



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
OCEANOGRAFIA AMBIENTAL**

LUCAS BERMUDES DE CASTRO

**Minerais pesados e morfodinâmica das praias da planície
deltaica do rio Doce.**

VITÓRIA-ES, 2022



LUCAS BERMUDES DE CASTRO

Minerais pesados e morfodinâmica das praias da planície
deltaica do Rio Doce.

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Oceanografia
Ambiental da Universidade Federal do
Espírito Santo, como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em
Oceanografia Ambiental. Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Jacqueline Albino

VITÓRIA 2022



LUCAS BERMUDES DE CASTRO

Minerais pesados e morfodinâmica das praias da planície deltaica do Rio Doce.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Oceanografia Ambiental.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Jacqueline Albino –
Orientadora Universidade Federal do
Espírito Santo/UFES

Prof^a. Dr^a. Valéria da Silva Quaresma –
Examinadora interno Federal do
Espírito Santo/UFES

Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Souza –
Examinadora externa Universidade
Federal do Paraná/UFPR

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Nilca, minha esposa Ailana e ao meu filho Augusto pelo amor incondicional que me motivaram a recomeçar os estudos. Agradeço ao programa de Pós-graduação em Oceanografia Ambiental da UFES por todo apoio na expansão do meu conhecimento, em especial à professora e orientadora Dr^a Jacqueline Albino pelo exemplo e dedicação aos seus alunos. Aos colegas de laboratório Luiz, Denise, Professor Dieter, por todo ensinamento e bons momentos juntos. À Brenda minha completa admiração, respeito e o agradecimento por toda a dedicação e amizade. A todos os estagiários, estudantes e amigos de laboratório pela competência. Meu desejo de sucesso no caminho. Com saudades e pesares dedico em especial à Luísa Lopes pela alegria transbordada na vida de todos. À Rede Rio Doce Mar pela disponibilização dos dados da pesquisa.

RESUMO

No presente estudo os processos morfodinâmicos e sedimentares responsáveis pela distribuição e seleção de minerais pesados nas praias de um delta dominado por ondas são investigados. A planície deltaica do rio Doce apresenta sua evolução associada ao alto volume do aporte fluvial, às flutuações geológicas de nível do mar longo prazo e às variações dos processos oceanográficos de longo e curto prazo. Os resultados indicam que a proximidade com a desembocadura fluvial e a redistribuição de sedimento ao longo da costa pelas correntes longitudinais são responsáveis por uma gradação dos parâmetros morfológicos da praia entre as extremidades sul e norte da planície, como também nos parâmetros texturais dos sedimentos. Quanto às assembleias de minerais pesados, o estabelecimento de uma relação entre a morfodinâmica e a deposição das espécies minerais, é menos evidente, mas condicionada ao sentido predominante da deriva litorânea a partir da desembocadura. Desta forma os minerais menos densos e mais instáveis, como os anfibólios, acompanham o sentido resultante da corrente longitudinal e encontram-se associados às praias dissipativas, de baixa declividade e composta por areias finas, ao norte do rio Doce. Por outro lado, o enriquecimento por minerais mais densos e ultraestáveis, como monazitas, zircão e os minerais opacos ricos em ferro, foram mais comumente relacionados a praias ao sul da foz, de areias grossas e face praial inclinada. A análise da concentração dos minerais pesados em diferentes intervalos granulométricos permitiu concluir que, de forma geral, os minerais tendem a acompanhar a “lei da equivalência hidráulica” proposta por Rubey (1933), dada pela densidade e tamanho do grão. No entanto, além da textura do sedimento, a morfologia da praia e o padrão do espraiamento das ondas, processos hidrodinâmicos da praia, interferem na seleção dos minerais pesados na face praial, sugerindo a ocorrência de outros processos atuantes na distribuição e seleção dos minerais pesados, entre eles, o arrasto seletivo e a seleção por cisalhamento.

Lista de Tabela

Tabela 1: Estabilidade dos minerais pesados presentes na matriz sedimentar da foz do rio Doce.....	12
Tabela 2: Características médias e máximas de Hs e Tp, frequência de eventos com Hs superiores a 1,8 m, no período durante as campanhas incluindo três dias anteriores ao início dos levantamentos em campo.....	25
Tabela 3: Altura do espriamento máximo em metro calculado para as praias estudadas para o período de 3 dias anteriores ao levantamento	26
Tabela 4: Concentração (%) das espécies mineralógicas encontradas nas estações analisadas e a concentração entre de minerais opacos e translúcidos.....	30

Lista de Figura

Figura 1: Unidades geomorfológicas da planície costeira do rio Doce a partir dos dados obtidos por Rossetti e Polizel (2015) e as estações amostrais do presente estudo distribuídas ao longo da costa. As estações são distintas pelo prefixo S e N, referentes à porção Sul e Norte da planície, respectivamente, e a numeração é crescente de sul para norte. As estações S1, S2 e S3 estão a 31 Km, 18 km e 7 km ao sul da foz, respectivamente. As estações N1, N2, N3, N4 e N5, se encontram ao norte da foz a distâncias de 7 km, 32 Km, 54 Km, 73 Km e 104km, respectivamente.	6
Figura 2: Corrente longitudinal modelada e a corrente longitudinal obtida a partir da análise de indicadores geomorfológicos para as praias da planície deltaica do rio Doce. Modificado de Bittencourt et al (2007) e OLIVEIRA (2015), (a) e a análise do período diário de onda (Ts) e altura de onda diário (hs) com o modelo global Wavewatch III, NOAA-WW3, entre os anos de 2008 e 2019, na plataforma continental a frente da foz do rio Doce (b).	9
Figura 3: Separação hidráulica atuante sobre os minerais. (A) Princípio da equivalência hidráulica (RUBEY, 1933) responsável pelo controle das relações de tamanho e densidade entre os grãos e pela variedade da composição intramostral. (B) Arrasto seletivo responsável pela triagem dos minerais mais grossos e menor densidade dos minerais mais finos e mais densos. (GARZANTI e ANDÒ, 2019).	14
Figura 4: Esquema de enriquecimento por minerais pesados após erosão de praia pela entrada de eventos de maior energia. Modificado de Rao (1957)...	17
Figura 5: Frequência direcional das ondas durante os levantamentos de campo incluindo três dias anteriores ao início dos levantamentos.	26
Figura 6: Relação entre os parâmetros estatísticos das areias das praias e da estação fluvial. A variação da média, desvio padrão (grau de seleção) e assimetria das amostras analisadas são destacadas quanto a distribuição espacial e temporal.	28
Figura 7: Box-plot da concentração de minerais pesados (%MP) nas areias das da carga de fundo do rio Doce e das praias do delta ao longo do período monitorado.	29
Figura 8: Composição média dos minerais pesados translucido mais abundantes (Silimanita-Sil, Cianita-Cia e Anfibólios-Anf) e o índice ZTR (soma entre os zircões, turmalinas e rutilos) durante as quatro campanhas para as estações amostrais fluviais e praias.	31
Figura 9: Teor entre minerais pesados translúcidos nas estações amostrais analisadas ao longo do monitoramento. Anfibólio (Anf.), zircão (Zir.), Silimanita (Sil.), granada (Gra.), turmalina (Tur.), rutilo (Rut.), Epidoto (Epi.), cianita (Cia.), monazita (Mon.), estauroлита (Est.).	33

Figura 10: Curvas da frequência granulométrica das amostras total das areias analisadas e a distribuição intra-amostal de minerais com diferentes densidades.	34
Figura 11: Parâmetro ω para as praias monitoradas. As linhas verticais vermelhas em 1,5 e 5,5 representam os limites inferior de ω para praias refletivas e o limite superior para praias dissipativas, respectivamente. O intervalo entre as linhas representa a faixa de praias intermediárias.	35
Figura 12: Parâmetros morfológicos extraídos dos perfis de praia: altura da duna frontal ou cordões arenosos frontais (m), comprimento da praia (m), altura da berma (m) e inclinação da face ($^{\circ}$).	37
Figura 13: Perfis de praia das estações analisadas. Os perfis foram plotados em diferentes escalas dada a grande variação morfológica entre as praias	40
Figura 14: Curvas de frequência das distribuições granulométricas da amostra total e as distribuições intra-amostal dos anfibólios, turmalinas, minerais opacos e zircões em dois diferentes setores da planície. (a) Setor Norte, representado pelas estações N3, N4 e N5 e (b) Setor Sul, representado pelas amostras das estações S2 e S3.	42
Figura 15: Correlação gráfica entre declividade da praia em graus e a granulometria média em ϕ	45
Figura 16: Relação entre a concentração de minerais pesados (%) e o diâmetro médio do grão (ϕ) das amostras da face praial. As praias ao norte da planície deltaica do rio constituída por areias muito finas apresentam maior enriquecimento na matriz de minerais pesados. Já as praias ao sul, formadas por sedimentos	46
Figura 17: Análise de <i>cluster</i> na obtenção da similaridade entre as amostras estabelecida a partir da abundância relativa entre as espécies de minerais pesados. As amostras da estação S1 se agrupa em Em (a) estações fluviais e estações do setor sul (entre as estações S1 e N2). Em (b) setor norte (estações N3, N4 e N5). As setas vermelhas indicam as campanhas em que as amostras do setor sul se agruparam com as amostras do setor norte, indicando uma maior suscetibilidade do setor sul à variabilidade sazonal na abundancias dos minerais.	48
Figura 18: Resultado da análise multivariada das componentes principais dos teores das diferentes espécies de minerais pesados (a) e a disposição geométrica das amostras (b) segregadas nos setores: Erosivo (estação N2), setor Norte (estações N3, N4 e N5), setor Sul (estação S2, S3 e N1) e setor rio Doce, representado pelas amostras fluviais RD1 E RD2. Em (c) seguem as contribuições das variáveis analisadas para as dimensões 1 e 2.	49
Figura 19: Perfil praial erosivo na estação N2 e enriquecimento por minerais pesados na face praial. data	51
Figura 20: Run-up modelado e altura da berma para cada estação ao longo do período monitorado, indicando o potencial de inundação da praia.	52

Índice

1	INTRODUÇÃO	4
1.1	Apresentação.....	4
1.2	Objetivos.....	4
1.2.1	Objetivo geral	5
1.3	Área de estudo.....	5
1.3.1	Localização e evolução do delta do rio Doce.....	5
1.3.2	As praias associadas e processos costeiro	7
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
2.1	Embasamento metodológico.....	10
2.1.1	Definição, características e fonte de minerais pesados	10
2.1.2	Minerais Pesados em Ambientes Aquosos.....	12
2.1.3	Aplicação de minerais pesados na interpretação de processos costeiros	14
2.1.4	Minerais Pesados em Praias Deltaicas.....	17
2.1.5	Morfodinâmica de praia e clima de espraiamento.....	19
2.2	Obtenção de amostras e dados em campo.....	20
2.3	Condições oceanográficas e morfodinâmica.....	21
2.4	Tratamento e análise de dados.....	22
2.4.1	Morfologia e tipologia praial.....	22
2.4.2	Análise sedimentológica das areias.....	22
2.4.3	Integração dos dados	23
3	RESULTADOS	24
3.1	Ondas, espraiamento e vazão.....	24
3.2	Textura do sedimento	26
3.3	Minerais Pesados.....	29
3.3.1	Teores	29
3.3.2	Composição de minerais pesados	30
3.3.3	Composição mineralógica intra-amostral	33
3.4	Morfologia e morfodinâmica das praias.....	34
3.5	Perfis de praia e mobilidade sazonal.....	38

4	DISCUSSÃO	41
4.1	Varição intramostral das espécies de minerais pesados	41
4.2	Transporte longitudinal e o impacto na morfologia das praias e na matriz mineralógica	43
4.3	Morfodinâmica e mobilidade sazonal das praias e a assembleia de minerais pesados na planície do delta do rio Doce	50
5	CONCLUSÃO	53
6	REFERÊNCIA	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Os deltas marinhos são amplamente distribuídos pelo globo e as praias associadas a esses ambientes apresentam uma grande variedade morfodinâmica. A diversidade sedimentar e morfológica desses ambientes é dada, primariamente, pela geologia precedente à formação do delta e pela complexidade de processos continentais e costeiros, que impactam no transporte, deposição e redistribuição dos sedimentos (FISHER, 1969).

As características da bacia de drenagem, tais como clima, precipitação, formação geológica, vazão e carga sedimentar são umas dessas características que interferem na sedimentação deltaica. No ambiente costeiro, a largura da plataforma, a exposição às ondas, a direção da costa, o regime de maré e as correntes são fatores que promovem a distribuição longitudinal e transversal dos sedimentos ao longo das praias (WRIGHT e COLEMAN, 1973).

Entre os processos sedimentares, os minerais pesados vêm sendo tradicionalmente usados no ambiente praias como ferramenta complementar na interpretação dos processos erosivos (ROY, 1957, KOMAR e FRIHY, 1993; FRIHY e DEWIDAR; 1993. FRIHY e LOFT, 1997), nos estudos de proveniência sedimentar (SAWAKUCHI, 2009; GUEDES, et al., 2011; DILL & SKODA RADEK, 2017), na reconstituição dos processos evolutivos da planície costeira (ROY, 1999) e também como traçadores de correntes (PUPIENIS, et al., 2013; COSTA, et al., 2017). Já que os minerais que compõem as areias das praias apresentam uma variedade de densidades, formas e estabilidade, a análise de minerais pesados contribui para a compreensão dos processos de transporte de sedimento ao largo e transversalmente à costa, na associação com processos erosivos e nos estudos de proveniência.

Amostras de sedimento da face das praias da planície deltaica do rio Doce foram coletadas para, a partir das variações texturais do sedimento e das assembleias mineralógicas de minerais pesados, estabelecer as relações morfodinâmicas que preferencialmente distribuem e depositam os minerais pesados ao longo das praias. Paralelamente, os parâmetros de onda, assim como a interpretação da interação desses com a costa, contribuíram para a compreensão da triagem das espécies de minerais pesados frente às variações sazonais do clima metaoceanográfico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Interpretar os processos costeiros responsáveis pela distribuição das assembleias de minerais pesados na face das praias da planície do delta do rio Doce.

Objetivo Específico:

- Determinar as assembleias de minerais pesados ao longo das praias expostas e dominadas por ondas na planície deltaica do rio Doce.
- Estabelecer a relação entre os grupos de minerais pesados da face praial com a área fonte (desembocadura fluvial) e com o padrão de transporte de sedimento ao longo da costa pela corrente longitudinal.
- Determinar a atuação das alterações morfodinâmicas dos perfis de praia nas alterações sazonais dos teores e grupos de minerais pesados nas areias

1.3 Área de estudo

1.3.1 Localização e evolução do delta do rio Doce

O rio Doce é um dos principais agentes que interferem na sedimentação costeira e na plataforma continental do Espírito Santo, com a foz sendo responsável pela carga de sedimento em suspensão e de fundo com ampla distribuição ao longo da costa (ALBINO, 1999; ALBINO e SUGUIO, 2010; QUARESMA et al., 2015).

As praias estudadas estão inseridas na planície costeira do rio Doce, sendo essa uma feição deltaica dominada por ondas, segundo a classificação proposta por Fisher (1969), e com predominância de fácies de influência marinha na forma de cordões litorâneos (BACOCOLI, 1971). A geomorfologia precedente associada à planície deltaica do rio Doce é marcada pela ocorrência de falésias mortas do grupo Barreiras depositadas durante o Neógeno, e que marcam em direção ao interior do continente o limite oeste da planície (Figura 1). Esse tabuleiro costeiro apresenta relevo baixo com altimetria em torno de 50 m, francamente ondulado e constituído por sedimento arenosos e argilosos variados.

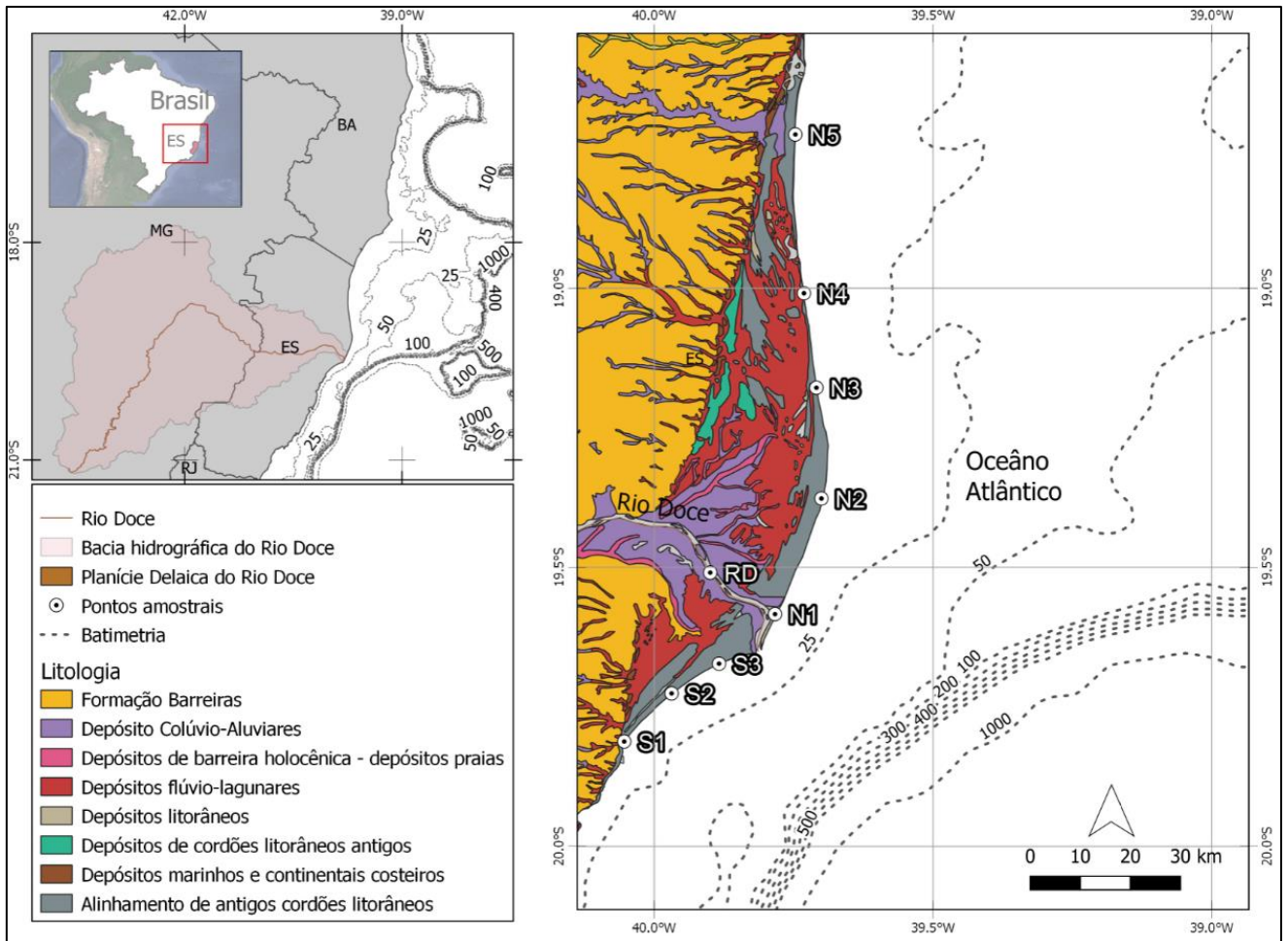


Figura 1: Unidades geomorfológicas da planície costeira do rio Doce a partir dos dados obtidos por Rossetti e Polizel (2015) e as estações amostrais do presente estudo distribuídas ao longo da costa. As estações são distintas pelo prefixo S e N, referentes à porção Sul e Norte da planície, respectivamente, e a numeração é crescente de sul para norte. As estações S1, S2 e S3 estão a 31 Km, 18 km e 7 km ao sul da foz, respectivamente. As estações N1, N2, N3, N4 e N5, se encontram ao norte da foz a distâncias de 7 km, 32 Km, 54 Km, 73 Km e 104km, respectivamente.

A evolução recente da planície costeira ao longo de aproximadamente 5 mil anos foi caracterizada pelo constante suprimento de sedimentos pelo rio Doce, disponibilizando sedimento na plataforma continental e nas praias adjacentes ao rio, promovendo o avanço da linha de costa com sucessivos depósitos de cordões arenosos (DOMINGUEZ et al 1981) na base das falésias do grupo Barreiras. As transgressões e regressões do nível do mar durante o período influenciaram na morfologia da planície promovendo a formação de ilhas barreiras e associadas a elas sistemas lagunares, regiões pantanosas. Gradativamente ocorreu o preenchimento lagunar por deltas intra-lagunares e terraços marinhos (DOMINGUEZ et al 1981).

Rossetti e Polizel (2015), mais recentemente, com base em análise de multisensores, sugerem que a formação do delta do rio Doce desde os estágios iniciais se deu com o lançamento de sedimento em mar aberto na base da Formação Barreiras, contrariando as propostas anteriores que sugerem o lançamento de sedimento no interior de lagunas.

A característica progradante da planície costeira do rio Doce, segundo Dominguez *et al* (1981), não se deve apenas ao aporte contínuo de sedimento fluvial, sugere também que o nível do mar de 4 a 5 m mais baixo que o atual ao longo dos últimos 5 mil anos contribuíram para o prolongamento dos terraços marinhos, além da presença da formação do arquipélago de Abrolhos, com a plataforma continental mais rasa e larga promovendo a proteção da costa contra a ação das ondas.

A plataforma continental de frente à planície do rio Doce pode ser separada em duas porções morfológicas distintas quanto a sua largura, uma ao norte da desembocadura do rio e outra ao sul. Ao norte a plataforma se apresenta larga com comprimento que pode alcançar até 230 km. O maior desenvolvimento da plataforma nesse setor, como anteriormente mencionado, está relacionado à formação dos Bancos de Abrolhos que em função da sua origem vulcânica alargou a plataforma originalmente estreita. Esse setor sob influência do banco de Abrolhos se estende de Belmonte (Estado da Bahia) até ao norte da desembocadura do rio Doce (Estado do Espírito Santo) e promove uma relativa proteção da costa às ondas dos quadrantes nordeste e leste. Ao sul da desembocadura do rio, sem mais influência morfológica do banco de Abrolhos a plataforma sofre estreitamento, atingindo comprimento médio de 50km.

