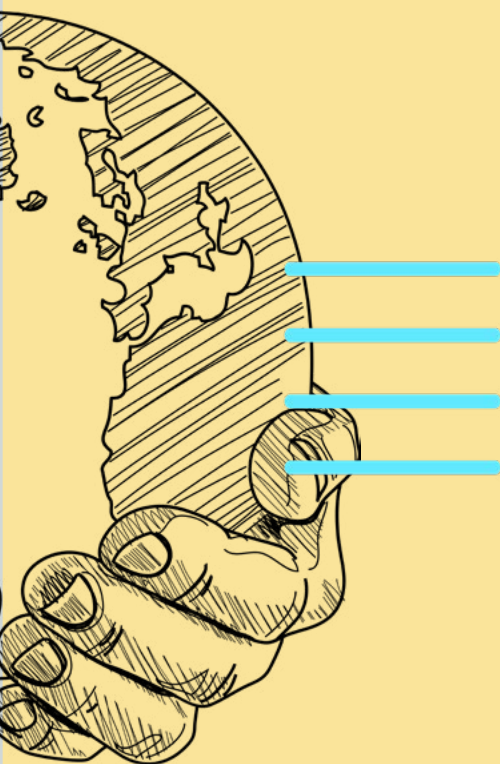


Anais do Fórum de Programas do Meio Físico

Licenciamento Ambiental Federal



26 e 27 de julho de 2023
Aline Fonseca Carvalho (org.)



Anais do **Fórum de Programas do Meio Físico**

Licenciamento Ambiental Federal

26 e 27 de julho de 2023
Aline Fonseca Carvalho (org.)

Março 2024



Presidência da República

Luis Inácio Lula da Silva

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima

Marina Osmarina Silva

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

Rodrigo Antonio de Agostinho Mendonça

Diretoria de Licenciamento Ambiental

Claudia Jeanne da Silva Barros

Coordenação e organização

Aline Fonseca Carvalho

Equipe

Amandda Caroline Cavalcante

Elida Santos da Silva

Nani Oliveira Cavalcanti

Rafael Melo dos Reis

Roberta Mota Cavalcanti de Albuquerque Cox

Revisão

Auristela Marina Cardoso Genaro Webster



Sumário

Apresentação	5
Projeto de Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina da Bacia de Santos (PMPAS-BS)	7
Programa de Controle de Emissões Atmosféricas e Monitoramento da Qualidade do Ar	20
Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar	33
Programa de Monitoramento Limnológico	44
Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico	58
Plano de Gestão Espeleológico	69





Apresentação

Desde 2019, a Diretoria de Licenciamento Ambiental (Dilic) do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (Ibama) vem realizando fóruns no intuito de apresentar à sociedade os resultados dos programas ambientais que são parte das licenças emitidas. Essa iniciativa foi concebida por Rita de Cássia Pereira, uma servidora agora aposentada que trabalhava na área socioeconômica. Ela percebeu que muitos projetos eram mereciam destaque e que seria interessante compartilhar essas experiências com outros empreendedores, consultorias, Organizações Não Governamentais (ONGs), a academia e qualquer interessado em acompanhar o trabalho do Licenciamento Ambiental Federal (LAF).

Os três primeiros fóruns foram realizados de forma presencial, sendo dois exclusivos dos programas ambientais do meio socioeconômico e um dedicado aos Programas de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). Em

todos, o auditório principal do Ibama em Brasília ficou lotado de participantes que assistiram às apresentações e contribuíram nos debates. Entretanto, o modelo presencial apresentava limitações, pois era empecilho para muitos interessados de outros estados.

Então, a partir de 2021, buscando dar continuidade e ampliar essa importante iniciativa de divulgação, o terceiro fórum do meio socioeconômico foi o primeiro a ser realizado exclusivamente online. Aquele evento trouxe ainda mais uma inovação: os programas não seriam mais indicados pelo corpo técnico. Em vez disso, foi aberta uma fase de inscrições, permitindo que empreendedores e consultorias que acreditavam que suas medidas mitigadoras/compensatórias estavam aptas a disputar uma vaga e se apresentar, enviassem seus materiais para a avaliação de uma comissão composta exclusivamente por servidores do LAF.

Desde então, foram orga-



nizados não apenas o terceiro fórum de socioeconomia, mas também um segundo de PRAD, o primeiro de fauna e o que é objeto desta publicação: o Fórum de Programas de Meio Físico do LAF.

Este documento apresenta o resultado em forma de artigos da seleção de programas de meio físico para monitoramento, mitigação ou compensação de impactos ambientais como resultado do LAF.

O primeiro Fórum de Programas de Meio Físico do LAF, ocorreu nos dias 26 e 27 de junho de 2023 e selecionou oito projetos. As apresentações foram organizadas em blocos, seguidos de debates. Destes programas, seis contribuíram com textos e imagens para a composição deste documento.

Assim, espera-se continuar divulgando os resultados do LAF e contribuir para que a sociedade brasileira entenda a importância desse instrumento de política pública para o desenvolvimento sustentável.

Aline Fonseca Carvalho
Analista Ambiental/Ibama



Projeto de Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina da Bacia de Santos (PMPAS-BS)

Atividade de Produção e Escoamento de Petróleo e Gás Natural do Polo Pré-Sal da Bacia de Santos - Etapa 2

Ângela Spengler
Diogo P. Corrêa Pereira
Thiago Pires de Paula

O Projeto de Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina na Bacia de Santos (PMPAS-BS) foi elaborado e proposto em resposta ao Termo de Referência 002/2013, emitido pela CGPEG/DILIC/IBAMA. Este projeto foi concebido para atender às necessidades do processo de licenciamento ambiental dos Projetos de Produção e Escoamento de Petróleo e Gás Natural no Polo Pré-Sal da Bacia de Santos – Etapa 2, e as renovações das licenças de operação das atividades de exploração e produção (E&P) da Petrobras na Bacia de Santos, bem como os novos processos de licenciamento ambiental destas atividades da Petrobras nessa bacia.

O projeto tem como objeti-

vo a caracterização da paisagem acústica submarina e o monitoramento do nível de ruído submarino na região do Polo Pré-Sal na Bacia de Santos, assim como nas rotas de navegação preferenciais que servem à região. Uma de suas possíveis aplicações é subsidiar análises de risco à biodiversidade e estudos de avaliação de impactos sobre a biota marinha.

O termo “paisagem acústica” engloba tanto os sons produzidos por organismos (biofonia), quanto sons ambientais de origem não biológica, como aqueles produzidos por ventos e ondas (geofonia), além dos sons gerados por atividades humanas (antropofonia) (Andrade, 2018).

Seguindo o que se preconiza na literatura científica (Wenz, 1962; Cato, 2008; Dekeling, et al., 2014),



o monitoramento dos ruídos produzidos por atividades antropogênicas é realizado considerando os níveis de energia nas bandas de frequência de 63Hz e 125Hz do espectro de 1/3 de oitava. As bandas de 500Hz e 1000Hz são utilizadas para o monitoramento de ruídos gerados por ventos e ondas.

O projeto foi elaborado considerando ciclos de implantação, cada um com duração de quatro anos. Isso permite uma constante avaliação da eficácia das metodologias de coleta e análise de dados para o cumprimento dos objetivos do projeto, além de possibilitar a proposição de eventuais melhorias e ajustes de escopo. O esforço de levantamento de dados do PMPAS-BS durante o 1º ciclo compreendeu duas vertentes:

1. Monitoramento fixo: realizado por meio de equipamentos de medição autônomos instalados no leito marinho, por meio de observatórios submarinos (OS) em regiões costeiras e através de linhas de fundeio instrumentadas (LFI) em regiões

oceânicas. Esses equipamentos contam com sensores acústicos instalados em profundidades de 50m, 200m e 950m; e

2. Monitoramento móvel: realizado por meio de equipamentos de navegação autônoma do tipo glider, que navegam realizando mergulhos sucessivos de até 1000m executando gravações acústicas contínuas. Além disso, são utilizados perfiladores acústicos de livre deriva, que fazem medições acústicas de 1 minuto em cinco níveis verticais discretos entre a superfície e 1000m.

O 1º ciclo do PMPAS-BS considera o período de novembro de 2015 (início do monitoramento móvel) a dezembro de 2021 (o início efetivo do monitoramento fixo oceânico ocorreu em setembro de 2017).

A *Figura 1* mostra a localização dos equipamentos de monitoramento fixo durante o 1º ciclo do PMPAS-BS, enquanto a *Figura 2* apresenta a trajetória dos gliders e perfiladores de monitoramento móvel no mesmo período.



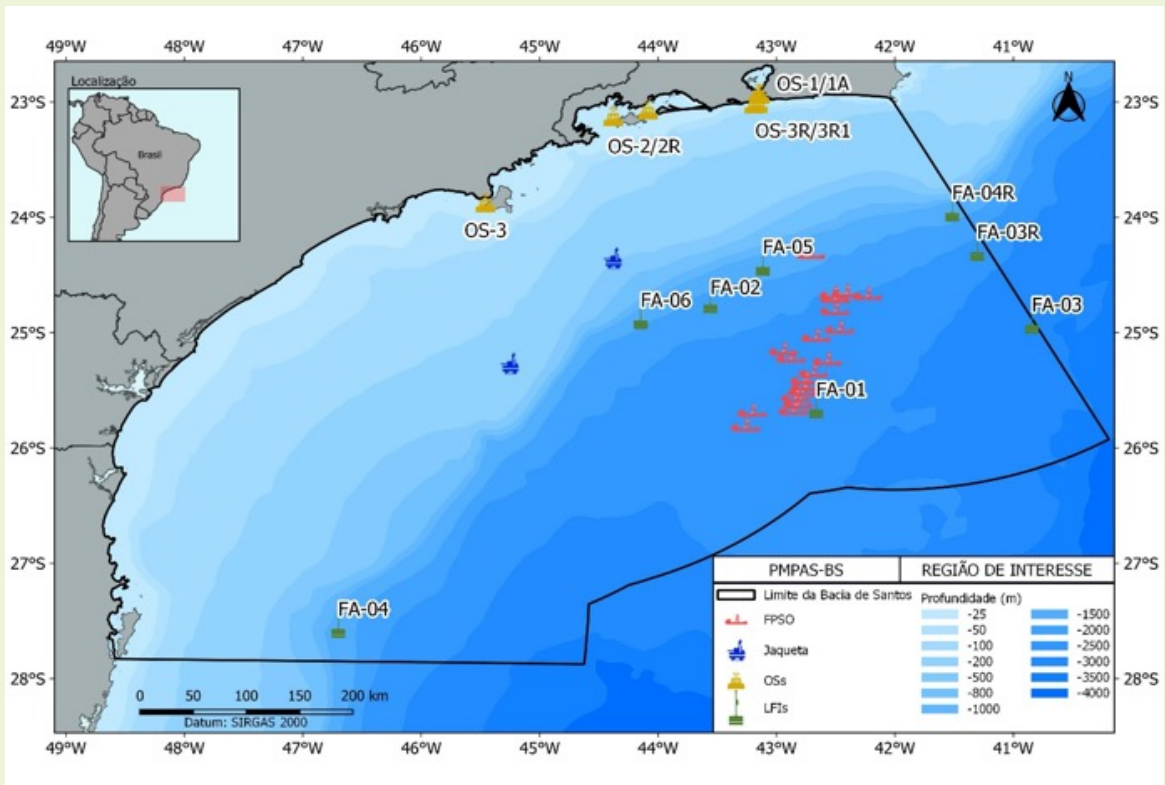


Figura 1 – Mapa da Bacia de Santos (BS) com as posições de sistemas de produção da PETROBRAS (FPSO e jaquetas), as 6 linhas de fundeio instrumentadas (LFIs) e os observatórios submarinos rasos (OS). As linhas FA-03 e FA-04 foram reposicionadas (indicadas pela letra R) durante o 1º ciclo do PMPAS-BS, assim como os OSs. A linha preta indica os limites geográficos da Bacia de Santos (Lima, et al., 2022).

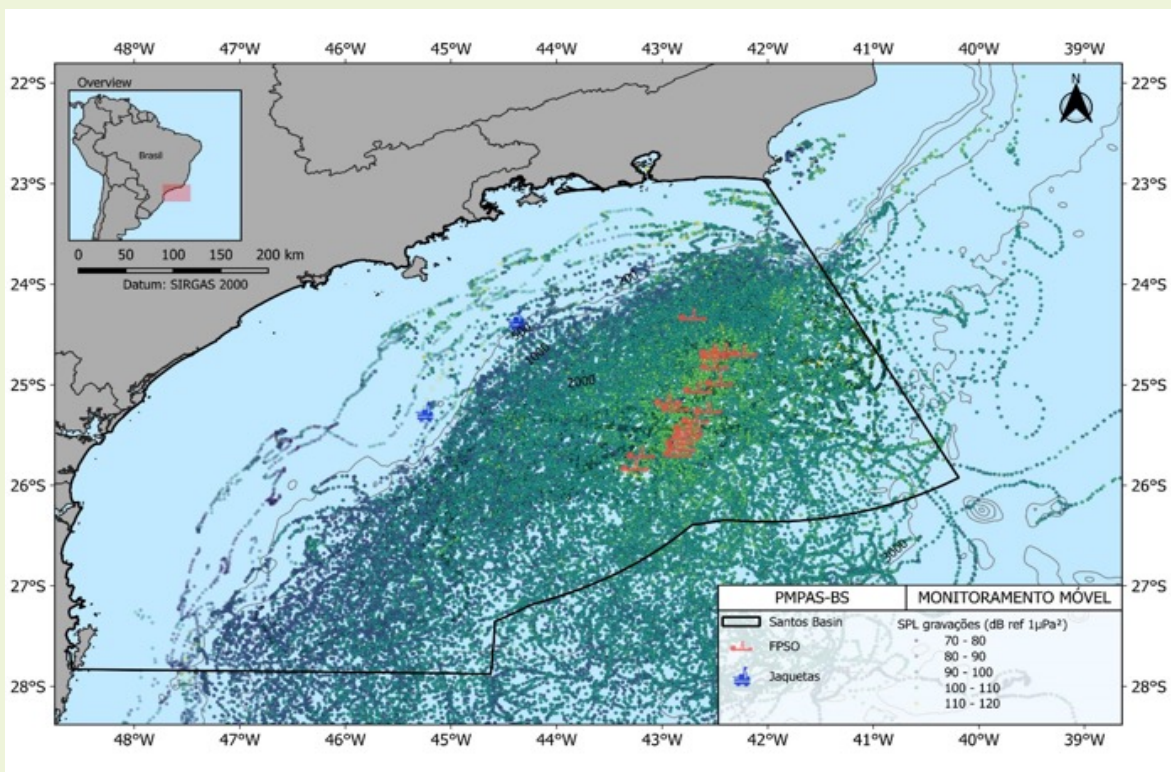


Figura 2 – Distribuição espacial das medições acústicas realizadas ao longo das trajetórias dos gliders e perfiladores acústicos durante o 1º ciclo do PMPAS-BS. As cores dos pontos são proporcionais ao nível de ruído (amarelo maior ruído) na banda de 63 Hz do espectro de 1/3 de oitava medido nesses pontos (Fonte: compilação dos autores a partir dos dados do 1º ciclo do PMPAS-BS).

Dos quatro equipamentos empregados para a coleta de dados, apenas os perfiladores acústicos não armazenam os dados brutos, uma vez que o próprio equipamento faz o processamento das gravações acústicas e transmite os parâmetros acústicos processados via satélite, já que estes dispositivos não são recuperados. Os gliders, OSs e LFI armazenam as gravações em cartões de memória, os quais são recolhidos posteriormente e permitem uma análise mais detalhada das informações após o processamento dos sinais e cálculo dos parâmetros acústicos.

Além da coleta, processamento e análise dos dados acústicos, foi desenvolvido um sistema de modelagem de propagação capaz de gerar mapas de ruído a partir de informações de localização e tipo de embarcações, bem como das características do meio, como a batimetria, tipo de sedimento de fundo, temperatura e salinidade da água. Essa fer-

ramenta oferece uma visão espacial e temporal mais abrangente da distribuição do ruído em toda a bacia, permitindo a extrapolação dos níveis de ruído para locais onde nenhum dado acústico foi coletado.

A simulação do ruído irradiado por navios e plataformas fixas é realizada por meio do modelo *Kraken*¹, considerando a posição média das fontes sonoras da Bacia de Santos em janelas de duas horas. A contribuição de cada fonte é, então, somada para obtenção de mapas de ruído com frequência temporal diária, mensal, sazonal ou anual.

Ao longo dos seis primeiros anos do PMPAS-BS, foram gravadas 142.796,03 horas de dados acústicos para os gliders, OSs e LFI. No mesmo período, os perfiladores analisaram um total de 5.479,7 horas de sinal. O conjunto de dados coletados no âmbito do PMPAS-BS, no período de 2015 a 2021, tanto na sua vertente móvel quanto na fixa, traz uma visão inédita e abrangente da variabilidade espacial e



temporal do ruído hidroacústico na Bacia de Santos.

A *Figura 3* mostra os resultados obtidos a partir da determinação dos níveis de ruído ambiente da Bacia de Santos. Em termos do nível de intensidade sonora (SPL), os resultados ora obtidos apontam para um incremento de ruído de 10,1 e 10,7dB para as faixas de 63 e 125Hz, respectivamente, na região onde se concentra a maior parte das atividades da Petrobras (região R1) e a maior parte das medições acústicas em relação a regiões mais silenciosas (R2 e R3). No entanto, a diferença entre as regiões com maior ou menor grau de atividades antropogênicas para as bandas de 500 e 1.000Hz é menor, da ordem de 6dB, indicando a relevância de ruídos de origem geofônica, como o ruído induzido pela ação do vento e por ondas de gravidade em superfície.

