

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ANÁLISE E PROVENIÊNCIA DE MINERAIS PESADOS EM
TERRAÇOS DO RIO JAPURÁ, ESTADO DO AMAZONAS**

Vinicius de Lima Passos

Orientador: Prof. Dr. André Marconato

(TF - 24/54)

SÃO PAULO

2024

*Dedico este trabalho ao meu pai,
Djalma, meu amado e eterno Babo, olhe
por mim
de onde estiver.
Te amo muito*

AGRADECIMENTOS

Todo esse trabalho foi o ponto alto de cinco anos de graduação que tive o prazer de vivenciar no Instituto de Geociências. Apesar das condições não terem sido as ideais desde o início, com o forte impacto da pandemia que me afastou dois longos anos do convívio social, ainda acredito que todo esse tempo não foi desperdiçado de maneira nenhuma.

Quero agradecer a todos que me apoiaram e fortaleceram para esta missão e que continuam a olhar por mim daqui em diante, por citar minha amada mãe, Dona Maria Leite, meus padrinhos, Adetive e Eliete, meus queridos tios maternos e minha amada avó Amélia e meu falecido avô Antônio.

Deixo também especial agradecimento aos meus mentores nesse período e espero que nos próximos também, André e Renato, por me auxiliarem tanto nesse caminho. Confio muito carinho aos meus grandes amigos, de alô-nimos, Cipó, Joanele, Bocão, Frieira, Prodígio, Micoze, Origami, Tarzan, Xarrete, Clavipes, Pêsego, Dorime, Brabu, Rapakivi, Ventosa e ao meu primeiro e maior amigo em todos os tempos que foram e que virão, Djalma, meu pai, ou babo, como eu o chamava, descanse em paz e meu sincero obrigado.

Minha querida Milene, de todas as pessoas que me acompanharam nessa tarefa, poucas conseguiram me motivar tanto quanto você, cujo carinho, conselhos e boas ideias foram essenciais para a conclusão dessa pesquisa. Agradeço especialmente aos adesivos durante a apresentação (ficaram fofoooooossss). Lhe devo tudo isso meu amor, espero que este trabalho fique a altura, não se preocupe, eu gosto quando você fica corrigindo minha ortografia (apesar de eu me estressar).

Por fim, faço agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processo FAPESP N° 2024/12392-5), e ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo (N° do projeto 3507).

Assim que o fogo começar a diminuir, você vai procurar outra faísca. -

Vinland Saga.

Toda revolução começa com uma faísca. -

The Hunger Games.

LISTA DE FIGURAS

Mapa Geológico da área de estudo. Destaque para os rios Japurá, Solimões e terraços associados. As amostras estão classificadas de acordo com seu contexto e origem (modificado de SGB, 2024).	3
Mapa geológico da Amazônia, com as províncias geocronológicas do cráton amazônico e regiões adjacentes, após Tassinari e Macambira (1999), Fuck et al. (2008), Cardona et al. (2009) e Decou et al. (2013) . As setas vermelhas e a seta cinza mostram respectivamente a posição das fontes primárias principais e a direção do fluxo sedimentar da Formação Içá e dos depósitos recentes. A posição estimada do Arco de Iquitos e Purus é indicada pelas linhas pontilhadas vermelhas (Roddaz et al., 2005a).	8
Representação dos métodos de coleta, com método de coleta tradicional (pipeta), à esquerda e método de coleta por congelamento parcial à direita	13
Montagem do processo de banho em Nitrogênio Líquido, usando um sistema de Banho Maria, congelando a base do tubo.	13
Fundo do Tubo congelado após processo de mergulho parcial para separação de pesados	14
Estados de conservação do zircão, extraído de Andó et al. (2012).	15
Estados de conservação do zircão, extraído de Andó et al. (2012).	15
Estados de conservação do rutilo, extraído de Andó et al. (2012)	15
Variados graus de corrosão da monazita, Andò et al. (2012)	15
Variados graus de corrosão da granada, Andò et al. (2012).	15
Variados graus de corrosão da cianita, Andò et al. (2012).	15
Graus de corrosão (eixo horizontal) e intemperismo (eixo vertical) sobre hornblenda, Andò et al. (2012). Os graus de intemperismo foram traduzidos como (de cima para baixo): inalterado, corroído, serrilhado, profundamente serrilhado e esquelético	16
Fórmula de cálculo do ZTR, baseado em Hubert (1962) e Garzanti e Andò (2007a).	17
Fórmula de cálculo do ZR, baseado em Garzanti e Andò (2007b).	17
Fórmula de cálculo do Anf-Pyr, modificado de Garzanti e Andò (2007a) e Rossetti et al. (2005)	18
Fórmula de cálculo da concentração de hbl, baseado em Garzanti e Andò (2007)	18

Cálculo da concentração de minerais pesados em relação ao peso total da amostra; Wh-peso dos minerais pesado, wtot-peso total, tot-total de minerais pesados da contagem pesado, h- quantidade de minerais da contagem como um todo	18
Concentração de Minerais Pesados sem filossilicáticos; s-minerais a tirar, h-total de pesados	18
Fórmula da transformação razão logarítmica centrada.	19
Frequência de minerais por amostra	20
De cima pra baixo, zircão, cianita na segunda linha ,rutilo na terceira linha, turmalina e hornblenda na quarta linha. Os minerais a direita, são mais euédricos, a esquerda mais arredondados	21
De cima pra baixo, zircão, rutilo, hornblenda e granada na terceira linha, com clorita na quarta linha, com os minerais a direita, mais euédricos que os da esquerda	23
Monazita da amostra ALC 96F, destacando presença de inclusões de zircão e rutilo.	24
hornblendas, da direita pra esquerda tendendo a subédrico, na fileira de baixo respectivamente turmalina, granada e zircão	25
zircão e hornblendas	26
Bi-plot do MDS das amostras e minerais.	27
Bi-plot do MDS mostrando a similaridade das amostras.	28
Comparação entre as razões de turmalina/zircão e rutilo/zircão	28
Correlação entre minerais após substituição dos zeros. Quanto mais perto de 1, maior a correlação entre os minerais, mostrando alta relação entre rutilo, zircão e cianita e entre augita e diopsídio.	29
concentração relativa dos minerais após transformação logratio	29
Análise de principais componentes das amostras, baseado no grau de similaridade entre as frequências minerais das assembleias de cada amostra.	30
MDS das amostras comparando a similaridade das amostras	31
Comparação entre as razões de turmalina/zircão e rutilo/zircão	31
Correlação entre concentração de anfibólios e piroxênios em relação a minerais ultraestáveis, mostrando isolamento das amostras provenientes do Rio Japurá em relação às amostras dos terraços ocidentais, de caráter mais maduro,	32

com maiores valores de ZTR. As amostras do Rio Solimões e dos terraços Orientais são próximas, tendo então similaridade entre elas.	
Razões de concentração de minerais instáveis, anfibólios e piroxênios, entre as diferentes amostragens, no qual é visível a maior maturidade mineralógica dos terraços do oeste, em oposição a baixíssima maturidade das assembleias do rio Japurá. As assembleias do Rio Solimões e dos terraços à leste tem concentrações muito similares, com valores mais próximos aos terraços ocidentais que o próprio Japurá	36
Terraços mapeados por Mazoca, 2023, no qual os terraços Q1 são mais velhos, possuindo maiores valores de ZTR que os demais, e os terraços de valores Q9 possuem valores de ZTR mais baixos que os anteriores	38
Destaque para os terraços ocidentais (Q6) do rio Japurá e dos terraços orientais (Q9), ao redor do rio Solimões, mostrando que os terraços ocidentais são mais velhos que os orientais	39

LISTA DE TABELAS

Localização das amostras e suas fontes de amostragem	11
tHMC das amostras e classificação segundo Garzanti et al., 2011	33
Cálculo de ZTR e ZR para as amostras e suas médias	34
cálculo de concentração de hbl	35
cálculo de concentração de Anf-Pyr	37

LISTA DE ABREVIATURAS

clr	Log ratio central
h	Quantidade de minerais da contagem como um todo
H%	Concentração de minerais pesados em relação ao peso total da amostra
HM%	Concentração de minerais pesado não filossilicáticos
MDS	Escalonamento Multidimensional
MPt	Minerais pesados transparentes
PCA	Análise de Principais Componentes
tHMC	Concentração de Minerais Pesados transparentes
tot	Total de minerais pesados da contagem pesado
Wh	Peso dos minerais pesado
wtot	Peso total
ZR	Concentração de zircão e rutilo
ZTR	Concentração de zircão, turmalina e rutilo

Ep	epidoto
Mon	monazita
Mus	muscovita
Hrn	
hornblenda	Tre
	tremolita
Tlc	talco
Zrc	zircão
Act	actinolita
Rut	rutilo
Kya	cianita
Bt	biotita
Ser	sericita
Apt	apatita
Grt	granada
Chl	clorita
Tur	turmalina
Cc	calcita
Hyp	
hiperstênio	Ens
	enstatita

Sil	silimanita
Dio	diopsídio
Aug	augita
Est	estaurolita
And	andaluzita
Zoi	zoisita
Ol	olivina

RESUMO

O Oeste Amazônico apresenta alguns dos maiores rios do mundo, fatores determinantes para a organização da paisagem local, constituindo barreiras ecológicas e afetando a distribuição da biodiversidade da região. O mesmo pode ser dito sobre a evolução dos depósitos quaternários que formam os atuais terraços cortados pelos rios, de maneira que a sucessão destes influenciou a evolução da biodiversidade amazônica ao longo do quaternário. Os cinturões de canais dos rios estão sujeitos a fenômenos de avulsão que, efetivamente, tornam estas barreiras geográficas móveis. Neste cenário, particularidades sobre o curso dos rios e organização de terraços (ocidentais) do atual Rio Japurá sugerem que tenham sido formados pelo Rio Solimões, ilustrando a importância destes no desenvolvimento da grande biodiversidade e da atual geografia dos ambientes de terra firme. Este trabalho visa comparar assembleias de minerais pesados provindas de ambos os rios e dos terraços adjacentes visando analisar a similaridade entre os conjuntos, testando a qual dos dois rios se deve a formação dos terraços. A quantificação da assembleia considera minerais pesados transparentes concentrados da fração areia muito fina (0,063 – 0,125 mm). A concentração de minerais pesados foi feita utilizando líquido denso, empregando técnica de congelamento parcial e também de coleta manual a fim de compará-las. Os dados de frequência sedimentar foram tratados com uso de *Multidimensional Scaling* (MDS), discriminando as similaridades entre as diferentes famílias e as proximidades entre os grupos, adicionado ao uso de índices de minerais pesados (ZTR, hbl, concentração de instáveis) para comparação de assembleias. O emprego de MDS e dos índices de minerais pesados permitiu alocar os terraços ocidentais separados das assembleias de calha do Rio Japurá, sendo caracteristicamente mais maduros mineralogicamente, mais próximos semelhantes às amostras de calha do Rio Solimões. A comparação entre os métodos de preparação de amostras mostrou que o congelamento parcial produziu dados mais precisos.

Palavras chave: Sedimentologia; Minerais Pesados; Amazônia; Proveniência Sedimentar.

ABSTRACT

The Western Amazon is home to some of the largest rivers in the world, which play a crucial role in shaping the local landscape. These rivers act as ecological barriers and significantly influence the distribution of biodiversity in the region. Similarly, the evolution of the Quaternary deposits that form the current terraces, shaped by these rivers, has impacted the development of Amazonian biodiversity throughout the Quaternary period. The river channel belts are subject to avulsion phenomena, which render these geographic barriers dynamic. In this context, the characteristics of the river courses and the organization of the western terraces of the current Japurá River suggest that they were formed by the Solimões River. This illustrates their importance in the development of the region's rich biodiversity and the current geography of the Terra Firme environments. This study aims to compare the assemblages of heavy minerals from both rivers and their adjacent terraces, with the objective of analyzing the similarities between these sets and to determine which river is responsible for the formation of the terraces. The quantification of the assemblage focuses on transparent heavy minerals concentrated in the very fine sand fraction (0.063 – 0.125 mm). The concentration of heavy minerals was achieved using a dense liquid, employing a partial freezing technique alongside manual collection for comparative analysis. Sediment frequency data were processed using Multidimensional Scaling (MDS) to discern the similarities among different families and the proximity between groups. Additionally, heavy mineral indices (ZTR, hbl, and concentration of unstable minerals) were employed for the comparison of assemblages. The use of MDS and heavy mineral indices facilitated the differentiation of the western terraces from the assemblages of the Japurá River channels. The western terraces are characteristically higher mineralogical maturity compared to terraces from Japurá River, aligning more closely with terraces from the Solimões River. The comparison of the sample preparation methods revealed that partial freezing yielded more accurate data.

Keywords: Sedimentology; Heavy Minerals; Amazon; Sedimentary Provenance.

1. INTRODUÇÃO.....	2
2. METAS E OBJETIVO.....	4
3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Bacia do Solimões.....	5
3.2. Sedimentação no rio Solimões.....	6
3.3 Formação Içá.....	7
3.4. Proveniência sedimentar.....	9
3.5. Intemperismo em minerais pesados.....	9
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
4.1. Preparação para minerais pesados.....	11
4.2. Feições de corrosão e intemperismo.....	15
4.3. Índices de Minerais Pesados.....	16
4.3.1. ZTR.....	17
4.3.2. ZR.....	17
4.3.3. Anf-Pry.....	17
4.3.4. Concentração de hornblenda.....	18
4.3.5. tHMC.....	18
4.4. Metodologia estatística.....	19
5. RESULTADOS.....	20
5.1. Petrografia de minerais pesados.....	21
5.1.1. Terraços Ocidentais.....	21
5.1.2. Terraços Orientais.....	23
5.1.3. Canal do rio Solimões.....	25
5.1.4. Canal do rio Japurá.....	25
5.2. Análise de dados.....	27
5.2.1. Concentração de pesados por pipeta.....	27
5.2.1. Concentração de pesados por congelamento parcial.....	29
5.3. Índices de concentração de minerais pesados.....	32
5.3.1. Índice tHMC.....	32
5.3.2. Índice ZTR e ZR.....	33
5.3.3. Concentração de hornblenda.....	34
6. DISCUSSÃO.....	38
6.1. Proveniência sedimentar e intemperismo.....	38
6.2. Comparação de metodologia de concentração de pesados.....	41
7. CONCLUSÕES.....	43
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
ANEXO 1.....	49
ANEXO 2.....	50

1. INTRODUÇÃO

Desde o Plioceno, a planície Amazônica teve uma grande diversificação de espécies, tendo as mudanças no comportamento tanto geológico quanto hidrológico influenciando ativamente na diversificação das espécies nesta região (e.g., Rossetti *et al.*, 2005), sendo os terraços Quaternários ao longo dos grandes rios da região importantes agentes nesse processo (Rossetti *et al.*, 2005). Isso acontece pois os cinturões de canais dos rios estão sujeitos a fenômenos de avulsão que, efetivamente, tornam estas barreiras geográficas móveis.

Estes cinturões de canais do oeste Amazônico são alguns dos maiores rios do mundo, que são fatores determinantes para a organização da paisagem local, por exemplo, constituindo barreiras ecológicas, afetando a distribuição da biodiversidade da região.

Alguns autores que tentaram explicar esse grande *pool* de biodiversidade, tal qual Haffer (1969), com a hipótese de Refúgio, todavia a relação e a importância dos rios só foi começar a ser compreendida a partir de trabalhos como Ayres e Clutton-Brock (1992) e Weir *et al.* (2015).

Grande parte das variadas espécies da região se originaram durante o Plioceno-Pleistoceno, como sugerido em estudos filogenéticos (e.g., Rull, 2011; Ribas *et al.*, 2012; Garzón-Orduña *et al.*, 2014; Boubli *et al.*, 2015; Pavan e Marroig, 2017). Pupim *et al.* (2019) determinam que as relações ecológicas não são explicadas somente pelos ciclos glaciais, mas também pelas mudanças físicas no meio ambiente e na paisagem, com auxílio de fatores bióticos, como o surgimento de novas espécies e teias alimentares.

O Rio Japurá tem origem na Cordilheira dos Andes no sul da Colômbia, sendo chamado de Rio Caquetá, adentrando o Brasil próximo ao município de Vila Bittencourt, no noroeste do estado do Amazonas, onde deságua no Rio Solimões, percorrendo a chamada Bacia do Solimões. Esta bacia é delimitada a Leste pelo Arco de Purus, e a oeste pelo Arco de Iquitos, a norte pelo Escudo das Guianas e a sul pelo Arco Brasileiro cobrindo uma área de aproximadamente 480.000 km², majoritariamente dentro do estado do Amazonas (Rossetti *et al.*, 2005).

A natureza de constante mudança dos rios desta região, aliado a sua significativa influência na paisagem e biodiversidade (Rossetti *et al.* 2005), favorece a perspectiva de que durante o Plioceno e Pleistoceno os cinturões de canais destes rios habitaram diferentes cursos em relação aos atuais, existindo assim a possibilidade que os atuais terraços do Rio Japurá tenham sido formados pelo Rio Solimões durante aquele período.

A área de estudo corresponde aos terraços encontrados nos interflúvios entre os rios Solimões e Japurá (anteriormente considerados Formação Içá), tendo sido então estudados os sedimentos dos terraços desses dois além dos sedimentos modernos desses

rios (que corresponde às amostras de canais). Os terraços destes rios possuem relações de corte que sugerem que ao longo do Plioceno e Pleistoceno a foz do Rio Japurá, hoje localizada aproximadamente entre o Rio Japurá e Rio Negro já estiveram ligados (Mazoca, 2023). Este cenário difere do atual, com Japurá desaguando no Rio Solimões, de tal forma que o Rio Solimões poderia ter depositado ambos os terraços. Dado que ambos os rios possuem uma assembleia sedimentar e mineralógica própria, o uso de minerais pesados como ferramenta de similaridade entre os canais e os terraços pode indicar o real formador dos depósitos.

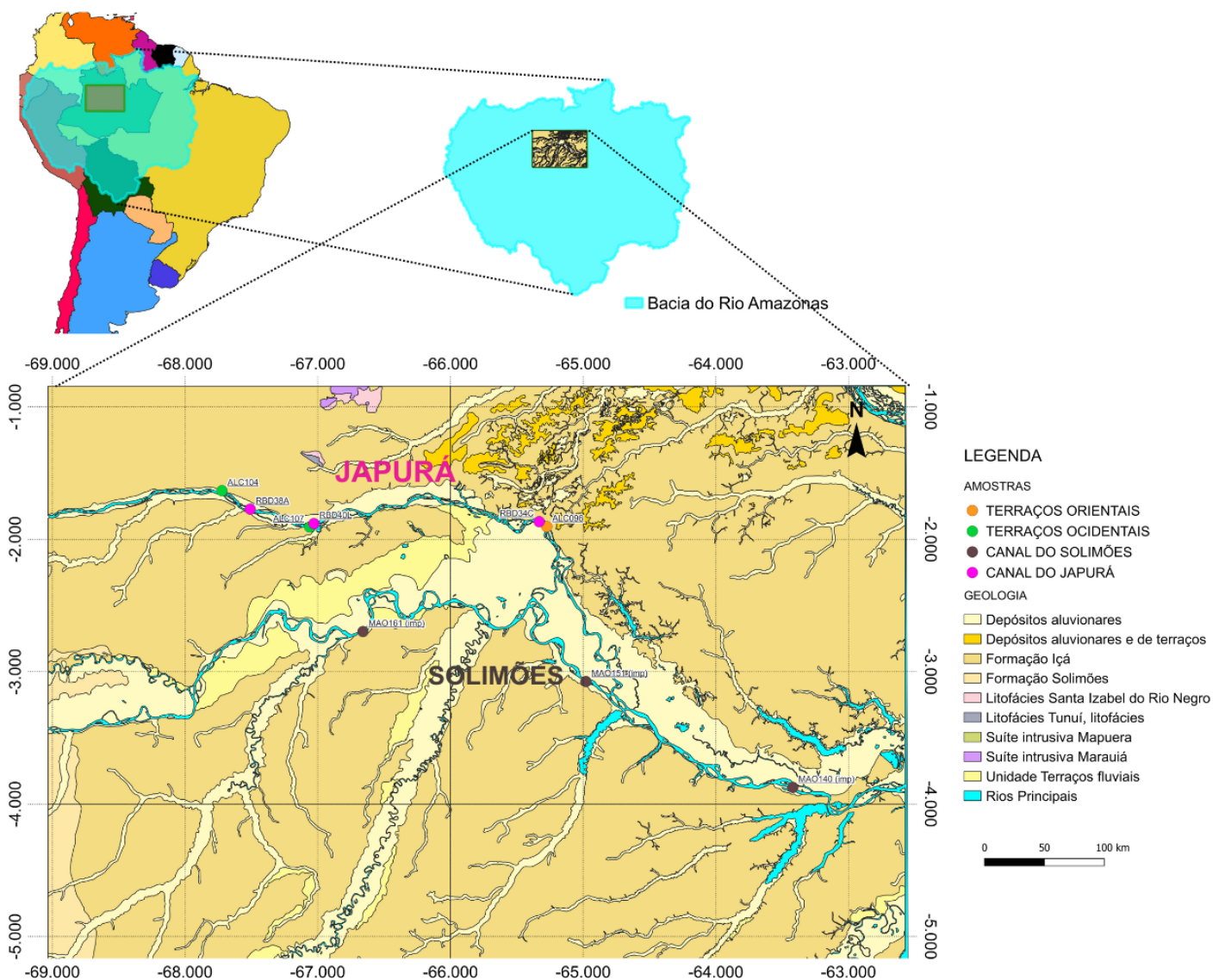


Figura 1 - Mapa Geológico da área de estudo. Destaque para os rios Japurá, Solimões e terraços associados. As amostras estão classificadas de acordo com seu contexto e origem (modificado de SGB, 2024).