1.3.2 As praias associadas e processos costeiro

As variações sazonais metaoceanograficas que atuam no Atlântico Sul afetam diretamente a distribuição de sedimentos e a morfologia das praias ao longo da planície deltaica do rio Doce, durante sua evolução pretérita e no presente (BACOCOLI, 1971, DOMINGUEZ *et al* 1981, (BITTENCOURT *et al*, 2007, ALBINO e SUGUIO, 2010). Bigarella (1972) resume o padrão de vento na costa leste do Brasil como sendo determinado pelas massas de ar geradas na zona de alta pressão do Atlântico Sul e por periódicas chegadas de massas de ar polar. O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul é a principal geradora de ventos e ondas do quadrante N, NE e E, e o deslocamento dessa massa de ar promove as alterações sazonais de intensidade e direção desses ventos. A chegada de Sistemas Transicionais vindos das regiões subtropicais e extratropical do hemisfério sul são responsáveis pela entrada de eventos de maior energia, gerando ondas de maior altura e período que se deslocam principalmente vindas de S e SE (OLIVEIRA E QUARESMA, 2018). A atuação desses sistemas de ar

na formação das características de onda, como altura, período e direção, interferem diretamente nos processos costeiros.

Contudo, além dos ventos, a diferença de largura da plataforma continental sul e norte da desembocadura do rio Doce e a atual configuração de costa interfere nos processos de aproximação da onda junto à costa. De maneira geral a linha de costa ao longo da planície apresenta cinco orientações principais, o que determina diferentes exposições às ondas e diferentes processos de refração. Martin et al (1993, 1996) demonstram o efeito de mudanças paleoclimáticas na descontinuidade na deposição dos terraços marinhos e na construção dos cordões arenosos. Apesar disso, Bittencourt et al (2007), modelaram as ondas incidentes junto à planície deltaica do rio Doce, propagando-as para águas rasas, e criaram o diagrama de refração das ondas em diferentes linhas de costa ao longo do holoceno tardio (Figura 2). Os autores sugerem que o transporte resultante da corrente ao longo da costa permaneceu o mesmo ao durante os últimos 5.600 anos, no sentido norte, independente da configuração morfológica da planície.

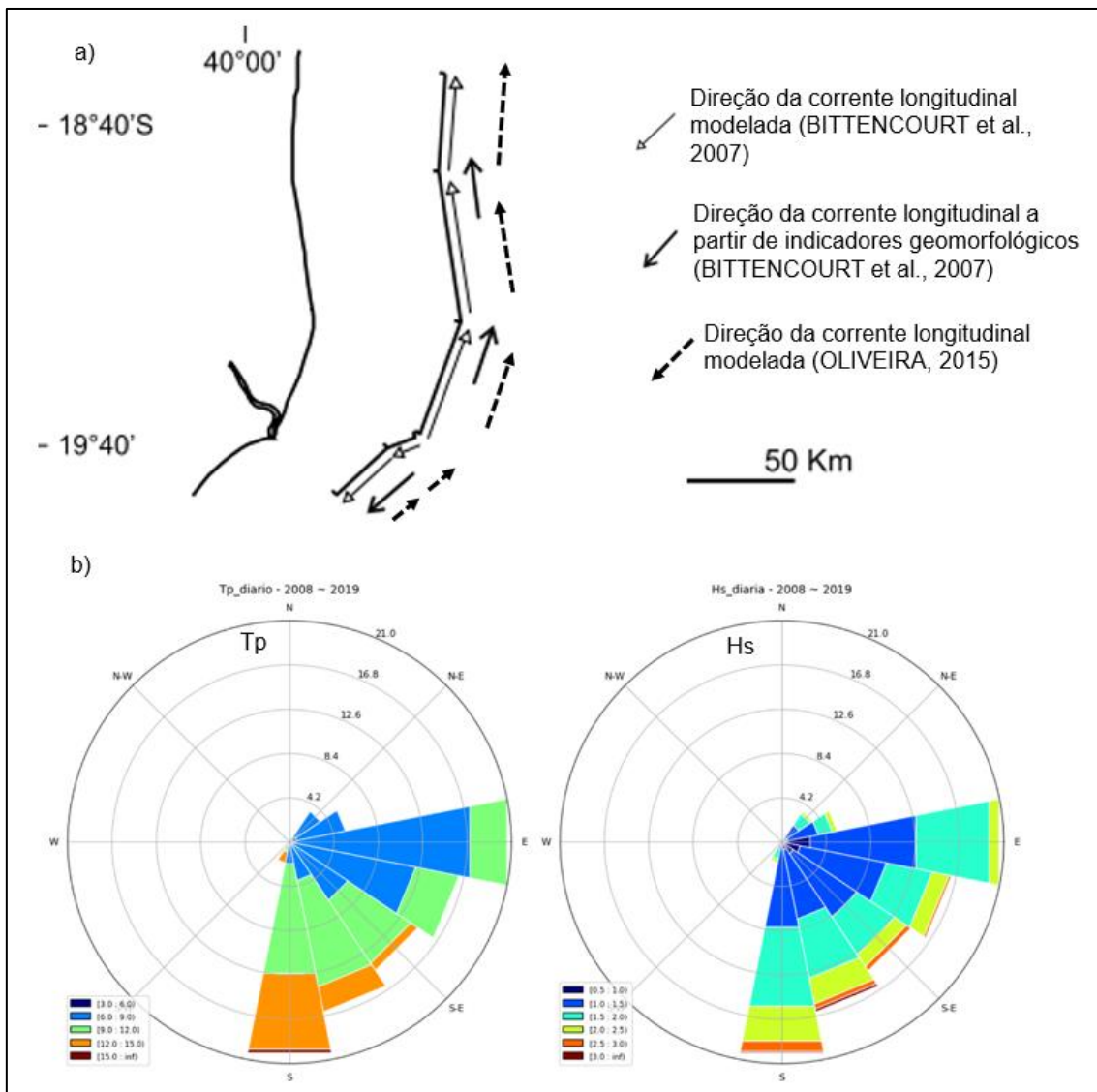


Figura 2: Corrente longitudinal modelada e a corrente longitudinal obtida a partir da análise de indicadores geomorfológicos para as praias da planície deltaica do rio Doce. Modificado de Bittencourt et al (2007) e OLIVEIRA (2015), (a) e a análise do período diário de onda (Ts) e altura de onda diário (hs) com o modelo global Wavewatch III, NOAA-WW3, entre os anos de 2008 e 2019, na plataforma continental a frente da foz do rio Doce (b).

Utilizando o modelo Global Ocean Wave (GOW), Oliveira et al. (2015) obtiveram dados de parâmetros estatísticos das ondas que incidem em frente à foz do rio Doce. As ondas predominantes modeladas foram dos setores E (34,8%), ESSE (22,1%) e SE (16,1%), com alturas variando entre 0,5 m e 2,0 m (70%) e período entre 4s e 10s. Valores de altura e período superiores à média estão associados às ondas de SE e SSE. Esses mesmos autores propagando a onda para água rasas e calculando o balanço sedimentar da deriva litorânea, reafirmam o transporte resultante no sentido sul-norte.

Desta forma, a resultante da deriva litorânea na foz do rio Doce segue o sentido resultante sul-norte, tendo com isso efeito na morfologia estrutural da planície, marcada pelo maior desenvolvimento na porção ao norte da foz do rio. Esse indicativo está relacionado à maior eficiência dos ventos, e por conseguinte as ondas do quadrante S e SE gerada pela entrada regular de frentes polares. (BITTENCOURT, et al, 2007).

Como resultado da frequência direcional das ondas a distribuição dos sedimentos imprime na planície uma diferenciação sedimentar e morfodinâmica das praias. Em geral são observadas próximo à desembocadura fluvial praias refletivas e intermediárias, com declividade moderada e areias grossas e médias, que favorecem a mobilidade sazonal do perfil. No extremo norte da planície, no sentido predominante da corrente, as praias de areias finas apresentam tipologias dissipativas de baixa declividade. O aporte contínuo de sedimento e a atuação suficiente dos ventos de leste sobre a face favorece a ocorrência de dunas na retropraia (ALBINO *et al.*, 2016).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Embasamento metodológico

2.1.1 Definição, características e fonte de minerais pesados

Tradicionalmente os minerais pesados são definidos com base na densidade, sendo usado como valor de referência o bromofórmio ($2,89 \text{ g/cm}^3$). Esse líquido foi usualmente utilizado na separação dos minerais com densidade superior $2,89 \text{ g/cm}^3$, os minerais pesados, e os minerais com densidade inferior, minerais leves, como quartzo e o feldspato (ADDAD, 2001). Com o passar dos anos e com a descoberta dos efeitos cancerígenos do bromofórmio, passou-se a utilizar outros líquidos densos para a separação densimétrica, principalmente o politungstato, por se tratar de um sal solúvel em água e com densidade padrão de $2,9 \text{ g/cm}^3$ (ANDÔ, 2020).

Tomando a definição de mineral pesado baseado unicamente no fator densidade, incorre de incluir uma grande variedade de detritos sedimentares que superam o valor de $2,9 \text{ g/cm}^3$, como por exemplo, micas, óxidos de ferro, carbonatos ferruginosos e fragmentos de rochas. Em alguns casos a fração principal mais densa do sedimento é formada pela precipitação química ou bioquímica no ambiente deposicional ou a partir da alteração das características dos grãos pela agregação de contaminantes derivados das atividades antrópicas (GARZANTI e ANDÔ, 2017).

A definição usada neste trabalho inclui unicamente os grãos minerais de origem terrígena, desagregados das rochas na área de fonte, constituído por grãos de

minerais pesados opacos e minerais pesados translúcidos, não micáceos, e com densidade superior a 2,89 g/cm³, uma vez que o líquido denso usado na separação foi o bromofórmio. A adoção desse critério restringe a análise a minerais que são recorrentemente utilizados na interpretação dos processos ambientais (GARZANTI e ANDÒ, 2017).

Os minerais pesados podem ser encontrados nas rochas-mãe como constituintes essenciais da estrutura das rochas, como no caso de anfibólios, piroxênios e micas, ou como minerais acessórios de menor representatividade, como a turmalina e o zircão (MANGE e MAURER, 1992). Rochas características da tectonoestratigrafia superior da crosta terrestre, representada pelas rochas sedimentares a metasedimentares e plutônico félsicas (por exemplo, arenitos e granitos) apresentam densidade relativamente baixas (DALY et al., 1966) e, portanto, fornecem poucos minerais pesados, em geral com concentrações inferiores a 1%. Ao contrário, rochas ígneas ultramáficas e máficas de altas temperaturas e metamórficas de alta pressão, que compõem níveis tectonoestratigráficos mais profundos da litosfera, são mais densos e portando, quando expostos à desagregação irão fornecer muito mais detritos de minerais pesados para os sedimentos derivados dessas rochas (GARZANTI e ANDÒ, 2017).

A estrutura cristalina, cor, zoneamento químico e óptico, inclusões e geminações dos grãos de minerais pesados têm sua origem na petrogênese dos minerais durante a formação da rocha (MANGE e WRIGHT, 2007). No sedimento, a abundância relativa e absoluta das espécies de minerais pesados depende significativamente das variações de densidade, formas e tamanhos dos grãos entre os grupos de minerais pesados, uma vez que tais características interferem no comportamento hidráulico do grão, como a velocidade de decantação, o coeficiente de arrasto e a tensão de cisalhamento (KOMAR e WANG, 1984; FRIHY ET AL., 1995).

Além das características dos grãos, a natureza dos processos hidráulicos (por exemplo, o fluxo direcional dos rios ou o movimento oscilatório das ondas) e processos diagênicos (como temperatura e umidade) condicionam os teores de minerais pesados no sedimento, permitindo a concentração pela deposição e/ou posterior dissolução dos minerais, provocando a perda total ou parcial de espécies minerais. (VAN GOSEN, et al., 2014). O enriquecimento por minerais pesados é comum em casos em que a rocha-mãe fornecedora de sedimentos já apresenta concentrações elevadas destes minerais ou quando os processos mecânicos (seleção física dos grãos) ou químicos (lixiviação seletiva) promovem a concentração desses minerais, formando os chamados placeres (KOMAR, 1989).

A resistência do mineral à solubilização está relacionada com a sua estabilidade, sendo que durante o transporte de sedimento pelos rios o estoque de sedimento aluvial vai reduzindo à medida que decorre o transporte, sendo que os minerais mais instáveis tendem a reduzir a concentração por conta da maior solubilização (MORTON, 1999). Considerando a estabilidade, os minerais pesados podem ser classificados como ultraestáveis, estáveis, moderadamente estáveis, instáveis e muito instáveis, segundo a classificação proposta por Pettijohn (1973). Na Tabela 1 segue a ordem de solubilização dos minerais proposta por Morton (2007).

O ciclo sedimentar tem início com a desagregação e erosão das rochas-mãe, que disponibilizam para o sistema aluvial detritos de minerais pesados e leves. Estes são transportados como carga de fundo ou em suspensão pelo fluxo fluvial. Durante todo o ciclo de sedimentação, os minerais sofrem modificações como a abrasão mecânica e intemperismo químico, desde a desagregação da rocha, durante o transporte e após a deposição, pelos processos diagênicos.

Tabela 1: Estabilidade dos minerais pesados presentes na matriz sedimentar da foz do rio Doce.

Estabilidade	Minerais
Ultraestáveis	Turmalina, Rutilo, Zircão
Estável	Ilmenita, Monazita, Estaurolita
Moderadamente estável	Granada, Silimanita, Cianita, Epidoto
Instáveis	Anfibólios

2.1.2 Minerais Pesados em Ambientes Aquosos

Diversos autores buscam formular equações dos processos físicos atuantes na seleção e concentração entre os grãos de minerais pesados e os de minerais leves no ambiente aquoso. Rubey (1933) constatou que os diversos processos hidráulicos são determinantes para formação de diferentes suítes mineralógicas, sendo a deposição determinada pelas características do grão, como velocidade de decantação, densidade e tamanho, introduzindo assim o conceito de “equivalência hidráulica”, sugerindo que minerais de maior densidade tendem a depositar juntamente com minerais menos densos de granulometria maior. Apesar do princípio da equivalência hidráulica explicar suficientemente bem os

processos envolvidos na deposição geral dos minerais, no ambiente deposicional natural é possível notar que a deposição de minerais com velocidades de decantação semelhantes, muitas vezes não se dá ao mesmo momento (RITTENHOUSE, 1943, SLINGERLAND, 1977), indicando que outros fatores envolvidos na seleção dos grãos (KOMAR, 1989 e MORTON e HALLSWORTH, 1999). Nesse sentido a interação entre hidrologia e os diferentes tipos de minerais, de formas, tamanho e densidades vão determinar qual grão de mineral será depositado em cada tipo de ambiente (KOMAR, 1993 e SLINGERLAND, 1999).

Outros trabalhos, tais como, Slingerland e Smith (1986), Komar (1987) e Li e Komar (1992) a partir de ensaios em ambientes controlados, realizaram a formulação teórica e matemática dos processos físicos (hidrológicos e sedimentares) em ambiente aquoso envolvidos na seleção dos minerais, passando a utilizar sedimentos mistos, compostos por minerais de quartzo e minerais pesados. Para esses autores, a separação entre os grãos de minerais leves e minerais pesados se dá pelo menos em um destes quatro processos: seleção em suspensão, seleção por arrastamento, seleção por transporte e seleção por cisalhamento. Os processos de triagem melhor compreendidos, a seleção em suspensão e o arrasto seletivo seguem esquematizados na Figura 3.

A seleção dos grãos quando em suspensão está relacionada aos processos de deposição, sendo a velocidade de decantação dos grãos o mecanismo que atua na separação entre os grãos de minerais pesados e minerais leves. Em suspensão os grãos são selecionados a partir das características do grão como densidade, forma e tamanho.

A seleção dos grãos por arrasto geralmente é expressa em termos da tensão crítica de cisalhamento do fundo e envolve, além das características do grão, a configuração do fundo e está associado aos processos erosivos, que atua na remoção de sedimentos.

Na seleção dos grãos por transporte envolve além das características dos grãos e do fundo, também a velocidade do fluxo. Já na seleção por cisalhamento a força atuante é a pressão dispersiva, que atua na separação vertical de sedimentos heterogêneos, geralmente mantendo os minerais mais finos na camada inferior e os mais grossos na superior.

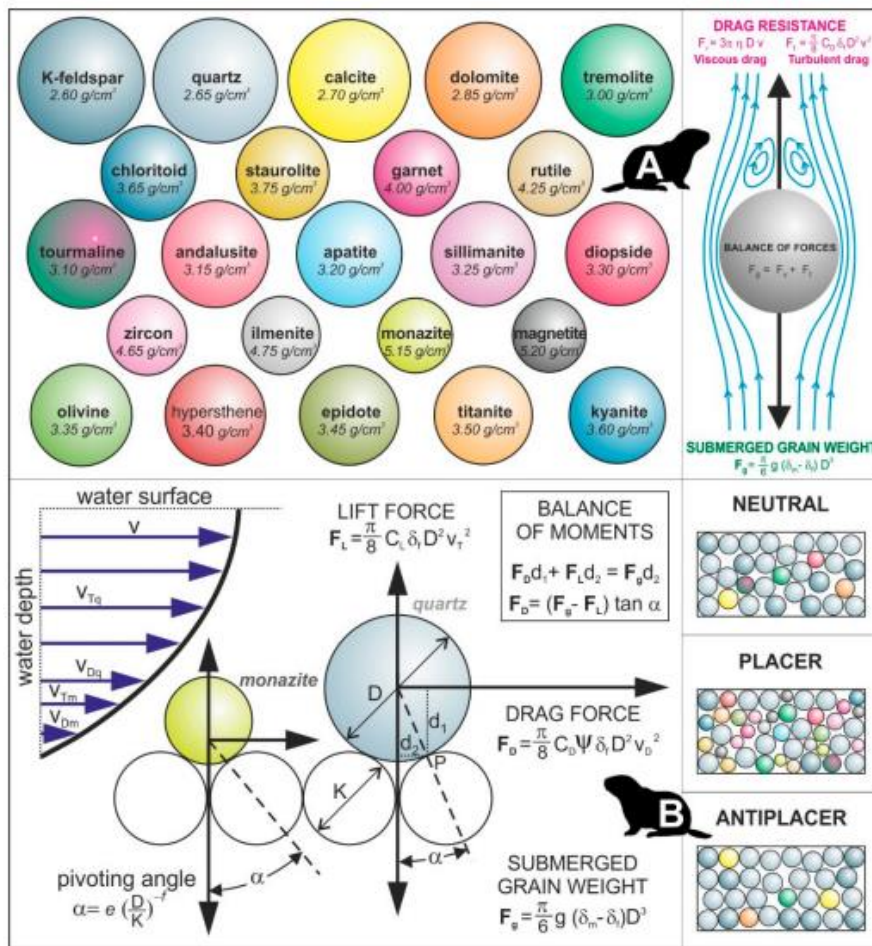


Figura 3: Separação hidráulica atuante sobre os minerais. (A) Princípio da equivalência hidráulica (RUBEY, 1933) responsável pelo controle das relações de tamanho e densidade entre os grãos e pela variedade da composição intramostral. (B) Arrasto seletivo responsável pela triagem dos minerais mais grossos e menor densidade dos minerais mais finos e mais densos. (GARZANTI e ANDÒ, 2019).

2.1.3 Aplicação de minerais pesados na interpretação de processos costeiros

Segundo Force (1991), o enriquecimento por minerais pesados em praias se dá principalmente na face e na berma da praia, a partir da atuação do fluxo de espraiamento da onda sobre a face. A quebra da onda na zona de surfe é responsável por um fluxo turbulento que transporta sedimentos até a zona de espraiamento. Na base da face da praia são depositados primeiros os minerais com maiores velocidades de decantação e à medida que o espraiamento sobe a rampa da face e a velocidade do escoamento diminui os minerais com menores velocidades de decantação passam a ser depositados, havendo uma configuração de gradiente de afinamento dos grãos da base ao topo da face. No

retorno do espriamento o fluxo é menos turbulento, com isso é menor a carga de material em suspensão o que aumenta a capacidade erosiva do refluxo. Minerais leves e mais grossos são mais facilmente removidos pelo efeito do “arrasto seletivo” deixando depositados minerais mais densos e mais finos (SLINGERLAND e SMITH, 1986).

Como os minerais que compõem as areias das praias apresentam uma variedade de densidades, formas e estabilidade, a análise de minerais pesados contribui para a compreensão dos processos de transporte de sedimento ao largo e transversalmente à costa, na associação com processos erosivos e nos estudos de proveniência.

Acompanhado do enriquecimento por minerais pesados na praia (Figura 4), processos de erosão e o recuo de costa são comumente documentados (RAO, 1957). Essa associação pode ocorrer nas mais diversas escalas temporais, tanto em variações volumétricas diária da face praial ao longo de um ciclo de maré, como em variações de longo prazo da linha de costa, seja por processos naturais decorrentes do aumento na energia dos processos costeiros, como também em casos de estruturas antrópicas que alteram o fluxo sedimentar, como na construção de quebra-mares e barragens na bacia de drenagem (FRIHY e KOMAR, 1993).

As variações sazonais na energia e direção das ondas e correntes interferem na concentração de minerais pesados e nas concentrações relativas das espécies mineralógicas, ao largo e transversalmente à costa. O processo de enriquecimento por minerais pesados é documentado acompanhando os eventos de maior energia associada às tempestades de monções na costa da Índia (KURIAN *et al.*, 2001), responsáveis pelas principais variações no volume da praia e na retração da linha de costa.

Durante eventos de maior energia das ondas, como na passagem de tempestades, o período do espriamento é intensificado, atuando mais efetivamente na remoção de sedimentos da parte emersa da praia e transportando para antepraia contribuindo para a formação de bancos submersos. A depender da intensidade e a duração desses eventos, o transporte promovido pelo espriamento seleciona e deposita os grãos de maior densidade, formando lentes de areias enriquecidas por minerais pesados ou então extensos depósitos em eventos de longa duração (CASALHO E TABORDA, 2014).