Uma avaliação adicional dos dados (ver *Figura 4*) mostrou que a presença ou ausência de embarcações nas imediações do sensor resulta em uma diferença de até 8dB no ruído medido para a fai-

xa de 10Hz a 1kHz. Além disso, a presença de ventos com intensidade superior a 1,5m/s pode resultar em um aporte de ruído entre 8 e 16dB na faixa de 500Hz a 2kHz, enfatizando a importância das bandas de 63Hz e 125Hz como indicadores do impacto do ruído antropogênico no ambiente acústico da Bacia de Santos.

Com o monitoramento móvel, não foram identificadas tendências de aumento do ruído ao longo do tempo. No entanto, com o monitoramento fixo, foram identificados tanto acréscimos quanto decréscimos de ruído, dependendo da faixa de frequência considerada. Essa variação denota a pequena abrangência espacial e o maior grau de sensibilidade desse tipo de monitoramento a pequenas variações locais do comportamento das fontes, que nem sempre se refletem no contexto da bacia como um todo.

Não obstante, a existência de maiores níveis de ruído próximo a regiões de intensa atividade de E&P e navegação na Bacia de Santos vem sendo observada e consolida-



da ao longo da execução do PMPAS-BS. Porém, tais níveis estão em linha ou mesmo abaixo do ruído medido em outras regiões onde atividades antropogênicas se-

melhantes ocorrem, como no Golfo do México e no Mar do Norte (IPqM e PETROBRAS, 2022)

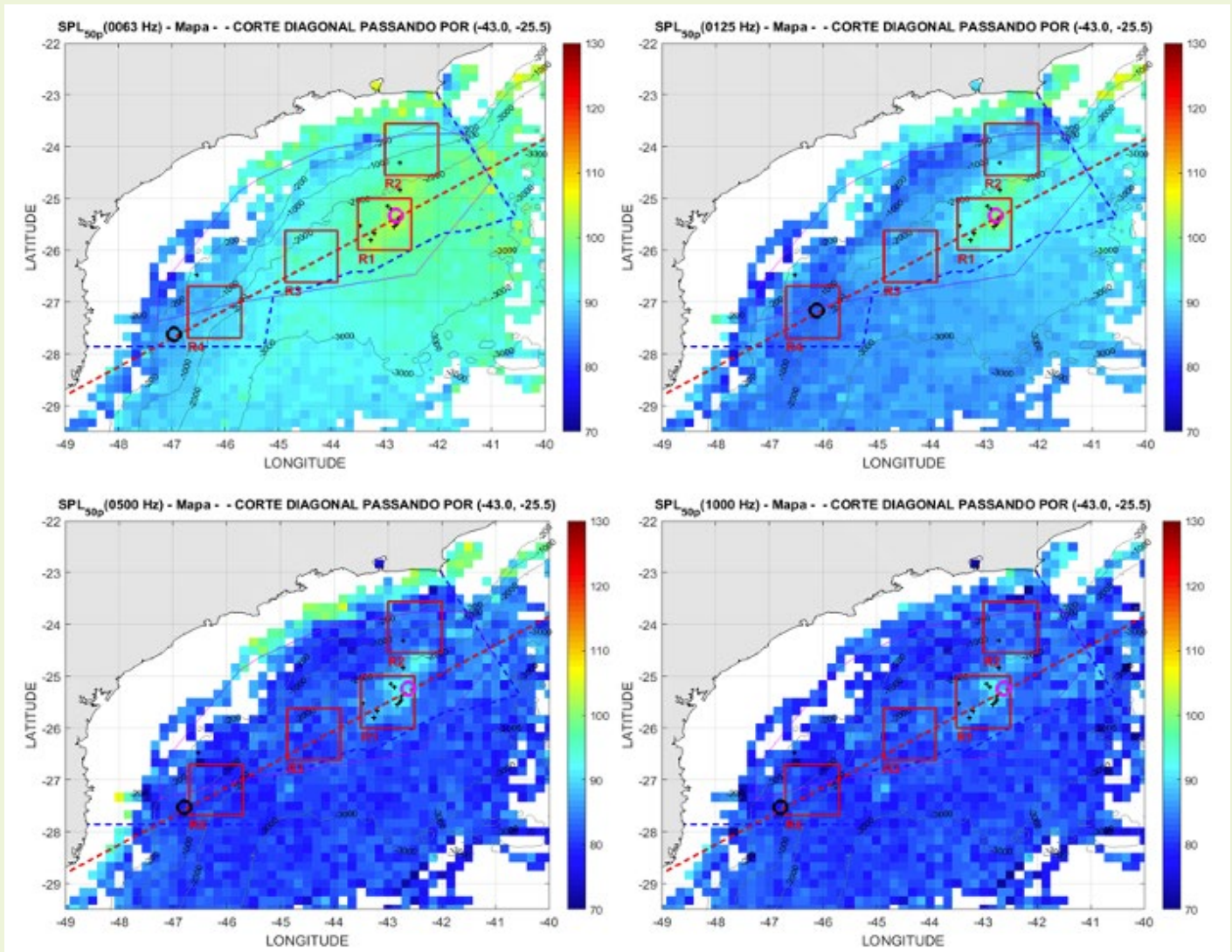


Figura 3 – Mapas do SPL para o filtro de 1/3 de oitava centrado nas frequências de 63 Hz, 125 Hz, 500 Hz e 1.000 Hz. Os quadrados vermelhos delimitam 4 regiões com diferentes características de ocorrência de fontes antropogênicas: região R1 (maior concentração de atividades da Petrobras), R2 (maior concentração de rotas de navegação), R3 e R4 (regiões com menor densidade de atividades antropogênicas). As cruzes pretas indicam a posição de algumas plataformas (IPqM e PETROBRAS, 2022).



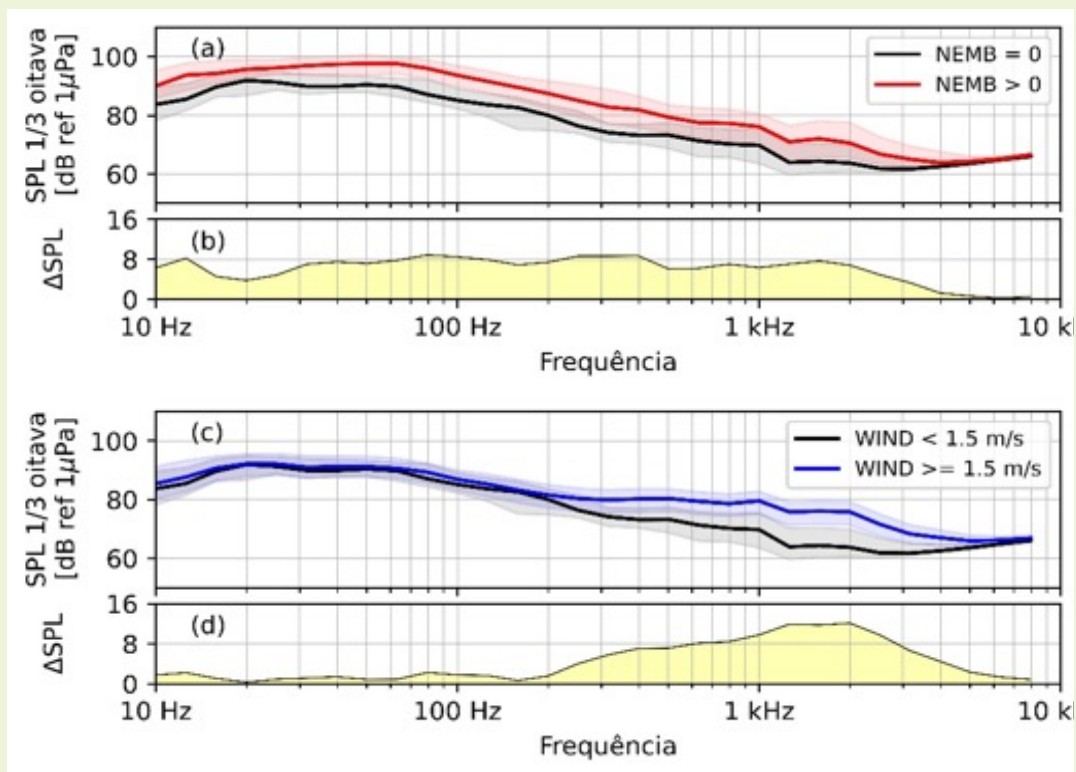


Figura 4 – Painel superior: (a) mediana dos espectros de 1/3 de oitava do SPL para as medições com e sem a presença de embarcações em um raio de 40 km e vento inferior a 1,5 m/s; (b) diferença em dB entre as duas situações descritas em (a). Painel inferior: (c) espectros de 1/3 de oitava do SPL para as medições sem presença de embarcações em um raio de 40 km com vento acima e abaixo de 1,5 m/s; (d) diferença em dB entre as duas situações descritas em (c). As linhas cheias grossas nos gráficos (a) e (c) indicam a mediana dos espectros e as envoltórias delimitam a região entre os percentis 25% e 75% (IPqM e PETROBRAS, 2022).

Embora as medições acústicas realizadas na região oceânica não possibilitem uma identificação precisa da assinatura acústica das plataformas, os aportes de energia sonora associados à atividade de produção, e que envolvem, sobretudo, o ruído irradiado das embarcações de apoio, puderam ser estimados com elevada precisão. Não obstante, a partir dos dados dos OS, é possível realizar uma identificação clara da assinatura acústica de

quaisquer embarcações civis ou militares que transitem nos principais canais de navegação da Baía de Guanabara, Ilha Grande e São Sebastião. Isso confere à Marinha do Brasil a prerrogativa de análise prévia dos sinais acústicos, tendo em vista a sensibilidade desses dados para questões de defesa e garantia da segurança nacional.

Além de uma refinada caracterização das fontes de ruído antropogênicas, os dados dos OSs revelaram a existên-



cia de ambientes acústicos ricos e bastante heterogêneos nas regiões costeiras da Baía de Santos, como ilustrado na *Figura 5*. Foram identificados ruídos de fontes bióticas, como de coros de peixes e invertebrados, estalos e de vocalizações de cetáceos; fontes geofônicas ou abióticas, principalmente o ruído de fluxo induzido pelas correntes sobre o sensor; e fontes antropogênicas,

sobretudo ruídos de embarcações, motores e bombas. A presença dessas fontes se dá em três faixas principais do espectro de frequência: 0 a 100Hz, 100Hz a 2kHz e 2 a 24kHz. As duas primeiras são influenciadas por sinais de origem antropogênica, abiótica e biótica, enquanto a última é dominada por fontes bióticas.

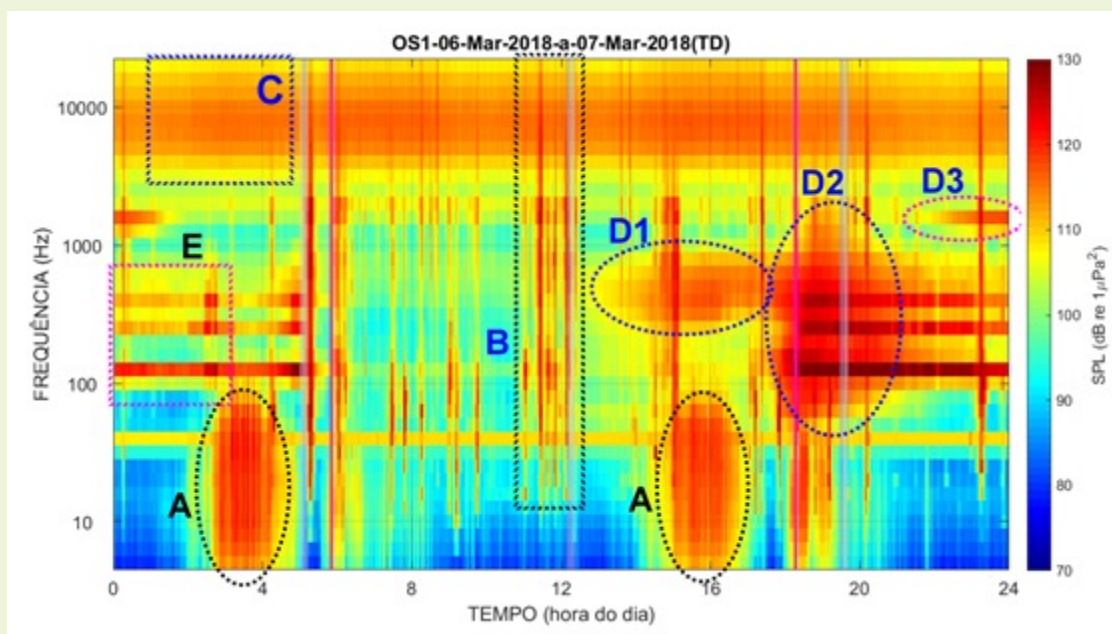


Figura 5 – Espectrograma (tempo vs frequência) do nível de ruído ao longo de um dia de monitoramento acústico no interior da Baía de Guanabara. As letras correspondem aos tipos de ruído observados (A = Fluxo de maré; B = Embarcações; C = Estalos/cliques; D = Coros; E = Tons 100/125Hz) (Lima, et al., 2022)

Em relação à iniciativa de modelagem do PMPAS-BS, os resultados ora obtidos são robustos o suficiente para permitir o acompanhamento das tendências gerais de aumen-

to ou redução dos ruídos na Baía de Santos. Eles demonstram que a qualidade do sistema de modelagem desenvolvido está em linha com as melhores iniciativas inter-



nacionais de modelagem de propagação acústica utilizadas mundialmente, por entidades e agências reguladoras, como ferramenta efetiva de diagnóstico e gestão do impacto ambiental associado ao ruído antropogênico (De Lima, et al., 2020).

A *Figura 6* apresenta uma comparação em relação ao ruído medido em diferentes pontos da Baía de Santos e ilustra a boa aderência do modelo às medições, com a raiz do erro médio quadrático inferior a 5dB. Uma rodada de calibração dos parâmetros do modelo de propagação está em andamento, e novas aplicações das simulações de propagação estão previstas para o segundo ciclo do PM-

PAS-BS, para que esta ferramenta se torne uma das fontes primárias de informações sobre o ambiente acústico da Baía de Santos.

Assim, considera-se que os resultados do 1º Ciclo de implementação do PMPAS-BS, de novembro de 2015 até dezembro de 2021 (seis anos de dados acústicos medidos), são capazes de fornecer uma base robusta para definição dos principais aspectos e tendências da paisagem acústica submarina da Baía de Santos.

O PMPAS-BS tem uma magnitude de medições acústicas oceânicas que é pioneira na América Latina e com poucas similares no mundo, pois realiza o monitoramento de

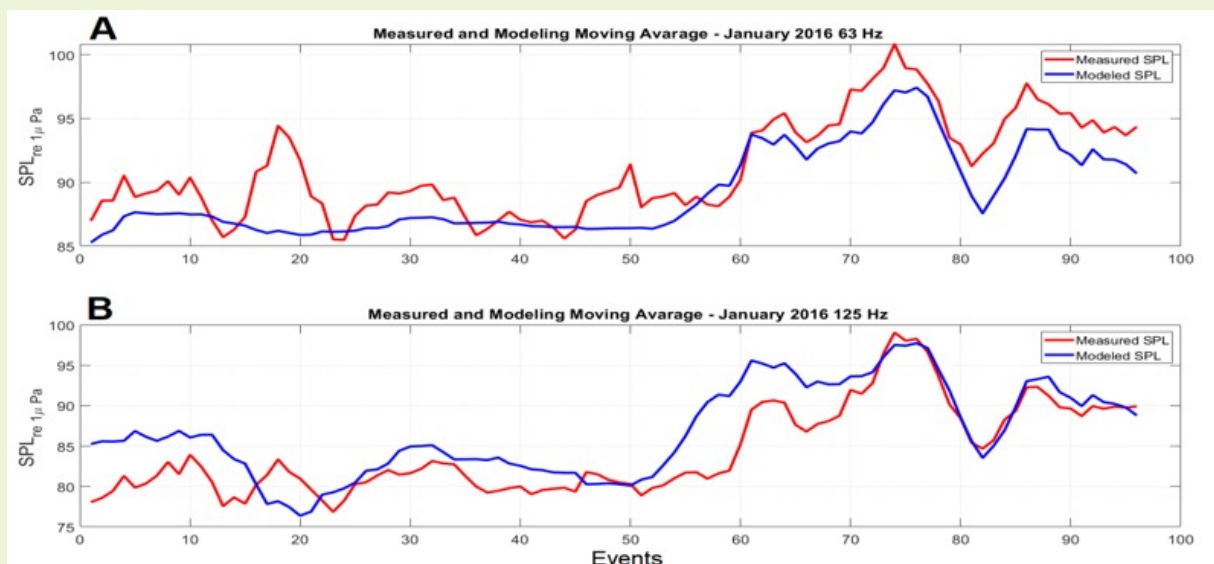


Figura 6 – Comparação entre os níveis de ruído medidos (curva vermelha) e modelados (curva azul) para as frequências de 63 Hz (painel A) e 125 Hz (painel B) durante o mês de janeiro de 2016 (De Lima, et al., 2020). O eixo x se refere a células de 1/6º geograficamente distribuídos de sul a norte da Baía de Santos, em que ocorrem medições acústicas no referido mês.



uma enorme área (~339.000 km²) por meio de diversos equipamentos com distintos métodos e sensores de aquisição acústica (Lima, et al., 2022). Um grande desafio do projeto é garantir a qualidade e a intercambialidade dos dados medidos pelos diversos equipamentos, possibilitando estudos abrangentes com a integração dos resultados dos dados coletados pelos diferentes componentes (monitoramento móvel, fixo oceânico e fixo costeiro).

