p. 1994.
- BIRKELAND, P. W. **Soils and geomorphology**. New York. 372p. 1984.
- BOULANGÉ, B. Les formations bauxitiques latkntiques de Côte d'Ivoire. Les facies, leur transformation, leur distribution et l'évolution du modelt. Trav Docum. 1984; 175 - 341p.
- BROWN, D. J.; MCSWEENEY, K. & HELMKER, P. A. **Statistical, geochemical and morphological analyses of stone line formation in Uganda**. *Geomorphology*. v.62, p.217-237. 2004.
- BUTT, C. R. M.; LINTERN, M. J. & ANAND, R.R. **Evolutions of regoliths and landscapes in deeply weathered terrain – implications of geochemical exploration**. *Ore Geology Reviews*. 16:167-183. 2000.
- CABRAL, C. J. Caracterização paleoclimática e paleoambiental do campo de dunas de Petrolina em Pernambuco: um subsídio para a reconstrução do submédio São Francisco. **Dissertação de Mestrado**: Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 152p, 2014.
- CAMPY, M & MACAIRE, J. J. **Géologie des formations superficielles: géodynamique – faciès – utilization**. Paris: Masson. 443p. 1989.
- CARNEIRO, A. E. V. **Análise quantitativa da composição química do sedimento depositado nas planícies de inundação de alguns rios da Amazônia**. São Paulo, 1995. 219f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo.1995.

CARNEIRO, A. E. V.; NASCIMENTO FILHO, V. F. **Análise quantitativa de amostras geológicas utilizando a técnica de fluorescência de raios X por dispersão de energia.** Scientia Agrícola, v.53, p.95-105, 1996.

CARVALHO, Iasmin Teles. Geomorfologia da paisagem através da quimioestratigrafia dos depósitos de encosta e fluviais do maciço da Serra Negra e áreas circunvizinhas, Sergipe. Universidade Federal de Sergipe, Itabaiana, **Dissertação de Mestrado** (Ciências Naturais), 112 p., 2022.

CHATELIN, Y. les sols ferrallitiques, tome III, 1^{re} alteration. Initiations – **Documentations Techniques**. ORSTOM, 24. 1974, 145p.

CHAUHAN, D.S., CHAUHAN, R. SINGH, B. Provenance composition, paleo-weathering and tectonic setting of Himalayan foreland basin sediments, Kumaun Sub-Himalaya, India. **Journal of Sedimentary Environments**.7, 471–499 (2022). <https://doi.org/10.1007/s43217-022-00106-6>.

CHEN, B. YANG, X. JIANG, Q. LIANG, P. MACKENZIE, L.L. ZHOU, Y. Geochemistry of aeolian sand in the Taklamakan Desert and Horqin Sandy Land, northern China: Implications for weathering, recycling, and provenance, **CATENA**, Volume 208, 2022,105769, ISSN 0341-8162, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105769>.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; & LEPSCH, I. F. **Stratigraphical discontinuities, tropical landscape evolution and soil distribution relationships in a case study in SE – Brazil.** Revista Brasileira de Ciências do Solo. v.26, p.673-683. 2002.

CORRÊA, A. C. B. – 2001 – Dinâmica geomorfológica dos compartimentos elevados do Planalto da Borborema, Nordeste do Brasil. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, **Tese de Doutorado** (Geografia), 386 p. 2001.

COSTA, M. L.; ANGÉLICA, R. S. & COSTA, N. C. **The geochemical association Au-As-B-(Cu)-Sn-W in latosol, colluvium, lateritic iron crust and gossan in Carajás, Brazil: importance of primary ore identification.** Journal of Geochemical Exploration. v.67, p.33-49. 1999.

COSTA, M. L.; CARMO, M. S. & BEHLING, H. **Mineralogia e geoquímica de sedimentos lacustres com substrato laterítico na Amazônia Brasileira.** Revista Brasileira de Geociências, v.35(2), p.165-176. 2005.

CRUZ, L. O. M. **Assinatura Geoquímica de unidades coluviais da bacia do Córrego do Rio Grande – Depressão de Gouveia/MG.** (Dissertação) – Mestrado em Geografia. 152f. 2006. Universidade Federal de Minas Gerais. 2006.

