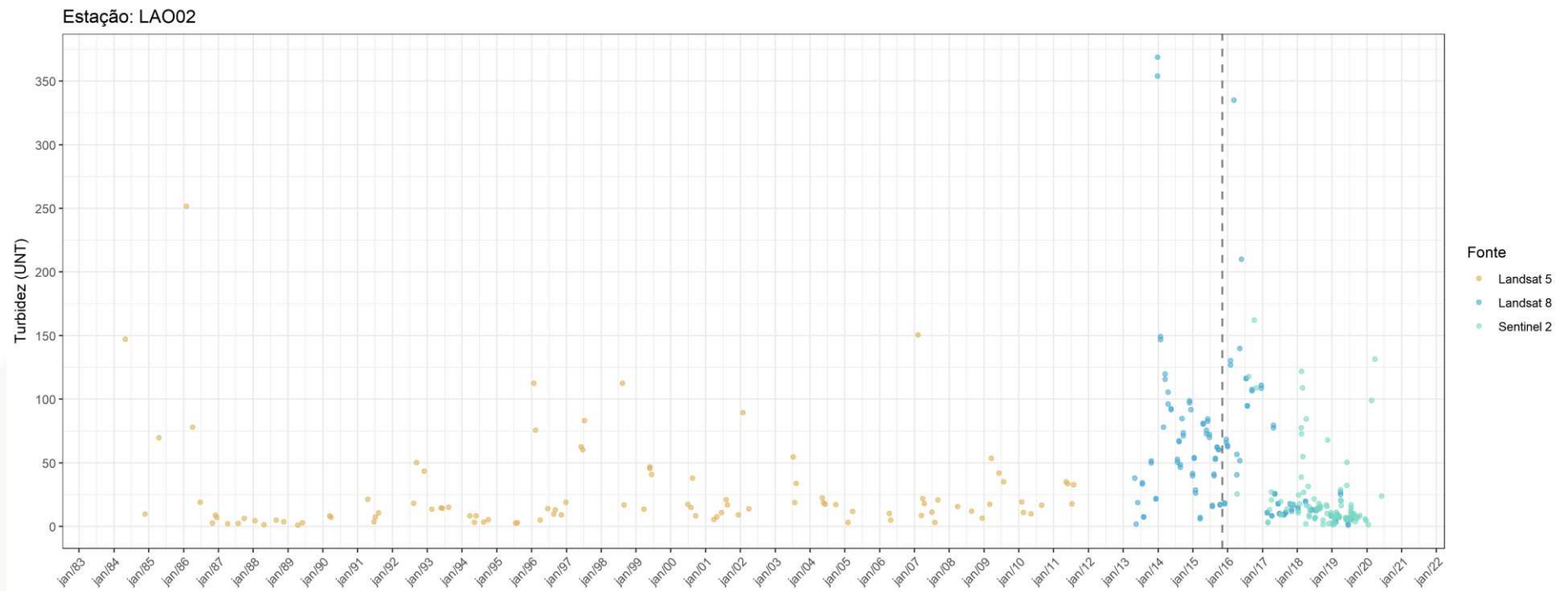
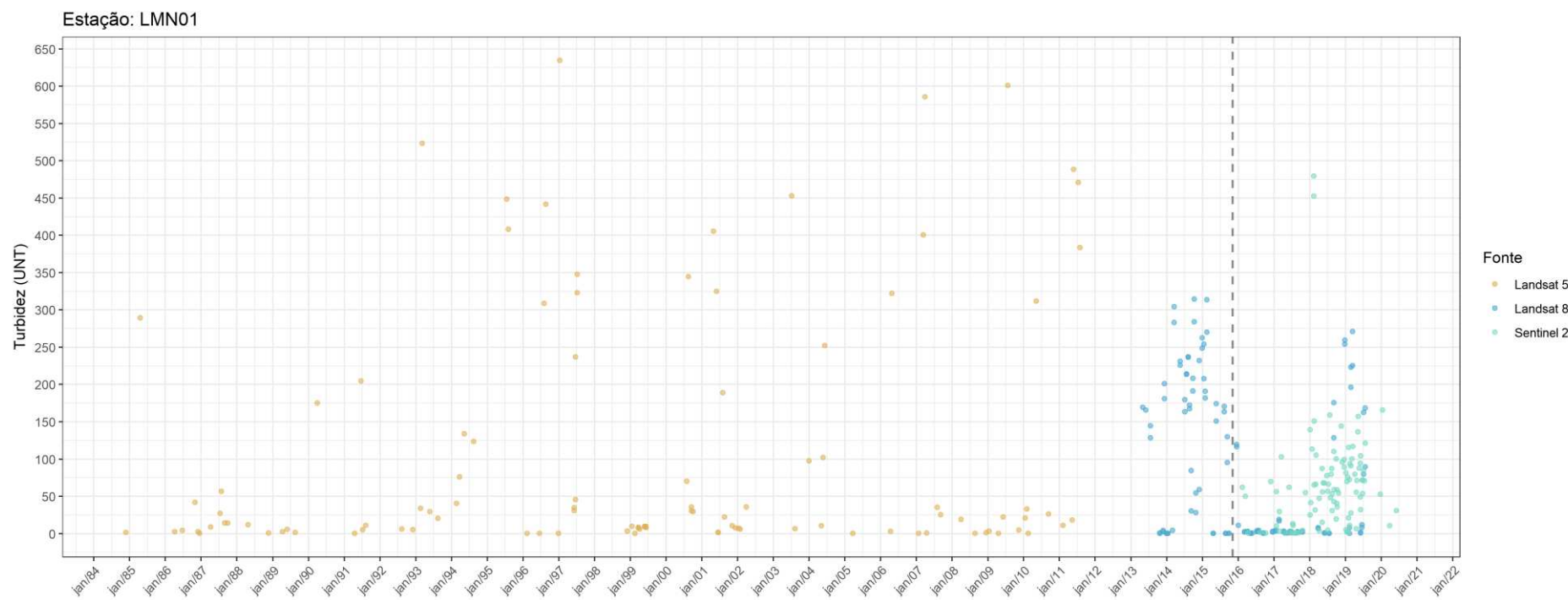


Figura 91 - Série histórica de turbidez – Estação LAO02.



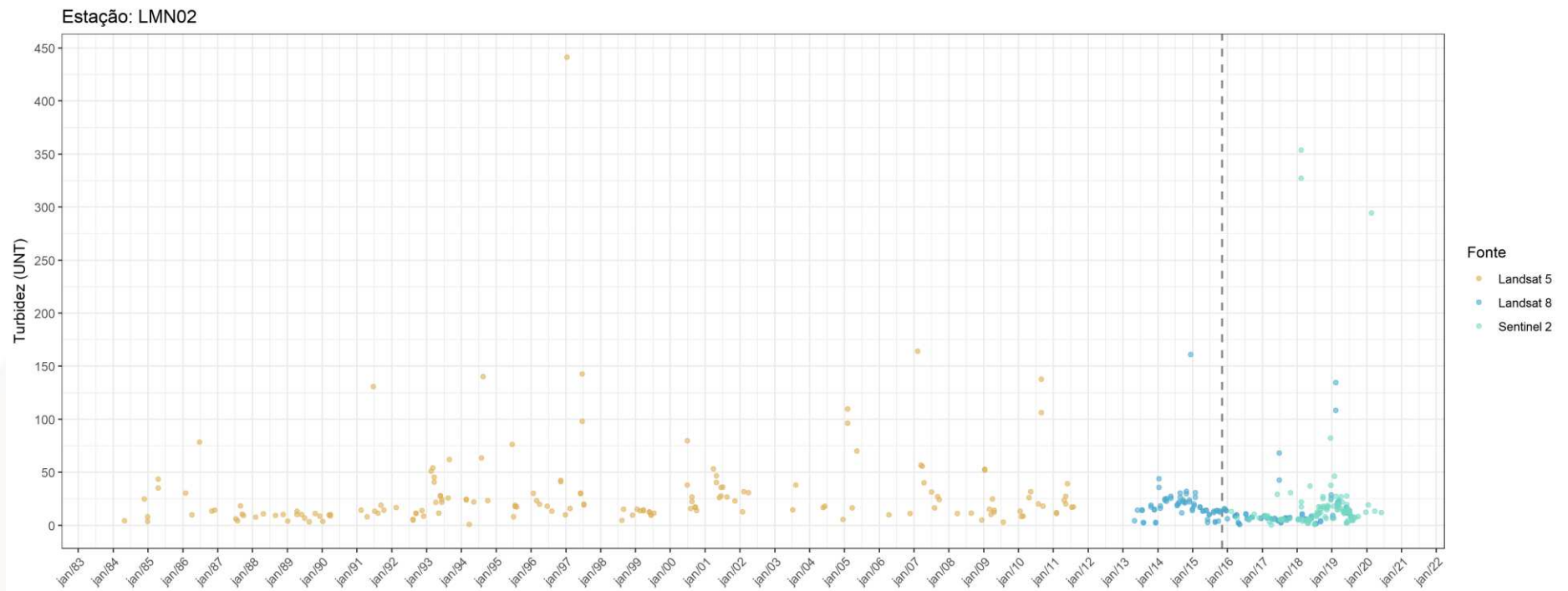
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 92 - Série histórica de turbidez – Estação LMN01.



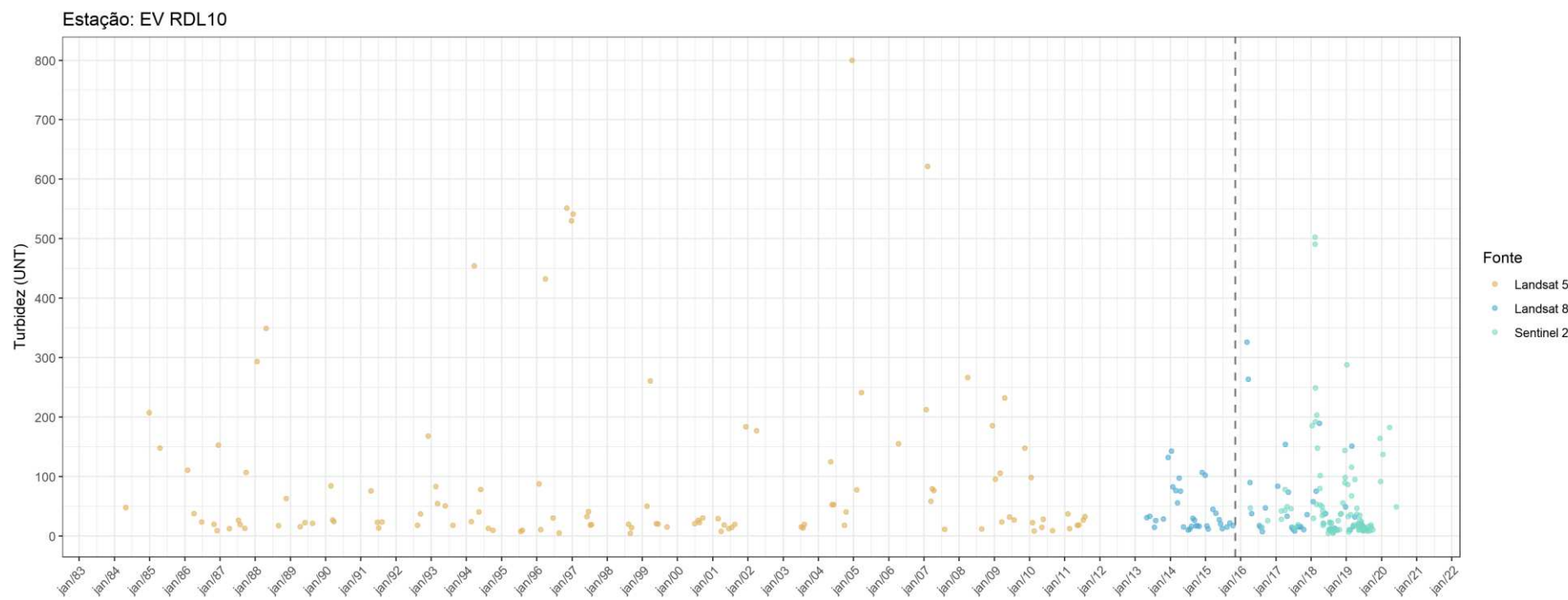
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 93 - Série histórica de turbidez – Estação LNM02.



Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 94 - Série histórica de turbidez – Estação EV RDL10.



Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

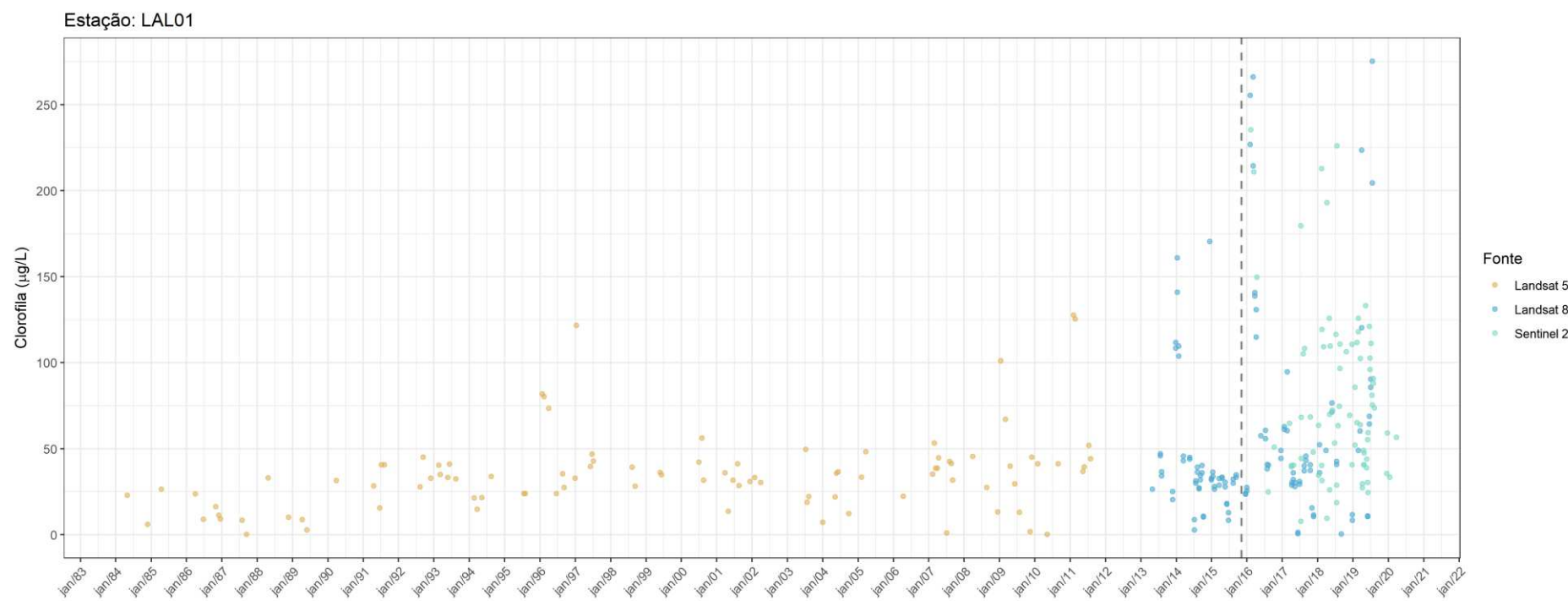
Nas estações localizadas nas lagoas Areão e Areal é possível observar que os dados geralmente estiveram entre 0 e 50 NTU, entretanto, notaram-se incrementos significativos esporadicamente. Na série histórica anterior ao lançamento da missão Landsat-8 (antes de 2013), esses incrementos são menos esporádicos, um dos detrimientos do alto tempo de revisita do satélite Landsat-5. Com a alta densidade de dados provida conjuntamente pelas missões Landsat-8 e Sentinel-2, essas flutuações são mais visíveis. Não coincidentemente, a maior parte dos valores mais elevados observados são de imagens dos meses de dezembro-janeiro, época chuvosa quando podem ocorrer as cheias.

O mesmo efeito pode ser observado nas estações da lagoa Monsarás, em especial no ponto LMN01 (Figura 92) que fica localizado na desembocadura do canal perene que liga a lagoa e o rio Doce. Nas épocas chuvosas, a entrada de sedimentos no canal aumenta a turbidez da água de forma significativa, na ordem de centenas de NTU.

A estação EV RDL10 localizada na foz apresentou dados com variação entre 0 e 100 NTU (Figura 94), porém foram verificados mais valores extremos de turbidez do que observado na estação EV RDL09, localizada também no rio Doce, 40 km a montante. Em termos de sazonalidade, os valores se apresentaram mais elevados nos meses mais chuvosos.

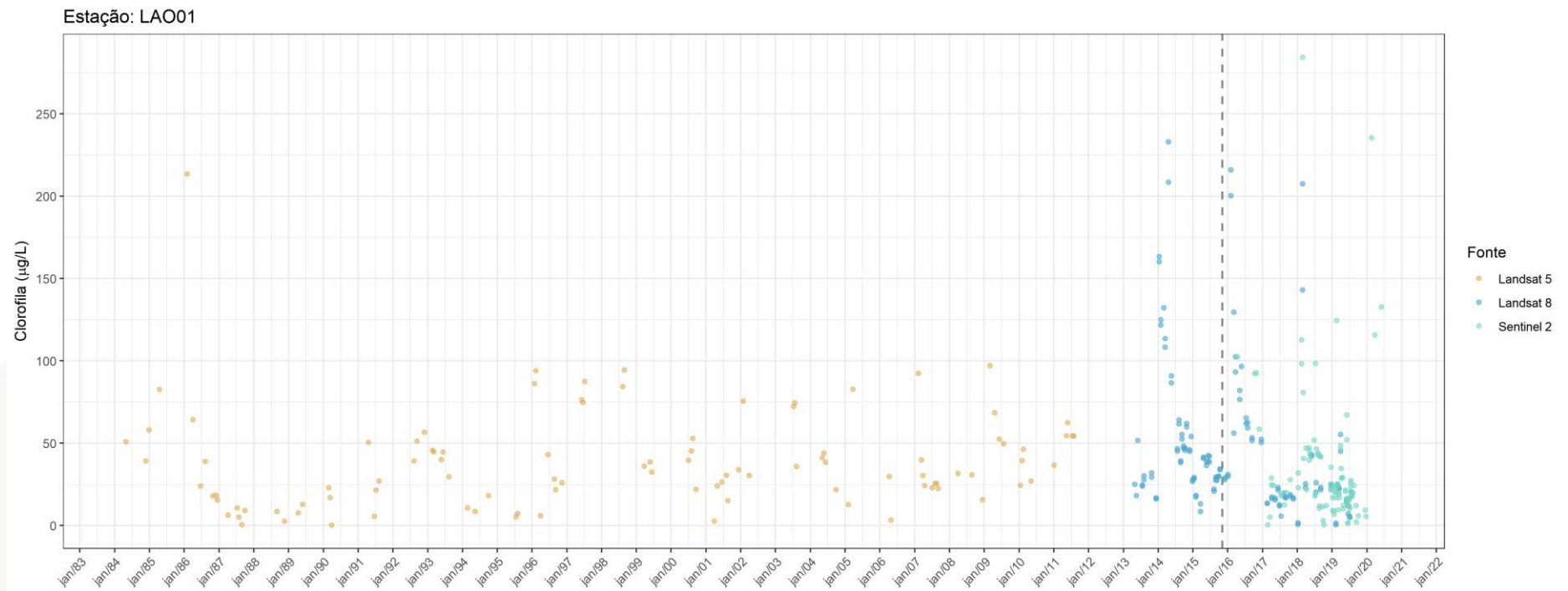
A seguir são apresentados os gráficos para o parâmetro clorofila-a, para as mesmas estações virtuais (Figura 95 até a Figura 100).

Figura 95 - Série histórica de clorofila-a – Estação LAL01.



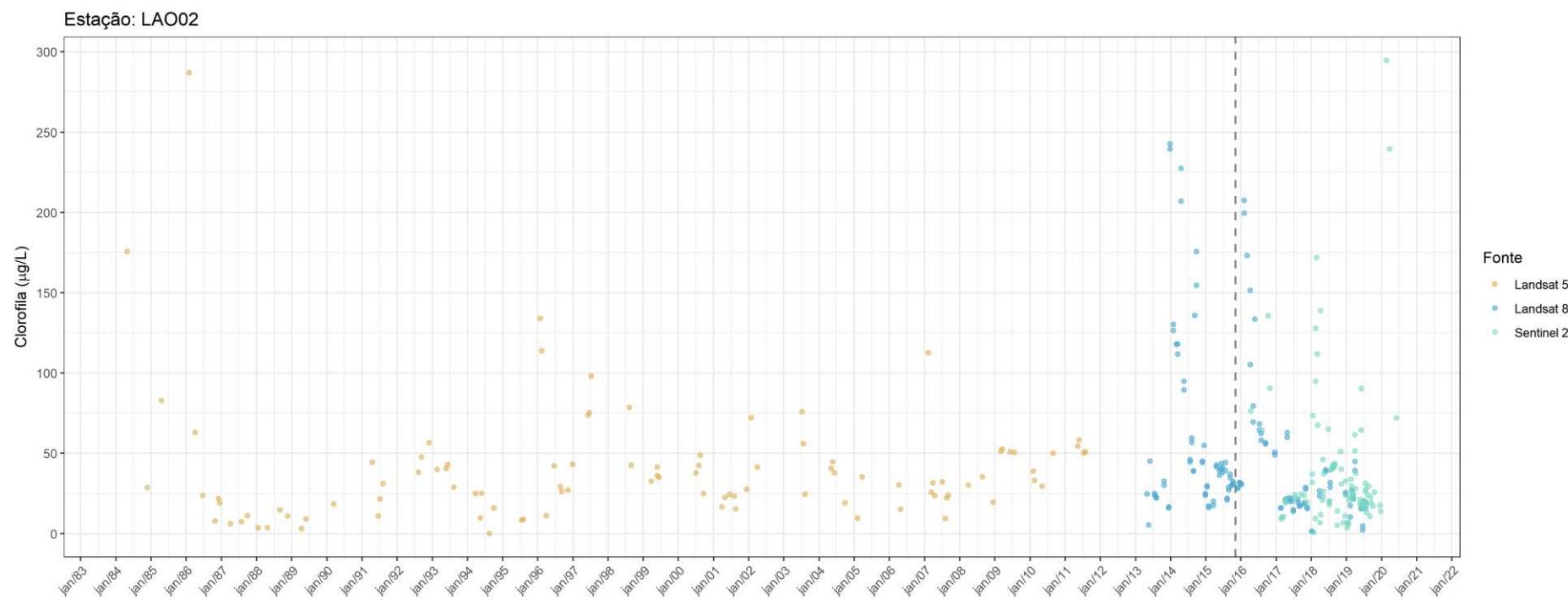
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 96 - Série histórica de clorofila-a – Estação LAO01.



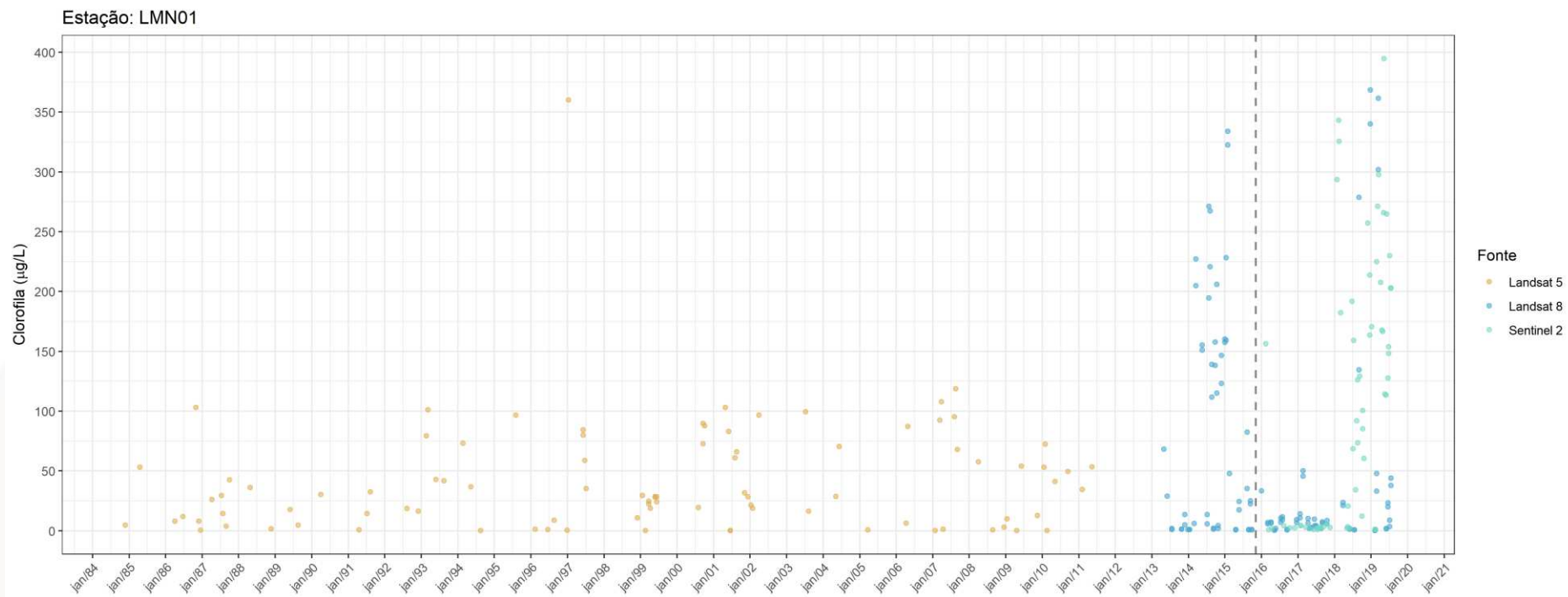
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 97 - Série histórica de clorofila-a – Estação LAO02.



