

**Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da
Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região
Marinha e Costeira Adjacente**

RELATÓRIO ANUAL:

Integração Abiótica dos Ambientes

RT-27 RRDM/NOV19

Coordenação Geral

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius de Castro

Jorge Abdala Dergam dos Santos

Vitória,

Novembro de 2019

COORDENAÇÕES

Anexo 1

Adalto Bianchini (FURG)

Anexo 3

Edmilson Costa Teixeira (UFES)

Fabian Sá (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

Subprojetos

Alessandra Delazari Barroso (FAESA)

Alex Cardoso Bastos (UFES)

Ana Cristina Teixeira Bonecker (UFRJ)

Anderson Geyson Alves de Araújo (UFES)

Björn Gücker (UFSJ)

Camilo Dias Júnior (UFES)

Daniel Rigo (UFES)

Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)

Gilberto Amado Filho (IPJB) *in memoriam*

Gilberto Fonseca Barroso (UFES)

Iola Gonçalves Boechat (UFSJ)

Leila Lourdes Longo (UFRB)

Leonardo Tavares Salgado (IPJB)

Luís Fernando Loureiro (UFES)

Marco Aurélio Caiado (UFES)

Renato David Ghisolfi (UFES)

Renato Rodrigues Neto (UFES)

Rodrigo Leão de Moura (UFRJ)

Valéria da Silva Quaresma (UFES)

Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)

Vanya Marcia Duarte Pasa (UFMG)

Anexo 4

Jacqueline Albino (UFES)

Subprojetos

Karla Costa (UFES)

Maria Tereza Carneiro (UFES)

Anexo 5

Diolina Moura Silva (UFES)

Mônica Tognella (UFES)

Anexo 6

Agnaldo Silva Martins (UFES)

Subprojetos

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

Leandro Bugoni (FURG)

Sarah Vargas (UFES)

Anexo 7

Maurício Hostim (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

Subprojetos

Carlos W. Hackradt (UFSB)

Fabiana Felix Hackradt (UFSB)

Jean-Christophe Joyeux (UFES)

Luis Fernando Duboc (UFV)

Anexo 8

Heitor Evangelista (UERJ)

Coordenação Técnica (CTEC)

Alex Cardoso Bastos

Lara Gabriela Magioni Santos

Laura Silveira Vieira Salles

Tarcila Franco Menandro

Coordenação Escritório de Projetos

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro

Patrícia Bourguignon Soares

Paulo Roberto Filgueiras

Valdemar Lacerda Junior

Walter Luiz Alda Junior

Coordenação Núcleo de Atuação Integrada em Rede (NAIR)

Edmilson Costa Teixeira

Karla Libardi Gallina

Andressa Christiane Pereira

Anna Paula Lage Ribeiro

Caroline De Marchi Pignaton

Paulo Eduardo Marques

SUMÁRIO

| | | |
|---|---|----|
| 1 | INTEGRAÇÃO ABIÓTICA DOS AMBIENTES | 6 |
| 2 | REFERÊNCIAS | 33 |
| 3 | APÊNDICE..... | 35 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Qualidade da água no ambiente dulcícola em relação a frequência de ocorrência do fósforo total referente ao valor orientador da Resolução CONAMA 357/05. | 7 |
| Figura 2: Qualidade da água no ambiente dulcícola em relação a frequência de ocorrência do ferro dissolvido referente ao valor orientador da Resolução CONAMA 357/05. | 9 |
| Figura 3: (A) – Variação da vazão do Rio Doce (m ³ /s) e (B) – variação da altura significativa de onda, ao longo do PMBA. | 11 |
| Figura 4 Mapas de turbidez superficial a partir de sensores remotos foram estimados para o período de janeiro de 2003 a abril de 2019. | 13 |
| Figura 5: Resultados da direção e intensidade de correntes e do vento (m/s) nos locais dos fundeios monitorados durante o PMBA. | 14 |
| Figura 6: Campos médios (correntes e temperatura) durante os períodos chuvoso (verão) e seco (inverno) e campos instantâneos (correntes) em período de aumento da energia de onda associado a passagem de sistema frontal (frente fria) na plataforma continental do Espírito Santo. | 16 |
| Figura 7: Esquema dos processos meteoceanográficos na plataforma continental do Espírito Santo durante condições normais, sem atuação de sistemas frontais. | 17 |
| Figura 8: Esquema dos processos meteoceanográficos na plataforma continental do Espírito Santo durante a atuação de sistemas frontais. | 18 |
| Figura 9: Distribuição espacial de sinais do rejeito no sedimento marinho superficial de acordo com os critérios mineralógicos e químicos estabelecidos. Os círculos vermelhos indicam que ambos os critérios foram satisfeitos para a estação e indicam a presença do sinal do rejeito. Os círculos verdes mostram ausência de sinal do rejeito. Os círculos amarelos indicam que apenas um dos critérios foi satisfeito, sugerindo possível presença de sinais do rejeito. As Unidades de Conservação são indicadas pelos polígonos tracejados. | 22 |
| Figura 10: Qualidade da água no ambiente dulcícola em relação a frequência de ocorrência (%) do ferro dissolvido na água superficial e de fundo referente aos valores orientadores crônico (50 µg/L) e agudo (300 µg/L) da NOAA. | 24 |
| Figura 11: (A) Lama na arrebentação na praia de Regênci. (B) Aplainamento do perfil praial e inundação da praia (transposição das ondas alcança a vegetação), praia de Regênci em junho de 2016. Observa-se arrebentação das ondas sobre as barras da desembocadura do rio Doce ao fundo. | 26 |
| Figura 12: Frequência de ocorrência de concentrações acima de limites de referência dos elementos potencialmente tóxicos na região costeira. Os diagramas circulares representam a frequência ocorrências agrupadas por setores em praias e restingas. Manguezais foram representados | |

individualmente. Observar a maior concentração de elementos como Al, Cr, Ni e V na região da antepraia do setor norte e ampla distribuição de As e Mn. A, B e C são os compartimentos costeiros adotados e seus limites geográficos.31

Figura 13: Presença de elementos potencialmente tóxicos no ambiente costeiro, distribuição de valores acima dos limites de referência. Presença verificada por estação amostral durante o monitoramento entre setembro de 2018 e agosto de 2019. Notar a concentração de alguns elementos como Al, Co, Cr e V ao norte do rio Doce. Ampla distribuição de As e Mn.32

1 INTEGRAÇÃO ABIÓTICA DOS AMBIENTES

A integração dos dados abióticos do primeiro ano do Programa de Monitoramento da Biota Aquática (PMBA) apresenta os principais resultados do cenário observado de forma descritiva e integrada, utilizando uma forma sequencial das forçantes hidrodinâmicas, qualidade da água e do sedimento, suas interações. Levando em conta ainda o comportamento dos parâmetros monitorados em uma frequência de ocorrência espaço-temporal (mapas), nos ambientes dulcícola, marinho e costeiros respectivamente (Apêndice).

No ambiente dulcícola notamos que os períodos amostrados apresentaram condições sazonais pluviométricas similares àqueles observados para as médias das séries históricas, com períodos de estação seca e chuvosa bem definidos, sendo o período seco coincidente com os meses mais frios do ano. Entretanto, este primeiro ano de monitoramento do PMBA foi mais seco que a média das séries históricas em praticamente todas as estações pluviométricas, com apenas duas exceções (RT-18D). A bacia do Rio Doce como um todo, no período monitorado, apresenta a porção central e nordeste como a parte mais seca, e a porção oeste como a mais chuvosa.

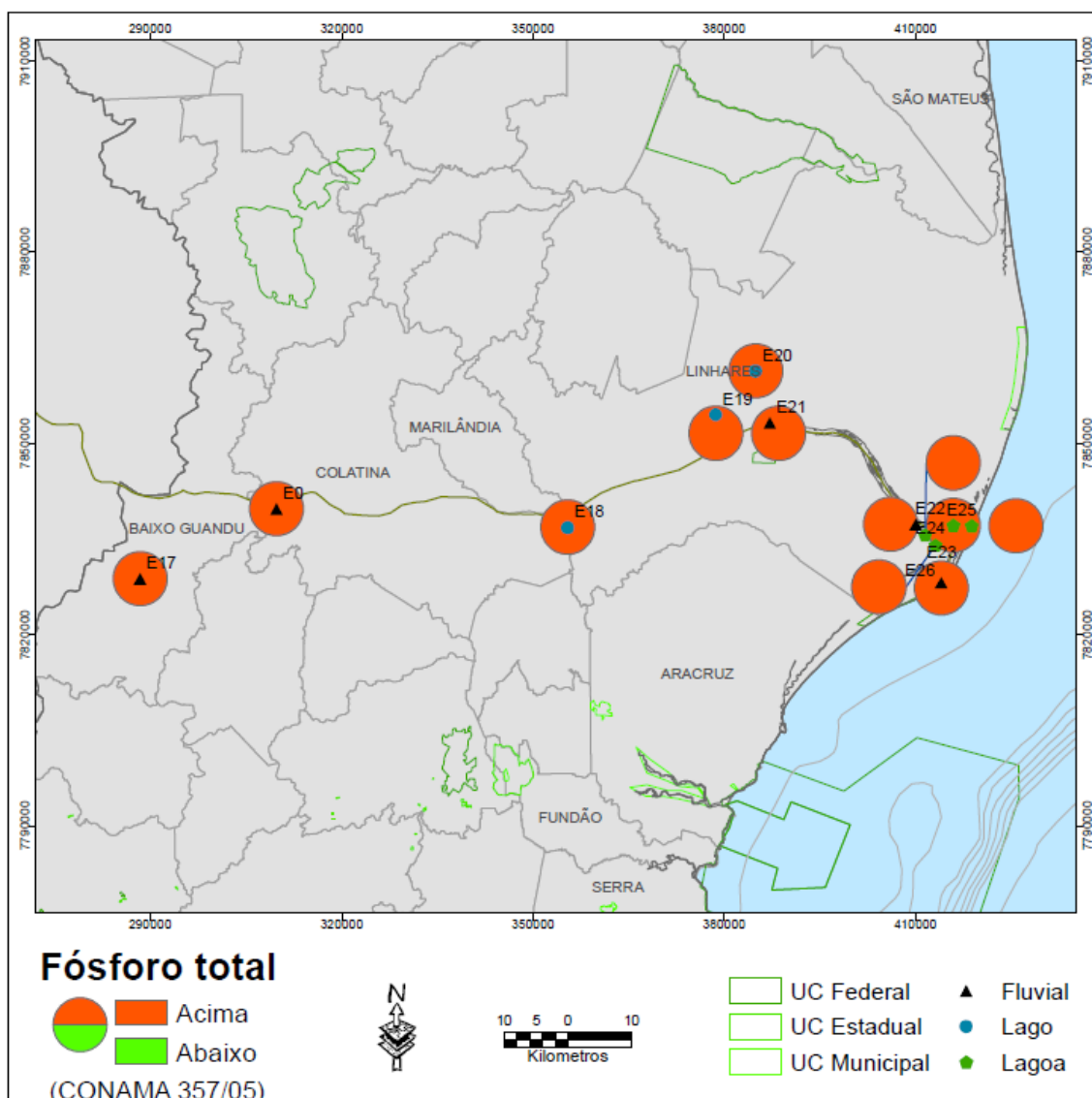
Esta condição de pluviosidade abaixo da média histórica reflete nas condições fluviométricas observadas durante o monitoramento, como o observado no período chuvoso (out/2018 a mar/2019), o qual apresentou vazões médias inferiores à vazão característica de período seco, quando comparado registros históricos correspondentes ao período analisado. Os resultados fluviométricos monitorados no PMBA estão de acordo com a ocorrência de fenômenos de El Niño, predominante neste primeiro ano de monitoramento. Destaca-se neste período, que as vazões mínimas e máximas estimadas foram 92 m³/s (20/07/2019) e 2.598 m³/s (02/01/2019) (RT-18C).

As variações pluviométricas e fluviométricas registradas durante o PMBA refletem diretamente na qualidade da água e do sedimento, uma vez que possibilitam o transporte de materiais erodidos para a calha do Rio Doce, através de seus afluentes, e também a ressuspensão de sedimentos depositados em seu leito principal, tendo como destino final sua foz. Sendo a turbidez um parâmetro que reflete a presença de material em suspensão na água da calha do Rio Doce, nota-se que no período chuvoso do PMBA os valores medianos e máximos observados são ainda superiores aos registrados nos anos anteriores ao desastre, porém com uma tendência de redução quando comparados ao período chuvoso de 2015/2016, o qual estava sob influência da passagem do material oriundo do rompimento da barragem de rejeitos de mineração. Estes resultados vão de encontro aos reportados no PMQQS (2018) e IGAM (2018), os quais atestam aumento dos valores de turbidez e concentração de sólidos suspenso totais nos períodos chuvosos.

Dentre os nutrientes analisados no ambiente dulcícola durante o PMBA, mensurados ao longo do Rio Doce, o fósforo total destaca-se por apresentar concentrações com frequência de ocorrência acima do valor orientador pela Resolução CONAMA 357/05 em todas as estações amostrais durante todas as campanhas realizadas (Figura 1). Fósforo total foi um parâmetro com elevada variação durante a

passagem do material oriundo do rompimento da barragem de mineração (2015/2016), quando apresentou concentrações máximas muito superiores aos propostos na Resolução CONAMA 357/05. Entretanto, mesmo apresentando atualmente uma frequência de ocorrência em não conformidade como os valores orientadores, suas concentrações podem refletir atividades desenvolvidas na bacia de drenagem, como a agricultura, atividade forte na região, que contribui com grande carga de fertilizantes, ricos em fósforo, para os corpos d'água. Nos ambientes lacustres, lagos e lagoas, e também no Rio Baixo Guandu, esta mesma frequência de ocorrência foi verificada.

Figura 1: Qualidade da água no ambiente dulcícola em relação a frequência de ocorrência do fósforo total referente ao valor orientador da Resolução CONAMA 357/05.



Mesmo os demais nutrientes não apresentando concentrações acima dos valores orientadores, é importante ressaltar que os maiores fluxos diários de fósforo total, nitrogênio total, silício dissolvido, nitrogênio inorgânico dissolvido e fósforo inorgânico dissolvido coincidem com os meses do período

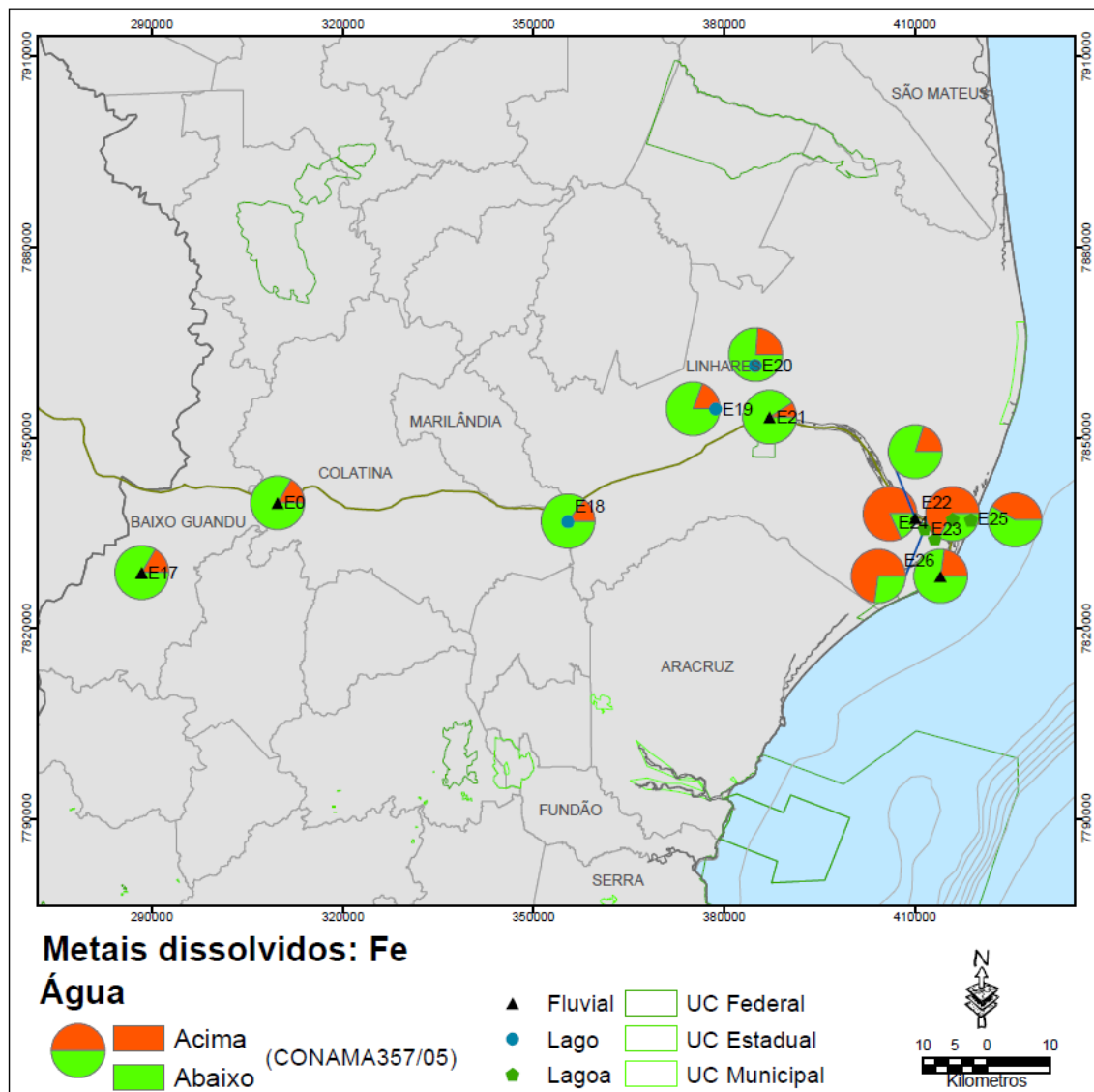
chuvoso, tendo seus valores máximos registrados no mês de dezembro do presente monitoramento. A ordem decrescente da produção anual para nutrientes é: silício dissolvido > nitrogênio total > fósforo total.

Outros parâmetros que não apresentam conformidade com valores orientadores com frequência de ocorrência alta são os pesticidas, como por exemplo o DDT e seus derivados, refletindo a contaminação da bacia do Rio Doce devido às atividades agrícolas. As análises realizadas em água para os compostos orgânicos na calha do Rio Doce mostraram valores significativos, principalmente para os parâmetros PCB (bifenilas policloradas), pesticidas e HPA (hidrocarbonetos poliaromáticos).

Em relação à metais na matriz água, os resultados obtidos na calha do Rio Doce no PMBA quando comparados a dados pretéritos, apresentam condições similares àquelas anteriores ao desastre. Contudo, uma frequência de ocorrência de 20% de não conformidade para as concentrações de ferro dissolvidos com a Resolução CONAMA 357/05 foi observada (Figura 2). Nota-se que há um aumento desta frequência de ocorrência de piora da qualidade da água, exemplificado neste caso pelo ferro dissolvido, na proximidade da foz do Rio Doce. O valor crônico orientador da NOAA para ferro é maior, porém ao compararmos as concentrações de ferro e outros elementos, como Al, Co, Pb e Cu, na fração total, a frequência de ocorrência de concentrações mais elevadas aumenta. Destaca-se o Fe e o Al como os elementos com frequência de ocorrência de concentrações mais elevadas na fração total para a matriz água (Apêndice).

Estas ocorrências em que há um aumento das concentrações de metais, seja na fração dissolvida ou total, coincidem com as campanhas realizadas no período chuvoso, ressaltando que épocas de maiores índices pluviométricos e fluviométricos há disponibilização de metais para a coluna d'água, sendo estes transportados ao longo de toda a calha do Rio Doce. PMQQS (2018) e IGAM (2018) também relatam aumento nas concentrações de metais dissolvidos e totais no período chuvoso, com destaque para Fe e Mn. Até 2017, Fe dissolvido havia apresentado uma estabilidade de suas concentrações em relação ao período pré-rompimento, entretanto em 2018 ocorre um aumento desses valores, violando valores orientadores em aproximadamente metade das amostras (IGAM, 2018). Este aumento nas concentrações de Fe dissolvido refletem no ambiente marinho em períodos de maior vazão fluvial, como será demonstrado adiante.

Figura 2: Qualidade da água no ambiente dulcícola em relação a frequência de ocorrência do ferro dissolvido referente ao valor orientador da Resolução CONAMA 357/05.



É destacado que as concentrações de metais nos sedimentos superficiais da calha do Rio Doce ainda refletem o impacto ocorrido pela passagem do material proveniente do rompimento da barragem de rejeito de mineração. Os resultados obtidos para as médias das concentrações de metais observadas no PMBA e as obtidas no monitoramento realizado pelo IEMA dias após o rompimento da barragem de Mariana(mas antes da chegada da pluma de rejeitos no Espírito Santo na calha do Rio Doce), demonstram que os valores para Ba, Cu, Pb e Ni ainda mantêm aumentos consideráveis, sendo de 17,6; 5,7; 2,2 e 2,6 vezes, respectivamente, maiores que os reportados pelo IEMA. Para o Fe e Mn, os aumentos foram de aproximadamente 50% e 40%. As análises de extração sequencial de metais em sedimento da calha do Rio Doce demonstram que estes elementos se encontram principalmente em

sua porção que contém óxidos de manganês e ferro amorfos, podendo serem disponibilizados para a água dependendo das condições físico-químicas do meio.