DEWOLF, V. **Interêt et principes d’une cartographie des formations superficielles.** Association des Publications de la Fac. Lettres et Sci. Hum. Univ. Caen, 181, 1965.

FAZAL, AG. UMAR, M. SHAH, F. MIRAJ, M.A.F. JANJUHAH, H.T. KONTAKIOTIS, G. JAN, A. K. Correction: Fazal et al. Geochemical Analysis of Cretaceous Shales from the Hazara Basin, Pakistan: Provenance Signatures and Paleo-Weathering Conditions. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 800. **Journal of Marine Science and Engineering**. 2022; 10(11):1654. <https://doi.org/10.3390/jmse10111654>.

FERNANDES, K. G.; MORAES, M.; GOMES NETO, J. A.; NOBREGA, J. A.; OLIVEIRA, P. V. **Padronização interna em espectrometria de absorção atômica.** Química Nova. v.26, n.2. 2003.

FIGUEIREDO, M. A.; FABRIS, J. D.; VARAJÃO, A. F. D. C.; COUCEIRO, P. R. C.; LOUFTI, I. S.; AZEVEDO, I. S.; GARG, V. K. **Óxidos de ferro de solos formados sobre gnaiss do Complexo Bação, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília. v.41, n.2, p.313-321. 2006.

FONSÊCA, D. N. CORRÊA, A. C. B. LIRA, D. R. TAVARES, B. A. C. TORRES, B. A. GONÇALVES, R. B. SILVA, W. Climatically driven Quaternary sedimentation in a passive margin tropical context: Insights into the geomorphological evolution of Northeastern Brazil, **Geomorphology**, Volume 461, 2024, 109316, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109316>.

FRIEDRICH, G.; MARKER, A. & KANIG, M. **Heavy mineral surveys in exploration of lateritic terrain.** In: BUTT, C. R. M. & ZEEGERS, H. (ed.) Handbook of exploration geochemistry: regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains. v.4. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers B. V. p.481-498.

GALVÃO, D. C. Evolução do Paleoambiente e da paisagem quaternária no sudeste do Piauí. **Tese de Doutorado:** Universidade Federal de Pernambuco, Recife, pag145, 2019.

GONÇALVES, D.; LEITE, W. C.; BRINATTI, A. M.; SAAB, S. C.; IAROSZ, K. C.; MASCARENHAS, I. P.; CARNEIRO, P. I. B.; ROSA, J. A. **Mineralogia de um latossolo vermelho distrófico submetido a diferentes manejos por 24 anos.** Revista Brasileira de Ciências do Solo. Número Especial, v. 32, p.2647-2652, 2008.

HORBE, A. M. C.; PAIVA, M. R. P.; MOTTA, M. C.; HORBE, M. A. **Mineralogia e geoquímica de perfis sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Carajás – AM.** Acta Amazônica. v. 37(1), p.81-90.2007.

LIMA, F. J; CORRÊA, A. C. B; LIMA, G. G; MARÇAL, M. S; PAISANI, J. C; PONTELLI, M. E. Late Quaternary Geomorphological evolutionary dynamics of the Araripe sedimentary Plateau, Northeast of Brazil. **Journal of South American Earth Sciences.** 124:1-13, 2023.

LIRA, D. R. Evolução geomorfológica e paleoambiental das bacias do riacho do pontal e GI-8 no sub-médio São Francisco/PE. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, **Tese de Doutorado** (Geografia), 234 p., 2014.

LUZ, L. R. Q. P.; SANTOS, M. C. D.; MERMUT, A. R. **Pedogênese em uma topossequência do semi-árido de Pernambuco.** Revista Brasileira de Ciências do Solo. v.16, p.95-102. 1992.

MANZANILLA, L. BARBA, L. La arqueología. Una visión científica del pasado del hombre, 1994. McFARLANE, M. J.; BOWDEN, D. J. & GIUSTI, L. **The Behaviour of chromium in weathering profiles associated with the African surface in part of Malawi.** In: ROBINSON, D. A. & WILLIAMS, R. B. G. (ed.). Rock Weathering and Landform Evolution. Chinchester, England: Jonh Wiley. P.321-338. 1994.