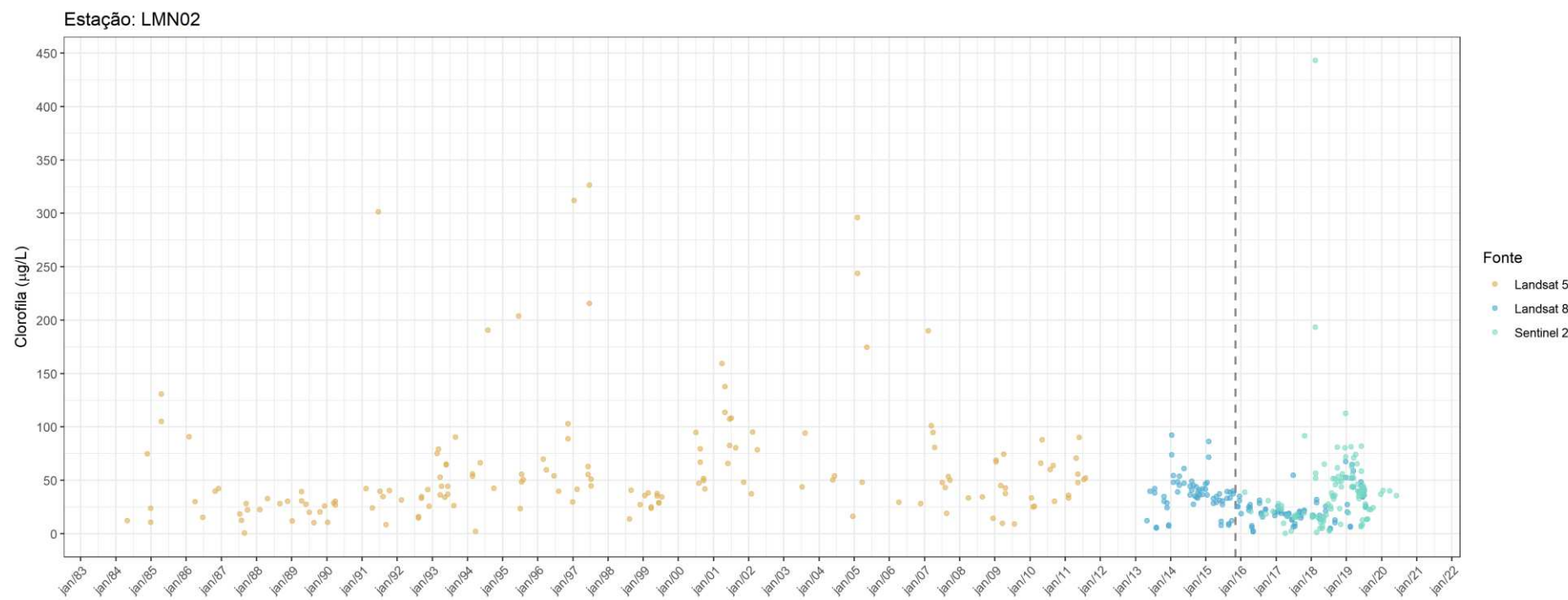
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 98 - Série histórica de clorofila-a – Estação LMN01.



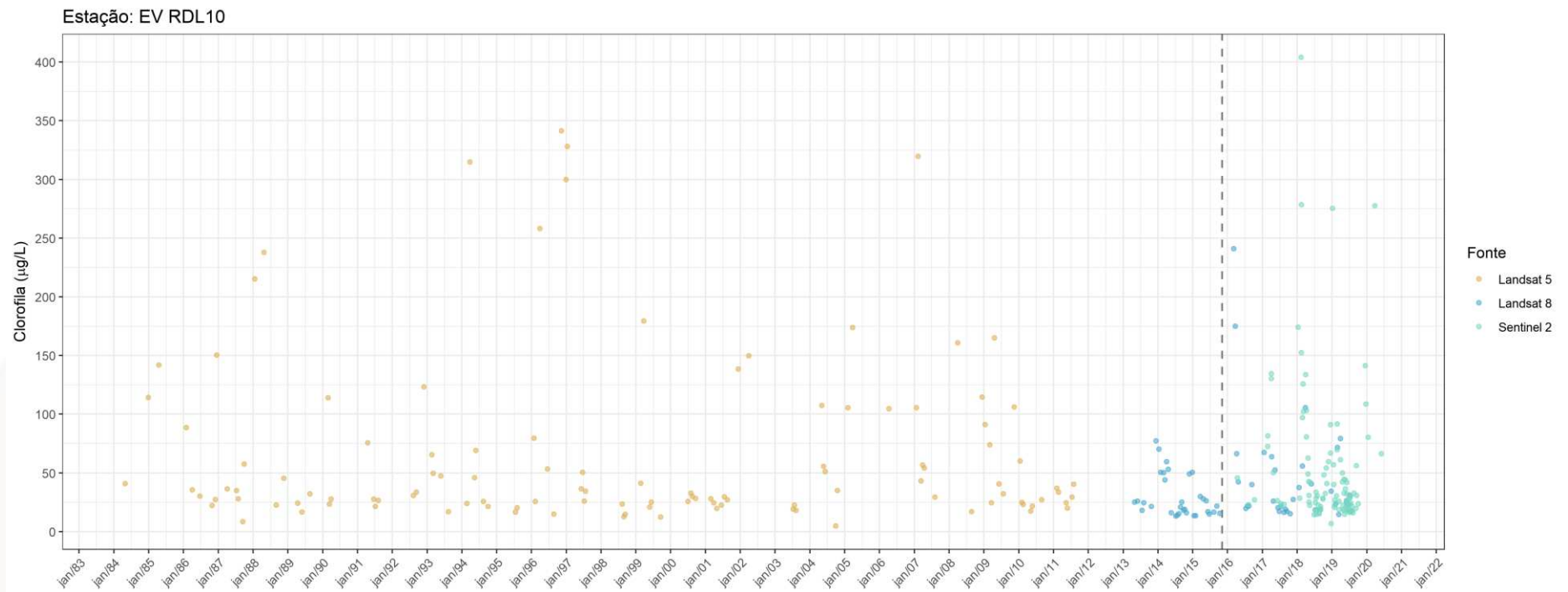
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 99 - Série histórica de clorofila-a – Estação LMN02.



Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 100 - Série histórica de clorofila-a – Estação EV RDL10.



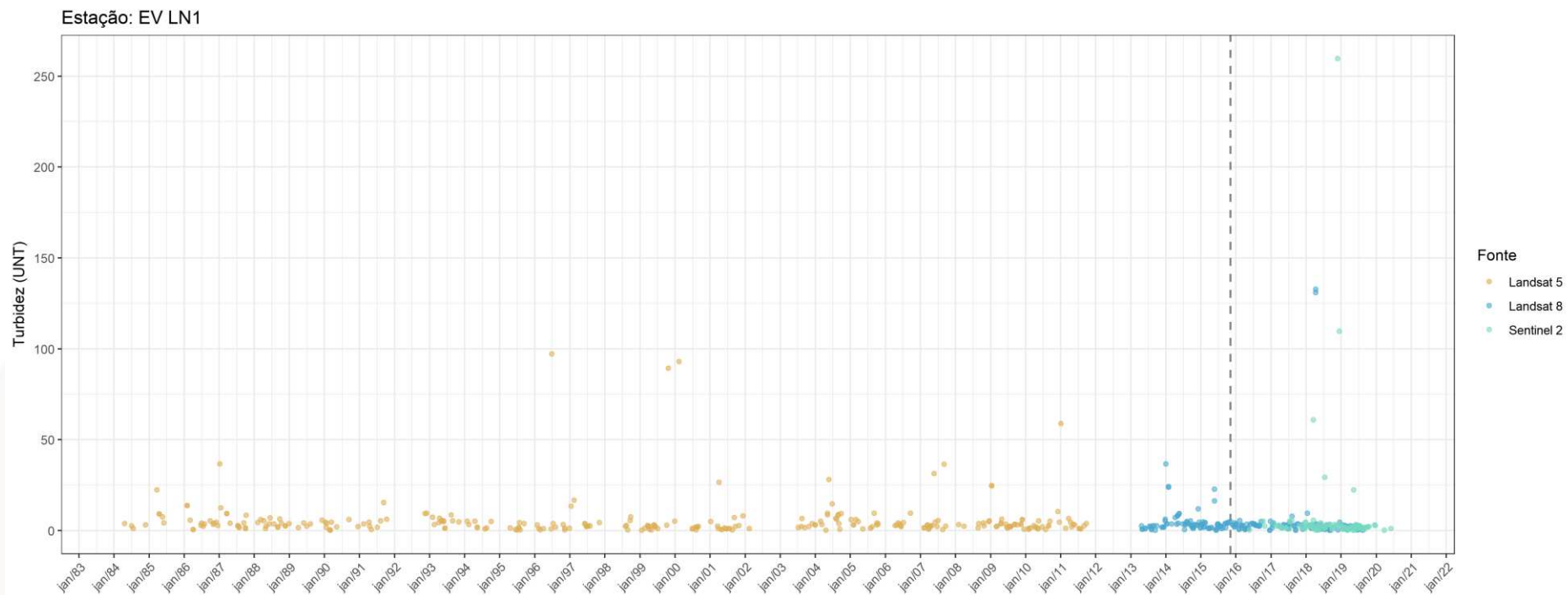
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Diferentemente da lagoa Juparanã, as lagoas mais próximas da foz apresentam um maior nível de eutrofização com valores fluando entre 0 e 100 µg/L. Valores superando 200 µg/L foram registrados, indicando alto grau de eutrofização. Sazonalidade foi observada de forma mais consistente nas estações da lagoa Areão e no ponto na região central da lagoa Monsarás, que são as maiores áreas analisadas. Os dados de clorofila-a na série histórica para a estação EV RDL10 são apresentados na figura (Figura 100). Ao contrário do que ocorre com a turbidez, os níveis de clorofila-a no rio em si são menores do que os das lagoas. Fatores que possam contribuir a isso são a alta turbidez no rio que inibe o crescimento de algas e a alta vazão, se comparado com as lagoas.

5.3.2.2.3 *Lagoa Nova*

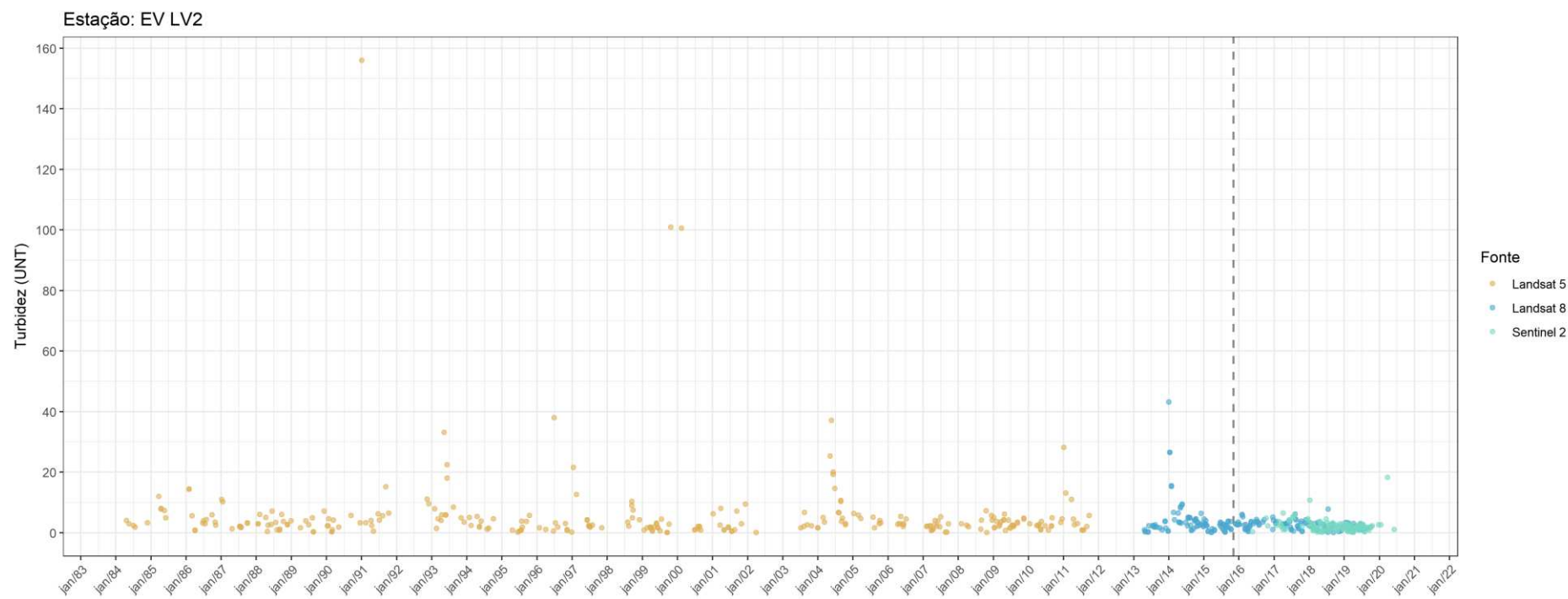
As estações virtuais analisadas na lagoa Juparanã foram: EV LN1, EV LV2, EV LV3, EV LV4, EV LV5, LNV01, LNV02, LNV03. Além dessas, a estação EV RDL8 localizada no rio Doce próximo à lagoa também foi inserida na análise. As figuras mostram os dados de turbidez extraídos na série histórica de imagens (Figura 101 até a Figura 109).

Figura 101 - Série histórica de turbidez – Estação EV LN1.



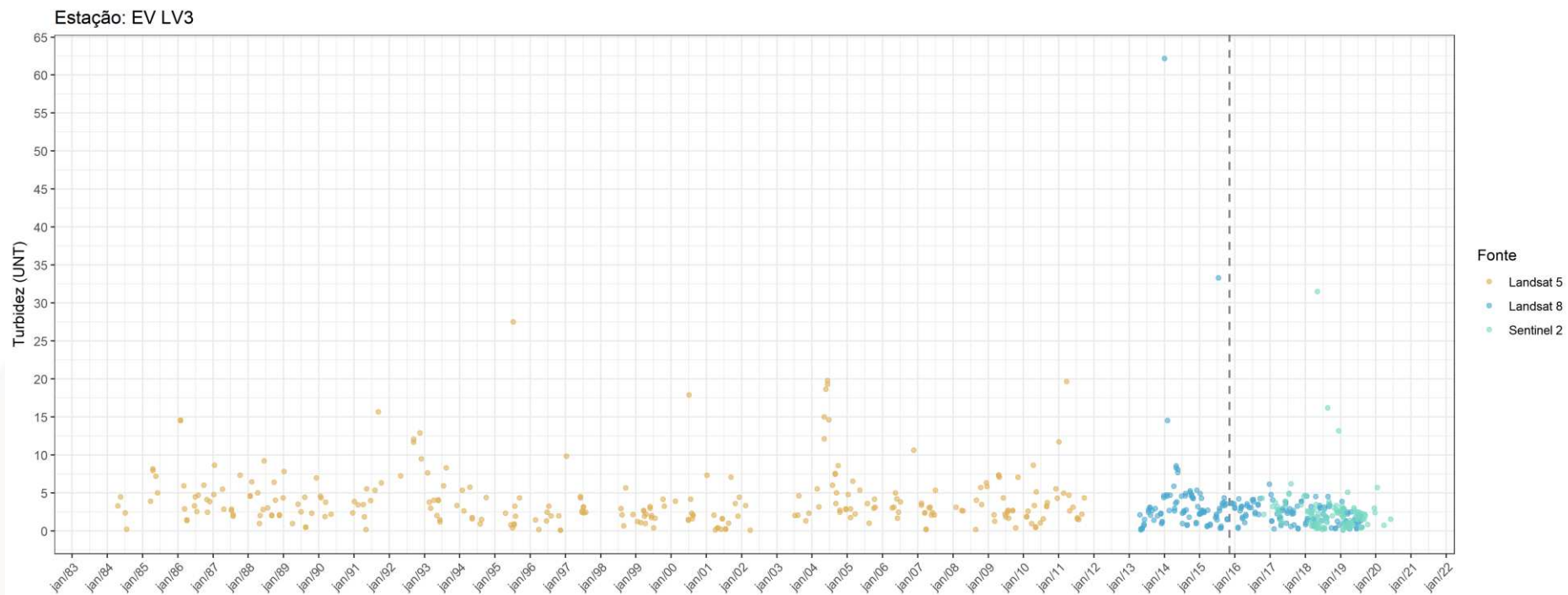
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 102 - Série histórica de turbidez – Estação EV LV2.



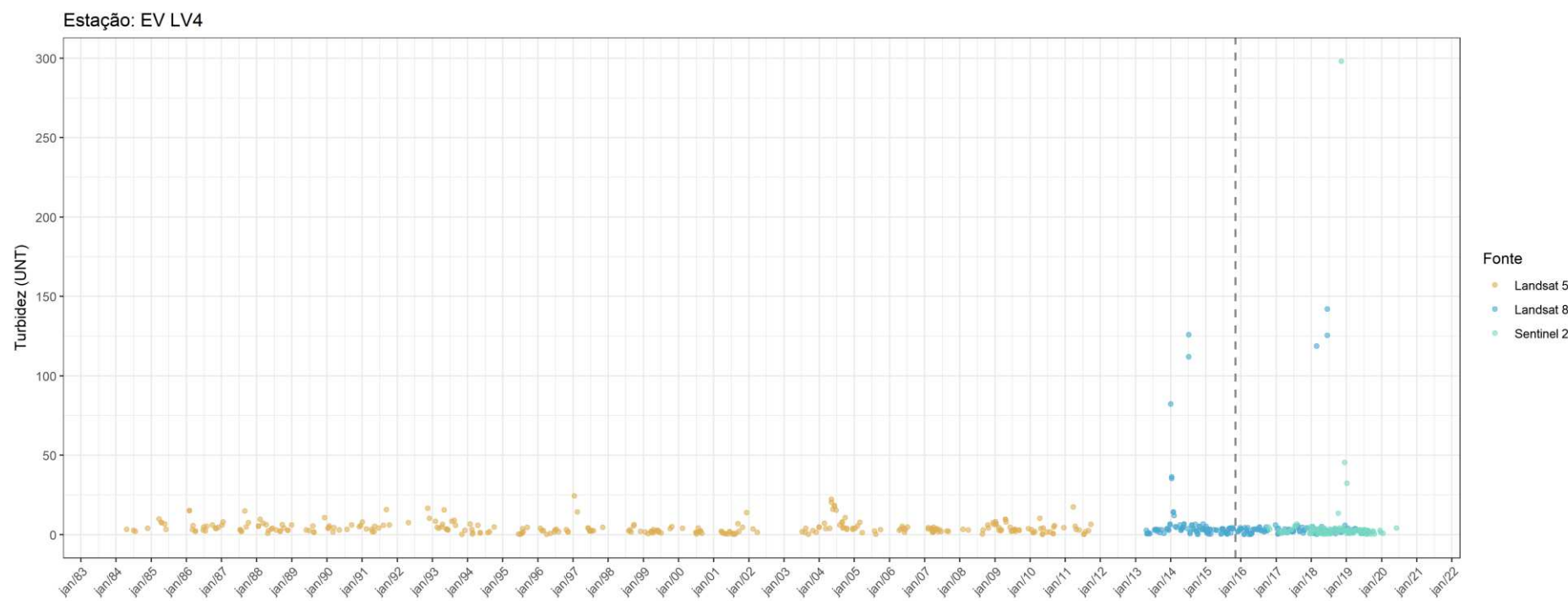
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 103 - Série histórica de turbidez – Estação EV LV3.



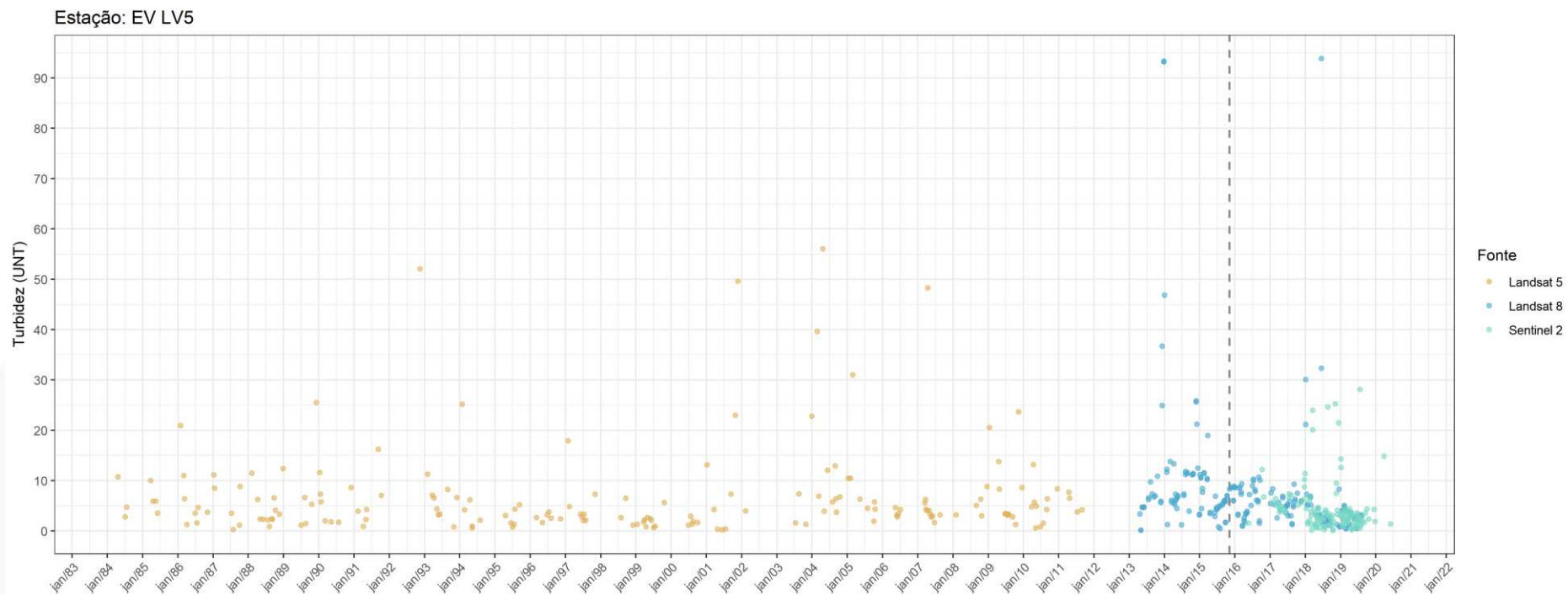
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 104 - Série histórica de turbidez – Estação EV LV4.



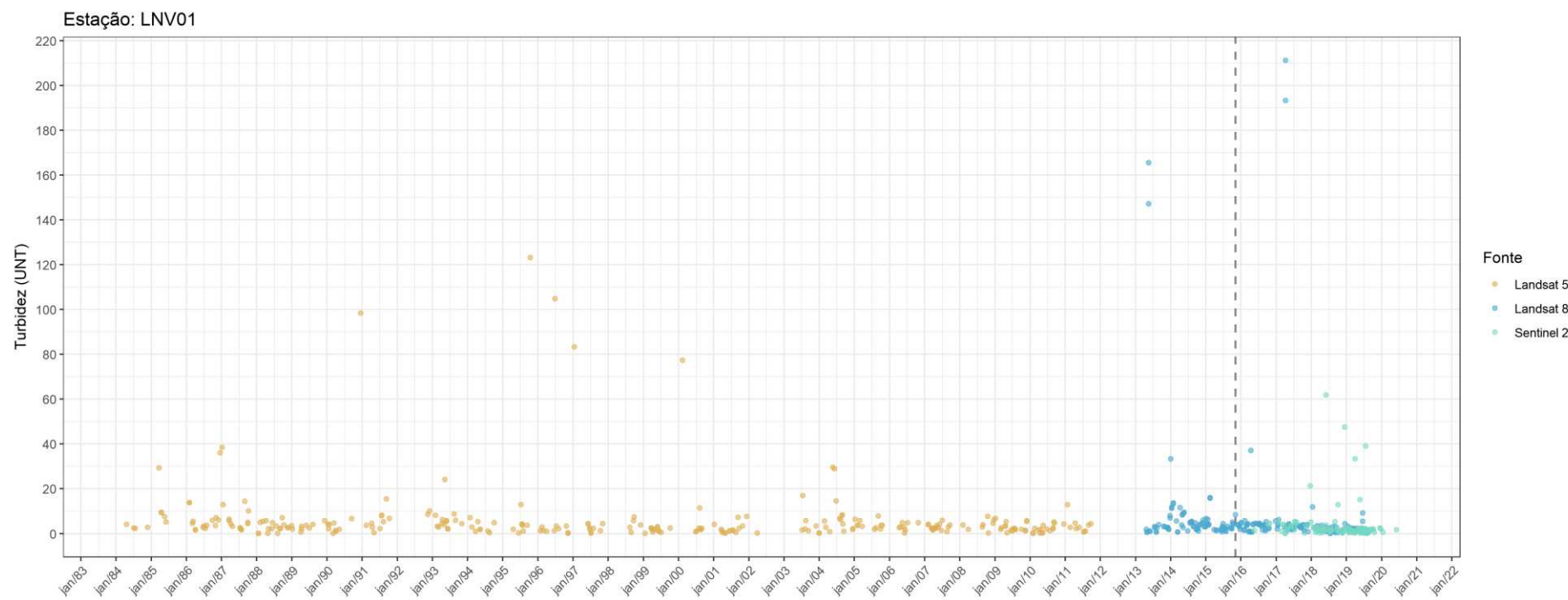
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 105 - Série histórica de turbidez – Estação EV LV5.