2. METAS E OBJETIVO

A Fim de analisar a correlação dos terraços ocidentais com os rios Japurá e Solimões, foram concentradas assembleias de minerais pesados provindas dos terraços e dos rios, utilizando-se de análise de minerais pesados para inferir sobre a evolução de áreas-fonte e correlação entre diferentes sítios deposicionais.

Assim, esta pesquisa visou a utilização de assembleias sedimentares e técnicas de análise estatísticas para dados composicionais, aplicado as assembleias de Minerais Pesados com o intuito de estabelecer os seguintes tópicos:

Os objetivos específicos são:

- Concentração de assembleias de minerais pesados
- Contabilização das espécies minerais em cada amostra
- Processamento das contabilizações por métodos estatísticos
- Análise da corrosão superficial dos grãos
- Interpretação das correlações entre assembleias e da corrosão superficial com a evolução geológica da região

3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Bacia do Solimões

Esta bacia se estende à Leste até o Arco de Purus, e a oeste até o Arco Iquitos, limitada a norte pelo Escudo das Guianas e a sul pelo Arco Brasileiro, cobrindo uma área de 480.000 km², majoritariamente dentro do estado do Amazonas. Segundo Eiras (2005) e reforçado por Silva, (1998), a Bacia se encontra alocada sobre as províncias do Rio Negro-Jurema (1,8 a 1,55 Ga) e Rondônia-San Ignacio (1,55 a 1,3 Ga), ambas de idade precambriana, dentro do contexto do Craton Amazônico.

Os depósitos que registram os sistemas fluviais que recobrem a Formação Solimões cobrem mais de 1.000.000 km² nas terras baixas da Amazônia Central. Originalmente, esses sedimentos foram classificados como Formação Içá, definidos como uma sucessão de arenitos não fossilíferos e argilitos intercalados, interpretados como sistemas fluviais, em referência à sua seção-tipo localizada na margem esquerda do Rio Içá (Maia *et al.*, 1977), nas cercanias de Santo Antônio do Içá. Estudos mais recentes (*e.g.*, Rossetti *et al.*, 2005) têm classificado junto a esta formação porções sedimentares ao norte e sudeste da Amazônia Central, expandindo seu alcance.

Os sedimentos que compõe a Formação Solimões e que compõe a formação sobrejacente (Formação Içá), são separados por uma discordância erosiva denominada Discordância de Ucayali (Campbell *et al.*, 2006), tendo origem na Orogenia Andina da fase Quechua I de caráter compressivo (Campbell *et al.*, 2006), posicionada no intervalo Plioceno-Pleistoceno por Campbell *et al.* (2001) e Kummel (1948).

Tais sucessões sedimentares indicam que os substratos que sustentam a floresta de Terra Firme nesta região foram constituídos por meio da agregação de barras fluviais e sedimentos da planície de inundação. Tais canais esculpíram os modernos vales fluviais aos quais as atuais florestas de Várzea estão atualmente restritas (Pupim *et al.*, 2019).

Segundo Pupim *et al.* (2019), durante o Plioceno-Pleistoceno, os sistemas eram amplamente cobertos por sistemas fluviais não confinados e lagos de várzea, o que implica grande disseminação de ambientes inundados formados após o desenvolvimento transcontinental do Rio Amazonas no Plioceno (Campbell *et al.*, 2006).

A Bacia do Solimões é dividida em 2 sub-bacias: a leste a Sub-Bacia do Juruá e a oeste a Sub-Bacia de Jandiatuba, respectivamente com 3.800 e 3.100 metros de espessura de sedimento. As sub-bacias são separadas pelo alto estrutural de 120 Km chamado de Arco de Carauari. As sequências deposicionais podem ser divididas em duas sequências de 1ª Ordem, Paleozoica e Mesozoica/Cenozoica. A Sequência Paleozoica, detentora das rochas reservatórios de hidrocarbonetos, é composta por quatro sequências de 2ª Ordem (Ordoviciano Inferior, Siluriano Superior-Devoniano Inferior, Devoniano Médio

Carbonífero Inferior e Carbonífero Superior-Permiano Inferior), sendo afetada por intrusões de diques e soleiras de diabásio e coberta pela sequência Mesozoica-Cenozoica (Eiras, 1994, e reforçado por Silva, 1998)

A partir da flexura litosférica ocasionada pela Orogenia Andina, houve a instalação, no Paleogeno, de um sistema fluvial isolado, que posteriormente gerou um sistema lagunar.

A Formação Solimões surge como resultado do aumento do aporte sedimentar dos rios, com um aumento da deposição sedimentar arenosa e argilosa entre os Rios Jutai e Negro, acumulando até 7000 metros de depósitos entre o Arco de Purus e bacias Subandinas(Eiras, 1994).

3.2. Sedimentação no rio Solimões

Os terraços fluviais são extremamente importantes para o entendimento da evolução sedimentológica e biológica do Quaternário, em especial do Holoceno. Eles são definidos como feições geomorfológicas feitas de material aluvionar em uma região mais elevada que a da planície do rio, sendo que esta diferença de altura se dá pela erosão do rio, devido a fatores climáticos e tectônicos (Winge *et al.* 2001; Bridge e Demico, 2008).

Esses estudos são utilizados para estudos da biodiversidade ao longo da evolução quaternária do clima e tectônica (Rossetti *et al.* 2005, Pupim *et al.* 2019).

Rossetti *et al.* (2005) separam o que anteriormente era conhecida uniformemente como Formação Içá em quatro sucessões distintas, denominadas: Q1(43,7 a 37,4 mil anos), constituído de lobos arenosos intercalados com finas camadas de argila orgânica; Q2 (~27,2 mil anos), tendo granulometria ascendente de argila até areia média; Q3 (6,73 a 2,48 mil anos), sendo composta de intercalações de argila e areia fina e; Q4 (280 a 130 mil anos), correspondendo a planícies de inundação moderna, de ocorrência descontínua e compostos de areia fina a muito fina que intercala com material pelítico. Q1 e Q2 correspondem a sistemas de lobos progradacionais e Q3 e Q4 correspondem à formação dos terraços fluviais (Rossetti *et al.* 2005).

Todavia, Soares *et al.* (2010) dizem que estas idades podem ser mais antigas para os terraços do rio Solimões, que vão de 65.200 à 7.500 anos através de dados obtidos por OSL (Luminescência Opticamente Estimulada).

Gonçalves Júnior (2016) divide os terraços do Rio Solimões em 3 unidades morfoestratigráficas sendo elas: Os Terraços Superiores (UT), de idade 240-15 mil anos, através de métodos OSL, com a presença de marcas onduladas e camadas de solo. Internamente possui intercalações de areia e lama; A segunda são os Terraços Intermediários (IT) de idade 31-19 mil anos, composta de espessas camadas de lama siltosa, de cor cinza e amarronzada, intercaladas por camadas métricas de areia

acinzentada infrequentes, sendo rompidos por canais mais jovens e lagos de meandro; por fim, os Terraços Inferiores (LT), de 18-2 mil anos. Todavia, sua litologia é composta por intercalações de camadas siltosas métricas marrom e camadas arenosas submétricas cinza claras, sendo elas bem selecionadas e de granulação fina.

Segundo Roza *et al.* (2012), o atual sistema fluvial *anabranching* se definiu a partir do modelo de meandros de forma gradual há cerca de 7 mil anos devido a eventos neotectônicos e mudança do nível do mar. Em rios tais quais o Rio Solimões a sedimentação ocorre principalmente em pontos mais próximos do canal, justamente nos terraços (Walling e He, 1998), sendo que variações transversais das planícies são recorrentes. Entretanto, variações longitudinais da sedimentação não ocorrem de forma aparente, embora segregação granulométrica seja observada. Segundo Konsoer *et al.* (2016), a formação de barras de rolagem (*scroll bars*) ocorre em decorrência da diferença da erosão nas margens e planícies de inundação.

As fontes sedimentares do rio Solimões e Rio Japurá são de origem principalmente andina (Sawakuchi *et al.*, 2018), justamente devido a sua nascente, tal qual a do rio Madeira, ter localização sobre rochas vulcânicas e metassedimentares mesozoicas e neogênicas (Sawakuchi *et al.*, 2018), posteriormente correndo sobre sedimentos subandinos e da Amazônia Central (Jaillard *et al.*, 2000). A abundância de feldspato em relação a quartzos em sedimentos do Rio Solimões indica que os grãos de quartzo são provenientes de áreas de maior taxa de denudação. Neste caso implica rápida erosão de fontes nos Andes, resultando em período curto de exposição ao intemperismo químico durante o transporte, favorecendo o aporte de minerais pouco estáveis nos sedimentos fluviais, o que mostra que o intemperismo dos sedimentos durante o transporte pode ser desconsiderado (Sawakuchi *et al.* 2018).

Campbell *et al.* (2001) dizem que essas contribuições andinas ocorreram no Plioceno, enquanto que Rossetti *et al.* (2005) e Bezerra (2003) afirmam que esse aporte sedimentar ocorreu no final do Pleistoceno.

3.3 Formação Içá

O rio Japurá percorre áreas pertencentes à Formação Içá, que foram definidas por Maia *et al.* (1977), através de furo de sondagem na margem do rio Içá, na região de São Joaquim, norte do estado do Amazonas. Essa formação é caracterizada pela presença de arenitos amarelo-avermelhados, finos a conglomerados e friáveis, tendo a presença de siltitos subordinados e argilitos de ambiente continental árido. Há a presença de feições tal qual ritmitos maciços, pelitos e conglomerados, estes com estratificação cruzada acanalada, laminações cruzadas, além de marcas de ondas e estratificação sigmoidal,

marcas de raízes, estratificação cruzada tabular e fósseis de planta, principalmente.

Os depósitos atribuídos à Formação Içá são formados por camadas de areia que se depositaram durante o Pleistoceno e formaram os interflúvios de terra firme (não inundáveis), se tornando amplamente distribuídos na área como terraços de terras altas, sendo então os depósitos superiores do substrato amazônico. Seu registro apresenta paleocorrentes NE e SE, com alta proporção de conjuntos de minerais detríticos estáveis que se originaram do Cráton Amazônico (tal qual as províncias Rondônia-San Ignácio e Sunsás-Grenvilliana) e regiões adjacentes, incluindo os cinturões móveis pampeanos brasileiros do Neoproterozoico ao Cambriano (Horbe *et al.*, 2013).

Mineralogicamente, a Formação Içá, em sua porção inferior, apresenta grande presença de andaluzita e outros minerais detríticos estáveis de origem metamórfica, com origem nas províncias mais antigas do Cráton Amazônico e a própria Formação Solimões, enquanto sua porção superior têm maiores concentrações de minerais micáceos, zircão, cianita e minerais instáveis, relacionados a fontes ocidentais (Horbe *et al.*, 2013).

O sentido das paleocorrentes, aliado a idade da formação e idade da atual configuração do Rio Solimões, segundo Horbe *et al.* (2013), sugere que o Arco de Iquitos bloqueou a entrada de sedimentos advindos do oeste, sendo erodido após a deposição da Formação Içá (Fig. 2).

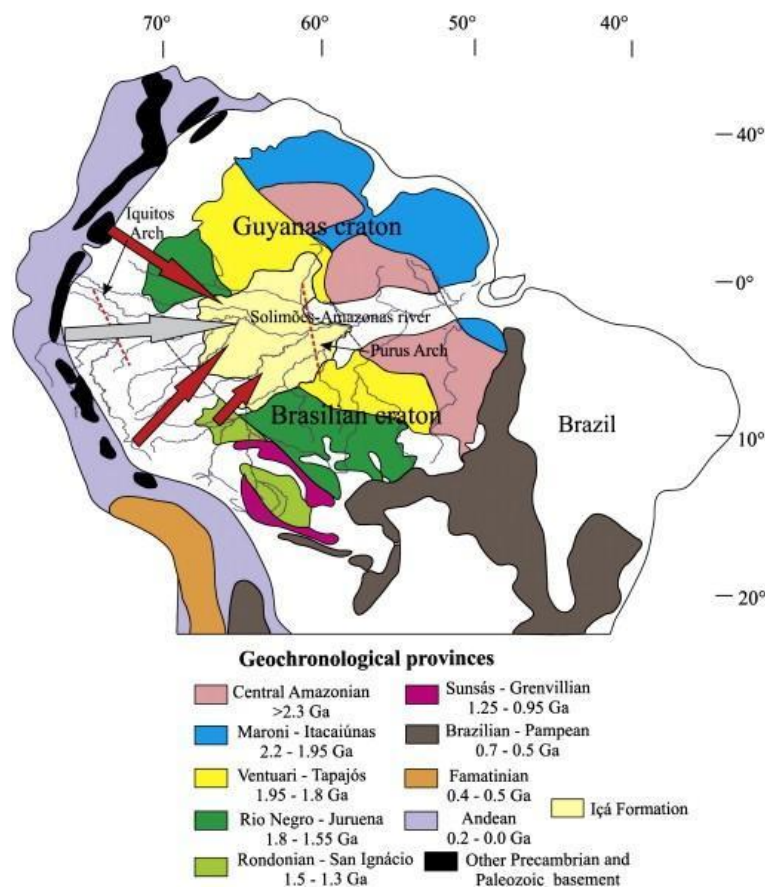


Figura 2. Mapa geológico da Amazônia, com as províncias geocronológicas do cráton amazônico e regiões adjacentes, após Tassinari e Macambira (1999), Fuck et al. (2008), Cardona et al. (2009) e Decou et al. (2013). As setas vermelhas e a seta cinza mostram respectivamente a posição das fontes primárias principais

e a direção do fluxo sedimentar da Formação Içá e dos depósitos recentes. A posição estimada do Arco de Iquitos e Purus é indicada pelas linhas pontilhadas vermelhas (Roddaz et al., 2005a).

3.4. Proveniência sedimentar

O uso da proveniência sedimentar permite não apenas correlacionar a área fonte de sedimentos, mas também permite inferir sobre sua história evolutiva, tal como o transporte sofrido, clima e influência tectônica (Pettijohn et al., 1987). Entre as ferramentas aplicáveis para esta análise há a petrografia de minerais pesados, sendo um método reconhecido para comparação e reconstrução de proveniência (e.g., Eynatten e Gaupp, 1999). O uso de minerais pesados para estudos de proveniência tem ampla utilização para caracterização, discriminação e correlação de áreas fontes (Krippner et al., 2016), com sua utilização em variados contextos, como gnaisses pré-cambrianos no sudoeste da noruega (Krippner *et al.*, 2016), no complexo de subducção do Indo-Burman–Andaman–Nicobar (Garzanti *et al.*, 2013), no leste dos Alpes, visando reconstituição da proveniência sedimentar de arenitos do cretáceo (Eynatten e Gaupp, 1999), reconstituição de paleodrenagem e paleoclima (Weltje e Eynatten, 2004), proveniência sedimentar no deserto da Namíbia (Garzanti *et al.*, 2012), divisão estratigráfica de unidades geológicas (Decou, 2011; Morton e Hallsworth, 1994) ou até para datação U-Pb em zircão (Alvàn *et al.*, 2015). Essa utilização generalizada em estudos de proveniência se deve ao fato de minerais pesados serem suscetíveis a mudanças de suas assembleias em bacias quando ocorre mudança da proveniência sedimentar (Dickinson e Suczek, 1979), causando mudança na frequência mineralógica (Alvàn *et al.*, 2015). A aplicação de minerais pesados também é usado como indicativo de fácies metamórficas da área fonte (Eynatten e Dunkl, 2012) e paleotermômetro no momento da exumação (Eynatten e Dunkl, 2012).

Através da aplicação em estratigrafia, proveniência e paleoclima, os minerais pesados têm sido aplicados em estudos geológicos de bacia e formações petrolíferas, como Fossum *et al.*, (2019), para proveniência e geocronologia na bacia petrolífera de Mandawa, em arenitos petrolíferos russos (Yurkova, 1970) e como indicador de condições de formação de petróleo (Morton e Hallsworth, 1999).

3.5. Intemperismo em minerais pesados

O efeito do intemperismo é uma forçante de considerável influência na análise da proveniência sedimentar, uma vez que durante o processo de transporte e pode haver dissolução de parte dos minerais (Garzanti, 2013), que tem maior magnitude na dissolução e corrosão dos minerais do que a abrasão mecânica durante transporte (Feil, 2024). Durante esse processo, minerais máficos (anfibólio, piroxênio, biotita), são os primeiros a

serem

esgotados uma vez que são minerais instáveis ao intemperismo, enquanto os chamados ultraestáveis (zircão, turmalina e rutilo), resistem mais e acabam por serem concentrados (Weltje e Eynatten, 2004). Todavia a dissolução não é a única causa de remoção de minerais de uma assembleia; fatores como dissolução seletiva, onde minerais de uma composição são mais facilmente lixiviados que outros, como granadas cálcicas sendo mais instáveis que granadas pobres em Ca (Eynatten e Dunkl, 2012), ou a seleção hidráulica (concentração de minerais mais densos, como em praias de monazita) podem alterar a composição da assembleia, concentrando minerais mais estáveis em até duas ordens de grandeza (Garzanti, 2013). Este fator também é influenciado pelo chamado *grain-size inheritance* (herança do tamanho de grão), conceito citado por Feil, (2024) e Krippner, (2016), diz que nem todos os minerais pesados partem da rocha fonte com mesma granulometria e nem se concentram de forma homogênea nas mesmas granulometrias, implicando remoção de certos minerais antes da deposição devido ao tamanho (Krippner, 2016), segregando certas variedades minerais a faixas granulométricas (Krippner, 2016), como turmalinas metamórficas se concentrando em granulometria de areia fina a muito fina, enquanto turmalinas graníticas se concentram mais em areia média à grossa (Viator, 2003). Todavia, essa herança por granulometria não é regra, como demonstrado por Eynatten *et al.*, (2005), onde a concentração de rutilo não variou entre fases granulométricas diferentes.

Quanto maior o tempo de residência dos minerais após a deposição somado ao quão profundamente estiverem enterrados, maior tenderá a ser a dissolução por diagenese, de modo que esses minerais sofrem corrosão, com os mais instáveis não permanecendo na assembleia, de tal modo que as assembleias depositada não são iguais à rocha fonte (Morton e Hallsworth, 1994). Este aspecto é bastante significativo em planícies de inundação e terraços fluviais, especialmente de clima neotropical (Morton e Hallsworth, 1994). Isso pode ser observado em contextos de orógenos drenados por rios, como os Andes, que fornecem sedimentos para a Bacia do Solimões (Sawakuchi *et al.*, 2018). Nesse contexto de grandes rios em clima quente (equatorial), as assembleias de minerais pesados em terraços tendem a ter maior grau de corrosão que seus pares originais (Garzanti, 2013 e Garzanti e Andò, 2007b).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada utilizando 3 conjuntos principais de amostra denominados pelas siglas ALC, RBD e MAO, totalizando 11 amostras em planta e em perfil, como sumarizado na tabela 1. o grupo ALC é designado para os terraços, contendo as amostras ALC 107D, ALC 104B, ALC 104i, ALC 96F, ALC 96C, sendo dividida em dois subconjuntos, o dos terraços a leste (orientais) e do oeste (ocidentais). O subconjunto oriental engloba as amostras ALC 96C e ALC 96F, já as amostras ALC 107D, ALC 104B e ALC 104i fazem parte do subconjunto ocidental. O conjunto RBD engloba as amostras RBD 40L, RBD 38A e RBD 34C, correspondendo ao canal do Rio Solimões. Por fim, as amostras do conjunto MAO, que engloba os exemplares MAO 161, MAO 151 e MAO 140, provém do canal do Rio Solimões (Anexo 1).

Amostra	Unidade
ALC104B	TERRAÇO OCIDENTAL
ALC104i	TERRAÇO OCIDENTAL
ALC107D	TERRAÇO OCIDENTAL
ALC96C	TERRAÇO ORIENTAL
ALC96F	TERRAÇO ORIENTAL
MAO140	CANAL SOLIMÕES
MAO151	CANAL SOLIMÕES
MAO161	CANAL SOLIMÕES
RDB34c	CANAL JAPURÁ
RDB38A	CANAL JAPURÁ
RDB40L	CANAL JAPURÁ

Tabela 1: Localização das amostras e suas fontes de amostragem

A preparação das amostras visando concentração posterior dos minerais pesados, seguiram os clássicos métodos referenciados por Mange e Maurer (1992). Após isso, foi empregada a quantificação da assembleia de minerais pesados, transparentes e não-micáceos. A quantificação se deu através do procedimento de “*ribbon counting*” (Galehouse, 1971; Mange e Maurer, 1992). A posterior análise estatística preliminar envolveu o emprego de análise MDS (escalonamento multidimensional) e o teste de *T-Student*, com o intuito de comparar o valor e dimensão do erro entre os grupos amostrais.