A análise de minerais pesados em praias tem sido usada também na interpretação de processos de trocas de sedimento transversalmente à costa. Komar e Wang (1984) avaliaram a distribuição dos minerais pesados ao longo de transectos ao longo da costa do Oregon durante eventos de passagem de tempestades, quando os minerais leves foram transportados pelo movimento do espriamento para a parte submersa das praias deixando para trás depósitos de

minerais pesados na face praial. Os minerais mais densos, como a ilmenita e o zircão apresentaram forte preferência de se depositarem nos depósitos da face praial, enquanto os minerais menos densos, como augita e hornblenda foram preferencialmente transportados a *off-shore* e depositados nos bancos submersos na antepraia. Esses autores constataram também que o diâmetro médio dos minerais pesados depositados nos placeres da face praial foi sempre inferior aos diâmetros dos minerais depositados na parte submersa da praia. Para os autores acima citados, o transporte seletivo por arrasto entre os grãos é o fator principal para a formação dos placeres nas praias do Oregon, com a deposição de grãos mais densos e de menor diâmetro, tal como o zircão e a ilmenita, e o transporte em direção a *off-shore* os grãos de menor densidade e maior diâmetro médio, como as hornblendas.

A abordagem de Li e Komar (1992) buscou traçar o efeito do transporte longitudinal sobre a seleção dos grãos de minerais pesados nas praias ao norte e ao sul da foz do rio Columbia. Nesse estudo foi observada a mesma relação inversa entre a densidade dos minerais e o tamanho do grão encontrado por Komar e Wang (1984), como efeito da equivalência hidráulica entre os grãos atuando na seleção dos grãos em suspensão. Os depósitos de minerais pesados foram mais expressivos próximo da desembocadura do rio, com decréscimo à medida que se distancia da foz. Nas proximidades da foz são depositados minerais opacos mais densos, ao passo que à medida que se afasta da foz minerais menos densos como as hornblendas são preferencialmente transportadas pelas correntes longitudinais.

Como o enriquecimento por minerais pesados se dá principalmente na face praial e o fluxo do espraiamento é o mecanismo atuante na formação desses depósitos, a modelagem hidrodinâmica do espraiamento contribui para a compreensão de como opera a seleção entre as diferentes espécies mineralógicas. A análise do espraiamento máximo da onda sobre a face praial (*run up*) tem demonstrado que o incremento das ondas oceânicas não reflete necessariamente numa elevação da onda na costa, uma vez que quando há aumento na altura da onda ela passa a quebrar mais longe da costa, o que aumenta o caminho para a onda colapsada percorrer. Em contra partida, verifica-se uma elevação no período do espraiamento, associada às ondas de infragravidade, que sofrem impacto indireto da ação de tempestades. Essa intensificação do período de espraiamento é o principal responsável pela erosão de sedimento da praia emersa, principalmente os minerais menos densos, como o quartzo, deixando para trás os minerais pesados (KOMAR, 2007).

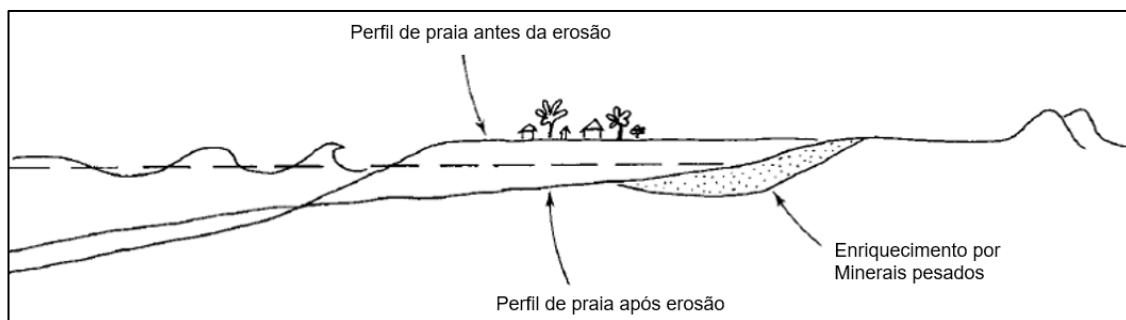


Figura 4: Esquema de enriquecimento por minerais pesados após erosão de praia pela entrada de eventos de maior energia. Modificado de Rao (1957).

Nos estudos de proveniência, onde se investiga a origem dos sedimentos para certa área de interesse (GARZANTI, 2016), os minerais pesados vêm sendo amplamente utilizados nas análises de similaridades entre as amostras das áreas fonte e a região de deposição (MALONE, 2007). Os minerais pesados tanto pelos tipos de espécies minerais quanto pela a abundância relativa entre eles, variam significativamente em cada tipo de rocha-mãe, sendo por isso, frequentemente usados como indicadores da origem do sedimento (BORROMEO *et al*, 2019, GARZANTI, 2021). O uso de múltiplas ferramentas, como a análise granulométrica, mineralógica e química, por sua vez, permite um melhor detalhamento na reconstituição da natureza dos processos, já que fornece visões dos detalhes díspares do quadro geral das análises. (NAJMAN, 2006). Ainda na definição da origem dos depósitos e na reconstituição dos processos formadores, o zircão-detrital é a principal ferramenta para auxiliar o refinamento das análises de proveniência (GÄRTNER, 2016; GARZANTI, 2021). O zircão é classificado como ultra-estável, portanto, altamente resistente ao processo de solubilização, permanecendo por muito tempo e percorrendo grandes distâncias no fluxo. Ainda, a partir da razão entre o decaimento dos isótopos de urânio e chumbo radioativo é possível realizar a datação do mineral (DAVIS *et al*, 2003) e, com isso, relacionar a idade do depósito com a idade das possíveis áreas fontes.

2.1.4 Minerais Pesados em Praias Deltaicas

Em deltas marinhos, a sedimentação é influenciada pelo material disponibilizado pelo rio que fica retido próximo à desembocadura (MORTON e HALLSWORTH, 1999; FISHER, 1969 e BACOCOLI, 1971), uma vez que a capacidade de remoção dos sedimentos pelos processos marinhos é inferior ao volume de sedimento siliciclástico disponibilizado pelo sistema fluvial (WRIGHT, 1978). Sob a ação das ondas, correntes e marés, o sedimento é redistribuído para as praias

associadas aos deltas, sendo que as diferentes assembleias mineralógicas experimentam diferentes comportamentos em função das diferenças de densidade, forma e tamanho (KOMAR, 2007). As praias deltaicas apresentam condições ambientais favoráveis para o enriquecimento por minerais pesados em suas areias, uma vez que o aporte de material terrígeno é elevado e por eventualmente, a costa sofrer processos de retração causados pela entrada de frentes frias ou pela alteração da boca do rio (KOMAR, 2007).

Nesse contexto de complexidade envolvendo a formação e os processos sedimentares dos deltas, a análise de minerais pesados vem se mostrando como importante método na compreensão dos processos sedimentares em deltas e as em praias associadas, já que o conjunto de minerais pesados encontrados nas areias de deltas marinhos tem se mostrado um eficiente traçador natural das correntes que atuam na distribuição de sedimento ao longo desses ambientes. Diversos autores têm utilizado os conhecimentos acerca das características destes minerais na resposta de processos erosivos, no entendimento do sentido do transporte das correntes e na indicação de áreas fontes de sedimento.

No delta do rio Nilo, sistemáticos estudos realizados por Frihy e colaboradores utilizaram os minerais pesados como ferramenta complementar nos estudos morfodinâmicos costeiros (FRIHY *et al*, 1991; FRIHY e KOMAR 1993; FRIHY e DEWIDAR, 1993 FRIHY e LOFT, 1997 FRIHY e DEWIDAR, 2003). A partir das análises de mais de 20 anos da evolução da linha de costa deltaica das praias do Nilo, foi possível definir com confiança áreas de acreção e erosão, além de constatar a distinção na assembleia mineralógica desses dois ambientes. A distribuição mineralógica se dá pela constatação da existência de dois grandes grupos baseada na densidade: um formado por minerais de menor densidade (augita, hornblenda e epidoto) e outro por minerais de maior densidade (opacos, granada, zircão e monazita). A concentração do grupo formado por minerais mais densos decai exponencialmente à medida que se distancia da área de erosão da costa, junto à boca do rio, enquanto os minerais menos densos apresentam padrão oposto, se concentrando nas áreas mais distantes da foz, em locais em que a costa se encontra em processos de acreção. Além da distinção ao longo da costa, padrões transversais à costa também foram observados na concentração de minerais pesados, apresentando altas concentrações no interior da zona de surf e com forte decaimento à medida que se afasta da costa. À medida que se afasta da costa, minerais mais densos tendem a diminuir a concentração em relação aos minerais menos densos. O enriquecimento na zona de espraiamento, por consequência, tende a ser formado por minerais mais densos.

2.1.5 Morfodinâmica de praia e clima de espraiamento

Os depósitos sedimentares de minerais pesados são encontrados nas mais diversas províncias geomorfológicas, nas mais variadas escalas e são geralmente formados pela interação entre o fluido, o fundo sedimentar e o transporte de partículas, que seleciona os grãos de minerais mais densos dos minerais mais leves (SLINGERLAND e SMITH, 1986). Na praia, a morfologia e a hidrodinâmica da zona de surfe e na zona de espraiamento da onda atuam de forma a alterar sazonalmente a configuração do perfil praial o que reflete numa alteração na abundância de minerais pesados e nas concentrações relativas entre as diferentes espécies mineralógicas. (KOMAR e WANG, 1984, ROY, 1999).

Nos estudos de hidrodinâmica costeira o monitoramento de perfil de praia é a ferramenta mais utilizada na compreensão das mobilidades históricas e atuais da costa, além de ajudar na previsão da evolução futura da costa. Levantamentos de perfis praias permite avaliar a magnitude e as frequências nas mudanças da linha de costa e nos volumes de sedimento presentes na praia, possibilitando identificar mudanças de curto prazo ou sazonais relacionadas às flutuações energéticas na costa, juntamente com a possibilidade de previsão de tendências de erosão ou acresção (COOPER, 2000).

A mobilidade do perfil se relaciona com as alterações no nível do mar provocada, por exemplo, pela chegada de tempestades. A “regra de Bruun” (BRUUN, 1954) é o modelo mais difundido que relaciona a elevação do nível do mar com a retração da costa. O modelo assume que, com a elevação do nível do mar, a parte superior da praia é erodida e o material retirado é transportado rumo ao mar e depositado junta à costa, em forma de barras, mantendo com isso constante o volume de sedimento na praia. O sedimento depositado na antepraia é equivalente ao aumento no nível do mar, com isso, o perfil não sofre variação ao longo da variação da maré.

A partir da contatação das alterações cíclicas na morfologia da praia, entre perfil de inverno, com perda de areia, e perfil de verão, com a chegada de areia ao prisma praial, busca-se compreender e prever essas alterações nos estudos de hidrodinâmica costeira. Os parâmetros conceituais de morfodinâmica de praia (WRIGHT e SHORT, 1984; MASSELINK e SHORT, 1993) é um dos principais parâmetros usados e descreve uma sequência de praias com características morfológicas que estabelecem relação com a declividade da face. Praias dissipativas ($\Omega > 6$) apresentam baixa declividade com uma extensa zona de surfe, enquanto praias refletivas ($\Omega < 1$) apresentam alta declividade e zona de surfe estreita ou inexistente. Os estágios intermediários ($1 < \Omega < 6$), variam conforme classificação apresentando grande variabilidade morfológica, com

ocorrência de bancos e calhas na zona de arrebentação da onda (PRODGER, 2016).

O espraiamento da onda sobre a face praial estabelece relação estreita com a morfologia e morfodinâmica da praia, uma vez que as características do sedimento e das ondas que se aproximam da costa, moldam a estrutura sedimentar da praia. A relação entre a declividade da face praial e o tamanho do grão é um conceito fundamental na morfologia costeira. Tal relação é primordialmente estabelecida pela permeabilidade da face praial. Em praias de areias mais grossas, em função da alta permeabilidade do sedimento, durante a atuação da onda sobre a face da praia, parte da energia do espraiamento é perdida, o que estabelece um fluxo resultante ascendente que permite um declive acentuado na costa. Praias com sedimento mais fino, em contra partida, a baixa permeabilidade permite maior rolamento dos sedimentos construindo, assim, perfis de menores inclinações (BASCON, 1951).

Nesse sentido, o refluxo da onda sobre a face praial é um mecanismo que contribui para o transporte de sedimento e transformação da morfologia praial nos processos de acreção e erosão da costa, determinada pela assimetria entre espraiamento e refluxo da onda (KOMAR, 1998). A hidrodinâmica da zona de espraiamento se relaciona com os parâmetros das ondas incidentes e da declividade da face praial (HUGHES, 2006, SHORT e JACKSON, 2021). Portanto, as características da costa, como grau de exposição, largura da zona de surfe e o tipo de quebra, relacionadas ao estágio morfodinâmico da praia, afetam o espraiamento da onda (MILES *et al.*, 2006). Adaptações nas equações não-lineares de águas rasas são comumente usadas para descrever o comportamento do espraiamento da onda sobre a face praial na seleção dos minerais (HUGES, 2006).

Sendo assim, variações sazonais dos processos costeiros se relacionam com a abundância de minerais pesados nos depósitos formados em praias, assim como com a morfologia do perfil. Essencialmente, a intensificação do espraiamento da onda sobre a face decorrente da intensificação dos processos costeiros e oceânicos, determina a formação de perfis de tempestade, com uma configuração mais convexa, característica da remoção de sedimento da praia emersa e deposição em bancos na antepraia (BRUNN, 1954; DEAN, 1973). O sedimento transportado para antepraia no retorno do espraiamento da onda, de maneira geral, é formado por sedimento de menores densidades, como o quartzo, simultaneamente os minerais pesados são acumulados na face e berma praial (RAO, 1957).

2.2 Obtenção de amostras e dados em campo

Amostras de sedimento da face da praia foram coletados em 8 perfis transversais à costa distribuídos ao longo de toda a planície deltaica do rio Doce (Figura 1). As praias foram visitadas durante 4 campanhas amostrais: setembro de 2018, dezembro de 2018, abril de 2019 e julho de 2019. As amostras foram coletadas por meio da raspagem da camada superficial do sedimento com o auxílio de pá de mão. Em duas estações fluviais, amostras de sedimento de fundo foram coletadas a aproximadamente 10 km à montante da foz, por meio de draga do tipo busca-fundo.

Dados morfológicos da praia foram obtidos por meio do levantamento dos perfis de praia em transectos transversais à linha de costa durante a baixa-mar. Os perfis de praia foram realizados com auxílio de um GNSS-RTK (marca TPS, modelo TP-10) em cada uma das estações. Durante o levantamento, o receptor móvel do sistema foi instalado sobre um bastão e ao longo do perfil, entre o cordão na retropraia e a antepraia rasa (zona de arrebentação), as feições das praias foram identificadas e coletadas suas coordenadas UTM e a altimetria. Para auxiliar na caracterização morfológica das estações, foram discriminadas as feições das praias em duna frontal ou cordão arenoso, final da vegetação de restinga, berma, espraiamento de preamar (“linha de deixa”), face praial, limite do espraiamento de vazante e máximo recuo da onda.

Além das amostras da praia, em março de 2020 foram coletadas 2 amostras no leito do rio Doce, a 10km a montante da foz, distribuídos entre margens esquerda e direita e a calha central. Os pontos de coletas foram previamente identificados com auxílio de imagens do Google Earth para obtenção das coordenadas geográficas. Em campo, com auxílio de um GPS de mão e utilizando uma embarcação motorizada, os pontos previamente definidos foram amostrados com um amostrador de fundo.

2.3 Condições oceanográficas e morfodinâmica

A caracterização das condições oceanográficas se deu pela análise dos parâmetros de onda atuantes durante o período monitorado. Altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção de propagação (θ), foram extraídos do site <https://www.surfguru.com.br/>. Essa plataforma usa para representação das ondas o modelo global Wavewatch III, NOAA-WW3 (TOLMAN, 2009).

Os perfis medidos em cada campanha foram usados para a modelagem da altura máxima do espraiamento da onda, utilizando o software livre XBeach, com o contorno de entrada definido em aproximadamente 15 m (BARNARD *et al.*, 2014; STOCKDON *et al.*, 2014), e as equações propostas por Stockdon *et al.* (2006) e por Mather *et al.* (2011).

Para além da caracterização das condições do mar durante a campanha e o cálculo do *run-up*, os dados de ondas foram usados para o cálculo do parâmetro adimensional ômega (Ω) (Equação 1), proposto por Dean (1973), onde H_b se refere à altura de onda na quebra em metros, ω_s é a velocidade de decantação do sedimento e T o período da onda em segundos.

$$\Omega = \frac{H_b}{\omega_s T} \quad (\text{Equação 1})$$

2.4 Tratamento e análise de dados

2.4.1 Morfologia e tipologia praial

A partir das coordenadas geográficas obtidas pelo GNSS/RTK os perfis de praia foram processados para a obtenção das distâncias acumuladas e a cota altimétrica dos pontos coletados em campo. Em cada uma das estações os perfis foram obtidos ao longo das 4 campanhas de monitoramento, afim de estabelecer o impacto da sazonalidade dos processos costeiros na adaptação do perfil praial. Foram calculados também os dados morfológicos de cada uma das praias: inclinação da face praial ($^\circ$), altura do cordão frontal (m), altura da berma (m), distância do espraiamento na vazante (m), comprimento da praia (m).

A classificação do estágio morfodinâmico proposta por Wright e Short (1984) separa as praias em dois estágios morfodinâmicos extremos, dissipativo e refletivo, e em quatro estágios intermediários. Para a determinação do estágio morfodinâmico foi calculado o parâmetro adimensional ômega (Ω), proposto por Dean (1973). Ômega é calculado pela interação entre os parâmetros de onda (altura e período) e a granulometria da face praial, dada pela velocidade de decantação do grão.

2.4.2 Análise sedimentológica das areias

A fração total de sedimento coletado na face praial e na calha do rio foram depositadas em beckers e adicionado água para remoção de sal, posteriormente secas em estufa a 60°C e, por fim, submetidas ao quarteamento até a obtenção

de duas alíquotas de 50g de sedimento, uma para a determinação da granulométrica e outra para as análises de minerais pesados.

A determinação da granulometria do sedimento arenoso coletado ao longo da pesquisa foi realizada por meio de peneiramento a seco. Para isso, a alíquota de 50g de sedimento foi depositada no jogo de peneiras com malha de - 2 a 4 ϕ acomodadas em agitador mecânico por 15 minutos. Após o peneiramento, o sedimento retido em cada malha foi pesado e calculado o teor de cada fração do sedimento.

As análises estatísticas dos dados granulométricos obtidos pelo peneiramento a seco foram executadas no programa GRADISTAT (BLOTT E PYE, 2001), que a partir da entrada dos pesos retidos nas peneiras, representa a característica textural do sedimento em função do diâmetro médio do grão (D_m) em phi, o desvio padrão (D_p), que representa o grau de seleção da amostra, representado pela dispersão dos tamanhos dos grãos em relação ao valor médio, também expresso em função de phi, e a assimetria (A_s), que representa para qual lado (dos grossos ou finos) tende à dispersão dos grãos (FOLK E WARD, 1957).

Para determinação do teor de %MP foi utilizado o método de separação densimétrica com líquido denso. Para isso, os 50g da alíquota obtidos pelo processo de quarteamento foram depositados em um becker e adicionado ácido clorídrico a 10% de diluição para a queima total de carbonato de cálcio. Após a remoção do CaCO_3 a amostra foi lavada e seca em estufa a 60°C. O sedimento, livre de carbonato, foi misturado ao bromofórmio (CHBr_3 , densidade de 2,9 g/cm^3) e adicionado em um sistema de funil, mangueira de latex e filtro, que possibilitam a remoção e retenção em filtro de papel os MP da amostra. Os minerais retidos no filtro foram lavados com álcool, posteriormente secos em estufa e pesados para quantificação do teor de minerais pesados (%MP).

Após a separação densimétrica, as amostras foram peneiradas a seco para obtenção das frações entre 1 e $>4 \phi$, sendo utilizados jogos de peneiras para retenção das frações 1,00 ϕ , 1,50 ϕ , 2,00 ϕ , 2,50 ϕ , 3,00 ϕ , 3,25 ϕ , 3,75 ϕ , 4,00 ϕ e $>4 \phi$. Em cada uma das frações retidas no jogo de peneira foi realizada a identificação das espécies minerais de MP. A identificação se deu pela contagem randômica de 300 grãos de minerais pesados não-micáceos em lupa. Inicialmente, os minerais pesados foram diferenciados entre transparentes e opacos e, por fim, os minerais transparentes foram identificados. Para auxiliar na identificação dos minerais pesados foram utilizadas como referências as obras Mange e Maurer (1992) e Addad (2010).

2.4.3 Integração dos dados

A Análise de Componentes Principais apresenta ampla aplicação em geologia (MANGE e WRIGHT, 2007) e se mostra como uma ferramenta eficiente na análise e interpretação de dados de minerais pesados, uma vez que os estudos relacionados envolvem um conjunto grande de dados (PIRKLE *et al.*, 1985; SVENDSEN, 2002). Os dados morfodinâmicos, sedimentológicos e as variáveis de minerais pesados foram submetidas à análise das principais componentes (PCA).

A primeira e segunda componentes de similaridade da PCA foram utilizadas para avaliar a associação morfodinâmica com a preferência deposicional dos minerais pesados. A fim de complementar a análise PCA foi realizada a análise de “cluster” das amostras a partir dos dados de abundância de minerais pesados. Nessa análise, as amostras individuais, são caracterizadas pela série de variáveis (neste caso, abundância relativa entre os diferentes minerais pesados) e agrupadas conforme a similaridade com as demais amostras. Esse tipo de análise é uma técnica qualitativa para estabelecimento da relação existente entre amostras, não sendo, estritamente, um procedimento estatístico (MALONE, 2007).