MISSURA, R. Bacia do riacho Pioré/PE: análise morfotectônica e morfoestratigráfica. Recife, PE. 2013. 196f. **Tese de Doutorado**, Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

MORAES, B. C., CORRÊA, A. C. de B., LAGE, M. C. S. M. Fundamentos da Geoarqueologia e Geoquímica na Indicação de Níveis de Ocupação Humana pré-histórica no Parque Nacional Serra da Capivara- Piauí, Brasil. **In:** ABEQUA, XIV Congresso da Associação Brasileira do Quaternário: Processos Naturais e Antrópicos. Um desafio para o desenvolvimento Sustentável. Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, 2013. Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. Disponível em: http://www.abequa.org.br/trabalhos/arg_2014_06.pdf.

MORAES, B. C., MOURA, L. de S., CARVALHO, R. de C. P. S., & CORRÊA, A. C. de B. Marcadores Geoquímicos como Indicadores de Atributos Culturais na Paisagem Geomorfológica no Parque Nacional Serra da Capivara, Piauí-Brasil. *Physis Terrae - Revista Ibero-Afro-Americana De Geografia Física E Ambiente*, 1(2), 2019, 185–214p. <https://doi.org/10.21814/physisterrae.2255>.

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Fluorescência de raios X por reflexão total**: fundamento e aplicações. Piracicaba: CENA/USP, 1997. 93p.

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Técnicas analíticas nucleares na pesquisa agropecuária**: fluorescência de raios X e ativação neutrônica. Piracicaba: CENA/USP, 1993. 93p.

OLIVEIRA, S. M. B.; PASSEDA, L. C. R.; GOUVEIA, S. E. M.; FÁVARO, D. I. T.; BABINSK, M. **Evidência geoquímica de solos formados pela integração de Guanos e rochas vulcânicas, Ilha Rata, Fernando de Noronha (PE)**. *Revista do Instituto de Geociências – USP, Série Científica*, São Paulo, v.9, n.3, p.03-12, 2009.

OLIVEIRA, V. A. & JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. **Relação solo-material litológico subjacente em latossolos em dois compartimentos no planalto central goiano**. *Geociências*. São Paulo: UNESP. v.21, n.1/2, p.85-96. 2002.

OLLIVER, C. & PAIN, C. F. **Regolith, soils and landforms**. Chinchester, New York: Jonh Wiley. 316p. 1996.

PARTHASARATHY, P. MADHAVARAJU, J. Montoya, E. R. RAMASAMY, S. Geochemistry of estuarine sediments from Marakkanam area, Tamil Nadu, India: source area weathering and provenance implications. *Arab J Geosci* 13, 157 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12517-019-5008-6>.

PATON, T. R. **The formation of soil material**. London: George Allen & Unwin. 143p. 1978.

PEDRO, J.O; SOUSA L.R; TELES, M; RAMOS, J.M. Study of the Água Vermelha dam by the finite element method. **LNEC Report, Lisbon (in Portuguese)**, 1975.

PEREIRA, E.; RODRIGUES, R. & BRAZUTTI, D. **Caracterização Geoquímica da superfície de inundação máxima Llandoveriana na parte paraguaia da bacia do Paraná**. *Geochemical Bazilliens*. v.17(1), p.01-12. 2003.