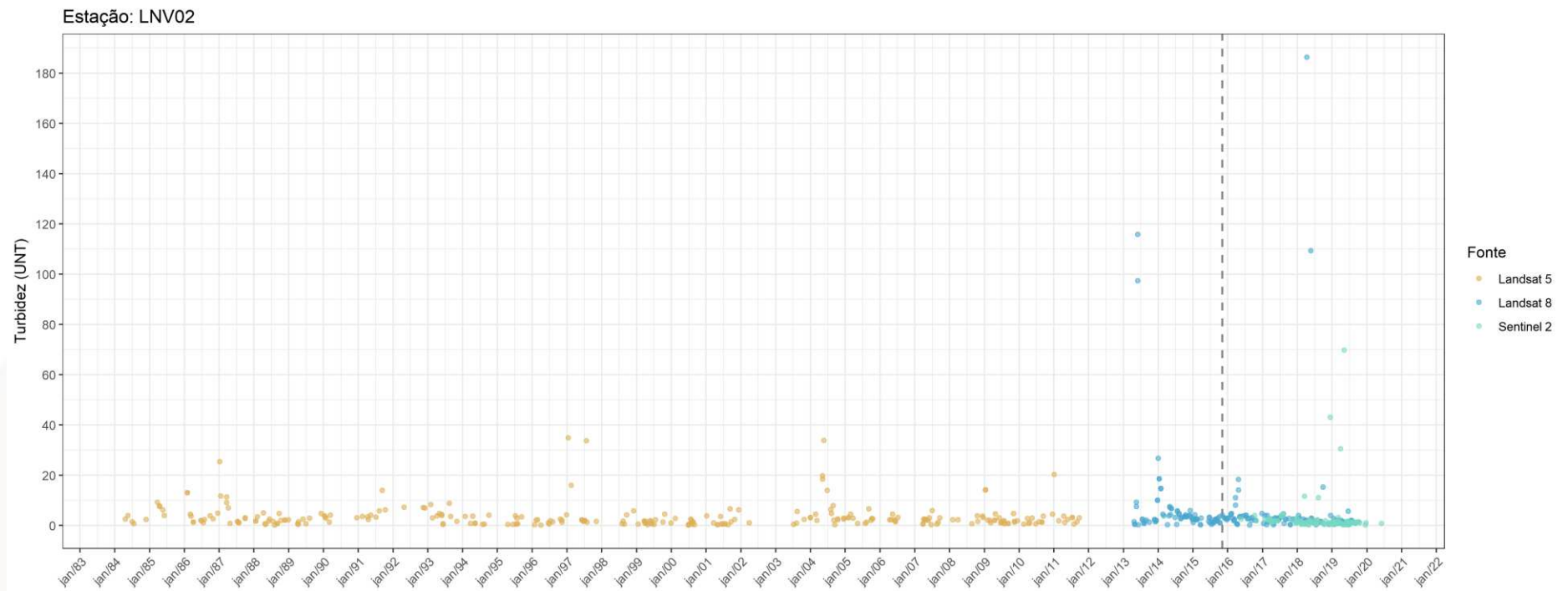
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 106 - Série histórica de turbidez – Estação LNV01.



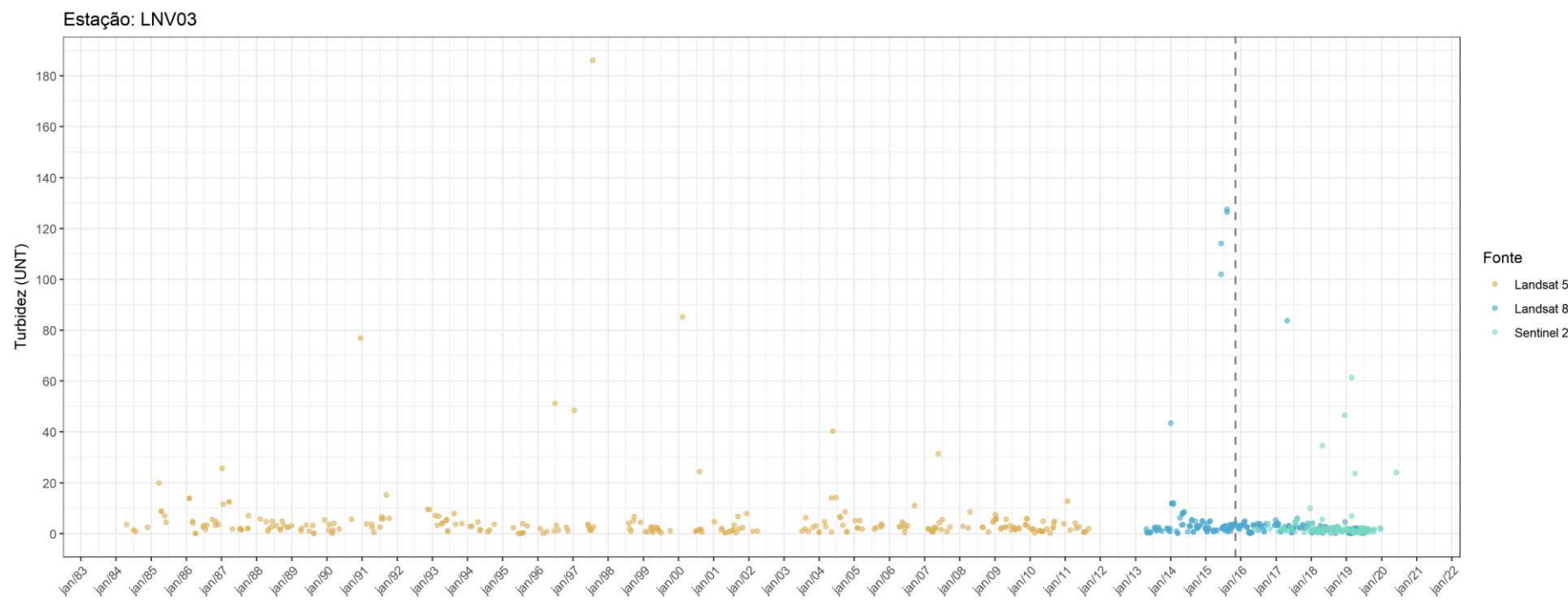
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 107 - Série histórica de turbidez – Estação LNV02.



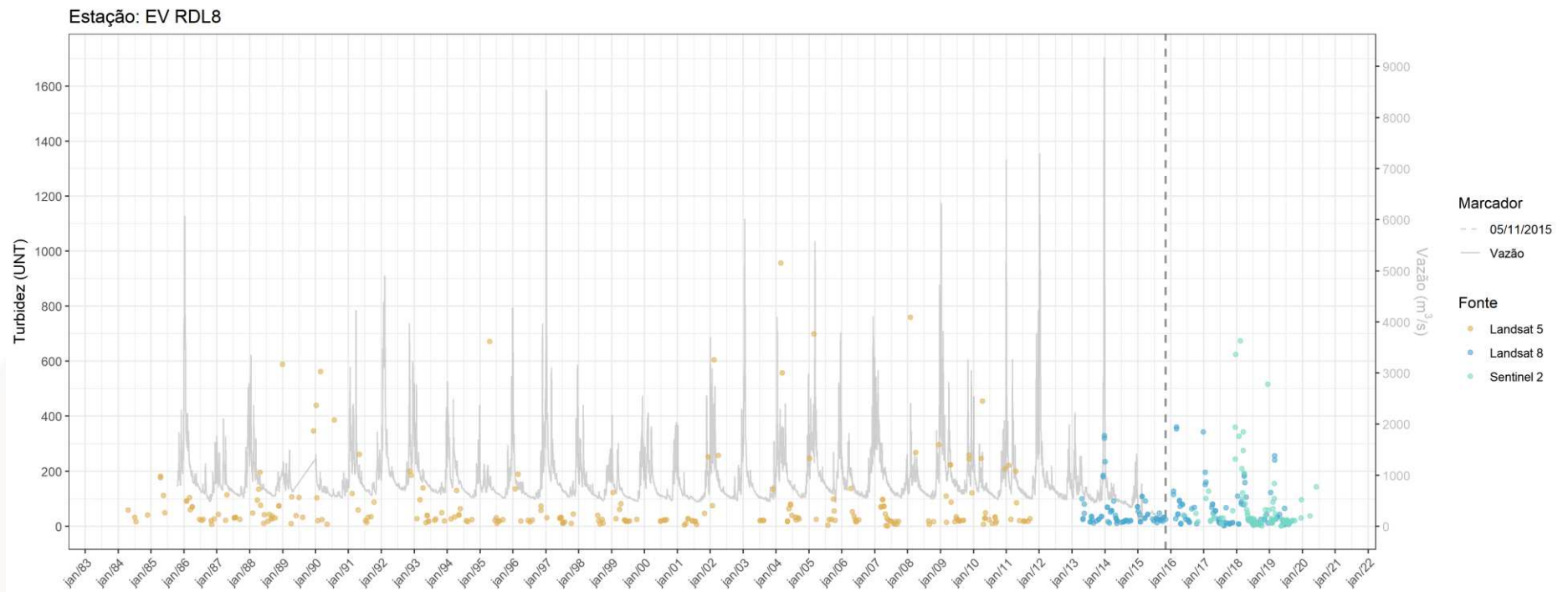
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 108 - Série histórica de turbidez – Estação LNV03.



Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 109 - Série histórica de turbidez – Estação EV RDL8.



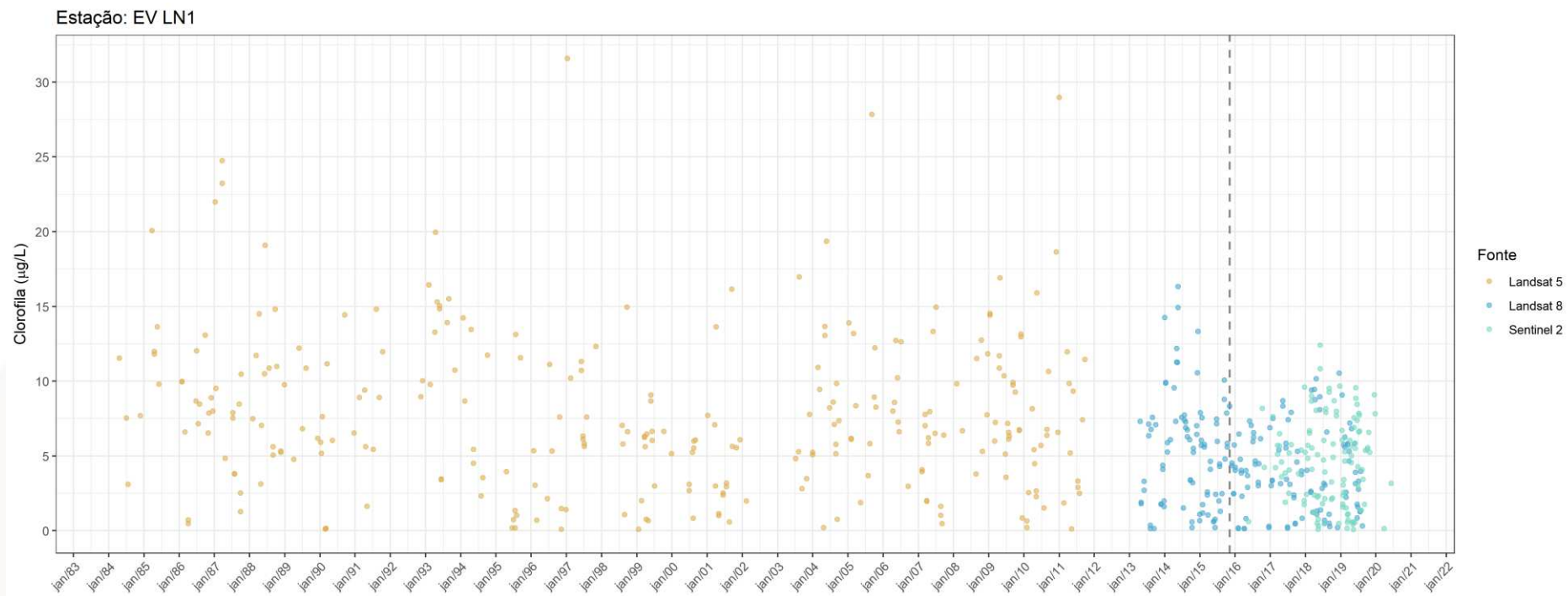
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

A Lagoa Nova, em geral, apresentou baixos níveis de turbidez, por ter uma bacia hidrográfica menor, ou seja, o aporte de sedimentos é menos elevado se comparado a lagoa Juparanã, que é localizada logo a leste. A maior parte dos valores ficaram abaixo de 10 NTU, sendo os maiores dados registrados em meses chuvosos. As estações mais próximas ao rio Doce não apresentaram valores mais elevados se comparados com as estações na área central da lagoa, reforçando a hipótese que, mesmo havendo um canal que liga a lagoa ao rio, a probabilidade das águas do rio Doce adentrarem a lagoa durante as épocas de cheias é pequena.

Para efeitos de comparação, os dados da estação EV RDL8 localizado próximo a lagoa foram inseridos no gráfico de série histórica. Os dados foram plotados juntamente com os valores de vazão ajustada pela área, método descrito na seção 5.3.2.2.1. É possível observar a sazonalidade nos dados e uma correspondência em alguns picos de vazão.

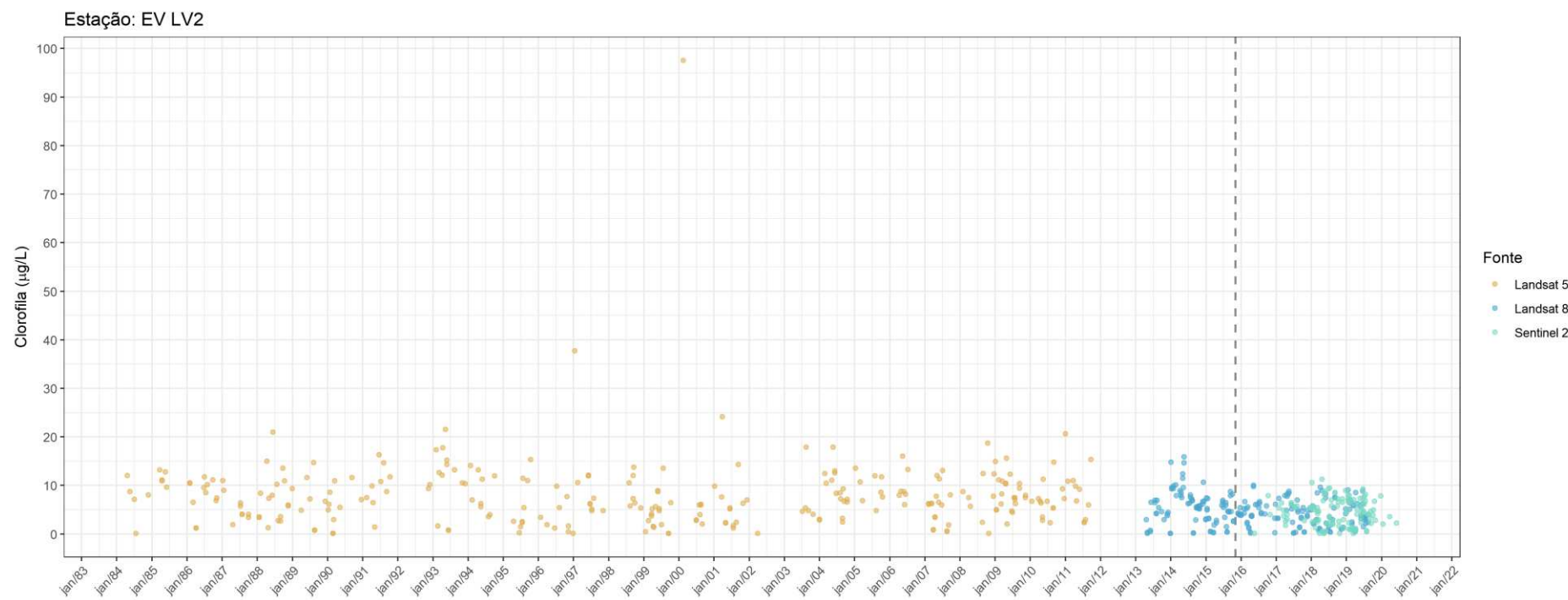
A seguir são apresentados os gráficos para o parâmetro clorofila-a, para as mesmas estações virtuais (Figura 110 até a Figura 117).

Figura 110 - Série histórica de clorofila-a – Estação EV LN1.



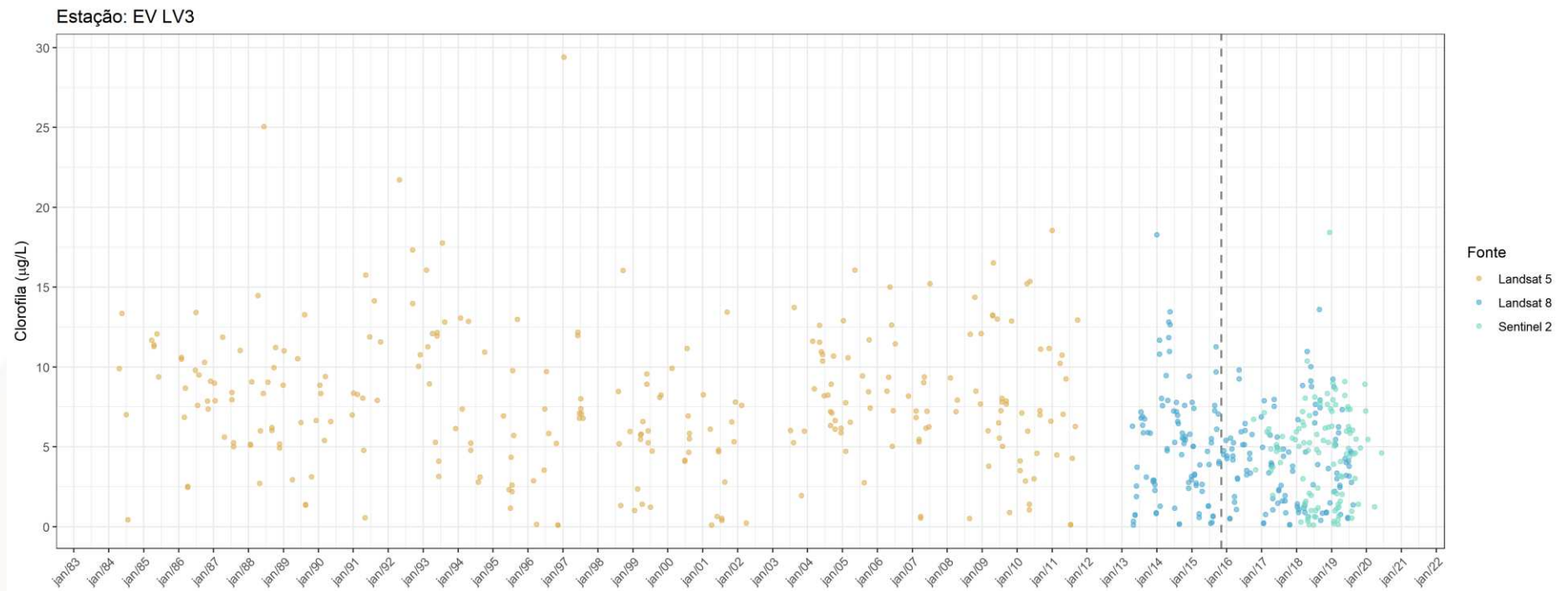
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 111 - Série histórica de clorofila-a – Estação EV LV2.

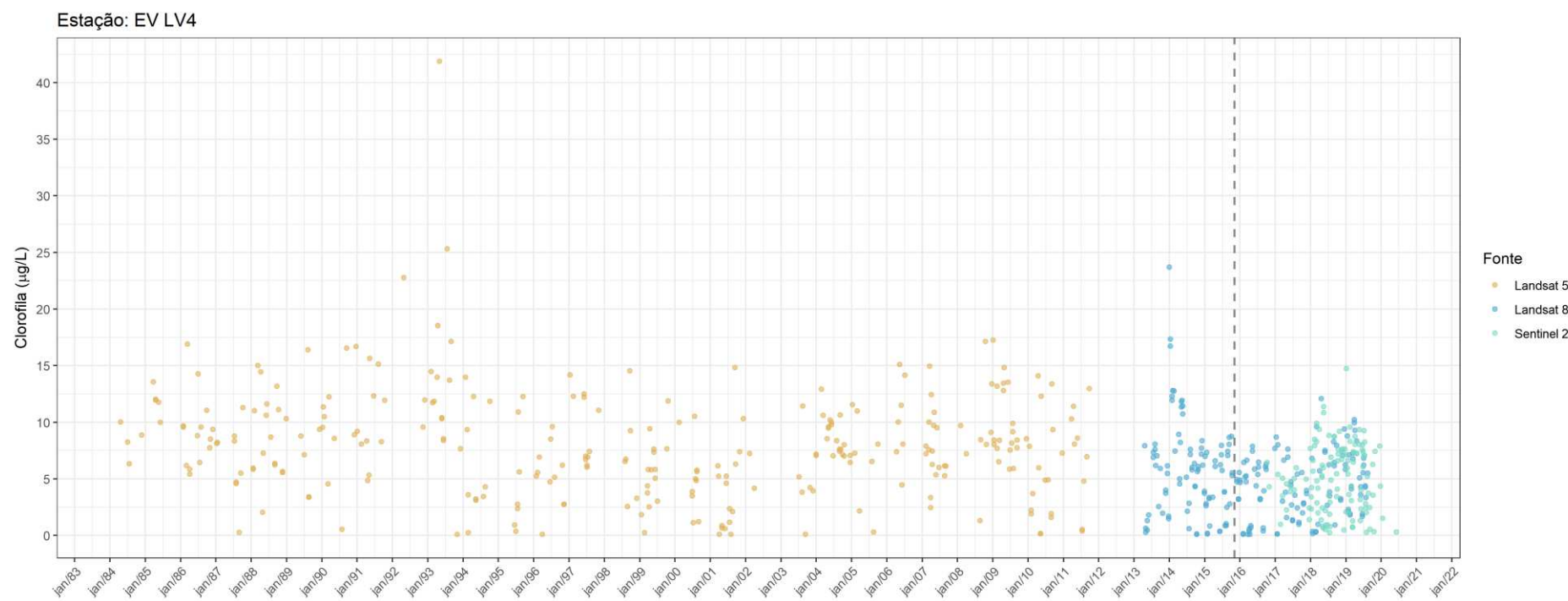


Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 112 - Série histórica de clorofila-a – Estação EV LV3.



Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 113 - Série histórica de clorofila-a – Estação EV LV4.

Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 114 - Série histórica de clorofila-a – Estação EV LV5.