3 RESULTADOS

3.1 Ondas, espraiamento e vazão

As estatísticas de ondas e os dados de vazão seguem descritos na Tabela 2 e Figura 5. O período que antecedeu a primeira campanha (setembro de 2018), entre os meses de junho e agosto de 2018, foi marcado por uma vazão média de 660, m³/s, característica de período seco, e por ondas de maior altura, com até 18,9% de ocorrência de ondas superiores a 1,8m de altura e período médio de 9,3s alcançando valores máximos de até 18s, típicos de grandes tempestades, provenientes em quase 50% do tempo do E-SE. Já durante a segunda campanha, entre os meses de setembro de 2018 e dezembro de 2018, a agitação marinha foi menos intensa, com alturas de ondas média de 1,2m, com apenas 4,5% das ondas superando a altura de 1,8m, com as direções de propagação apresentando um grande faixa de atuação entre os quadrantes NE e S, sendo que as ondas provenientes de S mais significativas, com aproximadamente 25% de ocorrência. Entre o período de dezembro de 2018 e abril de 2019 a altura média das ondas foi de 1,1m e período de 9,4s, com a agitação marinha atípica para o período, em função da entrada da tempestade tropical “Iba”. Para o período que antecedeu a quarta campanha (julho de 2019) as ondas voltaram a ter um incremento, com altura média de 1,1m e períodos

médio de 9,4s. As ondas superiores a 1,8m estiveram associadas à entrada recorrente de frentes.

Tabela 2: Características médias e máximas de Hs e Tp, frequência de eventos com Hs superiores a 1,8 m, no período durante as campanhas incluindo três dias anteriores ao início dos levantamentos em campo.

Campanhas	Hs média (m)	Tp médio (s)	Hs máx. (m)	Tp máx. (s)	Hs > 1,8 m (%)	Vazão máx. (m³/s)	Observações
09/18	1,2	9,5	1,8	11,8	0,7%	660,4	Período Seco, ondulação de Sul no início da campanha, diminuindo Hs e direção E no final
12/18	1,0	8,5	2,1	16,9	4,5%	1340,9	Período chuvoso, ondas com distribuição bimodal, direção E passando para S no final
04/19	1,2	8,6	2,4	11,3	16,0%	1338,8	Período precedido pela tempestade tropical Iba
07/19	1,1	8,5	2,3	14,7	8,0%	728,4	Período seco, Incidência de frentes frias desde 04/19 com 3 eventos Hs > 1,8 m até o início da campanha

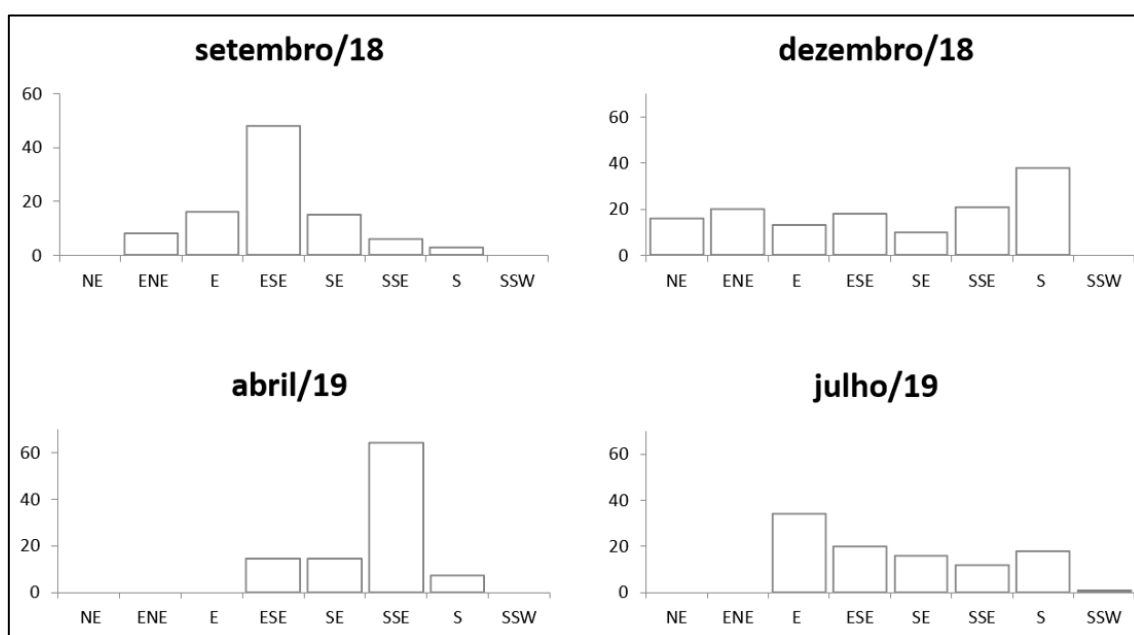


Figura 5: Frequência direcional das ondas durante os levantamentos de campo incluindo três dias anteriores ao início dos levantamentos.

Variações sazonais do run-up são verificadas ao longo do período decorrente de mudanças no regime de ondas e atmosférico. O espraiamento alcança maiores alturas em relação ao nível médio do mar nas estações ao sul, com valores mais expressivos na estação S1 no extremo sul da planície, com média de 5,52m para essa estação. Em direção ao norte da planície a altura máxima do espraiamento é menor e sofre um decaimento gradual, como valor médio de 2,93m na estação N5, no extremo norte da planície. Na Tabela 3 segue o valor calculado para o run-up para o período de monitoramento ao longo da planície deltaica do rio Doce.

Tabela 3: Altura do espraiamento máximo em metro calculado para as praias estudadas para o período de 3 dias anteriores ao levantamento

Campanha	S1	S2	S3	N1	N2	N3	N4	N5
set/18	6.04	3.50	3.57	2.28	3.06	3.16	3.04	3.01
dez/18	4.75	3.98	3.58	3.94	4.00	3.41	3.00	2.82
abr/19	5.19	4.05	2.29	4.04	3.47	3.86	3.58	2.85
jul/19	6.09	4.26	3.38	3.12	3.50	2.77	2.63	3.05

3.2 Textura do sedimento

A análise textural do sedimento da calha do rio Doce, nas estações fluviais, RD1 e RD2, coletadas 10 km à montante da foz, apresentam diâmetro médio de $1,58\Phi$ e $0,92\Phi$, respectivamente, representando areias grossas a médias. O grau de seleção é classificado como muito pobre e a assimetria muito negativa na amostra RD1, o que indica a cauda da distribuição representada por sedimentos grossos.

O sedimento coletado na face das praias da planície deltaica do rio Doce revela a presença de areias que variam desde muito grossas (inferiores a $0,0\Phi$) a areias muito finas (superiores a $2,0\Phi$). O diâmetro médio dos grãos das amostras

analisadas apresenta valor médio de $1,09 \Phi$, com valor mínimo de $-0,72 \Phi$ e máximo de $2,76\Phi$.

A partir da classificação granulométrica é possível identificar uma compartimentação da área de estudo. (Figura 6). Nas estações ao sul da desembocadura do rio Doce, os sedimentos da face praial são mais grossos, principalmente ao extremo sul da planície, na estação S1, com teor de cascalho alcançando até aproximadamente 23% (setembro de 2018) em relação à amostra total. Nas estações S2 e S3, ainda ao sul da foz, o sedimento apresenta uma tendência de afinamento, com média de diâmetro de $0,22\Phi$ e $0,32\Phi$, respectivamente.

Ao norte da foz o sedimento foi majoritariamente classificado como areia fina, com valores superiores a $2,0\Phi$, com tendência de afinamento rumo ao norte. Na estação N1, a 7km ao norte da foz, as areias da face praial, ao contrário das demais estações do setor norte, foram classificadas como areias grossas a muito grossas com valor médio entre as campanhas de $0,3 \Phi$.

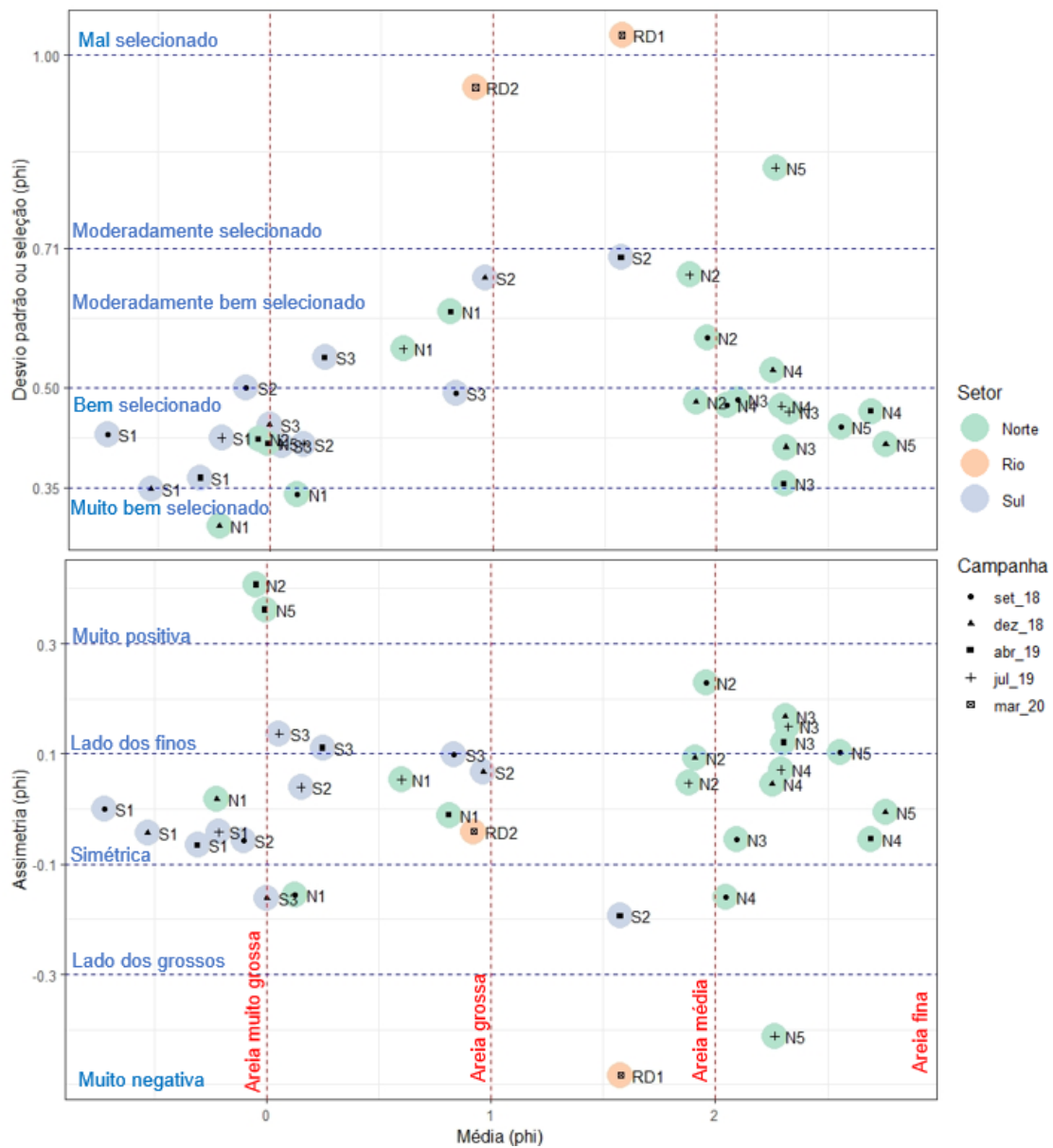


Figura 6: Relação entre os parâmetros estatísticos das areias das praias e da estação fluvial. A variação da média, desvio padrão (grau de seleção) e assimetria das amostras analisadas são destacadas quanto a distribuição espacial e temporal.

Os valores de assimetria próximos a zero ϕ (Φ) indicam que a curva da distribuição granulométrica é simétrica, já valores de ϕ (Φ) positivos apresentam uma cauda para o lado dos finos, apresentando com isso a contribuição de sedimentos finos, ao passo que valores negativos de ϕ (Φ) indicam a contribuição de grãos grossos. Desta forma quanto à assimetria as areias apresentaram valores variando entre $-0,41\Phi$ a $0,41\Phi$. A média das assimetrias das amostras da praia apresentam valor aproximado de $0,03\Phi$, portanto as distribuições das curvas granulométricas se apresentam simétricas.

3.3 Minerais Pesados

3.3.1 Teores

O teor de minerais pesados das amostras coletadas tanto no ambiente praias como fluvial pode ser dividida em três faixas de concentração (Figura 7). As amostras com concentrações inferiores a 1% representaram 50% das amostras analisadas e estão essencialmente associadas às areias da face das praias ao sul da planície do rio Doce, podendo ser observada uma leve tendência de aumento nas concentrações de sul em direção à foz do rio. Concentrações inferiores a 1% também foram encontradas na praia de Povoação, logo ao norte da foz. As concentrações entre 1 e 10% representam 47% das amostras analisadas e estão presentes principalmente nas praias de Pontal de Ipiranga, Barra Nova e Guriri, na porção mais ao norte da planície deltaica, com uma leve tendência de incremento na concentração média de minerais pesados no sentido sul/norte.

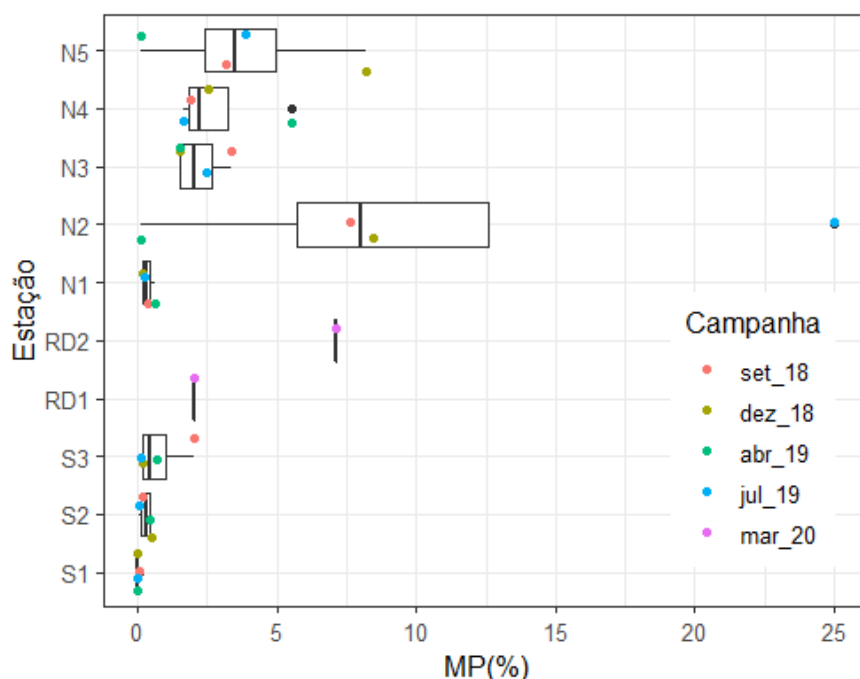


Figura 7: Box-plot da concentração de minerais pesados (%MP) nas areias das da carga de fundo do rio Doce e das praias do delta ao longo do período monitorado

Em Degredo, ao norte da planície, foi encontrada a maior concentração média de minerais pesados. Durante a campanha de julho de 2019 a concentração apresentou valor de 24,9%, sendo a única ocorrência com valor superior a 20%.

As estações fluviais apresentaram concentrações de minerais pesados com valores de 2,02% e 7,11% nas estações RD1 e RD2, respectivamente.

3.3.2 Composição de minerais pesados

A análise global da mineralogia das amostras coletadas na planície deltaica do rio Doce, constituída tanto pelos sedimentos da face praial como as areias do ambiente fluvial, resulta em uma composição formada por 48% de minerais translúcidos e 52% de minerais opacos. Dentre os translúcidos os minerais com maior ocorrência são os anfibólios (48%), silimanita (19%), cianita (12%), zircão (8%) e turmalina (6%), e em menor quantidade (inferiores a 5%), granada, monazita, rutilo, epidoto e estauroilita (Tabela 4). Na Figura 8, seguem representados os minerais com maiores contribuições em abundância relativa e o índice ZTR representado pela soma dos minerais de zircão, turmalina e rutilo.

Tabela 4: Concentração (%) das espécies mineralógicas encontradas nas estações analisadas e a concentração entre de minerais opacos e translúcidos.

Estação	Camp.	Sil	Gra	Tur	Rut	Epi	Cia	Mon	Est	Anf	Zir	Opa	Trans
S1	set_18	1,7	0,0	5,7	0,6	0,0	1,7	0,0	0,6	12,0	77,7	57,8	42,2
	dez_18	14,3	0,0	28,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	57,1	12,5	87,5
	abr_19	11,5	0,0	34,6	0,0	0,0	19,2	0,0	0,0	30,8	3,8	62,3	37,7
	jul_19	20,6	2,8	2,8	0,9	1,9	16,8	0,9	10,3	39,3	3,7	84,6	15,4
S1	set_18	4,1	0,0	8,2	0,0	5,2	7,2	0,0	2,1	67,0	6,2	71,9	28,1
	dez_18	16,8	0,7	4,0	0,4	1,0	9,3	0,4	2,2	64,1	1,2	44,5	55,5
	abr_19	19,5	0,1	0,8	0,1	0,3	7,3	0,1	1,1	68,3	2,3	36,5	63,5
	jul_19	66,7	0,0	0,0	0,0	0,0	6,3	2,1	4,2	18,8	2,1	71,9	28,1
S3	set_18	14,4	5,4	19,0	1,0	2,1	11,3	0,2	5,7	31,1	9,9	68,2	31,8
	dez_18	31,8	0,0	3,3	0,0	0,7	5,3	1,3	2,6	45,7	9,3	66,4	33,6
	abr_19	20,5	9,4	10,9	0,0	1,1	9,0	0,2	2,1	46,2	0,6	58,4	41,6
	jul_19	51,2	2,3	0,0	0,0	0,0	23,3	0,0	0,0	14,0	9,3	64,3	35,7
N1	set_18	17,6	0,4	2,6	0,0	2,6	14,2	0,4	8,2	47,6	6,4	49,7	50,3
	dez_18	50,0	16,7	0,0	0,0	0,0	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	75,0
	abr_19	15,9	2,6	3,1	0,0	1,4	15,9	1,0	9,0	49,8	1,3	60,7	39,3
	jul_19	17,3	2,7	4,1	0,9	0,5	25,0	0,0	5,0	38,2	6,4	34,9	65,1
N2	set_18	10,7	6,3	11,9	0,6	1,9	10,8	1,6	5,5	34,8	15,9	63,9	36,1
	dez_18	6,4	5,7	3,7	0,4	1,6	5,4	0,6	5,8	64,7	5,8	61,3	38,7
	abr_19	17,9	8,8	8,0	0,4	1,5	8,8	0,0	9,5	44,3	0,8	67,7	32,3
	jul_19	3,5	7,0	4,4	0,3	0,7	6,7	0,8	3,7	64,2	8,7	60,4	39,6
N3	set_18	12,0	0,7	1,6	0,7	0,6	14,2	0,4	3,7	63,3	3,0	48,3	51,7
	dez_18	20,8	0,4	2,5	0,0	0,2	13,2	0,1	1,4	58,3	3,0	45,1	54,9
	abr_19	17,0	0,2	3,2	0,0	0,5	14,9	0,4	2,2	60,1	1,7	38,7	61,3
	jul_19	15,7	0,3	2,4	1,3	0,2	10,0	0,2	2,1	63,9	3,9	50,1	49,9

N4	set_18	13,9	0,1	2,3	0,3	0,6	12,1	0,1	1,8	65,2	3,6	42,2	57,8
	dez_18	19,9	0,5	2,6	0,2	0,3	4,2	0,4	3,2	65,4	3,3	47,1	52,9
	abr_19	17,4	0,3	3,2	0,0	0,9	11,8	0,3	2,1	60,0	4,2	40,1	59,9
	jul_19	20,2	1,0	1,4	0,3	0,0	9,0	0,2	1,7	62,7	3,4	47,5	52,5
N5	set_18	14,9	0,0	2,3	5,1	0,5	13,6	0,0	0,5	61,6	1,6	27,4	72,6
	dez_18	18,4	0,5	2,7	0,0	0,2	14,8	0,2	2,3	57,6	3,3	38,9	61,1
	abr_19	16,8	0,2	4,0	0,5	0,4	24,6	0,7	0,9	47,6	4,2	66,5	33,5
	jul_19	21,7	0,4	3,5	0,8	0,5	9,1	0,1	1,8	58,3	3,8	55,6	44,4
RD1	mar_20	9,0	5,6	3,6	0,5	0,1	4,3	0,5	4,1	60,0	12,4	45,0	55,0
RD2	mar_20	10,8	1,6	2,8	0,5	0,5	5,5	2,0	3,5	67,3	5,3	57,4	42,6

As amostras fluviais apresentam composição mineralógica formada majoritariamente por anfibólios, representando 63%, seguida pelas silimanitas e as cianitas representando, respectivamente, 10% e 5% da contribuição para a mineralogia da fração translúcida de minerais pesados. O índice ZTR, calculado a partir da soma da contribuição dos zircões, turmalinas e rutilos representam 12%.