Destaca-se a importante inter-relação do PMPAS-BS com outros dois projetos de monitoramento regional da Baía de Santos: o Projeto de Monitoramento do Tráfego de Embarcações da Baía de Santos (PMTE-BS) e o Projeto de Monitoramento de Cetáceos na Baía de Santos (PMC-BS). O primeiro fornece os dados das embarcações que são utilizados para a interpretação dos resultados do PMPAS-BS e como dados de entrada no modelo de propagação. Já o PMC-BS recebe periodicamente insumos e infor-

mações obtidos por meio do PMPAS-BS, possibilitando as avaliações de riscos e impactos aos cetáceos, pelo PMC-BS, além de avaliar os dados de possíveis vocalizações de cetáceos registrados pelo PMPAS-BS.

Em relação à integração entre o PMPAS-BS e o PMC-BS, resultados importantes têm sido obtidos. Os dados das frequências de 63Hz e 125Hz estão sendo utilizados na modelagem de distribuição de habitats elaboradas pelo PMC-BS, na qual são utilizadas diversas variáveis ambientais (como temperatura da água, salinidade, batimetria, correntes) e variáveis antrópicas (como tráfego de embarcações, ruídos) para verificar quais se correlacionam com a distribuição dos cetáceos na Baía de Santos. De acordo com os resultados obtidos até o momento, os ruídos não são variáveis plausíveis para explicar a distribuição dos cetáceos.

Além disso, os dados coletados pelo PMPAS-BS permitem também a identificação de possíveis vo-



calizações de cetáceos. A detecção de vocalizações é realizada utilizando o programa PAMGuard, e sua saída é processada manualmente, como no caso dos gliders, ou por meio de um classificador automático baseado em redes neurais, como foi feito para os OSs e LFI. Os trechos detectados são recortados e enviados para PMC-BS, para separação das vocalizações, classificação e inclusão na sonoteca do projeto. A equipe técnica do PMC-BS vem trabalhando na melhoria dos detectores utilizados, considerando tanto o desenvolvimento de novos detectores quanto a verificação de diferentes configurações para detectores utilizados, o que tornará os resultados ainda mais assertivos.

Os dados obtidos por meio do PMPAS-BS têm sido complementares aos gerados pelo PMC-BS, principalmente em relação aos mysticetos (baleias verdadeiras com barbatanas bucais), que produzem vocalizações de baixa frequência e mais estereotipadas. Isso permite, inclusive, a identificação da espécie,

em alguns casos, mesmo sem a avistagem direta. A integração entre o PMPAS-BS e o PMC-BS possibilitou a identificação de vocalizações da baleia-minke-antártica (*Balaenoptera bonaerensis*), levando à publicação de um artigo sobre a primeira tentativa de descrever a diversidade acústica dessa espécie em latitudes menores (Rossi-Santos, Filun, Soares-Filho, Paro, & Wedekin, 2022).

Até o momento, foi dado um foco maior nos dados de vocalizações de cetáceos obtidos por meio dos gliders. Isso foi corroborado pela qualidade desses dados, em associação com a versatilidade do equipamento em seus deslocamentos tanto horizontais quanto ao longo da coluna de água (até 1.000m de profundidade), além da extensa banda de frequência de amostragem, o que eleva a probabilidade de detecção de sinais da biota presente na região oceânica. Os registros obtidos por meio dos OS e LFIs tem apresentado grande potencial e serão detalhadamente explorados no futuro.

Embora os dados apre-



sentados no presente estudo sejam referentes ao 1º ciclo de implantação do projeto, é importante ressaltar que o PMPAS-BS está atualmente em seu segundo ciclo de execução. Foram realizados ajustes no escopo do projeto com base nos resultados do 1º ciclo.

Referências

ANDRADE, B. C. (2018). Estudo da paisagem acústica submarina na região do Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, Brasil. Niterói: Universidade Federal Fluminense.

CATO, D. H. (2008). Ocean ambient noise: its measurement and its significance to marine animals. *Environmental Science*.

LIMA, F. M. de, CORREA-JUNIOR, C., SOARES FILHO, W., GALOTTAS; C., LIMA, J. A. & PAULA, T. P. de (1 de Setembro de 2020). An underwater acoustic modelling framework for Santos Basin, Brazil. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, p. 070020.

DEKELING, R., TASKER, M., VAN DER GRAAF, S., AINSLIE, M., ANDERSSON, M., André, M., (2014). *Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas-Part II: Monitoring Guidance Specifications*. Luxemburgo: Publications Office of the European Union.

ERBE, C., & THOMAS, J. A. (2022). *Exploring Animal Behavior Through Sound: Volume 1*. Springer Nature.

IPqM e PETROBRAS. (2022). 6º Relatório Técnico do PMPAS-BS - Nov/2015 a Dez/2021. Disponível em: <https://comunicaciadesantos.petrobras.com.br/documents/d/comunica-bacia-de-santos/6rt_pmpas_final_assinado_17=11-22-1-?download=true>.

LIMA, J. A., DE PAULA, T. P., SOARES-FILHO, W., SPENGLER, A., DE ALMEIDA, F. G., PEREIRA, D. P., . . . STEIN, M. (03 de Abril de 2022). Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina da Baía de Santos (PMPAS-BS): uma iniciativa brasileira em monitoramento acústico oceânico. *Revista Brasilei-*



ra de Meio Ambiente, pp. 95-119.

ROSSI-SANTOS, M. R., FILUN, D., SOARES-FILHO, W., PARO, A. D., & WEDEKIN, L. L. (2022). "Playing the beat": Occurrence of Bio-duck calls in Santos Basin (Brazil) reveals a complex acoustic behaviour for the Antarctic minke whale (*Balaenoptera bonaerensis*). PLOS ONE.

WENZ. (1962). Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. Journal of the Acoustical Society of America, pp. 1936-1956.

Notas

1. https://oalib-acoustics.org/website_resources/AcousticsToolbox/manual/kraken.html



Programa de Controle de Emissões Atmosféricas e Monitoramento da Qualidade do Ar

Terminal Marítimo Ponta da Madeira

André Knop Henriques
Sanderson Silva Teixeira
Luiz Antônio Radaeli
Luiz Claudio Santolim

Introdução

O Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM) está localizado no Distrito Industrial de São Luís (DISAL), criado pelo Decreto Estadual nº 7.632/1980, e reformulado por meio do Decreto Estadual nº 20.727 de 23/08/2004. O TMPM está situado na porção noroeste da Ilha de São Luís, distando cerca de oito quilômetros do centro da cidade de mesmo nome. (Figura 1)

O TMPM foi pensado ao processo administrativo Iba-ma nº 02001.112498/2017-24, que autorizou a sua operação por meio da Licença de Operação (LO) nº 1.432/18, atualmente em sua 3ª Retificação. Este ter-

minal é parte integrante do Complexo Ponta da Madeira (CPM), que possui ainda as estruturas do Terminal Ferroviário de Ponta da Madeira (TFPM), Terminal de Concentrado de Cobre, Terminal de Níquel, Terminal de Carga Geral da VLI, a qual é a comodatária, e a Usina de Pelotização - U1N, cada qual com sua licença de operação específica. Integra ainda o Corredor Norte, um conjunto de estruturas de produção de minério e logística, formado pelas Minas de Serra Norte, Serra Leste e Serra Sul, Ferrovia e Porto nos estados do Pará e Maranhão, sendo o TMPM o principal sistema de produção e escoamento para o exterior de produtos da Vale em volume. Seus principais processos operacionais incluem descarregamento, empilhamento, estocagem, recuperação e embarque. O processo pro-





Figura 1 – Mapa de localização do TMAP. Fonte: Vale S.A.

duto no porto se inicia com o descarregamento do minério de ferro nos viradores de vagões, ponto de referência onde termina a ferrovia (TFPM) e se inicia a operação portuária (TMAP). Atualmente, o terminal opera com oito viradores de vagões, com capacidade de descarregamento de 8.000 toneladas/hora, operando dois vagões simultaneamente, com 105 toneladas de minério cada.

Após ser descarregado, o minério é movimentado por um sistema de correias transportadoras até os pátios de estocagem. Atualmente, a área de estocagem é formada por 17 pátios destinados ao armazenamento de minério de ferro, manganês e pelotas. O sinter feed é o produto de minério de ferro que possui o maior volume de estoque.

A operação de recuperação realizada nos pátios de



minério consiste em recolher o minério estocado e transportá-lo, via correias transportadoras, até os carregadores de navios, onde o minério é escoado para vários continentes do mundo.

O TPM pode ser classificado como um porto do tipo abrigado em ambiente estuarino, contando com 55 milhas náuticas de canal de acesso à Baía de São Marcos, com largura entre 500 e 1.000m. Além disso, possui uma das maiores variações de maré e grandes profundidades que o capacitam a receber os maiores navios graneleiros do mundo.

Segundo os dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), o TPM liderou o ranking de movimentação de carga em 2022, com 168 milhões de toneladas (ANTAQ, 2023), entre os Terminais de Uso Privado (TUP). Quanto ao Índice de Desempenho Ambiental (IDA), disponibilizado para as instalações portuárias e que avalia, por meio de indicadores, a eficiência e a qua-

lidade da gestão ambiental destas, a partir do preenchimento de um questionário, o TPM tem se mantido nos primeiros lugares entre os Terminais de Uso Privado, conquistando o 1º lugar em 2020, 3º lugar em 2021 e 2º lugar em 2022.

Metodologia

O Programa de Controle de Emissões Atmosféricas e Monitoramento da Qualidade do Ar visa promover uma adequada gestão da qualidade do ar do empreendimento. Isso é alcançado por meio de monitoramento e ações específicas de controle de emissões, permitindo uma avaliação dos níveis atuais da qualidade do ar em relação à legislação ambiental brasileira e normas técnicas aplicáveis.

Em função da natureza do seu processo produtivo, que envolve a movimentação de materiais 24 horas/dia e 7 dias/semana, a Vale vem implementando diversas ações de controle ambiental. O foco dessas ações é principalmente a minimização das emissões



fugitivas de partículas. Nesse sentido, foi incorporado ao monitoramento ambiental a ferramenta de acompanhamento da evolução das emissões fugitivas de partículas, denominada Rede Automática de Monitoramento das Emissões Fugitivas de Partículas (RAMP).

Desenvolvida, implementada e operada pela Ecosoft Consultoria Softwares Ambientais, a RAMP é um sistema de monitoramento em tempo real, composto por um conjunto de estações estrategicamente posicionadas. Essas estações são capazes de detectar as variações tridimensionais das concentrações de partículas totais em suspensão (PTS) em áreas específicas no interior do TMPM, bem como medir o fluxo de vento nesses locais. Com base nesses dados e na geometria das áreas monitoradas, a RAMP calcula, 24h por dia, em intervalos de 15 minutos, as taxas de emissão (kg/h) de material particulado emitido para a atmosfera. Esse monitoramento proporciona um acompanhamento efetivo das ações de controle ambiental implementadas pela Vale e

uma gestão otimizada, identificando eventuais desvios e pronta atuação operacional nos controles, objetivando a redução gradativa dessas emissões, com efeito a curto e longo prazo na qualidade do ar no local e nas áreas circunvizinhas.

Equipamentos de monitoramento

As estações RAMP são equipadas com monitores de partículas posicionados em três alturas diferentes. A *Figura 2 - A* apresenta, a título de exemplo, a estação RAMP 25, situada ao norte do Pátio Sul, enquanto a *Figura 2 - B* ilustra a composição esquemática de uma estação RAMP.

Os monitores de partículas ECOPR são desenvolvidos e mantidos pela EcoSoft, sendo especificamente projetados para operar em ambientes industriais com possibilidade de altas concentrações de partículas na atmosfera, além de condições ambientais adversas.

Além dos monitores de partículas, as estações também são compostas por sen-

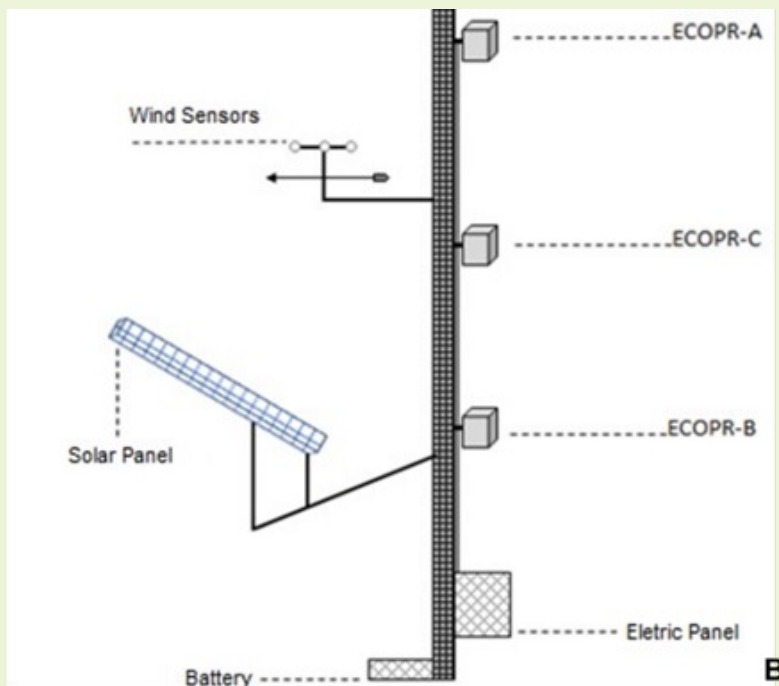


Figura 2 – A - Estação RAMP 25 e B - composição esquemática de uma estação RAMP. Fonte: Vale S.A. e Ecosoft Consultoria Softwares Ambientais.

Variáveis medidas	PTS, MP10, MP2.5, MP1.0. Variáveis opcionais (sob demanda): meteorológicas
Faixa de medição	0 - 10.000 µg/m3 (referência PTS)
Sensibilidade	0,1 µg/m3 (referência MP1.0)
Faixa de diâmetro de partícula	0,35 a 35 µm (6 faixas de tamanho)
Tipo de sensor	Contador de partículas a laser
Sucção da amostra de ar	Interna, ventilador centrífugo
Sonda	Aquecida com filtro de proteção em aço inoxidável
Vazão de operação	0,05 a 0,20 L/min
Variáveis operacionais adicionais	Temperatura do ar e umidade relativa do ar

Tabela 1 – Especificações técnicas do monitor ECOPR. Fonte: Ecosoft Consultoria Softwares Ambientais.

sores de temperatura atmosférica e umidade relativa do ar, datalogger interno e fonte de energia fotovoltaica. Algumas estações, em locais es-

tratégicos, também possuem o sensor de direção e velocidade dos ventos.



Estação	Coordenadas (SIRGAS2000 - UTM)			Qualidade do ar	Meteorologia				Controle Operacional	
	Fuso	X	Y		PTS	DV	VV	TA	UR	BV
RAMP 01	23	572882	9716526	X	X	X	X	X	X	X
RAMP 02	23	572781	9716162	X	X	X	X	X	X	X
RAMP 03	23	572705	9716037	X	-	-	X	X	X	X
RAMP 04	23	572759	9715938	X	-	-	X	X	X	X
RAMP 05	23	572304	9716128	X	-	-	X	X	X	X
RAMP 06	23	572090	9716130	X	X	X	X	X	X	X
RAMP 07	23	571589	9716159	X	-	-	X	X	X	X
RAMP 08	23	571420	9716301	X	X	X	X	X	X	X
RAMP 09	23	570999	9716566	X	X	X	X	X	X	X
RAMP 10	23	571047	9716734	X	-	-	X	X	X	X
RAMP 11	23	570701	9716883	X	-	-	X	X	X	X
RAMP 12	23	570786	9716947	X	X	X	X	X	X	X
RAMP 13	23	571250	9716873	X	-	-	X	X	X	X
RAMP 14	23	571882	9716960	X	X	X	X	X	X	X
RAMP 15	23	572422	9716903	X	-	-	X	X	X	X
RAMP 16	23	572709	9715759	X	-	-	X	X	X	X

Tabela 2 – Parâmetros Monitorados nas Estações RAMP. Fonte: Vale S.A.

Legenda:

PTS – Partículas Totais em Suspensão PP – Precipitação Pluviométrica
 DV – Direção do Vento TA – Temperatura Atmosférica (° C)
 VV – Velocidade do Vento UR – Umidade Relativa do Ar (%)
 BV – Tensão Elétrica (Volt) PSL – Painel Solar



Princípio de medição

Em relação ao princípio de medição, o monitor baseia-se na contagem das partículas suspensas no fluxo de ar que atravessam um feixe de laser. O tamanho das partículas determinado pela amplitude do sinal percebido pelo detector, posicionado a 90° do feixe de luz.

Calibração

A calibração dos sensores é realizada pelo método comparativo, onde os monitores são colocados dentro de uma câmara monitorada simultaneamente por um monitor de partículas beta (Met One BAM 1020) com padrão internacional rastreável, aprovado pela United States Environmental Protection Agency (USEPA).