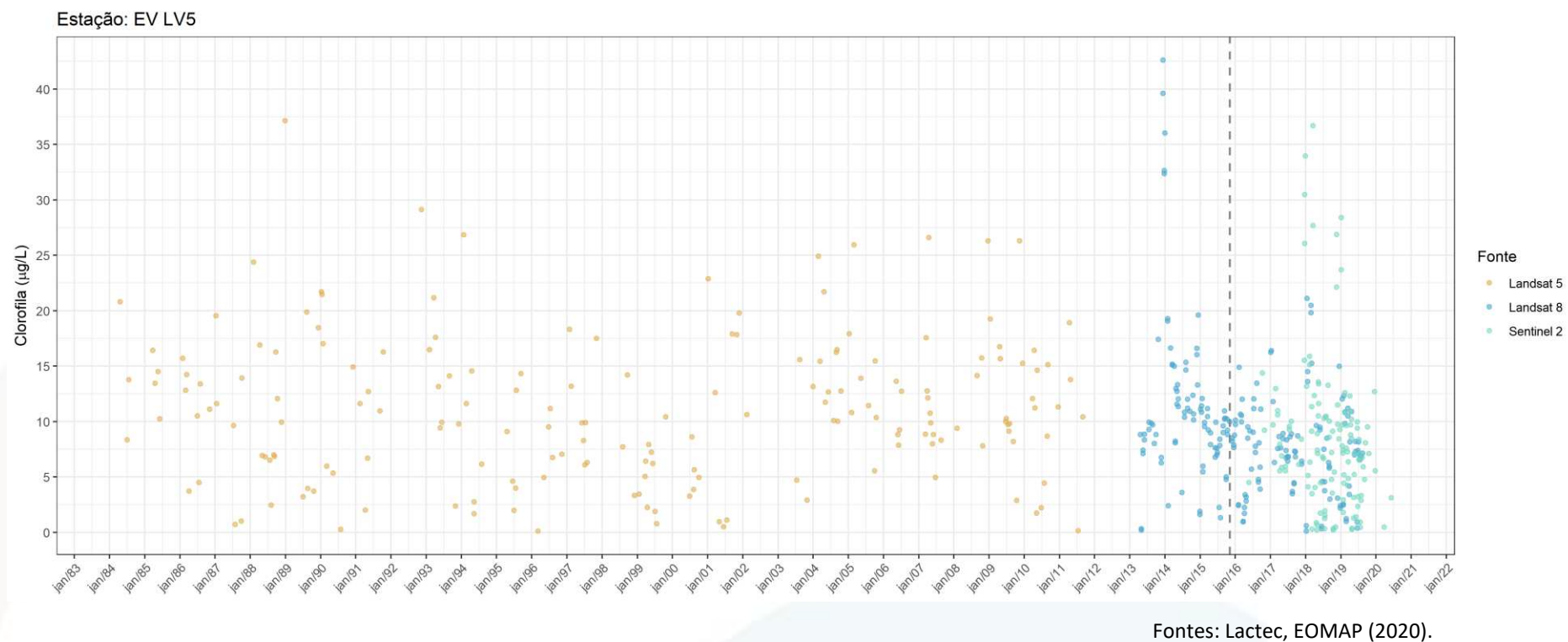
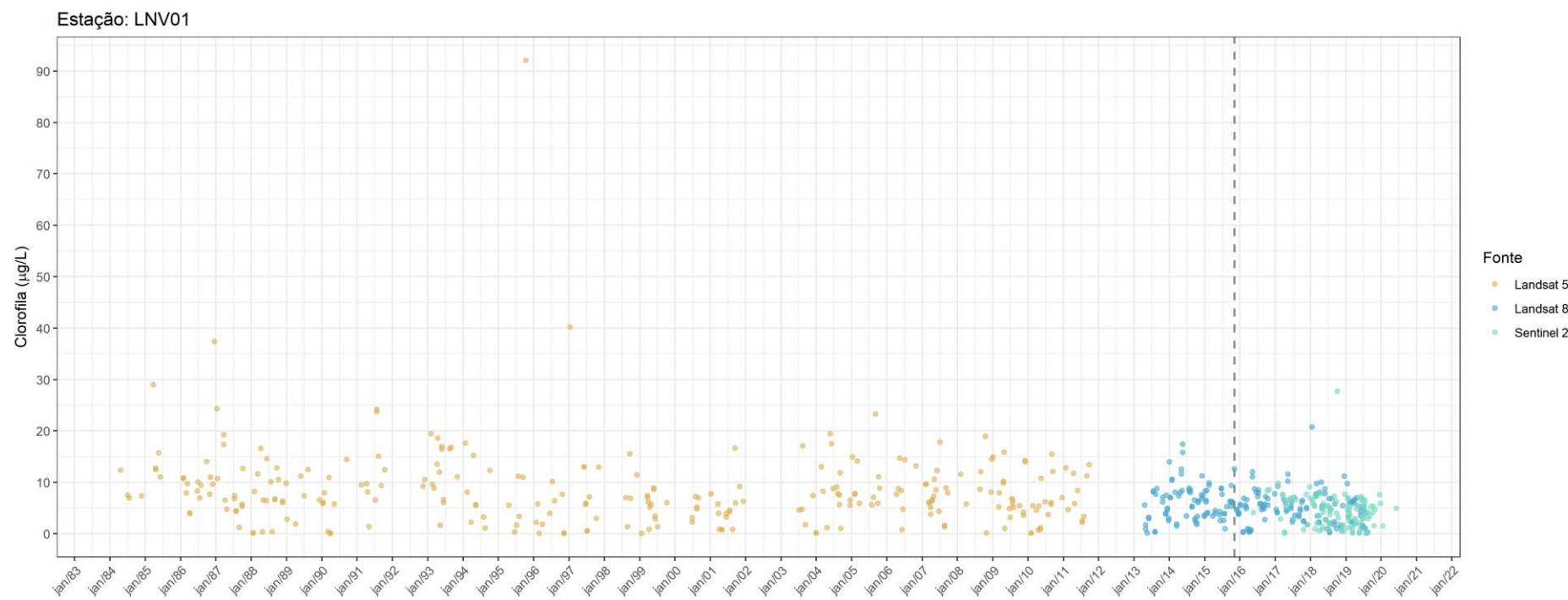
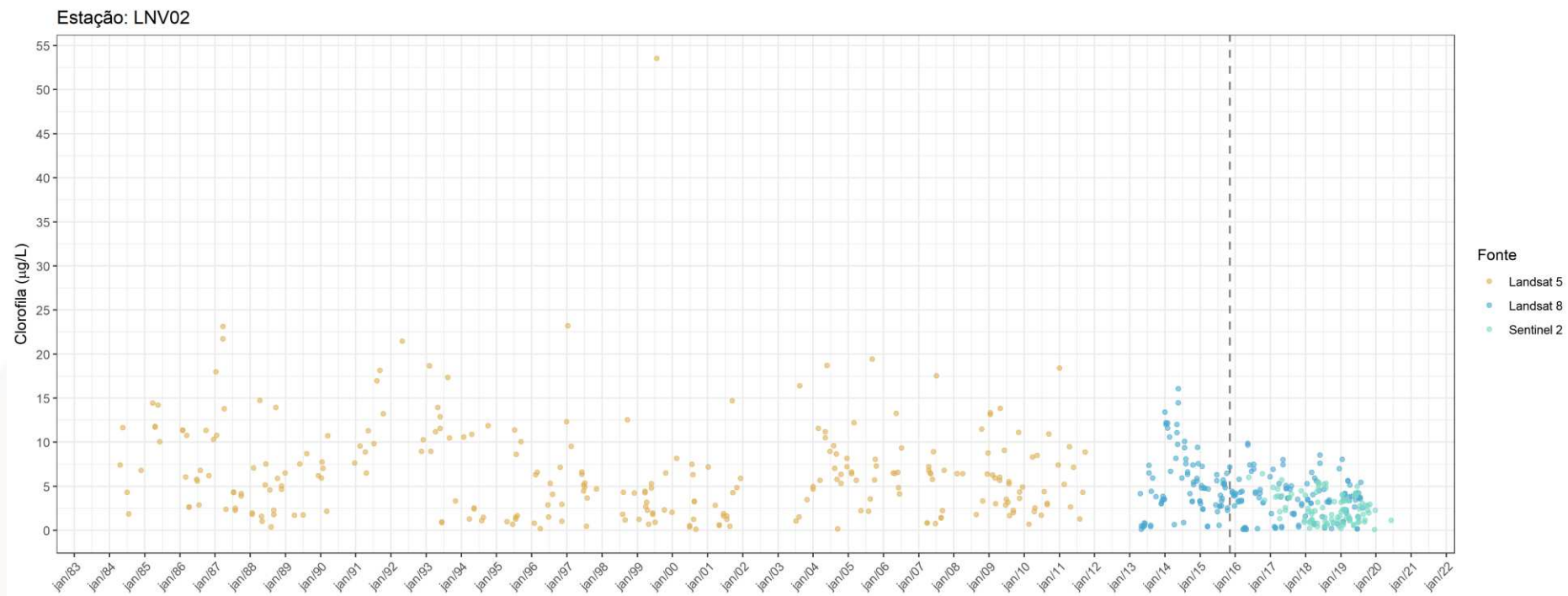


Figura 115 - Série histórica de clorofila-a – Estação LNV01.



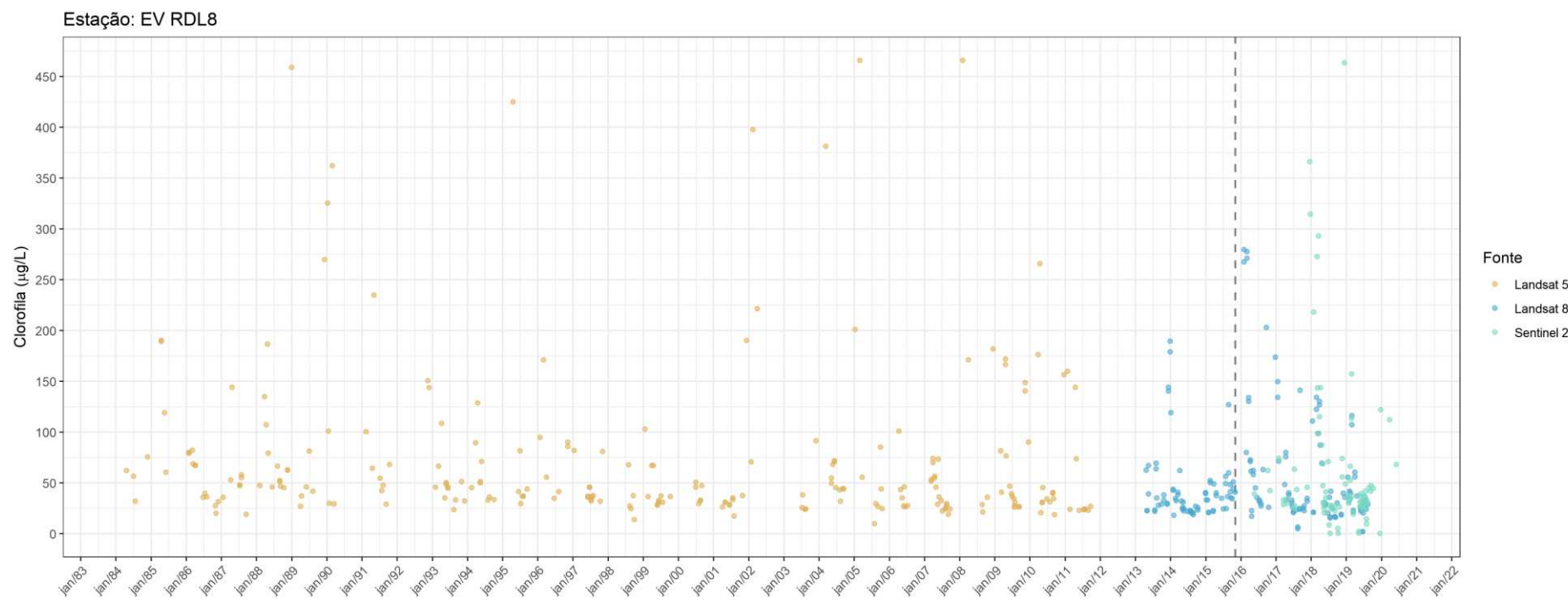
Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 116 - Série histórica de clorofila-a – Estação LNV02.



Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Figura 117 - Série histórica de clorofila-a – Estação EV RDL8.



Fontes: Lactec, EOMAP (2020).

Os valores de clorofila-a apresentaram uma distribuição mais “caótica” se comparado com turbidez, no entanto os valores estão em um nível menor se comparado com as outras lagoas. Não foi possível observar sazonalidades, os valores foram similares independente da época do ano. A estação EV LV5 (Figura 114), que fica localizada no extremo norte da lagoa, apresentou os maiores valores, indicando a influência da descarga do rio que ligado ao corpo d’água.

No caso da estação EV RDL8 localizada no rio (Figura 117), os valores são mais elevados e também não foi possível observar sazonalidades. A distribuição dos dados é similar aos da estação EV RDL10 e com valores menores que a da estação EV RDL9 – localizada próximo a área urbana. É possível nesse caso identificar os efeitos da urbanização na eutrofização do corpo d’água.

5.3.3 CONCLUSÕES OBTIDAS NA AVALIAÇÃO DO EFEITO NAS LAGOAS

Neste item foram analisadas imagens de diversos sensores orbitais em datas próximas a eventos extremos de cheias, no intuito de se comparar com os valores de cotas e vazão da cheia de janeiro 2016, as quais ocorreram após o desastre. O objetivo foi verificar se com base em eventos similares à cheia de 2016, houve possibilidade das águas do rio Doce entrarem nas lagoas localizadas próximas a sua foz, possivelmente trazendo o rejeito depositado dentro delas.

A partir da análise de imagens orbitais de diferentes eventos de cheias na calha do rio Doce, observou-se uma mudança significativa nos valores de turbidez das lagoas comparando-se datas prévias e póstumas às enchentes, além da similaridade da coloração desses corpos hídricos com a do rio Doce. Esses resultados indicaram uma alta possibilidade de que as águas do rio Doce adentrem as lagoas adjacentes – em especial as lagoas Juparanã, Areão, Areal e Monsarás – em eventos de cheias. Baseando-se nas imagens dos eventos similares a cheia de 2016, verificou-se que há a possibilidade das águas terem entrado na Lagoa Nova, porém menor que a das outras lagoas. Quanto a lagoa do Limão, em nenhuma das imagens analisadas os valores se alteraram na mesma magnitude que das outras lagoas. Neste caso, a possibilidade das águas terem entrado nesta lagoa é mínima.

Convém mencionar que, apesar de não ter sido possível visualizar através das imagens os efeitos da cheia do rio Doce de 2016 sobre as lagoas devido a fatores atmosféricos, foi observado que em eventos menos extremos de cheias (cotas menores) houve a possibilidade dessa entrada, o que sugere então que as lagoas Juparanã, Areão, Areal e Monsarás tenham sido atingidas em janeiro/2016 pelas águas do rio Doce.

5.4 O EFEITO NO MAR

Com o rompimento da barragem de Fundão em 5 de novembro de 2015, a onda de rejeitos se deslocou e atingiu a área costeira adjacente ao rio Doce em 21 de novembro de 2015, a qual se dispersou no mar, ocasionando diversos danos naquela região. Um parâmetro que descreve as dimensões dos danos é o volume (ou massa) de rejeitos que foi e ainda está sendo liberado ao mar e que contribui aos danos na região costeira e marinha. Outro parâmetro é a extensão da área da passagem da pluma. Os mesmos são descritos nos itens subsequentes.

5.4.1 VOLUME DE REJEITO LIBERADO AO MAR

Os estudos de modelagem hidrodinâmica apresentados em Brasil (MPF)/LACTEC (2020b) demonstram que o aporte de rejeitos ao mar provenientes do desastre foi de aproximadamente $0,99 \text{ hm}^3$ (em termos de massa $1,98 \cdot 10^6 \text{ ton}$), entre o 21/11/2015 e o mês de outubro de 2016, o que corresponde a 2,25% do volume total liberado pelo desastre. O restante do rejeito ficou retido nos reservatórios das hidrelétricas ou depositou na calha do rio Doce e nas margens do mesmo.

A partir de medições de sólidos suspensos totais e vazões antes e depois do desastre foi estimada a massa (e realizada uma conversão para volume) de rejeitos que atingiu a região costeira, entre o desastre e o final do ano de 2019, estimado como o aporte adicional, acima da linha base. O principal resultado relacionado à massa (ou volume) de rejeito sendo aportada no ambiente costeiro é relacionado com os períodos em que tais aportes ocorrem. Em geral, esses aportes ocorrem nos períodos chuvosos, nos quais as cargas calculadas tendem a ultrapassar as cargas médias de linha-base. Já nos períodos secos, tais cargas estão próximas ao que era observado no período de linha-base. Detalhes desta análise podem ser consultados no TOMO IV do presente relatório. Com estes resultados estimou-se que entre o desastre e 2019, $1,1 \text{ hm}^3$ (em termos de massa $2,2 \cdot 10^6 \text{ ton}$) de rejeitos foram aportados no ambiente costeiro, o que corresponde a 2,5% do volume total liberado no rompimento da barragem de Fundão.

Dado que os aportes provenientes do desastre ocorrem nos períodos chuvosos, a cheia de 2020 também pode contribuir para o aporte de rejeitos para a área costeira. No ambiente continental, por exemplo, as cargas de sólidos suspensos totais em algumas estações de monitoramento do compartimento 2 avaliadas ultrapassaram os máximos de linha-base, conforme demonstrado no item 5.1.

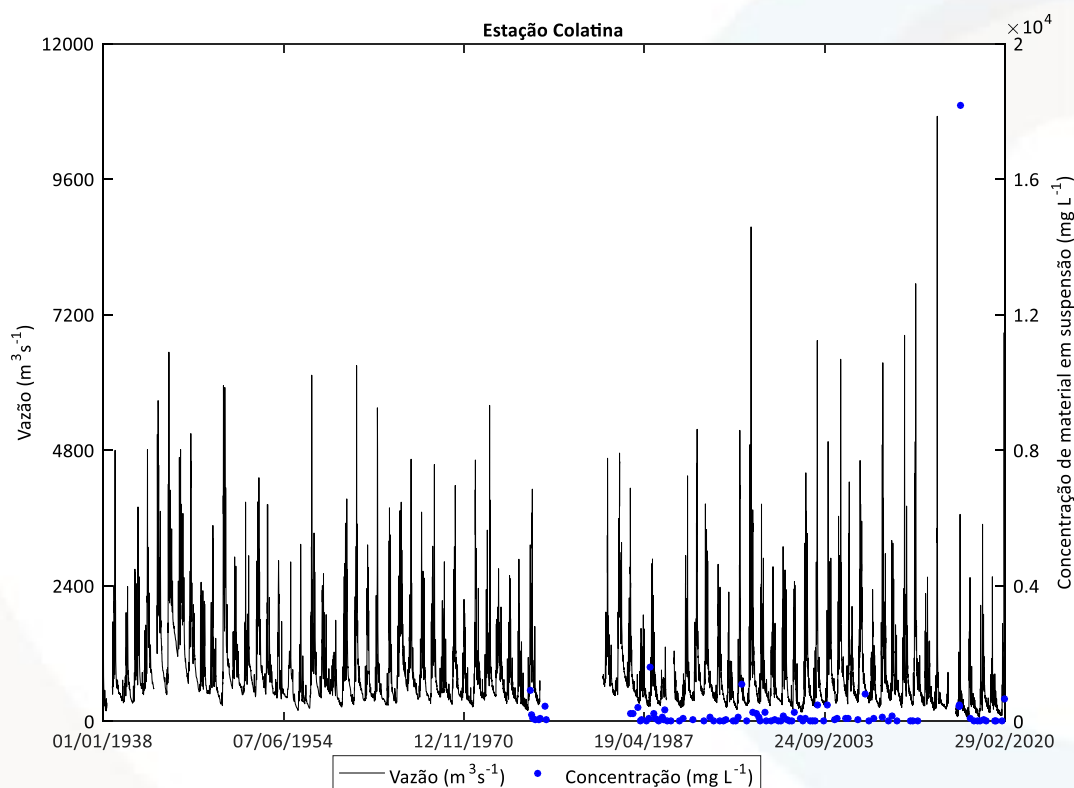
Para avaliar os efeitos da cheia de 2020, foram utilizados dados da série histórica de vazão e concentração de material em suspensão da estação 56994500 (Colatina), obtidos do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb), da Agência Nacional de Águas (ANA), na qual foi observada uma medição de concentração do material em suspensão no dia 29/01/2020, próximo ao pico de vazão da cheia de 2020 desta estação, que ocorreu no dia 28/01/2020, de $6.883,25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. É importante destacar que a frequência de

medições de concentração de material em suspensão nesta estação não é a mesma ao longo dos anos. Como exemplo, no ano de 2018 foram realizadas duas medições (abril e maio) e no ano de 2000, foram realizadas quatro medições (abril, julho, setembro e dezembro).

Na Figura 118 está apresentada a série histórica de vazão e concentração de material em suspensão na estação Colatina. As medições de vazões foram iniciadas em 1938 na referida estação e, em 1976 para concentração de material em suspensão. Os dados de vazões se encontraram disponíveis até 29/02/2020. A partir dos dados apresentados foram calculadas as cargas de material em suspensão para os períodos com dados medidos de vazão e concentração.

Na Figura 119 estão apresentados os resultados de carga de material em suspensão na estação Colatina. No período de linha-base, a maior carga foi observada em novembro/1987, de 132.720,6 t dia⁻¹. No período pós-desastre, a maior carga ocorreu em 27/01/2016, de 2.623.027,1 t dia⁻¹, a qual ultrapassou a carga máxima de linha-base em 19,8 vezes. No caso da cheia de 2020, a carga máxima de linha-base foi ultrapassada em 2 vezes pela carga de material em suspensão de 29/01/2020, de 267.790,7 t dia⁻¹. Para mais detalhes das cargas máximas, consulte a Figura 118.

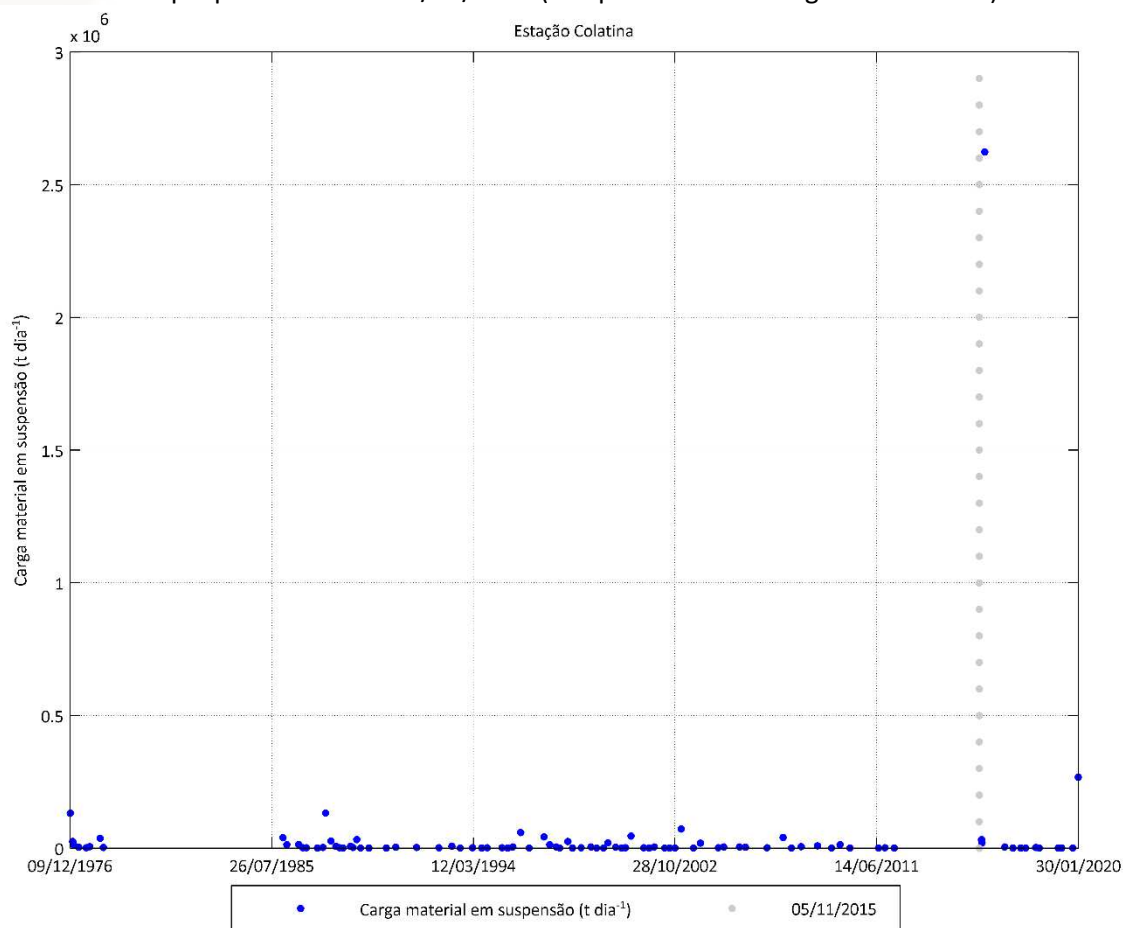
Figura 118 - Série histórica de vazão e concentração de material em suspensão na estação Colatina.



Fonte: Lactec (2020).

Desta forma, observa-se que no período chuvoso de 2020 a carga máxima de linha-base foi ultrapassada, indicando ressuspensão de rejeitos e carreamento de material depositado nas margens que contribuem para os aportes para a área costeira adjacente ao rio Doce. Estes resultados reforçam a necessidade de monitoramento próximo a foz do rio Doce, assim como maior frequência de monitoramento no período chuvoso. Estes resultados também são semelhantes aos obtidos para o compartimento 2, apresentados na seção 5.1, nos quais foram observados valores de cargas que ultrapassam os máximos de linha-base no período chuvoso de 2020.

Figura 119 - Cargas para a série histórica de vazão e material em suspensão na estação Colatina, com destaque para a data de 05/11/2015 (rompimento da barragem de Fundão).