4.1. Preparação para minerais pesados

As etapas de preparação de amostras foram feitas conforme técnicas descritas por Mange e Maurer (1992). Desta forma, os procedimentos seguidos foram a fragmentação da

amostra por meios mecânicos, seguido pelo tratamento químico para remoção de cimentação e matéria orgânica, através do uso de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) sob agitação leve e aquecimento ($50^\circ C$). Antes e após esta etapa são feitas pesagens para cálculo da concentração de minerais pesados presentes na composição da amostra (Garzanti e Andò, 2007a). Uma vez feita, seguiu-se a concentração das diferentes granulometrias (Garzanti e Andò 2020), separadas por peneiramento via úmida, a fim de concentrar a fração correspondente a areia muito fina (Dickinson, 1985), da qual os minerais pesados foram concentrados (Garzanti *et al.*, 2016; Mange e Maurer, 1992). Embora o uso de frações específicas pode levar ao enviesamento estatístico das assembleias de minerais pesados, o uso da amostra de forma integral, só é possível em condições específicas (Garzanti e Andò, 2019). Como as amostras de leito de rio e seus terraços possuem apreciável variação na granulometria, não é viável aplicar todas as granulometrias (Mange e Maurer, 1992), focando-se então na fração areia muito fina.

Os minerais foram concentrados a partir de duas abordagens diferentes, sendo que a preparação para segregação em ambas seguia o mesmo caminho: a separação por líquido denso (politungstato de sódio) através de centrifugação (Garzanti e Andò, 2019). A primeira abordagem de separação fez uso de pipeta para recolher os minerais alocados ao fundo do tubo de ensaio após a centrifugação (Mange e Maurer, 1992). Na segunda abordagem foi efetuado o congelamento parcial do líquido denso, mergulhando parcialmente o tubo de ensaio em Nitrogênio líquido (Fig. 3, 4 e 5) por 2 minutos, de forma a congelar somente o fundo do tubo de ensaio, não afetando o restante do volume (Fig. 5). O volume não congelado pode, então, ser lavado e despejado em filtro, separando de forma eficiente os minerais leves dos extratos de minerais pesados congelados (Garzanti e Andò, 2020). Em seguida se aplica água desmineralizada ao corpo congelado para derretê-lo e obter a fração pesada muito mais limpa, sem contaminação de minerais leves (Garzanti e Andò, 2020). Esta metodologia já foi replicada por Tangari *et al.*, (2021), Garzanti *et al.*, (2022), Lai *et al* (2023), He *et al.*, (2023), Usman *et al.*, (2024). Com a aplicação desse método neste estudo tendo sido a primeira vez que fora aplicada no Laboratório de Sedimentologia da Universidade de São Paulo.

Com a alíquota de minerais pesados concentrada, foram produzidas lâminas de imersão, sendo de 1 até 3 lâminas, a depender da quantidade de grãos (Mange e Maurer, 1992). O meio de imersão utilizado foi o Bálsamo do Canadá Natural (índice de refração 1,54-1,56): após aquecimento das lâminas é depositado o Bálsamo, seguidos do extrato de minerais pesados, adição de lamínula e, posteriormente, resfriado rapidamente em água desmineralizada.

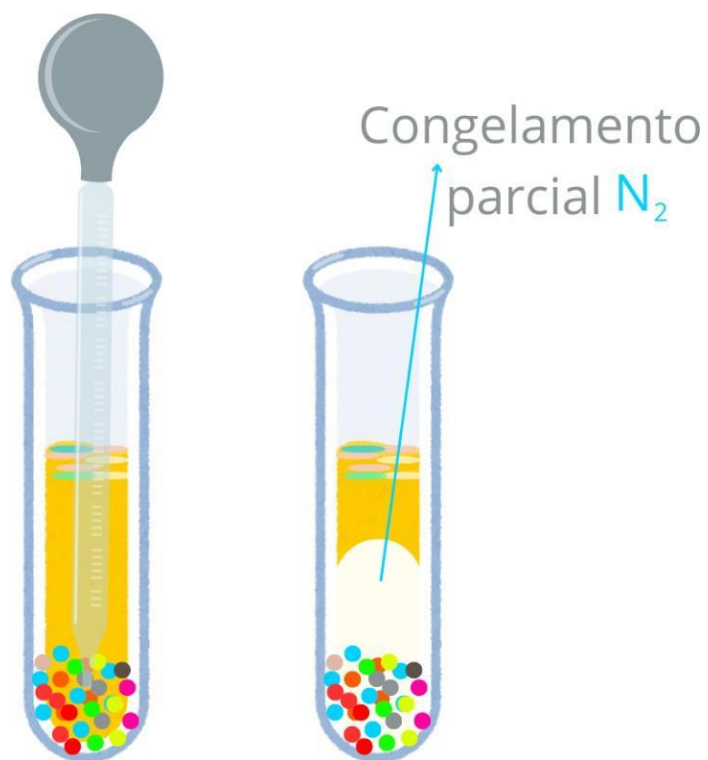


Figura 3: Representação dos métodos de coleta, com método de coleta tradicional (pipeta), à esquerda e método de coleta por congelamento parcial à direita



Figura 4: Montagem do processo de banho em Nitrogênio Líquido, usando um sistema de Banho Maria, congelando a base do tubo.

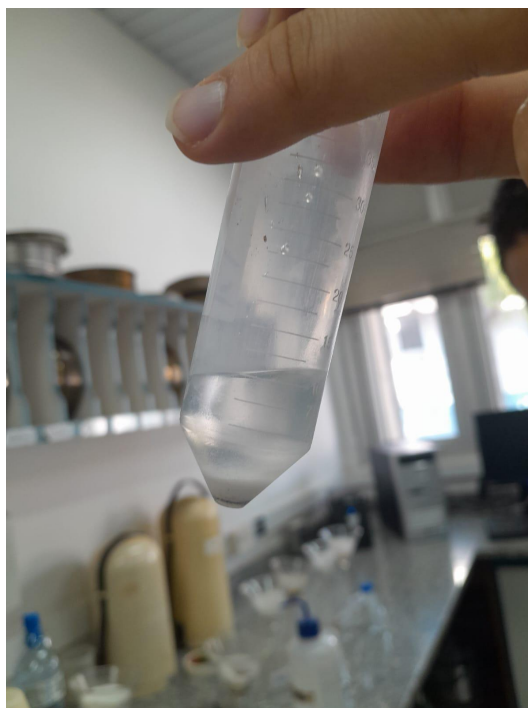


Figura 5: Fundo do Tubo congelado após processo de mergulho parcial para separação de pesados.

Após a confecção das lâminas, foram realizadas a quantificação de minerais pesados em microscópio petrográfico modelo Axioplan, contabilizando 300 grãos, excluindo grãos opacos, semi-opacos e leves que possam ter passados (Ingersoll *et al.*, 1984), distinguindo as diferentes espécies mineralógicas de forma a quantificar sua população, relacionando junto suas características de preservação (Mange e Maurer; 1992).

4.2. Feições de corrosão e intemperismo

Devido a ação do intemperismo que age sobre os minerais, estes acabam por apresentar feições de corrosão em variados graus, de tal forma que sua análise contribui para o entendimento acerca do estágio de maturidade do sedimento e dos diferentes fatores ambientais que acarretam nessas feições, conforme proposto por Andó *et al.* (2012). Para tanto, foram escolhidos como alvo das análises o zircão (Fig. 6), turmalina (Fig. 7), rutilo (Fig. 8), granada (Fig. 9) e cianita (Fig. 10).

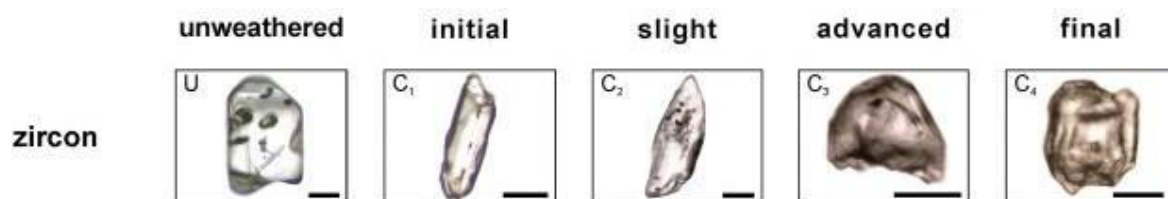


Figura 6: Estados de conservação do zircão, extraído de Andó *et al.* (2012).

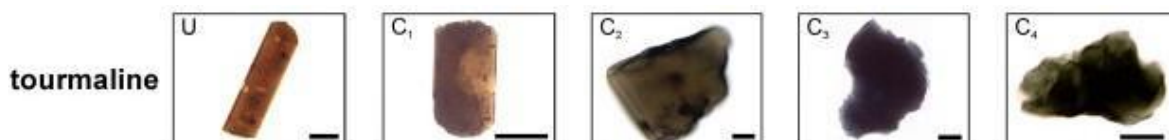


Figura 7: Estados de conservação da turmalina, extraído de Andó *et al.* (2012).

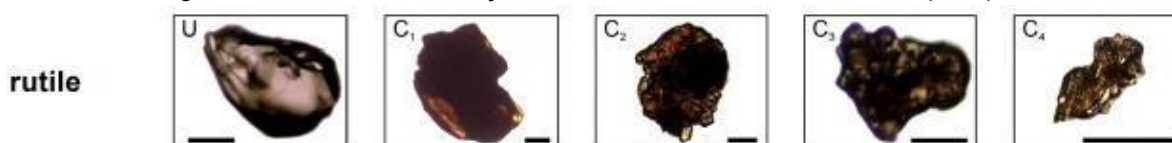


Figura 8: Estados de conservação do rutilo, extraído de Andó *et al.* (2012).

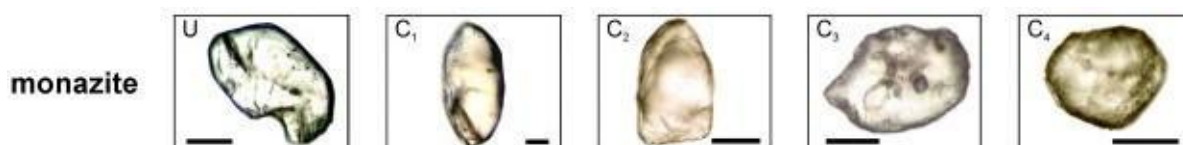


Figura 9: Variados graus de corrosão da monazita, Andó *et al.* (2012).

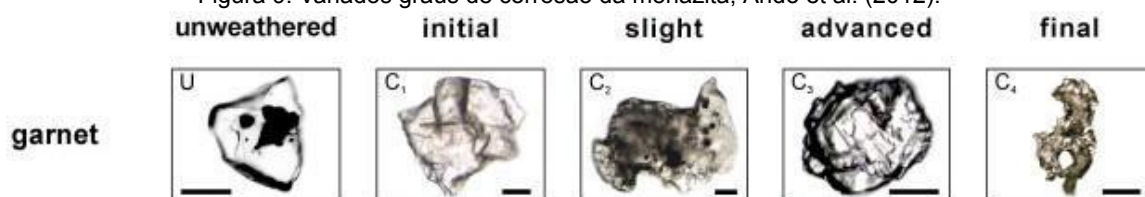


Figura 10: Variados graus de corrosão da granada, Andó *et al.* (2012).

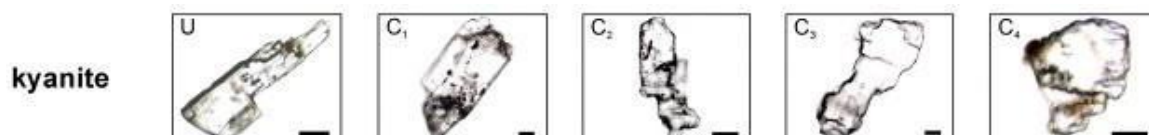


Figura 11: Variados graus de corrosão da cianita, Andó *et al.* (2012).

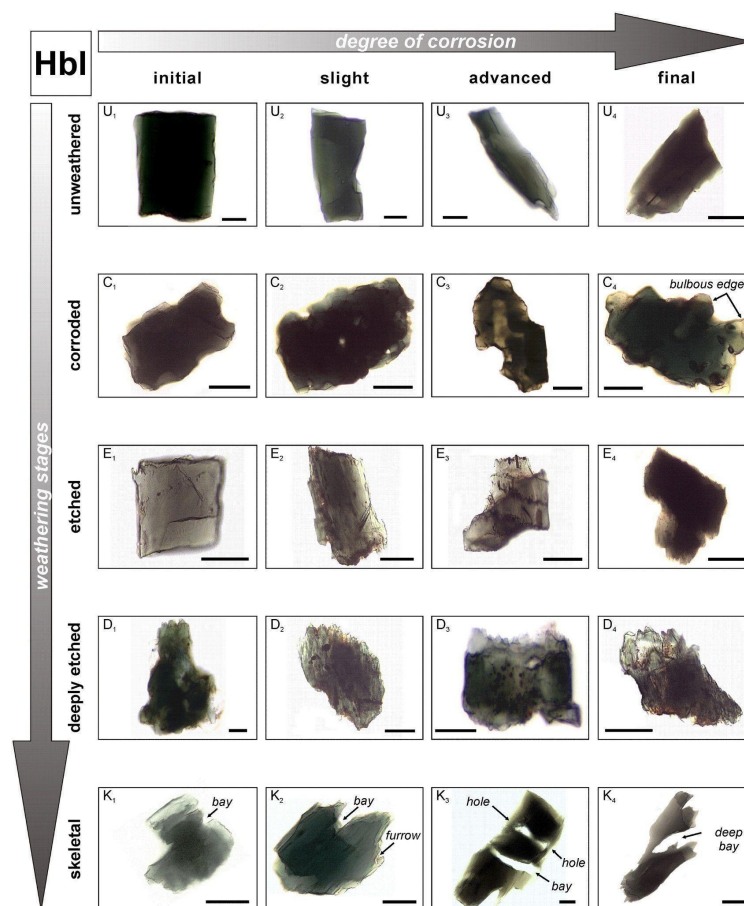


Figura 12: Graus de corrosão (eixo horizontal) e intemperismo (eixo vertical) sobre hornblenda, Andò et al. (2012). Os graus de intemperismo foram traduzidos como (de cima para baixo): inalterado, corroído, serrilhado, profundamente serrilhado e esquelético

O grau de arredondamento (Fig. 14) é importante para minerais ultraestáveis, uma vez que permite comparar o grau de intemperismo sofrido por seus grãos, uma vez que feições de corrosão de nível baixo não são comuns, dada a resistência desse mineral. Assim sendo, o grau de arredondamento permite comparar influências pós deposicionais em assembleias maduras Andò *et al.* (2012).

4.3. Índices de Minerais Pesados

A aplicação de índices de Minerais Pesados é empregada desde Hubert (1962), com Mange e Maurer (1992) dando destaque às aplicações do índice ZTR. Os índices são aplicados no intuito de estabelecer a proveniência sedimentar e seu ambiente de origem (Garzanti e Andò, 2007b), além de permitir comparações quanto a influência do intemperismo, com maiores valores, representando maior grau de maturidade (Hubert, 1962).

A aplicação dos índices seguiu o estabelecido por Garzanti e Andò (2007b), por

serem considerados bastante eficazes na comparação de grupos mineralógicos, sendo eles o ZTR, ZR, Anf-Pyr, Hbl e tHMC, explicados a seguir.

4.3.1. ZTR

O índice ZTR foi estabelecido por Hubert (1962), que usa minerais ultraestáveis (zircão, turmalina e rutilo), sobre a soma dos minerais pesados transparentes (MPt), excluindo muscovita (cujo range de densidade varia de 2,7-3g/cm³, limítrofe aos Minerais Pesados), como mostrado na Fig. 13. Este índice se baseia na alta estabilidade compartilhada pelos três minerais em relação ao intemperismo, sendo um bom indicador da área fonte além dos ciclos de reciclagem de sedimentos, que aumentam a concentração de zircão, turmalina e rutilo (Eynatten e Dunkl, 2012).

$$ZTR = \frac{\sum (Z + T + R)}{\sum (M + P + t)}$$

Figura 13: Fórmula de cálculo do ZTR, baseado em Hubert (1962) e Garzanti e Andò (2007a).

4.3.2. ZR

O índice ZR foi estabelecido por Hubert (1962), com Garzanti e Andò (2007), aplicando-o para comparação de diferentes áreas fontes. O cálculo do índice usa a razão de

minerais ultraestáveis ultradensos (zircão e rutilo), contra o valor da soma de todos os ultraestáveis (Fig. 14)

$$ZR = \frac{(zircão+rutilo)}{(zircão+turmalina+rutilo)}$$

Figura 14: Fórmula de cálculo do ZR, baseado em Garzanti e Andò (2007b).

4.3.3. *Anf-Pry*

O terceiro índice aplicado foi baseado na lista de índices de Garzanti e Andò (2007), e em Rossetti *et al.* (2005). O índice é a razão de anfibólio e piroxênio dividido pela soma de Minerais Pesados transparentes (MPt). Essa relação faz uso do principal mineral diferenciador das amostras, a hornblenda, cuja presença em cada grupo de amostra tem um comportamento diferente, variando significativamente sua frequência (Fig. 15). Sua aplicação visou medir a intensidade de intemperismo, baseado no consumo de anfibólio (principalmente hornblenda) e piroxênio pelo intemperismo nas assembleias.

$$Anf - Pyr = \frac{(anfíbólio+piroxênio)}{\Sigma(MPt-muscovita)}$$

Figura 15: Fórmula de cálculo do Anf-Pyr, modificado de Garzanti e Andò (2007a) e Rossetti et al. (2005)

4.3.4. Concentração de hornblenda

O quarto índice tratou da razão de Ca-anfíbólio pela soma de minerais pesados, uma vez que este é um dos minerais mais presentes em arenitos continentais modernos (Garzanti e Andò, 2007). Desta forma, a razão de Ca-anf ajuda a discriminar diferentes áreas-fonte, além de ser outro bom indicador da intensidade do intemperismo sobre os minerais, uma vez que como dito anteriormente, a hornblenda é um mineral menos resistente ao intemperismo Garzanti e Andò (2007b). O cálculo se baseia na razão entre a quantidade de Ca-anf em relação ao número de pesado, excluído Mu (Fig. 16).

$$Hbl = \frac{(hornblenda)}{\Sigma(MPt-muscovita)}$$

Figura 16: Fórmula de cálculo da concentração de hbl, baseado em Garzanti e Andò (2007)

4.3.5. tHMC

O último índice foi a Concentração de Minerais Pesados transparentes (tHMC), sua aplicação visa obter a concentração dos minerais pesados transparente dentro da amostra como um todo, afim de ver o quão rica em minerais pesados as amostras são. O cálculo foi detalhado em Garzanti e Andò (2007a), seguindo as seguintes etapas:

1. A razão do peso do concentrado de minerais pesados pelo peso total da amostra usada na concentração, multiplicada pela razão entre Minerais Pesados (densidade superior a 2,9 g/cm³) por total de contagem (Fig. 17).

$$H\% = \left(\frac{w}{W} \right) \left(\frac{\frac{TOT}{\Delta_H}}{\Delta_H} \right)$$

Figura 17: Cálculo da concentração de minerais pesados em relação ao peso total da amostra; Wh-peso dos minerais pesado, wtot-peso total, tot- total de minerais pesados da contagem pesado, h-

quantidade de minerais da contagem como um todo

2. Exclusão de grãos filossilicatos (bt e chl), carbonatos e minerais sintéticos (Fig. 18).

$$HM\% = H\% \times \left(1 - \frac{s}{h}\right)$$

figura 18: Concentração de Minerais Pesados sem filossilicáticos; s-minerais a tirar, h-total de pesados

Uma vez que não foram contabilizados opacos, turvos e nem cimento dissolvido, como explicado por Garzanti e Andò (2007a), então o valor de tHMC será o valor de HM%.

4.4. Metodologia estatística

O MDS (*Multidimensional scaling*) permite comparar amostras a partir dos dados de matriz de dissimilaridade, colocando amostras similares mais próximas do que amostras diferentes (Vermeesch, 2013). Essa ferramenta estatística tem origem no campo da psicologia, através dos estudos de percepção de cores e de estímulos sensoriais por humanos (e.g., Helm, 1964), e posteriormente utilizada na ecologia (e.g., Kenkel e Orlóci, 1986) na paleontologia, (e.g., Dunkley Jones *et al.*, 2008; Schneider *et al.*, 2011), tendo só recentemente incorporado aos estudos de proveniência sedimentar (Vermeesch, 2013).

O método de MDS funciona ao mostrar a similaridade entre as diferentes amostras, usando diferentes dimensões, com cada dimensão correspondente a uma variável nessas amostras, permitindo sua comparação, de forma a usar o dado original das amostras e calcular sua dissimilaridade (Vermeesch, 2013). O MDS produz como resultado um gráfico do tipo *bi-plot*, com os grupos de pontos (amostras) mais similares entre si mais próximos (Vermeesch, 2013). Esse gráfico é feito utilizando uma matriz de dissimilaridade, obtida através do teste de Kolmogorov-Smirnov, medindo a distância entre cada par de amostra (Xue *et al.*, 2023), que então é plotada em plano cartesiano formando grupos de similaridade (Vermeesch, 2013). Assim, é possível comparar *proxies* diferentes para diferentes amostras em uma análise única, em vez de despendar vários gráficos para um único parâmetro por vez (Vermeesch e Garzanti, 2015).