Análise dos dados

O Sistema Supervisório de Emissões Difusas (SSED), consiste em um software desenvolvido pela EcoSoft para análise contínua dos dados gerados pelo monitoramento. Ele calcula a taxa de emissão de material particulado em cada uma das áreas internas monitoradas

pela RAMP de forma tridimensional. Todas as etapas do monitoramento, transmissão, cálculo e exibição dos resultados são descritos na *Figura 3*.

O Ambion (*Figura 4*) é um aplicativo desenvolvido para trabalhar integrado à RAMP, registrando dados de PTS, direção e velocidade do vento medidos simultaneamente pelas estações, considerando também sua altura e localização geográfica. Um modelo computacional tridimensional utiliza a geometria dos setores monitorados para calcular o balanço de massa das entradas e saídas de material particulado em cada área delimitada. As saídas do modelo tridimensional são as taxas de emissão de material particulado em kg/h geradas nas áreas de monitoramento. Esses valores são inseridos no banco de dados da Ambion e disponibilizados ao usuário em tempo real.

Como pode ser observado na *Figura 4*, as estações da rede automática de monitoramento das emissões fugitivas de partículas es-



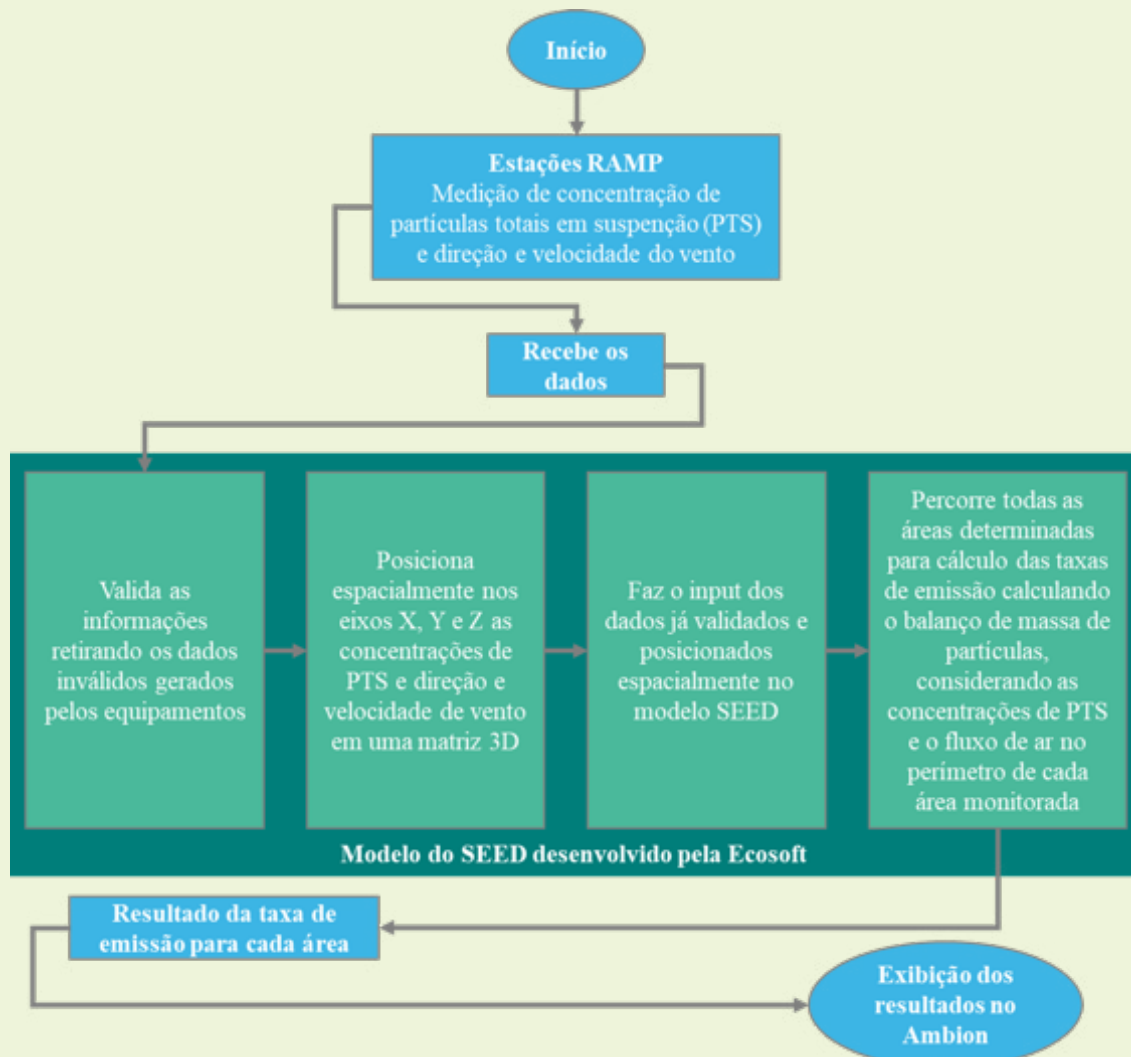


Figura 3 – Fluxo de transmissão de dados da RAMP. Fonte: Adaptado Ecosoft Consultoria Softwares Ambientais.

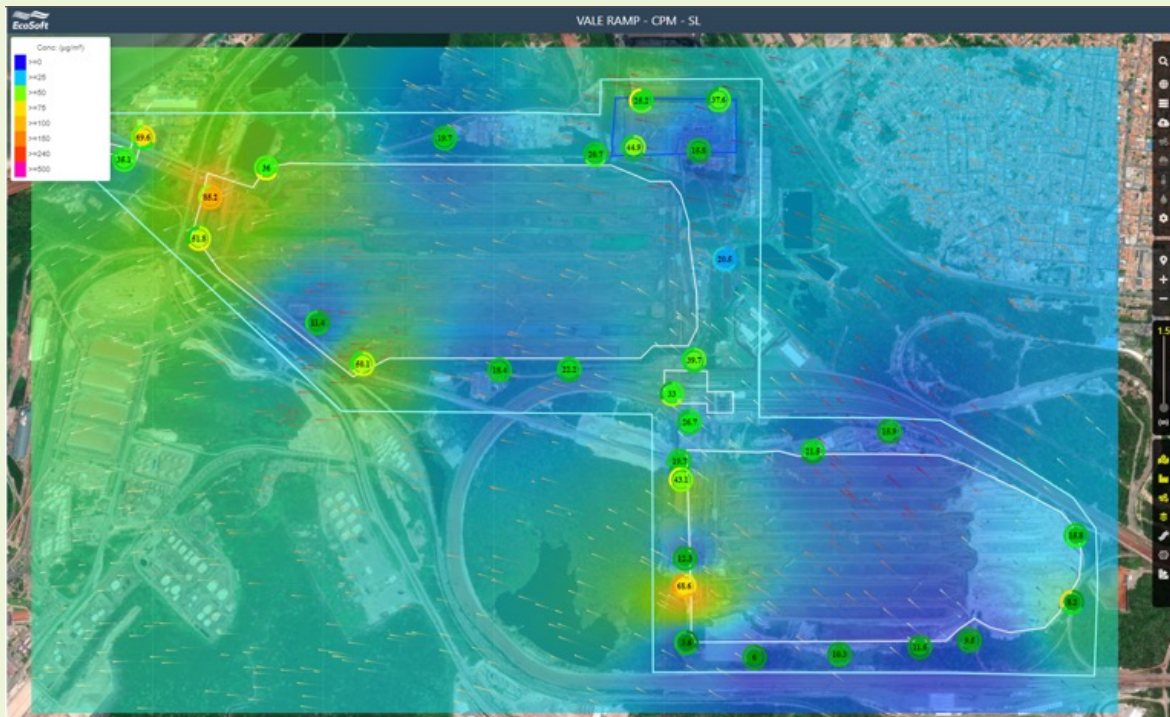


Figura 4 – Tela do aplicativo Ambion. Fonte: Ecosoft Consultoria Softwares Ambientais.



tão dispostas no entorno das áreas propensas a emissão de material particulado. O Pátio Norte possui em seu entorno 15 estações de monitoramento, enquanto o Pátio Sul possui 13.

Para o funcionamento mínimo de uma RAMP, são necessárias atividades básicas de operação e manutenção das estações para o correto cálculo da taxa de emissão das áreas. Com relação ao processo de validação/invalidação dos dados medidos pelas estações RAMP, diariamente são analisados os dados de concentração, direção e ve-

locidade dos ventos e variáveis operacionais medidas pelas estações. Com base nessa avaliação, os dados brutos gerados pelos equipamentos são validados ou invalidados todo dia útil.

Resultados

Nesta seção, são apresentadas as análises dos dados gerados de taxa de emissão (kg/h) das áreas internas monitoradas pela RAMP do TPM para os pátios Norte e Sul, durante o período de janeiro de 2021 a maio de 2023.

	Pátio Norte	Pátio Sul
Número de Registros Esperados	84.576	84.576
Número de Registros Válidos	83.896	84.532
Percentual de Dados Encontrados	99,20 %	99,95 %
Média Aritmética	2,7 kg/h	2,5 kg/h
Média Geométrica *(Valores maiores que zero)	2,8 kg/h	1,9 kg/h
Média Harmônica	0,7 kg/h	0,3 kg/h
Desvio Padrão	4,74 kg/h	3,84 kg/h
Variância	22,4 (kg/h) ²	14,7 (kg/h) ²
Coeficiente de Variação	174,64 %	152,44 %
Percentil 50 (Mediana)	0,3 kg/h	1,0 kg/h
Percentil 75	3,7 kg/h	3,6 kg/h
Percentil 97,5	15,8 kg/h	13,0 kg/h

Tabela 3 – Estatística descritiva – período de janeiro de 2021 a maio de 2023. Fonte: Vale S.A.



A RAMP permite o monitoramento em tempo real das emissões fugitivas de material particulado, possibilitando também o registro da série histórica desses dados. Por meio da série histórica é possível acompanhar a evolução do controle de emissões atmosféricas utilizado nas áreas monitoradas.

Entre as medidas de controle de emissões atmosféricas, as principais adotadas no TMPM são:

1. Umectação de pilhas de minério com uso de polímero aglomerante.

2. Sistema de aspersão nos viradores de vagões.

3. Lavagem e umectação de vias e acessos pavimentados e não pavimentados.

4. Transportadores e casas de transferências enclausurados.

As *Figuras* a seguir mostram os gráficos que representam a evolução das taxas médias diárias e mensais das emissões de material particulado referente às áreas dos Pátios Norte e Sul no período avaliado. Observa-se, em geral, que as curvas apresentam comportamentos similares, com picos nos períodos de estiagem. Porém, as ordens de grandeza diferem, o que pode estar relacionado ao volume de minério

estocado, ao tamanho da área avaliada e à intensidade das movimentações.

Pela análise dos gráficos é possível constatar a redução das taxas de emissão do Pátio Norte ao longo do período avaliado. Quanto ao Pátio Sul, é importante considerar que ele está em processo de ampliação de área e de capacidade de estocagem, o que justifica a linha de tendência crescente nos gráficos.

O acompanhamento do monitoramento, com o estabelecimento de limites internos restritivos, proporciona um ambiente propício ao desenvolvimento da melhoria contínua do processo, buscando garantir a qualidade na operação do TMPM. Complementarmente, a supervisão em tempo real das emissões atmosféricas, por meio de uma metodologia diversificada, permite a adoção de medidas de controle de forma mais ágil e assertiva, garantindo o atendimento aos padrões de qualidade do ar definidos na Resolução Conama nº 491/2018 nas estações de monitoramento localizadas nas comunidades ao redor do TMPM.



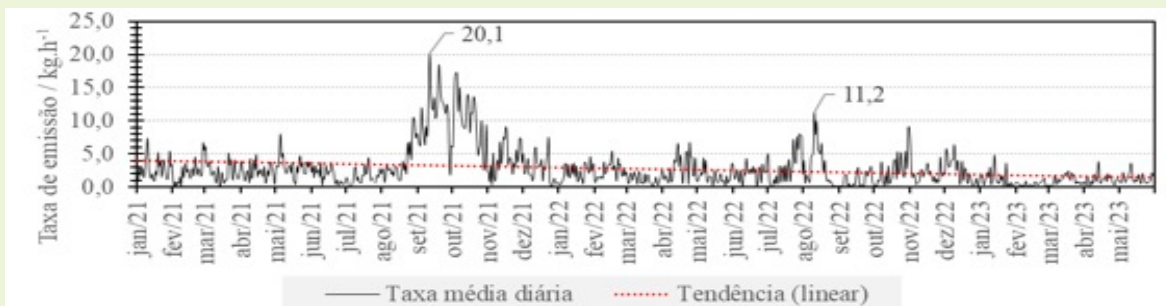


Figura 5 – Gráfico da taxa média diária – Pátio Norte. Fonte: Vale S.A.

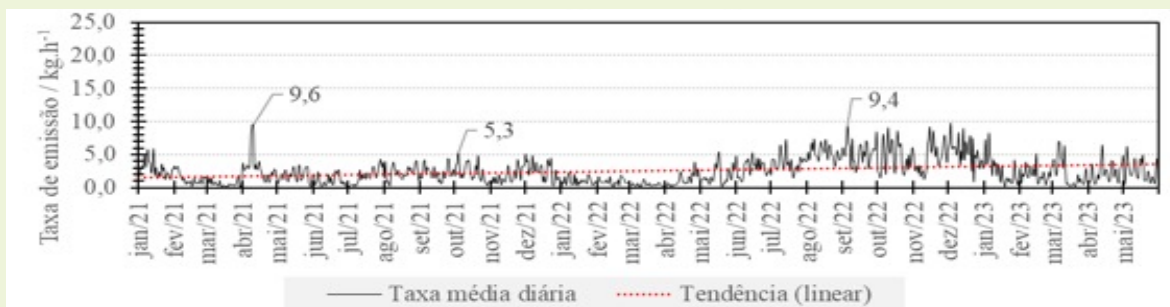


Figura 6 – Gráfico da taxa média diária – Pátio Sul. Fonte: Vale S.A.

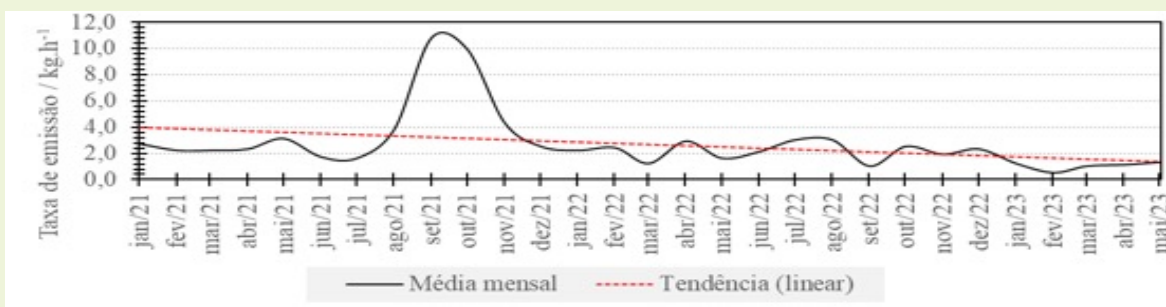


Figura 7 – Gráfico da taxa média mensal – Pátio Norte. Fonte: Vale S.A.

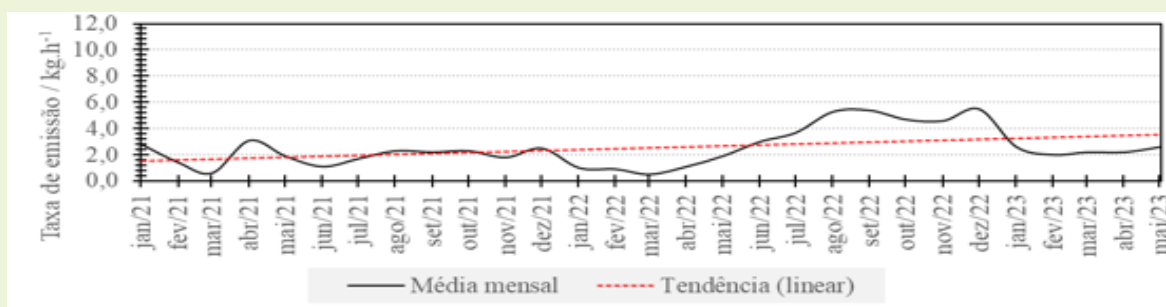


Figura 8 – Gráfico da taxa média mensal – Pátio Sul. Fonte: Vale S.A.



Pela análise dos gráficos é possível constatar a redução das taxas de emissão do Pátio Norte ao longo do período avaliado. Quanto ao Pátio Sul, é importante considerar que ele está em processo de ampliação de área e de capacidade de estocagem, o que justifica a linha de tendência crescente nos gráficos.

O acompanhamento do monitoramento, com o estabelecimento de limites internos restritivos, proporciona um ambiente propício ao desenvolvimento da melhoria contínua do processo, buscando garantir a qualidade na operação do TPM. Complementarmente, a supervisão em tempo real das emissões atmosféricas, por meio de uma metodologia diversificada, permite a adoção de medidas de controle de forma mais ágil e assertiva, garantindo o atendimento aos padrões de qualidade do ar definidos na Resolução Conama nº 491/2018 nas estações de monitoramento localizadas nas comunidades ao redor do TPM.