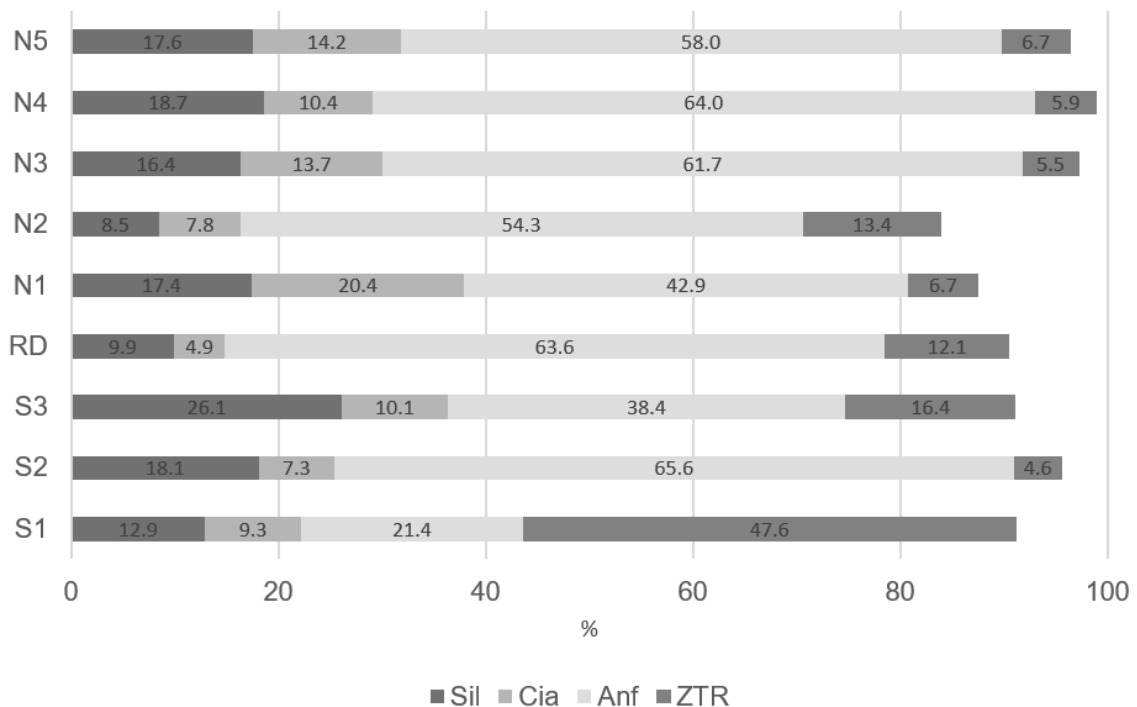


Figura 8: Composição média dos minerais pesados translúcidos mais abundantes (Silimanita-Sil, Cianita-Cia e Anfibólios-Anf) e o índice ZTR (soma entre os zircões, turmalinas e rutilos) durante as quatro campanhas para as estações amostrais fluviais e praias.

Variações significativas na abundância relativa entre os minerais pesados translúcidos espacial e temporalmente foram verificadas ao longo do monitoramento nas amostras da face das praias analisadas (Figura 9). As

estações N3, N4 e N5, no extremo norte da planície, apresentam a mineralogia que se assemelham entre si com pequena variação sazonal, com predominância anfibólios compondo aproximadamente 60% das amostras analisadas e valores médios do índice ZTR de 6%, característicos de sedimentos imaturos. As silimanitas e as cianitas representam em média 17% e 12%, respectivamente.

Mais ao sul, na estação N2, os anfibólios são o grupo de minerais mais abundante, porém com representatividade média menor, em torno de 54%. As silimanitas e as cianitas representam contribuições de 8.5% e 7.8%, respectivamente. Nessa estação o índice ZTR sofre aumento em relação às estações do extremo norte da planície, alcançando valor médio de 13%.

O trecho praiado formado pelas estações S2, S3 e N1, mais próxima à foz do rio, apresenta uma maior variação sazonal na abundância relativa dos minerais. Os anfibólios ainda são os minerais dominantes, mas eventualmente as silimanitas e as cianitas podem apresentar contribuições maiores. Na campanha de julho de 2019, por exemplo, nas estações S2 e S3, as concentrações de silimanitas e cianitas juntas apresentaram valores superiores a 75%. O índice ZTR tem um pequeno incremento para esse setor, com uma maior contribuição de zircão e turmalina na estação S3

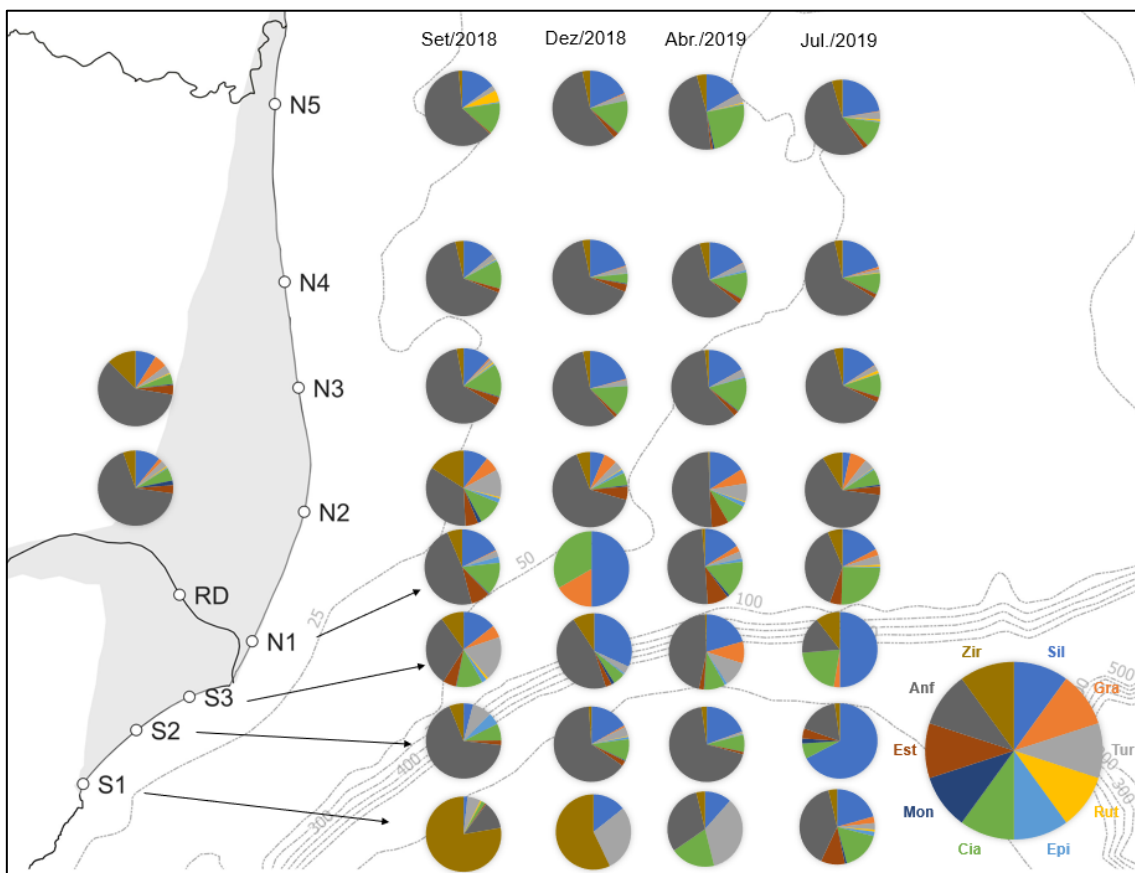


Figura 9: Teor entre minerais pesados translúcidos nas estações amostrais analisadas ao longo do monitoramento. Anfibólio (Anf.), zircão (Zir.), Silimanita (Sil.), granada (Gra.), turmalina (Tur.), rutilo (Rut.), Epidoto (Epi.), cianita (Cia.), monazita (Mon.), estauroлита (Est.).

A estação S1 no extremo sul da planície se diferencia das demais, com os anfibólios deixando de ter maior representatividade, com valor médio entre as campanhas de 21,4%. Nessa estação o índice ZTR, nas campanhas de setembro de 2018 e dezembro de 2018, apresenta valores superiores a 80%, podendo ser classificados, com base na estabilidade dos minerais pesados, como sedimentos maduros.

3.3.3 Composição mineralógica intra-amostal

Os minerais opacos, os anfibólios, as turmalinas e os zircões foram analisados dentro das diversas frações granulométricas das areias e da distribuição granulométrica da fração total da amostra (Figura 10).

Os minerais pesados por serem mais densos que os minerais de quartzo, apresentam distribuição, de forma geral, em frações mais finas que a amostra total, relacionando com isso, com a proposição de Rubey (1933) da deposição por equivalência hidráulica: em que grãos menores de maiores densidades se depositam junto a grãos maiores com densidades inferiores.

Dentre os minerais pesados a lei da equivalência hidráulica também estabelece relação uma vez que, os minerais mais densos, como o zircão e os minerais opacos, são depositados nas frações de areia muito finas, enquanto que, os anfibólios e turmalinas apresentam maiores concentrações nas frações de areias finas e médias.

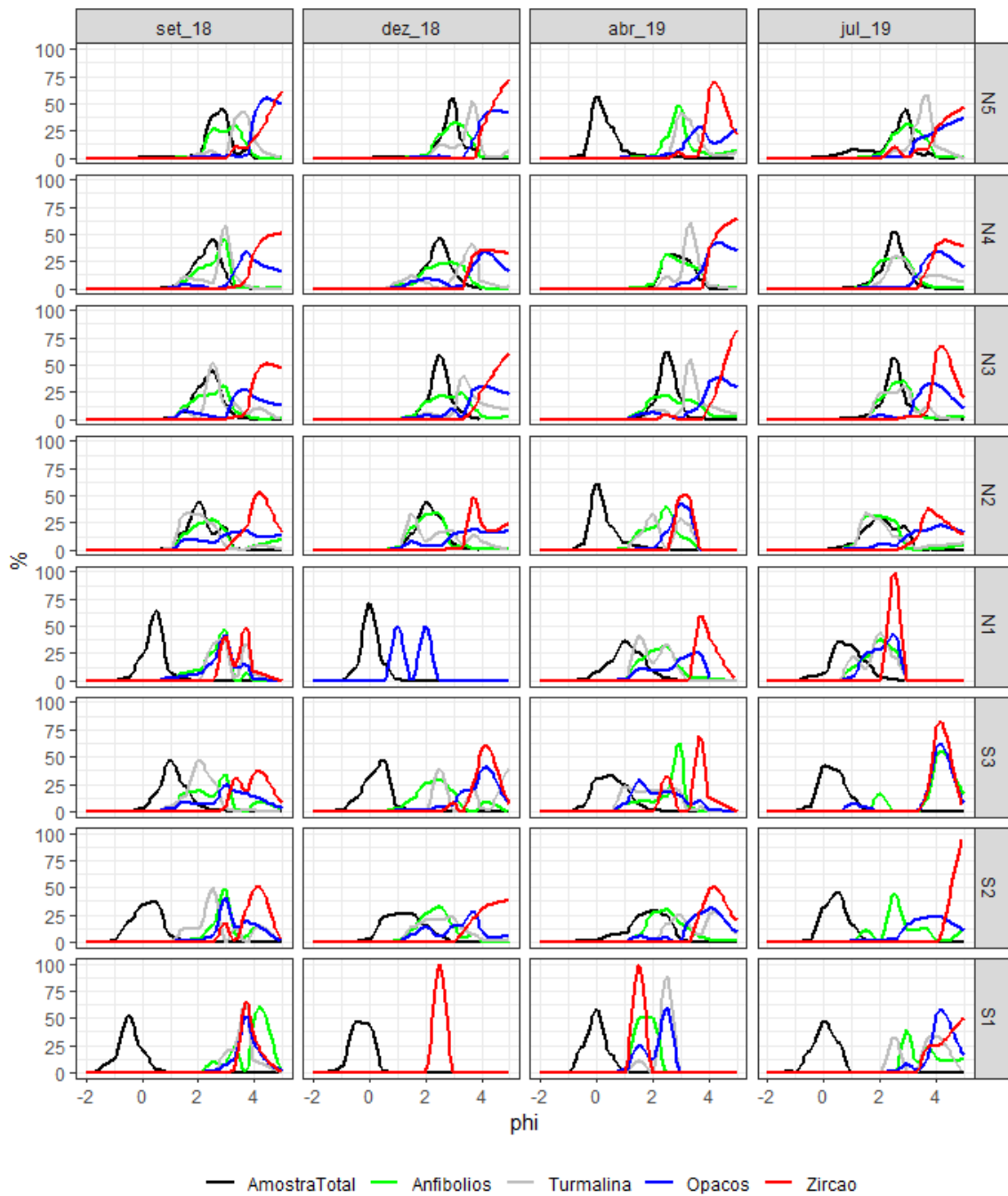


Figura 10: Curvas da frequência granulométrica das amostras total das areias analisadas e a distribuição intra-amostral de minerais com diferentes densidades.

3.4 Morfologia e morfodinâmica das praias

As praias que compõem a planície deltaica do rio Doce apresentam diferenças nos parâmetros morfológicos e morfodinâmicos entre as extremidades norte e sul da planície. O parâmetro ω , que integra os dados de onda e de

velocidade de decantação, também acompanha essa gradação espacial (Figura 11), tendendo a apresentar valores baixos de praias refletivas, no setor ao sul da foz do rio Doce, e uma elevação no valor médio nas praias ao norte da desembocadura.

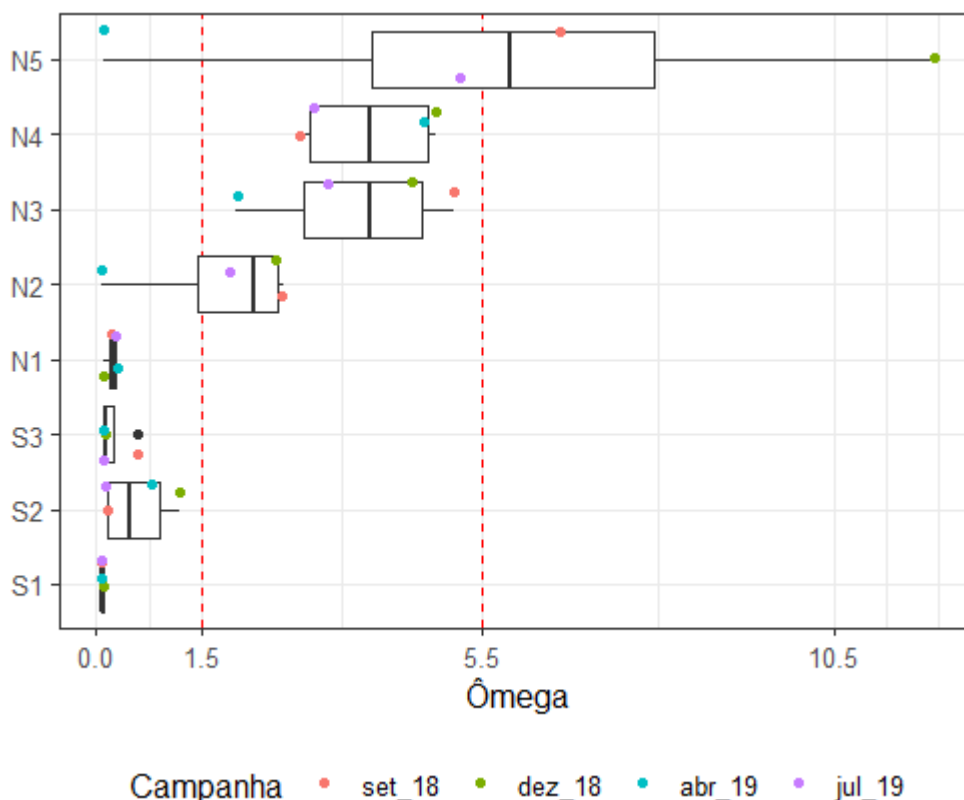


Figura 11: Parâmetro ômega para as praias monitoradas. As linhas verticais vermelhas em 1,5 e 5,5 representam os limites inferior de ômega para praias refletivas e o limite superior para praias dissipativas, respectivamente. O intervalo entre as linhas representa a faixa de praias intermediárias.

No extremo sul da planície a 31 km da foz do rio Doce, em Barra do Riacho (estação S1), em todas as campanhas a praia foi classificada como refletiva, com valores de ômega sempre inferiores a 0,1. As ondas observadas em campo foram sempre classificadas como ascendentes, com quebra já na base da face, não havendo, com isso, zona de surfe. Dentre as praias analisadas esta apresenta a maior declividade da face praial, com média de 10,5 graus ao longo do ciclo de monitoramento. As feições superiores da praia como a berma e o cordão frontal são bem desenvolvidos e apresentam cotas altimétricas elevadas em relação ao NMM. A altura da berma praial apresentou valor médio superior a 5,5m. Apesar do cordão frontal apresentar altura também elevada, com média de 6,7m, a diferença de aproximadamente 1m em relação à berma é pequena.

Ainda ao sul da planície no setor entre a Terra Indígena de Comboios e a Reserva Biológica de Comboios, respectivamente nas estações S2 e S3, as

praias apresentam uma diminuição na declividade da face da praia em relação à estação S1, mas ainda com valor médio elevado, de 9,3 graus. Ao longo do monitoramento estas estações ainda apresentaram valores de ω inferiores a 1,5 característicos de praias refletivas, apesar de uma tendência de aumento em relação à praia da Barra do Riacho. Ao longo das campanhas as ondas na arrebatção apresentaram características ora mergulhantes ora colapsantes, sugerindo uma elevação acentuada do perfil na antepraia. Quanto à altura da berma e do cordão arenoso frontal apresentam uma tendência de diminuição nas cotas altimétricas partindo da extremidade sul da planície em direção à foz do rio. Na estação S2 a praia apresenta-se pouco desenvolvida ao longo do período monitorado, com comprimento médio em torno de 25m, ao passo que em S3 os valores foram superiores a 50m.

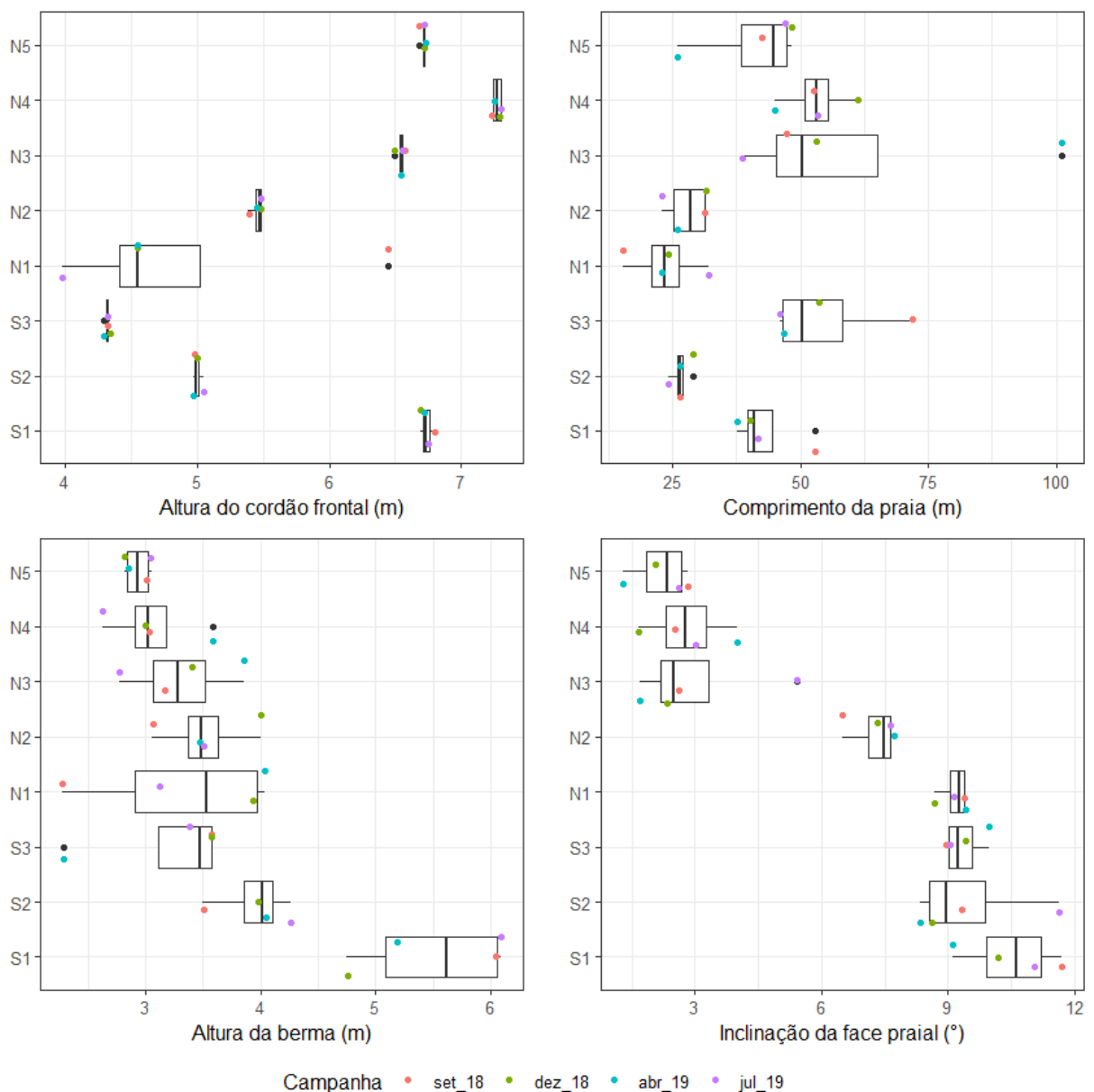


Figura 12: Parâmetros morfológicos extraídos dos perfis de praia: altura da duna frontal ou cordões arenosos frontais (m), comprimento da praia (m), altura da berma (m) e inclinação da face (°).

Ao norte do rio do Doce a aproximadamente 8 km da foz, na praia de Povoação, a estação N1 apresenta valores baixos de ω , sendo classificada ainda como refletiva e apresentando elevada inclinação da face praial, com valor médio de 9,2 graus, próximo ao encontrado nas estações S2 e S3. A praia se apresenta estreita em Povoação, com comprimento médio inferior a 25m. A parte mais alta da praia, como a berma e o cordão frontal apresentaram valores com forte variação ao longo do período de monitoramento.

A praia de Degredo (estação N2) se encontra a 33 km ao norte do rio Doce e apresenta-se como uma estação de transição quando avaliado os valores de ω e de inclinação da face praia. O valor de ω para esta estação apresentou valores médio de 1,8 de praias intermediárias, mas com ocorrência de valor inferior a 1,5 de praias refletivas. A declividade apresentou valor médio inferior às demais estações analisadas, com média de 7,3 graus. A altura da berma ainda apresenta valores próximos aos das estações S3 e N1, anteriormente mencionadas, e próximo a 3,5m. A altura do cordão frontal se eleva e atinge valor médio superior a 5m.

Rumo ao norte nas praias de Pontal do Ipiranga, Barra Nova e Guriri (estações N3, N4 e N5, respectivamente) os valores de ω apresentaram uma tendência de elevação, assumindo valores que permitiram ser classificadas entre praias intermediárias e dissipativas. As praias a partir desse trecho também sofrem uma redução mais significativa na declividade, enquanto, tendem a apresentarem uma faixa de areia mais extensa.