Antes da realização de MDS, duas etapas foram realizadas: a primeira foi a substituição dos zeros da contagem por valores estatisticamente indistinguíveis de 0 (neste caso um valor inferior a precisão dos dados gerados), permitindo a posterior realização de uma razão logarítmica (Fig. 19; Aitchison, 1982). A razão logarítmica é realizada visando remover a restrição de soma constante, o que na prática força com que os dados composicionais (que por definição somam 100%) possam variar de forma independente uns dos outros (Aitchison, 1982; Kucera e Malmgren, 1998). O método de razão logarítmica foi a transformação *centered log ratio*, que utiliza da razão de cada componente pela média:

$$clr(x) = \log \frac{x}{\bar{x}(x)}$$

Figura 19: Fórmula da transformação razão logarítmica centrada.

5. RESULTADOS

Através das contabilizações de frequência de minerais pesados transparentes não micáceos, obteve-se os valores mostrados no Anexo 1 e as proporções observadas na Fig. 20 e no Anexo 2. Desse modo, seguindo padrão estabelecido na tabela 1, é destacável que as amostras dos Terraços Ocidentais, possuem altos valores de zircão (sempre acima de 20%) e rutilo (chegando a 60%), sendo amostras de maturidade mineralógica bastante elevada. Paralelo a isso é notória a alta concentração de hornblenda nas amostras do rio Japurá (40-60%), mostrando uma maturidade textural muito baixa, em contraste às amostras correspondente aos terraços ocidentais. Ademais, as amostras dos terraços orientais juntamente com as amostras do rio Solimões são bastante próximas em suas concentrações de hornblenda e hiperstênio (frequências parecidas), além de valores de zircão, turmalina e rutilo.

Os minerais mais frequentes na quantificação da assembleia de Minerais Pesados (Anexo 1) foram especialmente: hornblenda, hiperstênio, epídoto, zircão, rutilo e clinopiroxênios (Fig. 20), como augita e diopsídio.

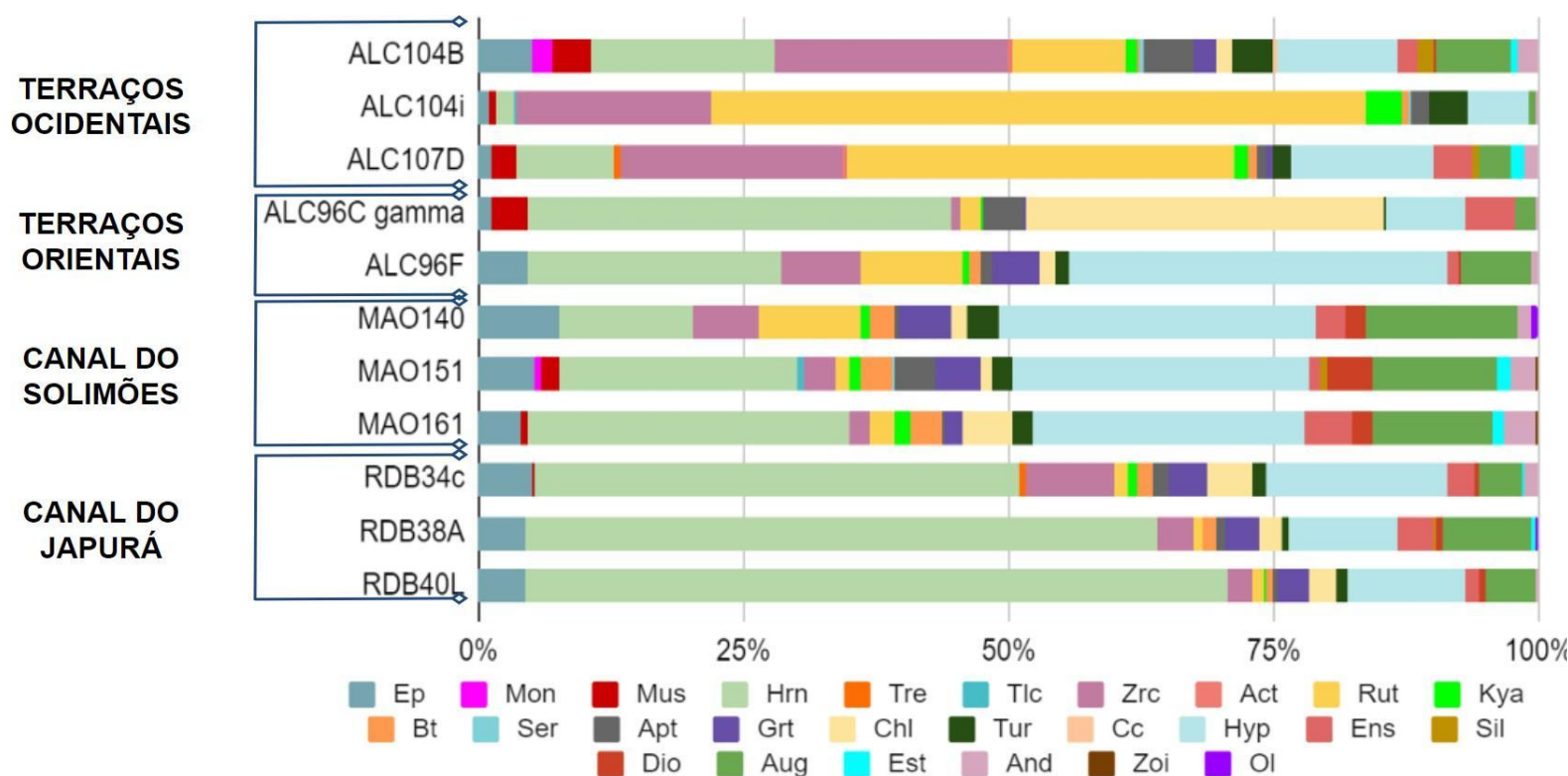


Figura 20: Frequência de minerais por amostra

5.1. Petrografia de minerais pesados

Minerais que são parte de sedimentos de canais de rios tendem a sofrer influência do intemperismo e modificação de sua textura durante o transporte, ficando muitas vezes desgastados em diferentes graus (Andò *et al.*, 2012).

O trabalho de Andó *et al.* (2012) foi usado como parâmetro para as comparações de corrosão, intemperismo e arredondamento de alguns dos minerais observados como referido na seção Materiais e Métodos.

5.1.1. Terraços Ocidentais

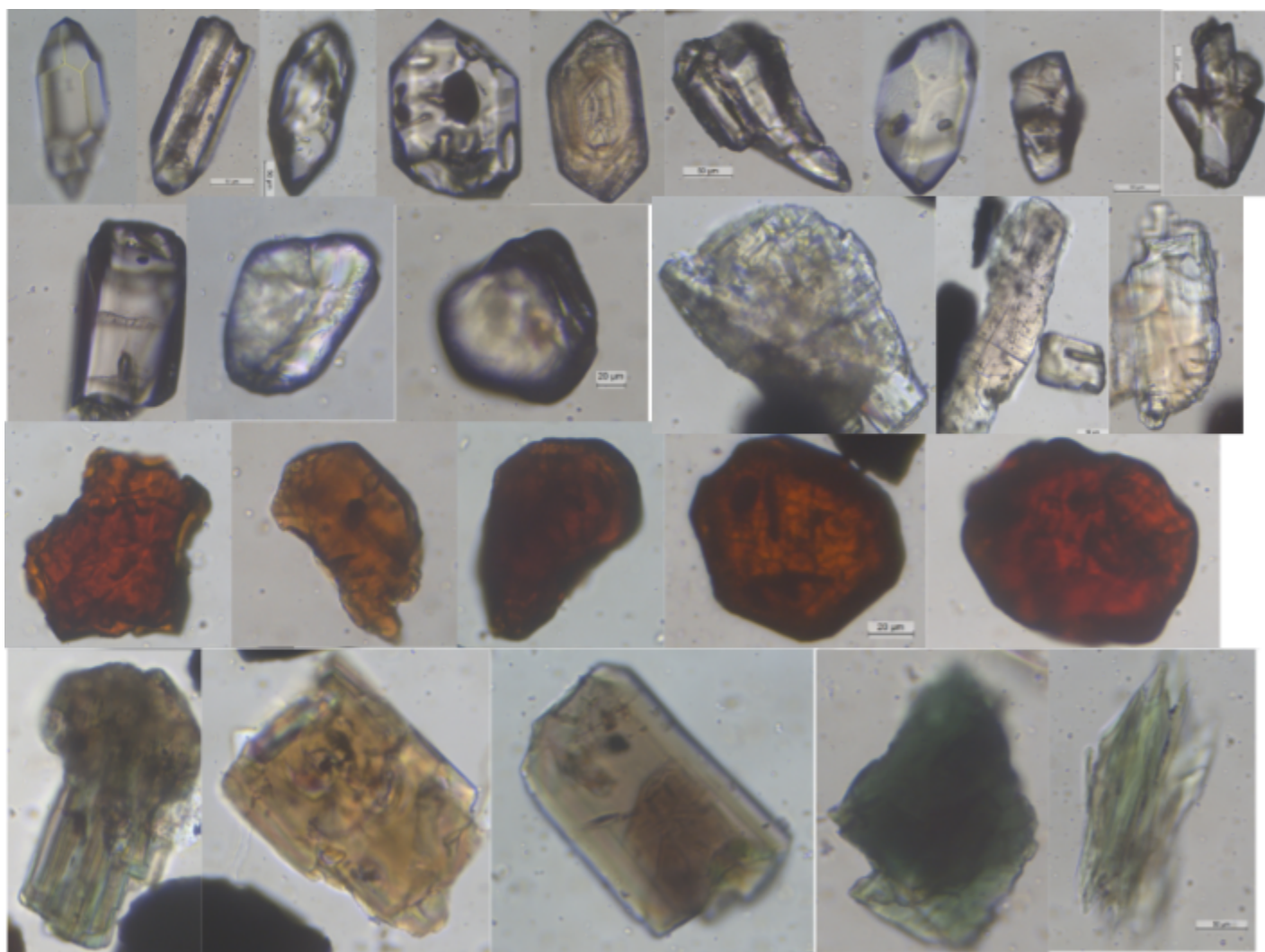


Figura 21: De cima pra baixo, zircão, cianita na segunda linha ,rutilo na terceira linha, turmalina e hornblenda na quarta linha. Os minerais a direita, são mais euédricos, e a esquerda mais arredondados

Os minerais originados dos terraços ocidentais, apresentam maiores quantidades de minerais estáveis como rutilo e zircão. Os grãos de zircão (Fig. 21) não apresentam feições de corrosão ou inicialmente intemperizados, chegando a avançado em certas ocasiões com grau de arredondamento variando do euédrico e angular , chegando a arredondado. A presença de inclusões também é observada esporadicamente.

A variedade de grãos de rutilo (Fig. 21) desse conjunto vai de inalterada, mais

comum, até avançadamente corroída, com grau de arredondamento indo de subarredondado até angulosos

Paralelamente, hornblenda e piroxênio provindos dos terraços ocidentais são os que apresentam maior grau de corrosão, tendo grau de intemperismo de serrilhado até profundamente serrilhado. Apesar de muitos grãos apresentarem grau de corrosão avançado, a frequência de grãos inicialmente ou levemente corroídos é maior do que os que estão mais intensamente corroídos, como visto na Fig. 21.

Grãos de cianita (Fig. 21) apresentam corrosão, variando de não afetadas até em estágio final de corrosão, com muitos grãos em estado esquelético, sendo bastante reconhecível como o mineral em maior estado de corrosão da assembleia.

Turmalinas são os minerais ultraestáveis com maior grau de corrosão superficial, chegando principalmente inicial até avançado, com muitas vezes grãos angulosos curtos, subarredondados e arredondados (Fig. 21), geralmente cobertos por óxidos.

5.1.2. Terraços Orientais

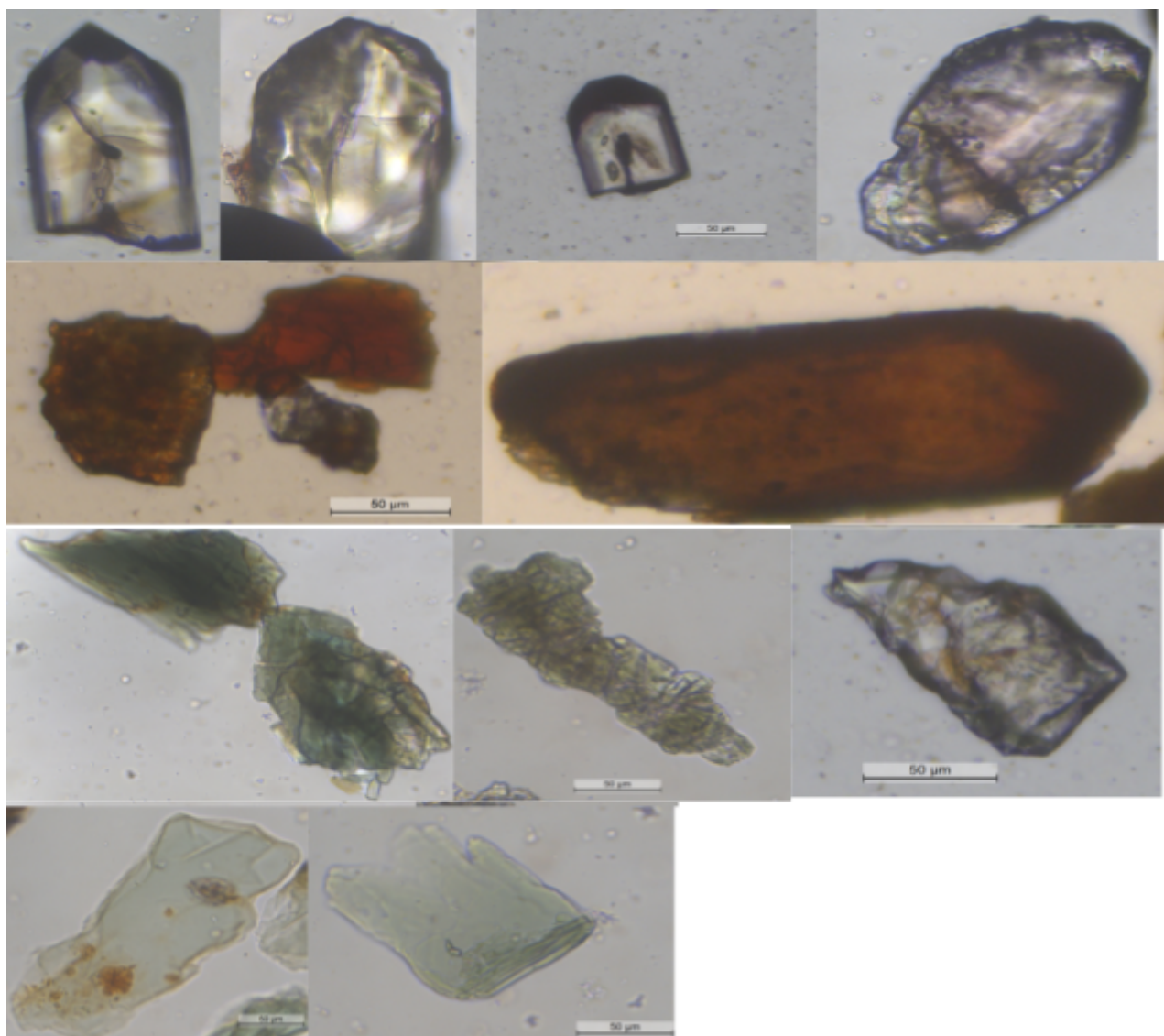


Figura 22: De cima pra baixo, zircão, rutilo, hornblenda e granada na terceira linha, com clorita na quarta linha, com os minerais a direita, mais euédricos que os da esquerda

Os terraços orientais são representados pelas amostras ALC 96C e ALC 96F, nos quais ocorre visível diferenciação mineral, com grande concentração de cloritas e hornblendas na amostra ALC 96C, na qual as cloritas apresentam bordas irregulares e, às vezes, oxidação (Fig. 22). Já a hornblenda apresenta grãos fortemente corroídos e profundas alterações intempéricas, chegando a profundamente serrilhado (Fig. 22).

As granadas presentes nessas assembleias estão em estado inicial ou até mesmo inalterado de corrosão, sendo geralmente grãos grandes, com baixo grau de arredondamento, principalmente subédricos (Fig. 22).

Os zircões apresentam grau de corrosão inalterado em sua maioria (Fig. 22) com pontas bem definidas. Existem, todavia, casos com avançado grau de corrosão (Fig. 22). Os grãos aparecem como euédricos, com casos de grãos subarredondados e arredondados, muitas vezes apresentam inclusões, com exemplos de inclusão de opacos e de minerais

escuros ou de pequenos zircões (Fig.22).

A presença de grãos de monazita na lâmina é esporádica, vindo acompanhada de inclusões de rutilo, opacos e zircão (Fig. 23), tendo alto grau de arredondamento e grau de corrosão inicial (Fig. 9).

A amostra ALC 96F apresenta grande quantidade de hiperstênio e hornblenda, tendo ambos alto grau corrosão, de nível avançado, com presença de feições pontiagudas, indo de serrilhado até profundamente serrilhado, chegando até mesmo à esqueletal, com grãos de tamanho variado devido a fragmentação (Fig. 22).

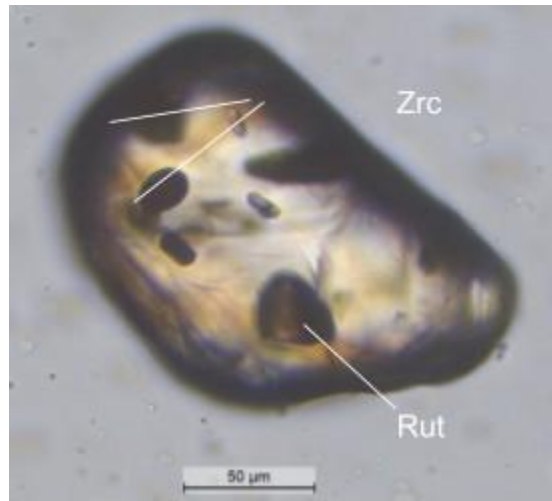


Figura 23: Monazita da amostra ALC 96F, destacando presença de inclusões de zircão e rutilo.

Os grãos de rutilo apresentam grau de corrosão de inicial até avançado, com maior frequência deste último, ou até mesmo no estágio final de corrosão, com formato subarredondado ou angular (Fig. 22).

5.1.3. Canal do rio Solimões

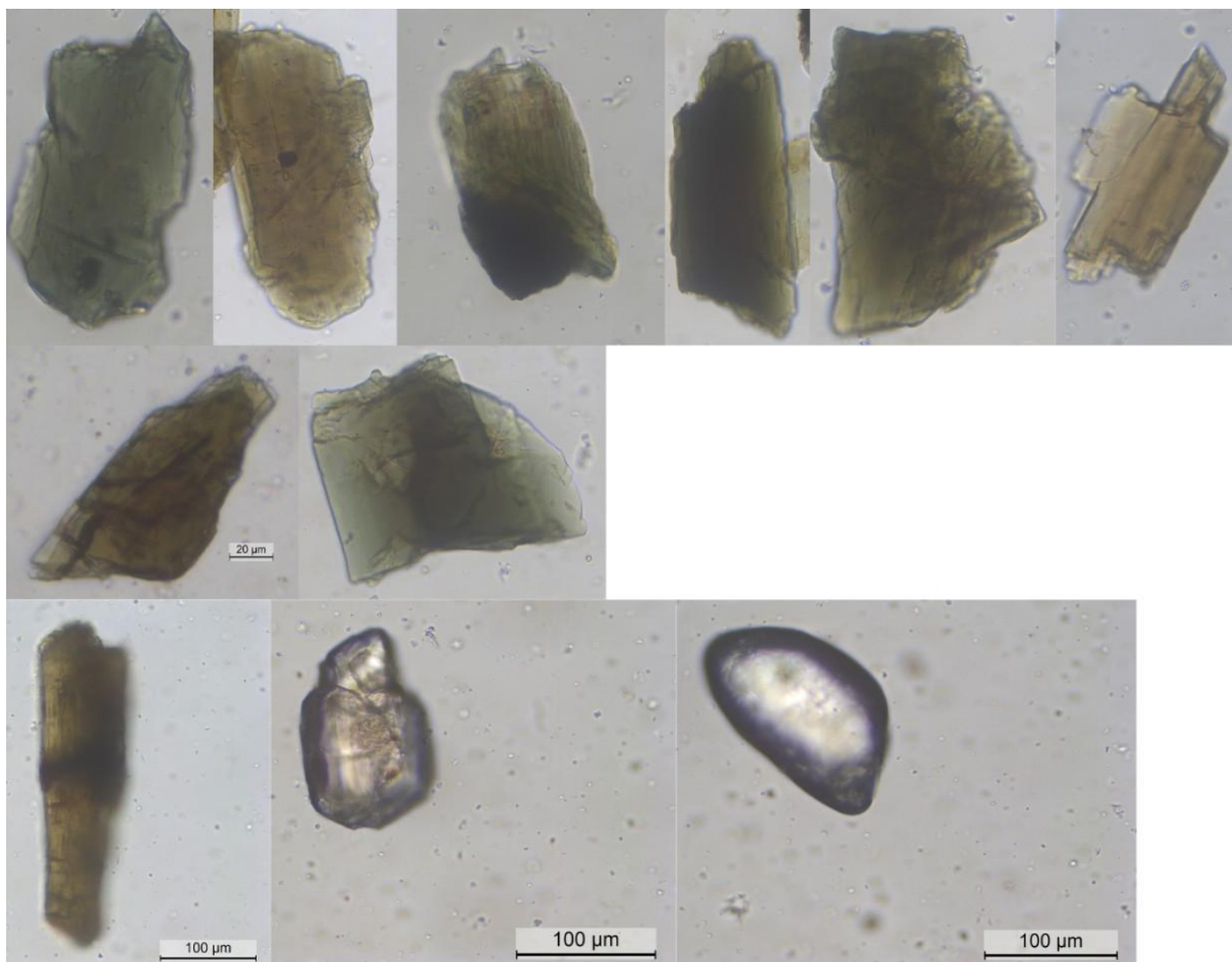


Figura 24: hornblendas, da direita pra esquerda tendendo a subédrico, na fileira de baixo respectivamente turmalina, granada e zircão

As granadas da assembleias são subarredondadas, com pouca corrosão superficial, indo somente até inicial (Fig. 24).