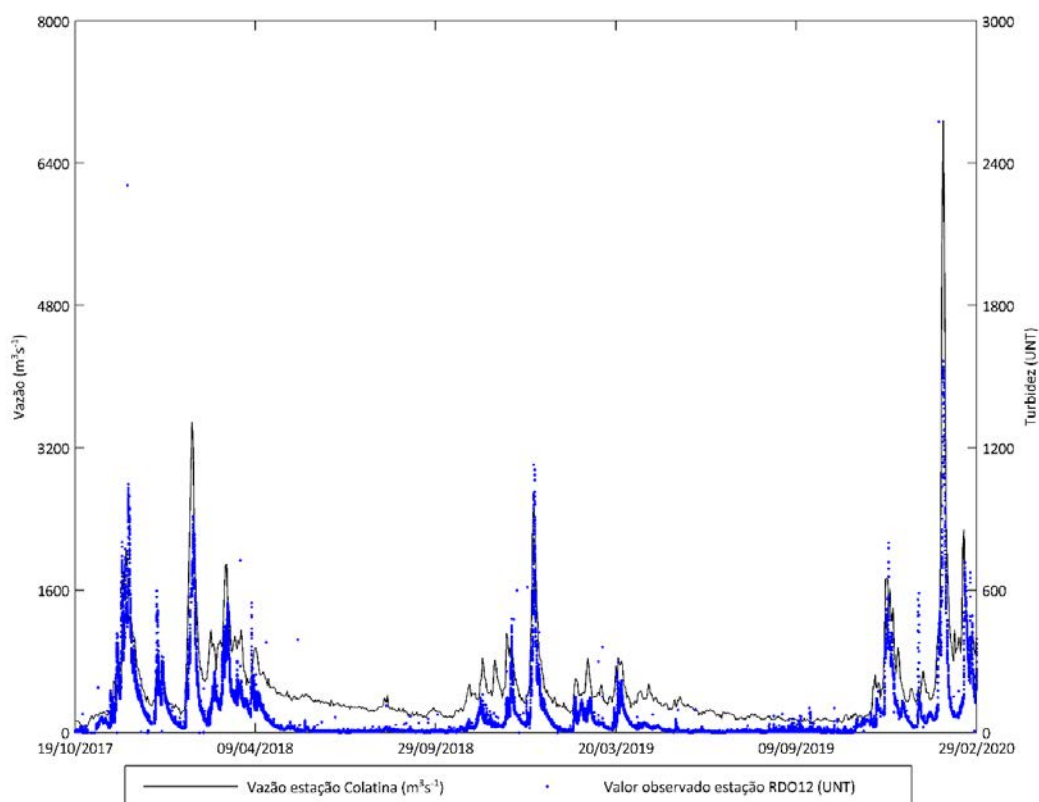
Fonte: Lactec (2020).

Tabela 14 – Cargas de material em suspensão (máximos de linha-base e pós-desastre e carga de janeiro de 2020), vazões e concentrações na estação Colatina.

Período	Carga (t dia ⁻¹)	Vazão (m ³ s ⁻¹)	Concentração (mg L ⁻¹)
Linha-base (carga máxima observada)	132.720,6	955	1.608,5
Pós-desastre (carga máxima observada)	2.623.027,1	1.669	18.190
Janeiro/2020	267.790,7	4.689	661

Na Figura 120 estão apresentadas as medições de vazão na estação Colatina e turbidez na estação RD012, da Renova, localizada no município de Colatina/ES. O aumento de turbidez indica um aumento dos sólidos em suspensão na água. Na referida figura é possível perceber a relação entre a vazão e a turbidez e, no período com medições de turbidez disponíveis, o pico da cheia de janeiro/2020 é o que apresenta os maiores valores de turbidez na estação. Isso indica maiores cargas no período chuvoso de 2020, o que corrobora os resultados até então apresentados.

Figura 120 - Vazões na estação Colatina e turbidez na estação RD012 (Renova).



Fonte: Lactec (2020).

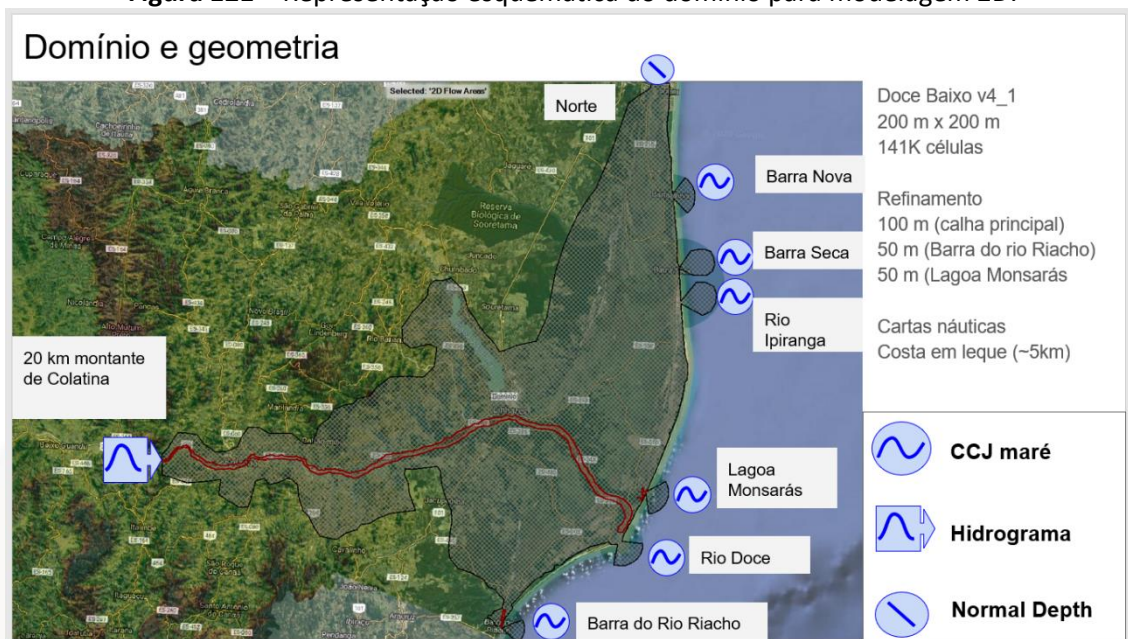
5.4.2 ÁREA DA PASSAGEM DA PLUMA

Nos estudos de modelagem hidrodinâmica apresentados em Brasil (MPF)/LACTEC (2020b) foram realizadas duas simulações (cenário sem e com rompimento) para definir a área da passagem da pluma de rejeitos. O período simulado foi de um ano, entre 21/10/2015 a 20/10/2016 no qual, seguindo as análises de medições de qualidade de água, esperou-se as principais alterações devido ao rompimento da barragem de Fundão. Para tal período foram apresentados mapas indicando a extensão e intensidade da pluma. É importante destacar que devido aos processos contínuos de mistura e transporte, esta área variou e até hoje varia continuamente em extensão e intensidade. Isto, também considerando que, todavia, há aportes de rejeitos ressuspensos, especialmente em períodos de cheias, como descrito no item anterior.

Nesta modelagem anterior foi calculado o aumento das concentrações devido ao desastre para determinar a área da pluma de rejeito. Embora a dinâmica costeira é complexa e variada, espera-se que as características de pluma de rejeitos (extensão e intensidade das concentrações acima da linha-base) serão iguais ou menores, com tendência de redução do que foi observado no ano simulado (21/10/2015 a 20/10/2016). Isto se justifica porque a tendência já foi observada no final do período simulado. Desta forma, para o acompanhamento dos danos, não foi realizada uma nova simulação para estender o período de análise. Porém, as novas simulações na área continental, especificamente do itens 5.2 e 5.4 indicaram que durante o período das cheias há um extravasamento do Rio Doce para planície de inundação e adicionalmente a abertura de algumas barras e extravasamento da água do Rio Doce para o mar em locais diferentes da calha principal do rio Doce. Neste relatório foi analisado o trecho entre a barragem de Candonga e a foz do rio Doce (Figura 121).

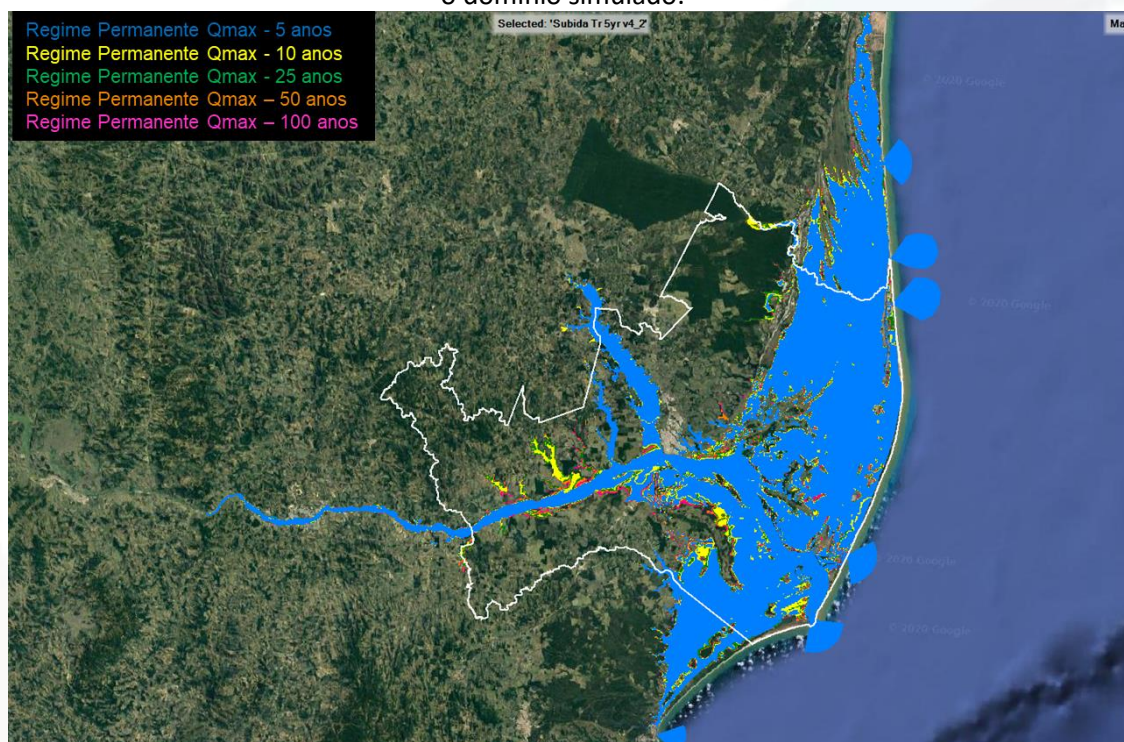
Neste trecho próximo a foz do Rio Doce, em período de seca, o rio corre dentro de sua calha. Durante as grandes cheias, que geralmente ocorrem de dezembro a março, nos momentos de pico da vazão o rio extravasa a calha e alaga esta imensa área de planície extremamente plana e que geralmente corresponde a outras bacias hidrográficas vizinhas. Na Figura 122 está mostrada a ASER neste trecho e na Figura 123 as vazões de saída ao mar. A simulação anterior, no entanto, considerou que a vazão do rio Doce sai toda pela foz do rio Doce. Assim, a simulação anterior não considerou que parte da vazão do rio Doce se espalha na planície de inundação e saindo nas barras durante o pico da cheia. Como indicado na Figura 123 as vazões saindo das barras tem duração curta (3 a 6 dias), mas podem chegar em vazões de até 250 m³/s e porcentuais chegando a mais de 40% da vazão total saindo pelas barras. E toda esta água carrega também o rejeito ressuspensado que é visível também em imagens de satélite (Figura 124). Para o acompanhamento do dano na região costeira foi analisado se há efeitos destes extravasamentos na área de pluma de rejeitos.

Figura 121 – Representação esquemática do domínio para modelagem 2D.



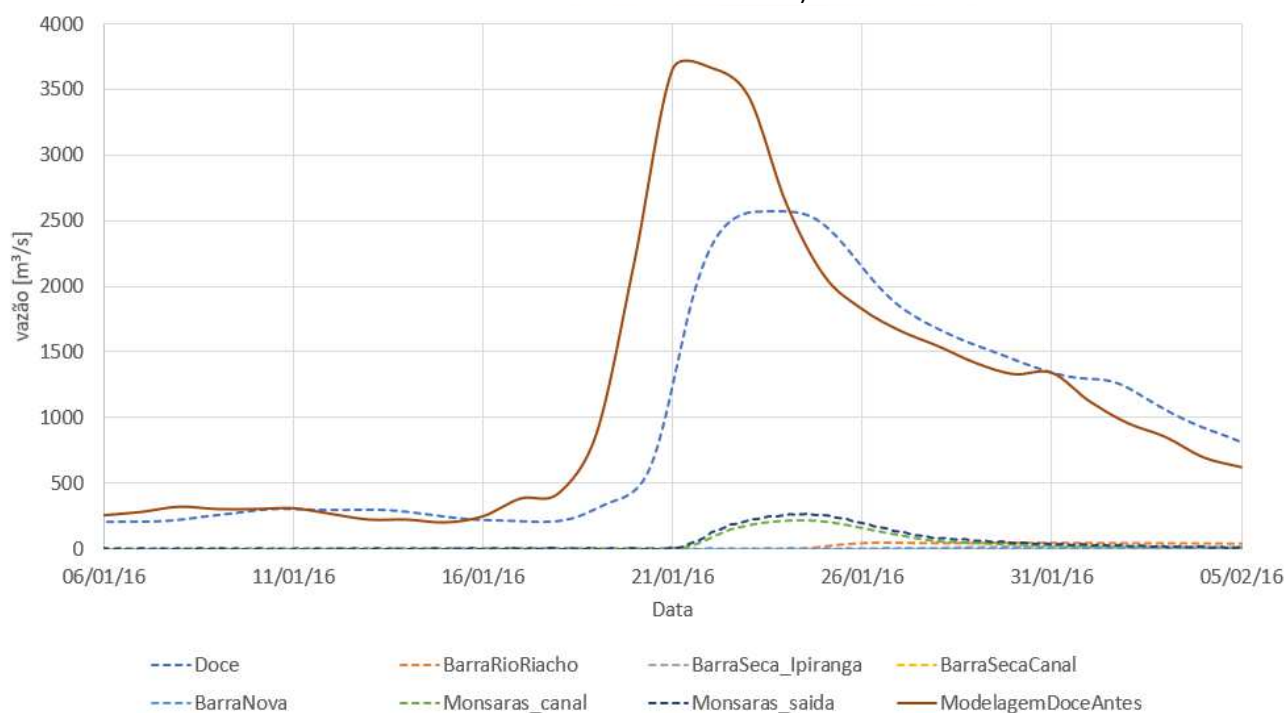
Fontes: Lactec (2020).

Figura 122 – Mancha de inundação para vazões de TR 5, 10, 25, 50 e 100 anos em regime permanente para o domínio simulado.



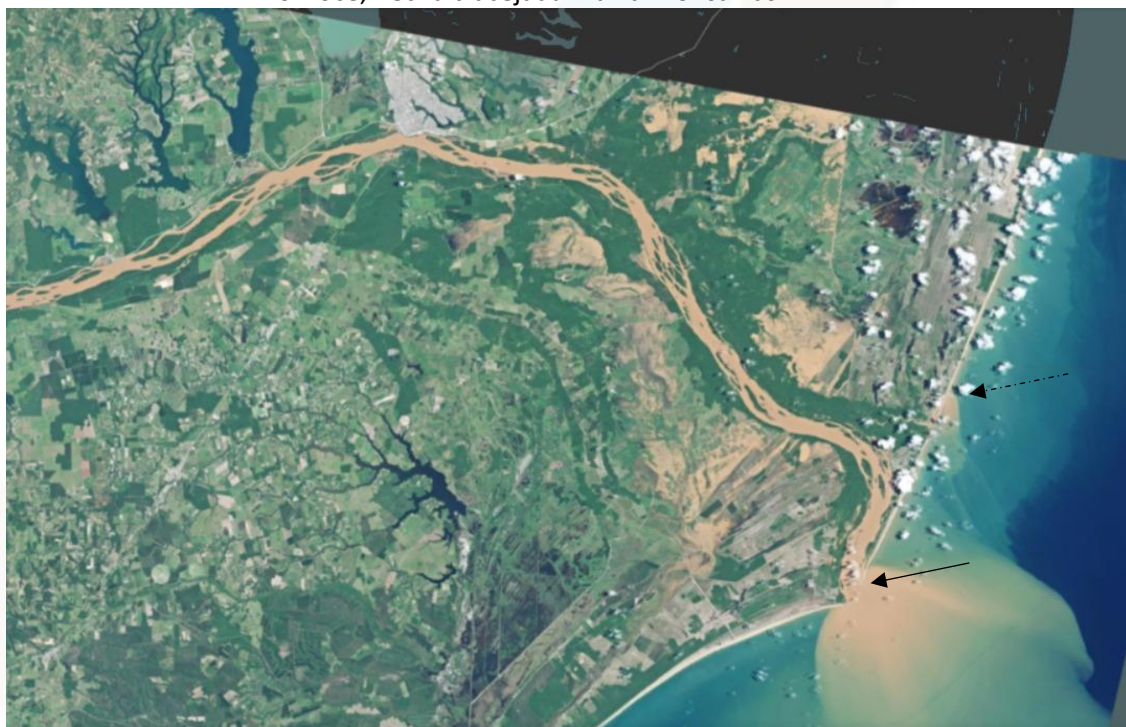
Fontes: Lactec (2020).

Figura 123 – Vazões do rio Doce e das barras saindo ao mar (linha contínua: dado usado na simulação anterior, somente saindo na foz do Rio Doce; linha tracejada: dado usado na simulação nova com saída da foz do Rio Doce e das barras).



Fontes: Lactec (2020).

Figura 124 – Imagem do satélite Rapid-Eye ortho tile 5 m para cheia em 01/02/2020. Flecha contínua: foz do rio Doce, flecha tracejada: Barra Monsarras.

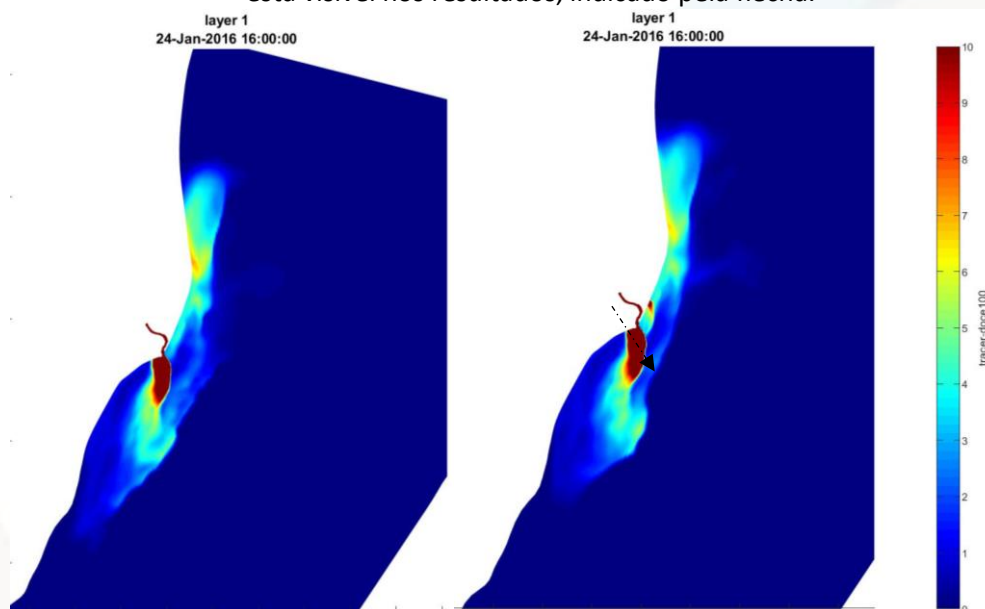


Fontes: Rapid Eye (2020).

Para a análise dos efeitos das barras para a área e intensidade da pluma de rejeitos foi utilizado o modelo hidrodinâmico original (BRASIL(MPF)/LACTEC, 2020b) alterando a vazão do exutório do rio Doce e considerando as vazões nas barras, com as mesmas concentrações usadas para o rio Doce. A Figura 125 mostra a comparação dos resultados para um mesmo instante de tempo em um momento próximo ao pico da cheia. A saída de concentração pela barra é claramente visível nos resultados. Mas observa-se também que a pluma como um todo foi pouco alterada e que as únicas diferenças são locais e próximas as barras. Com as duas simulações foram realizadas as mesmas análises estatísticas (calcular percentis de ocorrências de concentrações em cada local para o período todo) e comparadas.

A comparação mostrou alterações muito pequenas (<1%) na área e distribuição das intensidades. Isto se deve ao fato que os extravasamentos tem curta duração (poucos dias comparado com um ano de análise) e assim não tendo relevância significativa para determinação da área de passagem da pluma. Concluiu-se assim que não é necessário alterar a área da passagem de pluma. Porém, ficou evidente que a ressuspensão de rejeito durante as cheias e o extravasamento às planícies de inundação e parcial saída pelas barras indica que as planícies e barras devem ser monitorados e incluídos nos danos.

Figura 125 – Resultados de concentração do traçador conservativo (em kg m^{-3}) para um momento próximo ao pico da cheia (24/01/2016). Esquerda: modelagem original (sem considerar saída pelas barras); direita: modelagem nova, alterando a vazão do rio Doce e incluindo as saídas pelas Barras. A barra com vazão maior está visível nos resultados, indicado pela flecha.



Fonte: Lactec (2020).

Uma segunda análise do acompanhamento de danos referiu-se a discussões de efeitos e interações da pluma do rio Doce com plumas de demais estuários na região. Para isto foi realizada uma nova simulação,

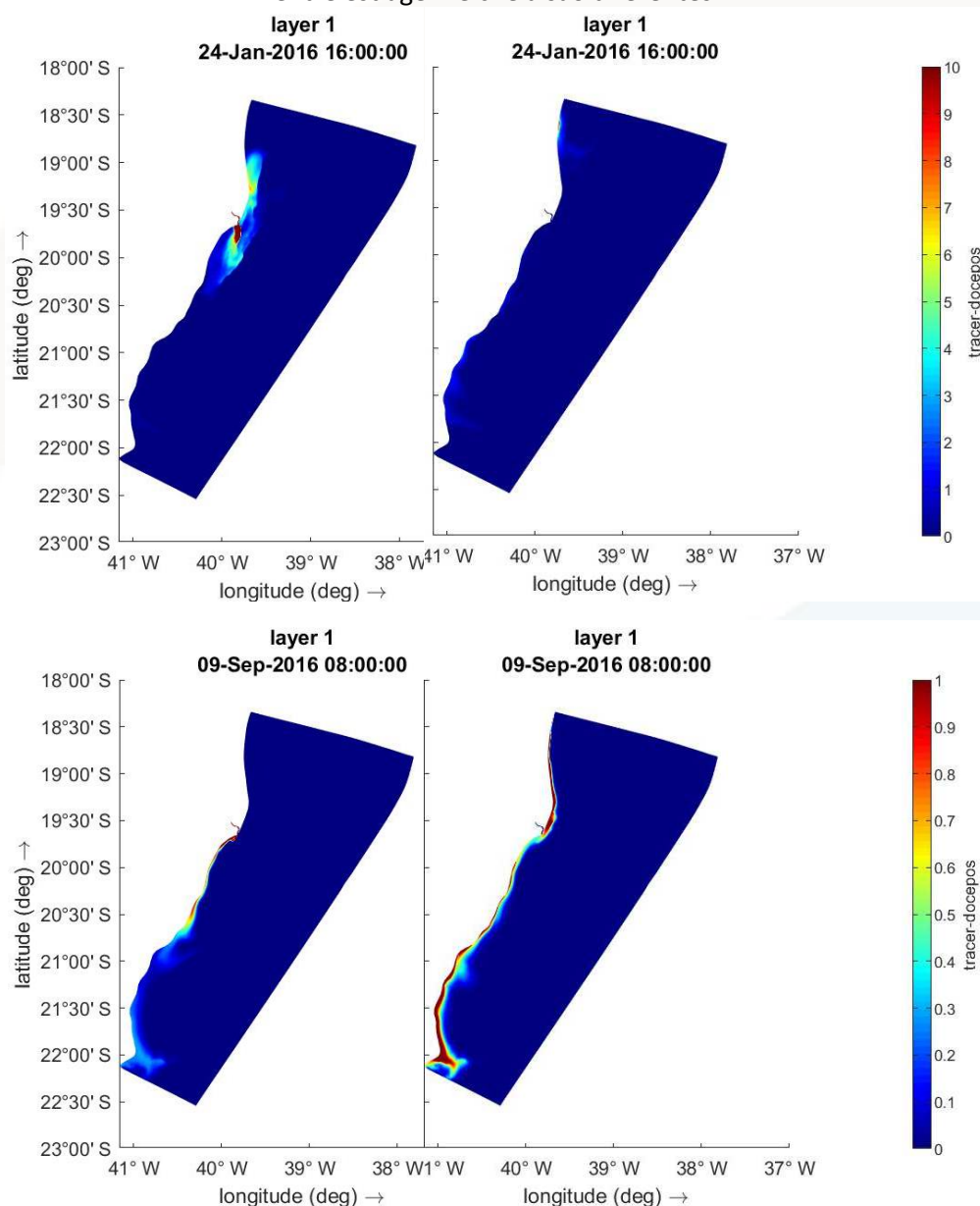
baseada na simulação apresentada em (BRASIL(MPF)/LACTEC, 2020b), mas incluindo traçadores nos demais estuários, listados na Tabela 15, todos com concentração constante de 100 kg/m^3 . Os resultados das plumas dos demais estuários com a pluma do rio Doce é ilustrado na Figura 126 para um momento do pico de vazão no rio Doce e num momento de estiagem. Os resultados indicam que em períodos de cheia no rio Doce a pluma do mesmo é a pluma dominante no domínio e plumas dos demais estuários tem abrangência local somente. Porém, em períodos de estiagem observa-se que as concentrações resultantes das plumas dos demais estuários, neste momento até se mostram mais dominantes do que da pluma do rio Doce. A concentração do traçador corresponde a uma substância conservativa dissolvida (por exemplo EPTs) e mostra que substâncias observadas nesta região, podem ser associadas ao aporte do rio Doce, especialmente em períodos de cheias e assim associados ao desastre, mas podem também ter origem dos demais estuários.

Tabela 15 - Vazões dos demais estuários no domínio analisado.