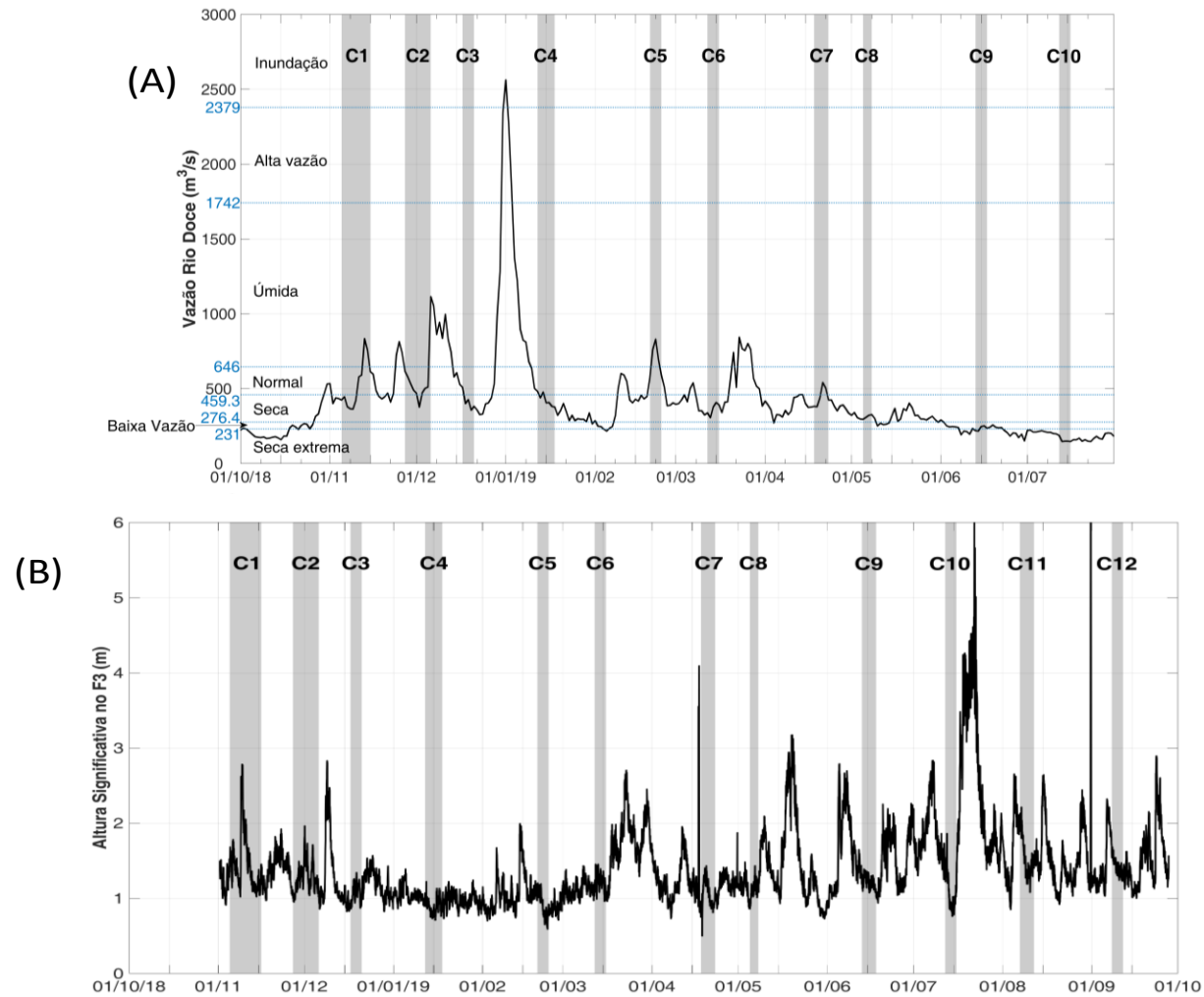
De forma geral, os ambientes lacustres (lagos e lagoas) monitorados no PMBA mostraram uma qualidade de água pior que na calha do Rio Doce. Devido à falta de dados pretéritos para lagos e lagoas, não foi possível avaliar a profundidade do impacto dos rejeitos que eventualmente transbordaram para alguns pontos amostrados desses ambientes. Entretanto, se avaliados pela legislação, os lagos apresentam comportamentos de não conformidades similares ao da calha do Rio Doce, contudo as lagoas se mostraram bastantes alteradas frente aos limites CONAMA para água para Fe (dissolvido) e Mn (total), tendo 68% e 47% de amostras não conformes, respectivamente.

A presença de pesticidas nas amostras mostrou-se preocupante principalmente devido à presença do DDT, representando cerca de 90% de não conformidades em relação a esse parâmetro para esses ambientes, como observado também para calha.

Esta contextualização abiótica para o ambiente dulcícola demonstra que houve melhoras, principalmente na calha do Rio Doce, em relação ao impacto agudo do desastre. Porém, ainda é possível observar que, em relação aos impactos diretos da presença do rejeito de mineração, notamos que em períodos chuvosos na bacia hidrográfica do Rio Doce, com maior vazão fluvial, temos aumento das concentrações de metais na água, tanto na fração dissolvida quanto na total, ou seja com contribuição de material particulado enriquecido destes elementos e disponibilização a partir dos sedimentos. Este fluxo de material particulado em suspensão, pesticidas, compostos orgânicos, nutrientes e metais, relacionados ou não com o material oriundo da barragem de rejeitos de mineração, tem como destino final o ambiente marinho, ou seja, a bacia de sedimentação do sistema.

O aporte de material oriundo do Rio Doce e sua distribuição na zona costeira adjacente a sua foz é controlado por forças hidrodinâmicas como a vazão fluvial e pelo aumento da energia das ondas, respectivamente. A Figura 3 apresenta as variações de vazões do Rio Doce (A) e de altura máxima de onda (B) como a indicação das campanhas de amostragem no ambiente marinho. É importante destacar que as campanhas 1 a 6 no ambiente marinho estão inseridas no período chuvoso, sendo que a campanha 4 foi realizada após o registro da maior vazão registrada no Rio Doce para esse ano, enquanto as campanhas 6 a 12 são representativas do período seco. Observa-se claramente que durante o período chuvoso há predominância da frequência de ocorrência de picos de vazão fluvial enquanto no período seco o aumento da energia das ondas prevalece. Esta variação hidrodinâmica na foz do Rio Doce é extremamente importante para a compreensão dos processos meteoceanográficos da plataforma continental do Espírito Santo e será constantemente relacionado com os resultados dos parâmetros analisados para responder as alterações observadas na qualidade da água e do sedimento.

Figura 3: (A) – Variação da vazão do Rio Doce (m³/s) e (B) – variação da altura significativa de onda, ao longo do PMBA.



Mapas de turbidez superficial a partir de sensores remotos foram estimados para o período de janeiro de 2003 a abril de 2019. A partir dos mapas diários, foi analisada a recorrência para todo o período de valores distintos de turbidez superficial (1, 2, 5, 10, 15 e 20 NTU) em cenários de alta e baixa vazão do Rio Doce, seguindo a classificação da vazão proposta por Oliveira e Quaresma (2017). Através da análise destes mapas (Figura 4) foi possível notar que os maiores valores de turbidez na foz do Rio Doce ocorrem em momentos de maiores vazões fluviais, porém com uma dispersão espacial mais restrita e com direcionamento tendendo a sul. Por outro lado, momentos de menores valores de turbidez, durante a baixa vazão fluvial e associados a passagem de sistemas frontais, possuem uma extensão de influencia maior com direcionamento de transporte de material ressuspensão a norte e mais próximo da linha de costa. Este transporte preferencial em direção ao norte, em momentos de passagem de sistemas frontais, pode ser visualizado pelos resultados obtidos nos fundeios presentes ao sul e norte da foz do Rio Doce, os quais demonstram a intrínseca relação entre a intensidade do vento e a intensidade de corrente tanto na superfície quanto no fundo da coluna d'água. Nota-se que os dois fundeios localizados a norte da foz do Rio Doce (Fundeio 3 e 4) as intensidades de corrente tem direções predominantes para norte no período seco, quando os sistemas frontais predominam (Figura 5). O fundeio localizado logo a sul da foz do Rio Doce (Fundeio 2) não apresenta uma direção de corrente predominante, explicando o porquê deste local já ter sido descrito como um depocentro sedimentar, com tendência de acúmulo de material fino.

Figura 4 Mapas de turbidez superficial a partir de sensores remotos foram estimados para o período de janeiro de 2003 a abril de 2019.

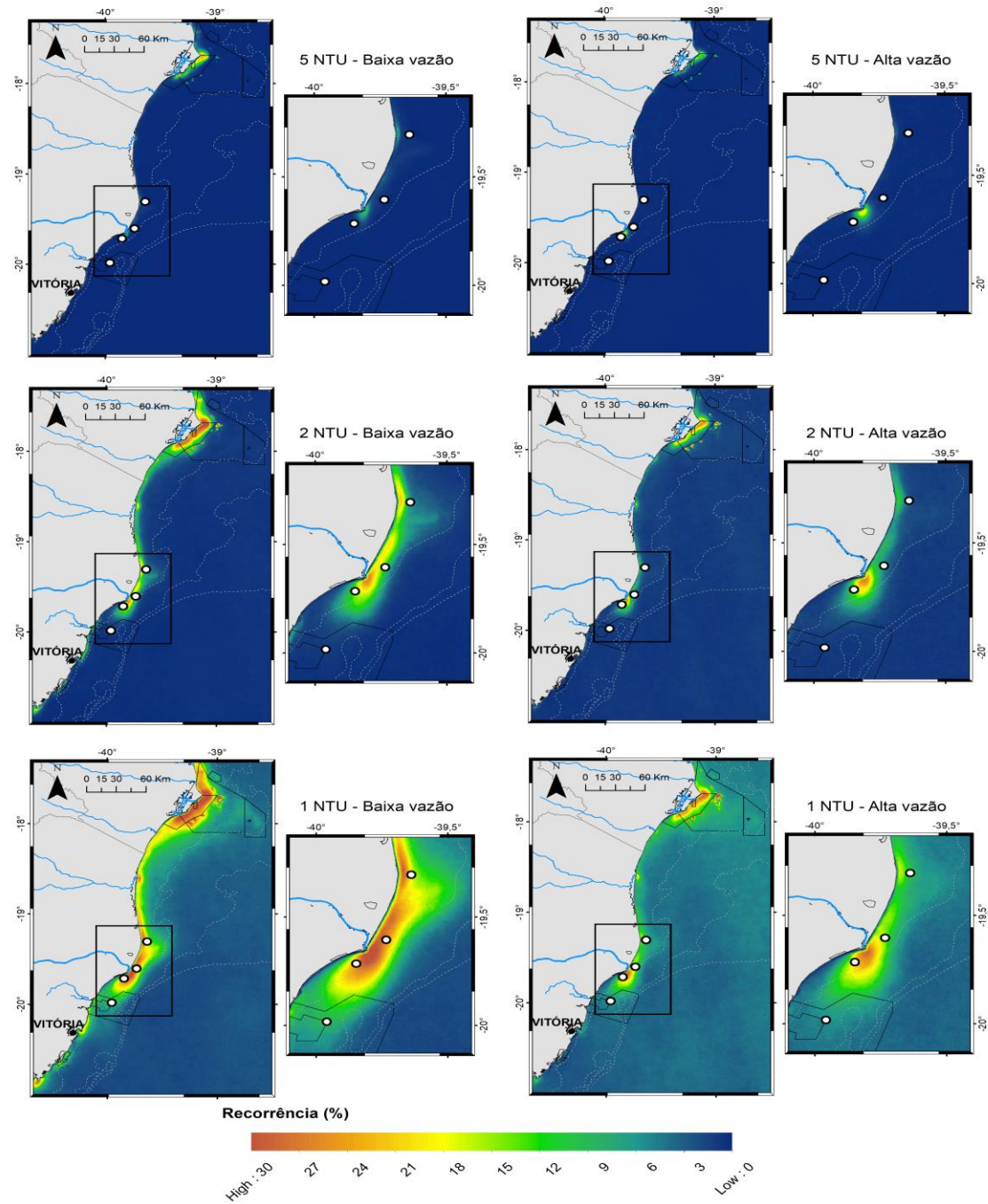
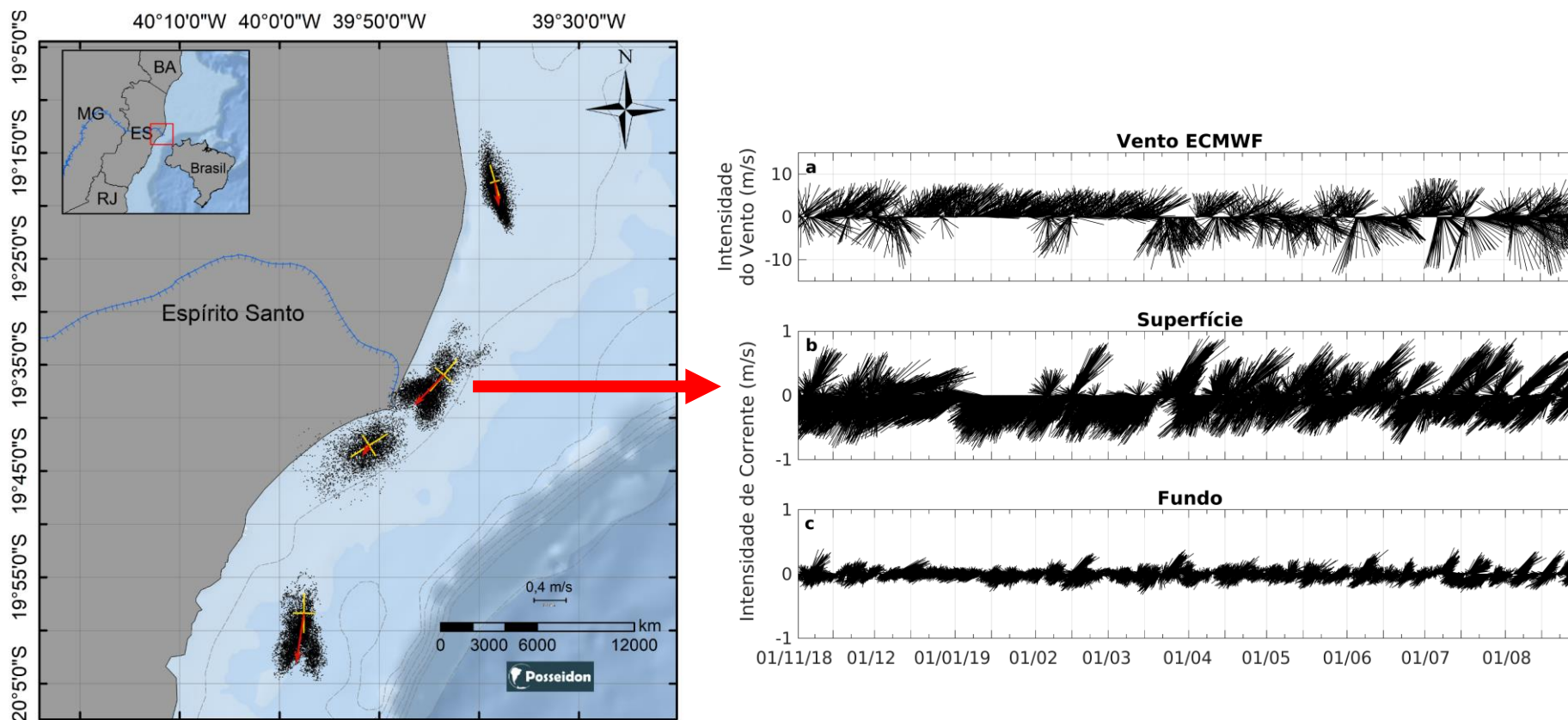


Figura 5: Resultados da direção e intensidade de correntes e do vento (m/s) nos locais dos fundeios monitorados durante o PMBA.

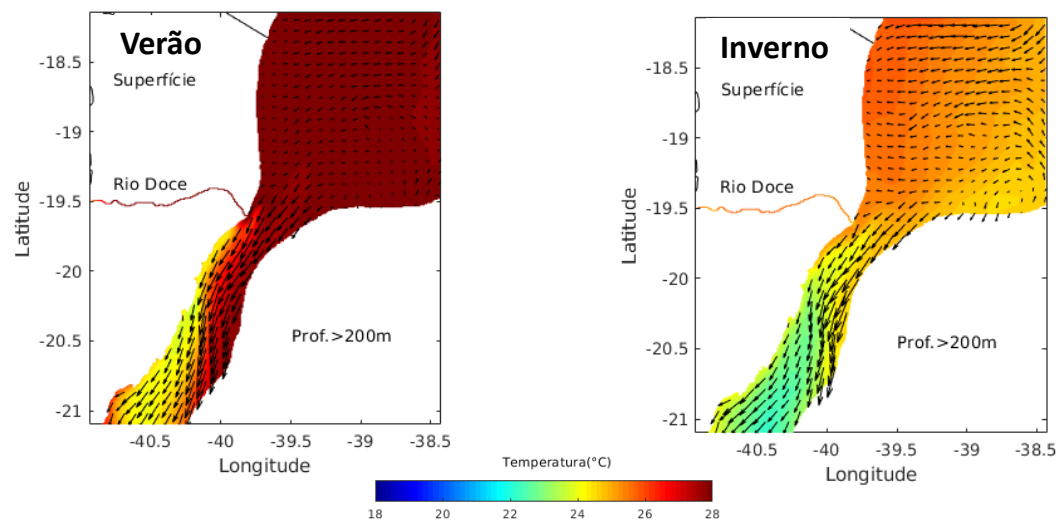


Este padrão de inversão da direção e intensidade de correntes é típico de momentos quando há a passagem de sistemas frontais. Isto fica mais evidente quando comparamos os campos médios de corrente e temperatura superficial com campos instantâneos de correntes. Ao verificarmos os campos médios entre o período chuvoso (verão) e o período seco (inverno) notamos que a direção das correntes é para sul em ambos, alterando apenas a temperatura, sendo esta mais fria no inverno, como esperado. Entretanto, analisando um campo instantâneo durante a passagem de um sistema frontal (Figura 6), podemos observar que a direção das correntes é para sul em condições normais de vento NE. Com a entrada da frente fria a corrente e inversão da direção de vento para SE a corrente alterna para norte, retornando as condições iniciais após a passagem do sistema frontal. Ressalta-se que a duração destes campos instantâneos é de poucos dias, mas podem ser intensificados dependendo das condições climáticas.

A Figura 7 representa um esquema das condições meteoceanográficas durante condições normais. Assim, predominam ventos e ondulações de NE, correntes de superfície e fundo com direção para sul, ressurgência da ACAS (Água Central do Atlântico Sul) na plataforma continental, deriva litorânea para norte e retro-alimentando a costa a sul da foz do Rio Doce. Sendo a plataforma continental ao norte da foz com predomínio de transporte por correntes de maré. Quando há a passagem de uma frente fria ocorre inversão da direção do vento, conseqüentemente da ondulação (SE) e do sentido das correntes de fundo para norte, ressaltando a não intrusão da ACAS (Figura 8).

Figura 6: Campos médios (correntes e temperatura) durante os períodos chuvoso (verão) e seco (inverno) e campos instantâneos (correntes) em período de aumento da energia de onda associado a passagem de sistema frontal (frente fria) na plataforma continental do Espírito Santo.

Campos médios (correntes e temperatura)



Campos instantâneos (correntes)

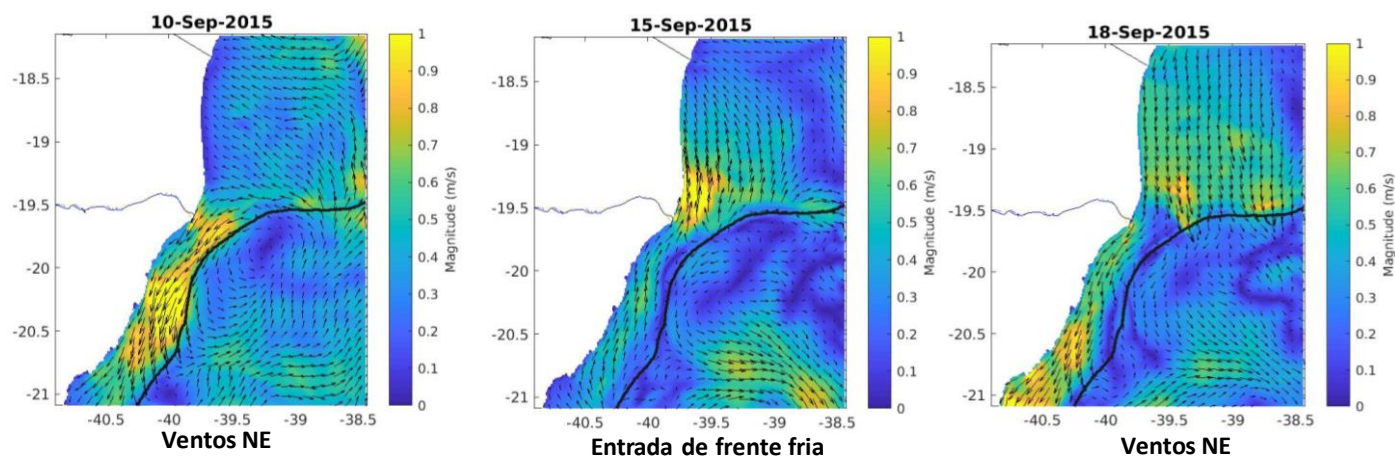


Figura 7: Esquema dos processos meteoceanográficos na plataforma continental do Espírito Santo durante condições normais, sem atuação de sistemas frontais.