Considerações Finais

A operação consistente

da RAMP, uma metodologia diversificada de monitoramento das emissões atmosféricas, proporciona o registro de uma série histórica de dados, tornando-se um instrumento fundamental para potencializar e aprimorar a gestão das emissões atmosféricas e da qualidade do ar. Além disso, permite a mensuração dos reais benefícios obtidos com a implementação de ações de controle, por meio da avaliação da evolução de longo prazo das taxas de emissão nas áreas monitoradas.

Associado à possibilidade de monitoramento das emissões fugitivas de material particulado no curto prazo, o conhecimento adquirido sobre as emissões de fontes difusas pode ser aplicado em inventários de emissões atmosféricas. Isso permite que os fatores e modelos de emissão de material particulado sejam gradativamente aprimorados, proporcionando uma entrada de dados mais precisa para modelos de dispersão atmosférica. Essa abordagem pode se tornar uma alternativa aos fatores de emissão estimados pela USEPA.



Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). Estatístico Aquaviário. Disponível em: <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/indicadores.html#pt>. Acesso em: 15 de Jun. de 2023.

AMPLO ENGENHARIA E GESTÃO DE PROJETOS. Relatório Anual de Desempenho Ambiental do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, São Luís - MA, VALE, março de 2023.

AMPLO ENGENHARIA E GESTÃO DE PROJETOS. Revisão do Plano de Gestão Ambiental do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, São Luís - MA, VALE, maio de 2022.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. 2018. Brasília, DF, 2018.

ECOSOFT CONSULTORIA SOFTWARES AMBIENTAIS. Monitores ECOPX. Disponível em: <https://www.ecosoft.com.br/wp-content/uploads/2021/09/Folder-ECOPX-R2.pdf>. Acesso em: 27 de Jun. de 2023

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Guia Técnico para o

Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar, Brasília, DF, 2019.



Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar

Porto de Santos

André Luciano Malheiros
Bruno Melo Cruz
Débora Lia Perazzoli
Luis Antonio Nogueira Junior
Luiz Fernando Maciel Oliva
William Paulo R. dos Santos

Introdução

O monitoramento da qualidade do ar em áreas portuárias desempenha um papel essencial no gerenciamento dos impactos ambientais decorrentes da atividade. Dada a natureza logística intensa dos portos, é fundamental monitorar e controlar os potenciais impactos na qualidade do ar, visando a proteção da saúde pública e a preservação do meio ambiente.

O presente artigo, elaborado no âmbito do Fórum de Programas de Meio Físico no Licenciamento Ambiental Federal (LAF), tem como objetivo apresentar o programa de monitoramento da qualidade do ar, que integra os Planos Básicos Ambientais previstos na Licença de Operação nº 1382/2017, emitida

pelo Ibama, em favor da APS.

O Porto de Santos, o maior da América Latina, conta com mais de 40 terminais que operam diferentes tipos de cargas. A proximidade entre áreas residenciais e portuárias, aliadas à topografia complexa e às condições meteorológicas peculiares, torna a gestão da qualidade do ar um tema muito relevante nesta região.

O programa de monitoramento da qualidade do ar do Porto Organizado de Santos busca fornecer dados precisos e atualizados sobre as concentrações de poluentes atmosféricos na região portuária. Isso possibilita a análise da conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação ambiental vigente, sendo a Resolução Conama 491/2018 em nível federal e o Decreto Estadual nº 59.113/2013 em nível estadual.

Por meio do monitoramento contínuo, é possível identificar variações nas concentrações de poluentes atmosféricos, as quais estão relacionadas aos diferentes tipos de cargas mo-



vimentadas. Essa abordagem contribui para o direcionamento de ações fiscalizatórias assertivas e para a elaboração de estratégias de mitigação e controle da poluição, buscando a conformidade com as regulamentações ambientais. Esse monitoramento próximo às áreas portuárias desempenha um papel crucial na gestão ambiental responsável, permitindo uma tomada de decisão embasada em dados concretos e contribuindo para a sustentabilidade das atividades portuárias.

Em conformidade com o Edital nº 9/2023 Dilic, este programa está inserido na área temática "3.4.1. Monitoramento do ar (ruído, vibração, qualidade)", e atende aos seguintes critérios de elegibilidade, os quais serão detalhados na sequência deste artigo:

3.5.1. Metodologias inovadoras e/ou diversificadas;

3.5.2. Indicadores bem definidos;

3.5.6. Medidas adotadas a partir dos dados do monitoramento; e

5.5.2 Implementação de programas de inventário de emissão de gases de efeito estufa.

Metodologias inovadoras e/ou diversificadas

Quanto ao critério "Metodologias inovadoras e/ou diversificadas", este programa incluiu a

instalação e operação de uma rede automática de monitoramento da qualidade do ar e meteorologia. Esta rede abrange duas estações para medição de parâmetros gasosos (SO₂, NO₂ e COV) e vento (direção e velocidade), duas estações para medição de parâmetros particulados (PTS, MP₁₀, MP_{2,5}) e vento, além de uma estação exclusiva para medição da direção e velocidade do vento. A localização das estações da rede de monitoramento é apresentada na *Figura 1*, e mais detalhes são mostrados na *Figura 2*.

As estações foram instaladas dentro do Porto Organizado de Santos, próximas às atividades portuárias (fontes de emissão). A seleção dos locais se baseou no estudo prévio das macrozonas potencialmente poluidoras do Porto, que mapeou as atividades de acordo com o tipo de carga e o potencial de emissão. Portanto, as estações de gases foram instaladas nas regiões dedicadas ao movimento de granéis líquidos, enquanto as estações de particulados foram colocadas em áreas dedicadas a granéis sólidos. Além disso, foram atendidos os requisitos de infraestrutura, disponibilidade de energia elétrica, segurança e o fato de as áreas das estações serem de



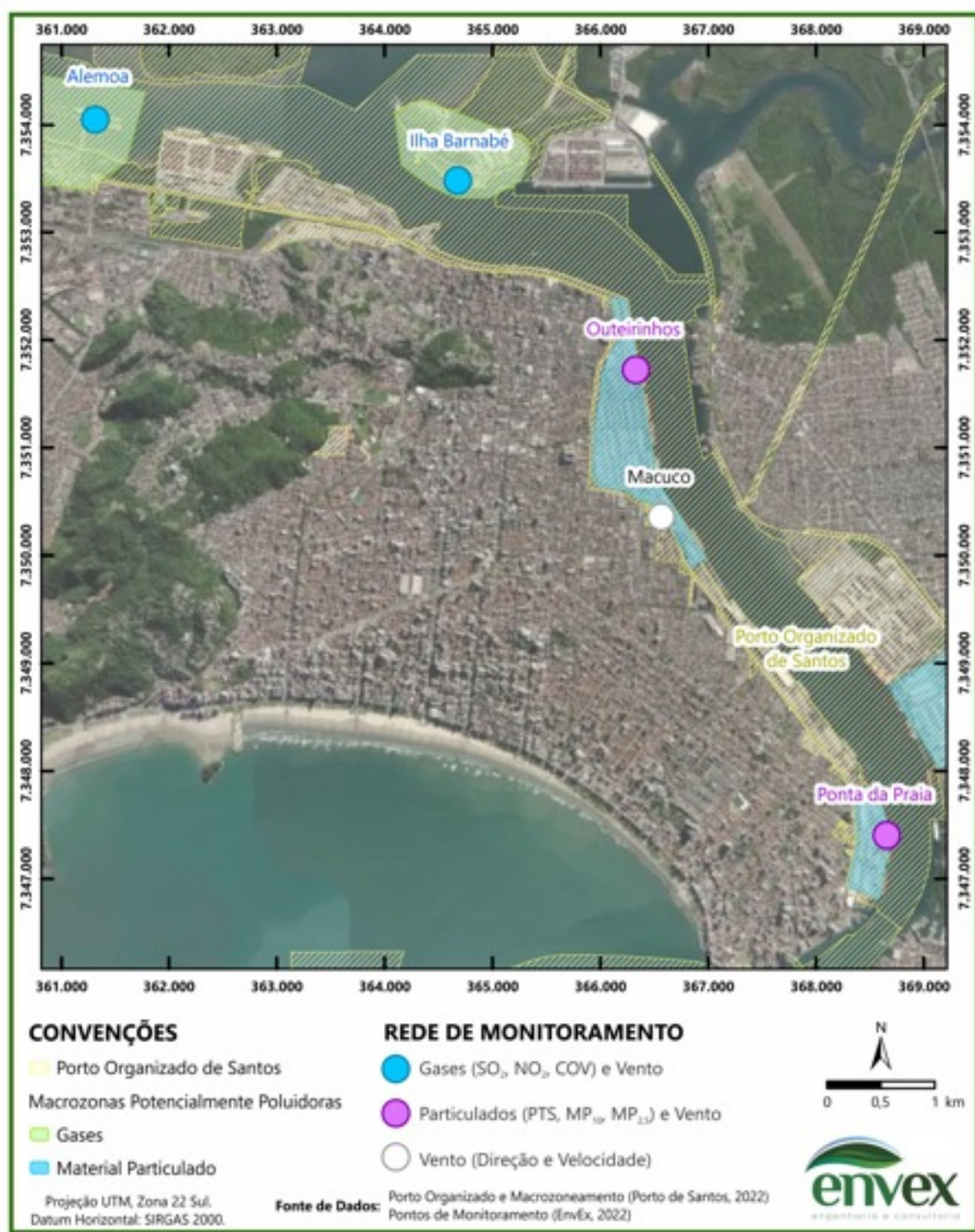


Figura 1– Mapa da rede de monitoramento da qualidade do ar do Porto Organizado de Santos. EnvEx Engenharia e Consultoria (2023).





Figura 2 – Estação Alemoa (gases), Ilha Barnabé (gases), Gate 8 Outeirinhos (particulados), Macuco (vento) e Ponta da Praia (particulados). EnvEx Engenharia e Consultoria (2023).



propriedade da APS.

As estações entraram em operação entre junho e agosto de 2022 e, desde então, as médias horárias das concentrações medidas ficam disponíveis para a equipe da Gerência de Meio Ambiente (GEMAM) da APS. Esses dados são utilizados para apoiar a fiscalização das operações portuárias, por meio de um centro supervisor e um sistema de gerenciamento de dados denominado NVX Air, onde estes dados são exibidos 24h/dia.

O NVX Air foi desenvolvido pela startup de tecnologia NVX Tech, integrante do grupo EnvEx, visando

do atender às especificidades da demanda de monitoramento do Porto de Santos. O software possui uma interface amigável que exibe em tempo real os dados monitorados pela rede, bem como o Índice de Qualidade do Ar (Figura 3). É possível acompanhar a evolução temporal de cada parâmetro em intervalos sub-horários, bem como realizar consultas de dados e exportação em planilhas. O sistema possui também a funcionalidade de alerta, que envia e-mail quando valores pré-estabelecidos são superados.

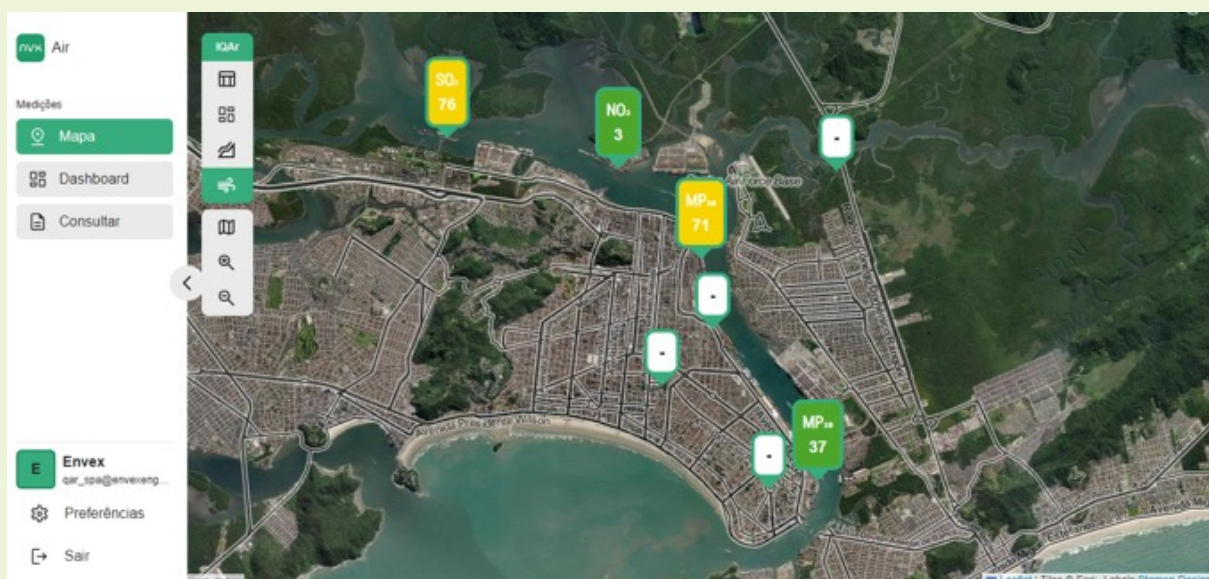


Figura 3- Exemplo de Interface do NVX Air. EnvEx Engenharia e Consultoria (2023).



Indicadores

Quanto ao critério “Indicadores bem definidos”, os indicadores são os padrões de qualidade do ar estipulados na Resolução CONAMA nº 491/2018 (Nível Federal) e pelo Decreto Estadual nº 59.113/2013 (Nível Estadual), para os parâmetros PTS, MP10, MP2,5, SO2 e NO2. A Figura 4 apresenta um gráfico obtido com os dados das estações de

particulados ao longo de 2022, para o parâmetro MP2,5, o qual ilustra estes padrões como linhas horizontais.

Outro exemplo de indicadores são as rosas dos ventos, exemplificadas na Figura 5, que auxiliam na visualização abrangente e clara dos padrões de vento nas diferentes áreas monitoradas, visto que o vento é uma das principais variáveis meteorológicas que influencia a dispersão dos poluentes atmosféricos.

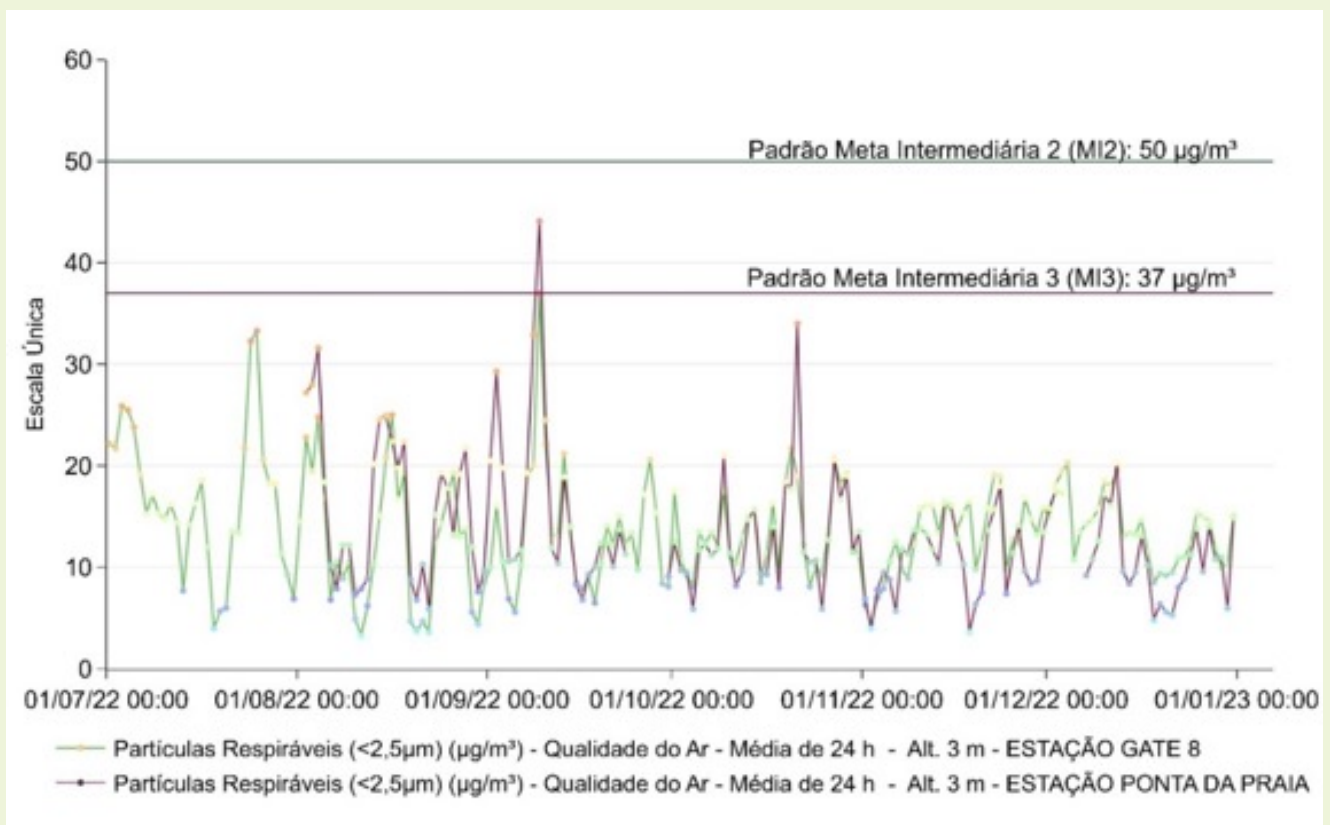


Figura 4 – Concentração de MP2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), médias de 24h, no ano de 2022. EnvEx Engenharia e Consultoria (2023).$



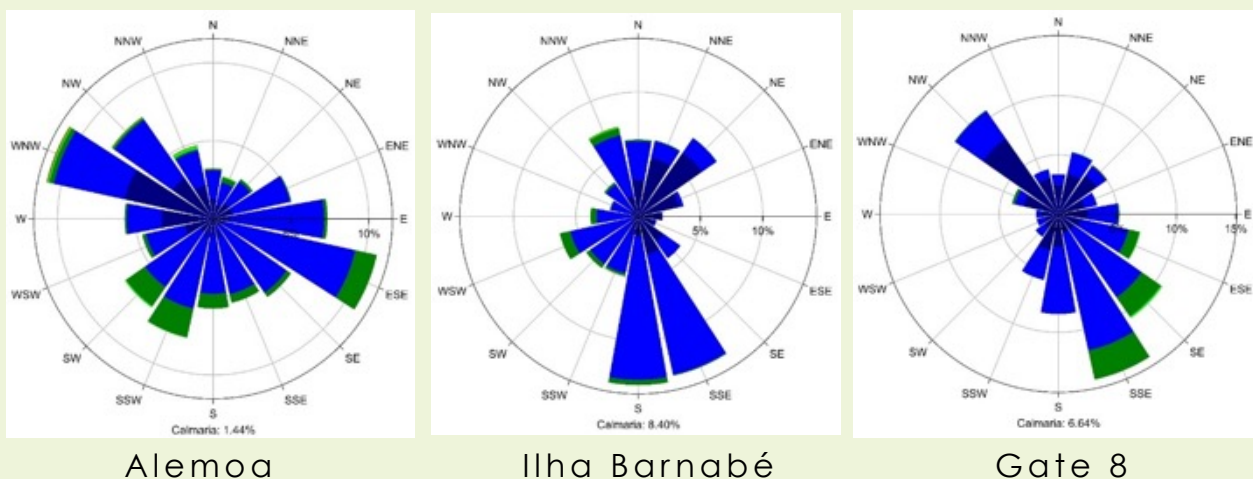


Figura 5 – Exemplo de rosa dos ventos elaboradas com dados do ano de 2022. EnvEx Engenharia e Consultoria (2023).