Nome do estuário	Vazão média anual estimada (m^3/s)
Itaunhas	30,1
São Mateus	74,3
Jucu	23
Santa Maria Vitória	26,9
Benevente	19,13
Rio Novo	4,2
Itapemerim	31,3

Figura 126 – Resultados de concentração de traçador conservativo (em kg m^{-3}) para um momento próximo ao pico da cheia (24/01/2016, figuras acima) e num momento de estiagem (09.09.2016, figuras abaixo).

Esquerda: modelagem original (sem considerar traçador nos demais estuários no domínio); direita: modelagem nova, incluindo traçador nos locais dos demais estuários. Obs.: As legendas de concentração entre estiagem e cheia são diferentes.



Fonte: Lactec (2020).

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação quali-quantitativa da água mostrou que, no período chuvoso de 2020 (janeiro, fevereiro e março/2020), foram observadas cargas de sólidos suspensos totais que ultrapassaram o máximo histórico (carga máxima de linha-base). Como comparação, no ano de 2019, para sólidos suspensos totais não foram

identificadas cargas superiores ao histórico nas estações avaliadas. Estes resultados destacam a importância da manutenção do monitoramento de qualidade da água haja vista sua alta dependência dos períodos chuvosos ao longo do rio Doce e com maior frequência, dado que pode haver ressuspensão do material depositado ao longo do rio Doce.

A avaliação dos dados de vazão e concentração de material em suspensão na estação Colatina indicou que em janeiro/2020 foi observada uma carga que ultrapassa o histórico de linha-base. Estas cargas contribuem para os aportes na área costeira adjacente ao rio Doce. Estes resultados destacam a importância da manutenção do monitoramento no rio Doce e com maior frequência, dado que pode haver ressuspensão do material depositado ao longo do rio Doce, que contribuem para os aportes na área costeira.

As simulações atualizadas, considerando extravasamento do rio Doce para as planícies de inundação e saindo ao mar pelas barras mostraram a importância do monitoramento das cheias também nestas regiões. A respeito da área total de passagem da pluma, porém, não foi significativo e assim foi mantida a área também no acompanhamento de danos.

6 ECOTOXICOLOGIA

A ecotoxicologia (também denominada toxicologia ambiental) é a ciência que estuda os efeitos tóxicos, qualitativos, quantitativos e de modo integrado, de substâncias naturais ou sintéticas sobre organismos vivos animais ou vegetais, aquáticos ou terrestres, incluindo suas interações com o ambiente (TRUHAUT, 1977). Trata-se de uma ciência relativamente nova, reconhecida a partir da década de 60, com vistas tanto ao diagnóstico da qualidade ambiental quanto à avaliação e previsão de impactos ambientais decorrentes da poluição (SISINNO; OLIVEIRA-FILHO, 2013; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2014). Esta ciência permite, pela identificação de alterações subletais em diferentes níveis da organização biológica, compreender as causas, os efeitos e os mecanismos de ação de um determinado poluente ou de alterações ambientais sobre o animal, bem como antecipar efeitos subsequentes sobre as populações, comunidades e até mesmo ecossistemas (MOUNEYRAC; AMIARD-TRIQUET, 2013; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2014)

Em decorrência da extensão do relatório referente a este tópico, de modo a não segmentar os textos, optou-se por apresentar o presente capítulo a parte, em um volume único. Assim, os textos de Ecotoxicologia, componentes do TOMO I do Relatório de Acompanhamento de Danos, serão apresentados integralmente no volume específico, intitulado *Ecotoxicologia*. Os apêndices e anexos relativos à temática serão apresentados sequencialmente, no documento específico e nos Volumes 1 a 12 deste mesmo tomo.

7 MATRIZ DE DANOS

A partir dos estudos levantados no diagnóstico de danos, foi elaborada uma matriz, na qual todos eles foram sintetizados, separados por ambiente afetado, sendo relacionados os valores dos indicadores na linha-base e pós-desastre e as suas respectivas classificações em termos de abrangência, gravidade, tendência e reversibilidade (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b). No presente documento, a matriz elaborada foi revisada, com base nos dados de acompanhamento de danos efetuados até o ano de 2020, sendo incluída a classificação da importância dos danos. Ressalta-se que alguns danos não tiveram a classificação de importância por não serem considerados indicadores de mudança de estado dos sistemas ambientais avaliados. Maiores detalhes da relação dos danos com os serviços ecossistêmicos afetados podem ser consultados no capítulo 8 desse relatório.

Ressalta-se, somente, que a temática Patrimônio Cultural, Bens Materiais e Imateriais não foi estudada em termos do acompanhamento de danos, tendo sido a matriz finalizada no Relatório de Diagnóstico dos Danos – TOMO I (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b).

Ambiente	Área temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Terrestre	Superfície	Alterações de paisagem	Mapa do uso e ocupação do solo, análise de imagens pré e pós-desastre e a APDL.	Cálculo da área afetada em ha, além de verificação in loco de pontos de interesse. Área total afetada de 92.311,1 ha.	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Cessado	Parcialmente reversível	-
		Danos em áreas de processos de extração de bens minerais	Consulta dos processos minerários na base de dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), análise de imagens pré e pós-desastre e a APDL.	Quantificação dos processos afetados e cálculo da área correspondente em ha, pela APDL. Total de 53.441,82 ha de área com processo mineral afetado e 612 processos.	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Cessado	Parcialmente reversível	-
		Danos em feições subterrâneas ¹	Dados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) e do Patrimônio Cultural e Turístico (MG).	Foram identificadas 8 feições naturais e 2 sítios arqueológicos atingidos pela lama: - 2 feições naturais totalmente alagadas; - 6 feições naturais atingidas, mas em processo de recuperação; - 1 sítio arqueológico totalmente soterrado.	Compartimento 1	Grave	Cessado	Irreversível	Muito importante
		Áreas de geração de resíduos sólidos	Mapa do uso e ocupação do solo, análise de imagens pré e pós-desastre e a APDL.	Madeira suprimida = 120.017,23 m ³ ; Edificações atingidas = 38.085,62 m ³ ; Estimativa do volume de resíduo de RCD gerado pelo processo de reassentamento = 4.551,50 m ³ .	Compartimento 1	Grave	Redução	Parcialmente reversível	-
		Ampliação de áreas de disposição de rejeitos	Barragem de Fundão	Parque de Exposições - Barra Longa/MG = 1,96 ha; Fazenda Vista Alegre - Barra Longa/MG = 11,56 ha; UHE Risoleta Neves - Rio Doce/MG = 20,63 ha.	Compartimento 1	Grave	Aumento	Parcialmente reversível	-
		Alteração da composição do solo ²	quartzo, mica, caulinita, clorita, feldspato potássico C org. = 0,88 dag dm ⁻³ matiz da cor = 2,5YR a 10YR pegajosidade = pegajoso a muito pegajoso	hematita, goethita, magnetita C org. = 0,17 dag dm ⁻³ matiz da cor = 7,5R a 10R pegajosidade = ligeiramente pegajoso	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Irreversível	Muito importante
	Solos	Formação de Tecnossolo	camada = 0 m	camada (mediana) = 1 m	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Irreversível	Muito importante

(-) Danos que não tiveram classificação determinada.

1 Aqui é apresentada a classificação para a maioria das feições, sendo que 3 foram classificadas como gravíssimo.

2 Comparação com os solos controle, uma vez que não haviam indicadores de linha base.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Terrestre	Solos	Aumento da densidade do solo	areia total = 695 g kg ⁻¹	areia total = 437 g kg ⁻¹	Compartimento 1	Grave	Cessado	Parcialmente reversível	Muito importante
			areia grossa = 75 g kg ⁻¹	areia grossa = 64 g kg ⁻¹					
			areia fina = 600 g kg ⁻¹	areia fina = 368 g kg ⁻¹					
			argila = 150 g kg ⁻¹	argila = 150 g kg ⁻¹					
			silte = 160 g kg ⁻¹	silte = 412 g kg ⁻¹					
			d. solo = 1,51 g cm ⁻³	d. solo = 1,97 g cm ⁻³					
			d. part. = 2,73 g cm ⁻³	d. part. = 3,00 g cm ⁻³					
			macropor. = 0,201 m ³ m ⁻³	macropor. = 0,07 m ³ m ⁻³					
			micropor. = 0,255 m ³ m ⁻³	micropor. = 0,359 m ³ m ⁻³					
			poros. total = 0,51 m ³ m ⁻³	poros. total = 0,429 m ³ m ⁻³					
		Aumento dos processos erosivos do solo	U _{CC} = 0,230 m ³ m ⁻³	U _{CC} = 0,359 m ³ m ⁻³	Compartimento 1	Grave	Redução	Parcialmente reversível	Importante
			U _{PMP} = 0,133 m ³ m ⁻³	U _{PMP} = 0,072 m ³ m ⁻³					
		Alteração da capacidade de suporte e deformabilidade do solo	CAD = 51,7 mm	CAD = 227 mm	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Irreversível	Importante
			perda de solo: 44,1 t ha ⁻¹ ano ⁻¹	perda de solo: 54,8 t ha ⁻¹ ano ⁻¹					
			tensão de pré-adensamento = 120 kPa	tensão de pré-adensamento = 95 kPa					
		Alteração da permeabilidade e do fluxo de água no solo	coeficiente de permeabilidade = 10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁶	coeficiente de permeabilidade = 10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁵	Compartimento 1	Grave	Redução	Irreversível	Importante
		Alteração da estabilidade de encostas	ângulo de atrito = 24° a 42° Intercepto coesivo = 0 a 55 kPa	ângulo de atrito = 14,9° a 37,2° intercepto coesivo = 7,1 a 26,8 kPa	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Irreversível	Importante
		Alteração da fertilidade e do potencial produtivo do solo ³	pH água = 5,9	pH água = 6,3	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Parcialmente reversível	Importante
			pH KCl = 5,3	pH KCl = 6,6					
			Δ pH = -0,6	Δ pH = 0,14					
			Al ³⁺ = 0,00 cmol _c dm ⁻³	Al ³⁺ = 0,00 cmol _c dm ⁻³					
			m% = 0%	m% = 0%					
			Ca ²⁺ = 2,1 cmol _c dm ⁻³	Ca ²⁺ = 1,1 cmol _c dm ⁻³					
			Mg ²⁺ = 0,49 cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ = 0,18 cmol _c dm ⁻³					
			Ca/Mg = 4,5	Ca/Mg = 6,2					
			P disponível = 4,0 mg dm ⁻³	P disponível = 7,2 mg dm ⁻³					
			K ⁺ = 0,04 cmol _c dm ⁻³	K ⁺ = 0,09 cmol _c dm ⁻³					
			SB = 2,65 cmol _c dm ⁻³	SB = 1,39 cmol _c dm ⁻³					
			V% = 64%	V% = 46%					
			CTC ef. = 2,65 cmol _c dm ⁻³	CTC ef. = 1,52 cmol _c dm ⁻³					
			CTC pot. = 4,1 cmol _c dm ⁻³	CTC pot. = 3,3 cmol _c dm ⁻³					

- 3 Para o diagnóstico desse dano, houve também a interpretação de outros indicadores (plantas coletadas em campo e realização de experimento em condições controladas) para os quais não havia linha base.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Terrestre	Solos	Contaminação do solo por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) ⁴	Fe = 216,7 g kg ⁻¹	Fe = 118,4 g kg ⁻¹	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Irreversível	Importante
			Mn = 3.409 mg kg ⁻¹	Mn = 531,1 mg kg ⁻¹					
			As = 8,6 mg kg ⁻¹	As = 19,2 mg kg ⁻¹	Compartimento 2				
			Mn = 698,3 mg kg ⁻¹	Mn = 1.156,8 mg kg ⁻¹					
			As = 8,3 mg kg ⁻¹	As = 11,2 mg kg ⁻¹	Compartimentos 3 e 4				
			Mn = 499,2 mg kg ⁻¹	Mn = 717,5 mg kg ⁻¹					
		Contaminação do solo por EPTs devido às ações emergenciais pós-desastre ⁵	Ag = 0,018 mg kg ⁻¹	Ag = 0,017 mg kg ⁻¹	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Irreversível	Importante
			Al = 2,9 g kg ⁻¹	Al = 17,1 g kg ⁻¹					
			As = 8,13 mg kg ⁻¹	As = 8,84 mg kg ⁻¹					
			Ba = 36,2 mg kg ⁻¹	Ba = 90,97 mg kg ⁻¹					
			Cd = 0,014 mg kg ⁻¹	Cd = 0,01 mg kg ⁻¹					
			Co = 2,5 mg kg ⁻¹	Co = 5,47 mg kg ⁻¹					
			Cr = 18,2 mg kg ⁻¹	Cr = 40,08 mg kg ⁻¹					
			Cu = 6,8 mg kg ⁻¹	Cu = 14,09 mg kg ⁻¹					
			Fe = 118,4 g kg ⁻¹	Fe = 57,7 g kg ⁻¹					
			Hg = 0,14 mg kg ⁻¹	Hg = 0,18 mg kg ⁻¹					
			Mn = 531,1 mg kg ⁻¹	Mn = 520,1 mg kg ⁻¹					
			Ni = 9,7 mg kg ⁻¹	Ni = 14,4 mg kg ⁻¹					
			Pb = 3,8 mg kg ⁻¹	Pb = 14,0 mg kg ⁻¹					
	Sb = 0,51 mg kg ⁻¹	Sb = 0,46 mg kg ⁻¹							
	Se = 0,03 mg kg ⁻¹	Se = 1,51 mg kg ⁻¹							
	Sn = 3,90 mg kg ⁻¹	Sn = 5,47 mg kg ⁻¹							
	Zn = 19,8 mg kg ⁻¹	Zn = 26,78 mg kg ⁻¹							

- 4 Para o diagnóstico desse dano, houve também a interpretação de outros indicadores (plantas coletadas em campo e realização de experimento em condições controladas) para os quais não havia linha base; para os EPTs Ag, Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Sn e Zn não foi diagnosticado dano para a matriz solo do Compartimento 1, bem como não houve contaminação dos solos dos Compartimentos 2, 3 e 4 por Ag, Al, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn e Zn. Para maiores detalhes, verificar Relatório de Elementos Potencialmente Tóxicos no Tecossolo, que se encontra no Material Suplementar do TOMO III - Ambiente terrestre e atmosfera (BRASIL (MPF))/(LACTEC), 2020d)
- 5 Os valores de linha base para a contaminação por EPTs no solo devido às ações emergenciais pós-desastre foram considerados como sendo os teores pseudo totais quantificados no rejeito, para serem comparados com os teores das amostras de mistura.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Terrestre	Flora	Supressão de vegetação nativa ciliar	859,40 ha de vegetação nativa existentes na APDL	859,40 ha de vegetação nativa suprimidos	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível	Prioritário
		Supressão de vegetação nativa por implantação de infraestrutura	231,47 ha de vegetação nativa em áreas de implantação de infraestruturas por causa do desastre	231,47 ha afetados pela implantação de infraestruturas por causa do desastre	Compartimentos 1 e 3	Grave	Aumento	Parcialmente reversível	Prioritário
		Perda de biodiversidade de flora	Espécies existentes na APDL: 170 de árvores, 128 de trepadeiras, 28 de epífitas, 214 herbáceas florestais, 272 de vegetação secundária inicial, 74 de várzeas, 209 de campos rupestres, 193 de macrófitas aquáticas, 121 de reófitas. 14 espécies ameaçadas de extinção, 12 espécies endêmicas e 29 espécies protegidas.	Todas essas espécies foram afetadas	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível	Muito Importante
		Perda de recursos florestais madeireiros	Média de 158,28 m³ por hectare, totalizando aproximadamente 136.034,43 m³	Aproximadamente 136.034,43 m³ de madeira suprimidos	Compartimento 1	Grave	Cessado	Reversível	Muito Importante
		Perda de recursos florestais não madeireiros	108 espécies de árvores, 31 de trepadeiras, 5 de epífitas, 33 de herbáceas florestais, 105 de vegetação secundária inicial, 26 de várzeas, 52 de campos rupestres, 66 de macrófitas aquáticas e 60 de reófitas.	Todas essas espécies foram afetadas	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível	Muito Importante

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Terrestre	Flora	Redução na capacidade de resiliência da floresta	47 morfoespécies (sementes) encontradas no solo e na serrapilheira e 184 de plântulas. 957 hectares de área com alto potencial de regeneração existentes na área.	Todas afetadas e 957 hectares de área com alto potencial de regeneração foram alterados.	Compartimento 1	Grave	Cessado	Reversível	Muito Importante
		Fragmentação dos habitats e aumento do efeito de borda	233 fragmentos e 22,5% de área de borda	565 fragmentos e 24% de área de borda (aumento de 1,5%)	Compartimento 1	Pouco grave	Aumento	Parcialmente reversível	Muito Importante
		Introdução e aumento de espécies exóticas	Sem dados de linha-base.	Presença de 3 espécies exóticas utilizadas na restauração em ambientes nativos	Compartimento 1	Grave	Aumento	Reversível	Importante
	Fauna	Alterações nas populações faunísticas ⁶	Entomofauna: maior abundância (Nymphalidae, Scarabeinae, Formicidae, Culicidae) Avifauna: maior abundância de aves florestais Grandes mamíferos: habitat disponível para espécies (<i>Cerdocyon thous</i> e <i>Procyon cancrivorus</i> : 133,6; <i>Cuniculus paca</i> e <i>Hydrochaerus hydrocharis</i> : 774,05; <i>Lontra longicaudis</i> : 167); maior número de registros de <i>Cuniculus paca</i> .	Entomofauna: maior abundância (Scarabeinae e Culicidae) Avifauna: maior abundância de aves não-florestais Grandes mamíferos: habitat disponível para espécies (<i>Cerdocyon thous</i> e <i>Procyon cancrivorus</i> : 121,6; <i>Cuniculus paca</i> e <i>Hydrochaerus hydrocharis</i> : 664,45; <i>Lontra longicaudis</i> : 152); maior número de registros de <i>Hydrochaerus hydrochaeris</i> .	Compartimento 1	Grave	Cessado	Reversível	Importante

6 Há indícios de ocorrência do dano também nos compartimentos 2 e 3.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Terrestre	Fauna	Alterações nas assembleias faunísticas	Entomofauna: maior riqueza (Scarabeinae, Formicidae)	Entomofauna: aumento na riqueza de Formicidae e Ves/Apoidea	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível	Muito Importante
			Herpetofauna: maior riqueza de anfíbios florestais	Herpetofauna: maior riqueza de anfíbios arborícolas					
		Pequenos mamíferos: 5 a 8 espécies	Avifauna: maior proporção de espécies florestais	Avifauna: menor proporção de espécies florestais	Compartimentos 2 e 3	Pouco grave			Muito Importante
			Grandes mamíferos: menor número de registros de espécies exóticas (de 1 espécie).	Grandes mamíferos: maior número de registros de espécies exóticas (até 5 espécies) - Compartimento 1.					
		Piora nas condições físicas da fauna	Quiropteroфаuna: prevalência de infestação parasitária alta ou altíssima: <0,05	Quiropteroфаuna: prevalência de infestação parasitária alta ou altíssima: >0,2	Compartimento 2	Pouco grave	Redução	Reversível	Importante
		Perda de conectividade na paisagem	Índice de linearidade (mediana): 0,7851 Área funcionalmente conectada (média): 349,7346 ha	Índice de linearidade (mediana): 0,7653 Área funcionalmente conectada (média): 255,2634 ha	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível	Muito Importante
		Perda de adequabilidade ambiental	Área de hábitat com alta qualidade: 1.107,41 ha	Área de hábitat com alta qualidade: 35,98 ha (em média)	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível	Importante
		Comprometimento à saúde da fauna silvestre	Não há indicador para linha-base.	Avaliação de biomarcadores de respostas essenciais para a sobrevivência e bioacumulação, adicionalmente à comparação entre C e DA.	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo (Herpetofauna e Quiropteroфаuna); Grave (Pequenos Mamíferos)	Aumento	Irreversível	Importante
		Aumento na bioacumulação	Não há indicador para as espécies que utilizamos, mas para outras espécies Palmieri (2006) demonstra baixa contaminação por Hg, MeHg, As, Sb e Se.	Comparação entre C e DA, pois os estudos pretéritos não coletaram as mesmas espécies nem nas mesmas localidades. Além disso, estudos pós-desastre (Juncá et al. 2017) confirmam nossos achados de que a média da concentração dos diferentes EPTs são maiores nas áreas DA que nas áreas C.	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo (Herpetofauna, Avifauna, Quiropteroфаuna); Grave (Pequenos, Médios e Grandes Mamíferos)	Aumento	Irreversível	Importante
		Perda de biodiversidade terrestre	Riqueza média da flora: 17,13 Riqueza média da fauna: 29,19 Diversidade beta menor	Riqueza média da flora: 14,77 Riqueza média da fauna: 28,28 Diversidade beta maior	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível	Muito Importante

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Terrestre	Áreas naturais protegidas	Danos em Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas ⁷	Existem 22 áreas naturais protegidas ao longo dos cursos d'água afetados pelo desastre	Dentro dessas, uma área de 20.249,86 ha foi afetada pela passagem da lama	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Cessado	Parcialmente reversível	-
	Atmosfera	Alteração da qualidade do ar ⁸	Padrão de qualidade do ar estabelecido pela Resolução CONAMA N. 003/1990 para partículas totais em suspensão (PTS): 240 µg/m³ para a média de 24 horas.	Concentração de partículas totais em suspensão (PTS) acima do padrão estabelecido pela Resolução CONAMA N. 003/1990	Compartimento 1	Gravíssimo	Redução	Reversível	Importante
			Padrão de qualidade do ar estabelecido pela Resolução CONAMA N. 003/1990 para partículas inaláveis (PM ₁₀): 150 µg/m³ para a média de 24 horas. Valor guia estabelecido pela Organização Mundial da Saúde para partículas respiráveis (PM _{2,5}): 25 µg/m³ para a média de 24 horas.	Concentração de partículas inaláveis (PM ₁₀) acima do padrão estabelecido pela Resolução CONAMA N. 003/1990. Concentração de partículas respiráveis (PM _{2,5}) acima do valor guia estabelecido pela Organização Mundial da Saúde.					
Aquático Continental	Morfologia	Alteração na área de drenagem dos cursos de água	Nenhuma alteração na área de drenagem	Dano se restringiu apenas a trechos finais dos afluentes e menos de 20% das sub-bacias tiveram pelo menos 10% de suas áreas de drenagem afetadas. Nascentes não foram afetadas.	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Irreversível	Importante
		Alteração na configuração da rede de drenagem dos cursos de água ⁹	Rede de drenagem com configuração natural, e expoentes de elementos geométricos na ordem: b>m>f (largura>profundidade>velocidade).	Alteração da relação entre a vazão e as componentes geométricas da calha do rio Doce. Expoente geométrico da largura apresentou alteração maior do que 20%.	Compartimento 1	Gravíssimo	Redução	Irreversível	Importante

(-) Danos que não tiveram classificação determinada.

7 Aqui é apresentada a classificação para a maioria das áreas naturais protegidas. Para classificação individual ver Capítulo 2.5 do TOMO III - Ambiente terrestre e atmosfera (BRASIL (MPF)/(LACTEC), 2020d).

8 A comparação foi realizada com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA N. 003/1990 (PTS e PM₁₀) e com o valor guia estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (PM_{2,5}), uma vez que não haviam indicadores de linha base. A Resolução CONAMA N. 003/1990, vigente até 18/11/2018, não estabelece padrão de qualidade do ar para as partículas respiráveis (PM_{2,5}). É válido ressaltar que os valores estabelecidos pela Resolução CONAMA N. 003/1990 foram estabelecidos em 1990 e são menos restritivos do que os valores preconizados pela Organização Mundial da Saúde em 2005. Para o cenário pós-desastre foram avaliados os dados das estações de monitoramento da qualidade do ar instaladas pela Fundação Renova nos municípios de Barra Longa, Mariana e Rio Doce, considerando o período desde a instalação de cada uma até dezembro de 2019.

9 O dano não foi reavaliado. A tendência é de retorno das condições anteriores ao desastre. Contudo, este retorno demandará um tempo muito longo, de modo que a adição de dados mais atuais na análise desse dano não alterariam significativamente os resultados já apresentados em Brasil (MPF)/Lactec (2020c).

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Aquático Continental	Morfologia	Soterramento de cavas e açudes	Existência de 161 cavas e açudes no trecho entre Fundão e a UHE Risoleta Neves	Evidência do soterramento dessas cavas na APDL através da análise comparativa de imagens pré e pós-desastre	Compartmento 1	Gravíssimo	Cessado	Irreversível	Muito Importante
	Água	Redução das concentrações de oxigênio dissolvido na água	Limite legislado Oxigênio dissolvido: 5,0 mg/L Faixa de variação dos mínimos históricos nas estações analisadas nos compartimentos 1, 2 e 3 Oxigênio dissolvido: 4,2 a 7,8 mg/L	Variação do percentual de ocorrência da categoria C (valores em desacordo com o limite legislado e que extrapolaram a variação histórica pré-desastre), em novembro/2015, ao longo dos compartimentos 1, 2 e 3 OD: 0 a 22,6% ¹⁰	Compartimentos 1, 2 e 3	Pouco grave ¹¹	Cessado	Reversível	Importante
		Aumento das concentrações de sólidos na água	Limite legislado Turbidez: 100 UNT Faixa de variação dos máximos históricos nas estações analisadas nos compartimentos 1, 2 e 3 Turbidez: 8,87 a 955 UNT	Variação do percentual de ocorrência da categoria C (valores em desacordo com o limite legislado e que extrapolaram a variação histórica pré-desastre), em novembro/2015, ao longo dos compartimentos 1, 2 e 3 Turbidez: 77,8% a 100% ¹⁰	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo ¹²	Redução	Parcialmente reversível	Muito Importante
		Aumento das concentrações de EPTs na água	Limite legislado Alumínio dissolvido: 0,1 mg/L Ferro dissolvido: 0,3 mg/L Manganês total: 0,1 mg/L Faixa de variação dos máximos históricos nas estações analisadas nos compartimentos 1, 2 e 3 Alumínio dissolvido: 0,1 a 3,12 mg/L Ferro dissolvido: 0,19 a 2,67 mg/L Manganês total: 0,032 a 1,65 mg/L	Variação do percentual de ocorrência da categoria C (valores em desacordo com o limite legislado e que extrapolaram a variação histórica pré-desastre), em novembro/2015, ao longo dos compartimentos 1, 2 e 3 Alumínio dissolvido: 55,6% a 90,4% ¹⁰ Ferro dissolvido: 59,2% a 93,0% ¹⁰ Manganês total: 68,1% a 97,2% ¹⁰	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo ¹²	Redução	Parcialmente reversível	Muito Importante

¹⁰ Na linha-base, esse percentual é zero, uma vez que a variação da série histórica pré-desastre serviu de referência para o dano.