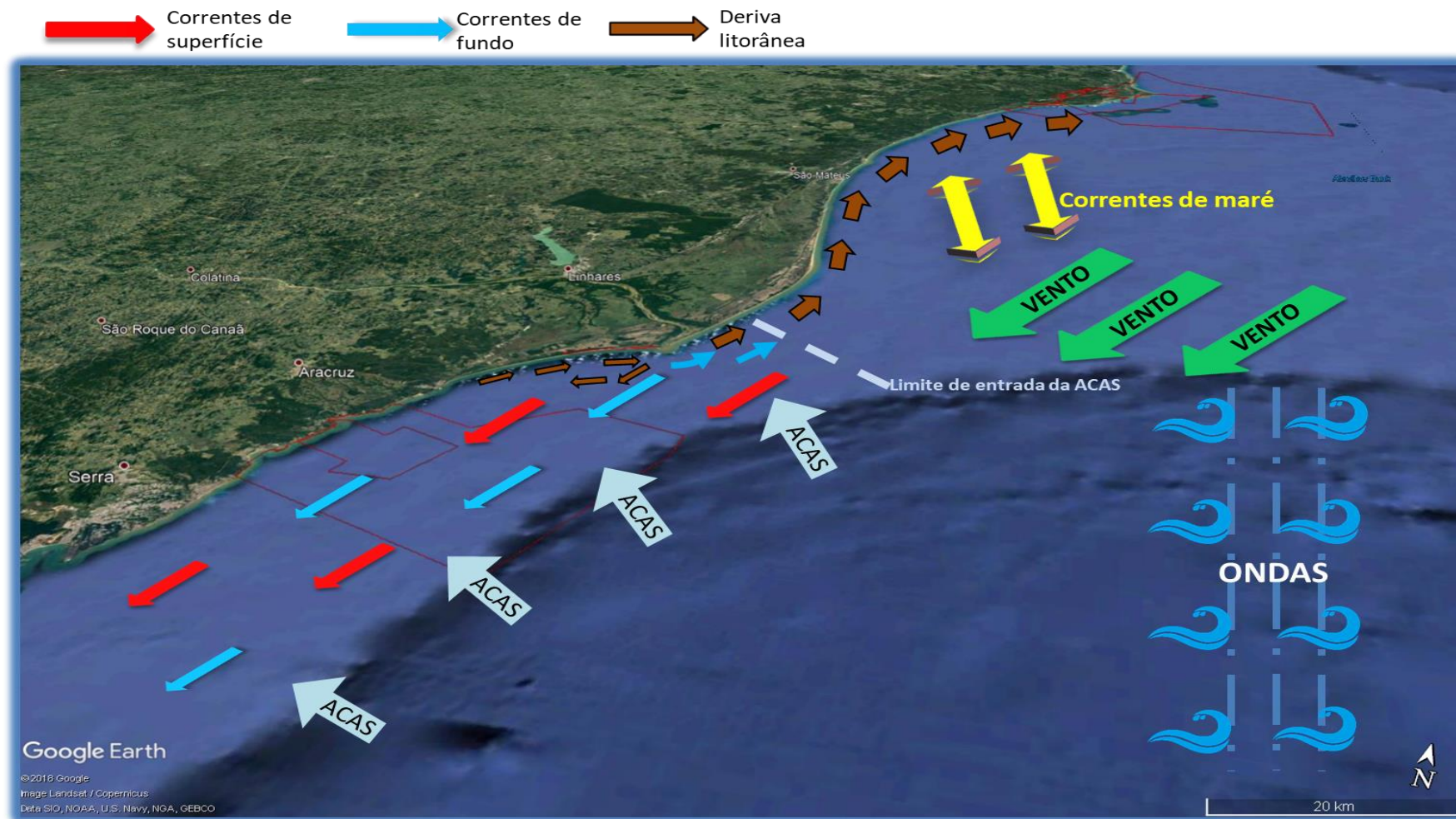
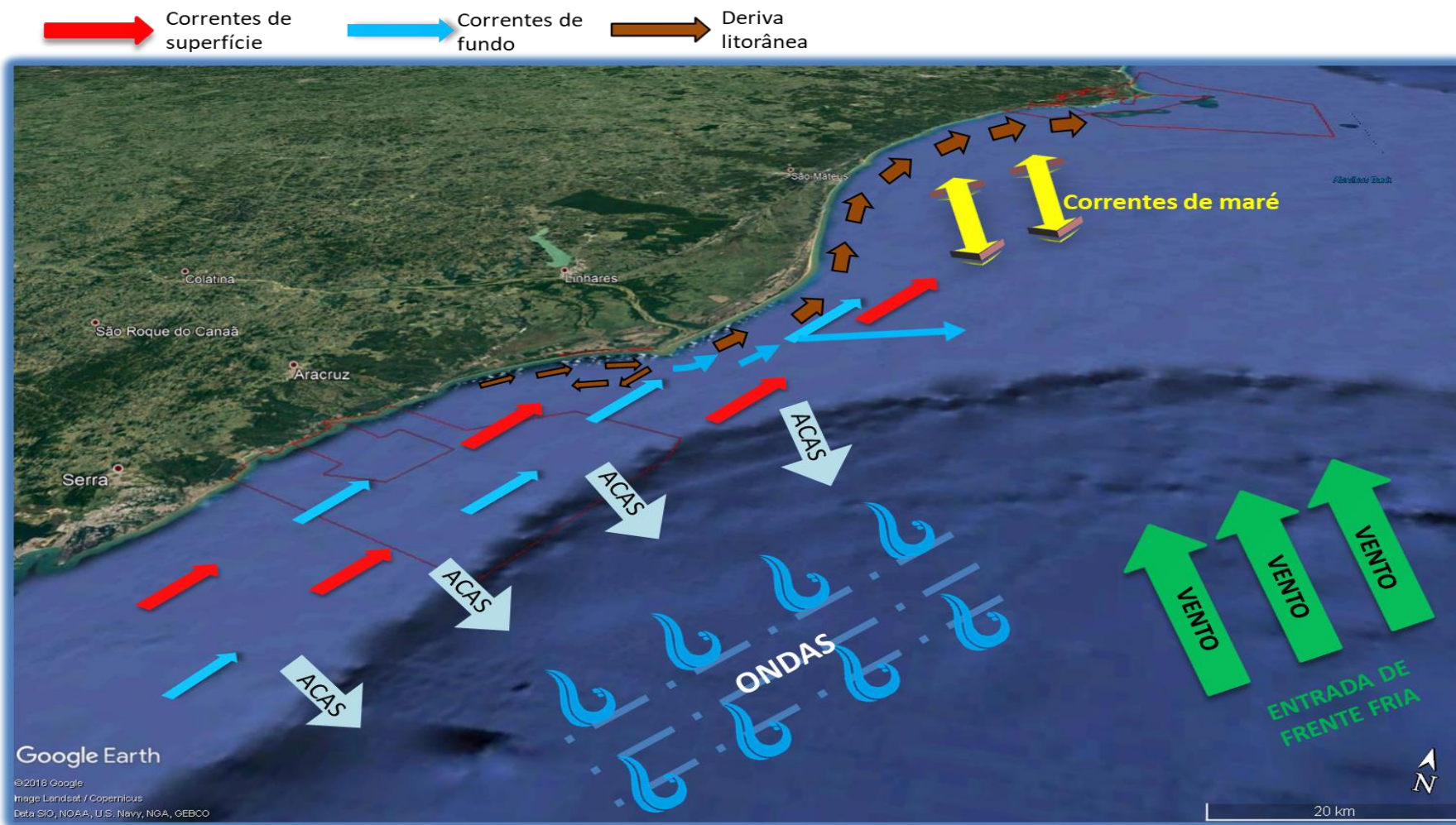


Figura 8: Esquema dos processos meteoceanográficos na plataforma continental do Espírito Santo durante a atuação de sistemas frontais.



Como comentando anteriormente, o aumento da vazão fluvial implica em maiores valores de turbidez, conseqüentemente de material particulado em suspensão (MPS). Esta relação fica muito nítida durante a campanha 4 (janeiro de 2019), onde foi registrada a maior vazão fluvial durante o PMBA e também os maiores valores de MPS na estação amostral SD 01 (RT-19C), a mais próxima da foz do Rio Doce. Valor semelhante a este registrado na campanha 4 para MPS demonstrando que alguns eventos hidrológicos apresentam capacidade de aporte de MPS comparáveis ao aporte primário de rejeitos, registrados durante o desastre, mesmo após mais de 3 anos do rompimento da barragem. A partir das campanhas 5 e 6 também há aumento das concentrações de MPS na coluna d'água, mantendo-se mais elevados, dependendo da estação amostral nas campanhas seguintes, coincidindo com o período seco e maior frequência de ocorrência de eventos com aumento da energia de ondas.

Estes momentos de maior aporte fluvial e de eventos de maior energia de ondas na plataforma continental refletem diretamente na qualidade da água e do sedimento, e serão exemplificados a seguir pelas concentrações de ferro no setor Foz. Na coluna d'água este reflexo pode ser exemplificado pelas concentrações de ferro dissolvido (A) e total (B) no setor Foz (RT-19B). As concentrações de ferro dissolvido aumentam significativamente na campanha 4 (janeiro de 2019) durante a maior vazão registrada e nas campanhas seguintes durante os eventos de ressuspensão de sedimento, com máximo de concentração na campanha 8. Estas concentrações de ferro dissolvido são superiores àquelas observadas durante o Pré-PMBA, entre o momento do desastre e 1 ano após. Este comportamento também pode ser observado nos setores APA/RVS e Norte, os quais foram amostrados na campanha 4. Padrão similar na variação das concentrações de ferro dissolvido ocorre para ferro total, entretanto com valor máximo na campanha 9 e concentrações menores do que durante o momento de chegada do material oriundo do rompimento da barragem de rejeitos de mineração (novembro e dezembro de 2015), no início do Pré-PMBA. Este aumento das concentrações de ferro na coluna d'água sugere que ainda há material chegando pelo Rio Doce em determinadas condições hidrológicas, por exemplo vazões mais elevadas com eventos ressuspensivos de sedimentos de fundo na plataforma continental, caracterizando eventos agudos dentro de um período crônico. Elementos como Al, Cr, Cu, Mn e Zn apresentam o mesmo comportamento na variação de suas concentrações dissolvidas ao longo das campanhas amostrais, entretanto apenas para o Fe as concentrações foram superiores àquelas registradas no Pré-PMBA. É importante ressaltar que durante a campanha 4 estes aumentos nas concentrações de ferro não foram observados no ambiente dulcícola, o que pode ser explicado pelo momento de coleta na calha do Rio Doce, pois esta campanha foi realizada concomitantemente nos dois ambientes, dulcícola e marinho. O momento destas coletas ocorre no final do período de maior vazão, refletindo em aumento das concentrações no ambiente marinho e não no dulcícola, uma vez que o rio já havia exportado este material para a região costeira. Destacando mais uma vez a importância do ambiente marinho como uma bacia de recepção e sedimentação do material exportado pelo Rio Doce

(como esperado) e como um ambiente extremamente sensível, que deve ser monitorado constantemente.

Além dos metais outros parâmetros como nitrogênio amoniacal e compostos nitrogenados totais (ex: aminas), apresentam aumento em suas concentrações durante eventos de aumento de energia de ondas. Hidrocarbonetos Poliaromáticos (HPAs) apresentam maiores concentrações durante o período chuvoso, indicando uma relação com o aporte fluvial. A não conformidade das concentrações para pesticidas verificada na calha do Rio Doce também são observadas no setor Foz, porém sem ocorrer em uma campanha específica, mas com maior ocorrência no período de ressuspensão de sedimentos.

A influência do aporte fluvial durante a campanha 4 também é registrada nos sedimentos superficiais, onde há valores máximos das concentrações de ferro e também de outros metais. No período seco, com o aumento da energia de onda e consequente ressuspensão de sedimentos, as concentrações de metais diminuem até a campanha 7 quando há uma brusca alteração destes valores nos sedimentos superficiais, como pode ser observado nos resultados apresentados no RT-19B. Entretanto, as concentrações de ferro no MPS aumentam nas últimas campanhas, principalmente na água de fundo. No PMBA foi notado tendências de redução da densidade do sedimento superficial, tendo como consequências a redução dos limiares de erodibilidade do sedimento, tornando o fundo mais susceptível a mobilização e erosão, com evidências claras no RT-19E, antes e após a tempestade tropical Iba em março de 2019 (que foi precedida por uma frente fria), indicando um alto potencial de ressuspensão do fundo.

A partir da campanha 10 há redução nas concentrações da maioria dos parâmetros analisados, principalmente metais, tanto na coluna d'água nas frações dissolvida e total, como nos sedimentos superficiais. Por outro lado, há aumento das concentrações de metais no MPS da água de fundo, indicando que este material ainda não sofreu deposição e pode estar como material fluido junto ao fundo. Valores mais elevados de metais no MPS de fundo são observados no setor Norte, indicando a atuação dos processos de transporte nesta direção.

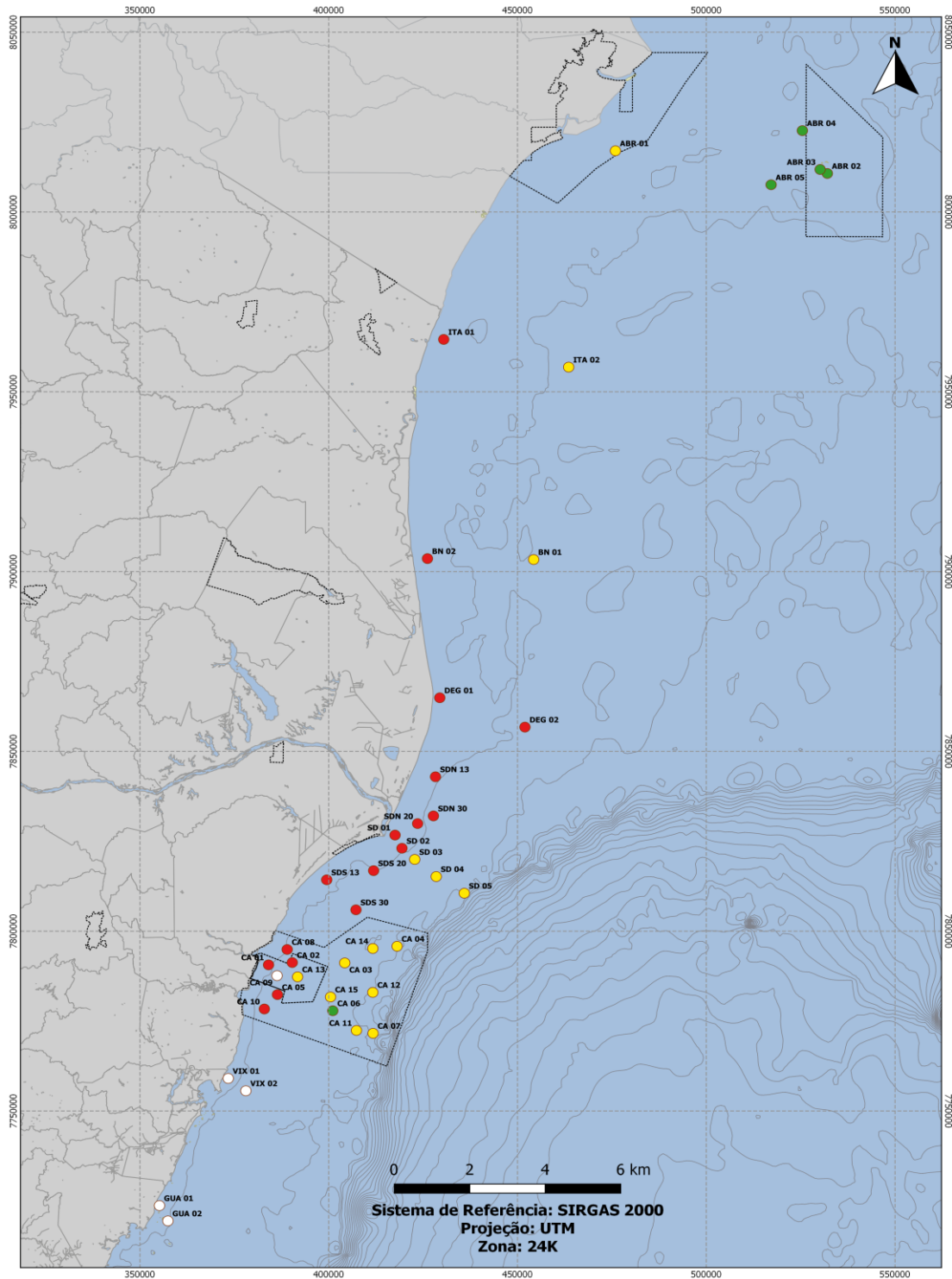
Toda esta dinâmica presente na plataforma continental é responsável pela distribuição do material proveniente do aporte continental. Através da aplicação dos critérios geoquímicos e mineralógicos, além da assinatura geoquímica por elementos terras raras (ETRs), apresentados na integração do Anexo 3 – Monitoramento Marinho, foi possível confeccionar o mapa de sinal da presença do rejeito de mineração junto ao sedimento marinho (Figura 9). A assinatura geoquímica de ETRs dos sedimentos marinhos e MPS nos diferentes setores monitorados foi comparada à assinatura do rejeito de mineração, propiciando um melhor entendimento não apenas do depósito deste material como da sua influência na coluna d'água durante aumento da energia de onda na plataforma continental. O mapeamento do depósito contendo sinal do rejeito, nos testemunhos, corroborou a presença desse sinal no setor Foz do Rio Doce, considerando

os critérios geoquímico e mineralógico. No setor Norte, o critério mineralógico também apontou a presença do sinal do rejeito no testemunho localizado na plataforma interna.

Para o setor ABROLHOS foi utilizado o modelo clássico de mistura binária isotópica visando testar a hipótese sobre a influência de potenciais fontes contribuintes para os sedimentos na coluna d'água no PARNA de Abrolhos. Foi empregado de forma integrada dados isotópicos dos sedimentos armadilhados e MPS em Abrolhos e Porto Seguro, dados dos principais rios que aportam no em torno do Parque Marinho e aqueles provenientes da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. As curvas de mistura calculadas indicam que a lama da barragem amostrada em Santarém não representa um *end-member* possível para os resultados na região de Abrolhos; por outro lado, o componente estabelecido pela Foz do Rio Doce pós-rompimento pode ser usada para descrever a maioria dos sedimentos encontrados nas armadilhas em Abrolhos. O modelo estima que os sedimentos armadilhados tenham assinatura isotópica equivalente a Foz do Rio Doce apresentando um padrão de mistura entre 5% a 15% da componente juvenil basáltica de Abrolhos (fonte local).

Combinando os resultados isotópicos com o sensoriamento remoto observou-se que apesar da detecção da chegada da pluma de rejeitos da Samarco no PARNA de Abrolhos, não foram observadas mudanças nos padrões de transparência das águas superficiais no Parque (análise da fração particulada), parâmetro este importante para o desencadeamento de vários processos biológicos inerentes a vida marinha em Abrolhos.

Figura 9: Distribuição espacial de sinais do rejeito no sedimento marinho superficial de acordo com os critérios mineralógicos e químicos estabelecidos. Os círculos vermelhos indicam que ambos os critérios foram satisfeitos para a estação e indicam a presença do sinal do rejeito. Os círculos verdes mostram ausência de sinal do rejeito. Os círculos amarelos indicam que apenas um dos critérios foi satisfeito, sugerindo possível presença de sinais do rejeito. As Unidades de Conservação são indicadas pelos polígonos tracejados.

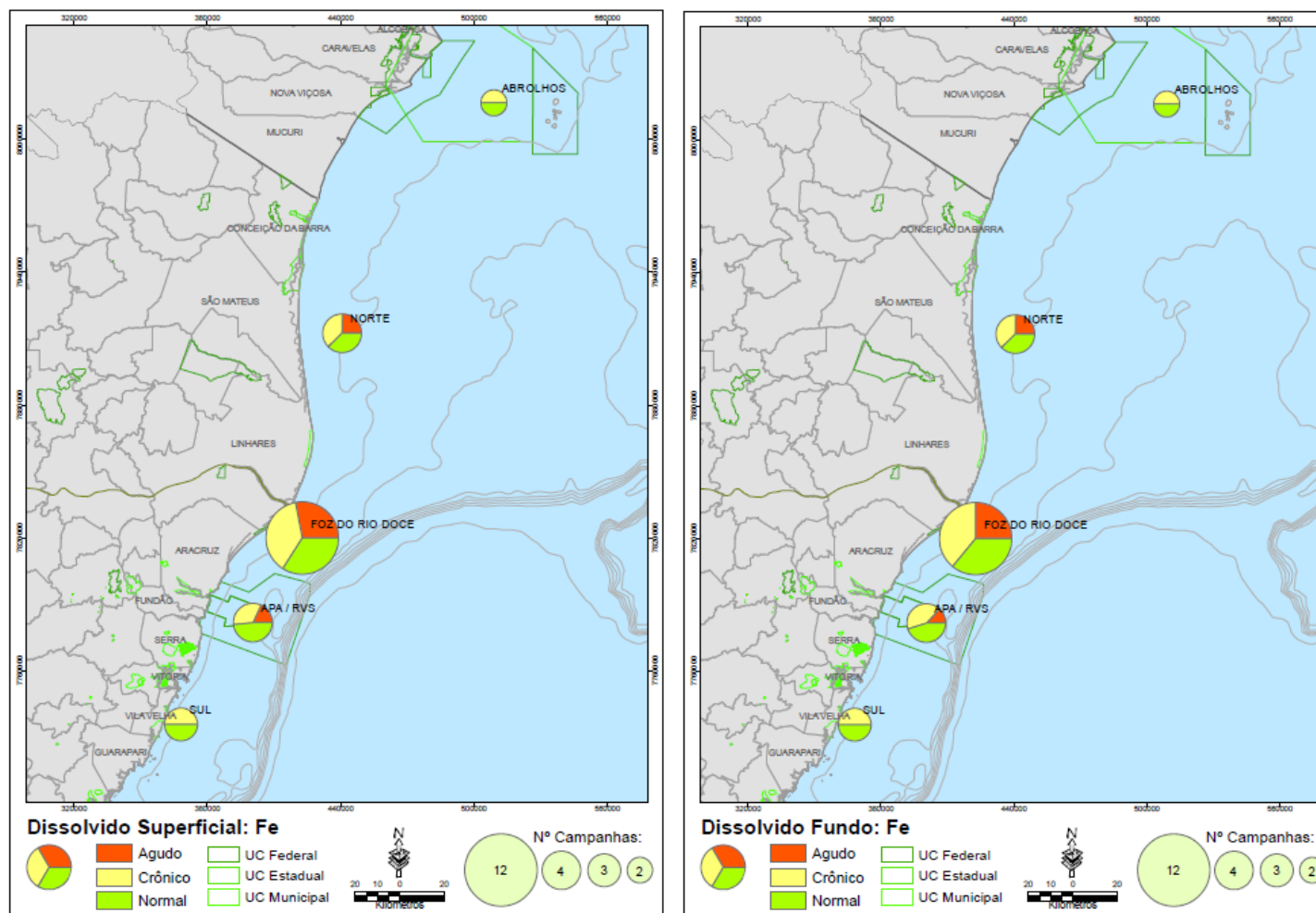


Como uma forma de verificar variações temporais e espaciais da qualidade da água ao longo do PMBA, ocasionadas pelo aporte fluvial ou ressuspensão de sedimentos, foram plotadas as frequências de ocorrências dos valores de concentração de metais e nutrientes em relação a um valor de referência, seja pretérito ou do NOAA (agudo e crônico). Tais mapas desta frequência de ocorrência estão apresentados no RT-19B e/ou no Apêndice do respectivo projeto, porém por estação amostral. Aqui são apresentados valores médios por setores, levando em consideração o número de campanhas amostrais realizadas em cada setor. Para os parâmetros que não apresentaram desconformidades com os valores orientadores não foram gerados mapas representativos. Estes mapas servem de base para a interpretação dos possíveis impactos bióticos, bem como de áreas com maior vulnerabilidade.

Pode-se observar que a frequência de ocorrência de valores agudos ocorreu nos setores APA/RVS, Foz e Norte, justamente nos setores em que o sinal da presença do rejeito de mineração foi indicada pelos critérios geoquímicos e mineralógicos adotados (Figura 10). Além disso, os setores Foz e Norte apresentam uma frequência de ocorrência de valores agudos maior do que em relação a APA/RVS, condizentes com os resultados das concentrações de metais na coluna d'água. Os momentos onde há esta piora na qualidade da água são justamente as campanhas em que houve maior aporte fluvial ou eventos ressuspensivos de sedimento. Estes resultados ficam ainda mais relevantes devido ao número de campanhas nestes setores serem maiores do que nos setores Abrolhos e Sul.

Sedimentos terrígenos no ambiente marinho são originados naturalmente do material proveniente do continente, formando depósitos, principalmente próximo a desembocaduras dos rios, como o caso aqui estudado. Assim sendo, são amplamente conhecidos como fonte de contaminantes e nutrientes para a coluna d'água, em função da qualidade e característica do material ali aportado. Dessa forma quando são ressuspensados, este material passa a ser distribuído por áreas mais extensas do ambiente pelas correntes resultantes. No presente monitoramento, as concentrações de metais nos sedimentos superficiais acima de valores pretéritos foram observadas para a maioria dos elementos analisados, como por exemplo: até 4 vezes para ferro; 8 vezes para alumínio; 6 vezes para bário; 10 vezes para zinco; 35 vezes para cádmio; 7 vezes para cobre e 3 vezes para manganês, cromo, chumbo, vanádio e níquel. Muitos desses elementos também apresentam inconformidades no ambiente dulcícola. Isso demonstra que após 4 anos do desastre o ambiente marinho, mesmo que recebendo cargas menores provenientes do aporte fluvial, tende a acumular e retrabalhar este material por um longo período, principalmente com características físicas e químicas tão particulares.

Figura 10: Qualidade da água no ambiente dulcícola em relação a frequência de ocorrência (%) do ferro dissolvido na água superficial e de fundo referente aos valores orientadores crônico (50 µg/L) e agudo (300 µg/L) da NOAA.



Este retrabalhamento constante no ambiente marinho com novas entradas de material em condições hidrológicas favoráveis na bacia do Rio Doce, tende a refletir tais variações de parâmetros em outros ambientes costeiros abrangidos pelo PMBA.