Medidas adotadas a partir dos dados do monitoramento

Quanto ao critério “Medidas adotadas a partir dos dados do monitoramento”, a Geman tem utilizado os dados para apoiar fiscalizações realizadas pela equipe de técnicos da APS em campo. São emitidos alertas pelo sistema NVX Air por e-mail para os endereços cadastrados, sempre que os valores de concentração previamente definidos no sistema são superados, tanto para médias horárias quanto para médias de 24h.

Dessa forma, a equipe é informada rapidamente, para que possa acionar seus recursos de fis-

calização. Isso inclui o sistema de monitoramento remoto (composto por centenas de câmeras espalhadas por todas as instalações portuárias) para identificar a fonte geradora de poluentes, possibilitando que os técnicos de campo se desloquem diretamente aos locais onde as concentrações altas foram registradas, e orientem os operadores portuários para que ajustem as atividades e minimizem as emissões.

Adicionalmente, os resultados do monitoramento são apresentados aos órgãos licenciadores dos terminais portuários, com vistas à avaliação da necessidade de ajustes operacionais ou tecnológicos para a atividade licenciada.



Implementação de programas de inventário de emissão de gases de efeito estufa

Este programa inclui também a elaboração do Inventário de Gases de Efeito Estufa (GEE) para a Autoridade Portuária de Santos, entregue em 2022, considerando os dados do ano base 2021. A metodologia adotada foi a do GHG Protocol, e incluiu o envio de questionários específicos para cada setor relevante dentro da APS. Esses questionários permitiram o levantamento de dados iniciais sobre atividades com potencial de emissão de GEE como consumo de combustíveis, tratamento de efluentes, transporte de colaboradores. Além disso, foram identificadas ações de mitigação de GEE já realizadas, como o plantio de mudas.

Em novembro de 2022, a equipe da EnvEx realizou uma visita a campo para o refinamento das informações. A *Figura 6* apresenta exemplos de fontes de emissão de GEE identificadas e quantificadas dentro do inventário.

Os resultados revelaram que as emissões totais de GEE para o ano-base 2021 foram 10.903 tCO₂e. Dentro de cada um dos escopos, os resultados desagregados por categorias são apresentados na *Figura 7*. Nas emis-

sões de Escopo 1, a atividade de dragagem representou 87% das emissões, seguida por 6% de embarcações e 4% da frota veicular terrestre.

Quanto às emissões do escopo 2 (consumo e geração de energia elétrica), 3% das emissões estavam relacionadas à atividade de tratamento de efluentes realizada na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de propriedade da APS, mas operada pela empresa CDN. A contribuição de emissões do escopo 2 foi pequena, visto que a maior parte de energia elétrica consumida é gerada em fonte renovável (Usina Hidroelétrica de Itatinga). Quanto ao Escopo 3, 3,59% das emissões calculadas foram devido ao deslocamento de funcionários e o restante foi devido à destinação de resíduos sólidos.

Cabe destacar que o documento completo do Inventário de Emissões de GEE da APS ano-base 2021 está disponível no site da companhia.

Os resultados estão sendo utilizados como base para elaboração de um Plano de Redução de Emissões Atmosféricas (PREA), com foco na definição de estratégias para a redução das emissões de GEE pela Autoridade Portuária. Algumas estratégias em



avaliação incluem o incentivo ao uso de etanol na frota de veículos leves a serviço da Autoridade Portuária, o incentivo aos funcionários para o uso de modais alternativos de transporte, além

de redução de taxas para empresas arrendatárias, situadas no Porto Organizado, que realizem e disponibilizem os dados de seus próprios inventários de emissão de GEE.



Consumo de combustível



Tratamento de efluentes



Emissões fugitivas



Sistema de combate a incêndios



Dragagem



Transportes de colaboradores

Figura 6 – Exemplos de fontes de GEE identificadas na visita técnica.
Fonte: EnvEx Engenharia e Consultoria (2023).



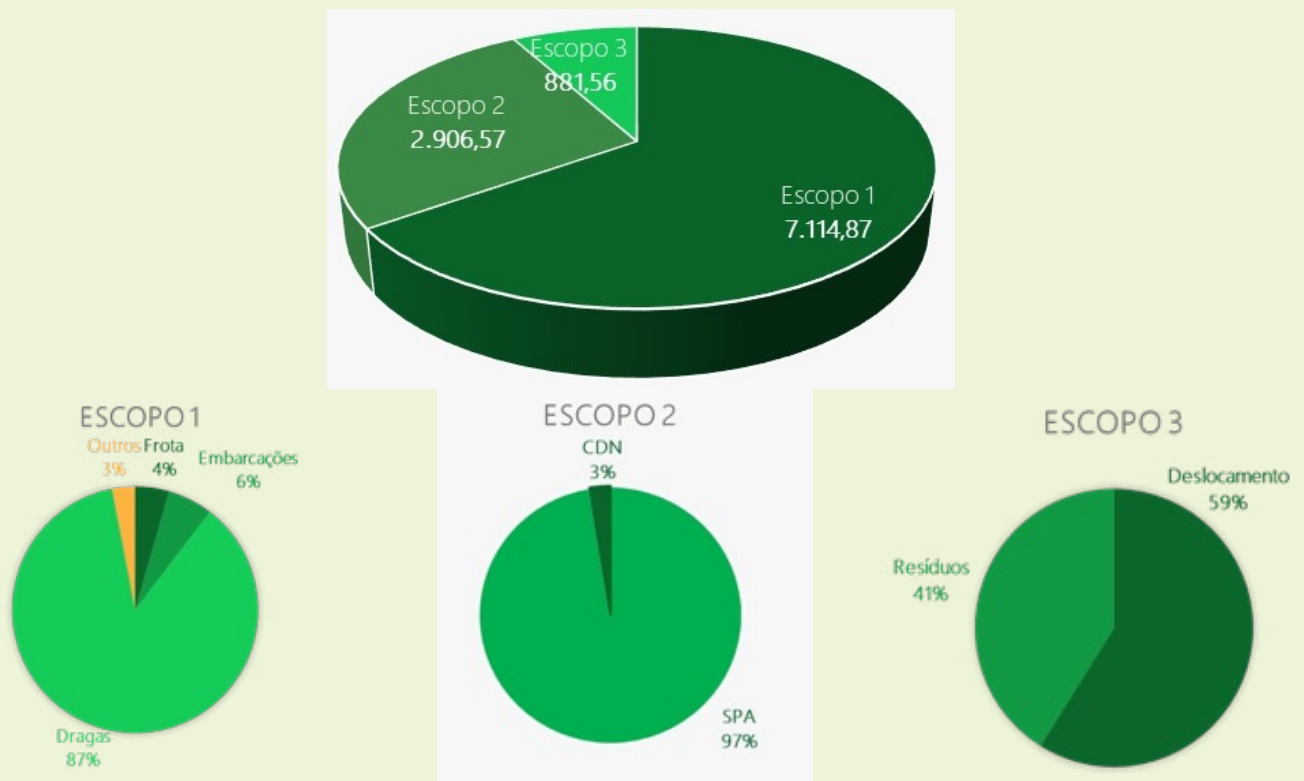


Figura 7 – Participação de cada escopo no total de emissões de GEE (ano-base 2021). EnvEx Engenharia e Consultoria (2023).

Considerações Finais

Este artigo demonstrou como o Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar da APS utiliza metodologias inovadoras e indicadores bem definidos para apoiar a implementação de medidas práticas de gestão na operação portuária. O objetivo é manter a qualidade do ar em níveis aceitáveis e reduzir a poluição atmosférica. O trabalho também destacou a relevância de estudos, como o inventário

de GEE, que permitiu identificar as fontes de emissão de GEE sob responsabilidade da APS, quantificá-las e na sequência, estudar medidas para reduzi-las.

O monitoramento ambiental, especificamente da qualidade do ar e meteorologia, representa uma ferramenta de melhoria contínua não apenas para o meio ambiente, mas também para a operação de empreendimentos e para a sociedade como um todo.

Por fim, destaca-se que a participação no Fórum de Pro-



gramas de Meio Físico do LAF é de suma importância para promover a transparência e a comunicação efetiva entre a Autoridade Portuária de Santos, o Ibama e outros órgãos e entidades envolvidos. Por meio desse fórum, é possível compartilhar informações, discutir melhores práticas e alinhar estratégias de gestão ambiental. Além disso, o evento contribui para a troca de conhecimentos e experiências, fortalecendo a cooperação entre os diversos atores envolvidos e promovendo a melhoria contínua das práticas ambientais nos empreendimentos do LAF.

www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html. Acesso em 01/06/23.

Referências

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018. Estabelece critérios e procedimentos para a elaboração, implementação e execução do inventário de resíduos sólidos. Diário Oficial da União, Brasília.

SÃO PAULO. Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo. Decreto Estadual nº 59.113, de 23 de abril de 2013. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://>



Programa de Monitoramento Limnológico

Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (Porto Primavera)

Leandro Fernandes Celestino
André Ricardo Brasilino Rocha
Gilmar Baugartner
Carlos Henrique Orsi
Alcione Refatti

Introdução

A água é um componente indispensável para a manutenção dos seres vivos no planeta. Entretanto, é necessário que os recursos hídricos apresentem condições químicas, físicas e geológicas adequadas para a sua utilização.

Os corpos d'água respondem à precipitação, ao intemperismo das rochas, às cargas de águas pluviais da agricultura e aos despejos industriais e municipais (Yabe & Gimenez, 2002). Assim, as características bióticas e abióticas dos corpos de água são um reflexo da atividade desenvolvida em sua bacia de drenagem e, considerando o conceito de rio comum contínuo (Vannote et al., 1980), a ocorrência e abundância das espécies dependem das caracte-

terísticas ambientais dos regimes lóticos.

Os represamentos dos rios provocam alterações na composição de nutrientes, principalmente nas formas de fósforo e nitrogênio, uma vez que a constituição florística das algas também se altera. Isso resulta no aumento do consumo e produção de nutrientes, assim como na demanda por oxigênio dissolvido (Esteves, 2011). Essa situação gera um processo de eutrofização, levando ao aumento da produtividade biológica e à redução do volume de água armazenado, a partir da adição excessiva de materiais orgânicos e inorgânicos dissolvidos e particulados em reservatórios (Wetzel, 2001).

Em ambientes represados, a eutrofização das águas tende a aumentar em razão da elevação da temperatura da água e da resistência térmica à circulação. Como resultado, as comunidades aquáticas se reorganizam alterando, constantemente, sua distribuição espacial e temporal. Assim,



espera-se maior frequência de florescimentos de cianobactérias (Paerl & Huisman, 2008).

O Reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Porto Primavera opera a fio d'água, drenando uma bacia de 572.480km². Sua área de operação na cota 259m acima do nível do mar, abrange 2.250km², com um perímetro de 1.385km. O volume do reservatório é de 20.000m³, e a vazão média de 6.981m³. A operação ocorre entre as cotas 257,0 e 259,7m, com nível de água normal previsto para a cota 259,0m. O tempo médio de residência da água é de 33,9 dias (CESP, 2006).

Objetivo

O programa tem como objetivos acompanhar espaço-temporalmente a qualidade da água e do sedimento na área de influência da UHE Porto Primavera, assegurando o cumprimento dos padrões estabelecidos pelas resoluções ambientais vigentes. Especificamente, foram analisados parâmetros físicos, químicos, biológicos (fitoplâncton e coliformes) e sedimentológicos. O programa visa verificar e acompanhar possíveis alterações na qualidade da água; possibilitar adoção

de medidas de controle e/ou corretivas, se necessário; e subsidiar os modelos matemáticos dos índices de qualidade da água (IQA), qualidade em reservatórios (IQAR) e índice de estado trófico (IET).

Metodologia

O Programa de Monitoramento Limnológico (PML) da UHE Porto Primavera foi reformulado em conformidade com as sugestões apresentadas pelo Ibama, especificamente pelo Parecer Técnico nº12/2019-COHID/CGTEF/DILIC. Nessa reformulação, o Programa avançou em três principais frentes:

1. Definição de indicadores claros e robustos;
2. Resultados analisados de forma integrada no espaço e tempo, além de interface com os outros programas, como os de macrófitas aquáticas e Ictiofauna; e
3. Inovação na metodologia, ao incluir pontos nos afluentes dos reservatórios e realizar a análise integrada dos dados.

As coletas de limnologia são trimestrais, e estão associadas às coletas de ictiofauna para possibilitar a



comparação dos atributos das comunidades, como riqueza, diversidade, abundância e equitabilidade. As coletas de macrófitas, também são realizadas simultaneamente às coletas de limnologia e ictiofauna. (Figura 1).

As amostragens do programa, em novo formato, tiveram início em 2020 e contemplam 10 pontos amostrais em diferentes ambientes, incluindo lótico, lântico e de transição (Figura 2). Além disso, um dos grandes

avanços do PML é a inserção de pontos de monitoramento nos quatro principais afluentes do reservatório da UHE Porto Primavera: os rios Verde e Pardo (Mato Grosso do Sul), Aguapeí e do Peixe (São Paulo). Além de amostragens estratificadas em superfície, meio e fundo, o programa também busca, por meio de amostragens, avaliar as fases do ciclo hidrológico (enchente, cheia, vazante e seca).



Figura 1 - Interação entres os programas de macrófitas, ictiofauna, limnologia e flora.



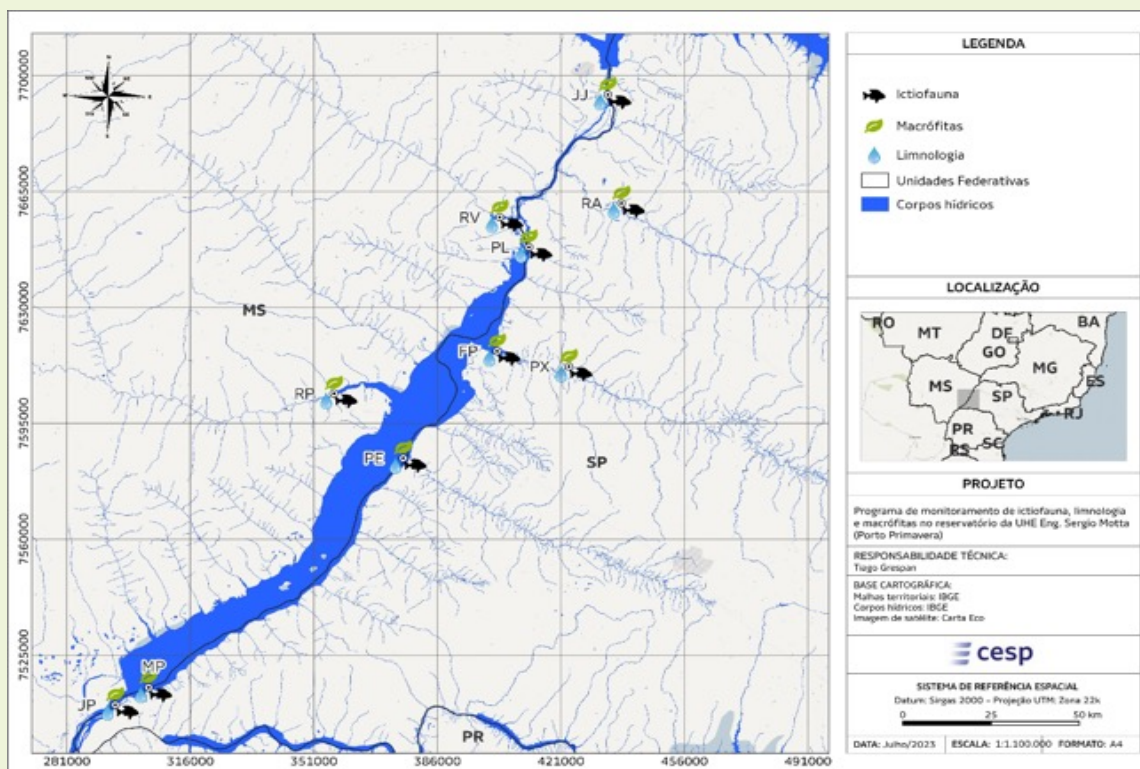


Figura 2 - Mapa da área de estudo com destaque para os dez pontos de coleta limnológica, macrófitas e ictiofauna na área de influência da UHE Eng. Sergio Motta (Porto Primavera). JJ= Jusante de Jupia, PL = Paulicéia, FP = Foz Rio do Peixe, PE = Presidente Epitácio, MP = Montante de Primavera, JP = Jusante de Primavera, RV = Rio Verde, RP = Rio Pardo, RA = Rio Aguapeí e PX= Rio do Peixe.