Hornblenda é um mineral bastante frequente na amostra (Anexo 1 e Fig.20), com grau de corrosão superficial normalmente leve, chegando a avançado com alguns minerais em estágio de intemperismo como serrilhado (Fig. 24).

Os grãos de zircão presentes nas assembleias possuem alto grau de arredondamento, todavia a corrosão ao longo da superfície do mineral é baixa, indo de inafetado a inicial (Fig. 24).

As turmalinas são os minerais ultraestáveis que mais apresentam feições de corrosão na assembleia, muitas vezes com presença de oxidação e corrosão em nível leve, todavia o grau de arredondamento é baixo, e os grãos são angulares (Fig. 24), tendo esse mineral a menor concentração relativa entre outros ultraestáveis.

5.1.4. Canal do rio Japurá

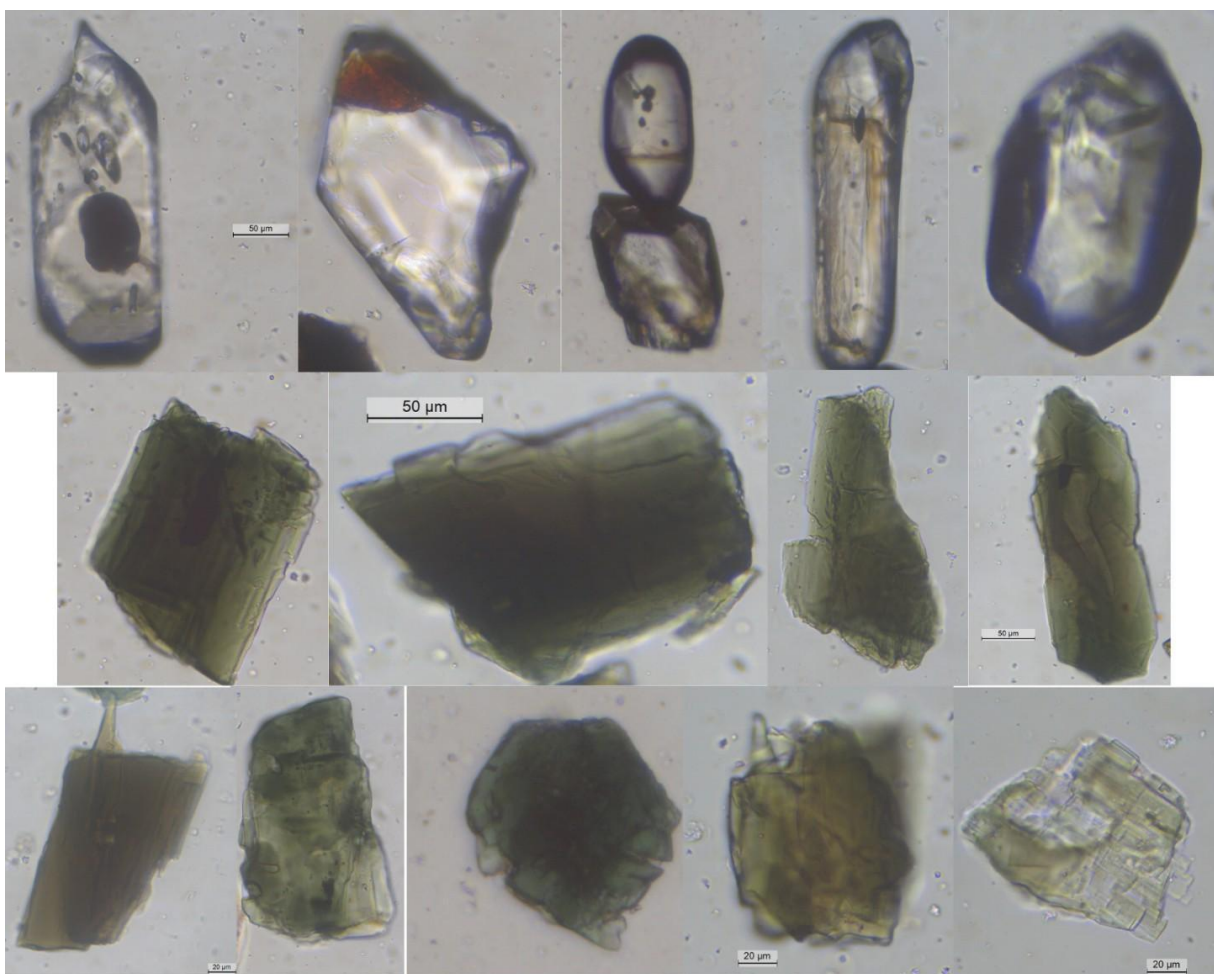


Figura 25: zircão e hornblendas

O mineral de maior presença nesta assembleia é a hornblenda, tendo variedade considerável em seu grau de corrosão, indo de inicial até avançado, com feições pontiagudas destacáveis, com grãos serrilhados. Os seus grãos são principalmente subédricos, com grãos curtos (Fig. 25).

A maioria dos grãos apresentam feições típicas de corrosão avançada, com alguma presença de corrosão inicial junto a grãos com feições esqueléticas e grau de corrosão avançado (Fig. 25).

Os zircões vistos nessas assembleias apresentavam feições pouco corroídas, com grau de corrosão inexistente ou inicial predominantemente, com grãos euédricos, angulares e subarredondados (Fig. 25).

A presença de inclusões é frequente, tal como ilustrado na Fig. 25, com os grãos de zircão possuindo inclusões de zircão e opacos.

5.2. Análise de dados

5.2.1. Concentração de pesados por pipeta

Ao analisar os gráficos preliminares obtidos pelo processamento estatístico da primeira rodada de contagem (conforme método detalhado na Seção 4) é possível desenhar algumas considerações; O *bi-plot* de análise de principais componentes (Fig. 26) mostra forte controle de determinadas variáveis sobre amostras individuais.

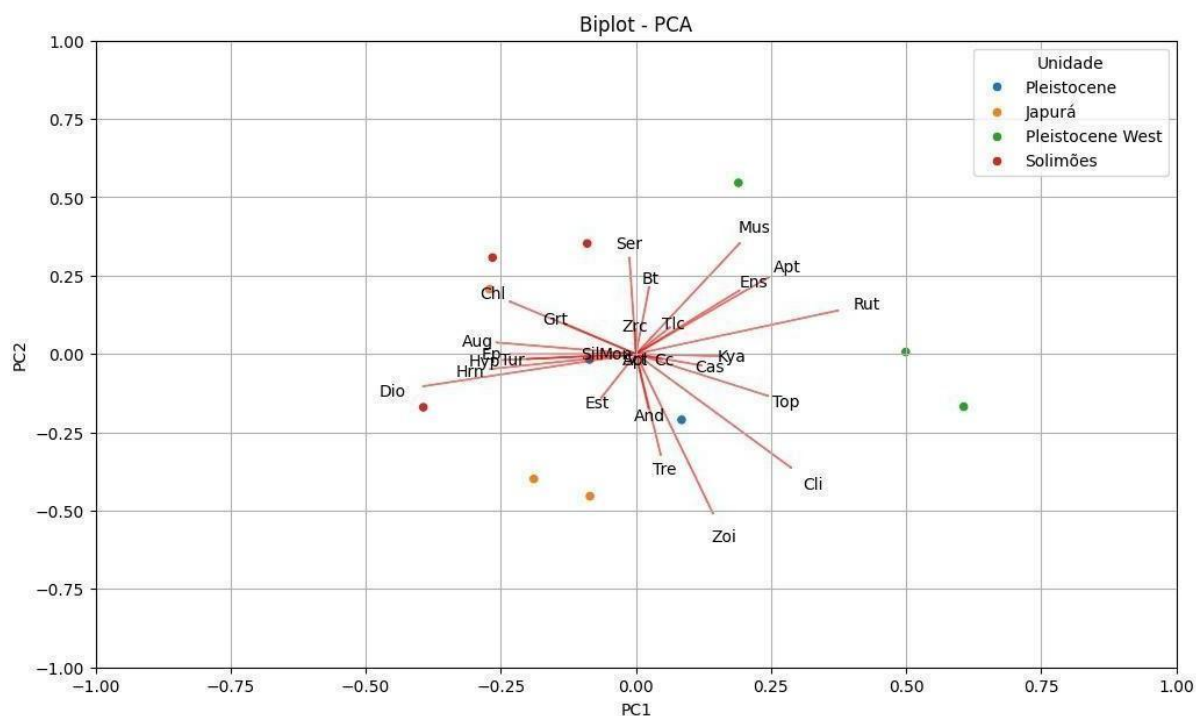


Figura 26: Bi-plot do MDS das amostras e minerais.

No gráfico da Fig. 26 vemos a oposição de certas variáveis, uma vez que os eixos que lhes correspondem estão em sentidos opostos, associados a agrupamentos de amostras. Destaca-se a oposição de rutilo, que se opõe aos minerais diopsídio, hornblenda, augita, turmalina, epídoto e hiperstênio. Como o rutilo é um mineral bastante estável, implica que amostras que possuem assembleias mais ricas desse mineral são mais maduras. Todavia, amostras enriquecidas em hornblenda, augita, epídoto e hiperstênio, são caracterizadas como mais imaturas, uma vez que apresentam grande gama de minerais pouco estáveis ao intemperismo.

A presença de zircão em eixo perpendicular ao rutilo indica que esses dois não apresentam correlação. Isso contradiz o esperado, uma vez que ambos são minerais consideravelmente estáveis, que deveriam aparecer em alta concentração juntos.

Desta forma, ocorrem distorções na interpretação dos dados, a exemplo da Fig. 27 e da Fig. 28, onde é possível ver que assembleias minerais pesados produzidas pelo método

de colheita manual de grãos agrupam as amostras de canais do Rio Japurá e do Rio Solimões, que acabam divergindo dos terraços depositados. Tal resultado não é o esperado, considerando a estratégia de amostragem e dos dados de geoquímica apresentados anteriormente por Mazoca (2023).

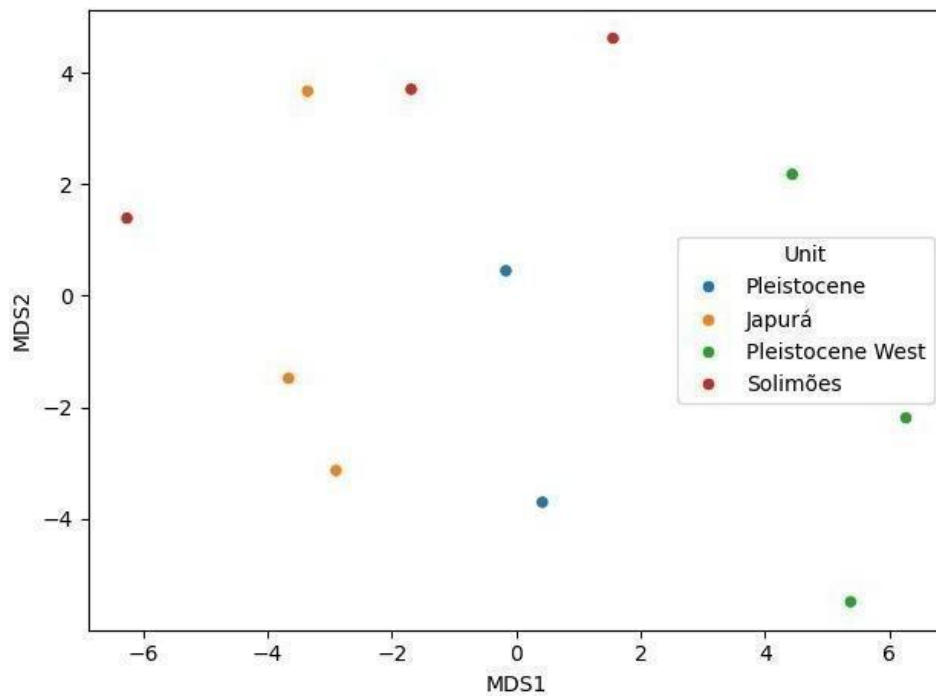


Figura 27: Bi-plot do MDS mostrando a similaridade das amostras.

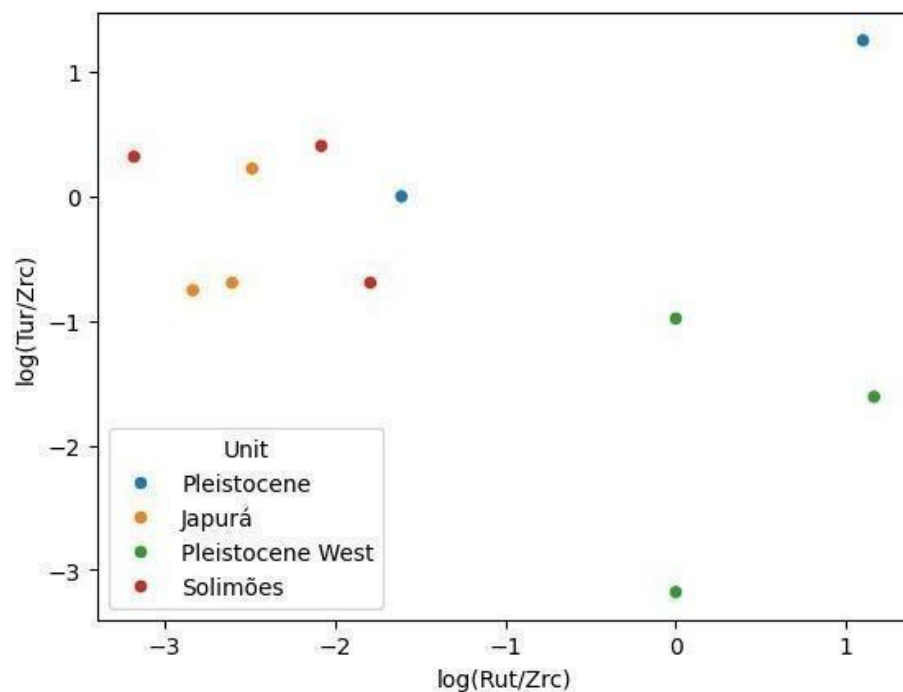


Figura 28: Comparação entre as razões de turmalina/zircão e rutilo/zircão

5.2.1. Concentração de pesados por congelamento parcial

Na Fig. 30, observa-se clara separação das espécies mineralógicas segundo a região de origem das assembleias, com as associações provenientes dos terraços tendo maiores concentrações de minerais ultraestáveis, como zircão e rutilo, e os canais apresentando maior presença de ortopiroxênio, clinopiroxênio e hornblenda.

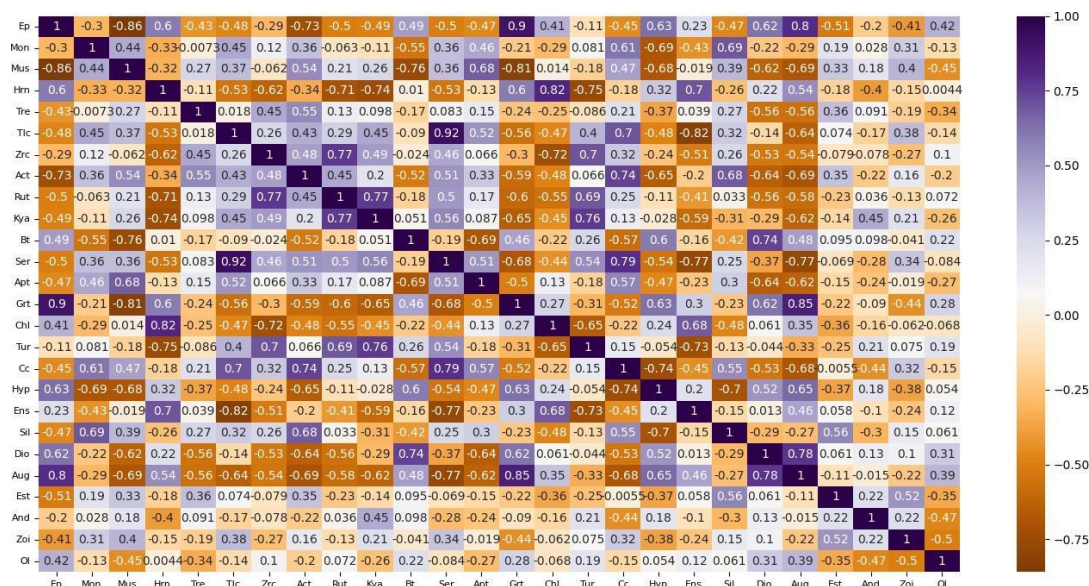


Figura 29: Correlação entre minerais após substituição dos zeros. Quanto mais perto de 1, maior a correlação entre os minerais, mostrando alta relação entre rutilo, zircão e cianita e entre augita e diopsídio.

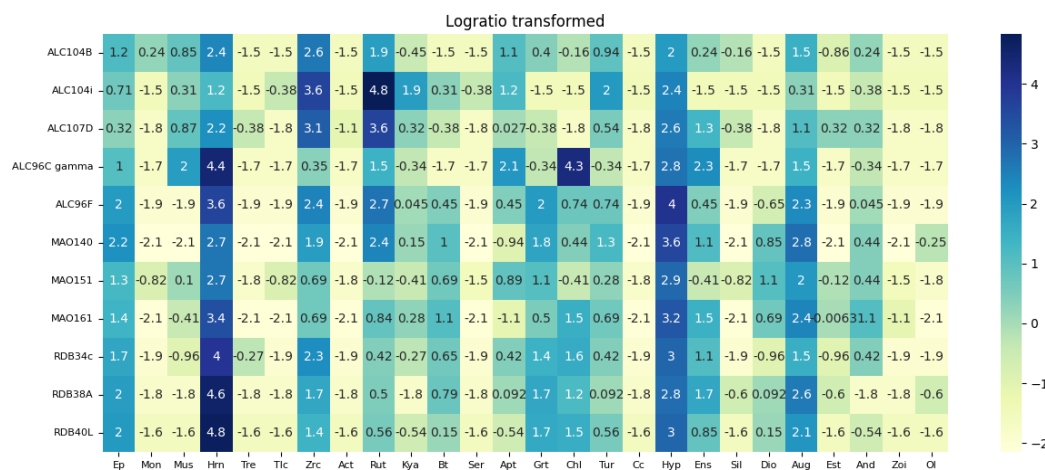


Figura 30: concentração relativa dos minerais após transformação logratio

A análise de similaridade em *bi-plot*, mostrada na Fig. 31, exibe o grau de proximidade, baseado nos minerais que cada amostra tem entre si. Desse modo, é visível um agrupamento dos eixos representantes dos componentes mineralógicos ultraestáveis, significando que eles possuem correlação apreciável, ou seja, tendem a aparecer juntos na assembleia de minerais pesados, e não aparecem quando minerais cujos os eixos estão em sentido oposto estão presentes.

Conforme mostrado na Fig. 31, zircão, rutilo, turmalina e cianita tendem a ocorrer juntos, em oposição a presença de clorita e hornblenda não tendo relação visível com granada, diopsídio, epídoto, hiperstênio, augita e biotita, uma vez que estão perpendiculares a esses componentes. Em vista dessas correlações, o agrupamento de pontos dos terraços ocidentais (mostrado como *pleistocene west*), está isolado dos outros *plots* acompanhando a tendência dos minerais ultraestáveis, mostrando maior maturidade mineralógica.

O diagrama de análise MDS das Fig. 32 e 33, não mostram de forma clara as correlações de similaridade entre as amostras, todavia mostram certo isolamento nas amostras provindas do rio Japurá, e maior similaridade das amostras de terraços ocidentais, orientais rio Solimões.