As praias de Pontal do Ipiranga e Barra Nova (estações N3 e N4) apresentaram valores de ω entre o mínimo de 2 e o máximo de 5, variando entre os estados intermediários de terraço de baixa mar e bancos de calhas longitudinais. A inclinação da face praial a partir da estação N3 sofre uma redução significativa da declividade com valor médio de 3 graus e 2,8 graus na estação N4. Nessas estações, a altura da berma assume a tendência de diminuição com valor médio de 3,3 m, ao passo que a altura da duna frontal se eleva em relação às estações anteriormente mencionadas. Em Barra Nova atinge a cota máxima de 7,3m.

No extremo norte da planície do rio Doce, aproximadamente 100 km da foz, a Praia de Guriri apresenta o menor valor médio de declividade de 2,1 graus e a ocorrência de valor ω superior a 5,5, característico de praias dissipativas. Para essa praia, continua a tendência de diminuição da altura da berma e a elevação do perfil em retropraia, com a duna frontal alcançando 6,7 m.

3.5 Perfis de praia e mobilidade sazonal

A sobreposição temporal dos perfis de praias permite avaliar as respostas da morfologia da praia frente às variações sazonais do ambiente e à readaptação do perfil, assim como permite reconhecer os processos de retração ou progradação da costa (COOPER, 2000), (Figura 13).

A evolução temporal do parâmetro ômega (Figura 11) para as praias estudadas mostra que as variações sazonais apresentam um maior impacto nas praias ao norte da estação N1 (Praia de Povoação), com praias que apresenta grande variação entre estados morfodinâmicos intermediários e o estado dissipativo. Em contraponto, as praias do sul e a praia de Povoação (7 km ao norte da foz), essas com características de praias refletivas, as variações sazonais não imprimiram mudanças significativas em ômega.

Apesar disso, as praias dos setores discriminados acima apresentaram diferentes repostas morfológicas entre as campanhas.

O perfil da praia extremamente refletiva de Barra do Riacho apresenta alta inclinação da face praial, apresentando berma e cordão frontal também com altas cotas. Apesar da praia ser estreita, o volume de sedimento sobre o perfil é comparativamente alto, com o estoque de sedimento associado ao bom desenvolvimento da berma. A variação temporal do perfil demonstra uma pequena alteração ao longo do período monitorado.

Mais ao norte, na porção central da planície sul, na estação S2, a praia apresenta variações na morfologia do perfil na antepraia rasa, passando pela base da face praial e com menor alteração na berma praial. Nas campanhas de setembro e dezembro de 2018 e abril de 2019 pequenas alterações na configuração da face foram insuficientes para alterar a posição da base da praia. Nesse período, a berma se torna um pouco mais desenvolvida durante a campanha do verão de 2019 (dezembro). Em julho de 2019 a base da face praial sofre uma pequena retração na ordem 4,5m e a porção mais alta do perfil, na base do cordão, apresenta-se escarpada acompanhado da construção de uma berma pouco desenvolvida.

Na Reserva Biológica de Comboios variações na base da face, associada à antepraia rasa, são significativas e altera a configuração do relevo nessa porção da praia. Ao longo do monitoramento o perfil evoluiu com uma leve progradação da face e com configuração concava entre a inverno de 2018 e o verão de 2018. A partir daí a face praial retrai em 4,7 m em abril de 2019 em julho o aplainamento da berma sugere o alcance máximo do espraiamento atuando na porção mais alta da praia.

Em Povoação a praia ao longo do monitoramento experimentou uma grande alteração na sua morfologia desde a parte inferior da praia, junto a base da face, até as porções mais elevadas do perfil, no cordão arenoso frontal. A base da face progradiu na ordem de 11m entre setembro de 2018 a julho de 2019. Apesar da progradação da face praial ocorre simultaneamente a remoção do cordão frontal, o que indica o processo erosivo na estação durante o período de monitoramento.

Em Degredo a praia evoluiu para uma retração total da face praial desde a base até a parte superior. O perfil em julho de 2019, apresenta morfologia convexa e ausência de berma, associada a uma retração em 9m da base da face. É possível notar ainda a morfologia escarpada abaixo da duna frontal que reforça a ocorrência de evento mais energético no período que antecedeu a campanha de julho de 2019. Nas campanhas anteriores o perfil sofreu pouca variação, ocorrendo apenas em abril de 2019 o início da retração verificada em julho de 2019.

A praia de Pontal de Ipiranga (N3) experimentou as maiores variações no relevo. As alterações ocorreram desde a antepraia rasa, com retração com a progradação da base da face praial atingindo até 45m, até a alteração da morfologia da berma na porção superior da praia. Entre as campanhas de setembro e dezembro de 2018, a alteração do perfil ficou restrita a pequenas alterações na morfologia da berma e na base da face. Em abril de 2019 a berma sofre maior desestabilização e a base da face praial avança rumo ao mar 45m em relação as campanhas anteriores. Já em julho de 2019 as alterações na morfologia se intensificam e a base da duna frontal sofre erosão, ocorre o desenvolvimento da berma praial e a maior retração da face dentre as campanhas de amostragem.

Na estação N4, em Barra Nova, nas campanhas de setembro e dezembro de 2018, a praia apresenta uma berma pouco desenvolvida junto à duna frontal, e a base da face com morfologia aplainada. Em abril de 2019 a berma fica mais alta e bem desenvolvida, enquanto que a base da face fica mais inclinada. Em julho de 2019 a berma retrai sugerindo a ocorrência de processos hidrodinâmicos mais energéticos no período anterior a campanha.

Em Guriri (estação N5), no extremo norte da planície, as alterações na morfologia do perfil são mais significantes na base da face, na porção superior do perfil, na berma praial, a poucas alterações ocorreram ao longo do monitoramento. Em abril de 2019 a base da face sofre uma significativa erosão que determinou a formação de uma larga calha. Em julho de 2019 a calha na base da face fica menos desenvolvida e a face toma uma configuração convexa.

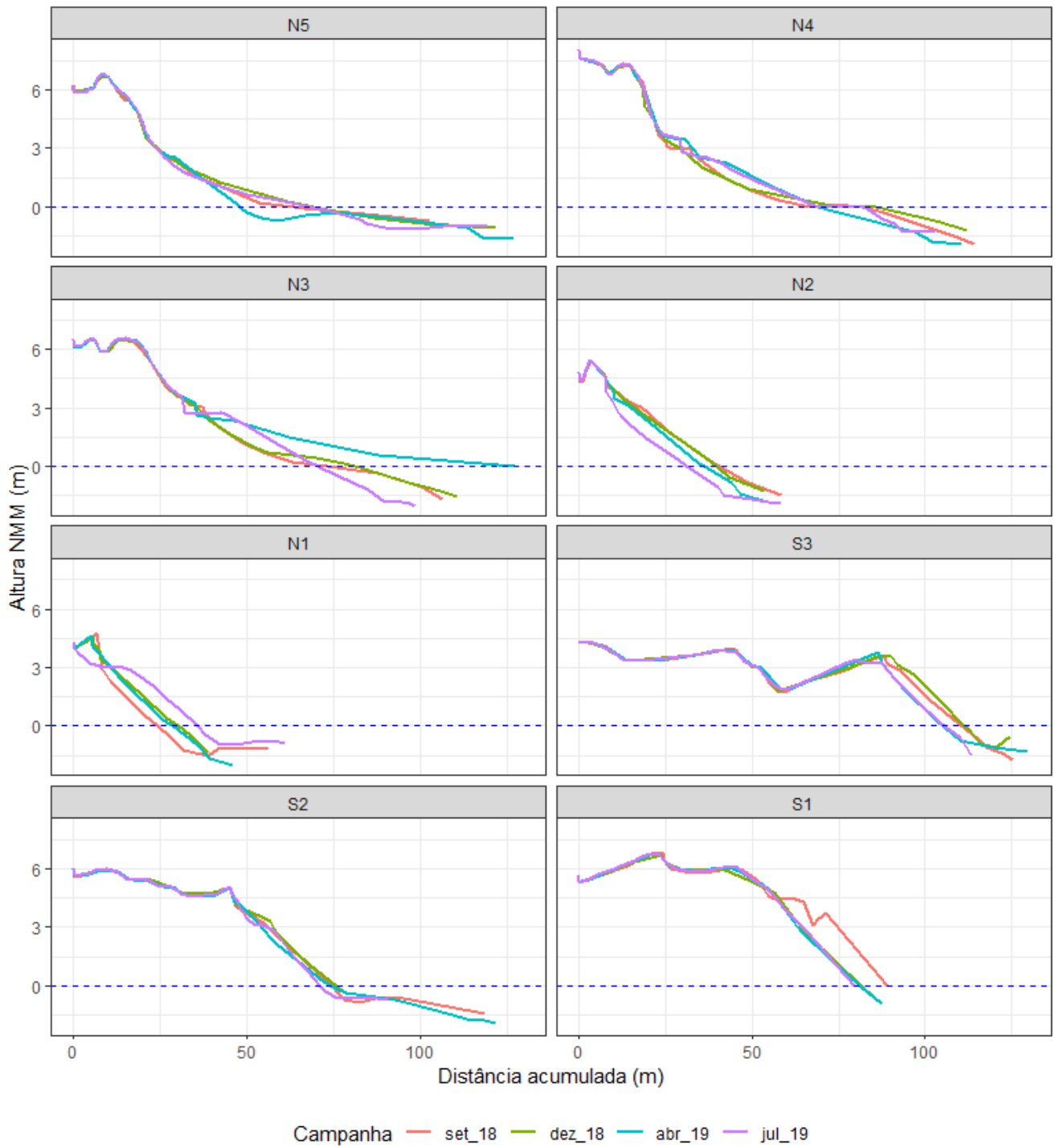


Figura 13: Perfis de praia das estações analisadas. Os perfis foram plotados em diferentes escalas dada a grande variação morfológica entre as praias

4 DISCUSSÃO

4.1 Variação intramostral das espécies de minerais pesados

A análise da composição intramostral permitiu verificar a triagem dos minerais de uma mesma amostra nas diferentes frações de areia. Na análise foi utilizada para comparação minerais com concentrações significativas no sedimento e com densidades contrastantes. Com isso, para o anfibólio, turmalina, zircão e os minerais opacos foram construídas curvas de frequência de concentração nas frações de areias grossas, médias, finas e muito finas, entre 1Φ e 4Φ .

De maneira geral, os grãos mais densos, como o zircão e os opacos tenderam a apresentar pico de ocorrência na granulometria de areias muito finas, com a média da curva de frequência próxima a 4Φ . A concentração de minerais mais densos na fração mais fina e os menos densos e os minerais de quartzo na fração mais grossa é esperado, uma vez que grãos mais densos apresentam velocidade de decantação igual a sedimentos mais grossos de menor densidade (RUBEY, 1933). No entanto, as curvas de frequência dos minerais analisados se deslocam, apresentando picos ora mais próximo da distribuição ora mais distante sugerindo a ocorrência de outros mecanismos de seleção dos minerais (FORCE e STONE, 1990).

Na Figura 14 é possível notar que nas amostras ao norte da planície (Figura 15a), a distribuição granulométrica dos diferentes minerais apresenta curvas com picos mais evidentes enquanto ao sul da planície, as curvas apresentam distribuição mais espaçadas e bimodais, indicando que a matriz de minerais pesados nesse setor apresenta maior amplitude de tamanhos possíveis de ocorrência. A proximidade ou não com a área fonte e o tempo do sedimento em transporte são provavelmente as responsáveis por essa diferenciação na distribuição dos minerais. As amostras mais próximas à desembocadura estão submetidas ao aporte contínuo de todas as frações granulométricas, enquanto as estações no extremo norte da planície, no sentido da corrente longitudinal preferencial, apresentam sedimentos com distribuição granulométrica mais bem definida e unimodal, decorrente da seleção dos minerais promovida pela corrente longitudinal (OLIVEIRA et al, 2015) ao longo dos mais de 100km da planície norte da foz do rio Doce.

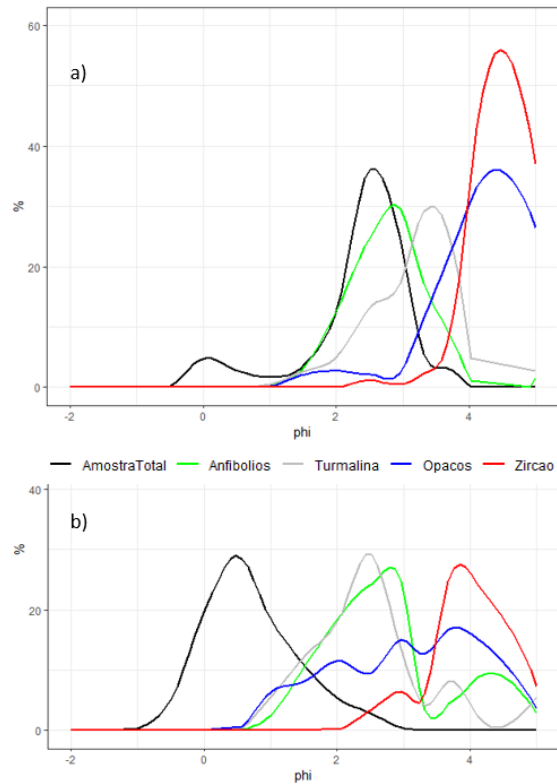


Figura 14: Curvas de frequência das distribuições granulométricas da amostra total e as distribuições intra-amostral dos anfíbolios, turmalinas, minerais opacos e zircões em dois diferentes setores da planície. (a) Setor Norte, representado pelas estações N3, N4 e N5 e (b) Setor Sul, representado pelas amostras das estações S2 e S3.

Komar e Wang (1984) sugerem que a seleção dos grãos na costa do rio Oregon se dá durante o momento que o grão é posto em movimento, quando grãos mais grossos são mais facilmente colocados em suspensão e transportados, quando comparado com grão de granulometria menor e de mesma densidade. O início do movimento do grão em um leito se dá entre o balanço da força exercida pelo fluxo e a resistência do grão. A partir desse conceito, a formulação teórica sugere que quanto maior o ângulo pivotante mais fácil o grão é colocado em movimento. O ângulo pivotante é dado entre a linha vertical que passa pelo centro do grão e o ponto de contato do grão com o grão no leito abaixo. Os grãos mais grossos, apresentam menor ângulo pivotante, logo a força requerida para colocá-lo em movimento é menor que outro grão de mesma densidade, mas de tamanho menor. Além disso, as velocidades mais altas na parte superior do escoamento atuam mais intensamente nos grãos maiores, ao passo que os grãos menores são submetidos a velocidades menores do fluxo (SLINGERLAND, 1984; KOMAR e WANG, 1984; LI e KOMAR, 1992).

No caso do zircão o pico da curva de frequência nas granulometrias mais finas é mais evidente, com a abundância desses minerais associada à fração de areia

muito fina. Os opacos apesar de tenderem a se concentrar em frações mais finas, apresentam curvas de distribuição mais achatada e sem pico evidente de concentração, e ainda com ocorrência de distribuições bimodais. A inclusão de diversos minerais na classificação como opacos implica em abranger uma variedade de grãos com densidades diferentes, com os minerais opacos se espalhando ao longo das diversas frações granulométricas, provocando, com isso, o achatamento da curva de frequência. A ilmenita, hematita e a goetita, minerais opacos nos depósitos por exemplo, apresentam densidades que podem variar entre $3,5\text{g/cm}^3$ para as goetitas e o máximo de $5,2\text{g/cm}^3$, para as hematitas.

Os anfibólios, com densidades mais baixas que o zircão e os minerais opacos, apresentaram curva de frequência variando entre as areias médias e finas, entre 1Φ e 3Φ . A característica da curva de frequência indica a distribuição significativa dos anfibólios por toda a faixa granulométrica analisada. Apesar da maior densidade dos anfibólios em relação ao quartzo ($3,2\text{g/cm}^3$ e $2,65\text{g/cm}^3$, respectivamente), nas areias finas ao norte da foz, as curvas de frequência desses minerais se sobrepõem às curvas da amostra total, sugerindo que o mecanismo responsável pela deposição da matriz quartzosa atue de forma semelhante na deposição dos anfibólios. Ao sul da foz, nas praias composta de sedimentos mais grossos, a curva de concentração dos anfibólios tende a se distanciar da fração total da amostra, com picos associado às frações de areias finas.

4.2 Transporte longitudinal e o impacto na morfologia das praias e na matriz mineralógica

Os deltas costeiros são caracterizados pela elevada carga fluvial para a costa, onde posteriormente o material é transportado e redistribuído para as praias adjacentes à foz do rio. As amostras coletadas na calha do rio Doce 10kmà montante da foz, representam possivelmente a carga de fundo transportada pelo fluxo fluvial e que disponibiliza ao sistema costeiro os detritos erodidos ao longo da bacia de drenagem (FISHER, 1969; BACCOLI, 1971 e MORTON e HALLSWORTH, 1999). Pelas análises estatísticas as areias fluviais foram classificadas como areias médias e grossas, mal selecionadas e com assimetria muito negativa, que indica uma contribuição de material grosso na carga do rio. A concentração máxima em massa de minerais pesados para essas amostras representou em média 7% da matriz quartzosa. Dentre esses minerais os anfibólios, os minerais opacos, as silimanitas, cianitas e zircões apresentaram concentrações mais expressivas (Figura 9).

Os sedimentos carregados pelo rio assim que disponibilizados para a costa são depositados nas praias mais próximas à desembocadura (ABÍLIO, et al, 2007; ALBINO E SUGUIO, 2010). Das extremidades da planície (norte e sul) em direção à foz é possível observar uma tendência de empobrecimento no grau de seleção das amostras, com as amostras das extremidades sul e norte apresentando os melhores graus de seleção, de bem selecionados a muito bem selecionados, e as praias próximas à desembocadura sendo classificadas como moderadamente bem selecionadas (Figura 6). É possível atribuir, o melhor grau de seleção nas amostras mais afastadas da área fonte (desembocadura fluvial) como o efeito do maior tempo que o sedimento fica sob a ação da triagem provocada pela corrente da deriva longitudinal, enquanto que as praias próximas à desembocadura são constantemente enriquecidas por sedimentos mal selecionados fornecidos pelo rio e que permanecem tempo insuficiente no fluxo para serem selecionados. (McLAREN, 1981; McLAREN e BOWELS, 1985)

O balanço entre o transporte de sedimento rumo ao norte, causado pela entrada de ondas mais altas e períodos maiores do quadrante sul-sudeste, e o transporte rumo ao sul gerado pelas ondas de leste e nordeste de alturas e períodos menos significativos, resultam em uma maior competência do transporte rumo ao norte. (BITTENCOURT et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2015). Tomando como o extremo sul da planície como a origem da corrente longitudinal e o extremo norte o final da corrente é possível observar a tendência de diminuição na granulometria média no sentido da corrente resultante. O sedimento mais fino é mais facilmente remobilizado e preferencialmente transportado pelas correntes longitudinais para a extremidade norte da planície, enquanto o sedimento grosso é deixado para trás. (McLaren, 1981; McLaren e BOWLES, 1985).

Ao sul da foz, no setor de menor desenvolvimento da faixa arenosa da planície costeira do rio Doce, a praia de Barra do Riacho é composta por areia muito grossa (inferior a 0Φ), com contribuição significativa de grânulos nas campanhas de setembro de 2018 e dezembro de 2018, representando 23% e 7%, respectivamente. Entre a porção central da planície sul (estação S2) e a estação N1 as areias são classificadas essencialmente como areias grossas, com exceção da praia de Povoação, a 7km da foz, que eventualmente apresentou granulometria na fração areia muito grossa, em decorrência da proximidade com o aporte fluvial. Ao norte de Povoação a redução gradual na granulometria (aumento de Φ) é mais evidente. Na praia de Degredo (N2) a granulometria média das areias são entre 1Φ e 2Φ (areias médias), enquanto as praias mais ao norte, no setor entre a praia de Pontal do Ipiranga e a praia de Guriri, com areia de granulometria média entre 2Φ e 3Φ (areias finas).

A corrente longitudinal e os sedimentos redistribuídos por ela imprimem também uma gradação nos parâmetros morfológicos e morfodinâmicos ao longo da planície. Ao sul da planície e na Praia de Povoação, ao norte, os sedimentos

grossos e muito grossos são responsáveis por gerar perfis inclinados, com bermas relativamente altas em relação ao nível do mar e cordões frontais vegetados formados pela deposição do espraiamento máximo da onda sobre face. No sedimento formado por grãos grossos e mal selecionados, o espaço intersticial é maior o que acarreta uma maior infiltração da água durante o espraiamento da onda sobre a face (BASCOM, 1951; DEAN, 1973; MASSELINK e LI, 2001). A infiltração da água resulta na redução do potencial erosivo do espraiamento durante o retorno da água, sendo assim, a competência no transporte de sedimento no fluxo de subida da onda é superior ao de retorno da água, gerando um transporte resultante ascendente sobre a face, responsável por gerar o acúmulo de sedimento na berma praial e imprimir à face maior inclinação (BASCOM, 1951). Em contrapartida, nas praias de sedimento mais fino ao norte da planície, o espaço intersticial é menor o que diminui a infiltração da água durante a atuação do espraiamento. A água que não infiltra é acumulada na zona de espraiamento e um novo espraiamento chega antes do retorno do anterior. O acúmulo da água na face aumenta a competência de transporte no fluxo de retorno. Essa característica determina a construção de perfis mais planos, com bermas relativamente baixas, além da elevação de dunas frontais em contos de até 7m, formadas pela ação do vento sobre o sedimento fino durante a baixa-mar. A relação estabelecida dentre a inclinação da face praial e a granulometria do sedimento segue na Figura 15.