Em todos os locais, são amostrados 66 parâmetros, abrangendo aspectos químicos, físicos e biológicos, incluindo análise de metais pesados e agrotóxicos. A avaliação desses parâmetros é de suma importância para entender como o uso e ocupação do solo podem influenciar na qualidade da água e interferir na vida aquática, principalmente na ictiofauna.

A amostras foram retiradas na subsuperfície em todos os ambientes e, também, nas camadas mais inferiores nos pon-

tos de reservatório, com auxílio da garrafa de Van Dorn. Posteriormente, foram armazenadas em caixas térmicas com gelo e encaminhadas aos laboratórios para análises.

Outro avanço foi a realização das análises por laboratórios acreditados, em parceria com instituições públicas de pesquisa, como laboratório do INEO/GERPEL/UNIOESTE na cidade de Toledo (PR), (ISO 17025; CRL nº1356). Neste laboratório, foram conduzidas as demais análises físicas e químicas, elaborados os relatórios de ensaios



e os relatórios consolidados.

Os resultados das análises de água foram comparados aos limites preconizados pela Resolução Conama nº 357/2005 para corpos de água classe 2.

Resultados

Durante as 10 amostragens, foram realizadas 12.342 análises, das quais apenas 136 apresentaram valores com desvios da resolução regulamentadora (1,10%). Entre os parâmetros analisados, a temperatura da água exerce influência nos organismos aquáticos e nos demais parâmetros avaliados. Nos peixes, atua diretamente no metabolismo (respiração, circulação, digestão, reprodução, órgãos sensoriais, produção de hormônios e de anticorpos) e na disponibilidade de oxigênio na água. Portanto, desempenha um papel muito importante no equilíbrio do sistema aquático (Esteves, 2011).

A temperatura média da água (*Figura 3*), apresentou valores mais baixos no ano de 2020. Contudo, as maiores va-

riações foram observadas no ano de 2022, quando foi registrada a menor temperatura da água (15,1°C) no tributário rio Aguapeí (RA) em agosto e a maior no local Presidente Epitácio (PE) em fevereiro (31,1°C). Vale à pena destacar que a resolução Conama nº 357/2005 não atribui valores de referência para esta variável.

Dentre os gases dissolvidos na água, o oxigênio é um dos mais importantes na dinâmica dos ecossistemas aquáticos (Esteves, 2011), sendo necessário para a respiração de organismos aeróbicos. A sobrevivência dos peixes, por exemplo, requer concentrações mínimas de oxigênio dissolvido entre 10% e 60% de saturação, dependendo da espécie e outras características do sistema aquático (Fiorucci & Filho, 2005). Durante o monitoramento da UHE Porto Primavera, os valores de oxigênio dissolvido (*Figura 3*) encontraram-se dentro do preconizado pela resolução (>5,00 mg/L), com exceções observadas nos locais Montante e Primavera (MP) fundo e RA (agosto e novembro de 2020, respec-



respectivamente), PE meio e fundo (fevereiro e agosto de 2021), Paulicéia (PL) fundo e Foz do rio do Peixe (FP) meio e

fundo (novembro de 2021) e FP meio, PE fundo e rio do Peixe (PX) (fevereiro de 2022).

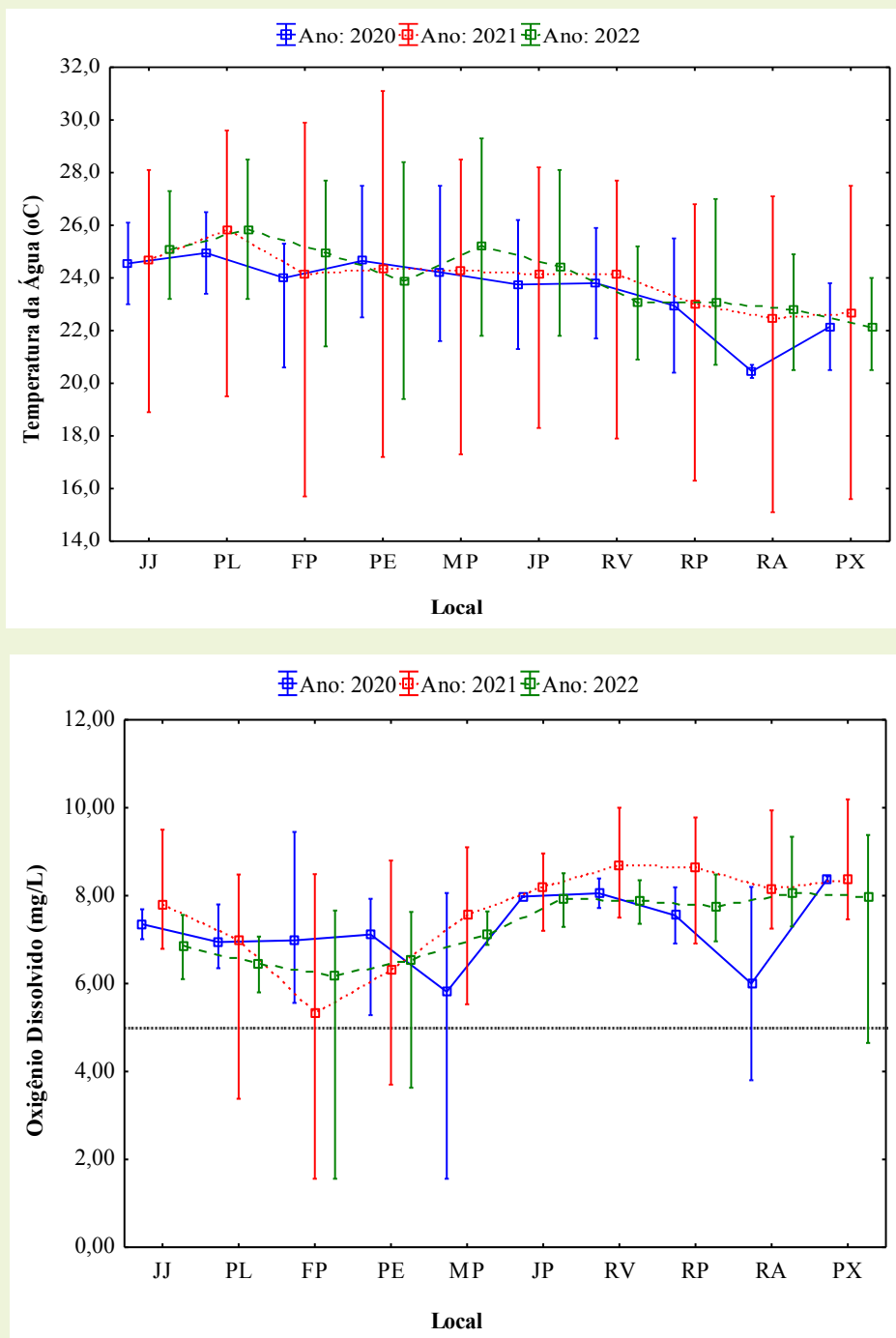


Figura 3 - Valores médios (quadrados), máximos e mínimos dos parâmetros: A- Temperatura da Água (°C); B- Oxigênio Dissolvido (mg/L), entre os anos de 2020 e 2022 nos locais da área de influência da UHE Eng. Sergio Motta (Porto Primavera). Linha pontilhada indica o limite estabelecido pela resolução CONAMA 357/2005 para corpos de água classe 2.



Outros parâmetros importantes no monitoramento são o fósforo total e a clorofila-a, que são indicativos da quantidade de nutrientes no corpo hídrico. Esses parâmetros são utilizados para o cálculo de alguns índices de qualidade e grau de trofia do ambiente.

O fósforo é um elemento essencial para o funcionamento e crescimento das plantas aquáticas, uma vez que é componente de ácidos nucleicos e adenosina trifosfato (Esteves, 2011). O fluxo de fósforo nas águas continentais depende de processos geoquímicos nas bacias hidrográficas, sendo que os fosfatos dissolvidos são derivados do processo de lixiviação de minerais (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008).

Durante o monitoramento, foram observados valores que não atenderam a resolução (<0,05 mg/L em ambientes lênticos e de transição e 0,10 mg/L para ambientes lóticos) em 42 ocasiões, com seis amostras no mês de novembro de 2022 que não atingiram o limite de quantificação do método. Notou-se, também, valores que ultrapassaram o limite da resolução, principalmente nos tributários e nos meses de maior pluviosida-

de.

As concentrações de clorofila-a apresentaram valores que não atingiram o limite de quantificação do método analítico (LQM = 0,56 µg/L) em 37,2% das amostras analisadas. A maior concentração (35,24 µg/L) foi registrada no local PX meio no mês de maio de 2022, sendo a única amostra que não atendeu a resolução Conama 357/2005, que preconiza valores de até 30,00 µg/L para corpos de classe 2.

Entre a comunidade fitoplanctônica, foi observada floração de cianobactérias apenas no rio Aguapeí em novembro de 2021. Nos demais locais e meses, não foram registradas altas concentrações que pudessem gerar consequências negativas ao meio ambiente.

Para o Índice de Qualidade da água (IQA), o ambiente ficou enquadrado, em média, como água de ótima qualidade nos anos de 2020 e 2022, e boa qualidade no ano de 2021, para os pontos na calha do rio Paraná e reservatório. Para os tributários, durante o período de monitoramento a classificação se enquadrou em boa qualidade em média,



atendendo à classificação para o uso múltiplo da água.

Em relação à qualidade da água do reservatório, o Índice da Qualidade da Água em Reservatórios (IQAR) classificou o corpo hídrico como pouco degradado (classe II), confirmando os resultados obtidos (Figura 4). Os valores de IQA em 2021 foram mais baixos do que os anos de 2020 e 2022. Este fato está associado à crise hídrica enfrentada na bacia do rio Paraná, que ocasionou o aumento do tempo de residência da água no reservatório (Figura 4).

Em relação ao IET, o ambien-

te em média foi classificado como mesotrófico, com valores que variaram entre ultra-oligotrófico (Jusante de Jupia – JJ – em fevereiro de 2021 e rio Verde – RV – e MP em agosto e novembro de 2022, respectivamente) e hipereutrófico (PX em novembro de 2020, maio e novembro de 2021 e maio de 2022; FP em maio e novembro de 2021; e MP em novembro de 2022). Contudo, o grau de trofia observado nos ambientes não impactou o uso múltiplo da água na área de influência da UHE Porto Primavera (Figura 5).

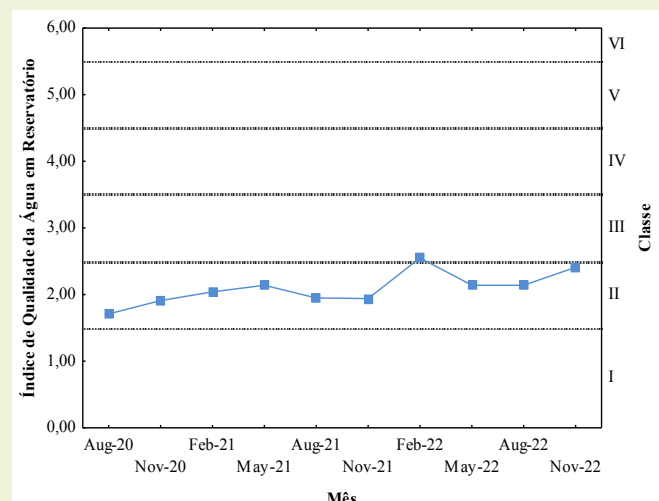
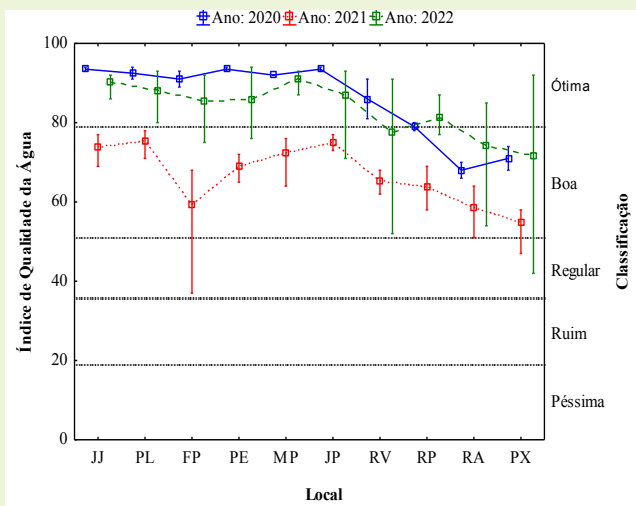


Figura 4 - Valores médios (quadrados), máximos e mínimos dos índices: A- Índice de Qualidade da Água (IQA); B- Índice de Qualidade da Água em Reservatório (IQAR), entre os anos de 2020 e 2022 nos locais da área de influência da UHE Eng. Sergio Motta (Porto Primavera). Linha pontilhada indica as classes para cada índice.



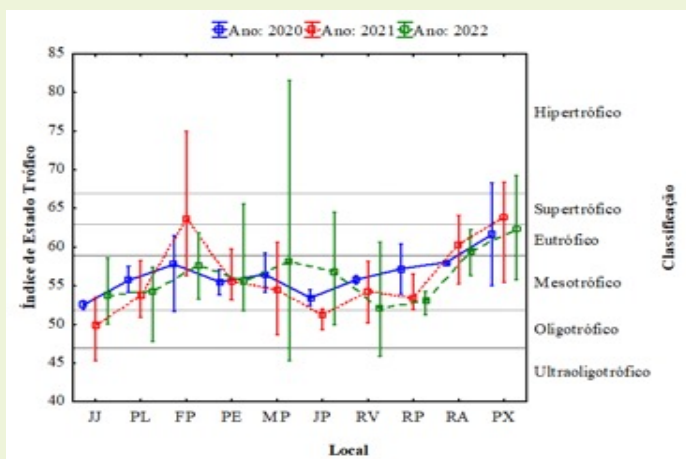


Figura 5 - Valores médios (quadrados), máximos e mínimos dos índices: A- Índice de Qualidade da Água (IQA); B- Índice de Qualidade da Água em Reservatório (IQAR), entre os anos de 2020 e 2022 nos locais da área de influência da UHE Eng. Sergio Motta (Porto Primavera). Linha pontilhada indica as classes para cada índice.

Para os sedimentos, de maneira geral, a composição é, em média, de 48,0% de areia média e 26,3% de silte, seguido de argila (16,1%) e areia fina (6,1%). Areia grossa e cascalho correspondem a 3,5% do total. Essa característica era esperada, pois essa região apresenta terrenos predominantemente constituídos de solo Latossólico Vermelho Escuro com fase arenosa, de natureza hidrométrica (Travassos, 2009).

Os valores de carbono orgânico total apresentaram desvios pontuais em relação à resolução Conama 454/2012 para os locais PL, FP, MP, JP, RA e PX no mês de agosto de 2021, e FP em fevereiro de 2022, ficando acima dos 10,0% indicados. Os

valores de fósforo e nitrogênio totais, atenderam a resolução (<2.000 mg/kg e <4.800 mg/kg, respectivamente). Quanto ao pH, os valores oscilaram entre 3,79 em RV no mês de agosto de 2020 e 7,81 em RP em maio de 2022. Normalmente, os solos brasileiros apresentam valores entre 4,00 e 7,50 (Cotta, 2003). Para esse parâmetro, a resolução CONAMA nº 454/2012 não preconiza valores limites.

As análises de escalonamento multidimensional não métrico, realizadas sobre os dados da qualidade da água e da biomassa das macrófitas aquáticas, juntamente com a análise de variância permutacional (Permanova), indicaram que não houve diferenças significativas entre os meses e anos amostrados. Contudo, entre as zonas, foram observadas diferenças ($p = 0,001$), mostrando que a zona lântica se diferencia das zonas lóti-cas ao apresentar espécies de vegetação mais comumente observadas nesse ambiente. Algumas dessas espécies incluem as invasoras *Hydrilla verticillata* e *Urochloa arrecta*, além das nativas *Typha domingensis* e *Eichhornia azurea*.



Essas diferenças se mostraram correlacionadas, principalmente, às variáveis de transparência, IQA, pH, oxigênio, nitrogênio Kjeldahl, sólidos e fósforo total.