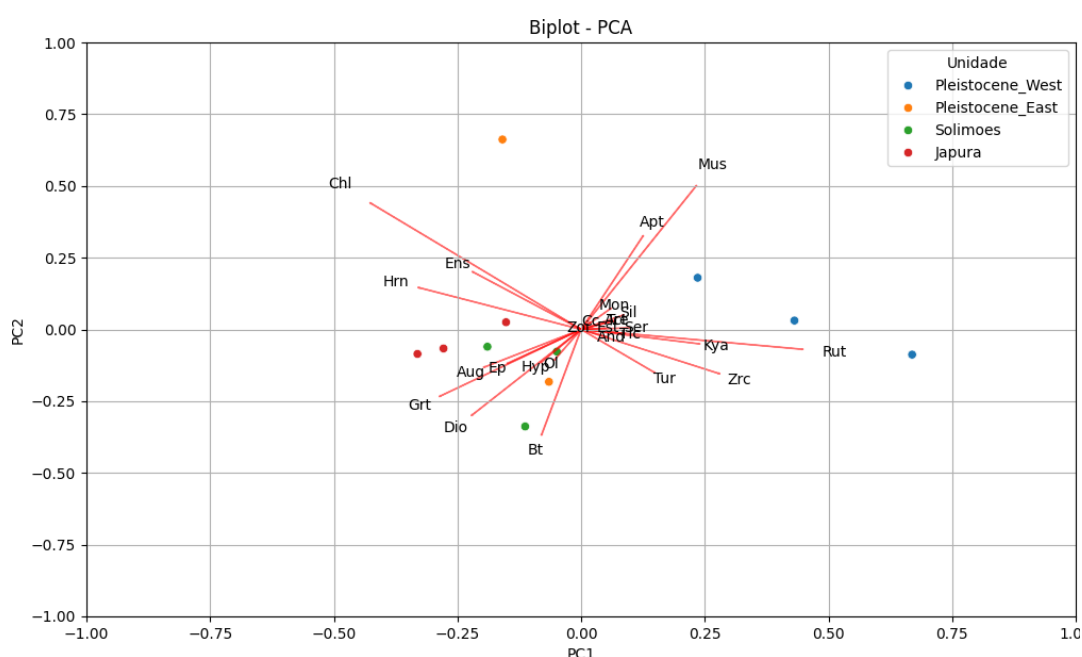


Figura 31: Análise de principais componentes das amostras, baseado no grau de similaridade entre as frequências minerais das assembleias de cada amostra.

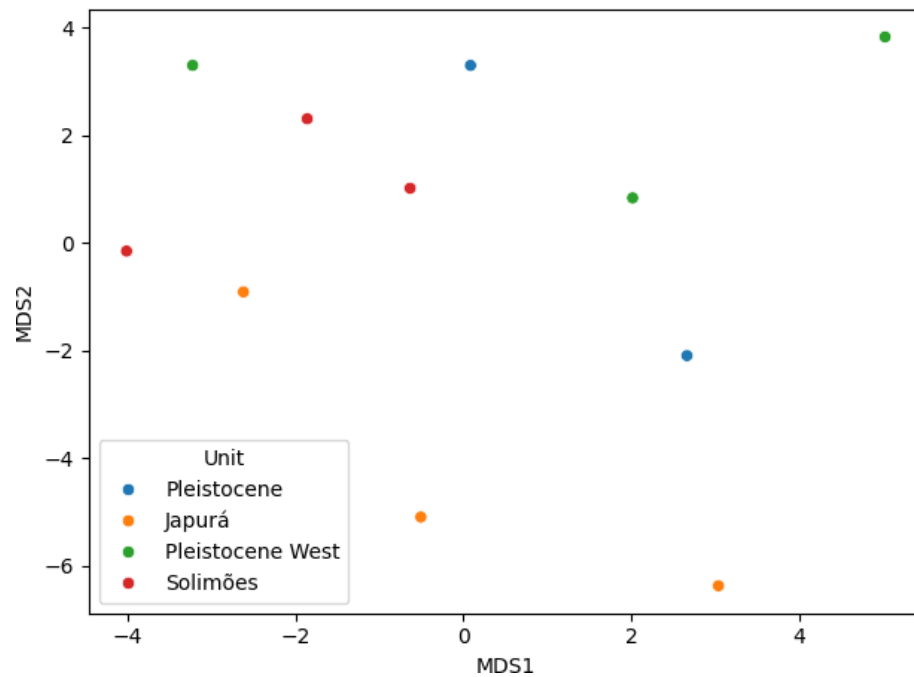


Figura 32: MDS das amostras comparando a similaridade das amostras

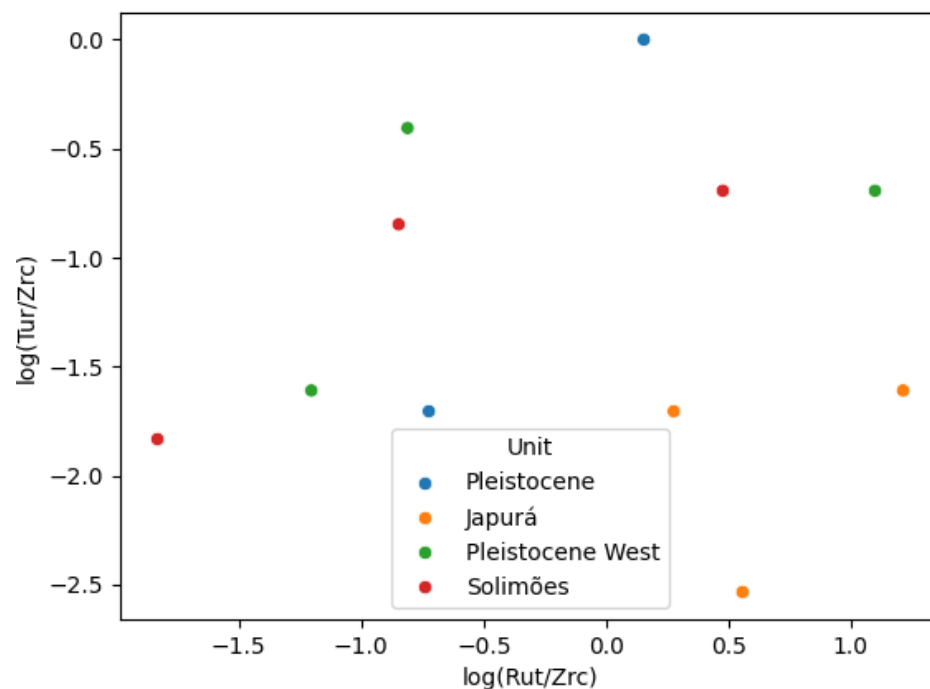


Figura 33: Comparação entre as razões de turmalina/zircão e rutilo/zircão

Como as frequências relativas de piroxênio e hornblenda eram consideravelmente diferente entre os distintos grupos de amostra, a aplicação de um índice da concentração de anfibólios e piroxênios em relação a minerais ultraestáveis revelou a separação das associações de canais e terraços (Fig. 34). Através dessa comparação os canais do Rio Solimões apresentam maior semelhança aos terraços orientais, formando um *cluster* isolado das demais amostras, que apresentam certa linearidade ligando os terraços ocidentais com

as amostras do Japurá. Isso cria 3 grupos distintivos. O primeiro mostra maior proximidade do rio Solimões com os terraços orientais, mostrando similaridade entre as amostras provindas das duas localidades. O segundo sendo os canais do Rio Japurá, que apesar de estar na mesma tendência linear que os terraços ocidentais, formam um grupo isolado com pouca presença de ultraestáveis e alta presença de minerais máficos (anfibólio e piroxênio). Por fim, o grupo dos terraços ocidentais mostra tendência linear de maior aumento dos valores de ZTR e diminuição da presença dos instáveis.

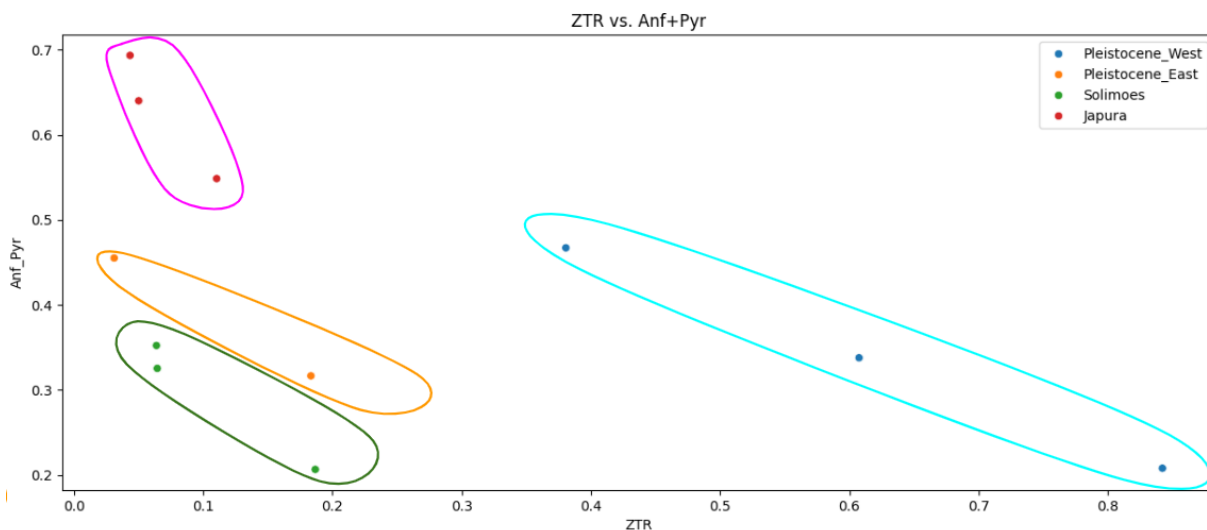


Figura 34: Correlação entre concentração de anfibólios e piroxênios em relação a minerais ultraestáveis, mostrando isolamento das amostras provenientes do Rio Japurá em relação às amostras dos terraços ocidentais, de caráter mais maduro, com maiores valores de ZTR. As amostras do Rio Solimões e dos terraços Orientais são próximas, tendo então similaridade entre elas.

5.3. Índices de concentração de minerais pesados

Os índices aplicados às contagens de mineral pesado possibilitam melhor entendimento da proveniência e do ambiente tectônico envolvido (Garzanti e Andò, 2007b). A aplicação dos índices exclui opacos e minerais com peso específico menor que 2,9 g/cm³ (Garzanti e Andò, 2007a).

5.3.1. Índice tHMC

A concentração de minerais pesados transparentes (tHMC), é fundamental para a definição do ambiente e tipos de sedimentação envolvidas, tal como o seu ambiente produtor ou contexto tectônico envolvido (Garzanti e Andò, 2007). Os dados obtidos na tabela 1 ilustram a tHMC calculada, seguindo a seção 4.3.5, com os valores atribuídos ao canal do rio Japurá, rondando o 1%, enquanto a maioria dos valores atribuídos ao Rio Solimões não passam de 0,2%. Os terraços, seja oriental ou ocidental, apresentam valores frequentemente menores que 0,1%, sendo especial o caso da amostra ALC 96C, passando

de 0,56%. Esses valores classificam as assembleias como extremamente pobres até moderadamente ricas (Garzanti *et al.*, 2011).

Amostra	Unidade	tHMC	Classificação
ALC 104B	TERRAÇO WEST	0,03%	Extremamente pobre
ALC 104I	TERRAÇO WEST	0,07%	Extremamente pobre
ALC 107D	TERRAÇO WEST	0,18%	Muito pobre
ALC 96C	TERRAÇO EAST	0,56%	Pobre
ALC 96F	TERRAÇO EAST	0,01%	Extremamente pobre
MAO 140	CANAL SOLIMÕES	3,57%	Moderadamente rico
MAO 151	CANAL SOLIMÕES	0,13%	Muito pobre
MAO 161	CANAL SOLIMÕES	0,17%	Muito pobre
RBD 34C	CANAL JAPURÁ	1,06%	Moderadamente pobre
RBD 38A	CANAL JAPURÁ	0,92%	Pobre
RBD 40L	CANAL JAPURÁ	1,47%	Moderadamente pobre

Tabela 2: tHMC das amostras e classificação segundo Garzanti *et al.*, 2011

5.3.2. Índice ZTR e ZR

O ZTR calculado para os terraços orientais e o canal do Rio Solimões apresentam valores muito similares, com a média dos valores sendo praticamente idêntica, mostrando pouca diferenciação entre eles. Tal fato indica que eles provavelmente foram expostos de maneira similar a condições intempéricas e por um período parecido.

O rio Japurá apresenta valores significativamente baixos de ZTR, mostrando uma assembleia muito imatura, com notável presença de minerais instáveis, significando uma influência menor do intemperismo sobre ela. A menor intensidade do intemperismo pode significar um período de exposição a condições intempéricas pós-deposicional menor que aos demais grupos.

Os terraços ocidentais são os que possuem maior maturidade mineralógica, com valores de altos valores de ZTR (de 40-80%), se destacando das demais assembleias. Esse valor demonstra um processo de corrosão significativo de minerais instáveis nesse grupo, como visto com a cianita e hornblenda nas amostras, que tendem a possuir um grau de corrosão elevado.

Amostra	Unidade	ZR	ZTR	ZR médio	ZTR médio
ALC 104B	TERRAÇO OCIDENTAL	89,09%	38,19%	93,97%	61,15%
ALC 104i	TERRAÇO OCIDENTAL	95,62%	84,51%		
ALC 107D	TERRAÇO OCIDENTAL	97,19%	60,75%		
ALC 96C gamma	TERRAÇO ORIENTAL	88,89%	3,10%	90,81%	10,72%
ALC 96F	TERRAÇO ORIENTAL	92,73%	18,33%		
MAO 140	CANAL SOLIMÕES	83,93%	18,67%	73,59%	10,50%
MAO 151	CANAL SOLIMÕES	68,42%	6,46%		
MAO 161	CANAL SOLIMÕES	68,42%	6,38%		
RDB 34c	CANAL JAPURÁ	87,88%	11,04%	83,82%	6,79%
RDB 38A	CANAL JAPURÁ	4,33%	5,00%		
RDB 40L	CANAL JAPURÁ	3,33%	4,33%		

Tabela 3: Cálculo de ZTR e ZR para as amostras e suas médias

Os índices de ZR expostos na tabela 3 tendem a ser bastante altos (acima de 90%), uma vez que, como exposto na seção 6.4, seu cálculo leva em conta a razão de zircão e rutilo sobre o ZTR. Devido a baixa quantidade de Turmalinas, esses valores acabam ficando consideravelmente altos, não permitindo muito uma aplicação para comparação de ambiente de origem (Garzanti e Andò, 2007b).

5.3.3. Concentração de hornblenda

Um dos minerais mais frequentes, e com maior amplitude de valores entre as amostras, é a hornblenda (Anexo 1). Desta forma, a aplicação de um índice específico permite uma comparação entre diferentes assembleias a partir desse mineral, com os valores mostrados na tabela 3.

Amostra	Unidade	hbl	Média hbl
ALC 104B	TERRAÇO OCIDENTAL	18,06%	9,65%
ALC 104i	TERRAÇO OCIDENTAL	1,68%	
ALC 107D	TERRAÇO OCIDENTAL	9,22%	
ALC 96C gamma	TERRAÇO ORIENTAL	41,38%	32,69%
ALC 96F	TERRAÇO ORIENTAL	24,00%	
MAO 140	CANAL SOLIMÕES	12,67%	22,00%
MAO 151	CANAL SOLIMÕES	22,79%	
MAO 161	CANAL SOLIMÕES	30,54%	
RDB 34c	CANAL JAPURÁ	45,82%	57,27%
RDB 38A	CANAL JAPURÁ	59,67%	
RDB 40L	CANAL JAPURÁ	66,33%	

tabela 4: cálculo de concentração de hbl

O cálculo da concentração de hornblenda indica menores concentrações nos terraços ocidentais, portanto mostrando maior grau de maturidade, em relação às demais assembleias.

Os terraços orientais e o canal do rio Solimões apresentam valores intermediários de concentração do referido mineral, indicando certa similaridade mineralógica e maturidade em relação ao grau de intemperismo dos dois conjuntos de amostras, apesar de não totalmente iguais.

Os canais do Rio Japurá apresentam os maiores valores de concentração de hornblenda, correspondendo a mais da metade dos grãos identificados. O conjunto tem, portanto, menor maturidade mineralógica em relação aos outros grupos (tabela 4), fazendo desse um grupo à parte em relação aos demais, com pouca semelhança em relação aos demais terraços.

5.3.4. Concentração de anfibólio e piroxênio

Este índice contrapõe parte da população de minerais instáveis em relação ao todo, sendo calculado como a razão de anfibólios e piroxênios divididos pela soma de minerais pesados. Esse índice já foi aplicado, com variações, para concentração de hornblendas em relação aos pesados (Garzanti e Andò, 2007b), e a soma de todos os instáveis sobre o total (Rossetti, 2005).

Os terraços orientais e o canal do rio Solimões apresentam valores muito próximos de concentração anf-pyr (Fig. 35, tabela 4), sugerindo uma origem comum de suas assembleias de minerais pesados, com o rio Solimões como o depositante dos terraços. Já o canal do Rio Japurá apresenta alta concentração de anf-pyr, mostrando uma assembleia bastante imatura, significativamente diferente dos terraços ocidentais, e com valores altos em relação ao Rio Solimões e aos terraços orientais.

Essa diferença fica ainda maior ao se comparar essa razão com os valores de ZTR, como indicado na Fig. 34, onde é possível isolar as amostras provenientes do rio Japurá em relação ao demais grupos amostrais, ficando afastado das amostras dos terraços ocidentais, no qual o Rio Japurá está atualmente alocado.

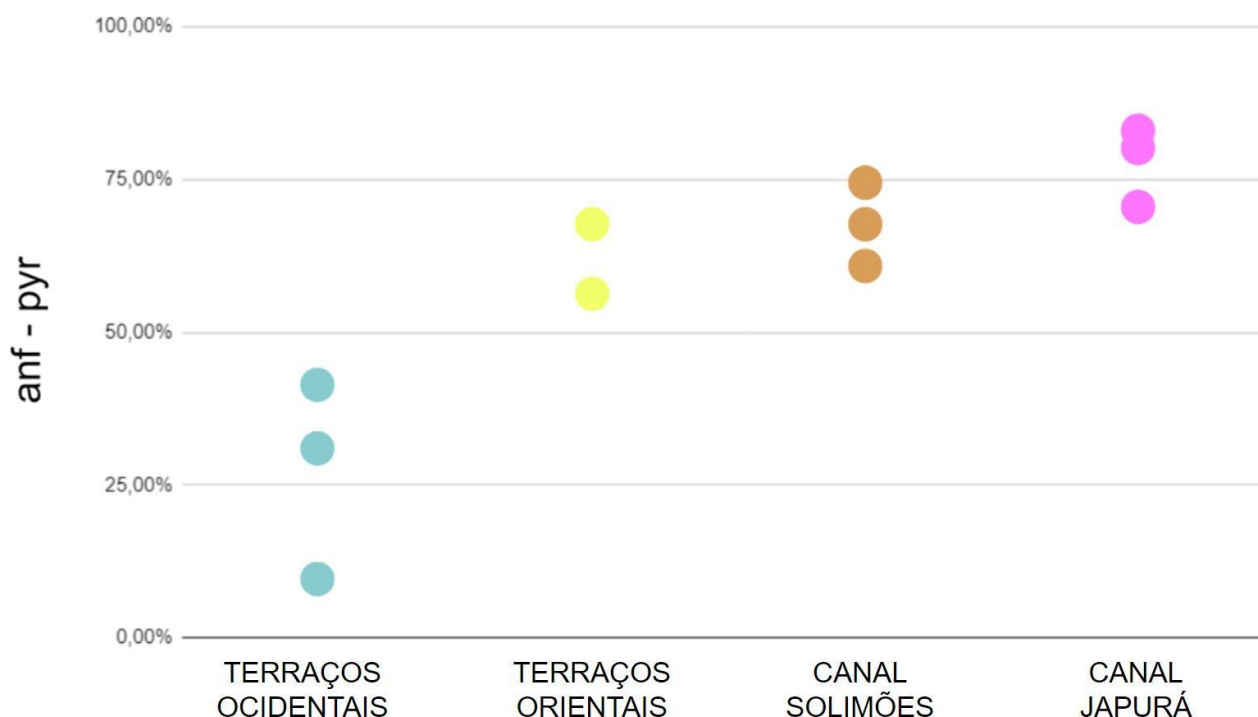


Figura 37: Razões de concentração de minerais instáveis, anfibólios e piroxênios, entre as diferentes amostragens, no qual é visível a maior maturidade mineralógica dos terraços do oeste, em oposição a baixíssima maturidade das assembleias do Rio Japurá. As assembleias do Rio Solimões e dos terraços à leste tem concentrações muito similares, com valores mais próximos aos terraços ocidentais que o próprio Japurá

Amostra	Unidade	Anf-Pyr
ALC 104B	Terraços Oeste	39,93%
ALC 104i	Terraços Oeste	8,08%
ALC 107D	Terraços Oeste	30,72%
ALC 96C gamma	Terraços Leste	55,86%
ALC 96F	Terraços Leste	67,67%
MAO 140	Canal Solimões	61,67%
MAO 151	Canal Solimões	68,71%
MAO 161	Canal Solimões	74,16%
RDB 34c	Canal Japurá	70,57%
RDB 38A	Canal Japurá	82,33%
RDB 40L	Canal Japurá	84,00%

Tabela 5: cálculo de concentração de Anf-Pyr

6. DISCUSSÃO

6.1. Proveniência sedimentar e intemperismo

Através da análise dos minerais contabilizados, é possível posicionar a origem dessas assembleias como sendo de natureza de rochas ígneas máficas e/ou rochas metamórficas de baixo a médio grau, compatíveis com as rochas sub-andinas cortadas pelo Rio Caquetá (nome atribuído ao Rio Japurá em território colombiano) (e.g., Sawakuchi *et al.*, 2018).