¹¹ Categoria A (valores de acordo com o limite legislado e com a variação histórica pré-desastre foi predominante em novembro/2015).

¹² Categoria C foi predominante em novembro/2015.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Aquático Continental	Comunidades planctônicas	Dano ao uso da água para abastecimento público	Todos os 23 sistemas de abastecimento público afetados operavam anteriormente.	Tempo de paralisação na operacionalidade padrão conforme Linha-Base, variando entre 5 dias atualmente.	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível	Importante
		Alteração da comunidade fitoplanctônica	*12 a 17 espécies com frequência comum, 1 a 3 espécies com frequência rara; 3 a 7 espécies com frequência constante *30 a 36 espécies comuns e constantes *Mediana de riqueza: 12,5 a 14,0 táxons por estação	*23,8% a 31,2% de mudança na frequência das espécies *Perda de 13,3% a 36,1% de espécies comuns e constantes *Mediana da riqueza: 8,0 a 11,5 espécies por estação (p<0,05)	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Irreversível	Importante
			*18 a 58 espécies com frequência comum, 5 a 9 espécies com frequência rara; 3 a 57 espécies com frequência constante *36 a 87 espécies comuns e constantes *Mediana de riqueza: 14,0 táxons para a estação CAN06 Mediana de densidade: 34,4 a 40,8 ind/mL para as estações P06, P04, P05	*34,2% a 46,8% de mudança na frequência das espécies *Perda de 27,8% a 47,1% de espécies comuns e constantes *Mediana da riqueza: 8,0 espécies por estação (p<0,05 para a estação CAN06) Mediana de densidade: 6,0 a 14,6 ind/mL por estação (p<0,05 para as estações P06, P04, P05)	Compartimento 2A				
			*28 a 55 espécies com frequência comum, 29 a 59 espécies com frequência rara; 2 a 7 espécies com frequência constante *64 a 91 espécies comuns e constantes *Mediana de riqueza: 23 a 27 táxons Mediana da densidade: 26,4 a 28,3 ind/mL para as estações P07, AIM40, AIM008	*36,4% a 46,8% de mudança na frequência das espécies *Perda de 26,6% a 44,9% de espécies comuns e constantes *Mediana da riqueza: 36 a 37 espécies por estação (p<0,05 para as estações P08, AIM023, AIM020) Mediana da densidade: 1,1 a 23,6 ind/mL por estação (p<0,05 para as estações P07, AIM40, AIM008)	Compartimento 2B				

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Aquático Continental	Comunidades planctônicas	Alteração da comunidade fitoplanctônica ^{13,14}	*17 espécies com frequência comum; 1 com frequência rara; 2 com frequência constante *34 espécies comuns e constantes *Mediana de riqueza por coleta: 15,5 táxons	*20,4% de mudança na frequência de ocorrência das espécies *Perda de 41,2% de espécies comuns e constantes *Mediana de riqueza por coleta: 7,5 táxons (p<0,05)	Reservatório da UHE Risoleta Neves	Gravíssimo	Cessado	Irreversível	Importante
			*59 com frequência comum; 78 espécies com frequência rara; 3 com frequência constante *107 espécies comuns e constantes *Mediana de riqueza por coleta: 31 táxons *Mediana de densidade por coleta: 51,2 ind/mL	*39,8% de mudança na frequência de ocorrência das espécies *Perda de 33,6% de espécies comuns e constantes *Mediana de riqueza por coleta: 48 táxons (p<0,05) *Mediana de densidade por coleta: 18,7 ind/mL (p<0,05)	Reservatório da UHE Baguari				
			*50 com frequência comum; 63 espécies com frequência rara; 4 com frequência constante *102 espécies comuns e constantes *Mediana de riqueza por coleta: 26 táxons *Mediana de densidade por coleta: 27,6 ind/mL	*38,6% de mudança na frequência de ocorrência das espécies *Perda de 28,4% de espécies comuns e constantes *Mediana de riqueza por coleta: 36 táxons (p<0,05) *Mediana de densidade por coleta: 12,7 ind/mL (p<0,05)	Reservatório da UHE Aimorés				
		Alterações nas comunidades zooplanctônicas	No monitoramento realizado pela UHE Risoleta Neves: riqueza máxima de espécies no Rio Piranga - 8; Rio do Carmo - 9; Rio Doce à montante da UHE - 9; Rio Doce à jusante da UHE - 10; abundância máxima (ind./m ³) no Rio Piranga - 9.990; Rio do Carmo - 9.390; Rio Doce à montante da UHE - 14.110; Rio Doce à jusante da UHE - 9.780	Redução da riqueza máxima de espécies em 50%, 56%, 56% e 60% respectivamente; Redução da abundância máxima em 82%, 93%, 98% e 82% respectivamente.	Compartimento 1	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível	Importante
			No monitoramento realizado pela UHE Baguari: riqueza máxima entre 5 e 13 espécies; abundância máxima (ind./m ³) entre 6.000 e 36.225	Redução da riqueza máxima de espécies, em três das cinco estações, de 13% e 14%; redução da abundância máxima, em duas das cinco estações, de 16% e 68%.	Compartimento 2A	Grave	Redução	Parcialmente reversível	

13 No compartimento 3 não foi possível mensurar nem classificar o dano.

14 No reservatório da UHE Mascarenhas não foi possível mensurar nem classificar o dano.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Aquático Continental	Comunidades planctônicas	Alterações nas comunidades zooplanctônicas	No monitoramento realizado pela UHE Aimorés: riqueza máxima de espécies no rio Doce entre 13 e 25 espécies; abundância máxima (ind./m³) entre 86.000 e 146.000.	Redução da riqueza máxima de espécies entre 21% e 56%; redução da abundância máxima entre 63% e 95%.	Compartimento 2B	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível	Importante
			Sem dados de linha-base no monitoramento da UHE Mascarenhas	Maiores riquezas e abundâncias quando comparado aos demais compartimentos no monitoramento do Lactec.	Compartimento 3	Dano não classificado			
			No monitoramento realizado pela UHE Risoleta Neves: riqueza máxima de espécies de 14; abundância máxima (ind./m³) de 25.250.	Redução da riqueza máxima de espécies em 50%; redução da abundância máxima em 76%	Reservatório da UHE Risoleta Neves	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível	
			No monitoramento realizado pela UHE Baguari: Riqueza máxima de espécies de 32; abundância máxima (ind./m³) de 58.290.	Redução da riqueza máxima de espécies em 5%; redução da abundância máxima em 44%.	Reservatório da UHE Baguari	Grave	Redução	Parcialmente reversível	
			No monitoramento realizado pela UHE Aimorés: riqueza máxima de espécies no rio Doce de 51; abundância máxima (ind./m³) de 296.900.	Redução da riqueza máxima de espécies em 55%; Redução da abundância máxima em 10%.	Reservatório da UHE Aimorés	Grave	Redução	Parcialmente reversível	
			Sem dados de linha-base no monitoramento da UHE Mascarenhas	Abundância moderada no monitoramento do Lactec	Reservatório da UHE Mascarenhas	-	-	-	
	Flora aquática	Supressão de vegetação nativa	67,39 hectares de várzea na APDL	67,39 hectares de várzea suprimidas.	Compartimento 1	Grave	Cessado	Reversível	Muito Importante

(-) Danos que não tiveram classificação determinada.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Aquático Continental	Flora aquática	Perda da biodiversidade de flora	Número de espécies existentes na APDL: 31 reófitas; 215 de macrófitas (1 espécie protegida); 289 (2 ameaçadas e 3 protegidas)	Todas essas espécies foram afetadas.	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Cessado	Reversível	Muito Importante
		Perda de recursos florestais não madeireiros	Espécies com uso ou potencialidade: 111 espécies de várzea; 6 espécies reofíticas e 78 espécies de macrófitas	Todas essas espécies foram afetadas.	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Cessado	Reversível	Importante
		Contaminação da vegetação aquática por EPTs	Não determinada	Diferença entre os teores de cada elemento nas áreas controle e afetada para 5 espécies: Alumínio, Cádmio, Cério, Cromo, Mercúrio, Selênio: > para 1 espécie Chumbo, Cobalto, Estanho, Ferro e Níquel: > para 2 espécies Bário e Lantânio: > para 3 espécies Antimônio e Arsênio: > para 4 espécies Manganês: > 5 espécies Cobre e Prata: sem diferença Zinco: < 1 espécie	Compartimento 1	Gravíssimo	Redução	Irreversível	-

(-) Danos que não tiveram classificação determinada.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Aquático Continental	Transporte de sedimentos		Valores históricos médios observados e modelados de 07/2000 a 06/2015 pré-rompimento	Valores médios observados e modelados pós rompimento em: 11/2015 a 06/2016 (ano 1); 07/2016 a 06/2017 (ano 2); 07/2017 a 06/2018 (ano 3).					
		Alteração da dinâmica do transporte de sedimentos ao longo do rio Doce	Compartimento 2 em 56539000 (Cachoeira do Óculos) CSS obs ¹⁵ : 127 mg/L QSS obs ¹⁶ : 3.326 ton/ano CSS sim ¹⁷ : 83 mg/L	Compartimento 2 em 56539000 (Cachoeira do Óculos) CSS obs: 51.817 mg/L; 427 mg/L; 128 mg/L. QSS obs: 1.640.166 ton/ano; 14.399 ton/ano; 3.842 ton/ano. CSS sim: 91 mg/L; 137 mg/L; 66 mg/L.	Compartimentos 2 e 3	Grave	Redução	Parcialmente reversível	Importante
			Compartimento 3 em 569945000 (Colatina) CSS obs: 117 mg/L QSS obs: 8.986 ton/ano CSS sim: 131 mg/L	Compartimento 3 em 569945000 (Colatina) CSS obs: 2.055 mg/L; 53 mg/L; 20 mg/L. QSS obs: 237.624 ton/ano; 2.609 ton/ano; 796 ton/ano. CSS sim: 336mg/L; 269mg/L; 71mg/L.					
		Assoreamento do canal do rio	*Volume de rejeito: 0 cm *Taxa de variação da espessura do depósito no rio Doce Compartimento 2 em Rio Dantas (56425000): Média (desvio) taxas 05/2007 a 08/2015 antes do evento: - 0,09 (+-0,25) mm/dia Compartimento 3 em Colatina (56994500): Média (desvio) taxas 06/2007 a 08/2015 antes do evento: 0,16 (+-0,68) mm/dia	*Volume de rejeito no compartimento 1 acima de 2 hm ³ *Acima de 2 mm/dia nos compartimentos 2 e 3	Compartimento 1 Compartimentos 2 e 3	Gravíssimo Grave	Redução Estabilizado	Parcialmente reversível	Muito Importante

15 CSS obs: Concentração de Sedimentos em Suspensão observada média no posto no período, usando os dados descritos nos capítulos anteriores do relatório.

16 QSS obs: Descarga Sólida em Suspensão observada média no posto no período, usando os dados descritos nos capítulos anteriores do relatório.

17 CSS sim: Concentração de Sedimentos em Suspensão simulada média para o local do posto, usando apenas os dados simulados nos mesmos dias em que dados observados estão disponíveis, usando os dados descritos nos capítulos anteriores do relatório.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Aquático Continental	Transporte de sedimentos	Assoreamento dos reservatórios hidrelétricos	Taxa de Assoreamento média: UHE Risoleta Neves: 0,7 hm³/ano Vida útil: 127 anos UHE Baguari: ~0 hm³/ano UHE Aimorés: 4,9 hm³/ano UHE Mascarenhas: 0,6 hm³/ano	Volume Assoreado por Rejeito: UHE Risoleta Neves: 9,9 hm³ (18% do Volume Inicial) Vida útil: 102 anos UHE Baguari: 3,36 hm³ (7,6% do Volume Inicial) UHE Aimorés: 3,35 hm³ (1,8% do Volume Inicial) UHE Mascarenhas: - hm³	Reservatório da UHE Risoleta Neves	Gravíssimo	Redução	Irreversível	Importante
					Reservatório da UHE Baguari	Grave		Parcialmente reversível	
					Reservatório da UHE Aimorés	Pouco grave			
	Qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas	Alteração na composição granulométrica do sedimento	Classificação granulométrica dos sedimentos	Aumento ou redução da granulometria nos sedimentos	Compartmento 1	Grave	Redução	Irreversível	Muito Importante
					Compartmentos 2 e 3	Pouco grave			
		Alteração da concentração de EPTs nos sedimentos	Limites legislados pela resolução CONAMA 454/2012 para os elementos: *Arsênio (As): 5,9 mg/kg *Cádmio (Cd): 0,6 mg/kg *Chumbo (Pb): 35 mg/kg *Cobre (Cu): 35,7 mg/kg *Cromo (Cr): 37,3 mg/kg *Mercúrio (Hg): 0,17 mg/kg *Níquel (Ni): 18 mg/kg *Zinco (Zn): 123 mg/kg Faixa de variação dos máximos históricos nos compartimentos 1, 2A e 2B, para os elementos: Bário (Ba), Cobalto (Co), Ferro (Fe) e Manganês (Mn).	*EPTs classificados como alterados entre 5 e 25% no respectivo compartimento (Pouco Grave) *EPTs classificados como alterados entre 25% e 50% no respectivo compartimento (Grave) *EPTs classificados como alterados acima de 50% no respectivo compartimento (Gravíssimo)	Compartmento 1	Pouco grave	Redução	Irreversível	Muito Importante
					Compartmento 2A	Grave			
					Compartmento 2B	Gravíssimo			
					Compartmento 3	Gravíssimo			

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Aquático Continental	Qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas	Alteração na comunidade de macroinvertebrados bentônicos presentes no sedimento ¹⁸	3% das estações com riqueza menor/igual a 1; 15% das estações com diversidade < 1; 23% das estações com menos de 20 indivíduos por amostra.	16% das estações com riqueza menor/igual a 1; 18% das estações com diversidade < 1; 20% das estações com menos de 20 indivíduos por amostra.	Compartimento 1	Grave	Cessado	Parcialmente reversível	Importante
			Nenhuma das estações com riqueza menor/igual a 1; 18% das estações com diversidade < 1; 2% das estações com densidade/ número de indivíduos menor que 20.	38% das estações com riqueza menor/igual a 1; 48% das estações com diversidade < 1; 40% das estações com densidade/ número de indivíduos menor que 20; Diferença significativa na análise de comparações múltiplas (LSD de Fisher).	Compartimento 2A	Gravíssimo	Redução		
			11% das estações com riqueza menor/igual a 1; 29% das estações com diversidade < 1; 11% das estações com densidade menor que 20.	35% das estações com riqueza menor/igual a 1; 69% das estações com diversidade < 1; 48% das estações com densidade menor que 20; Diferença significativa na análise de comparações múltiplas (LSD de Fisher).	Compartimento 2B	Gravíssimo	Redução		
			15% das estações com riqueza menor/igual a 1; 38% das estações com diversidade < 1; 31% das estações com menos de 20 indivíduos por amostra.	18% das estações com riqueza menor/igual a 1; 29% das estações com diversidade < 1; 18% das estações com menos de 20 indivíduos por amostra.	Reservatório da UHE Risoleta Neves	Grave	Cessado		
			4% das estações com riqueza menor/igual a 1; 14% das estações com diversidade < 1; 4% das estações com densidade menor que 20.	25% das estações com riqueza menor/igual a 1; 41% das estações com diversidade < 1; 38% das estações com densidade menor que 20.	Reservatório da UHE Baguari	Gravíssimo	Redução		
	Íctiofauna	Mortandade de peixes nos corpos d'água afetados	Sem dados de linha-base.	Com base nos dados secundários obtidos por meio de pesquisa bibliográfica foi estimado que a quantidade de peixes mortos em decorrência da passagem da lama foi de 10 toneladas.	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Cessado	Parcialmente reversível	Muito Importante

18 No reservatório das UHEs Aimorés e Mascarenhas não foi possível mensurar nem classificar o dano.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Aquático Continental	Ictiofauna	Alterações na composição e estrutura das comunidades de peixes	As informações levantadas para os compartimentos 1, 2 e 3 da bacia do rio Doce por meio de dados primários e secundários antes do desastre indicam a ocorrência de pelo menos 137 espécies de peixes.	As riquezas registradas nas coletas realizadas em 2018 e 2019 pelo Lactec representa cerca de 50% dos valores registrados na linha de base. Também foi registrado o aumento na dominância de espécies oportunistas, o que foi verificado pela análise de curvas de dominância acumulada de abundância e biomassa (ABC).	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível	Muito Importante
		Simplificação da estrutura trófica da ictiofauna	Presença de várias guildas tróficas, predomínio de invertívoros bentônicos	Diminuição na riqueza de espécies invertívoras bentônicas, zoobentívoras e zooplancívoras	Compartimentos 1, 2 e 3	Grave	Redução	Parcialmente reversível	Importante
		Aumento da riqueza e abundância de peixes introduzidos (exóticos)	Número de espécies invasoras registradas na linha de base era 10.	Nos levantamentos realizados pelo Lactec foram registradas 19 espécies de peixes "introduzidas" (não-nativas).	Compartimentos 1, 2 e 3	Grave	Redução	Parcialmente reversível	Importante
		Redução da diversidade genética da ictiofauna	Sem dados de linha-base.	Identificação por meio de análises que houve redução na diversidade genéticas das espécies selecionadas.	Compartimentos 1, 2 e 3	Grave	Redução	Parcialmente reversível	Importante
		Alteração da dinâmica populacional da ictiofauna	Sem dados de linha-base.	Modelagem de dinâmica populacional - simulações indicam perda de biodiversidade da ictiofauna. Modelagem de pesca e nicho indicam redução a abundância e perda de adequabilidade ambiental	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível	Importante
		Alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna	Não há indicador para todos os marcadores, apenas para histopatologia.	Comparações entre CN, CP e DA - alterações de saúde principalmente no ponto DA, mesmo quando comparado ao CP, especialmente na estação chuvosa.	<u>Compartimento 1</u> <u>Compartimento 2</u> Compartimento 3	Gravíssimo	<u>Aumento</u> -	<u>Irreversível</u> -	Importante
							-	Irreversível	

(-) Danos que não tiveram classificação determinada.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Aquático Continental	Ictiofauna	Aumento na bioacumulação e biomagnificação	Há estudos pretéritos apenas para o médio rio Doce e para um único ponto. Além disso, não há estudos pretéritos para todos os elementos que avaliamos.	Comparações entre CN, CP e DA e também com estudos pretéritos existentes para o compart. 2 (médio RD)	Compartimento 1	Gravíssimo	Aumento	Irreversível	Importante
				- identificado aumento nas concentrações dos diferentes metais, especialmente nos pontos DA dos diferentes compartimentos, mesmo quando comparado com CP. Nossos achados demonstram que peixes de fundo acumularam mais metais. Este achado foi corroborado pelos estudos pretéritos. Houve aumento de 2 vezes para Cr, 38 vezes para Cu, 25 vezes para Fe e de 10 vezes para Mn e Zn em relação aos estudos pretéritos. Outros estudos pós-desastre também confirmam nossos achados sobre a influência do desastre no aumento da concentração de EPTs em peixes.	Compartimento 2	Grave			
Zona Costeira e Marinha	Águas	Redução das concentrações de oxigênio dissolvido	Classe 1 Resolução CONAMA Nº 357/2005 Águas Salobras - Oxigênio dissolvido: 5,0 mg/L Classe 2 Resolução CONAMA Nº 357/2005 Águas Salobras - Oxigênio dissolvido: 4,0 mg/L Limite legislado - Oxigênio dissolvido: 5,0 mg/L Mínimos históricos na região marinha adjacente à foz do rio Doce - Oxigênio dissolvido: 4,1 mg/L	Classificação dos dados de OD predominante no período de 21 de novembro/2015 a março/2016 Pouco Grave: 82,6%	Compartimento 4-A	Pouco grave	Cessado	Reversível	Importante
				Classificação mais grave dos dados de OD predominante em um dos meses entre novembro/2015 a março/2016 Grave: 50,5 a 88,2%	Compartimento 5	Grave			

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Zona Costeira e Marinha	Águas	Aumento das concentrações de sólidos na água ¹⁹	Terceiro quartil dos dados de turbidez para o estuário do rio Doce - Turbidez: 69 UNT Máximos históricos no estuário do rio Doce - Turbidez: 480 UNT	Faixa de variação do percentual de valores superiores ao terceiro quartil e aos máximos históricos em um dos meses entre novembro/2015 a março/2016 Turbidez: 66,7%	Compartimento 4	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível	Muito Importante
			Referências bibliográficas de valores capazes de influenciar a fotossíntese e alterar a estrutura trófica devido à restrição da luminosidade - Turbidez: 30 UNT Máximos históricos na região marinha adjacente à foz do rio Doce - Turbidez: 89 UNT	Faixa de variação do percentual de valores superiores à referência bibliográfica e aos máximos históricos em um dos meses entre novembro/2015 a março/2016 Turbidez: 42,3%	Compartimento 5-A	Gravíssimo			
				Classificação mais grave dos dados de turbidez predominante em um dos meses entre novembro/2015 a março/2016 Pouco Grave: 50 a 100%	Compartimentos 5-B a 5-E	Pouco Grave			
		Aumento da concentração de EPTs na água	Limite legislado: Alumínio dissolvido: 0,1 mg/L Ferro dissolvido: 0,3 mg/L Máximos históricos na região marinha adjacente à foz do rio Doce: Alumínio dissolvido: 0,177 mg/L Ferro dissolvido: 0,202 mg/L	Faixa de variação do percentual de valores superiores ao limite legislado e aos máximos históricos em um dos meses entre novembro/2015 a março/2016 Alumínio dissolvido 100% Ferro dissolvido 88,9%	Compartimento 4	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível	Muito Importante
			Limite legislado: Ferro dissolvido: 0,3 mg/L Manganês total: 0,1 mg/L Máximos históricos na região marinha adjacente à foz do rio Doce: Ferro dissolvido: 0,363 mg/L Manganês total: 0,077 mg/L	Classificação mais grave dos dados em um dos meses entre novembro/2015 a março/2016 Ferro dissolvido 75,8 a 100% mg/L Manganês total 80 a 100%	Compartimento 5	Pouco grave			

19 Aqui é apresentada a classificação para a maioria dos subcompartimentos. O mais próximo à foz do rio Doce foi considerado gravíssimo.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Zona Costeira e Marinha	Comunidades planctônicas	Alteração da comunidade fitoplanctônica	Sem dados de linha-base para o estuário do rio Doce e lagoa Monsarás. Estuário do rio Piraquê-Açu: densidade 35 a 1.883 ind/mL, clorofila-a 0 a 12,7 µg/L, diversidade máxima 3,8 bits/ind	Estuário do rio Doce: densidade média 435 ind/mL, clorofila-a média 1,7 µg/L, riqueza média 25 táxons/estação Lagoa Monsarás: densidade média 977 ind/mL, densidade média de cianobactérias 3.487 cél/mL, riqueza média 25 táxons/estação Estuário do rio Piraquê-Açu: densidade 56 a 770 ind/mL, clorofila-a 1 a 2,2 µg/L, diversidade máxima 2,1 bits/ind	Compartimentos 4 e 5	-	-	-	Importante
			Densidade média na superfície: 35x10 ³ ind/L Concentração média de clorofila-a na superfície e no fundo: 0,8 µg/L	Densidade média na superfície: 594x10 ³ ind/L logo após o desastre Clorofila-a média na superfície: 1 µg/L e no fundo: 1,7 µg/L, logo após o desastre					
		Alteração na densidade e na composição de espécies do zooplâncton ²⁰	24 espécies representativas de Copepoda; Densidade média do zooplâncton: 7.777 org./m ³	08 das 24 espécies ocorreram em P1; 09 das 24 espécies ocorreram em P2 e 06 das 24 espécies ocorreram em P1 e em P2; Densidade do zooplâncton = pico de 222.959 org.m ⁻³ logo após o desastre; densidade média de 7.096 org.m ⁻³ em P1 e 6.219 org.m ⁻³ em P2.	Compartimento 5	-	-	-	Importante
	Transporte de sedimentos	Aumento na concentração de EPTs no zooplâncton marinho ²¹	Sem dados de linha-base.	Estudos secundários apontam aumento nas concentrações de Fe, e redução nas concentrações de As, Cd, Cr, Mn, Cu e Pb em abril quando comparados a janeiro/fevereiro de 2016.	Compartimento 5	-	-	-	Importante
		Incremento na deposição de sedimentos	Deposição natural estimada por modelagem computacional.	Aumento de até 42 vezes a deposição natural em função do desastre, também estimada por modelagem computacional.	Compartimento 5	Gravíssimo	Redução	Irreversível	Importante

(-) Danos que não tiveram classificação determinada.