- PEREIRA, J. C. **Geoquímica de solos e sedimentos e impacto antrópico por elementos-traço, na microbacia do córrego da Fazenda Santa Cândida, área periurbana de Campinas-SP.** (Dissertação) – Mestrado em Geociências. 86f. 2005. Universidade Estadual de Campinas. 2005.
- PEREZ FILHO, A.; SILVA, F. B. R & REGO, M. J. M. **Análise de uma topossequência de solos no vale do Moji-Guaçu.** Geociências. São Paulo, v.2, p.33-41, 1983.
- RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: Base para distinção de ambientes.** 4. ed. Viçosa: NEPUT. 338p. 2002.
- SANTOS, J. D. C. Evolução geomorfológica da paisagem da Bacia Hidrográfica do Riacho do Meio, afluente do rio Ipanema, Pesqueira-PE. 2024. **Dissertação** (Mestrado em Geografia) -Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024. 132p.
- SILVA, D. G. Reconstrução da dinâmica geomorfológica do Semiárido Brasileiro no Quaternário Superior a Partir de uma abordagem multiproxy. **Tese de Doutorado.** Universidade Federal de Pernambuco, 2013. 270p.
- SIMABUCO, S.M.; NASCIMENTO FILHO, V.F. **Quantitative analysis by energy dispersive X-ray fluorescence by transmission method applied to geological samples.** Scientia Agricola, v.51, p.197-206, 1994.
- TAPIA, J. MUKHERJEE, A. RODRÍGUEZ, M. P. MURRAY, J. BHATTACHARYA, P. Role of tectonics and climate on elevated arsenic in fluvial systems: Insights from surface water and sediments along regional transects of Chile, **Environmental Pollution**, Volume 314, 2022, 120151, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120151>.
- TATUMI, S. H.; SILVA, L. P.; PIRES, E. L.; ROSSETTI, D. F.; GOES, A. M.; MUNITA, C. S. **Datação de sedimentos Pós-Barreiras no Norte do Brasil: Implicações paleogeográficas.** Revista Brasileira de Geociências. v.38, n.3, p.514-524. 2008.
- TAVARES, B. A. C. Evolução morfotectônica dos pedimentos embutidos no Planalto da Borborema. Recife, PE. 251f. 2015. **Tese de Doutorado**, Universidade Federal de Pernambuco, 2015.
- TAVARES, K. C. O. Relações quimioestratigráficas entre os sedimentos quaternários do maciço Serra da Baixa Verde e seu significado geomorfológico. **Dissertação de Mestrado:** Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 142p, 2020.
- TAYLOR, G. and EGGELTON, R. A. **Regolith geology and geomorphology.** Chinchester, England: Jonh Wiley. 375p. 2001.
- THORNBUR, M. R. **The chemical mobility and transport of elements in the weathering environment.** In: BUTT, C. R. M. & ZEEGERS, H. (ed.) Handbook of exploration geochemistry: regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains. v.4. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers B. V. p.79-96. 1992.

TOLEDO, M. A. A. **Determinação de elementos traço em silicatos por espectrometria de fluorescência de raios-x: Estudo e avaliação da metodologia.** (Dissertação) – Mestrado em Geociências. 1998. 88f. Universidade Estadual de Campinas. 1998.

TOUNI, E.; EGGLETON, T. & TAYLOR, G. **Micromorphology and chemical weatering of a K-rich trachyandesite and an associated sedimentary cover (Parkes, SE Australia).** *Catena*. v.53, p.181-207. 2003.

TSAI, C. C. & CHEN, Z. S. **Lithologic discontinuities in ultisols along a toposequence in Taiwan.** *Soil Science*. v.167, n.7, p.587-596. 2000.

VILLAGRAN, X. S., SCHAEFER, C. E. G. R. Geoarqueologia das primeiras ocupações humanas na Antártica. **Vestígios - Revista Latino-Americana de Arqueologia Histórica**, 5(2), 2011, 117-136p. <https://doi.org/10.31239/vtg.v5i2.10653>.

WELLS, N. A.; ANDRIAMIHAJA, B & RAKOTOVOLOLONA, H. F. S. **Stonelines and landscape development on the laterized craton of Madagascar.** *Geological Society of America Bulletin*. v.102, p.615-627. 1990.

WILSON, C. A., DAVIDSON, D. A., CRESSER, M. S. Multi-element soil analysis: an assessment of its potencial as an aid to arqueological interpretation. **Journal of Archaeological Science**, 2008, 35(2), 412-424. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2007>.

ZAMBELLO, F. R. **Análise multielementar quantitativa de solos e sedimentos por espectrometria de fluorescência de raios-x.** (Dissertação) – Mestrado em Geociências. 53f. 2001. Universidade Estadual de Campinas. 2001.

ZUCCHI, O. L. A. D. **Caracterização qualitativa e quantitativa de elementos, pela técnica de fluorescência de raios X, em suplementos minerais para animais.** São Paulo, 1994. 175p. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo. 1994.