O índice ZTR (Hubert, 1962) tem aplicação direta sobre a proveniência e intemperismo, uma vez que valores mais altos significam que houve maior corrosão de minerais instáveis. Dessa maneira, é possível estabelecer uma idade relativa entre assembleias baseada no valor de ZTR (mazoca, 2023), onde valores mais altos implicam tempo de residência maiores no depósito sedimentar, já que maior será o tempo de exposição ao intemperismo (assumindo que o intemperismo durante o transporte é negligenciável), como visto na Fig. 38, onde os valores de ZTR diminuem de Q1 para Q9, .

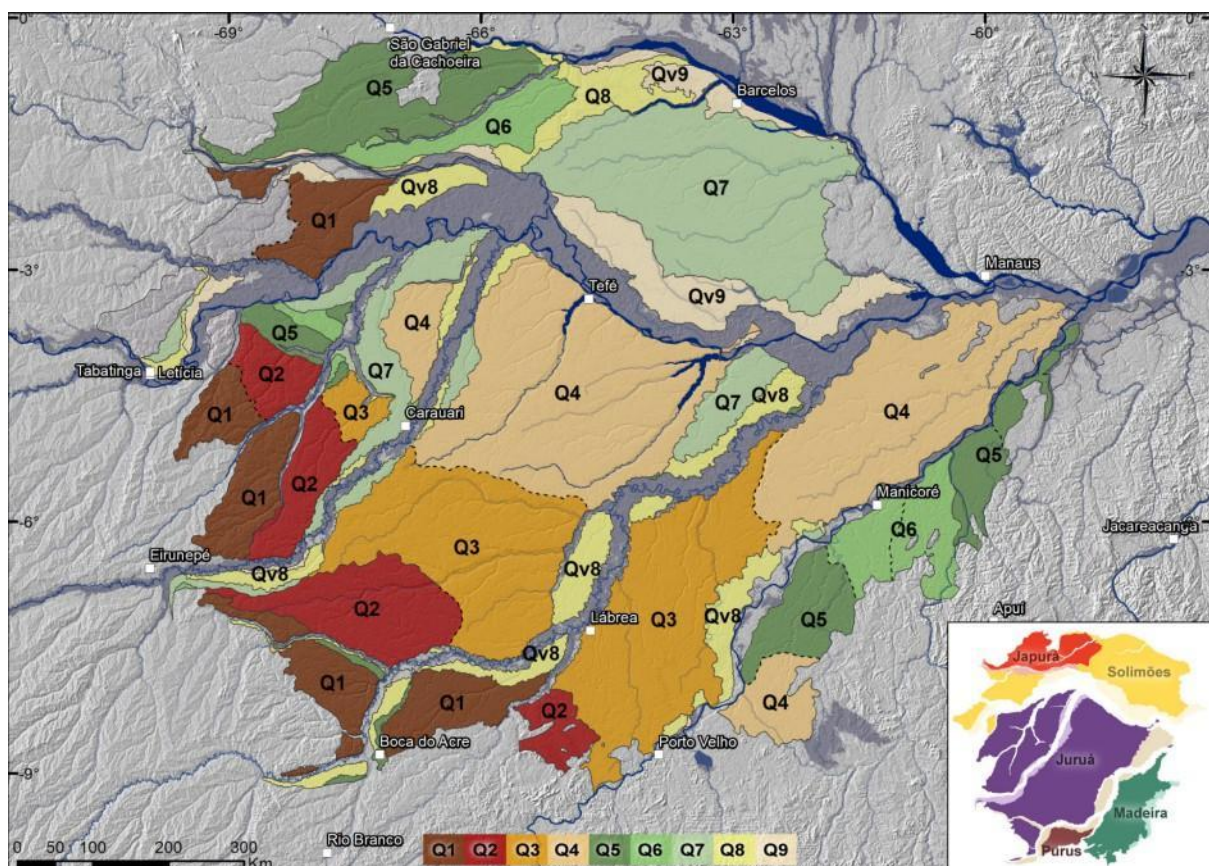


Figura 38: Terraços mapeados por Mazoca, 2023, no qual os terraços Q1 são mais velhos, possuindo maiores valores de ZTR que os demais, e os terraços de valores Q9 possuem valores de ZTR mais baixos que os anteriores

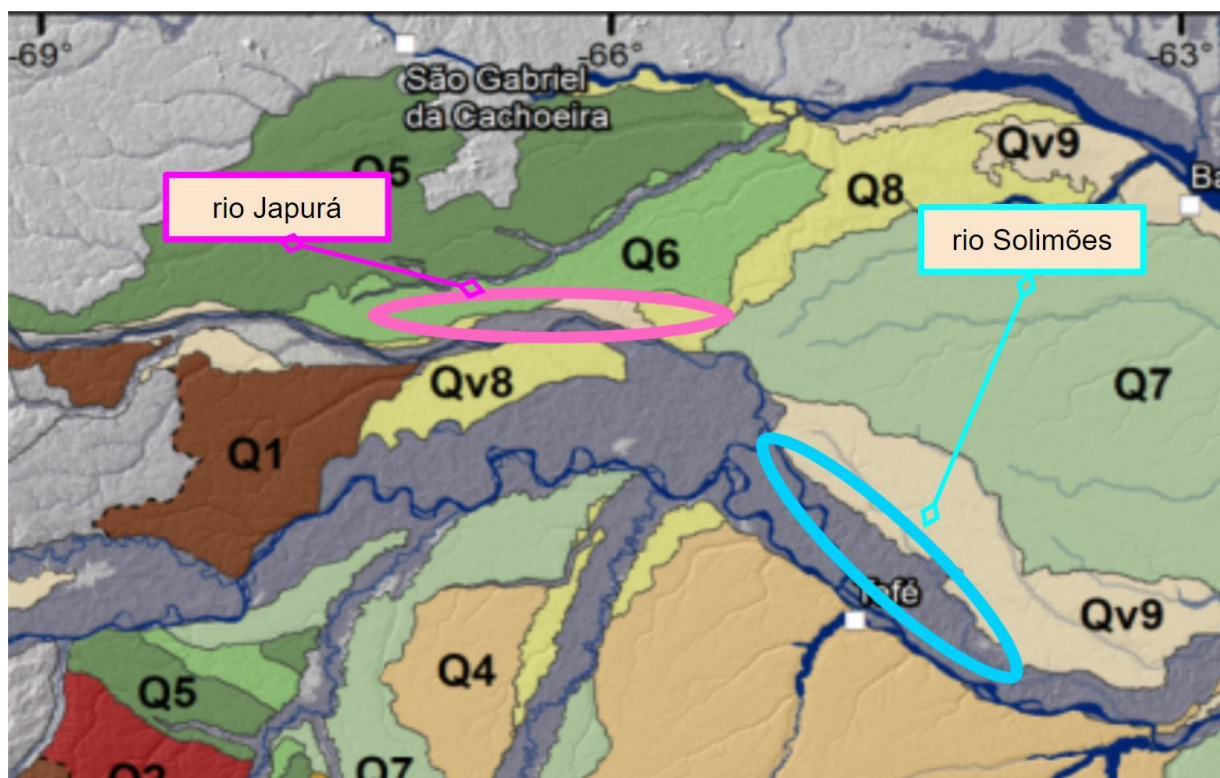


Figura 39: Destaque para os terraços ocidentais (Q6) do rio Japurá e dos terraços orientais (Q9), ao redor do rio Solimões, mostrando que os terraços ocidentais são mais velhos que os orientais

Desse modo, os terraços ocidentais são cronologicamente mais velhos que os terraços orientais, como já mapeado por Mazoca, (2023), corroborando com os valores de ZTR das amostras. Como os valores de ZTR da assembleia do rio Japurá são menores que os terraços ocidentais, isso pode implicar que este é mais novo que os próprios terraços, com a diferença média de valores entre os dois (tabela 3) possivelmente indicando uma ausência de correlação entre eles. Isso demonstra um caráter altamente imaturo provindo do rio Japurá, enquanto os terraços ocidentais apresentam grau de maturidade mineralógica consideravelmente maior, com os valores dos índices sendo basicamente o oposto do Rio Japurá (60% dos terraços ocidentais e menos de 10% do rio Japurá).

Já os valores de anf-pry e de concentração de hbl próximos do rio Japurá com o rio Solimões e os terraços orientais (tabelas 5 e 6) podem ser devido ao rio Japurá deságuar no rio Solimões, despejando grande quantidade de instáveis no rio Solimões. Já nos terraços ocidentais, os valores da concentração de hornblenda (menores de 10%), indicam maturidade mineralógica alta desses terraços, isso reflete nas hornblendas presentes nesse grupo possuírem feições de corrosão mais avançadas, significando um processo de intemperismo elevado. Esse comportamento indica que os anfíbios, que são minerais significativamente instáveis, estão sendo destruídos no intemperismo antes dos minerais ultraestáveis (zircão, turmalina e rutilo).

O intemperismo atuante é responsável pela corrosão dos grãos, arredondamento e modificação das assembleias mineralógicas, extinguindo minerais instáveis (Andò *et al.*,

2012). A presença de arredondamento dos grãos estáveis zircão e rutilo, tal qual ilustrado no canal do Rio Solimões (Fig. 22) ou nos terraços ocidentais (Fig. 24) não ocorre de forma concomitante ao intemperismo químico, não refletindo os mesmos processos que levaram a corrosão superficial dos minerais, que são por sua vez resultado de processos exógenos como o intemperismo em ambiente fluvial ou eólico (Andò *et al.*, 2012).

Quanto ao arredondamento observado em rutilo e zircão nos terraços, este provavelmente se derivou de processos exógenos fluviais, podendo ter correlação com a maturidade textural dos sedimentos (Andò 2012).

Andò *et al.*, (2012) e Garzanti e Andò, (2007a) ressaltam a importância do intemperismo exógeno, sendo largamente influente como complemento a proveniência sedimentar, dado que afetam os índices de ZTR e tHMC (Garzanti e Andò, 2007b), e deste modo servindo de *proxy* para tempo de residência no depósito.

Os menores valores de concentração de minerais pesados observados na tabela 1, são um indicativo que os depósitos sedimentares, tanto dos terraços quanto dos canais, sofreram grande influência intempérica, levando à destruição de grande parte dos minerais instáveis, como anfibólio e hiperstênio que são especialmente ricos nas assembleias dos canais, tanto do rio Japurá quanto do rio Solimões, levando a concentração de zircão, turmalina e rutilo, que sofreram corrosão posterior aos demais. A concentração de minerais estáveis (rutilo, turmalina e zircão), pode, então, ser utilizada como um indicador *proxy* da idade relativa entre deposições, com valores mais altos de ZTR indicando maiores idades deposicionais (Uddin e Lundberg, 1998, Morton e Hallsworth, 2007, Andò, 2012). Eynatten e Dunkl, (2012), diz que o processo de reciclagem sedimentar também pode levar, ao longo de vários ciclos, a perda de minerais pesados na assembléia.

As assembleias do Rio Solimões e dos terraços orientais apresentam valores intermediários de seus índices em relação aos terraços ocidentais e ao Rio Japurá, todavia bastante parecidos entre si em sua concentração de hornblenda, concentração de anfibólio-piroxênio e no ZTR, demonstrando continuidade mineralógica e pouca diferença de tempo de residência desde a deposição. A maior proximidade desses com o Japurá, somada à diferença marcada para os terraços ocidentais, indica que esse último teve maior tempo de exposição ao intemperismo, sendo mais antigos que os orientais.

Como mostrado no gráfico da Fig. 37, ocorre uma diferenciação clara entre os terraços ocidentais, que são mais maduros, dos orientais, mais imaturos. Isso mostra uma diferenciação clara de idade. Essa diferença relativa de idade (Fig. 38 e 39), aliado a uma mineralogia mais madura do Rio Solimões do que a do Rio Japurá, faz ponderável a hipótese de que a deposição dos terraços ocidentais, mais antigos, não se deu pelo Rio Japurá, dada a diferença relevante de mineralogia e maturidade. Dessa maneira, é considerável a possibilidade do Rio Solimões ter depositado os terraços ocidentais, tais quais os terraços orientais, do qual possui inegável semelhança, sendo assim o provável

progenitor de ambos, corroborando com dados de estratigrafia, luminescência e geoquímica apresentados por Mazoca (2023).

6.2. Comparação de metodologia de concentração de pesados

Ao se comparar as análises estatísticas (seção 5.2) entre a concentração de minerais pesados realizada a mão com a realizada com congelamento parcial, observa-se claramente que os resultados do segundo são notoriamente mais nítidos e precisos, uma vez que houve a remoção de muitos minerais micáceos que prejudicaram a contagem e diluí a concentração dos minerais mais densos. Isso gera anomalias que impediam a existência de qualquer tipo de correlação visível entre os canais e os terraços.

Amostras preparadas com o processo de separação manual (conforme Seção 5.2.) apresentam grande frequência de micas, que deveriam ter sido segregadas do concentrado de pesados durante a preparação, em especial de amostras como a ALC 104i e ALC 104b. Tal fato, aliado à baixa concentração de zircão, leva a concluir que o método de separação de minerais pesados por captura manual de concentrado com pipeta é pouco eficiente. A presença desses minerais atrapalham consideravelmente a eficiência da contabilização de outros minerais, gerando dados pouco confiáveis, nos quais não é visível similaridade entre as amostras.

Os dados contagens obtidos depois do método de congelamento parcial de Nitrogênio Líquido, tiveram maior clareza correlações entre minerais que antes não eram observadas, devido a alta quantidade de minerais de menor variação de densidade (Fig. 28), aliado a maior concentração relativa de minerais pesados, devido a menor influência de minerais micáceos (Fig. 29). Nesse novo conjunto, fica clara a correlação entre os ultraestáveis e sua oposição a minerais instáveis, agrupando os minerais de forma mais lógica, e ressaltando as diferentes assembleias entre si.

Essa dicotomia acontece porque durante a concentração por pipeta, por mais habilidoso que seja o operador, haverá o contato dos leves (contaminantes) com a pipeta antes do extrato de pesados (que está ao fundo), de forma que, a perturbação do sobrenadante de minerais leves contaminará a pipeta (seja interna, ou externamente), adicionando assim os leves ao concentrado, o que posteriormente gerará erros estatísticos. Adicionalmente, pipetar o sobrenadante antes não resolveria por completo o problema, pois pode haver quantidade significativa de minerais leves dispersos entre o extrato de minerais pesados no fundo dos tubos.

Congelar o extrato de minerais pesados, permite separar em duas etapas o líquido denso, eliminando os sobrenadantes leves dos minerais ao fundo (pesados), de forma a, literalmente, lavar todo o sobrenadante e os minerais dispersos na coluna de líquido denso antes de recuperar o extrato de minerais pesados.

Desse modo, a contaminação por leves que ficam na coluna de líquido denso é mínima ou até inexistente, permitindo dados muito mais precisos, sendo empregado já a alguns anos como em Tangari *et al.*, 2021, Usman *et al.*, 2024, Lai *et al* 2023, Garzanti *et al.*, 2022 e He *et al.*, 2023.

7. CONCLUSÕES

Ao comparar índices de mineral pesado, maturidade das amostras e métodos já empregados por outros trabalhos, nota-se a desconexão entre os terraços do Rio Japurá e os terraços ocidentais, mostrando a ausência de uma relação de proveniência entre os dois. Ao contrário, as assembleias do rio Solimões, junto aos terraços orientais possuem uma similaridade muito alta entre si, com ambos possuindo uma semelhança muito maior para com os terraços ocidentais que o rio Japurá, que é alocado acima deles, implicando que os terraços a oeste tenham sido depositados pelo rio Solimões ao invés do rio Japurá, sofrendo posterior intemperismo pós deposicional, elevando a concentração de estáveis.

Adicionalmente, verifica-se que o emprego de metodologia de separação de pesados através do congelamento parcial com nitrogênio líquido possibilita a obtenção de extratos muito mais livres de minerais leves que o método tradicional de coleta por pipeta, acarretando resultados mais precisos e conclusivos da contagem de minerais pesados, como demonstrado pela ampla utilização desse protocolo por variados autores.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aitchison, J., 1982, The Statistical Analysis of Compositional Data
- Alván, A., Eynatten, H.V, Dunkl, I., and Gerdes, A., 2015, Zircon U–Pb geochronology and heavy mineral composition of the Camaná Formation, southern Peru: Constraints on sediment provenance and uplift of the Coastal and Western Cordilleras: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 61, p. 14–32, doi:[10.1016/j.jsames.2015.02.008](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.02.008).
- Andò, S., Garzanti, E., Padoan, M., and Limonta, M., 2012, Corrosion of heavy minerals during weathering and diagenesis: A catalog for optical analysis: *Sedimentary Geology*, v. 280, p. 165–178, doi:[10.1016/j.sedgeo.2012.03.023](https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.023).
- Andò, S., 2020, Gravimetric Separation of Heavy Minerals in Sediments and Rocks: *Minerals*, v. 10, p. 273, doi:[10.3390/min10030273](https://doi.org/10.3390/min10030273).
- Ayres, J.M., and Clutton-Brock, T.H., 1992, River Boundaries and Species Range Size in Amazonian Primates: *The American Naturalist*, v. 140, p. 531–537, doi:[10.1086/285427](https://doi.org/10.1086/285427).
- Bridge, J., and Demicco, R.V., 2008, Earth surface processes, landforms and sediment deposits: Cambridge, Cambridge university press.
- Bezerra, P.E.L., 2003, Compartimentação morfotectônica do interflúvio Solimões-Negro [Tese de Doutorado]: Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará.
- Boubli, J.P., Ribas, C., Lynch Alfaro, J.W., Alfaro, M.E., Da Silva, M.N.F., Pinho, G.M., and Farias, I.P., 2015, Spatial and temporal patterns of diversification on the Amazon: A test of the riverine hypothesis for all diurnal primates of Rio Negro and Rio Branco in Brazil: *Molecular Phylogenetics and Evolution*, v. 82, p. 400–412, doi:[10.1016/j.ympev.2014.09.005](https://doi.org/10.1016/j.ympev.2014.09.005).
- Campbell, K.E., Frailey, C.D., and Romero-Pittman, L., 2006, The Pan-Amazonian Ucayali Peneplain, late Neogene sedimentation in Amazonia, and the birth of the modern Amazon River system: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 239, p. 166–219, doi:[10.1016/j.palaeo.2006.01.020](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.01.020).
- Campbell, K.E., Heizler, M., Frailey, C.D., Romero-Pittman, L., and Prothero, D.R., 2001, Upper Cenozoic chronostratigraphy of the southwestern Amazon Basin: *Geology*, v. 29, p. 595, doi:[10.1130/0091-7613\(2001\)029<0595:UCCOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0595:UCCOTS>2.0.CO;2).
- Cardona, A., Cordani, U.G., Ruiz, J., Valencia, V.A., Armstrong, R., Chew, D., Nutman, A., and Sanchez, A.W., 2009, U–Pb Zircon Geochronology and Nd Isotopic Signatures of the Pre-Mesozoic Metamorphic Basement of the Eastern Peruvian Andes: Growth and Provenance of a Late Neoproterozoic to Carboniferous Accretionary Orogen on the Northwest Margin of Gondwana: *The Journal of Geology*, v. 117, p. 285–305, doi:[10.1086/597472](https://doi.org/10.1086/597472).
- Decou, A., Eynatten, H.V, Dunkl, I., Frei, D., and Wörner, G., 2013, Late Eocene to Early Miocene Andean uplift inferred from detrital zircon fission track and U–Pb dating of Cenozoic forearc sediments (15–18°S): *Journal of South American Earth Sciences*, v. 45, p. 6–23, doi:[10.1016/j.jsames.2013.02.003](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.02.003).
- Decou, A., Eynatten, H.V, Mamani, M., Sempere, T., and Wörner, G., 2011, Cenozoic forearc basin sediments in Southern Peru (15–18°S): Stratigraphic and heavy mineral constraints for Eocene to Miocene evolution of the Central Andes: *Sedimentary Geology*, v. 237, p. 55–72, doi:[10.1016/j.sedgeo.2011.02.004](https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.02.004).
- Dickinson, W.R., 1985, Interpreting Provenance Relations from Detrital Modes of Sandstones, in Zuffa, G.G. ed., *Provenance of Arenites*, Dordrecht, Springer Netherlands, p. 333–361, doi:[10.1007/978-94-017-2809-6_15](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_15).
- Dickinson, W.R., Suczek, C.A., 1979, Plate Tectonics and Sandstone Compositions: *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 63(12), p. 2164–2182
- Dunkley Jones, T., Bown, P.R., Pearson, P.N., Wade, B.S., Coxall, H.K., and Lear, C.H., 2008, Major shifts in calcareous phytoplankton assemblages through the Eocene-Oligocene transition of Tanzania and their implications for low-latitude primary production: *Paleoceanography*, v. 23, doi:[10.1029/2008PA001640](https://doi.org/10.1029/2008PA001640).