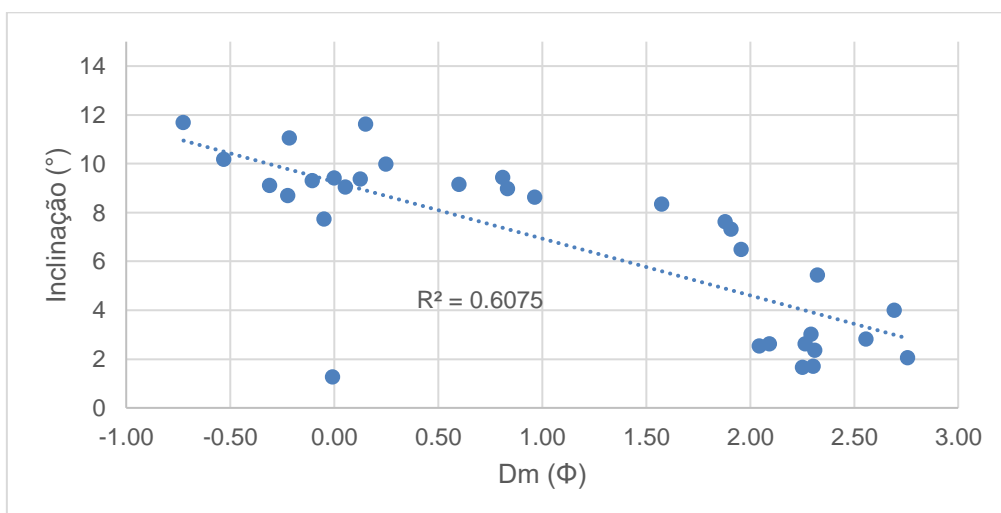


Figura 15: Correlação gráfica entre declividade da praia em graus e a granulometria média em phi.

Com o padrão da distribuição longitudinal, a concentração de minerais pesados tende a ser enriquecida na porção norte do rio. A regressão linear entre a granulometria média do sedimento e o teor de minerais pesados nas amostras analisadas (Figura 16) permite verificar o aumento no teor de minerais pesados

nas praias de areia média e principalmente nas praias de areias finas, ao passo que, concentrações inferiores a 1% estão associadas às praias de areia grossa a muito grossas ao sul. Esta mesma relação entre granulometria e teor de minerais pesados foi encontrado por Frihy e Komar (1993) nas praias do delta do rio Nilo, explicado pelo movimento de espraiamento da onda que preferencialmente arrasta e transporta minerais leves de maior densidade e deixam como rastro minerais de granulometria mais fina e de densidades superiores (KOMAR e WANG, 1984; LI e KOMAR,1991).

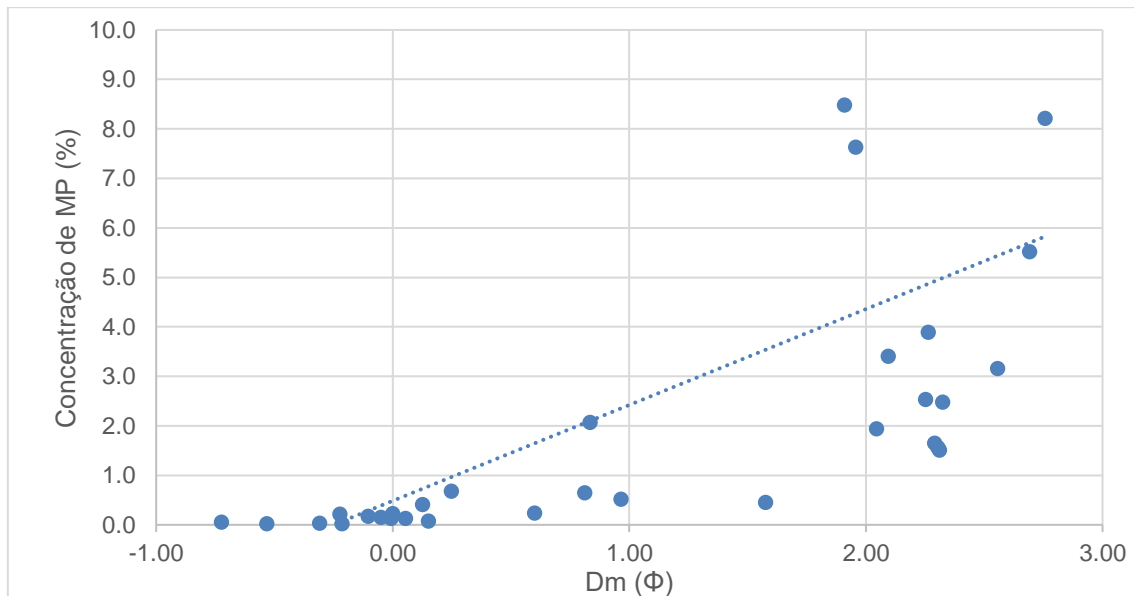


Figura 16: Relação entre a concentração de minerais pesados (%) e o diâmetro médio do grão (phi) das amostras da face praial. As praias ao norte da planície deltaica do rio constituída por areias muito finas apresentam maior enriquecimento na matriz de minerais pesados. Já as praias ao sul, formadas por sedimentos

No extremo sul da foz do rio Doce, na praia da Barra do Riacho, a concentração de minerais pesados é baixa, apresentando teores sempre inferiores a 0,1%. Nas demais praias ao sul do rio Doce e na estação de Povoação (N1, 7 km ao norte da foz), o sedimento ainda apresenta concentrações baixas, porém superiores a 0,1%. Nas praias ao norte de areias mais finas, o enriquecimento da matriz quartzosa é mais efetivo, com concentrações acima de 1% Em Degredo (Estação N2), ao norte da foz, na campanha de julho de 2019, os minerais pesados apresentaram concentração próxima a 25% em relação à amostra total, sugerindo a ocorrência de processos mais energéticos que atuaram na remoção de minerais mais leves e concentrando minerais mais densos (LI e KOMAR, 1992). A análise da morfologia do perfil permite identificar que, associado ao enriquecimento por minerais pesados na praia de Degredo no inverno de 2019, a face praial apresentou um recuo de aproximadamente 10 m e uma morfologia mais convexa em relação ao início do monitoramento. A

estação de Degredo está localizada próximo ao esporão formado a aproximadamente 40km ao norte da foz; essa estrutura geomorfológica alinha-se obliquamente às ondas de sul. Essa configuração favorece a amplificação do efeito da corrente longitudinal nesse setor, sendo responsável pelo alongamento dessa feição. A intensificação dos vetores da corrente rumo ao norte nesse setor pode ser a responsável pelo processo erosivo verificado nessa estação, logo, também responsável pelo enriquecimento por minerais pesados na face praial desse setor (RAO, 1957).

Em relação à abundância relativa das espécies de minerais pesados, os anfibólios e os minerais opacos são os minerais que mais foram encontrados no total das amostras analisadas, tanto nas areias fluviais como nas da face praial. Os anfibólios são o grupo de minerais pesados auxiliares que são encontrados em concentrações elevadas nas rochas menos densas do manto superior (MANGE e WRIGHT, 2007; GARZANTI, 2019). Os minerais opacos são representados pelos minerais ricos em ferro, como a ilmenita e a magnetita, e assim como os anfibólios são encontrados em abundância nas rochas fontes que compõem a bacia de drenagem do rio Doce. Os demais minerais – turmalina, rutilo, epidoto, estaurolita, granada, monazita – são encontrados em proporções menores, em concentrações médias inferiores a 5%. Sendo a carga do rio Doce a principal contribuinte de sedimento para as praias deltaicas, a matriz de minerais pesados das praias mantém forte relação com a matriz fluvial, em maior ou menor grau a depender da estação.

O agrupamento derivado da análise de cluster, a partir dos dados de abundância relativa dos minerais pesados, permitiu identificar o isolamento da estação S1 das demais em duas campanhas amostrais (Figura 17). Essa separação se dá principalmente pelo predomínio de minerais de zircão durante as campanhas de setembro e dezembro de 2018, quando a concentração alcançou valores de 77,7% e 57,1%, respectivamente. A turmalina também estabelece relação com essa estação e a contribuição desses dois minerais (zircão e turmalina) eleva o índice ZTR médio desse trecho da praia para 47%, enquanto nas demais estações o índice médio é inferior 10%. O índice ZTR estabelece, em certo ponto, relação com a maturidade em sedimentos inconsolidados, uma vez que representa a soma das concentrações de minerais translúcidos ultra-estáveis da amostra (HUBERT, 1962). A maturidade expressa o tempo em que o sedimento de determinado depósito permaneceu no fluxo, submetido à abrasão física e ao intemperismo químico (GARZANTI, 2017). Portanto, na estação S1, em função do elevado índice ZTR, é possível estabelecer que a estabilidade mineral, tanto quanto a densidade dos grãos, assumem papel importante no mecanismo de triagem dos grãos nesse setor da praia.

Desconsiderando a estação S1, a análise do agrupamento permite uma nova subdivisão da área de estudo baseado na mineralogia (Figura 17). A região

compreendida entre as estações que se encontram geograficamente circundando a foz do rio Doce, entre a porção mediana sul da planície (estação S2) até a estação N2 (ao norte da foz), as amostras apresentam maior similaridade entre si e com as amostras fluviais coletadas na calha do rio. As estações N3, N4 e N5, mais distante da foz, no extremo norte da planície, se agrupam separadamente das demais estações.

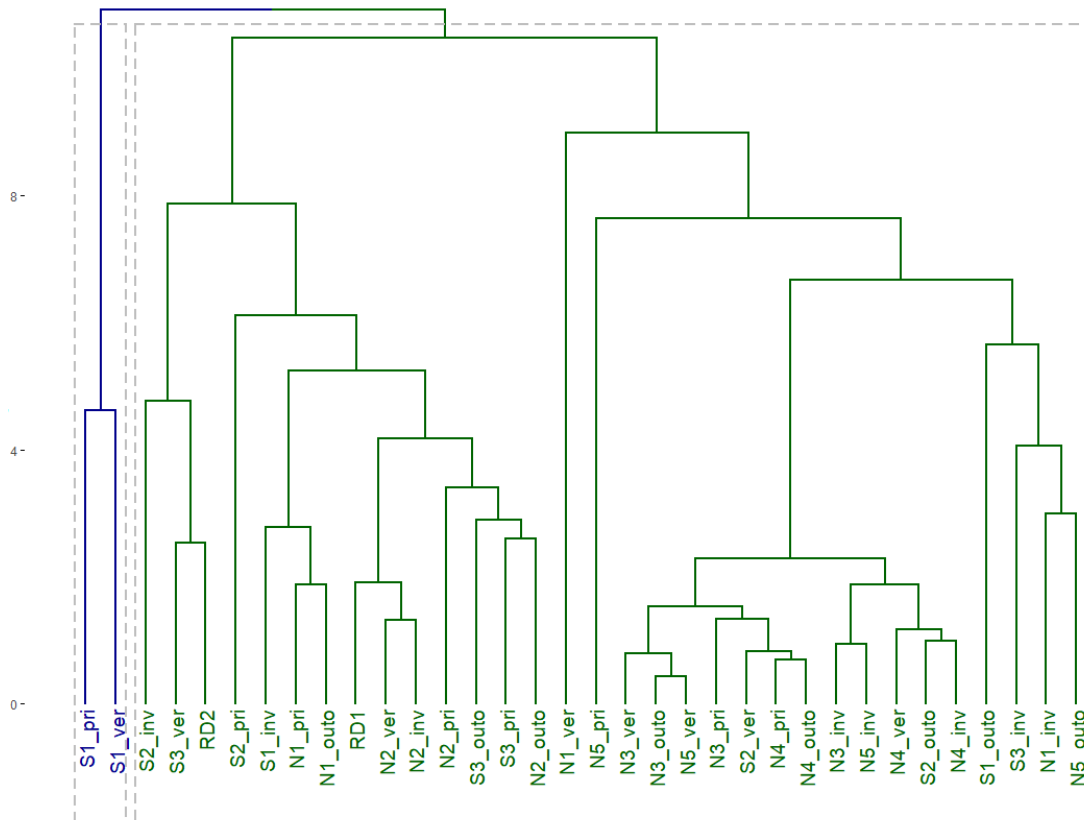


Figura 17: Análise de *cluster* na obtenção da similaridade entre as amostras estabelecida a partir da abundância relativa entre as espécies de minerais pesados. As amostras da estação S1 se agrupam em (a) estações fluviais e estações do setor sul (entre as estações S1 e N2). Em (b) setor norte (estações N3, N4 e N5).

A técnica estatística de PCA utilizada elucidou e contribuiu para a análise da distribuição dos minerais pesados, tendo como área fonte principal o aporte fluvial. A componente principal 1 explica 28,7% das correlações, enquanto a componente principal 2 explica 20,4% das correlações. Na PCA1 os minerais mais densos, como os opacos, turmalinas, granadas e zircão são os que mais apresentam contribuição para as correlações (superiores a 10%). Na PCA2 os anfibólios seguidos das silimanitas são os minerais com maior contribuição, representando a matriz formada por minerais menos densos (Figura 18).

Geometricamente, na distribuição dos vetores, a PCA1, formada por minerais mais densos, mantém maior correlação com a mineralogia das estações próximas à foz (Setor Sul), mas principalmente na praia de Degredo, onde foi possível identificar o recuo sucessivo da face praiar e que refletiu no enriquecimento de minerais pesados (ROY, 1957; LI e KOMAR, 1992). Essa estação se isola das demais pelo enriquecimento por minerais mais densos, principalmente minerais opacos, zircões, turmalinas e granadas. Resultados semelhantes foram encontrados por Komar e Wang (1984) e por Li e Komar (1992), onde minerais mais densos são encontrados em praias em processo de erosão, enquanto que minerais menos densos, principalmente os anfibólios, e o quartzo são transportados para áreas de acreção da costa.

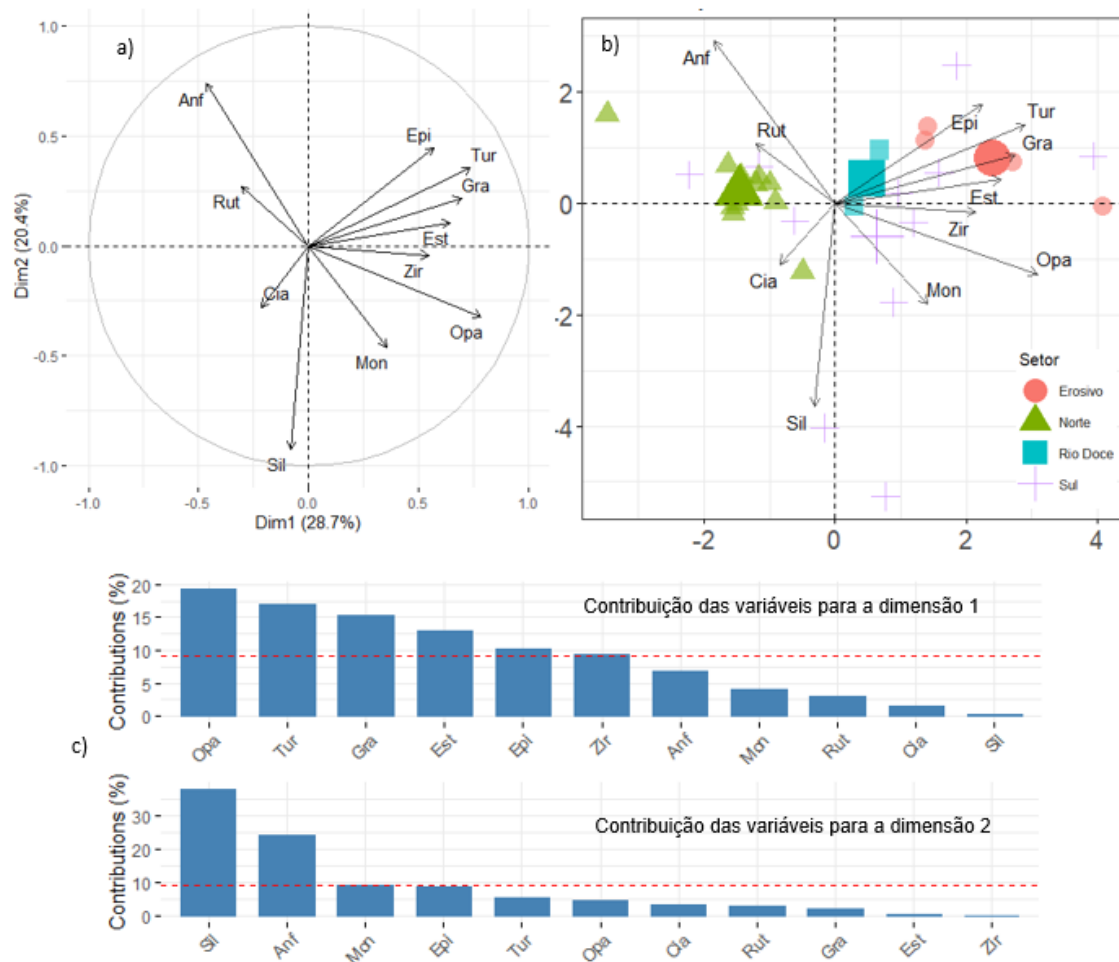


Figura 18: Resultado da análise multivariada das componentes principais dos teores das diferentes espécies de minerais pesados (a) e a disposição geométrica das amostras (b) segregadas nos setores: Erosivo (estação N2), setor Norte (estações N3, N4 e N5), setor Sul (estação S2, S3 e N1) e setor rio Doce, representado pelas amostras fluviais RD1 E RD2. Em (c) seguem as contribuições das variáveis analisadas para as dimensões 1 e 2.

A associação, apesar de fraca, existente entre a estação fluvial e as demais estações do setor sul demonstra a contribuição do aporte fluvial para as praias mais próximas à foz. Além disso, na PCA, os pontos representantes deste setor encontram-se distribuídos por toda a área do plano cartesiano, indicando a maior variabilidade temporal da mineralogia para esse trecho da praia. Para o setor norte, os pontos ficam mais agrupados, indicando menor variabilidade temporal e espacial.

Na PCA2, com maior contribuição dos minerais menos densos, está associada às estações ao norte da foz. Essa relação é mais bem explicada pela contribuição dos anfibólios, que dentre os minerais pesados analisados apresentam a menor densidade. As concentrações desses minerais estabelecem correlação inversa com os minerais mais densos, principalmente os minerais opacos. A resultante do transporte longitudinal rumo ao norte, portanto estabelece relação com as espécies minerológicas, de forma que transporta principalmente os minerais menos densos (principalmente os anfibólios) no sentido da corrente preferencial e os depositam no extremo norte da planície, deixando para trás, ao sul, minerais mais densos.

4.3 Morfodinâmica e mobilidade sazonal das praias e a assembleia de minerais pesados na planície do delta do rio Doce

A distribuição espacial granulométrica e as abundâncias relativas entre os minerais pesados ao longo das praias da planície do rio Doce explicam, de forma geral, a morfologia da planície e os processos morfodinâmicos atuantes em larga escala, determinados principalmente pelo transporte resultante da corrente longitudinal. No entanto, a variação diária de maré e/ou a incidência de eventos mais energéticos ao ambiente costeiro, que provocam a intensificação da altura e período de onda, promovem variações de curta duração na deposição de sedimentos, relacionados às trocas de sedimento decorrentes do transporte transversal à costa (CASCALHO E TABORDA, 2014). Nesse sentido, a abordagem proposta aqui nesta sessão considera que as variações sazonais na morfologia e na sedimentologia das praias durante o período de um ano de monitoramento são decorrentes das trocas transversais à costa, como resposta das alterações provocadas entre as alternâncias entre tempo bom, durante o verão, e a chegada de eventos mais energéticos durante o inverno (DEAN, 1973).

Durante o monitoramento, no inverno de 2019, por exemplo, a estação N2 sofre o maior enriquecimento por minerais pesados durante o monitoramento. A concentração de minerais pesados alcançou valor superior a 20% da matriz

quartzosa, formando depósitos laminares sobre a face (Figura 19). Nesse mesmo período foi possível constatar a erosão da face praial em aproximadamente 10 m, comprovando a intensificação do espraiamento da onda sobre a face praial atuando na remoção dos minerais de quartzo e retraindo a face praial (RAO, 1933). A abundância relativa de minerais pesados nessa estação também se distingue das demais, já que a presença de minerais de maior densidade, como os opacos, zircões, granadas e monazitas tendem a ser mais expressivas (Figura 18). Logo, os processos responsáveis pela matriz mineralógica, tanto em relação à concentração de minerais pesados, quanto pela abundância relativa das diferentes espécies minerais, são resultado das alterações ocorridas na energia de ondas e a interação com a costa, responsável pela distinção dessa estação das demais (JOEVIVEK e CHANDRASEKAR, 2014). A ocorrência de tempestade tropical Iba durante monitoramento e a exposição da praia às frentes vindas de sul intensificam o regime de espraiamento da onda sobre a face o que promove a erosão (Figura 19).



Figura 19: Perfil praial erosivo na estação N2 e enriquecimento por minerais pesados na face praial (Julho 2019).

O setor entre as estações N1 e N2, como mostrado na Figura 20, é o que apresenta maior atuação do espraiamento sobre face com *run-up* atingindo as maiores cotas altimétricas entre as estações estudadas, com a ocorrência de eventos capazes de transpor a berma praial em quase todo o período monitorado. A estação N1 também apresentou retração na face praial durante o

monitoramento, mas com recuperação do volume praiar na última campanha, não sendo suficiente para alterar as concentrações de minerais pesados na face da praia. Por outro lado, a exposição do setor compreendido entre as estações S2 e N2, composta por grãos médios a grossos, apresentam maior alteração na morfologia. Os perfis revelam a presença de bancos e calhas na antepraia que por vez são incorporados à face praiar, sugerindo a atuação das trocas transversais afetando a morfologia e a mineralogia das praias.