As características geomorfológicas e geoquímicas ao longo das praias estudadas entre o litoral de Serra e São Mateus permitem compartimentar a costa em três setores, a saber: Compartimento A: compreende as praias associadas aos terraços de abrasão entre o litoral de Serra e Aracruz; Compartimento B: compreende as praias da planície sul e proximidades da desembocadura do rio Doce, litoral de Aracruz e Linhares; e Compartimento C: compreende as praias de Degredo a Guriri, litoral de Linhares e São Mateus. Esta compartimentação imprime, conseqüentemente, os diferentes graus de impacto do rejeito de lama ao longo do litoral em estudo e ainda explica a distribuição transversal do material, i.e. ambiente marinho – praia – dunas (restinga), e auxilia na compreensão dos processos dos estuários – manguezal.

Devido à registros fotográficos nos primeiros dias após o alcance do litoral de Regência, que mostravam a cor das águas nas proximidades da linha de costa fica comprovado que o rejeito aportado à plataforma continental, foi mobilizado pelas ondas e atingiram a praia emersa pelos processos de espraiamento das ondas (Figura 11). Outros registros fotográficos indicam ainda que passados seis meses (junho de 2016) as praias próximas à desembocadura ficaram mais planas, permitindo que a vegetação adjacente à praia sofresse inundação (Figura 11).

Com o passar do tempo, devido às características granulométricas do material aportado (essencialmente fina), o material lamoso pôde ser preferencialmente encontrado somente nas porções da antepraia ao longo do perfil praial, onde as maiores profundidades e condições mais calmas do ponto de vista hidrodinâmico (quando comparadas às porções onde os processos de águas rasas são predominantes - arrebentação e espraiamento), permitem a deposição do material fino, transportados transversalmente da praia emersa. Apesar de condições hidrodinâmicas mais calmas da antepraia, os teores de lama encontrados são altos para estarem aquém do perfil de fechamento da praia, zona dinâmica da praia, o que revela aporte recente e/ou em grandes volumes.

Figura 11: (A) Lama na arrebatção na praia de Regência. (B) Aplainamento do perfil praiial e inundação da praia (transposição das ondas alcança a vegetação), praia de Regência em junho de 2016. Observa-se arrebatção das ondas sobre as barras da desembocadura do rio Doce ao fundo.

(A)



(B)



Fonte: A) <http://g1.globo.com/espírito-santo/noticia/2015/11/surfistas-lamentam-proibicao-de-surf-em-regencia-depois-da-lama.html>. 29/11/2015. Foto: Ricardo Moraes/Reuters/Reuters. B) Fonte: Jacqueline Albino.

Ao longo do monitoramento foi possível observar que, com alterações das condições sazonais das ondas e o incremento da atuação destas em mobilizar o fundo, este material é frequentemente removido para a praia emersa e pode alcançar a berma alta e/ou a porção do cordão ou duna adjacente, onde se encontram o ecossistema de restingas. Considera-se ainda que sob eventos mais energéticos de onda, haja troca ou mesmo aporte de sedimentos da plataforma (ambiente marinho) para a antepraia, já que em alguns setores do monitoramento, houve semelhanças dos teores de lama e de metais, onde as estações monitoradas pela praia se apresentam geograficamente próximas às monitoradas pelo ambiente marinho. O processo

de distribuição e alcance do material, as trocas transversais de sedimentos ao longo deste sistema (antepraia - praia – restinga) e as condições oceanográficas para a deposição de lama na antepraia dependem dos processos costeiros atuantes ao longo do litoral, os mesmos responsáveis pela compartimentação costeira.

Considerando a localização da desembocadura do rio Doce, e o predomínio da deriva litorânea residual deste setor do litoral ser no sentido sul-norte (Oliveira et al, 2015), o potencial de transporte e deposição do material lamoso segue neste sentido ao norte da desembocadura do rio. É interessante destacar que ao longo da evolução geomorfológica do rio Doce, a atuação desta deriva explica a configuração da linha de costa, mais saliente ao norte, e a morfologia e tipologia das praias (Martin et al, 1993). De sul para norte, as praias apresentam a diminuição da declividade associada ao afinamento do diâmetro das areias (Short e Wright, 1984; Albino et al., 2016)

Considerando a fração fina do material do rejeito, quatro anos após o acidente, a presença deste material é verificada preferencialmente na antepraia do litoral norte, praias de Degredo a Guriri, e ainda nas praias adjacentes à desembocadura do rio Doce, praias de Regência e Povoação.

Sendo o litoral norte o receptor do sedimento transportado pela deriva litorânea, é no Compartimento C que são encontrados os maiores valores de alguns metais como Fe, Mn e Al. Destacam-se ainda nesta porção as altas concentrações de Cr, Co, Cu, Ni e V, superiores as dos outros compartimentos e dos valores de referência estabelecidos, o que sugere como fonte preferencial o aporte do rio Doce e o transporte preferencial para norte, a partir da antepraia (Figura 12 e Figura 13).

Vale ressaltar que, independente dos processos de transporte de sedimentos, outros metais se apresentaram com teores representativos, como As e Mn e mesmo Al e Fe, ao longo de todo litoral (Figura 12 e Figura 13). Contudo estes dois últimos no compartimento ao norte apresentaram os teores mais elevados. A distribuição espacial destes metais sugere uma associação dos mesmos com características mineralógicas e petrográficas da geologia regional, como a relação de arsênio com os sedimentos carbonáticos presentes na antepraia ao sul e ao longo de toda a plataforma continental (Mirlean et al., 2012) e em função do aporte do Rio Doce (Cagnin et al, 2017), mas com maiores deposições onde os sedimentos lamosos são preferencialmente depositados. O Cd, por sua vez, indica estar associado às areias das praias e à restinga, não tendo associação com a recente lama depositada.

Descrevendo a distribuição do Al, por exemplo, fica evidente sua concentração no compartimento norte e nas adjacências da desembocadura (Figura 12 e Figura 13). Observaram-se teores acima dos índices de referência deste metal na antepraia e nos manguezais deste compartimento. Sua presença é também observada na praia e nas restingas, contudo em menor quantidade, o que pode indicar sua associação com a fração lamosa, presente na antepraia e estuários. Este

material, quando mobilizado pelas ondas, pode ser transportado em suspensão por correntes de deriva, correntes oscilatórias (transversais) e por correntes de maré adentrando estuários e atingindo os manguezais.

O material proveniente do rio Doce e encontrado na antepraia pode ser remobilizado nos eventos de tempestades, assim como o material depositado próximo à foz conforme descrito por Quaresma et al. (2015), tornando-se fonte constante de contaminação crônica. Os autores identificaram que os sedimentos recentes com densidade abaixo de 1200 kg/m^3 apresentam alto potencial de mobilidade e seu transporte está correlacionado com os ventos predominantes na região. Isto é, no período de verão com incidência dos ventos de nordeste e de norte, estes sedimentos depositados pelo rio Doce são transportados para o sul e no inverno com os ventos de sul o transporte se dá em direção ao norte. Neste sentido, a sazonalidade meteoceanográfica pode explicar a distribuição de Al no estuário do rio São Mateus. A concentração deste elemento se apresentou mais elevada nas amostras de inverno quando comparadas com aquelas de verão. Efeito inverso foi registrado nas amostras dos rios Piraquê-Açú e Mirim. Já no estuário mais ao norte, no rio Caravelas, a frequência de ocorrência de níveis acima dos limites de referência foi maior e mais frequente (Figura 12). Contudo, os dados de metais para os manguezais em Caravelas não podem ser, exclusivamente, correlacionados ao transporte via correntes marítimas, por mudanças vinculadas ao padrão de circulação atmosférica. A fonte dos metais pode estar associada à fatores locais ou relacionados à bacia do Rio Caravelas.

Na restinga, é importante destacar que a deposição de Al, e ainda de outros metais, pode ter associação com os processos de inundação da praia por ocasião de ondas mais altas (Figura 12). Tendo a praia recebido sedimentos finos ao longo do seu perfil houve o rebaixamento da altura das praias adjacentes ao rio Doce, e as praias ao norte apresentam naturalmente menores inclinações associadas à sua tipologia morfodinâmica. Ondas mais altas seriam responsáveis por espraamentos mais altos e completa inundação da praia. A ressuspensão do material retido nos sedimentos próximos à costa, principalmente na isóbata de 10 m, por ondas mais energéticas pode aumentar a concentração de elementos potencialmente tóxicos na coluna d'água e participar do espraimento. Desta forma, com a entrada da tempestade tropical Iba e das frequentes frentes frias, registrou-se as maiores concentrações dos diversos metais, inclusive Fe, na porção alta da praia. O alcance das ondas na base dos cordões litorâneos recobertos por vegetação de restinga foi ainda evidenciado nos processos de escarpamento e erosão dos perfis localizados nas adjacências do rio e alguns da porção norte. Contudo, os valores de metais nos solos da restinga devem ser analisados com cuidado, uma vez que não existem valores de referência para solos deste bioma no Espírito Santo. Os níveis adotados aqui para avaliar uma possível contaminação por elementos potencialmente tóxicos são valores de referência da CONAMA 420/2009 e valores médios para solos do Espírito Santo descritos por Paye et al. (2010).

A morfologia da praia e antepraia pode contribuir para as maiores concentrações de alguns elementos, principalmente de Fe e Al, nas parcelas localizadas no ponto 3 do estuário do rio São Mateus, mais interiorizado, uma vez que a modificação na declividade da praia e antepraia pode favorecer o maior alcance horizontal das correntes de maré, que aliado à velocidade da corrente alcança grandes extensões a montante. Além disso, a diminuição da pluviosidade deste rio em função da variabilidade climática também acentua o transporte de materiais para o estuário.

O setor ao sul do compartimento B, excluindo a localização dos perfis imediatamente adjacentes à desembocadura fluvial do rio Doce, é o setor onde os menores teores de Al e dos diversos metais, potencialmente provenientes do aporte do rio Doce como Cr, Co, Cu e Ni, apresentando teores abaixo dos índices de referência (Figura 12 e Figura 13). Este compartimento praiar pode ser classificado como de alta resiliência à contaminação: os perfis apresentam alta mobilidade sazonal, compostos por areias grossas e com maior porosidade e velocidade de infiltração e exfiltração das águas do espraiamento. A baixa capacidade de retenção de metais nos sedimentos pode se refletir nos baixos teores de metais associados à lama, na restinga, alcance ainda limitado pela elevada altura da praia e conseqüente baixo potencial de inundação. Como apresentado anteriormente exceções são as concentrações altas de Cd, Mn e As, que apresentam contribuição regional.

A hipótese de contribuição regional fica mais evidente no compartimento A, das praias associadas aos terraços de abrasão. A baixa ou mesmo ausência de lama da antepraia e as barreiras físicas representadas pelos próprios terraços na troca longitudinal de sedimentos (Albino et al., 2016) e nas trocas transversais (Anfuso et al., 2003), seriam limitantes para o alcance dos sedimentos provenientes do rio Doce nas praias deste setor e, conseqüentemente, nos ecossistemas da restinga. Nos manguezais deste setor, as barreiras seriam responsáveis, no mínimo, por teores mais baixos e limitados, resultantes do transporte das partículas em suspensão pelas correntes costeiras. Existe a possibilidade, sob certas condições de ondas, da lama ser transportada em suspensão pelas correntes costeiras para a plataforma e antepraia sul, mas este fato não pôde ser comprovado ao longo do monitoramento. Somente por uma ocasião a lama foi encontrada em torno de 5 m de profundidade depositada num local abrigado em meio as depressões da rugosidade dos terraços. Apesar das limitações do transporte de norte para sul e entre antepraia-praia, As e Mn apresentam teores acima dos índices de referência em toda a costa, mas especialmente na parte emersa da praia do setor A com menores ocorrências na parte emersa dos outros setores (Figura 12 e Figura 13). Elementos como Al, Cd e Cr, potencialmente associados aos rejeitos, estão em concentrações altas e acima dos níveis de referência somente nos manguezais do compartimento A.

No estuário do rio Piraquê foram encontrados os maiores valores acima dos níveis de referência de metais, entre eles Fe e Al. Os metais dissolvidos na coluna d'água possuem maior capacidade de dispersão que os sedimentos, tendo sido reportadas altas concentrações dos mesmos no

corpo hídrico durante o monitoramento realizado logo após a chegada da lama no litoral a partir de novembro de 2015 com leve declínio nas amostragens de julho de 2016. Tal aspecto pode contribuir para a contaminação observada nos pontos 1 e 2 nas florestas de manguezal do sistema estuarino Piraquê-Açú-Mirim.

A não correspondência entre os valores de metais com as praias adjacentes neste setor, seja na porção emersa ou na antepraia, pode ainda sugerir a proveniência continental/fluvial destes metais, além da contribuição local dos carbonatos e da própria Formação Barreiras (Rodrigues, 2017) nas altas concentrações de As e Mn, o que pode ser assumido como uma segunda província e fonte de metais para o compartimento em questão. Questiona-se aqui que caso o aporte sedimentar viesse de norte ou da antepraia e, associado ao rejeito de lama, traços do transporte no ambiente praiial seriam registrados. Como mencionado acima teores mais elevados foram observados em apenas uma situação, neste compartimento, em meio as depressões dos terraços de abrasão.

A contaminação pelos metais e a resposta das praias podem ser enquadradas nos três compartimentos costeiros previamente apresentados. No Compartimento A, acredita-se que a contaminação esteja associada ao próprio ambiente tendo como fonte os rios Piraquê- Açú e Piraquê-Mirim e os terraços de abrasão. Já nos Compartimentos B e C, nas adjacências do rio Doce, os metais encontrados devem-se principalmente ao aporte do rio que foi potencialmente incrementado após a chegada do rejeito ao litoral. Com o transporte de sedimentos predominante para o norte e possibilidade de deposição de lama na antepraia, estes são os setores que apresentam as maiores concentrações de metais. Já no compartimento B, a alta mobilidade das praias reflete na exportação da fração lama e na alta resiliência das praias no que se refere à contaminação dos metais.

Haja vista os resultados díspares observados para as áreas de manguezais ao sul (Barra do Riacho, Costa das Algas e Estuário do Piraquê) e ao norte (Urussuquara, Barra Nova e São Mateus) nos períodos de verão/inverno, acredita-se que haja ativo transporte dos sedimentos finos e estes representam fonte constante de contaminação. Apesar de não haver estações de monitoramento nas restingas deste setor, os processos de inundação de praia, com alcance e solapamento dos cordões vegetados, são frequentes e podem estar contaminando este ecossistema. As praias associadas aos terraços de abrasão são mais estreitas e o substrato rochoso empilha as ondas junto à costa (Jakson e Cooper, 2009) causando a inundação, que é mais intensa sob condições de frentes frias.

Figura 12: Frequência de ocorrência de concentrações acima de limites de referência dos elementos potencialmente tóxicos na região costeira. Os diagramas circulares representam a frequência de ocorrências agrupadas por setores em praias e restingas. Manguezais foram representados individualmente. Observar a maior concentração de elementos como Al, Cr, Ni e V na região da antepraia do setor norte e ampla distribuição de As e Mn. A, B e C são os compartimentos costeiros adotados e seus limites geográficos.

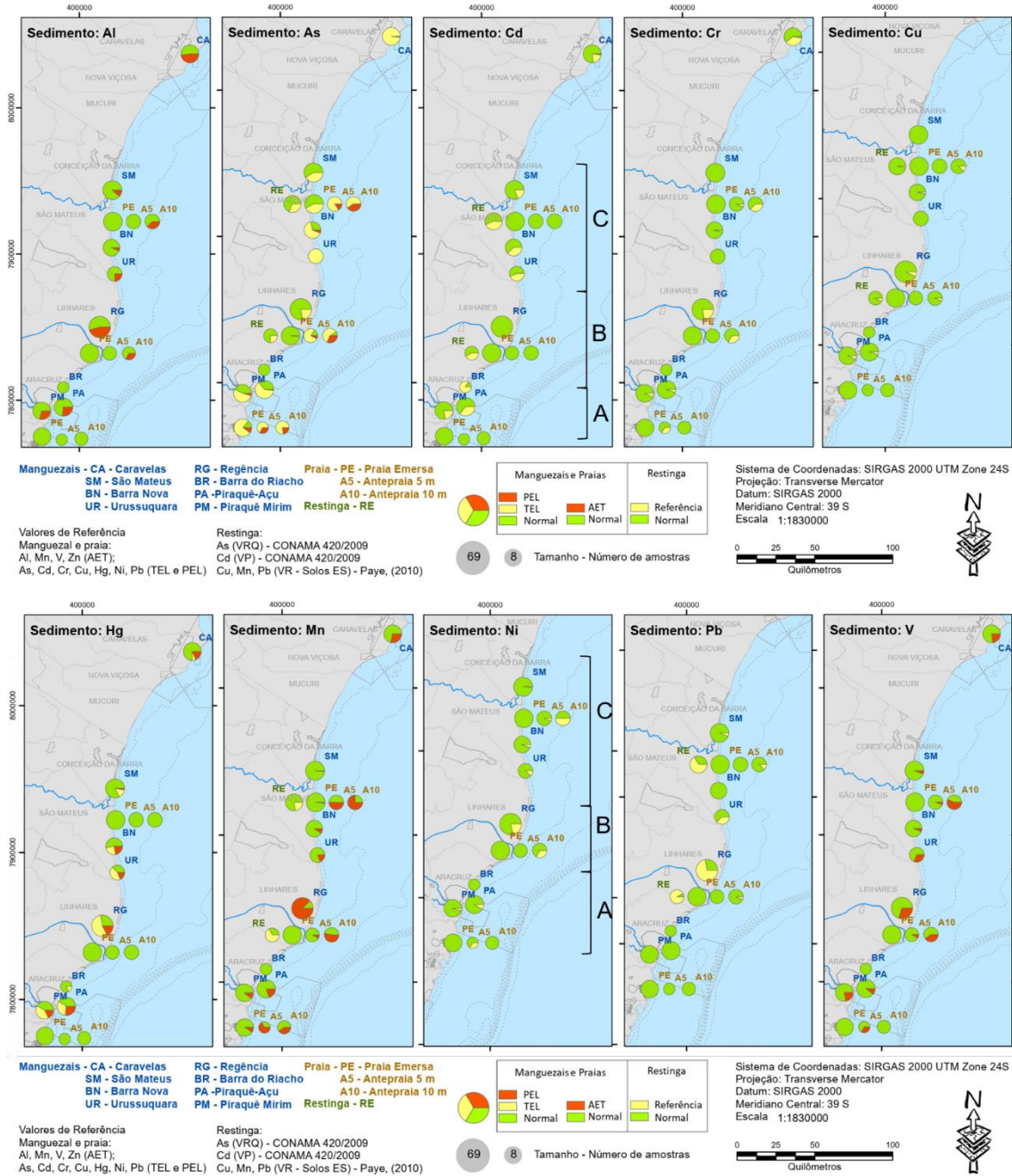
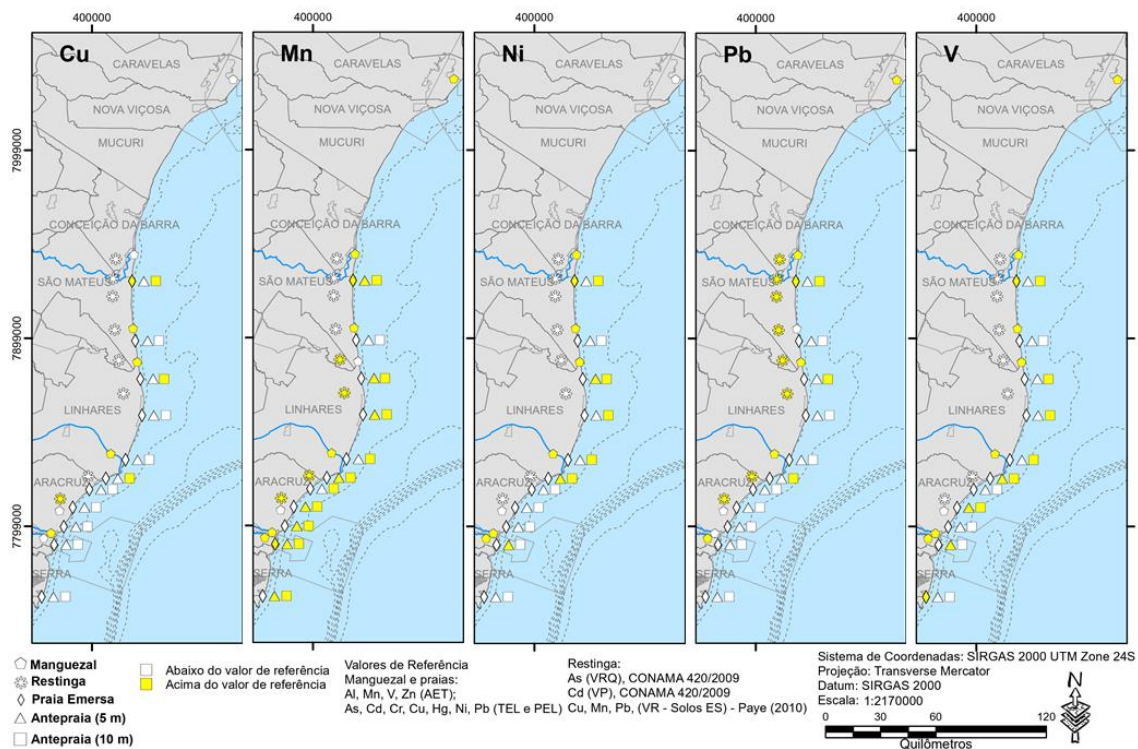
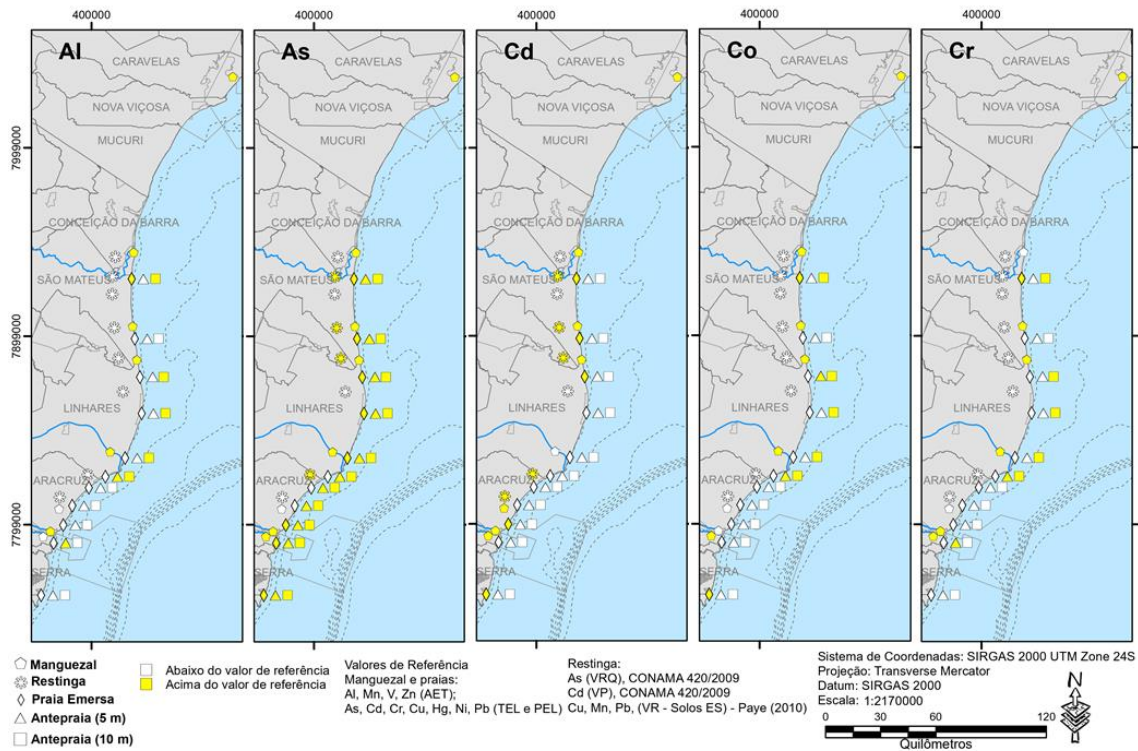


Figura 13: Presença de elementos potencialmente tóxicos no ambiente costeiro, distribuição de valores acima dos limites de referência. Presença verificada por estação amostral durante o monitoramento entre setembro de 2018 e agosto de 2019. Notar a concentração de alguns elementos como Al, Co, Cr e V ao norte do rio Doce. Ampla distribuição de As e Mn.