- Eynatten, H.V. and Dunkl, I., 2012, Assessing the sediment factory: The role of single grain analysis: *Earth-Science Reviews*, v. 115, p. 97–120, doi:[10.1016/j.earscirev.2012.08.001](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.001).
- Eynatten, H.V. and Gaupp, R., 1999, Provenance of Cretaceous synorogenic sandstones in the Eastern Alps: constraints from framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry: *Sedimentary Geology*, v. 124, p. 81–111, doi:[10.1016/S0037-0738\(98\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00122-5).
- Eynatten, H.V., 2005, Interactions between grain size and composition of sediments: two examples
- Feil, S., Eynatten, H.V., Dunkl, I., Schöning, J., and Lünsdorf, N.K., 2024, Inherited Grain-Size Distributions: Effect on Heavy-Mineral Assemblages in Modern and Ancient Sediments: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 129, p. e2023JF007356, doi:[10.1029/2023JF007356](https://doi.org/10.1029/2023JF007356).
- Filho, J.R.W., Eiras, J.F., and Vaz, P.T., 2007, Bacia do Solimões: *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, p. 217–225.
- Fossum, K., Morton, A.C., Dypvik, H., and Hudson, W.E., 2019, Integrated heavy mineral study of Jurassic to Paleogene sandstones in the Mandawa Basin, Tanzania: Sediment provenance and source-to-sink relations: *Journal of African Earth Sciences*, v. 150, p. 546–565, doi:[10.1016/j.jafrearsci.2018.09.009](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.09.009).
- Fuck, R.A., Brito Neves, B.B., and Schobbenhaus, C., 2008, Rodinia descendants in South America: *Precambrian Research*, v. 160, p. 108–126, doi:[10.1016/j.precamres.2007.04.018](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.018).
- Galehouse J.S. 1971. Point-counting. In: Carver R.E. (ed.). *Procedures in Sedimentary Petrology*. New York, Wiley-Interscience, p. 385–407.
- Garzanti, E., 2016, From static to dynamic provenance analysis—Sedimentary petrology upgraded: *Sedimentary Geology*, v. 336, p. 3–13, doi:[10.1016/j.sedgeo.2015.07.010](https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.07.010).
- Garzanti, E., and Andò, S., 2007a, Chapter 20 Heavy Mineral Concentration in Modern Sands: Implications for Provenance Interpretation, *in* *Developments in Sedimentology*, Elsevier, v. 58, p. 517–545, doi:[10.1016/S0070-4571\(07\)58020-9](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58020-9).
- Garzanti, E., and Andò, S., 2007b, Chapter 29 Plate Tectonics and Heavy Mineral Suites of Modern Sands, *in* *Developments in Sedimentology*, Elsevier, v. 58, p. 741–763, doi:[10.1016/S0070-4571\(07\)58029-5](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58029-5).
- Garzanti, E., Andó, S., France-Lanord, C., Censi, P., Vignola, P., Galy, V., and Lupker, M., 2011, Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments 2. Suspended-load silt (Ganga–Brahmaputra, Bangladesh): *Earth and Planetary Science Letters*, v. 302, p. 107–120, doi:[10.1016/j.epsl.2010.11.043](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.043).
- Garzanti, E., Andò, S., Vezzoli, G., Lustrino, M., Boni, M., and Vermeesch, P., 2012, Petrology of the Namib Sand Sea: Long-distance transport and compositional variability in the wind-displaced Orange Delta: *Earth-Science Reviews*, v. 112, p. 173–189, doi:[10.1016/j.earscirev.2012.02.008](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.008).
- Garzanti, E., Limonta, M., Resentini, A., Bandopadhyay, P.C., Najman, Y., Andò, S., and Vezzoli, G., 2013, Sediment recycling at convergent plate margins (Indo-Burman Ranges and Andaman–Nicobar Ridge): *Earth-Science Reviews*, v. 123, p. 113–132, doi:[10.1016/j.earscirev.2013.04.008](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.008).
- Garzanti, E. et al., 2019, Congo River sand and the equatorial quartz factory: *Earth-Science Reviews*, v. 197, p. 102918, doi:[10.1016/j.earscirev.2019.102918](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102918).
- Garzanti, E., Pastore, G., Stone, A., Vainer, S., Vermeesch, P., and Resentini, A., 2022, Provenance of Kalahari Sand: Paleoweathering and recycling in a linked fluvial-aeolian system: *Earth-Science Reviews*, v. 224, p. 103867, doi:[10.1016/j.earscirev.2021.103867](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103867).
- Garzón-Orduña, I.J., Benetti-Longhini, J.E., and Brower, A.V.Z., 2014, Timing the diversification of the Amazonian biota: butterfly divergences are consistent with Pleistocene refugia: *Journal of Biogeography*, v. 41, p. 1631–1638, doi:[10.1111/jbi.12330](https://doi.org/10.1111/jbi.12330).
- Gonçalves Júnior, E.S., Soares, E.A.A., Tatum, S.H., Yee, M., and Mittani, J.C.R., 2016, Pleistocene-Holocene sedimentation of Solimões-Amazon fluvial system between

- the tributaries Negro and Madeira, Central Amazon: Brazilian Journal of Geology, v. 46, p. 167–180, doi:[10.1590/2317-4889201620160009](https://doi.org/10.1590/2317-4889201620160009).
- Haffer, J., 1969 Speciation in Amazonian Forest Birds: Science, v. 165, p. 131–137. doi:[10.1126/science.165.3889.131](https://doi.org/10.1126/science.165.3889.131).
- He, J., Garzanti, E., Jiang, T., Barbarano, M., Liu, E., Chen, S., Liao, Y., Li, X., and Wang, H., 2023, Evolution of eastern Asia river systems reconstructed by the mineralogy and detrital-zircon geochronology of modern Red River and coastal Vietnam river sand: Earth-Science Reviews, v. 245, p. 104572, doi:[10.1016/j.earscirev.2023.104572](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104572).
- Helm, C.E., 1962, Multidimensional Ratio Scaling Analysis of Perceived Color Relations, v. 56, p. 156–162
- Horbe, A.M.C., Motta, M.B., De Almeida, C.M., Dantas, E.L., and Vieira, L.C., 2013, Provenance of Pliocene and recent sedimentary deposits in western Amazônia, Brazil: Consequences for the paleodrainage of the Solimões-Amazonas River: Sedimentary Geology, v. 296, p. 9–20, doi:[10.1016/j.sedgeo.2013.07.007](https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.07.007).
- 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: SEPM Journal of Sedimentary Research, v. Vol. 32, doi:[10.1306/74D70CE5-2B21-11D7-8648000102C1865D](https://doi.org/10.1306/74D70CE5-2B21-11D7-8648000102C1865D).
- Ingersoll, R.V., 1984, The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi- Dickinson point-counting method (Holocene, sand, New Mexico, USA): Journal of Sedimentary Petrology, v. 54(1), p. 103–116.
- Jaillard, E., 2000, Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and Northernmost Chile: Tectonic evolution of South America, p. 481–559
- Kenkel, N.C., Orlóci, L., 1986, Applying métric nonmetric multidimensional scaling to ecological studies: Some new results: Ecology, v. 67(4), p. 919–928
- Konsoer, K.M., Rhoads, B.L., Langendoen, E.J., Best, J.L., Ursic, M.E., Abad, J.D., and Garcia, M.H., 2016, Spatial variability in bank resistance to erosion on a large meandering, mixed bedrock-alluvial river: Geomorphology, v. 252, p. 80–97, doi:[10.1016/j.geomorph.2015.08.002](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.08.002).
- Krippner, A., Meinhold, G., Morton, A.C., Schöning, J., and Eynatten, H.V., 2016, Heavy minerals and garnet geochemistry of stream sediments and bedrocks from the Almklovdalen area, Western Gneiss Region, SW Norway: Implications for provenance analysis: Sedimentary Geology, v. 336, p. 96–105, doi:[10.1016/j.sedgeo.2015.09.009](https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.09.009).
- Kucera, M., and Malmgren, B.A. Logratio transformation of compositional data — a resolution of the constant sum constraint:
- Kummel, B. GEOLOGICAL RECONNAISSANCE OF THE CONTAMANA REGION,:
- Lai, W., Liang, W.-D., Hu, X.-M., Garzanti, E., Lu, H.-Y., and Dong, X.-L., 2023, Grain-size and compositional variability of Yarlung Tsangpo sand (Xigaze transect, south Tibet): Implications for sediment mixing by fluvial and aeolian processes: Journal of Palaeogeography, v. 12, p. 195–210, doi:[10.1016/j.jop.2023.01.002](https://doi.org/10.1016/j.jop.2023.01.002).
- Mange, M.A., and Maurer, H.F.W., 1992, Heavy Minerals in Colour: Dordrecht, Springer Netherlands, doi:[10.1007/978-94-011-2308-2](https://doi.org/10.1007/978-94-011-2308-2).
- Mazoca, C.E.M., 2023, Reconstruction of Pleistocene Alluvial Systems in Central Amazonia [Tese de Doutorado]: Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.
- Morton, A.C., and Hallsworth, C., 1994, Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones: Sedimentary Geology, v. 90, p. 241–256, doi:[10.1016/0037-0738\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90041-8).
- Morton, A.C., and Hallsworth, C.R., 1999, Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones: Sedimentary Geology, v. 124, p. 3–29, doi:[10.1016/S0037-0738\(98\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00118-3).
- Morton, A.C., Hallsworth, C., 2007, Chapter 7 Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis: Developments in Sedimentology, v. 58, p. 215–245
- Pavan, A.C., and Marroig, G., 2017, Timing and patterns of diversification in the Neotropical bat genus Pteronotus (Mormoopidae): Molecular Phylogenetics and Evolution, v. 108, p. 61–69, doi:[10.1016/j.ympev.2017.01.017](https://doi.org/10.1016/j.ympev.2017.01.017).
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R., Sand and Sandstone, Second Edition

- Pupim, F.N. et al., 2019, Chronology of Terra Firme formation in Amazonian lowlands reveals a dynamic Quaternary landscape: *Quaternary Science Reviews*, v. 210, p. 154–163, doi:[10.1016/j.quascirev.2019.03.008](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.03.008).
- Ribas, C. C., A palaeobiogeographic model for biotic diversification within Amazonia over the past three million years, doi:[10.1098/rspb.2011.1120](https://doi.org/10.1098/rspb.2011.1120).
- Roddaz, M., Baby, P., Brusset, S., Hermoza, W., and Maria Darrozes, J., 2005, Forebulge dynamics and environmental control in Western Amazonia: The case study of the Arch of Iquitos (Peru): *Tectonophysics*, v. 399, p. 87–108, doi:[10.1016/j.tecto.2004.12.017](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.12.017).
- Rossetti, D.F., Toledo, P.M., and Góes, A.M., 2005, New geological framework for Western Amazonia (Brazil) and implications for biogeography and evolution: *Quaternary Research*, v. 63, p. 78–89, doi:[10.1016/j.yqres.2004.10.001](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.10.001).
- Rozo, M.G., Nogueira, A.C.R., and Truckenbrodt, W., 2012, The anastomosing pattern and the extensively distributed scroll bars in the middle Amazon River: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 37, p. 1471–1488, doi:[10.1002/esp.3249](https://doi.org/10.1002/esp.3249).
- Rull, V., 2011, Neotropical biodiversity: timing and potential drivers: *Trends in Ecology & Evolution*, v. 26, p. 508–513, doi:[10.1016/j.tree.2011.05.011](https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.05.011).
- Sawakuchi, A.O. et al., 2018, Luminescence of quartz and feldspar fingerprints provenance and correlates with the source area denudation in the Amazon River basin: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 492, p. 152–162, doi:[10.1016/j.epsl.2018.04.006](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.006).
- Schneider, L.J., Bralower, T.J., and Kump, L.R., 2011, Response of nannoplankton to early Eocene ocean deoxygenation: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 310, p. 152–162, doi:[10.1016/j.palaeo.2011.06.018](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.06.018).
- Soares, E.A.A., Tatumi, S.H., and Riccomini, C., 2010, OSL age determinations of Pleistocene fluvial deposits in Central Amazonia: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 82, p. 691–699, doi:[10.1590/S0001-37652010000300017](https://doi.org/10.1590/S0001-37652010000300017).
- Tangari, A.C., Le Pera, E., Andò, S., Garzanti, E., Piluso, E., Marinangeli, L., and Scarciglia, F., 2021, Soil-formation in the central Mediterranean: Insight from heavy minerals: *CATENA*, v. 197, p. 104998, doi:[10.1016/j.catena.2020.104998](https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104998).
- Tassinari, C.G., Macambira, M.J.B., 1999, Geochronological provinces of the Amazonian Craton: *Episodes*, v. 22(3), p. 174–182.
- Uddin, A., and Lundberg, N., 1998, Unroofing history of the eastern Himalaya and the Indo-Burman ranges; heavy-mineral study of Cenozoic sediments from the Bengal Basin, Bangladesh: *Journal of Sedimentary Research*, v. 68, p. 465–472, doi:[10.2110/jsr.68.465](https://doi.org/10.2110/jsr.68.465).
- Usman, M., Cliff, P.D., Pastore, G., Vezzoli, G., Andò, S., Barbarano, M., Vermeesch, P., and Garzanti, E., 2024, Climatic influence on sediment distribution and transport in the Thar Desert (Sindh and Cholistan, Pakistan): *Earth-Science Reviews*, v. 249, p. 104674, doi:[10.1016/j.earscirev.2024.104674](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104674).
- Vermeesch, P., 2013, Multi-sample comparison of detrital age distributions: *Chemical Geology*, v. 341, p. 140–146, doi:[10.1016/j.chemgeo.2013.01.010](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.01.010).
- Vermeesch, P., and Garzanti, E., 2015, Making geological sense of ‘Big Data’ in sedimentary provenance analysis: *Chemical Geology*, v. 409, p. 20–27, doi:[10.1016/j.chemgeo.2015.05.004](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.05.004).
- Viator, D.B., 2003, Detrital tourmaline as an indicator of provenance: a chemical and sedimentological study of modern sands from the Black Hills, South Dakota [Tese de Mestrado]: Faculty of Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.
- Walling, D.E., and He, Q., 1998, The spatial variability of overbank sedimentation on river floodplains: *Geomorphology*, v. 24, p. 209–223, doi:[10.1016/S0169-555X\(98\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00017-8).
- Weir, J.T., Faccio, M.S., Pulido-Santacruz, P., Barrera-Guzmán, A.O., and Aleixo, A., 2015, Hybridization in headwater regions, and the role of rivers as drivers of speciation in Amazonian birds: *Evolution*, v. 69, p. 1823–1834, doi:[10.1111/evo.12696](https://doi.org/10.1111/evo.12696).
- Weltje, G.J., and Eynatten, H.V., 2004, Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook: *Sedimentary Geology*, v. 171, p. 1–11, doi:[10.1016/j.sedgeo.2004.05.007](https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.05.007).

- Xue, W., Hu, X., Garzanti, E., Ma, A., Lai, W., and Li, C., 2023, Discriminating Qiangtang, Lhasa, and Himalayan sediment sources in the Tibetan Plateau by detrital-zircon U-Pb age and Hf isotope facies: *Earth-Science Reviews*, v. 236, p. 104271, doi:[10.1016/j.earscirev.2022.104271](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104271).
- Yurkova, R.M., 1970, COMPARISON OF POST-SEDIMENTARY ALTERATIONS OF OIL-, GAS- AND WATER-BEARING ROCKS: *Sedimentology*, v. 15, p. 53–68, doi:[10.1111/j.1365-3091.1970.tb00205.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1970.tb00205.x).

ANEXO 1

Amostra	Unidade	Ep	Mon	Mus	Hrn	Tre	Tlc	Zrc	Act	Rut	Kya	Bt	Ser	Apt	Grt	Chl	Tur	Cc	Hyp	Ens	Sil	Dio	Aug	Est	And	Zoi	Ol
ALC 104B	TERRAÇO OESTE	15	6	11	52			66	1	32	3	1	1	14	7	4	12	1	34	6	4	1	21	2	6		
ALC 104i	TERRAÇO OESTE	3		2	5		1	55		185	10	2	1	5			11		17				2		1		
ALC 107D	TERRAÇO OESTE	4		7	27	2		63	1	110	4	2		3	2		5		40	11	2		9	4	4		
ALC 96C gamma	TERRAÇO LESTE	4		10	120			2		6	1			11	1	101	1		22	14			6		1		
ALC 96F	TERRAÇO LESTE	14			72			22		29	2	3		3	14	4	4		107	3		1	20		2		
MAO 140	CANAL SOLIMÕES	23			38			18		29	3	7		1	15	4	9		90	8		6	43		4		2
MAO 151	CANAL SOLIMÕES	16	2	5	67		2	9		4	3	9	1	11	13	3	6		84	3	2	13	35	4	7	1	
MAO 161	CANAL SOLIMÕES	12		2	91			6		7	4	9		1	5	14	6		77	13		6	34	3	9	1	
RDB 34c	CANAL JAPURÁ	15		1	137	2		25		4	2	5		4	11	13	4		51	8		1	12	1	4		
RDB 38A	CANAL JAPURÁ	13			179			10		3		4		2	10	6	2		31	10	1	2	25	1			1
RDB 40L	CANAL JAPURÁ	13			199			7		3	1	2		1	9	8	3		33	4		2	14		1		

ANEXO 2

Amostra	Unidade	Ep	Mon	Mus	Hrn	Tre	Tlc	Zrc	Act	Rut	Kya	Bt	Ser	Apt	Grt	Chl	Tur	Cc	Hyp	Ens	Sil	Dio	Aug	Est	And	Zoi	OI
ALC104B	TERRAÇO OCIDENTAL	5,00%	2,00%	3,67%	17,33%	0,00%	0,00%	22,00%	0,33%	10,67%	1,00%	0,33%	0,33%	4,67%	2,33%	1,33%	4,00%	0,33%	11,33%	2,00%	1,33%	0,33%	7,00%	0,67%	2,00%	0,00%	0,00%
ALC104i	TERRAÇO OCIDENTAL	1,00%	0,00%	0,67%	1,67%	0,00%	0,33%	18,33%	0,00%	61,67%	3,33%	0,67%	0,33%	1,67%	0,00%	0,00%	3,67%	0,00%	5,67%	0,00%	0,00%	0,00%	0,67%	0,00%	0,33%	0,00%	0,00%
ALC107D	TERRAÇO ORIENTAL	1,33%	0,00%	2,33%	9,00%	0,67%	0,00%	21,00%	0,33%	36,67%	1,33%	0,67%	0,00%	1,00%	0,67%	0,00%	1,67%	0,00%	13,33%	3,67%	0,67%	0,00%	3,00%	1,33%	1,33%	0,00%	0,00%
ALC96C	TERRAÇO ORIENTAL	1,33%	0,00%	3,33%	40,00%	0,00%	0,00%	0,67%	0,00%	2,00%	0,33%	0,00%	0,00%	3,67%	0,33%	33,67%	0,33%	0,00%	7,33%	4,67%	0,00%	0,00%	2,00%	0,00%	0,33%	0,00%	0,00%
ALC96F	TERRAÇO	4,67%	0,00%	0,00%	24,00%	0,00%	0,00%	7,33%	0,00%	9,67%	0,67%	1,00%	0,00%	1,00%	4,67%	1,33%	1,33%	0,00%	35,67%	1,00%	0,00%	0,33%	6,67%	0,00%	0,67%	0,00%	0,00%
MAO140	CANAL SOLIMÕES	7,67%	0,00%	0,00%	12,67%	0,00%	0,00%	6,00%	0,00%	9,67%	1,00%	2,33%	0,00%	0,33%	5,00%	1,33%	3,00%	0,00%	30,00%	2,67%	0,00%	2,00%	14,33%	0,00%	1,33%	0,00%	0,67%
MAO151	CANAL SOLIMÕES	5,33%	0,67%	1,67%	22,33%	0,00%	0,67%	3,00%	0,00%	1,33%	1,00%	3,00%	0,33%	3,67%	4,33%	1,00%	2,00%	0,00%	28,00%	1,00%	0,67%	4,33%	11,67%	1,33%	2,33%	0,33%	0,00%
MAO161	CANAL SOLIMÕES	4,00%	0,00%	0,67%	30,33%	0,00%	0,00%	2,00%	0,00%	2,33%	1,33%	3,00%	0,00%	0,33%	1,67%	4,67%	2,00%	0,00%	25,67%	4,33%	0,00%	2,00%	11,33%	1,00%	3,00%	0,33%	0,00%
RDB34c	CANAL JAPURÁ	5,00%	0,00%	0,33%	45,67%	0,67%	0,00%	8,33%	0,00%	1,33%	0,67%	1,67%	0,00%	1,33%	3,67%	4,33%	1,33%	0,00%	17,00%	2,67%	0,00%	0,33%	4,00%	0,33%	1,33%	0,00%	0,00%
RDB38A	CANAL JAPURÁ	4,33%	0,00%	0,00%	59,67%	0,00%	0,00%	3,33%	0,00%	1,00%	0,00%	1,33%	0,00%	0,67%	3,33%	2,00%	0,67%	0,00%	10,33%	3,33%	0,33%	0,67%	8,33%	0,33%	0,00%	0,00%	0,33%
RDB40L	CANAL JAPURÁ	4,33%	0,00%	0,00%	66,33%	0,00%	0,00%	2,33%	0,00%	1,00%	0,33%	0,67%	0,00%	0,33%	3,00%	2,67%	1,00%	0,00%	11,00%	1,33%	0,00%	0,67%	4,67%	0,00%	0,33%	0,00%	0,00%