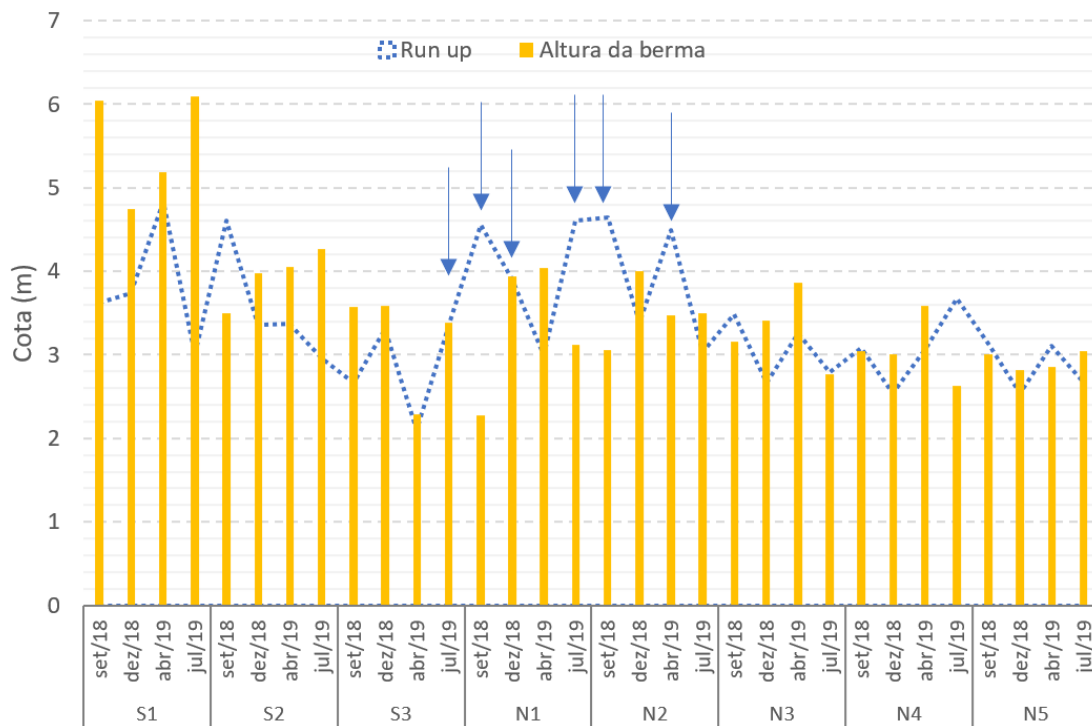


Figura 20: Run-up modelado e altura da berma para cada estação ao longo do período monitorado, indicando o potencial de inundação da praia.

A análise da matriz de sedimentos ao longo do tempo indica que a predominância de anfibólitos (densidade 3,20 g/cm³,) é alterada por outros minerais, principalmente a silimanita com densidade superior e de 3,60 g/cm³. Minerais com densidades superiores a 4,00g/cm³, como a granada, o zircão e a monazita também apresentam contribuição mais significativa que as praias no extremo norte da foz. A alternância de predominância dos minerais na face das praias desse setor pode estar relacionando a maior proximidade com a área fonte, o que determina na variação mineralógica em função da sazonalidade do aporte fluvial, entre os regimes de seca e enchente (COELHO, 2007). Além disso, essas praias apresentam zonas de surfe comparativamente mais estreitas com ondas variando de mergulhantes a colapsantes e alcançam a base da face praiar com maiores alturas. O fluxo de ascensão do espraiamento sobre a face

é turbulento e capaz de colocar grande quantidade de material em suspensão (FORCE, 1991). A perda de energia de onda durante a subida da face praial íngreme e a infiltração da água no sedimento permeável é responsável pela diminuição do fluxo de retorno da onda, tornando-o laminar. O fluxo turbulento presente na base da face praial de praias refletivas favorece a seleção dos minerais a partir da velocidade de decantação e acompanhando o princípio da equivalência hidráulica, enquanto que o retorno laminar do refluxo favorece a seleção por arrasto seletivo (HUGHES, 2006). Nesse sentido, entre o equilíbrio dos processos de seleção existentes nestas praias, dada a natureza turbulenta do fluxo na base da face praial, os anfibólitos são colocados mais facilmente em suspensão, permanece mais tempo na coluna d'água, já que apresentam menores velocidades de decantação, e são mais facilmente transportados, diminuindo sua predominância sazonal no setor. Os minerais mais densos, por sua vez, são preferencialmente depositados.

As praias intermediárias a dissipativas e de baixa declividade no extremo norte da planície, por outro lado, apresentam menores variações sazonais em sua morfologia. Em função da elevação suave do assoalho marinho entre a antepraia e a face, as ondas apresentam arrebentações do tipo deslizantes que quebram longe da costa e percorrem uma longa zona de surfe (WRIGHT e SHORT, 1984; WRIGHT *et al.*, 1985). A longa distância percorrida pela onda garante que parte da energia seja dissipada e as ondas se aproximam da zona de espraiamento com baixas alturas e percorrem longas distancias em um fluxo laminar de baixa velocidade (HUGHES, 2000; KOMAR e WANG, 1984). Nessas praias é comum que uma nova onda chegue à face praial antes do refluxo da onda anterior, o que promove um saturamento de água na face, imprimido ao fluxo uma característica laminar (KEMP e PLINTON, 1968; MUEHE, 1998). Essa característica hidrodinâmica do fluxo favorece o predomínio da seleção dos minerais por arrasto seletivo (KOMAR e WANG, 1986; HUGHES, 2006), uma vez que pouco material é posto em suspensão e o transporte se restringe a pequenas camadas do sedimento. Os anfibólitos de menor densidade são transportados pela corrente longitudinal resultante para norte e são preferencialmente depositados nessas praias. A predominância de anfibólitos e a estabilidade entre as abundancias relativas dos minerais indica que as variações sazonais nos parâmetros metaoceanograficos e morfológicos pouco afetam a matriz de minerais pesados, em decorrência das menores trocas transversais.

5 CONCLUSÃO

A análise granulométrica e as estatísticas dos dados de minerais pesados se mostram como uma importante ferramenta para a interpretação dos processos

relacionados ao aporte fluvial e a redistribuição de sedimentos nas praias do delta do rio Doce.

A análise por PCA e o agrupamento em *cluster* foram eficientes métodos para a associação de multivariáveis mineralógicas. Com esses testes foi possível estabelecer a similaridade entre as amostras analisadas e, através disso, reconhecer os processos de transporte atuantes entre as estações.

Minerais opacos, anfibólios, silimanitas, cianitas, zircões e turmalinas são as espécies de minerais pesados com maior representatividade nas amostras analisadas. A diferença espacial na abundância relativa desses minerais estabelece relação com a corrente longitudinal resultante no sentido sul/norte, uma vez que os minerais menos densos, representados principalmente pelos anfibólios, são mais facilmente mobilizados e transportados sendo depositados nas praias no extremo norte da planície. As estações mais próximas à desembocadura fluvial, ao contrário, ficam menos enriquecidas por minerais menos densos e há um acúmulo de minerais de maior densidade. No extremo sul da planície, onde os processos não apontam o aporte atual do rio, o enriquecimento por minerais pesados mantém relação com a estabilidade, uma vez que a praia apresentou índice ZTR superior a 75%, característico de depósitos maduros.

As respostas morfológicas e sedimentológicas às variações sazonais atuaram de maneira diferente em cada tipo de praia. As praias de baixa declividade e granulometria fina apresentaram menor mobilidade ao longo do tempo, o que indica que as alterações morfológicas não foram suficientes para alterar significativamente a abundância entre os minerais. Isso sugere uma maior importância da deriva longitudinal em relação às trocas transversais no enriquecimento de minerais.

Por outro lado, em porções erosivas e em praias compostas por areias médias e grossas, com alta declividade e expostas às ondas mais energéticas, as trocas transversais à costa são mais efetivas e alteram a matriz mineralógica ao longo do tempo. Outro fator que ainda influencia a alteração na mineralógica durante o monitoramento é a proximidade com a boca do rio, estando o setor sujeito às variações, entre as estações de secas e chuvosas, na carga sedimentar aportada à costa.

A análise da distribuição dos minerais pesados em uma faixa ampla granulométrica se mostra como um método que garante uma estimativa mais correta da abundância entre os minerais, já que os minerais menos densos são depositados junto a minerais mais densos de granulometrias menores. No presente estudo, por exemplo, é possível notar a ocorrência de zircões e minerais opacos, de alta densidade, mais expressivamente nas faixas granulométricas de areia finas a muito finas, enquanto que a distribuição modal

das areias está na faixa de areia grossas e médias. A análise de uma amplitude granulométrica menor e próximo à distribuição unimodal poderia implicar em uma subestimação dos valores dos minerais mais densos.

A relação acima descrita, sobre tamanho e densidade dos grãos, se apoia na lei da equivalência hidráulica de Rubey (1933), que apesar de explicar de forma geral a abundância relativa entre os minerais num depósito sedimentar, desconsidera o efeito da natureza do fluxo sobre a seleção ou a variação nas formas dos grãos.

O espraiamento sobre a face praial, assim como a natureza do fluxo da onda ao se aproximar da costa, e a característica dinâmica da zona de surfe interferem na seleção dos minerais. Nesse sentido, a caracterização da morfologia da praia, através do levantamento topográfico do perfil, e a modelagem do espraiamento máximo da onda (*run-up*), se apresenta como uma importante ferramenta na descrição da atuação do fluxo na deposição de minerais. O recuo na face praial apresentou correlação com os teores de minerais pesados, tanto elevando o teor médio de minerais pesados em relação à amostra total, como na alteração na abundância relativa entre as espécies de minerais pesados, deste que a praia tenha a tendência de enriquecimento por minerais mais densos.

6 REFERÊNCIA

- ADDAD, J. E. 2017. Minerais pesados: Uma Ferramenta Para Prospecção, Proveniência, Paleogeografia e Análise Ambiental.
- ALBINO, J. 1999. Processos de sedimentação atual e morfodinâmica das praias de Bicanga à Povoação, ES. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.
- ALBINO, J.; KENITIRO S.. 2010. "Sedimentation Processes and Beach Morphodynamics Active at the Doce River Mouth , Espírito Santo State , Brazil." *Annals of the Brazilian Academy of Sciences* ISSN 0001-3765 82:1031–44.
- ALBINO, J.; GIRARDI, G.; NASCIMENTO, A.K. Atlas de Erosão e Progradação Costeira do Litoral do Espírito Santo. In: Muehe, D. (Org), *Atlas de erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: MMA, 2006, p. 227-264.
- BACOCOLI, G., 1971. Os deltas marinhos holocênicos brasileiros - uma tentativa de classificação. B. téc. Petrobras, Rio de Janeiro, 14 (1/2): 5-38.
- BARNARD, P. L.; VAN ORMONDT, M.; ERIKSON, L. H.; ESHLEMAN, J.; HAPKE, C.; RUGGIERRO, P.; ADAMS, P. N.; FOXGROVER, A. C. Development of the Coastal Storm Modeling System (CoSMoS) for predicting the impact of storms on high-energy active-margin coasts. *Natural Hazards*, v. 74, n. 2, p. 1095-1125, 2014.
- BIGARELLA, J. 1972. Eolian environments their characteristics recognition and importance. *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM) Recognition of Ancient Sedimentary Environments (SP16)*.
- BITTENCOURT, A. C. S. P., DOMINGUEZ, J. M.L., MARTIN, L., SILVA, I R., MEDEIROS K. O. P, 2007. Past and Current Sediment Dispersion Pattern Estimates through Numerical Modeling of Wave Climate : An Example of the Holocene Delta of the Doce River,. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 79(2): 333-341
- BLOTT, S., PYE, K. 2001. Technical Communication Gradistat a Gran Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM) Recognition of Ancient Sedimentary Environments (SP16)*. 1248:1237–48.
- OLIVEIRA, A., T.;; ALBINO, J; VENÂNCIO, I.. 2015. Transporte longitudinal de sedimentos no litoral da planície deltaica do Rio Doce. *Quaternary and Environmental Geosciences*, [S.l.], v. 6, n. 1. ISSN 2176-6142. Disponível

em: <<https://revistas.ufpr.br/abequa/article/view/36738>>.

COSTA, P. J. M., ANDRADE C., CASCALHO J., DAWSON, A. G., FREITAS M. C., PARIS, R., DAWSON, S., 2015. Onshore Tsunami Sediment Transport Mechanisms Inferred from Heavy Mineral Assemblages. *The Holocene* 2015, Vol. 25(5) 795 – 809.

Davis, Donald W.; Williams, Ian S.; Krogh, Thomas E. (2003). Hanchar, J.M.; Hoskin, P.W.O. (eds.). "Historical development of U-Pb geochronology" (PDF). *Zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 53: 145–181. doi:10.2113/0530145.

DALY, R.A., MANGER, G.E., CLARK, S.P., 1966. Density of rocks, Section 4, Handbook of Physical Constants. *Geological Society of America Memoirs*, 19–26

MUEHE, D. 1998 Estado Morfodinâmico praias no instante da observação: uma alternativa de identificação. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 46 (2): p. 157- 169.

DEAN, R. G. Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Proc. Conf. on Engineering Dynamics in the Surf Zone*, Sydney, N.S.W., pp. 208-214. 1973.

DIAS, J. A. A Análise Sedimentar e o Conhecimento dos Sistemas Marinhos – Uma Introdução à Oceanografia Geológica. 2004. *Universidade do Algarve – Faro*. E-book, disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236551412_A_ANALISE_SEDIMENTAR_E_O_CONHECIMENTOS_DOS_SISTEMAS_MARINHOS_Uma_Introducao_a_Oceanografia_Geologica

DILL, H., G., SKODA, R., 2017. Provenance analysis of heavy minerals in beach sands (Falkland Islands/Islas Malvinas) - A view to mineral deposits and the geodynamics of the South Atlantic Ocean. *Journal of South American Earth Sciences* 78 (2017) 17 e 37.

DOMINGUEZ, M. L. J. and BITTENCOURT C. S. P. A.. 2018. Utilização De Padrões De Sedimentação Costeira Como Indicadores Paleoclimáticos Naturais (Proxies). *Revista Brasileira de Geociências* 24(1):3–12.

FOLK, R. L, WARD W, C., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal Sedimentary Petrology* 27(1) p3-27.

FRIHY, O. E., LOTFY, M. F., 1997. Shoreline Changes and Beach-Sand Sorting along the Northern Sinai Coast of Egypt. *Geo-Marine Letters*, 17:140–46.

FRIHY, O. E.; DEWIDAR K. M., 1993. Influence of Shoreline Erosion and Accretion on Texture and Heavy Mineral Compositions of Beach Sands of the Burullus Coast, North-Central Nile Delta, Egypt. *Marine Geology*, 114: 91–104.

FRIHY, OMRAN E., MORAD F. LOTFY, and Paul D. KOMAR. 1995. "Spatial Variations in Heavy Minerals and Patterns of Sediment Sorting along the Nile Delta, Egypt." *Sedimentary Geology* 97(1–2):33–41.

GARZANTI, E.; ANDÒ, S. Plate tectonics and heavy-mineral suites of modern sands. In Heavy Minerals in Use; Mange, M.A., Wright, D.T., Eds.; *Developments in Sedimentology Series*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2007; Volume 58, pp. 741–763.

GARZANTI, E., ANDÒ, S., 2019. Heavy Minerals for Junior Woodchucks. *Minerals*, 9(3), 148; <https://doi.org/10.3390/min9030148>

GARZANTI, E., 2017. The Maturity Myth In Sedimentology and Provenance Analysis. *Journal of Sedimentary Research*; 87 (4): 353–365. doi: <https://doi.org/10.2110/jsr.2017.17>

GARTNER, A., LINNEMANN, U., HOFMANN, M., 2014. The provenance of northern Kalahari Basin sediments and growth history of the southern Congo Craton reconstructed by U–Pb ages of zircons from recent river sands. *Int. J. Earth Sci.* 103 (2), 579–595.

GUEDES, C. C. F., GIANNINI, P. C. F., NASCIMENTO Jr., D. R., SAWAKUCHI, A. O., TANAKA A. P. B., ROSSI, M. G., 2011. Controls of heavy minerals and grain size in a holocene regressive barrier (Ilha Comprida, southeastern Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 31: 110 - 123.

GOLLOWAY, W. E., 1975. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional system. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogist (SEPM), Special Publication*, 31: 127-156.

HUBERT, J.F., 1962. A Zircon-Tourmaline-Rutile Maturity Index and Independence of Composition of Heavy Mineral Assemblages with Gross Composition and Texture of Sandstone. *Journal of Sedimentary Petrology*, 32, 440-450.

JOEVIVEK, V. and N. CHANDRASEKAR. 2014. "Seasonal Impact on Beach Morphology and the Status of Heavy Mineral Deposition – Central Tamil Nadu Coast , India." (1):135–49.

JOSÉ MARIA LANDIM DOMINGUEZ, ABÍLIO CARLOS DA SILVA PINTO BITTENCOURT and e LOUIS MARTIN. 2015. "Esquema Evolutivo Da Sedimentação Quaternária Nas Feições Deltaicas Dos Rios São Francisco (SE/AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba Do Sul (RJ)." (December 1981).

KOMAR P.D., WANG C., 1984. Processes of selective grain transport and the formation of placers on beaches. *Journal of Geology* 92: 637–655

- KOMAR, P. D., 1989. Physical Processes of waves and currents and the formation of marine placers. *Aquatic Sciences*. Volume 1, Issue 3.
- KOMAR, P. D., 1998. Beach processes and sedimentation. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 544 p.
- KOMAR, P.D., 2007. The entrainment, transport and sorting of heavy minerals by waves and currents. In: Mange, M.A., Wright, D.T. (Eds.), Heavy Minerals in Use. *Developments in Sedimentology*
- LI, M.Z., KOMAR, P.D., 1992b. Longshore grain sorting and beach placer formation adjacent to the Columbia River. *Journal of Sedimentary Petrology* 62, 429–441.
- LE MAITRE, R.W., 1982. Numerical Petrology (Statistical Interpretation of Geochemical Data). *Elsevier Science Publishing Company*, Amsterdam, 281pp.
- MANGE, M.A.; MAUER, H.F.W. 1992 Heavy Minerals in Colour; *Chapman and Hall*: London, UK, 147p.
- MATHER, A.; STRETCH, D.; GARLAND, G. Predicting extreme wave run-up on natural beaches for coastal planning and management. *Coastal Engineering*, v. 53, n. 2, p. 87-109, 2011.
- MORTON, A. C.; HALLSWORTH, C. R. 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 124: 3-29.
- MORTON, A.C., HALLSWORTH, C., 2007. Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis. In: Mange, M.A., Wright, D.T. (Eds.), Heavy Minerals in Use. : *Developments in Sedimentology Series*, 58. Elsevier, Amsterdam, pp. 215–245
- NAJMAN, Y., 2006. The detrital record of orogenesis: a review of approaches and techniques used in the Himalayan sedimentary basins. *Earth-Science Reviews* 74, 1-72.
- KEMP, P. H.; PLINSTON, D. T. 1968. Beaches produced by waves of low phase difference. 1. *Hydraul. Div.*, 94(4):1183-1195.
- OKAY, N., ERGUN, B. 2005. Source of the Basinal Sediments in the Marmara Sea Investigated Using Heavy Minerals in the Modern Beach Sands. *Marine Geology* 216(1–2):1–15.
- PAW, J. N., T. E. CHUA. 1991. Managing Coastal Resources in Cilacap,

Indonesia, and Lingayen Gulf, Philippines-an ASEAN Initiative. *Marine Pollution Bulletin* 23(C):779–83.

PETTIJOHN, F. J., POTTER, P. E., SIEVER, R. 1973. Sand and Sandstone. Heidelberg: *Springer-Verlag* Berlin.

PIRKLE, F.L., PIRKLE, E.C., PIRKLE, W.A., DICKS, S.E., 1985. Evaluation through correlation and principal component analyses of delta origin for the Hawthorne and Citronelle sediments of peninsular Florida. *Journal of Geology* 93, 493–501

POLIZEL, S. P.; ROSSETTI, D. F., 2014. Caracterização morfológica do Delta do Rio Doce (ES) com base em análise multissensor. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, nº 2.

PUPIENIS, D., BUYNEVICH I.V., JARMALAVIČIUS, D., ŽILINSKAS, G., FEDOROVICH, J., 2013. Regional distribution of Heavymineral concentrations along the Curonian Spit coast of Lithuania *In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium* (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 1844-1849, ISSN 0749-0208.

QUARESMA, V. S.; CATABRIGA, G. M.; BOURGUIGNON, S. N.; GODINHO, E.; BASTOS, A. C. Modern Sedimentary processes along the Doce River adjacent continental shelf. *Brazilian Journal of Geology*, 2015.

ROBERT P. SELF (2). 2003. "Longshore Variation in Beach Sands Nautla Area, Veracruz, Mexico." *SEPM Journal of Sedimentary Research* Vol. 47(4).

ROY, P. S., 1999. Heavy mineral beach placers in southeastern Australia: their nature and genesis. *Economic Geology*, Vol. 94, pp. 567-588.

RYAN, P.D., MANGE, M.A., DEWEY, J.F.D., 2007. Statistical analysis of high resolution heavy mineral stratigraphic data from the Ordovician of western Ireland and its tectonic consequences. *In: Mange, M., Wright, D.K. (Eds.), Heavy Minerals in Use. Developments in Sedimentology.*

SHORT, ANDREW D. AND ANTONIO HENRIQUE DA F. KLEIN. 2016. *Brazilian Beach Systems*. Springer International Publishing Switzerland.

SLINGERLAND, R., AND SMITH, N. D., 1986, Occurrence and formation of water-land placers: *Annual Review of Earth and Planetary Science*, v. 14, p. 113-147.

STATTEGGER, K., 1982. Schwermineraluntersuchungen in der östlichen Grauwackenzone (Steiermark/Oesterreich) und deren statistische Auswertung. *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt* 2, 107–122.

STOCKDON, H. F.; HOMAN, R. A.; HOWD, P. A.; SALLENGER, A. H. Empirical

- parameterization of setup, swash and runup. *Coast. Eng.* 53, 573-588. 2006.
- STOCKDON, H. F.; THOMPSON, D. M.; PLANT, N. G.; LONG, J. W. Evaluation of wave runup predictions from numerical and parametric models. *Coastal Engineering*, v. 92, p. 1-11, 2014.
- SUGUIO, K.. GEOLOGIA SEDIMENTAR. [S.L: S.N.], 2003.
- TOLMAN, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA, NWS, NCEP, *MMAB Technical Note 276*. 2009.
- VAN GOSEN, B.S., FEY, D.L., SHAH, A.K., VERPLANCK, P.L., AND HOEFEN, T.M., 2014, Deposit model for heavy-mineral sands in coastal environments: U.S. *Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–L*, 51 p., <http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070L>.
- VERMEESCH, P., 2019. EXPLORATORY ANALYSIS OF PROVENANCE DATA USING R AND THE PROVENANCE PACKAGE. *MINERALS*, V. 9, N. 3, P. 193.
- WRIGHT, L.D., 1978. River Deltas, In: Davis, J. R. A. (Eds), *Costal Sedimentary Environments*, Springer - Verlag New York Inc.
- WRIGHT, L. D.; SHORT, A. D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, v. 56, p. 93-118, 1984.