2 REFERÊNCIAS

ALBINO, J.; CONTTI NETO, N.; OLIVEIRA, T. C. A. The beaches of Espírito Santo. In: SHORT, A. D., KLEIN, A. H. F. (Eds). **Brazilian beach systems**. Sydney: Springer, 2016, p. 333-361.

ANFUSO, G., MARTÍNEZ DEL POZO, J.A., GRACIA, F.J., LÓPEZ-AGUAYO, F. Long-shore distribution of morphodynamic beach states along an apparently homogeneous coast in SW Spain. **Journal of Coastal Conservation**, v. 9, n. 1, p. 49-56, 2003.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). Encarte especial sobre a qualidade das águas do Rio Doce após 3 anos do rompimento da Barragem de Fundão: 2015-2018./ Instituto Mineiro de Gestão das Águas.--- Belo Horizonte, **Instituto Mineiro de Gestão das Águas**, 2018. 64p. 2018.

JACKSON, D. W. T.; COOPER, J. A. G. Geological control on beach form: accommodation space and contemporary dynamics. **Journal of Coastal Research**, p. 69-72, 2009.

MARTIN, L.; SUGULO, K.; FLEXOR, J. M. As flutuações de nível do mar durante o Quaternário Superior e a evolução geológica de "deltas" brasileiros. 1993.

MIRLEAN, N. et al. Coralline algae and arsenic fixation in near shore sediments. **Regional Studies in Marine Science**, v. 3, p. 83-88, 2016.

OLIVEIRA, T.C.A, ALBINO, J., VENANCIO, I.D. Littoral longshore sediment transport along the deltaic plain of Rio Doce. **Quaternary Environmental Geosciences**, v. 6, n. 1, p. 20–25, 2015.

OLIVEIRA, K. S. S.; QUARESMA, V. S. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 78, p. 101-115, 2017.

PAYE, H. S., MELLO, J. W. V., ABRAHÃO W. A. P., FERNANDES FILHO, E. I., DIAS, L. C. P., CASTRO M. L. O., MELO, S. B., FRANÇA, M. M. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 2041-2051, 2010.

PMQQS - Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos. **Relatório Parcial. Fundação Renova**. Junho, 2018.

QUARESMA, V D. S. et al. Modern sedimentary processes along the Doce river adjacent continental shelf. **Brazilian Journal of Geology**, v. 45, n. 4, p. 635-644, 2015.

RODRIGUES, D. R. P. Metais dissolvidos no Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim e a composição geoquímica de rochas e solos da bacia hidrográfica adjacente, Aracruz – ES. Programa de pós-graduação em Oceanografia Ambiental (PPGOAm) da Universidade Federal do Espírito Santo. **Dissertação de Mestrado**. 95 p. 2017.

SHORT, A. D.; WRIGHT, L. D. Morphodynamics of high energy beaches: an Australian perspective. **Coastal geomorphology in Australia**, p. 43-68, 1984.

3 APÊNDICE

Neste documento são apresentados os mapas de frequência de ocorrência, tanto para o ambiente dulcícola quanto para o marinho, somente para os parâmetros que apresentaram valores acima dos orientadores pela CONAMA 357/05 ou NOAA (agudo e crônico).

- **Ambiente dulcícola**

Figura 1: Qualidade da água nos ambientes dulcícolas em relação a frequência de ocorrência (%) para cianobactérias, fósforo total e oxigênio dissolvido referente aos valores orientadores da Resolução CONAMA 357/05.

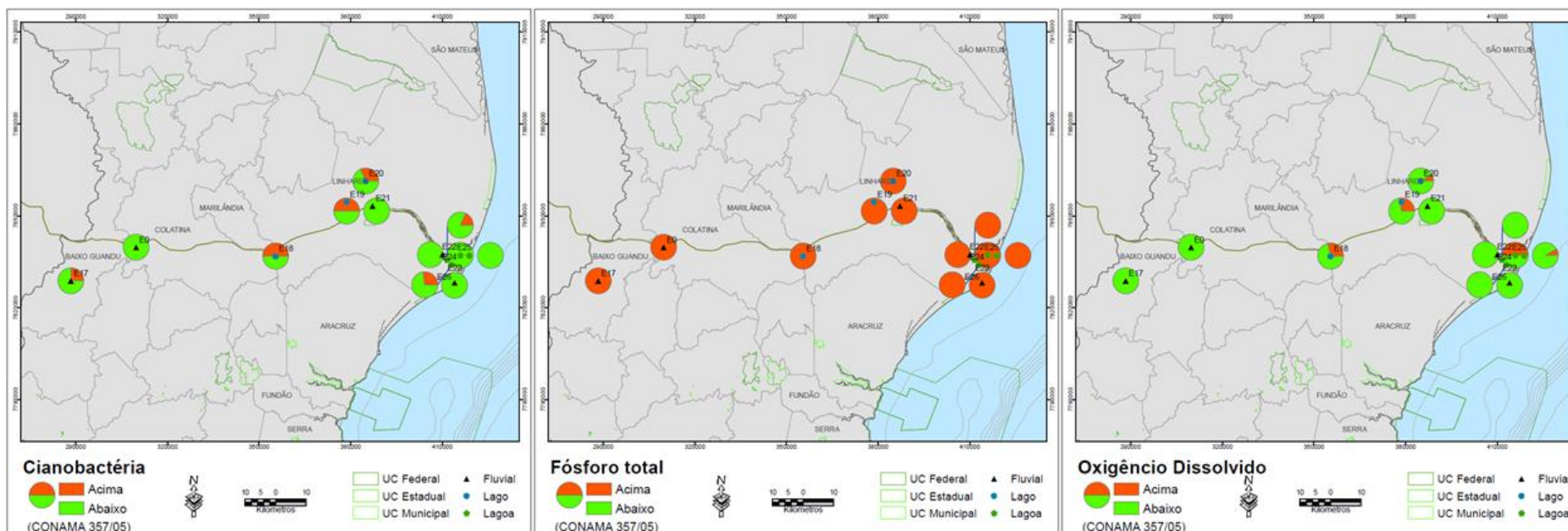


Figura 2: Qualidade da água nos ambientes dulcícolas em relação a frequência de ocorrência (%) para cobre, ferro e manganês dissolvidos referente aos valores orientadores da Resolução CONAMA 357/05.

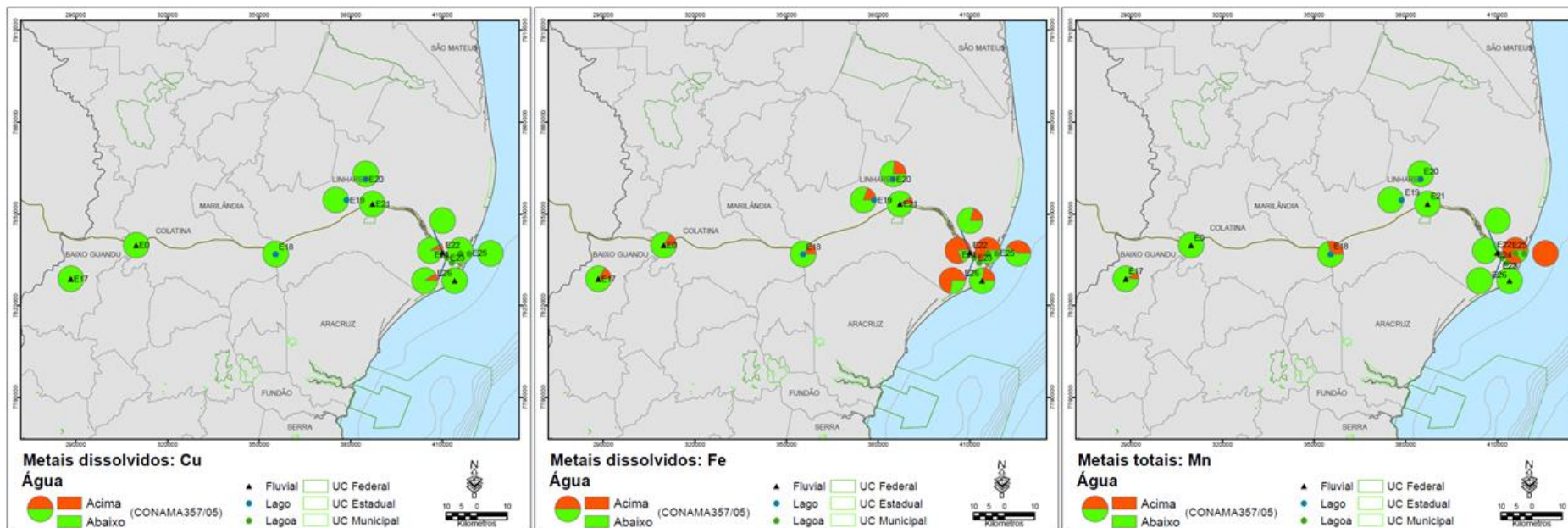


Figura 3: Qualidade da água nos ambientes dulcícolas em relação a frequência de ocorrência (%) para pesticidas referentes aos valores orientadores da Resolução CONAMA 357/05.

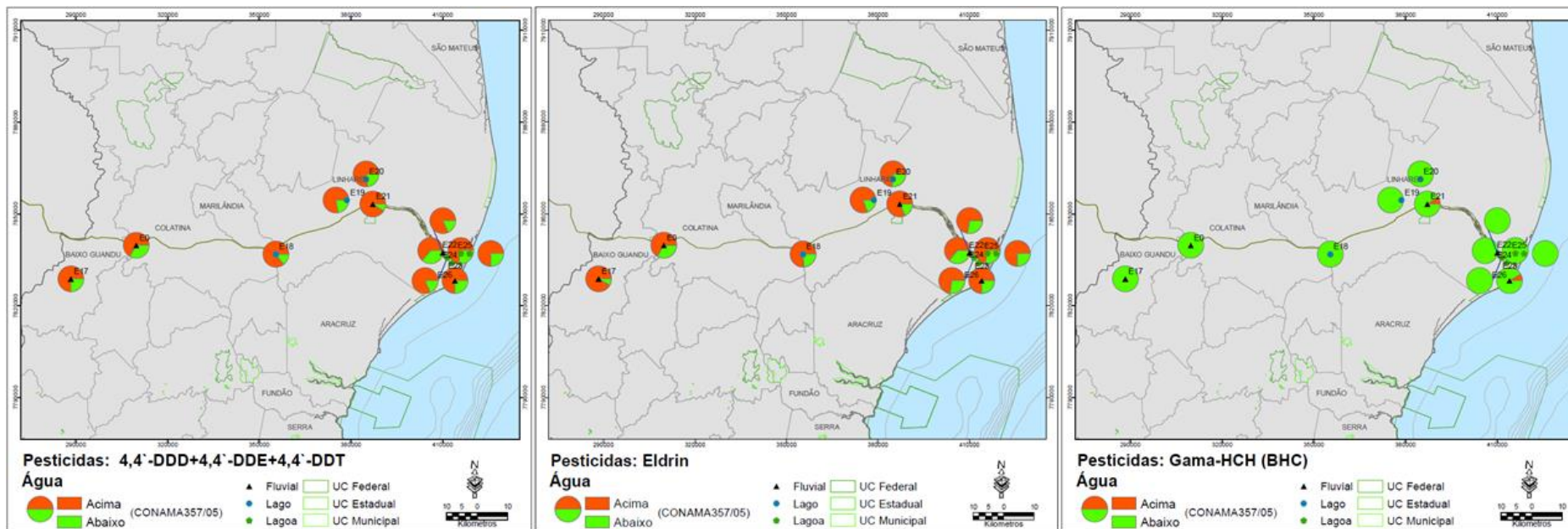


Figura 4: Qualidade da água nos ambientes dulcícolas em relação a frequência de ocorrência (%) para pesticidas referentes aos valores orientadores da Resolução CONAMA 357/05.

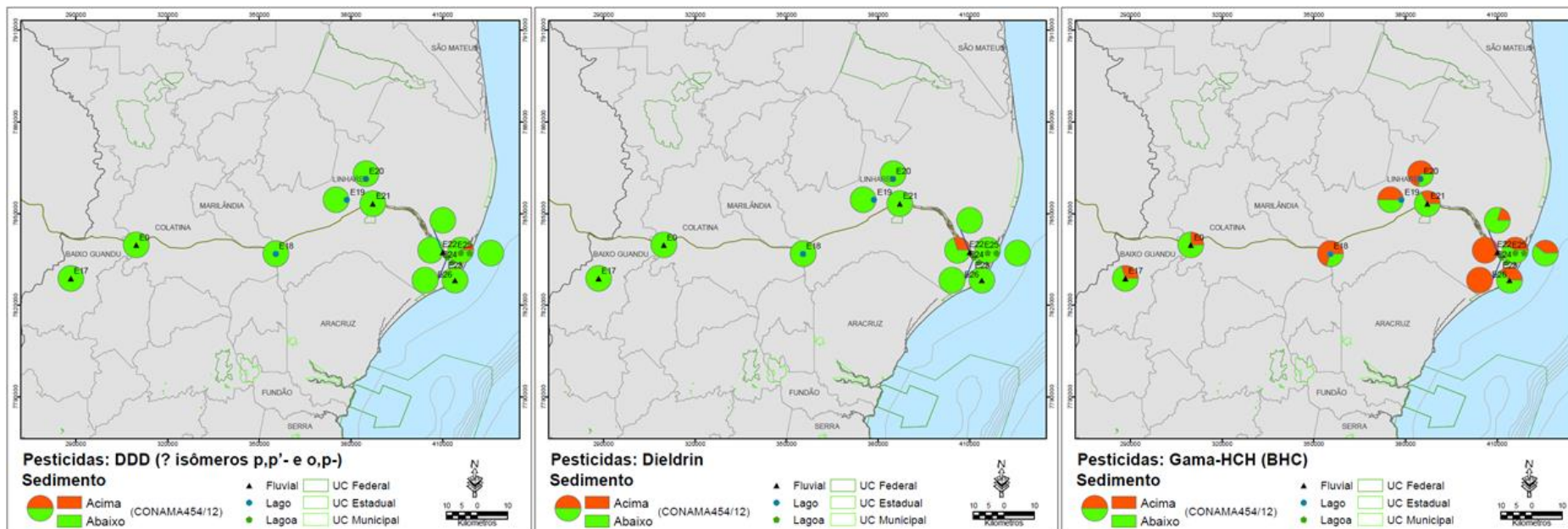


Figura 5: Qualidade do sedimento superficial nos ambientes dulcícolas em relação a frequência de ocorrência (%) para arsênio, cromo e níquel referente aos valores orientadores da Resolução CONAMA 357/05.

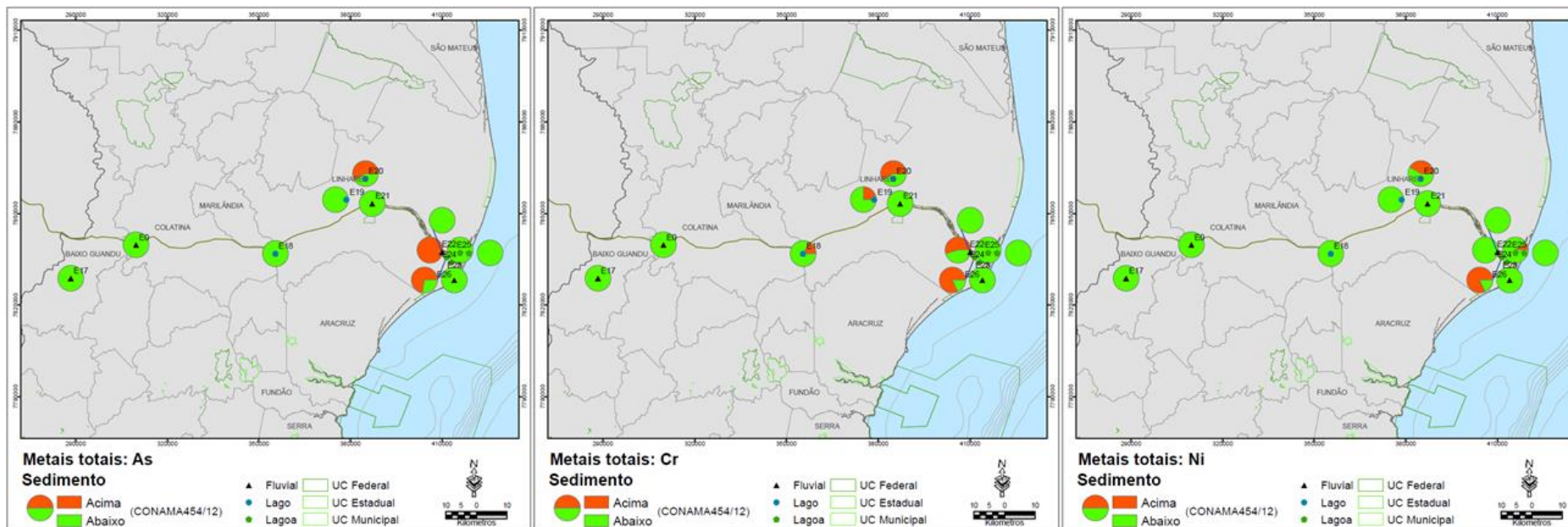


Figura 6: Qualidade do sedimento superficial nos ambientes dulcícolas em relação a frequência de ocorrência (%) para arsênio, cromo e cobre referente aos valores orientadores da NOAA.

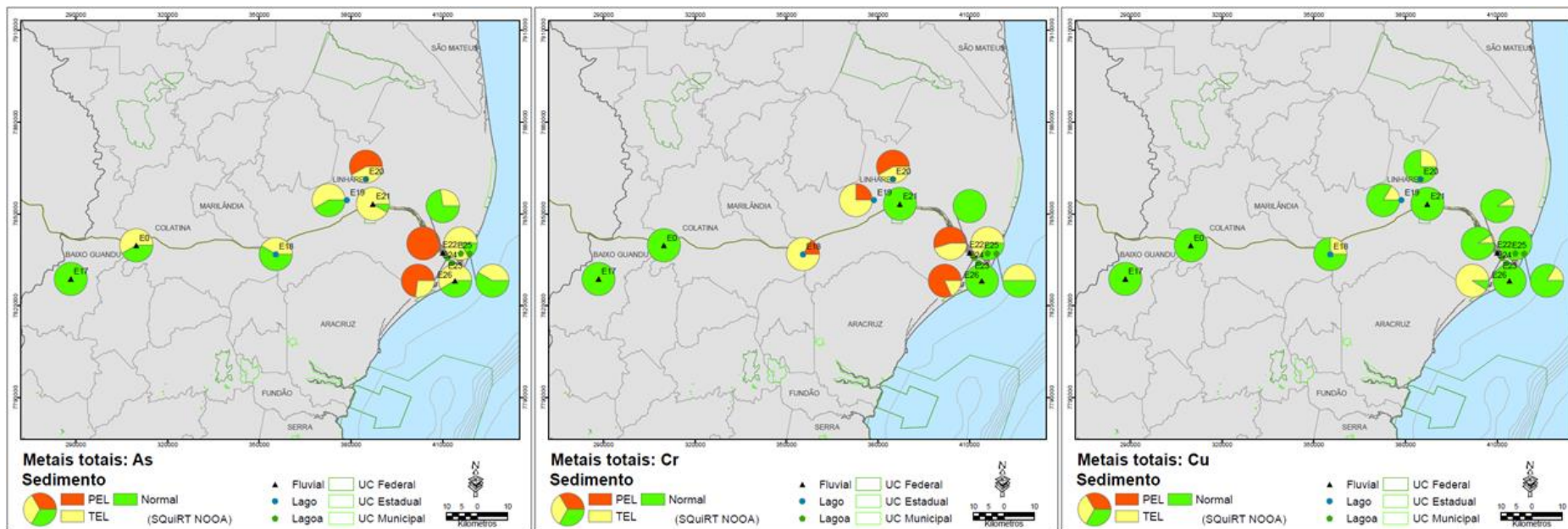


Figura 7: Qualidade do sedimento superficial nos ambientes dulcícolas em relação a frequência de ocorrência (%) para níquel, chumbo e zinco referente aos valores orientadores da NOAA.

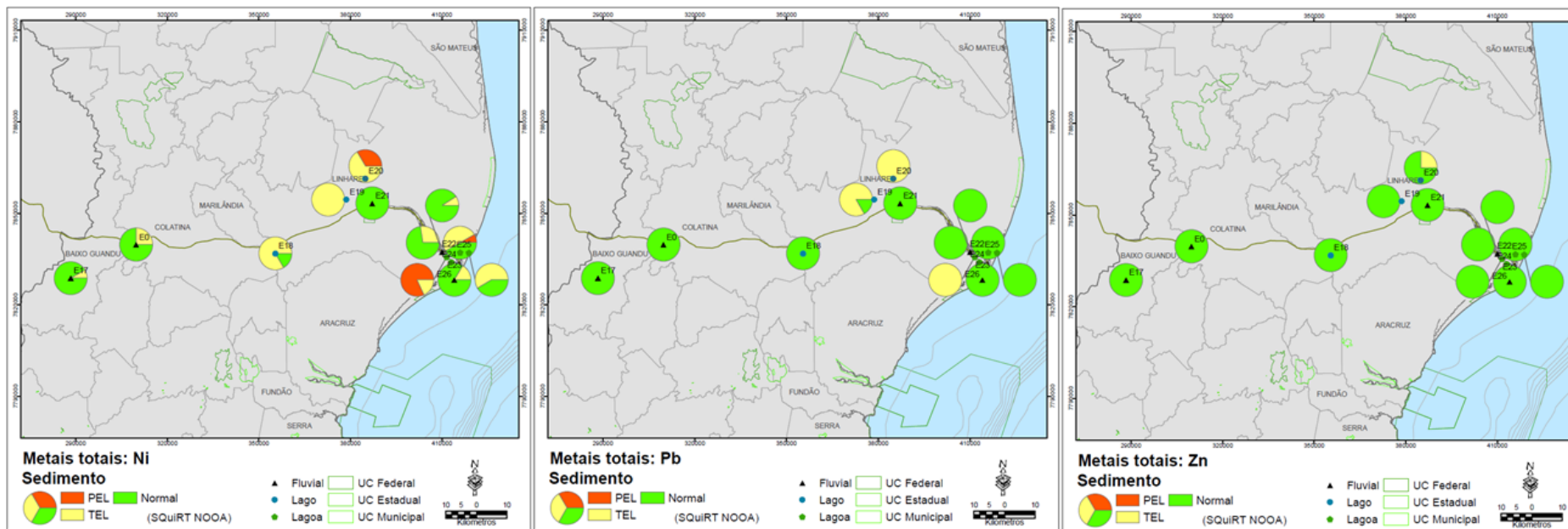


Figura 8: Qualidade do sedimento nos ambientes dulcícolas em relação a frequência de ocorrência (%) para pesticidas referentes aos valores orientadores da NOAA.