20 Grande grupo Copepoda como representativo pois faz parte dos organismos mais abundantes do planeta, os crustáceos, e com grande importância ecológica nos sistemas aquáticos. Nos trabalhos pesquisados Copepoda foi o grupo com maior densidade e riqueza de espécies. As espécies representativas de Copepoda foram aquelas classificadas como "muito frequente" (espécies que ocorreram em todos ou quase todos os pontos amostrais de cada trabalho pesquisado, ou seja, ocorreram em mais de 70% dos pontos de coleta) e/ou "abundante" (com alta densidade em cada trabalho pesquisado, considerando os valores de densidade registrados por trabalho).

21 Nos trabalhos pesquisados sobre o tema após o desastre, não houve apontamento das concentrações de metais ao longo do texto, somente gráficos, tornando imprecisa a definição de concentrações.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Zona Costeira e Marinha	Qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas	Alteração das características granulométricas do sedimento superficial	Média do percentual de finos (silte + argila) nos sedimentos do estuário do rio Doce: 16,5%	Aumento no percentual de finos (silte + argila) nos sedimentos do estuário do rio Doce entre novembro/2015 a março/2016 Percentual de finos: 28,3%	Compartimento 4	Grave	Redução	Parcialmente reversível	Muito Importante
			Variado percentual de finos (silte + argila) nos sedimentos dos compartimentos da região marinha	Aumento no percentual de finos (silte + argila) nos sedimentos dos compartimentos da região marinha entre novembro/2015 a março/2016	Compartimento 5	Dano não classificado			
			Padrão de referência: Manganês - 260 mg/kg Máximos históricos históricos no estuário do rio Doce: Manganês - 260 mg/kg	Pelo menos 1/3 dos dados superiores ao padrão de referência e aos máximos históricos no período entre novembro/2015 a março/2016 Manganês: 43,3%	Compartimento 4	Gravíssimo			
		Aumento da concentração de EPTs no sedimento	Padrão de referência: Alumínio - 18.000 mg/kg Máximos históricos históricos na região marinha adjacente à foz do rio Doce: Alumínio - 62.804,4 mg/kg	Pelo menos 1/3 dos dados superiores ao padrão de referência ou aos máximos históricos no período entre novembro/2015 a março/2016 Alumínio: 45,5 a 53,3%	Compartimento 5-B1, 5-B2 e 5-C	Grave	Redução	Parcialmente reversível	Muito Importante
				Pelo menos 1/3 dos dados superiores ao padrão de referência ou aos máximos históricos no período entre novembro/2015 a março/2016 Alumínio: 0 a 32,8%	Compartimento 5-A, 5-D e 5-E	Pouco Grave			

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Zona Costeira e Marinha	Qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas	Alteração na estrutura das comunidades benthicas de fundos inconsolidados	AMBIENTE MARINHO - DEZEMBRO/10 Densidades totais (m²): 6964,50 ± 14810,25; Número de Taxa: 19,50 ± 1,77; Índice de Diversidade H': 3,28 ± 0,15; Densidade Mollusca (m²): 248,25 ± 103,50; Densidade de Polychaeta (m²): 5081,25 ± 1638,75; Densidade de Crustacea (m²): 1306,50 ± 537,75; Densidade Outros (m²): 389,25 ± 113,25 ESTUÁRIOS - NOVEMBRO/15 Densidades totais (m²): 3490,00 ± 1631,00; Número de taxa: 19; Índice de Diversidade H': 1,40 ± 0,25; Densidade Mollusca (%): 0,86; Densidade de Polychaeta (%): 73,49; Densidade de Crustacea (%): 0,22; Densidade Outros (%): 0,65; PRAIAS Densidades (m²): 5509,54 ± 604; Número de taxa: 25; Índice de Diversidade H': 2 MANGUEZAIS Densidades: M1= 5819 ± 1474 ind.m⁻² chuv.; M2= 1590 ± 160 ind.m⁻² chuv.	AMBIENTE MARINHO - FEVEREIRO/19 Densidades totais (m²): 329,83 ± 37,83; (4% do valor inicial); Número de Taxa: 4,24 ± 0,36 (22% do valor inicial); Índice de Diversidade H': 1,66 ± 0,13 (50% do valor inicial); Densidade Mollusca (m²): 55,43 ± 12,32 (22% do valor inicial); Densidade de Polychaeta (m²): 110,41 ± 18,48 (2% do valor inicial); Densidade de Crustacea (m²): 66,42 ± 14,52 (5% do valor inicial); Densidade Outros (m²): 60,70 ± 14,08 (15% do valor inicial) ESTUÁRIOS - FEVEREIRO/19 Densidades totais (m²): 65,99 ± 31,11 (2% do valor inicial); Número de Taxa: 4 (21% do valor inicial); Índice de Diversidade H': 0,12 ± 0,28 (9% do valor inicial); Densidade Mollusca (%): 28,58 (aumento do valor inicial); Densidade de Polychaeta (%): 28,57 (39% do valor inicial); Densidade de Crustacea (%): 0 (0% do valor inicial); Densidade Outros (%): 0 (0% do valor inicial) PRAIAS - FEVEREIRO/19 Densidades (m²): 8885,35; Número de Taxa: 3 (12% do valor inicial); Índice de Diversidade H': 0,18 (9% do valor inicial). MANGUEZAIS Densidades: BS4= 1129,9 ind.m⁻² chuv.; BS5= 1129,9 ind.m⁻² chuv. (71% do valor inicial).	Compartimentos 4 e 5	Gravíssimo	Cessado	Parcialmente reversível	Importante
		Alterações na condição de saúde e contaminação por EPTs em invertebrados benthicos de fundos inconsolidados	Sem dados de linha-base.	Estudo secundários apontam contaminação em camarões no ambiente marinho; contaminação de camarões e caranguejos no estuário; contaminação de poliquetas, isópodos, anfípodos e caranguejos nas praias; e contaminação de crustáceos de manguezais: <i>Ucides cordatus</i> (caranguejo-uçá) e <i>Cardissoma guanhumi</i> (guanhamu).	Compartimentos 4 e 5	-	-	-	Importante

(-) Danos que não tiveram classificação determinada.

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Zona Costeira e Marinha	Ictiofauna	Redução da riqueza e diversidade da ictiofauna	Dados secundários para o ambiente marinho indicam a ocorrência de pelo menos 104 espécies de peixes.	O número de espécies e de grupos funcionais registrados para o ambiente costeiro amostrado na foz do rio Doce apresentou uma redução significativa de valores. Os valores encontrados nos levantamentos realizados pelo Lactec representam 59,5% dos registrados na linha base. Também foi registrado o aumento na dominância de espécies oportunistas, o que foi verificado pela análise de curvas de dominância acumulada de abundância e biomassa (ABC).	Compartimento 4	Grave			
			Dados secundários para o ambiente estuarino do rio Doce indicam a ocorrência de pelo menos 45 espécies de peixes.	O número de espécies e de grupos funcionais registrados para o ambiente estuarino amostrado apresentou uma redução significativa de valores. Os valores encontrados nos levantamentos realizados pelo Lactec representam 87,1% dos registrados na linha base. Concomitante à diminuição da riqueza, diversidade e equitabilidade de espécies, também foi registrado o aumento na dominância de espécies oportunistas, o que é geralmente considerado como indicativo de estresse ambiental. Também foi registrado o aumento na dominância de espécies oportunistas, o que foi verificado pela análise de curvas de dominância acumulada de abundância e biomassa (ABC).	Compartimento 5	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível	Muito Importante
		Simplificação da estrutura trófica da ictiofauna	Presença de várias guildas tróficas, predomínio de zoobentívoros; razão semelhante entre ictiófagos e zooplancívoros	Ambiente costeiro: diminuição de zoobentívoros, queda na razão entre ictiófagos e zooplancívoros Estuário: menor abundância de onívoros e herbívoros, queda na razão entre ictiófagos e zooplancívoros	Compartimentos 4 e 5	Grave	Redução	Parcialmente reversível	Importante

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Zona Costeira e Marinha	Ictiofauna	Diminuição das populações de espécies de peixes costeiros de interesse comercial	Proporção de espécies de interesse para pesca (41,4%)	Diminuição na proporção de espécies de interesse para pesca (38,2%)	Compartimento 5	Grave	Redução	Parcialmente reversível	Importante
		Alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna	Não há indicador para as áreas contempladas, exceto para a foz (estudos FAURG, apenas) para o marcador de peroxidação lipídica.	Comparações entre pontos próximos (5km) e distantes (25km) da costa e entre a foz do Doce com a foz do Piraquê-Açú, no caso do estuário - alterações de saúde tanto nos peixes do mar quanto do estuário, demonstrado por diferentes marcadores e, corroborado pelos dados da FAURG no caso do marcador de peroxidação lipídica.	Compartimentos 4 e 5	Gravíssimo	Com tendência de aumento	Irreversível	Importante
		Aumento na bioacumulação	Não há indicador exatamente para os mesmos pontos, mas, o estudo da FAURG foi realizado em pontos do mar e na foz dias antes da chegada da lama. Além disso, não há estudos pretéritos para todos os elementos que avaliamos.	Comparações entre pontos próximos (5km) e distantes (25km) da costa e entre a foz do Doce com a foz do Piraquê-Açú, no caso do estuário - houve aumento nas concentrações de EPTs (especialmente As) tanto no estuário quanto no mar. Nossos resultados demonstram que os peixes da localidade da foz e adjacência estão mais contaminados que os coletados na baía de Vitória. Novamente os espécimes de fundo apresentaram maior contaminação. Os incrementos em relação aos dados pretéritos foram de: 1000 vezes para Cd, 5566 vezes para Cr, 534 vezes para Cu, 3074 vezes para Fe, 1102 vezes para Mn e 300 vezes para Pb. Nossos achados também são corroborados por estudos pós-desastre.	Compartimentos 4 e 5	Gravíssimo	Com tendência de aumento	Irreversível	Importante

Ambiente	Área Temática	Dano	Indicador na Linha-base	Indicador no Pós-desastre	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade	Importância
Zona Costeira e Marinha	Quelônios e mamíferos marinhos	Degradação da qualidade dos habitats marinhos	Área total utilizada na modelagem de biodiversidade, em que as características do ambiente eram adequadas à ocorrência de quelônios e mamíferos marinhos, utilizando dois indicadores: <i>Chelonia mydas</i> (tartaruga-verde) - 44.085 km ² ; e <i>Sotalia guianensis</i> (boto-cinza) - 35.363 km ² .	Perda de adequabilidade ambiental para os dois indicadores: <i>C. mydas</i> (tartaruga-verde), para uma área total de 29.731 km ² , sendo 22% dessa área com perda severa (acima de 40% de perda); <i>S. guianensis</i> (boto-cinza), para uma área total de 18.973 km ² , sendo 12% dessa área com perda severa (acima de 40% de perda).	Compartimento 5	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível	Importante
		Aumento da incidência de encalhes de quelônios e contaminação por EPTs	Média do número anual de encalhes de quelônios observados entre 2010 e 2015 na localidade São Mateus (ponto 1B): 117	Média do número anual de encalhes de quelônios observados entre 2016 e 2018 na localidade São Mateus (ponto 1B): 207	Compartimento 5	Gravíssimo	Com tendência de aumento	Irreversível	Importante
	Cetáceos	Mortalidade e degradação da saúde de cetáceos pelo aumento da concentração de EPTs	Dados escassos de linha-base sobre contaminação em cetáceos.	Tendência de aumento da concentração anual média em botos-cinza entre 2011 e 2019 de Alumínio (0,011 mg/kg em músculo), Arsênio (0,017 mg/kg em fígado, 0,012 mg/kg em rim), Cobre (0,954 mg/kg em fígado), Cromo (0,009 mg/kg em fígado, 0,012 mg/kg em músculo, 0,030 mg/kg em rim) e Manganês (0,035 mg/kg em músculo).	Compartimento 5	Gravíssimo	Com tendência de aumento	Irreversível	Importante
			Número anual de encalhes de botos-cinza observados na localidade São Mateus (ponto 1B) em 2015: 20	Número anual de encalhes de botos-cinza observados na localidade São Mateus (ponto 1B) em 2016: 36 (incremento de 80%)					
			Baixa probabilidade de morte de botos-cinza por conta de processo infeccioso no período pré-desastre (probabilidade modelada próxima de zero)	Incremento da probabilidade de morte por processo infeccioso de botos-cinza na fase pós-desastre aguda (2,73 vezes mais provável que no período pré) e na fase pós-desastre crônica (3,21 vezes mais provável que no período pré)					
	Áreas naturais protegidas	Danos em Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas ²²	Existem 23 áreas naturais protegidas ao longo da área abrangida pela pluma de rejeitos	Dentro dessas, uma área de 130.755,25 ha foi afetada pela pluma de rejeitos no mar	Compartimento 5	Pouco grave	Reversível	Cessado	-

(-) Danos que não tiveram classificação determinada.

22 Aqui é apresentada a classificação para a maioria das áreas naturais protegidas. Para classificação individual ver Capítulo 6 do TOMO IV - Zona Costeira e Marinha.

8 ANÁLISE DE DANOS SOBRE OS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

Devido ao rompimento da barragem de rejeitos minerários de Fundão, diferentes sistemas ambientais, aquáticos, terrestres, de transição e marinhos, foram afetados, sendo identificados mais de 90 tipos de danos socioambientais, classificados quanto a sua gravidade, permanência e reversibilidade, atestando a impossibilidade de recuperação total da bacia do rio Doce. Para avaliar os efeitos de um desastre desta magnitude e complexidade, além do cuidado de se identificar e mensurar individualmente os danos socioambientais, também se faz necessário realizar uma avaliação integrada, que possibilite uma visão holística dos sistemas afetados.

Tradicionalmente, os danos socioambientais são percebidos como modificações deletérias em componentes físicos, biológicos ou antrópicos do ambiente considerado, sendo representados por indicadores que, normalmente, mensuram modificações estruturais. Entretanto, um dano ao meio ambiente não é um fato isolado, com consequências determinadas somente em uma conduta (dano direto), mas ao contrário, pode afetar diversos outros sistemas e processos (danos indiretos), que devem ser incluídos no rol de mensuração das perdas ambientais e ecossistêmicas (CORRÊA; SOUZA, 2013). Portanto, é preciso avaliar as relações de causa/efeito dos danos, as implicações para os ecossistemas onde o dano ocorre e para ecossistemas adjacentes, além das implicações para os diferentes usos socioeconômicos estabelecidos no ambiente analisado.

A avaliação de perdas de serviços ecossistêmicos foi realizada em complementaridade ao diagnóstico de danos socioambientais, com o intuito de auxiliar na compreensão da real dimensão do desastre a partir de uma abordagem ecossistêmica. Partindo da premissa de que os serviços ecossistêmicos não são apenas funções que viabilizam a vida humana, mas que dão suporte à vida nos sistemas ambientais e viabilizam toda biodiversidade (sustentabilidade ecológica), a metodologia proposta possibilita um enfoque integrado, lógico e funcional, que aporta, de forma explícita, as relações causais do dano, tendo em conta os processos afetados em diferentes níveis dos sistemas ambientais analisados, através da aplicação do modelo *Driver-Pressure-State-Impact-Response* (DPSIR) sistêmico adaptado ao desastre da Samarco.

Este capítulo apresenta primeiramente os conceitos da abordagem adotada e o modelo DPSIR sistêmico utilizado na avaliação das perdas de serviços ecossistêmicos em decorrência do desastre da Samarco. A primeira etapa para avaliação das perdas de serviços consiste na identificação dos sistemas ambientais, dos serviços ecossistêmicos e benefícios oferecidos pelos sistemas aos potenciais grupos de beneficiários. Foram identificados 19 sistemas ambientais, desde a região próxima à barragem de Fundão até a zona costeira afetada, que, de acordo com suas características, elementos, fluxos e funções ecológicas, podem oferecer até 27 diferentes serviços ecossistêmicos para 12 potenciais grupos de beneficiários. A partir

da determinação do número de serviços oferecidos por cada um dos sistemas ambientais identificados, obteve-se um total de 243 serviços ecossistêmicos para a área de estudo.

Baseado no modelo DPSIR sistêmico, as perdas de serviços ecossistêmicos ocorrem devido a uma mudança de estado nos sistemas que oferecem aquele serviço, sendo o estado dos sistemas descrito pela integridade das estruturas, processos físico-químicos e biológicos das funções ecossistêmicas, e pela integridade do patrimônio cultural material e imaterial. A partir dessa premissa, os danos identificados e quantificados por Brasil (MPF)/LACTEC (2020c, 2020d, 2020e, 2020f, 2020g, 2020h) foram considerados como indicadores da mudança de estado e consequentemente indicadores da perda de serviços ecossistêmicos. Para a avaliação das perdas de serviços ecossistêmicos foram estabelecidas as relações entre os danos, os sistemas ambientais mapeados e os serviços ecossistêmicos identificados, e assim foi estimada a potencial perda para os 243 serviços ecossistêmicos disponíveis na área de estudo. Por fim, é proposta uma estrutura para auxílio à formulação, planejamento, integração e gestão de respostas para auxiliar na retomada dos serviços ecossistêmicos perdidos devido ao desastre da Samarco.

8.1 ABORDAGEM/ENFOQUE SISTÊMICA(O)/SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

Ecossistemas são sistemas abertos, conectados a outros sistemas. Intervenções na sua estrutura ou funcionamento frequentemente possuem efeitos desconhecidos ou imprevisíveis. O funcionamento dos ecossistemas e sua resiliência diante dos fatores adversos à sua manutenção depende de relações dinâmicas dentro e entre espécies da biodiversidade, entre as espécies e o seu meio abiótico, assim como de reações físicas e químicas que ocorrem no ambiente. A abordagem ecossistêmica é uma estratégia para a gestão integrada de recursos naturais, baseada na aplicação de metodologias científicas apropriadas, focadas em níveis de organização biológica que englobam a estrutura essencial, os processos, as funções e as interações entre os organismos e seu ambiente. Considerando todos esses fatores, não há forma única de implementar a abordagem ecossistêmica, pois ela depende de condições locais, regionais, nacionais ou até mesmo globais (CBD, 2004).

Para a aplicação de uma abordagem ecossistêmica é fundamental firmar um entendimento sobre o que é um ecossistema. A *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA), que é um programa de pesquisas sobre mudanças ambientais e suas tendências para as próximas décadas, no documento intitulado *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment* (MEA, 2003), traz a seguinte definição:

Um ecossistema é um complexo dinâmico de comunidades de plantas, animais e microrganismos e do meio ambiente não-vivo interagindo como uma unidade funcional. Os humanos são uma parte integral dos ecossistemas. Os ecossistemas variam muito em tamanho; uma poça de água na cavidade de uma árvore e uma bacia oceânica, podem ser ambos exemplos de ecossistemas (MEA, 2003).

Não possuindo uma especificação de escala e partindo de uma definição ampla de ecossistema, a aplicação de uma abordagem sistêmica propicia o estabelecimento de uma estrutura flexível, que possa lidar com os complexos dinâmicos, interações inter e intra ecossistemas e, por vezes, com a ausência de completo conhecimento e compreensão sobre todas as relações que se está avaliando (SILVEIRA, 2019).

O enfoque ecossistêmico não deve ser entendido como uma dualidade entre ciência básica e aplicada. Na realidade, ele integra os conhecimentos, criando uma estrutura de análise holística, onde é necessário qualificar e descrever seus componentes e processos através de uma percepção integrada (ASMUS et al., 2018). Ao considerar a solução de problemas concretos, a transdisciplinaridade pode ser tomada como um de seus princípios, que visa a solução de problemas sociais e problemas científicos relacionados, diferenciando e integrando o conhecimento de vários campos de conhecimento (LANG et al., 2012).

As interações entre os elementos de um ecossistema são chamadas de funções ecossistêmicas. Essas funções geram serviços ecossistêmicos quando os processos naturais subjacentes a suas interações desencadeiam uma série de benefícios direta ou indiretamente apropriáveis pelo ser humano. Um único serviço ecossistêmico pode ser o produto de duas ou mais funções, ou uma única função pode gerar mais do que um serviço ecossistêmico (MMA, 2018). Os beneficiários são, portanto, aqueles cujos interesses os levam ao consumo e/ou apreciação de serviços ecossistêmicos, o que resulta em impacto (positivo ou negativo) sobre seu bem estar (LANDERS; NAHLIK, 2013).

Conforme categorização estabelecida na *Millennium Ecosystem Assessment* (2003), os serviços ecossistêmicos podem ser classificados em quatro categorias: provisão, regulação, suporte e cultural. A Tabela 16 apresenta a descrição de cada uma dessas categorias.

Tabela 16 - Definições das categorias de serviços ecossistêmicos.

Categoria	Descrição
Provisão	São produtos ou matéria-prima, retirados dos ecossistemas através da exploração ou manejo. Exemplos: madeira, fibras, água, recursos genéticos e outros. etc.
Regulação	São os que se relacionam com a regulação das condições ambientais e são obtidos através da manutenção dos processos do ecossistema. Exemplos: regulação climática, da qualidade da água, de enchentes, de erosão, de pragas e doenças e outros.
Suporte	São os que trazem benefícios indiretos, entregando os processos naturais necessários aos demais serviços. Exemplos: formação de solos, ciclagem de nutrientes e outros.
Cultural	São os que se relacionam a benefícios imateriais, ligados aos valores e manifestações culturais, exemplos: lazer, educação, inspiração, espiritualidade e outros.

A conexão de aspectos biofísicos dos ecossistemas com benefícios aos seres humanos através da noção de serviços ecossistêmicos é essencial para avaliar os *trade-offs* (ecológicos, socioculturais, econômicos e monetários) envolvidos na perda de ecossistemas e da biodiversidade de forma clara e consistente (TEEB, 2010). No contexto do desastre da Samarco, as técnicas transdisciplinares e colaborativas da abordagem

ecossistêmica podem ser utilizadas na avaliação dos danos aos ecossistemas, de forma a subsidiar a escolha de medidas mitigatórias e de restauração. Entre estas técnicas, o modelo *Driver-Pressures-State-Impact-Responses* (DPSIR) destaca-se por capturar e representar as causas, consequências e respostas a mudanças de forma sistêmica, encapsulando interações entre os componentes antropogênicos e naturais de sistemas socioecológicos (ELLIOT; O'HIGGINS, 2020; GREGORY et al., 2013). No presente estudo, esta abordagem foi utilizada visando a incorporação da complexidade ecológica, das interdependências dos organismos (incluindo seres humanos) e dos processos ecológicos na identificação e avaliação das perdas de serviços ecossistêmicos, em consequência da alteração da condição dos ecossistemas.

8.2 O MODELO DPSIR SISTÊMICO E A ADAPTAÇÃO AO DESASTRE DA SAMARCO

O modelo *Driver-Pressure-State-Impact-Response* (DPSIR) foi desenvolvido no final dos anos 1990 a partir de diversas estruturas utilizadas para avaliação ambiental, que tiveram sua origem na estrutura *Pressure-State-Response* (PSR), elaborada pela *Organization for Economic Co-operation and Development* (OECD, 1994). Nessa estrutura, todo o sistema social era representado pela dimensão *Pressure* (P), ignorando suas causas. Além disso, o sistema ecológico era representado apenas pela dimensão *State* (S), limitando a compreensão dos ecossistemas a parâmetros estruturais específicos e não permitindo uma análise dos seus processos e funções (EHARA et al. 2018; ELLIOTT; O'HIGGINS, 2020). Devido a essas limitações, a Agência Ambiental Europeia (EEA, 1999) criou a estrutura DPSIR como uma forma de análise integrada das atividades humanas e das interações com o ambiente.

O modelo DPSIR explicita as relações de causa-efeito que ocorrem em sistemas complexos sujeitos à ação humana. A ideia geral por trás do modelo é de que as atividades humanas tomadas como forças motrizes (*Drivers*) (ex: atividades antrópicas, usos e outros) originam diversos aspectos/pressões ambientais significativos (*Pressures*) que podem alterar o estado dos ecossistemas (*State*), e assim, produzir impactos que afetam as dimensões de saúde, segurança, relações sociais e necessidades materiais básicas da população. Por fim, o modelo propõe a elaboração de possíveis respostas (*Responses*) para amenizar ou mitigar as disfunções observadas nas etapas anteriores (BARRAGÁN, 2016; MATEUS; CAMPUZANO, 2008). O DPSIR é suficientemente flexível para ser conceitualmente utilizado em várias escalas espaciais e hierarquias tratadas na gestão do território e na avaliação de alterações no ambiente natural. Consequentemente, pode ser usado como uma ferramenta de comunicação entre cientistas de diferentes disciplinas, por um lado, e por gestores, formuladores de políticas e diferentes usuários, por outro (VON BODUNGEN; TURNER, 2001). Nesse sentido, torna-se um modelo capaz de integrar a ciência interdisciplinar e informar a tomada de decisão (BREMER; GLAVOVIC, 2013). O modelo DPSIR (Figura 127), tomado como método de análise, permite avaliar as causas, consequências e respostas à mudança de maneira integrada (EEA, 1999; ELLIOT, 2002), sendo adequado para