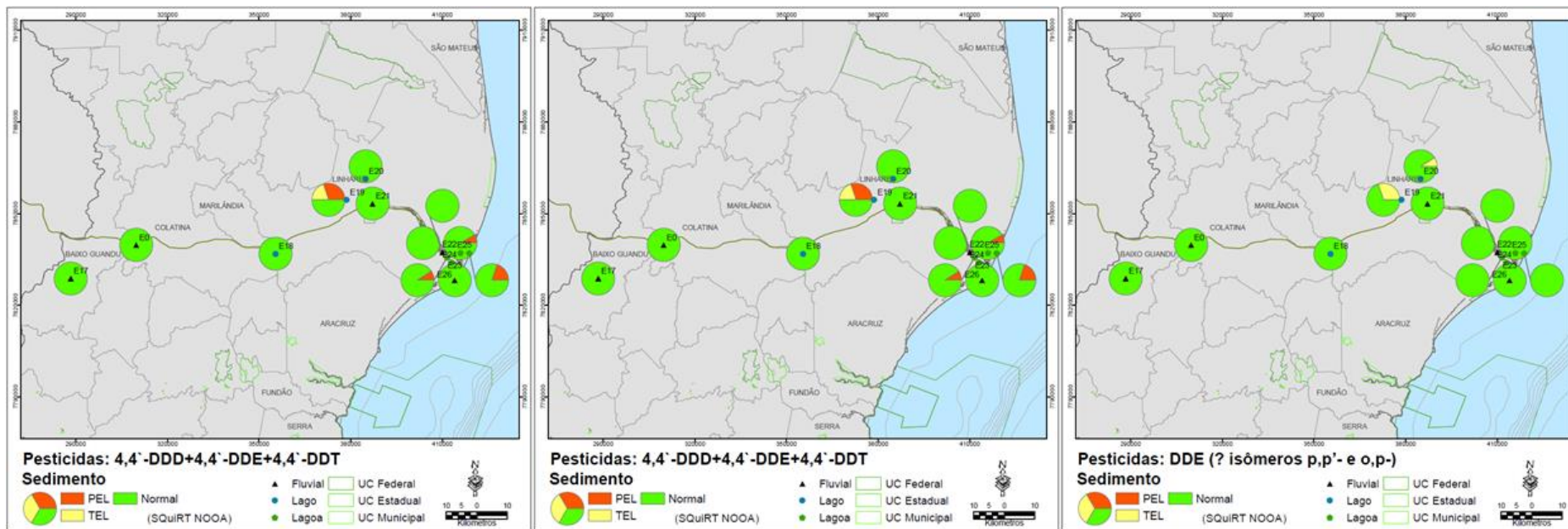
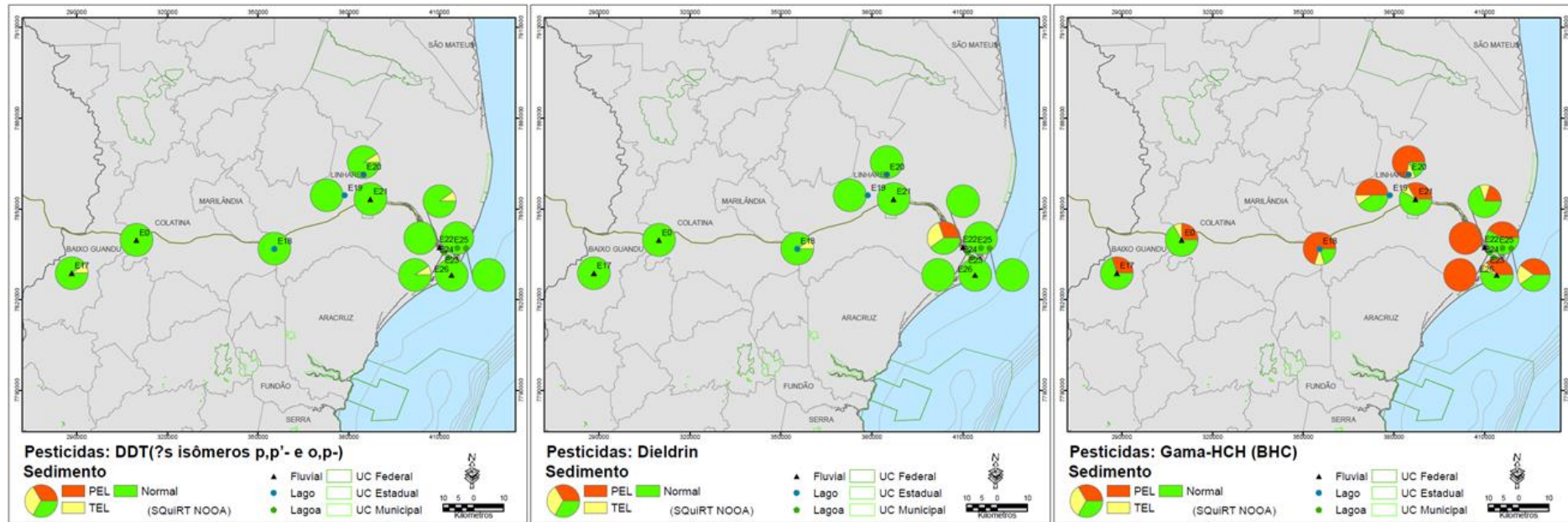


Figura 9: Qualidade do sedimento nos ambientes dulcícolas em relação a frequência de ocorrência (%) para pesticidas referentes aos valores orientadores da NOAA.



- **Ambiente Marinho**

Figura 10: Qualidade da água superficial e de fundo em relação a frequência de ocorrência (%) de nitrato referente a dados pretéritos (FIGUEIREDO et al., 2016).

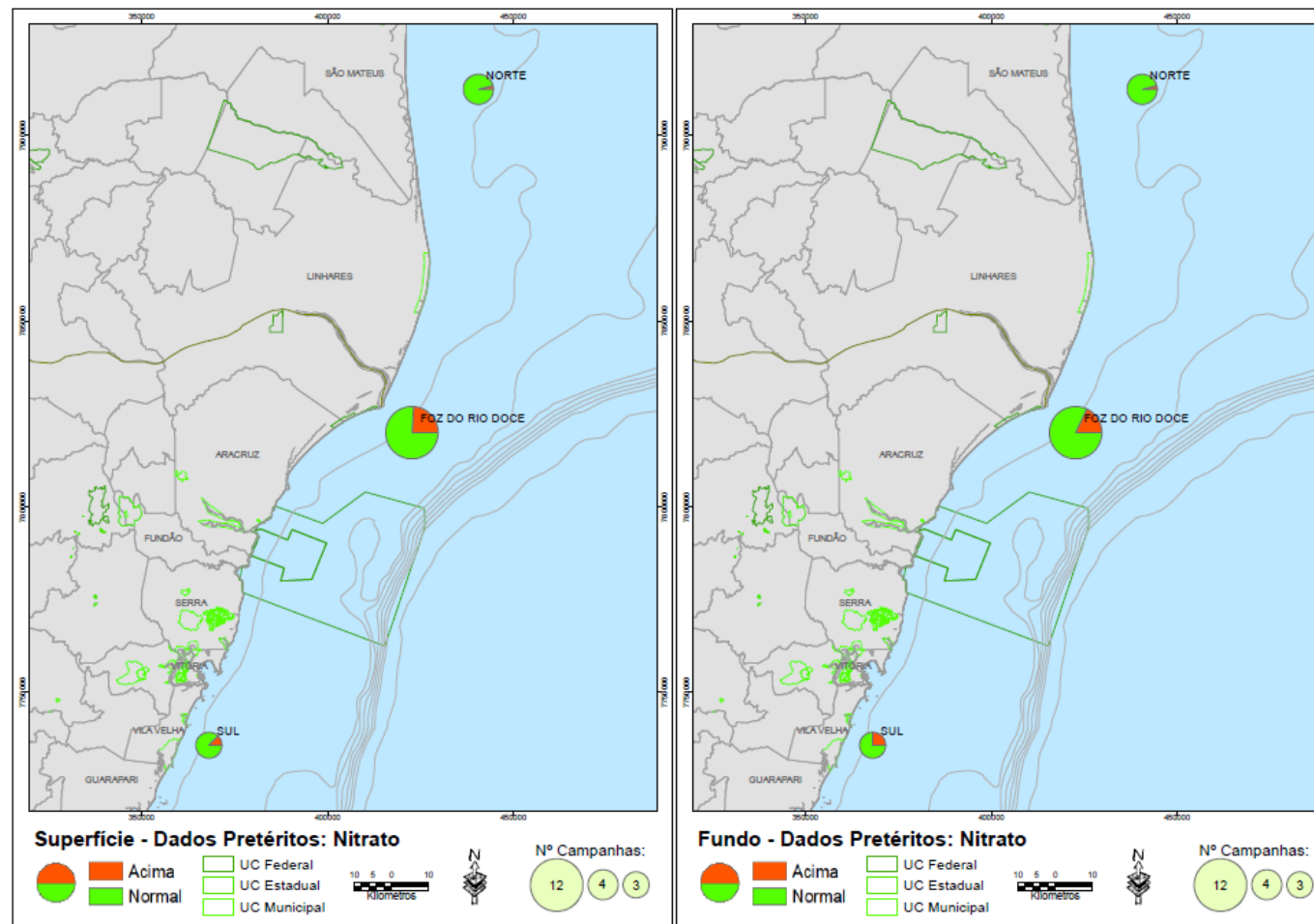


Figura 11: Qualidade da água superficial e de fundo em relação a frequência de ocorrência (%) de nitrito referente a dados pretéritos (FIGUEIREDO et al., 2016).

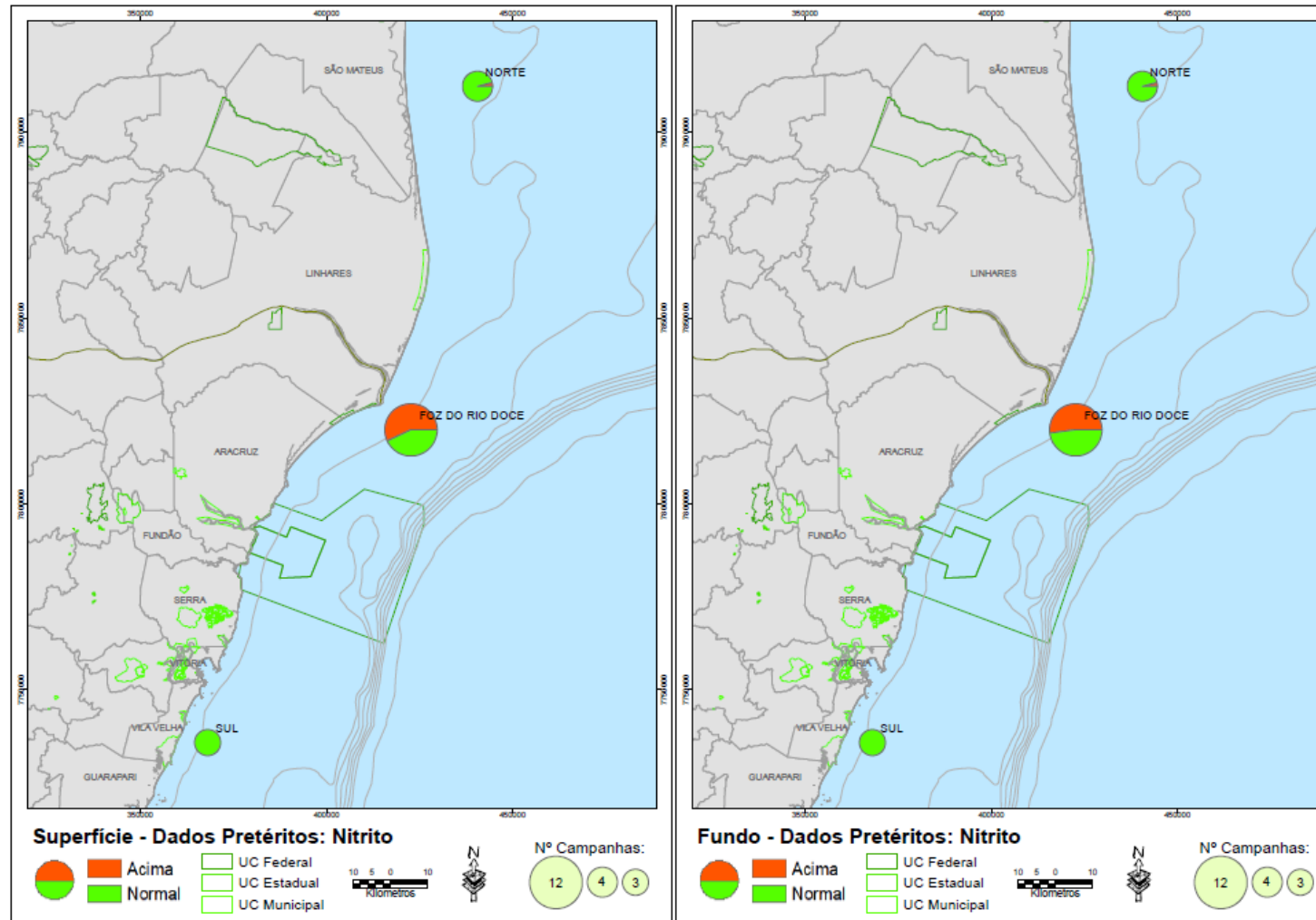


Figura 12: Qualidade da água superficial e de fundo em relação a frequência de ocorrência (%) de nitrogênio amoniacal referente a dados pretéritos (FIGUEIREDO et al., 2016).

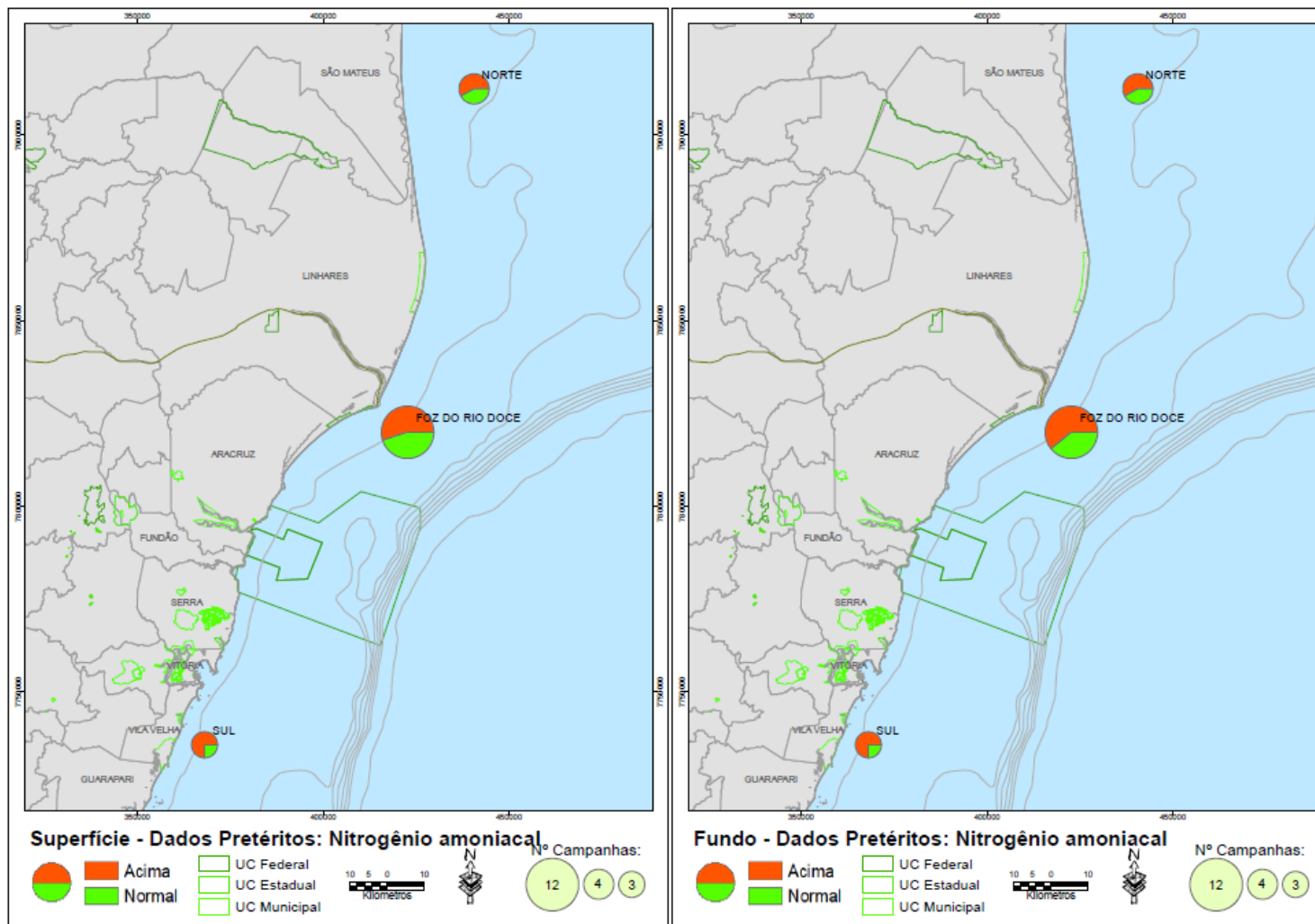


Figura 13: Qualidade da água superficial e de fundo em relação a frequência de ocorrência (%) de ortofosfato referente a dados pretéritos (FIGUEIREDO et al., 2016).

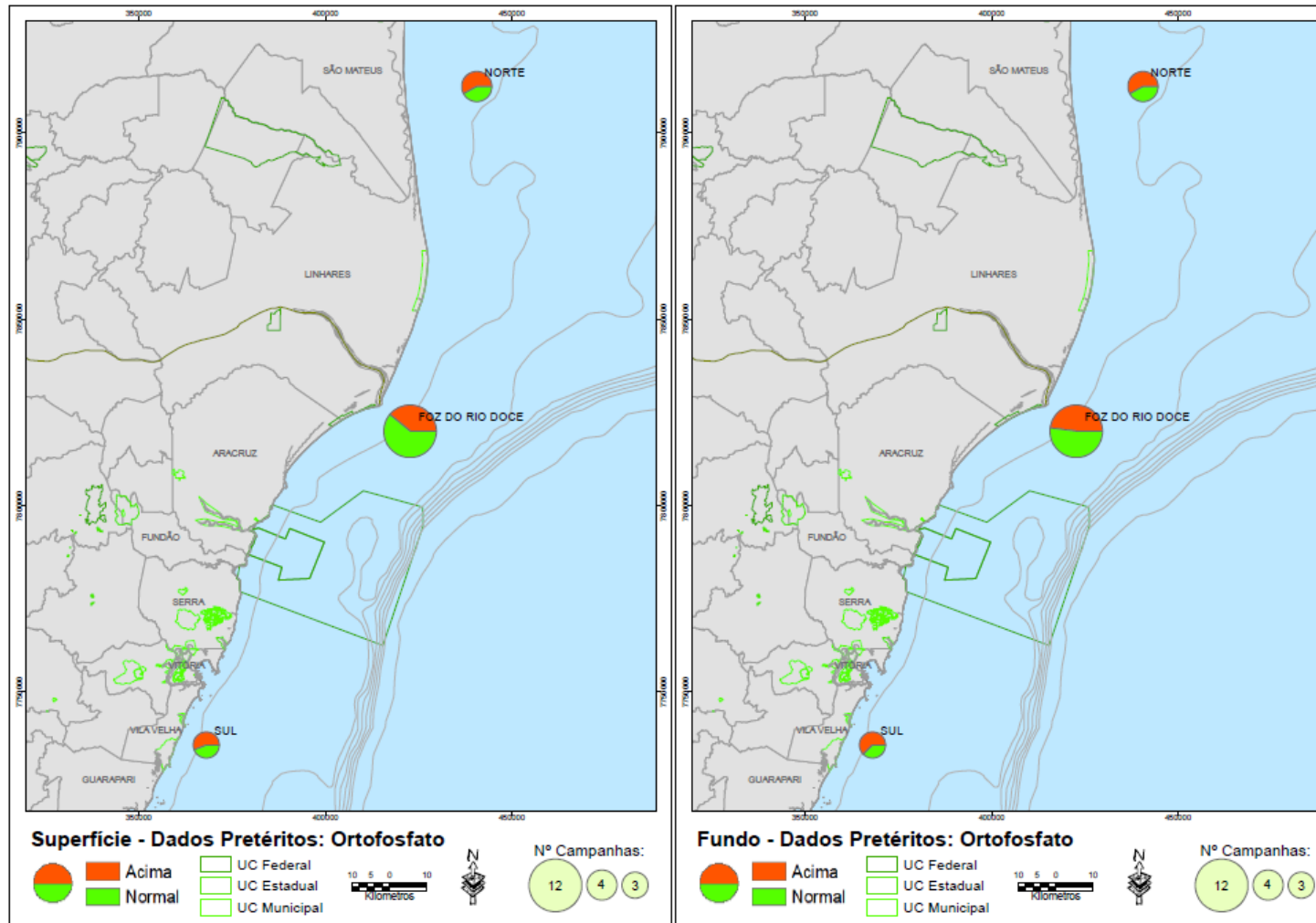


Figura 14: Qualidade da água superficial e de fundo em relação a frequência de ocorrência (%) de silício dissolvido referente a dados pretéritos (FIGUEIREDO et al., 2016).

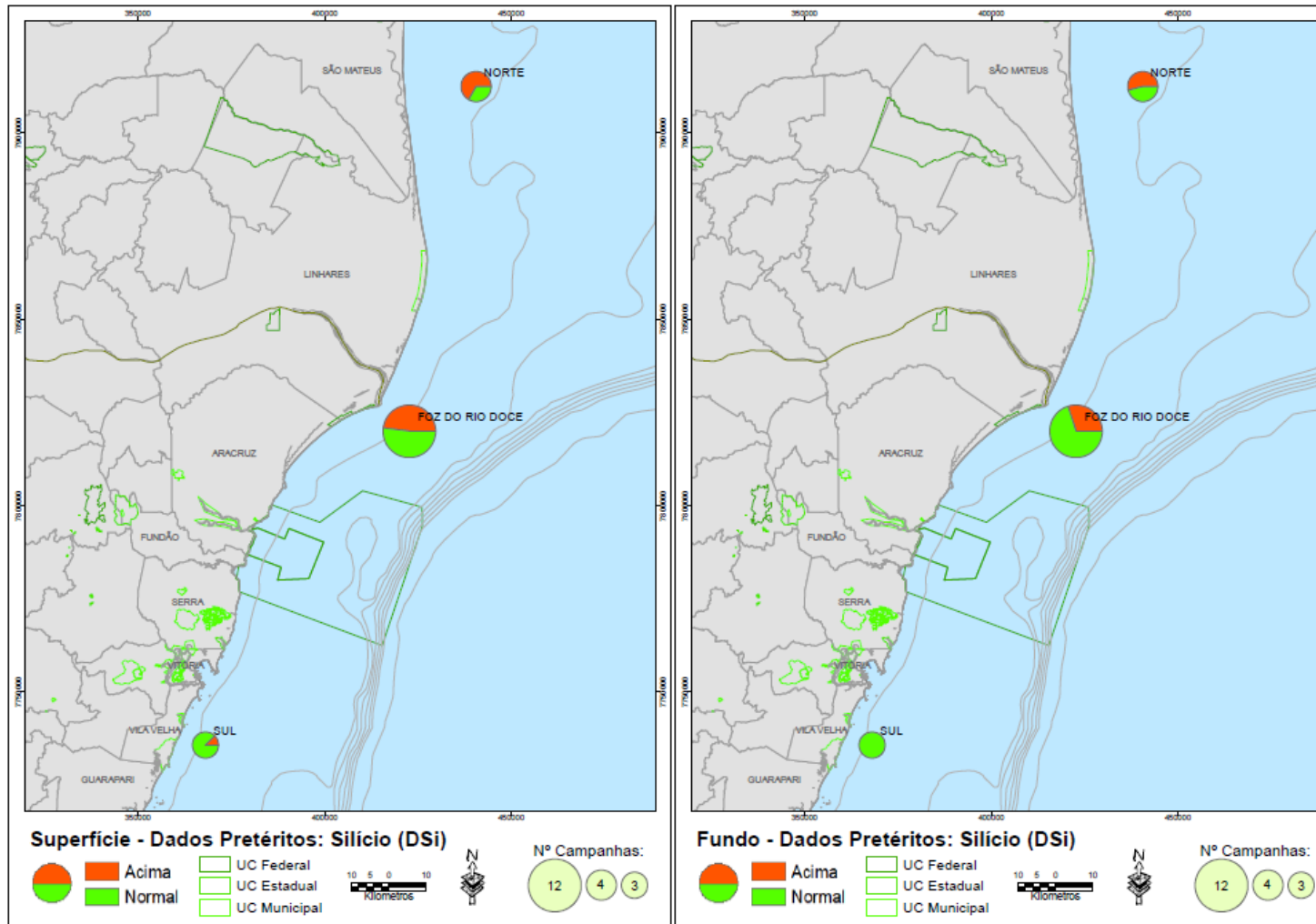


Figura 15: Qualidade da água superficial e de fundo em relação a frequência de ocorrência (%) de ferro dissolvido referente aos valores orientadores agudo e crônico da NOAA.

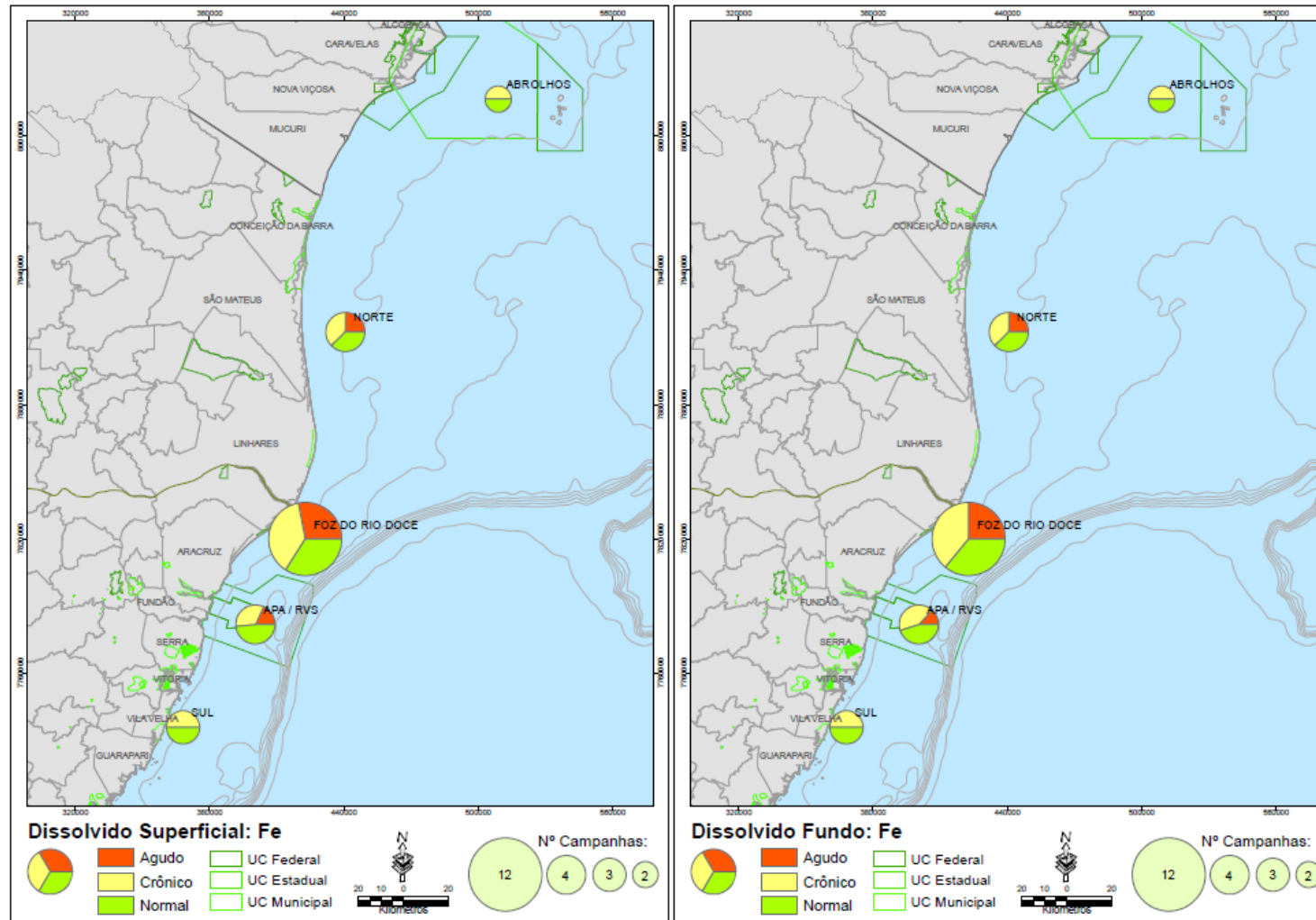


Figura 16: Qualidade da água superficial e de fundo em relação a frequência de ocorrência (%) de cobalto dissolvido referente aos valores orientadores agudo e crônico da NOAA.

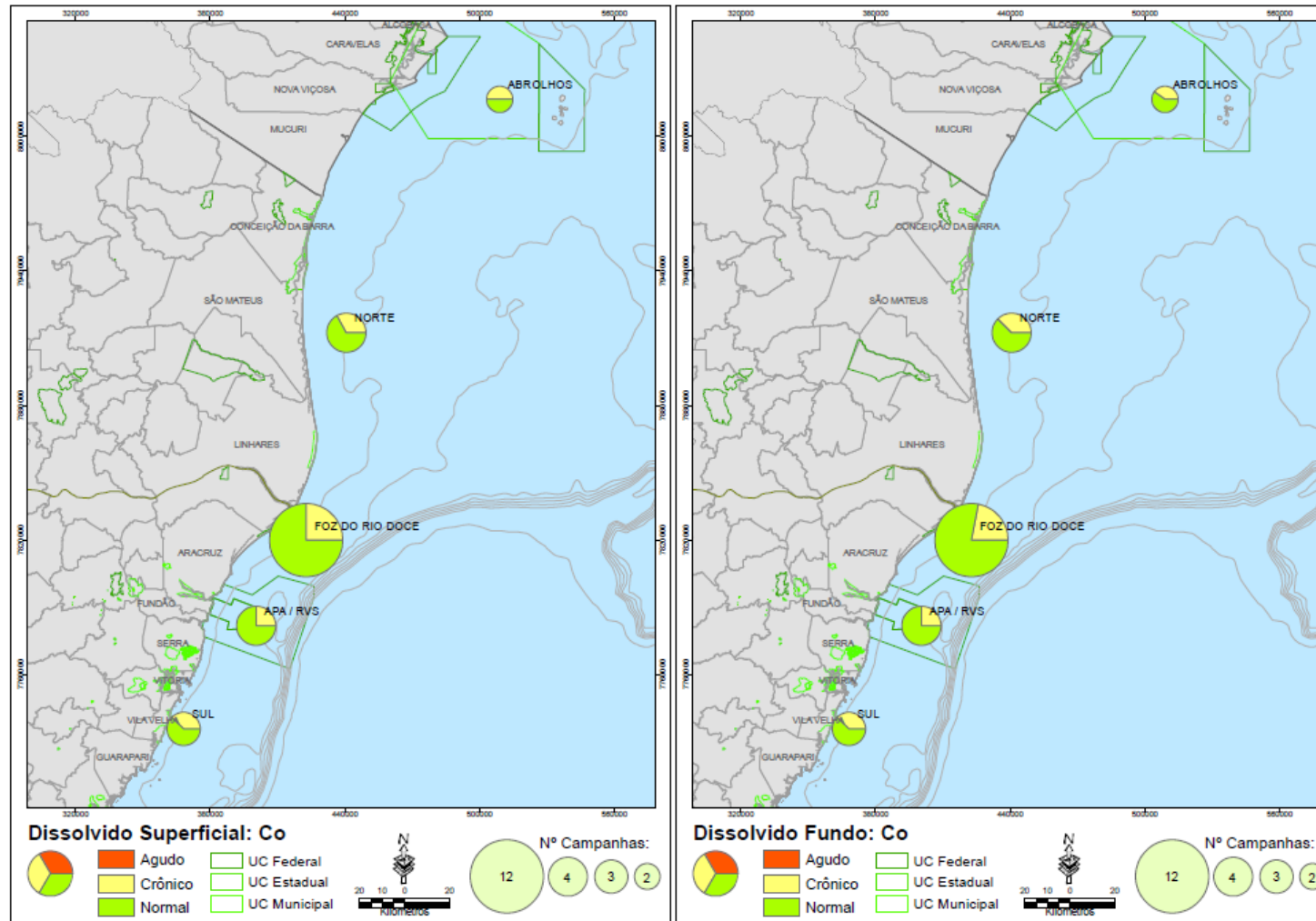


Figura 17: Qualidade da água superficial e de fundo em relação a frequência de ocorrência (%) de cobre dissolvido referente aos valores orientadores agudo e crônico da NOAA.

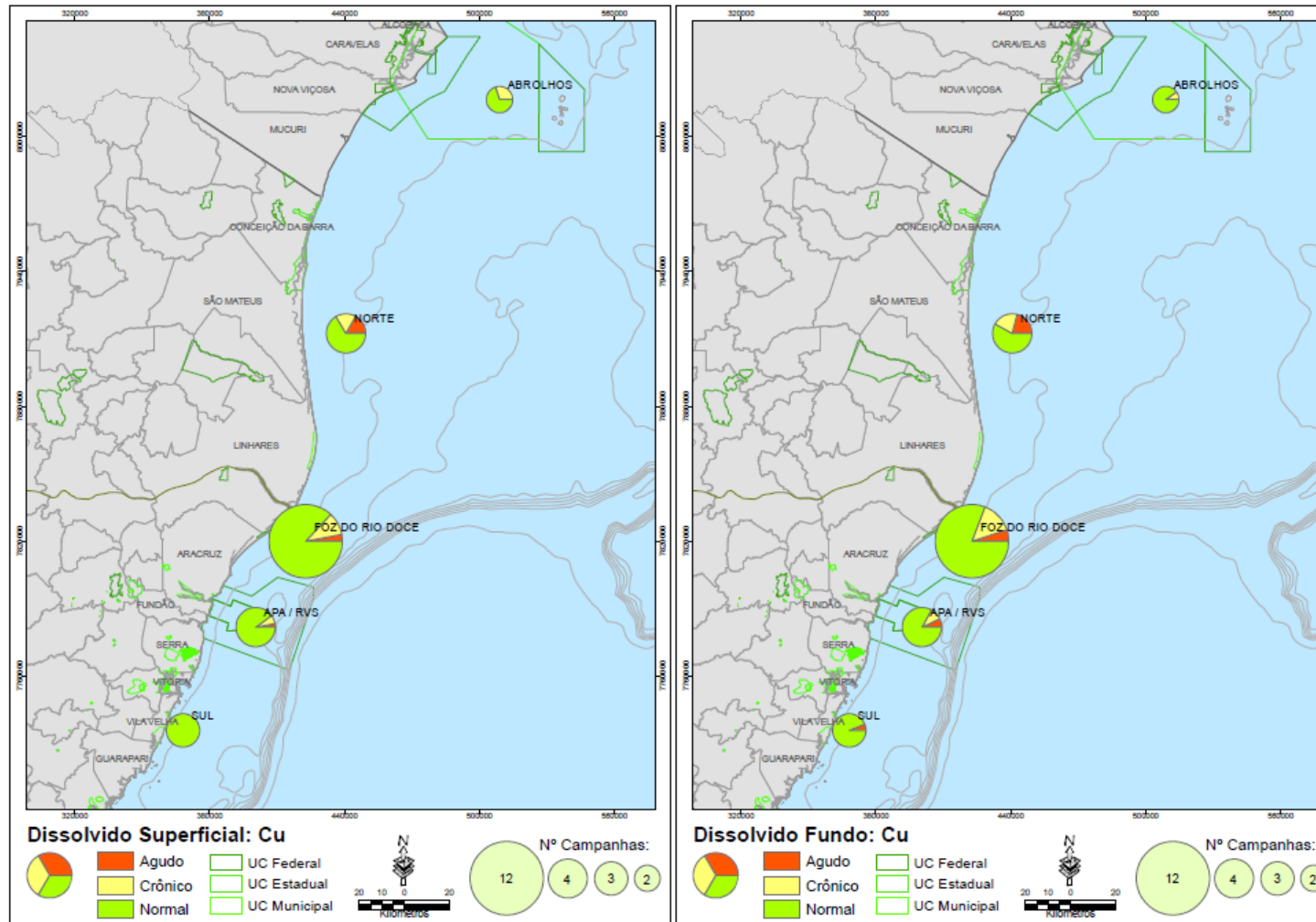


Figura 18: Qualidade da água superficial e de fundo em relação a frequência de ocorrência (%) de níquel dissolvido referente aos valores orientadores agudo e crônico da NOAA.

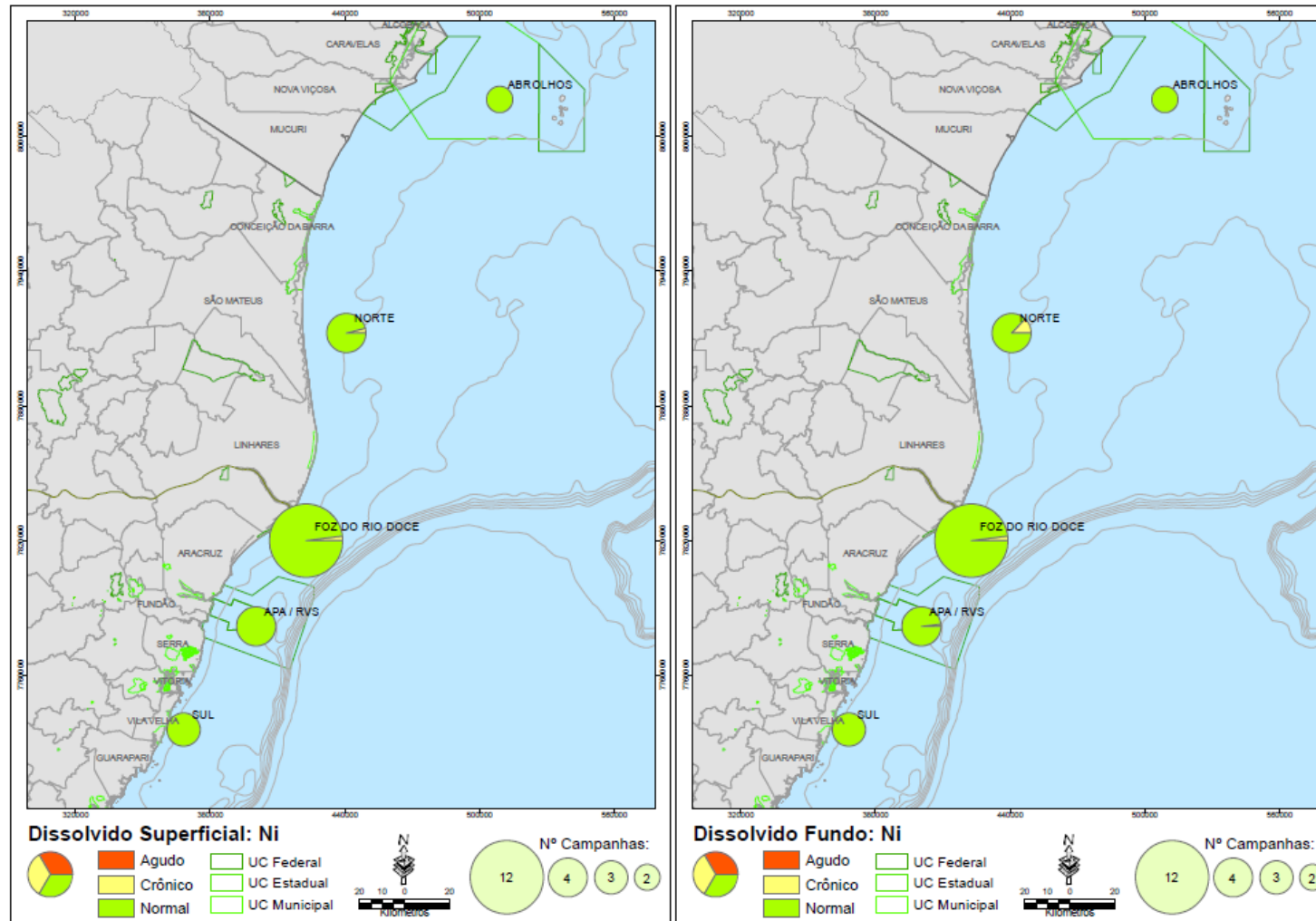


Figura 19: Qualidade da água superficial e de fundo em relação a frequência de ocorrência (%) de chumbo dissolvido referente aos valores orientadores agudo e crônico da NOAA.

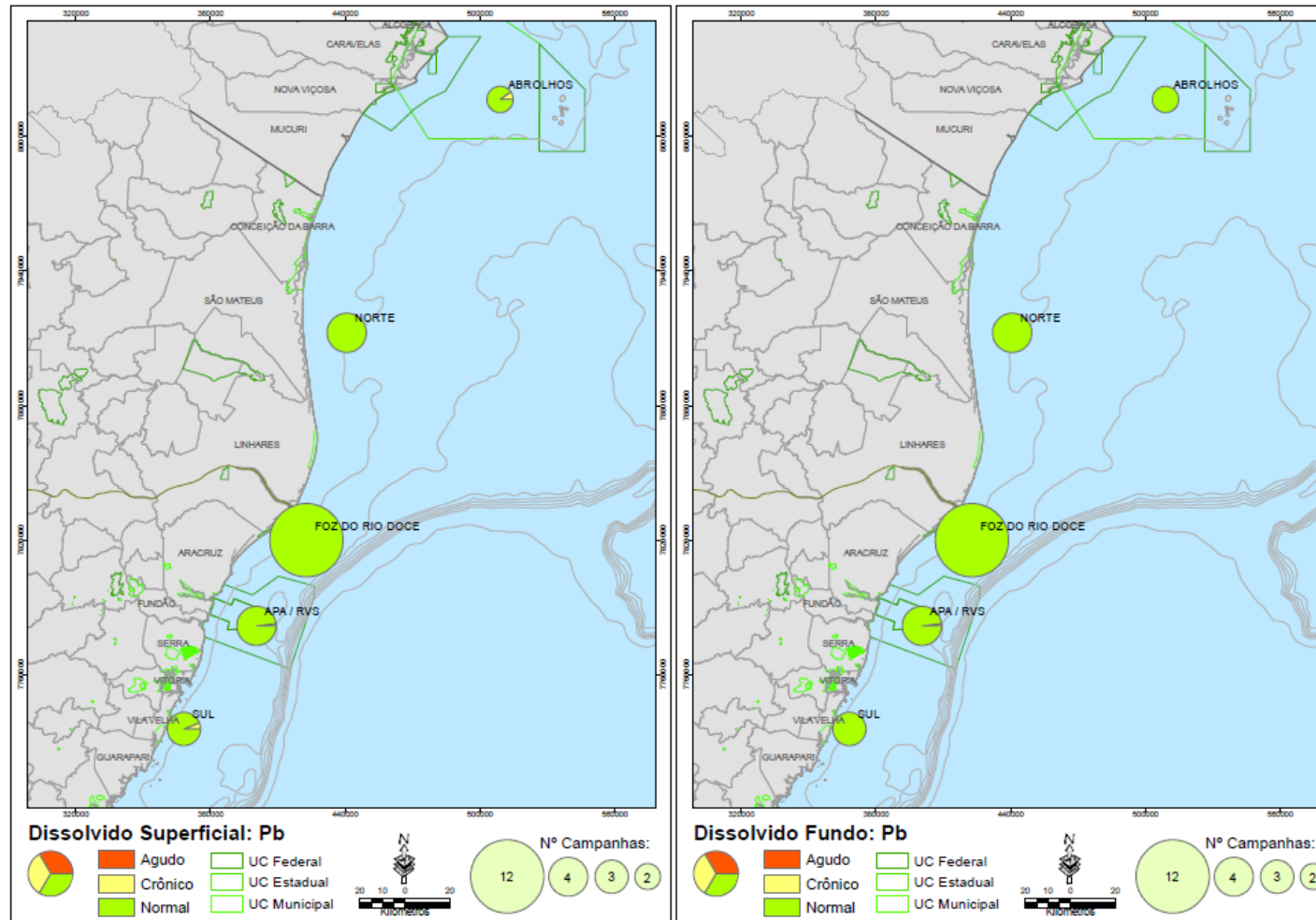


Figura 20: Qualidade da água de fundo em relação a frequência de ocorrência (%) de zinco dissolvido referente aos valores orientadores agudo e crônico da NOAA.

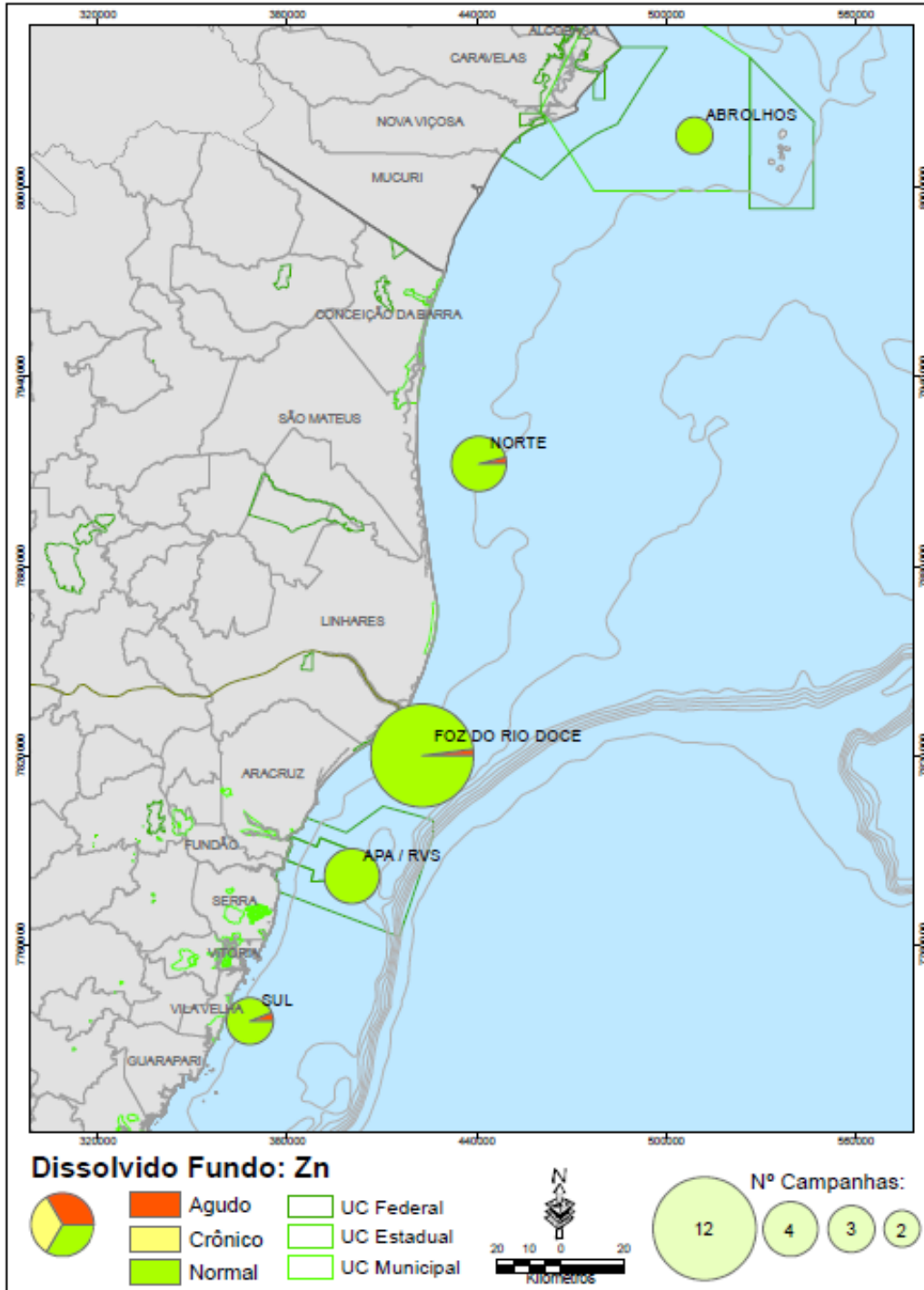


Figura 21: Qualidade do sedimento superficial em relação a frequência de ocorrência (%) de zinco referente aos valores orientadores PEL e TEL da NOAA e dados pretéritos.

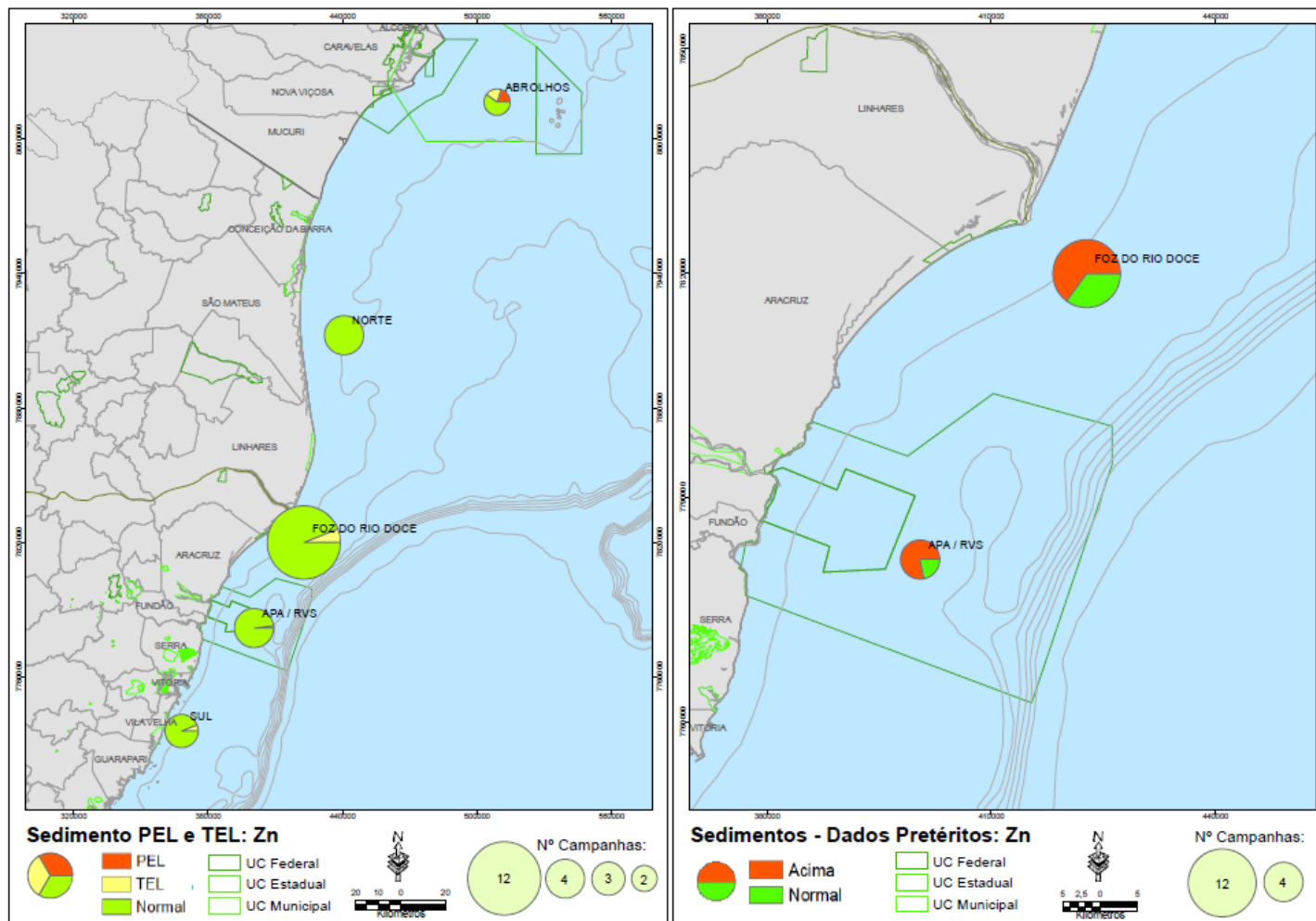


Figura 22: Qualidade do sedimento superficial em relação a frequência de ocorrência (%) de cobre referente aos valores orientadores PEL e TEL da NOAA e dados pretéritos.

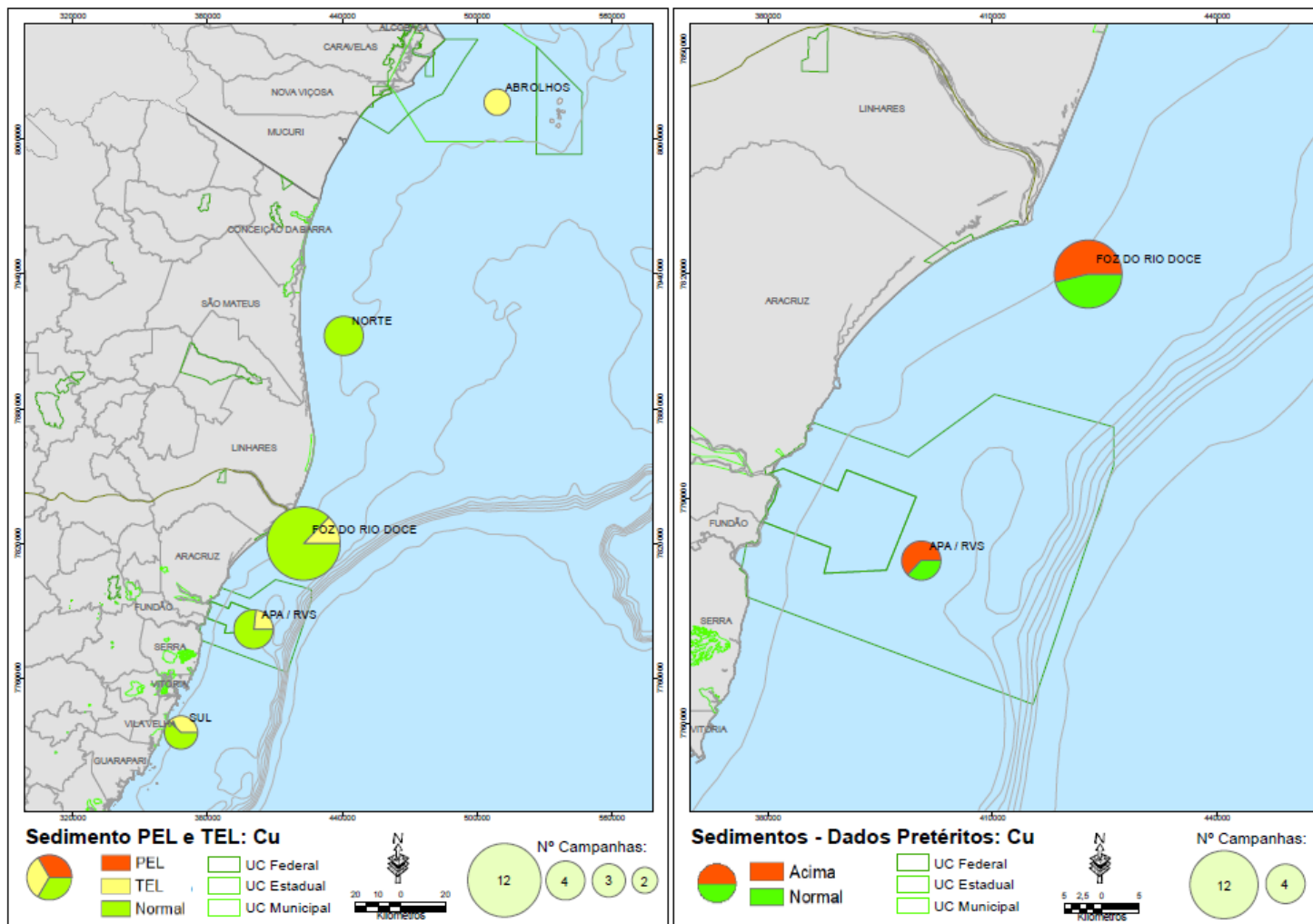


Figura 23: Qualidade do sedimento superficial em relação a frequência de ocorrência (%) de níquel referente aos valores orientadores PEL e TEL da NOAA e dados pretéritos.

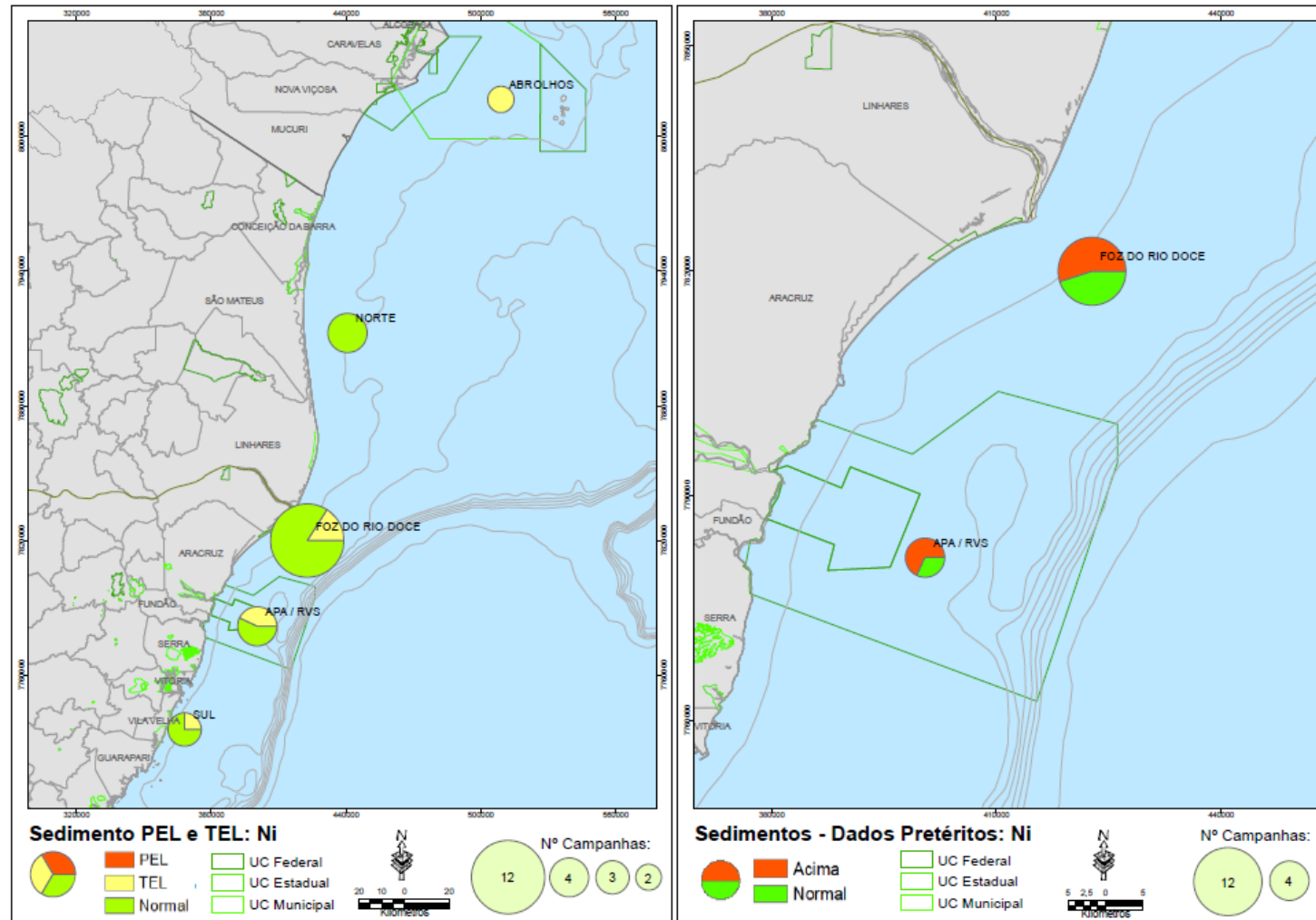


Figura 24: Qualidade do sedimento superficial em relação a frequência de ocorrência (%) de chumbo referente aos valores orientadores PEL e TEL da NOAA e dados pretéritos.

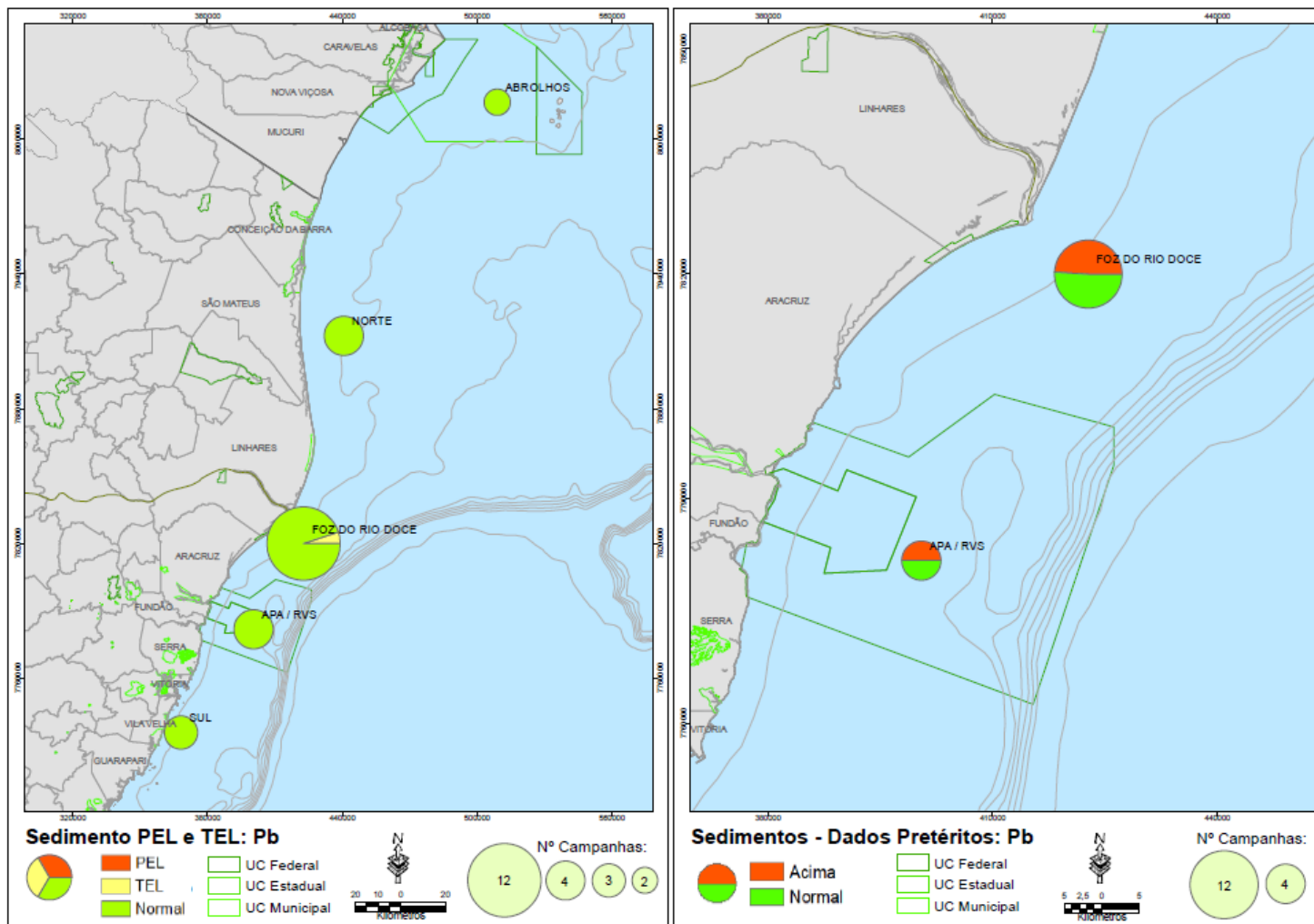


Figura 25: Qualidade do sedimento superficial em relação a frequência de ocorrência (%) de alumínio e ferro referente a dados pretéritos.

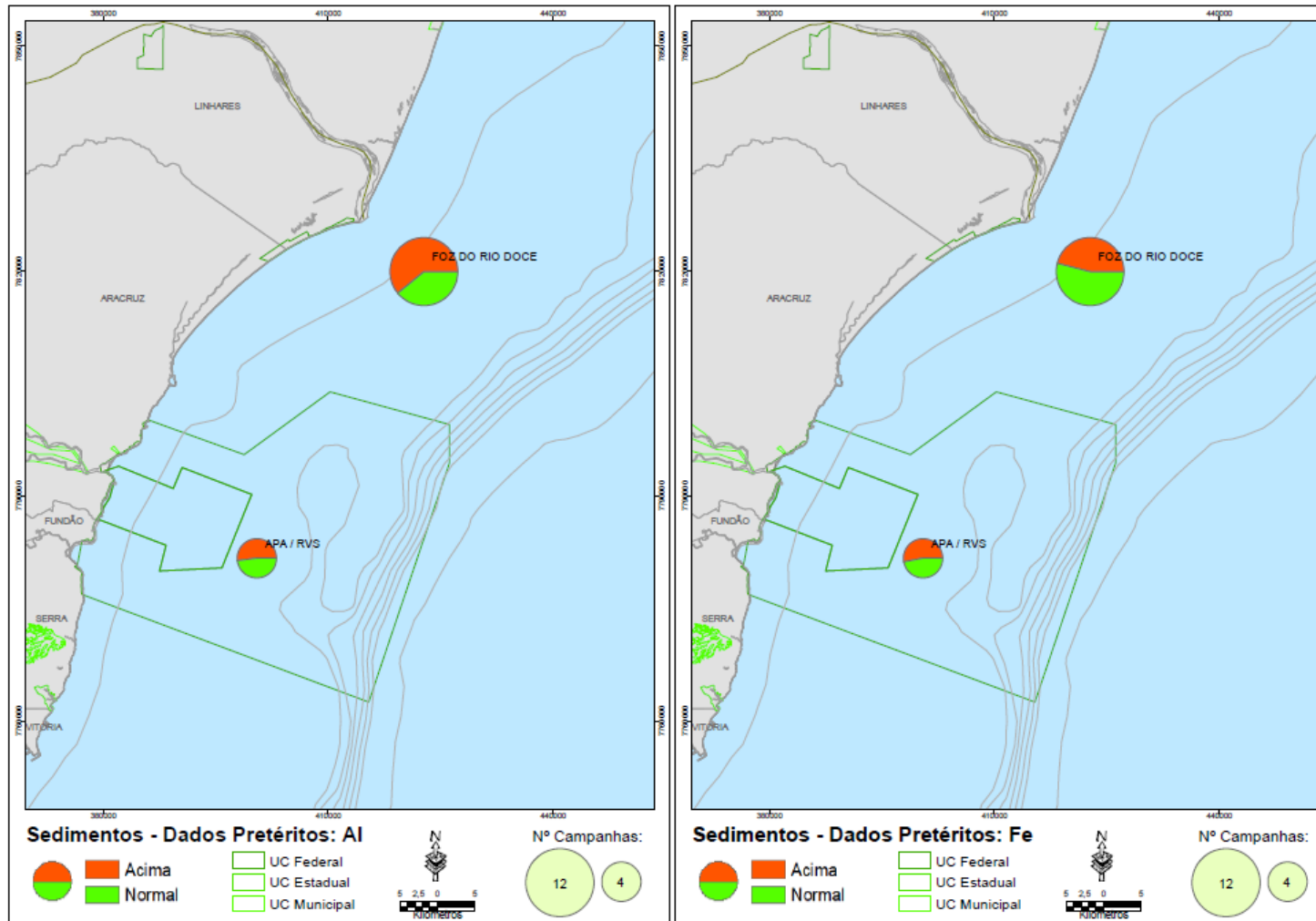


Figura 26: Qualidade do sedimento superficial em relação a frequência de ocorrência (%) de manganês e vanádio referente a dados pretéritos.