Enquanto isso, as zonas lóti- cas e de transição apresentaram maiores correlações com variáveis como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), temperatura da água, nitrito, nitrogênio amoniacal e coliformes fecais, além das espécies *Salvinia auriculata*, *S. biloba*, *E. crassipes*, *Pistia stratiotes* e *Ceratophyllum demersum*, por exemplo (Figura 6).

Para a ictiofauna, a maior abundância numérica e o maior

número de espécies identificadas foram encontrados em zona lântica. A maior abundância numérica foi observada para as espécies sedentárias, tanto aquelas sem cuidado parental quanto aquelas com cuidado parental, representando cerca de 96% (1035) dos indivíduos, o que é característico desses ambientes. Das 58 espécies identificadas em zona lântica, apenas cinco foram classificadas como migradoras de longa distância. Por outro lado, em zona lótica as espécies migradoras de longa distância foram representadas por sete espécies (Tabela 4).

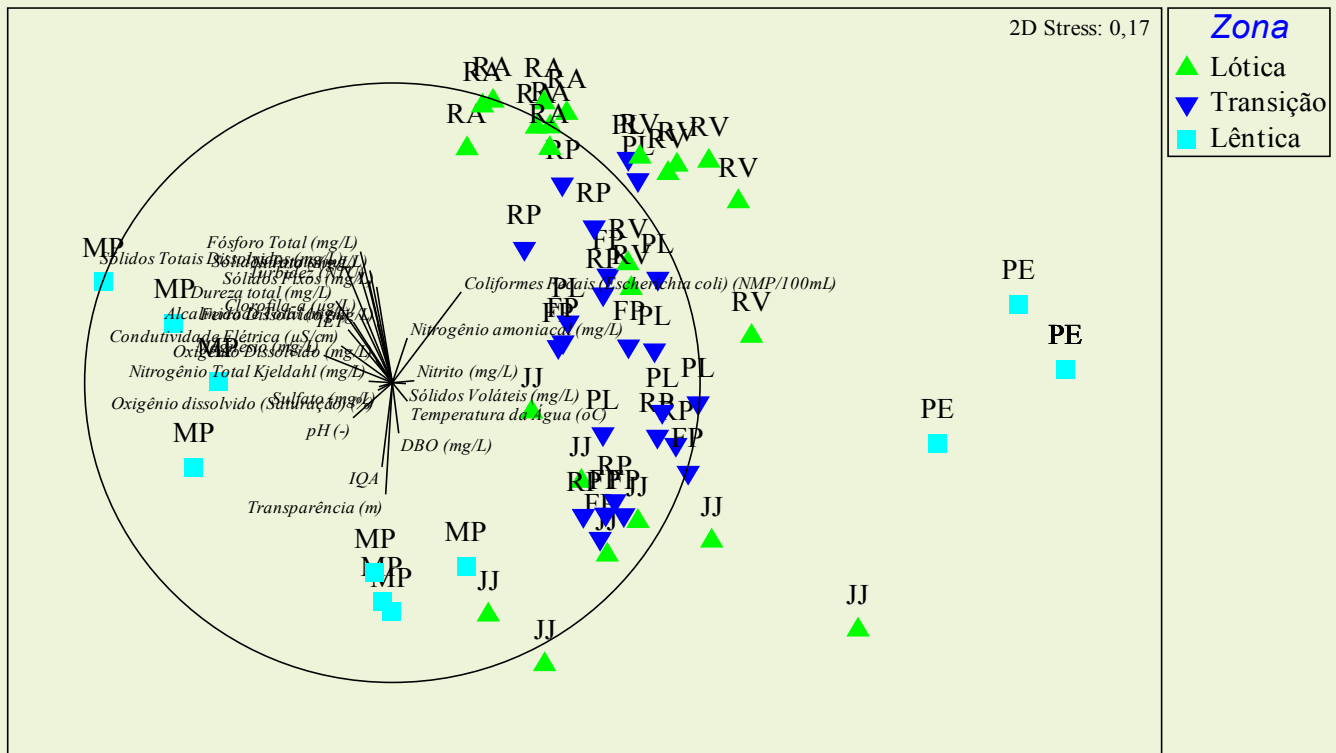


Figura 6 - Análise de escalonamento multidimensional não métrica (NMDS) sobre os dados de qualidade da água e biomassa das macrófitas aquáticas, na área de influência da UHE Porto Primavera, no ano de 2022.



Espécies	Estratégia	Lêntico	Lótico	Transição	Total Geral
<i>Schizodon borellii</i>	SSC	164	27	17	208
<i>Crenicichla semifasciata</i>	SCC	116	32	1	149
<i>Parauchenipterus galeatus</i>	SFIE	27	81	40	148
<i>Hoplias mbigua</i>	SCC	44	86	17	147
<i>Schizodon nasutus</i>	SSC	63	81	3	147
<i>Geophagus sveni</i>	SCC	100	21	12	133
<i>Hypostomus ternetzi</i>	SCC	78	31		109
<i>Serrasalmus maculatus</i>	SCC	27	54	11	92
<i>Leporinus friderici</i>	SSC	32	51	6	89
<i>Acestrorhynchus lacustris</i>	SSC	45	23	16	84
<i>Leporinus tigrinus</i>	SSC	37	44	1	82
<i>Plagioscion squamosissimus</i>	SSC	52	4	26	82
<i>Hypostomus cochliodon</i>	SCC	30	38	10	78
<i>Serrasalmus marginatus</i>	SCC	15	40		55
<i>Hypostomus iheringii</i>	SCC	26	24		50
<i>Auchenipterus osteomystax</i>	SFIE	1		44	45
<i>Cichla piquiti</i>	SCC	30	10	5	45
<i>Hemiodus orthonops</i>	SSC	13	3	19	35
<i>Hypostomus albopunctatus</i>	SCC	15	18	1	34
<i>Metynnis lippincottianus</i>	SSC	21	9	3	33
<i>Triportheus nematurus</i>	SSC	5	17	2	24
<i>Trachydoras paraguayensis</i>	SSC	3	1	19	23
<i>Satanoperca sp.</i>	SCC	12	8	1	21
<i>Coptodon rendalli</i>	SCC	1	19		20
<i>Rhaphiodon vulpinus</i>	MIG		12	7	19
<i>Loricariichthys platymetopon</i>	SCC	9		7	16
<i>Pimelodus misteriosus</i>	SSC	4	7	5	16
<i>Prochilodus lineatus</i>	MIG	10	4		14
<i>Odontostilbe avanhandava</i>	SSC		2	9	11
<i>Rhamdia quelen</i>	SSC	9	1		10
<i>Leporellus vittatus</i>	SSC	7	2		9
<i>Astronotus crassipinnis</i>	SCC		8		8
<i>Hoplias intermedius</i>	SCC	5	2	1	8
<i>Megaleporinus obtusidens</i>	MIG	7	1		8
<i>Iheringichthys labrosus</i>	SSC	1		6	7
<i>Leporinus striatus</i>	SSC	7			7
<i>Cichla kelberi</i>	SCC	3	1	2	6
<i>Hypostomus strigaticeps</i>	SCC	5		1	6
<i>Leporinus lacustris</i>	SSC	2	4		6
<i>Roeboides descavadensis</i>	SSC	6			6
<i>Sternopygus macrurus</i>	SCC	6			6



Espécies	Estratégia	Lêntico	Lótico	Transição	Total Geral
<i>Schizodon sp.</i>	SSC	5			5
<i>Sorubim lima</i>	MIG		4	1	5
<i>Astyanax lacustris</i>	SSC	1	2	1	4
<i>Cichla spp.</i>	SCC	3	1		4
<i>Hypostomus hermanni</i>	SCC	4			4
<i>Hypostomus regani</i>	SCC	3	1		4
<i>Megalancistrus parananus</i>	SCC	2	2		4
<i>Pamphorichthys hollandi</i>	SCC			4	4
<i>Pimelodus microstoma</i>	SSC	1	1	2	4
<i>Rhinelepis aspera</i>	MIG	2	2		4
<i>Salminus brasiliensis</i>	MIG		4		4
<i>Leporinus octofasciatus</i>	SSC	3			3
<i>Loricaria sp.</i>	SCC	2		1	3
<i>Pterygoplichthys ambrosettii</i>	SCC	1		2	3
<i>Schizodon altoparanae</i>	SSC	3			3
<i>Apistogramma commbrae</i>	SCC	2			2
<i>Crenicichla britskii</i>	SCC	2			2
<i>Galeocharax gulo</i>	SSC	1	1		2
<i>Laetacara araguaiaie</i>	SCC		2		2
<i>Moenkhausia aff. intermedia</i>	SSC		2		2
<i>Pterodoras granulosus</i>	MIG			2	2
<i>Aphyocharax anisitsi</i>	SSC	1			1
<i>Brycon orbignyanus</i>	MIG	1			1
<i>Catathyridium jenynsii</i>	SSC		1		1
<i>Crenicichla jaguarensis</i>	SCC		1		1
<i>Crenicichla jupiaensis</i>	SCC		1		1
<i>Eigenmannia virescens</i>	SSC			1	1
<i>Hemisorubim platyrhynchos</i>	MIG			1	1
<i>Hyphessobrycon eques</i>	SSC			1	1
<i>Megaleporinus piavussu</i>	MIG		1		1
<i>Megaleporinus sp.</i>		1			1
<i>Melanorivulus sp.</i>				1	1
<i>Myloplus tiete</i>	SSC		1		1
<i>Oxydoras eigenmanni</i>	SCC			1	1
<i>Pimelodella gracilis</i>	SSC	1			1
<i>Pimelodus ornatus</i>	MIG			1	1
<i>Platydoras armatulus</i>	SSC		1		1
<i>Pseudopimelodus mangurus</i>	SSC		1		1
<i>Pyrrhulina australis</i>	SSC			1	1
<i>Salminus hilarii</i>	MIG	1			1
Total geral		1078	795	312	2185



Conclusão

De maneira geral, a qualidade da água na área de influência do reservatório da UHE Porto Primavera foi considerada boa, permitindo o uso múltiplo, como abastecimento público, pesca e balneabilidade. Tais resultados são importantes para comprovar e acompanhar a eficiência das ações de mitigação dos efeitos antrópicos sobre os corpos aquáticos. Esse resultado indica que os ambientes estudados apresentam condições favoráveis para a manutenção da vida aquática, em especial para os peixes.

Por fim, destaca-se que a metodologia, os indicadores, a malha amostral e a análise integrada espaço-temporalmente implementados no PML da UHE Porto Primavera, fornecem subsídios robustos para entender o comportamento limnológico do reservatório e podem motivar outros empreendedores a adotarem ações sinérgicas semelhantes visando a conservação dos recursos hídricos e serviços ecossistêmicos associados.

Referências

COTTA, J. A. de O. Diagnóstico ambiental do solo e sedimento do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR). 2003. 120 f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ESTEVES, F.A. 2011. Fundamentos de Limnologia – 3ª edição. Editora Interciência. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 862 p.

FIORUCCI, A. R., & BENEDETTI FILHO, E. 2005. A importância do oxigênio dissolvido em ecossistemas aquáticos. Química nova na escola, nº22, 10-16.

PAERL, H. W. & HUISMAN, J. 2008. Blooms like it hot. Science, 320(5872), 57-58.

TRAVASSOS, L. E. P., & KOHLER, H. C. 2009. Historical and Geomorphological Characterization of a Brazilian Karst Region. Acta Carsologica, nº38 (2-3).

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. 2008. Limnologia. Oficina de textos. São Paulo. 631 p.

VANNOTE, R.L.; MINSHALL,



G.W.; CUMMINS, K.W.; SEDELL, J.R.; CUSHING, C.E. 1980. The river commun concept. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, v. 37. p. 130-137.

WETZEL, R. G. 2001. Limnology: lake and river ecosystems. gulf professional publishing.

YABE, M. J. S., & GIMENEZ, S. M. N. 2002. Caracterização físico-química da água da bacia do rio Tibagi. A bacia do rio Tibagi. Londrina, UEL, 355-371.



Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico

Usina Hidrelétrica Jirau

Introdução

O Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico (PMH), iniciado em 2009, tem como objetivo principal realizar o monitoramento ambiental e humano em todas as fases do reservatório da UHE Jirau. Isso envolve a determinação das concentrações de inúmeros parâmetros relacionados à qualidade da água e suas interfaces, bem como de alguns poluentes organometálicos, como o mercúrio. O programa avalia o risco da exposição humana a esse elemento e os potenciais efeitos adversos para as comunidades ribeirinhas do rio Madeira.

Ao longo dos últimos 14 anos, com a prática de 4 campanhas anuais de acordo com o ciclo hidrológico da região, foram coletadas mais de 10 mil amostras de diversas matrizes, tais como água superficial, sedimento de fundo, material particulado, solo, fito e zooplâncton, macrófitas, peixes, além

de cabelo humano e taxa de metilação. O número total de resultados analíticos gerados neste período ultrapassa os 150 mil. Dessa maneira, o objeto de estudo não se resume à água, propriamente dita, mas também aos seus entornos e tudo aquilo para o qual ela é vital.

As novas diretrizes do Plano de Segurança da Água da Organização Mundial da Saúde (OMS) deixam de lado o aspecto reducionista, centrando-se unicamente no corpo aquático, e ampliam seus entornos para toda a bacia hidrográfica ao analisar o ciclo da produção de água de forma holística. O Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico (PMH) praticado na UHE Jirau adota essa mesma abordagem ampliada, utilizando um método investigativo inovador, de grande interface com outros programas em curso. Há sempre a preocupação de compartilhar, com a comunidade em geral, incluindo



aquela sob a área de influência deste empreendimento, o diagnóstico ambiental atualizado. Isso inibe a desinformação, cujos danos são incalculáveis.

Ao gerar uma quantidade de dados desta grandeza, o PMH consolida a construção de um banco de dados robusto sobre a concentração de inúmeros parâmetros físico-químicos no ambiente aquático e suas interfaces. Isso inclui a concentração de mercúrio e de metilmercúrio em diversas matrizes ambientais e em seres humanos, por meio da análise deste metal no cabelo de voluntários que residem na área de influência do empreendimento. Criou-se, assim, um patrimônio de valor inestimável para a sociedade brasileira.

Cabe ressaltar que, além do elevadíssimo número de dados que compõem este banco, destaca-se a sua fidedignidade quanto à exatidão dos números ali expressos, uma vez que todas as determinações foram realizadas em um laboratório acreditado pelo INMETRO na ISO 17025. Essa acreditação permite a rastreabilidade de todos os dados analíticos gerados, bem como da cadeia de

custódia das amostras coletadas, o que garante a qualidade analítica envolvida nesta etapa do programa.

Ao mesmo tempo que segue os preceitos definidos no Plano de Gestão Ambiental (PGA) de cada uma das fases do empreendimento, os quais se tornam indicadores claros e definidos para o norteamento das metas a serem atingidas, o PMH busca, com o auxílio de estatística robusta, detectar padrões sazonais que possam servir como indicadores de qualidade e alertas de alterações ambientais no rio Madeira. Apenas com o auxílio desta ferramenta, a qual tem sido aplicada desde a primeira campanha de monitoramento, tornou-se possível identificar tendências reais num cenário tão complexo de alta variância sazonal e espaço-temporal dos parâmetros monitorados.

Nesta perspectiva, são apresentados alguns resultados obtidos no Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico, considerando alguns atores envolvidos na dinâmica do mercúrio na região, sendo eles: água superficial, solo, peixes e cabelo humano.



Materiais e métodos

Área de Estudo

O desenho amostral do Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico nas áreas de influência direta e indireta da Usina Hidrelétrica (UHE) Jirau, na bacia do rio Madeira, está apresentado de forma detalhada na *Figura 1*. Atualmente, a malha amostral é composta por 20 pontos, distribuídos desde o Madeira-Beni, estendendo-se por cerca de 160 km a montante do barramento.

Figura 1 – Mapa do desenho amostral do Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico na área de influência, direta e indireta, da UHE Jirau, no rio Madeira e seus tributários.

Determinação das Concentrações de Mercúrio

O Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico adota uma abordagem interdisciplinar e multi-institucional, buscando integrar o conhecimento do sistema ambiental e suas inter-relações com a saúde humana.

Em relação à componente ambiental, o Programa foi desenvolvido considerando as três fases do empreendimento (rio, enchimento e operacional), contemplando, até o momento, 55 campanhas. Dessas, 12 ocorreram na fase rio (setembro de 2009 a julho de 2012), 7 na fase de enchimento (outubro de 2012 a maio de 2014) e 36 na fase operacional (julho de 2014 a abril de 2023). A determinação das concentrações de mercúrio é realizada nas seguintes matrizes: água superficial (HgT, HgReativo e Hg Org.), material particulado suspenso (HgT), sedimento de fundo (HgT e MetilHg), fitoplâncton (HgT e MetilHg), zooplâncton (HgT e MetilHg), invertebrados (HgT e MetilHg), peixes (HgT e MetilHg), macrófitas (HgT e MetilHg) e solo (HgT). Além disso, são realizadas determinações da taxa de metilação nas matrizes água e sedimento.

No que se refere à componente humana, as determinações das concentrações de mercúrio total na matriz humana também contemplaram as três fases do empreendimento, com 7 campanhas na fase rio (de abril de 2010 a julho



de 2012), 5 campanhas na fase de enchimento (de outubro de 2012 a maio de 2014) e 15 campanhas na fase operacional (de outubro de 2014 a abril de 2022).

A Tabela 1 apresenta as técnicas utilizadas para as análises de mercúrio total nas matrizes água superficial, solo, peixes e cabelo humano.

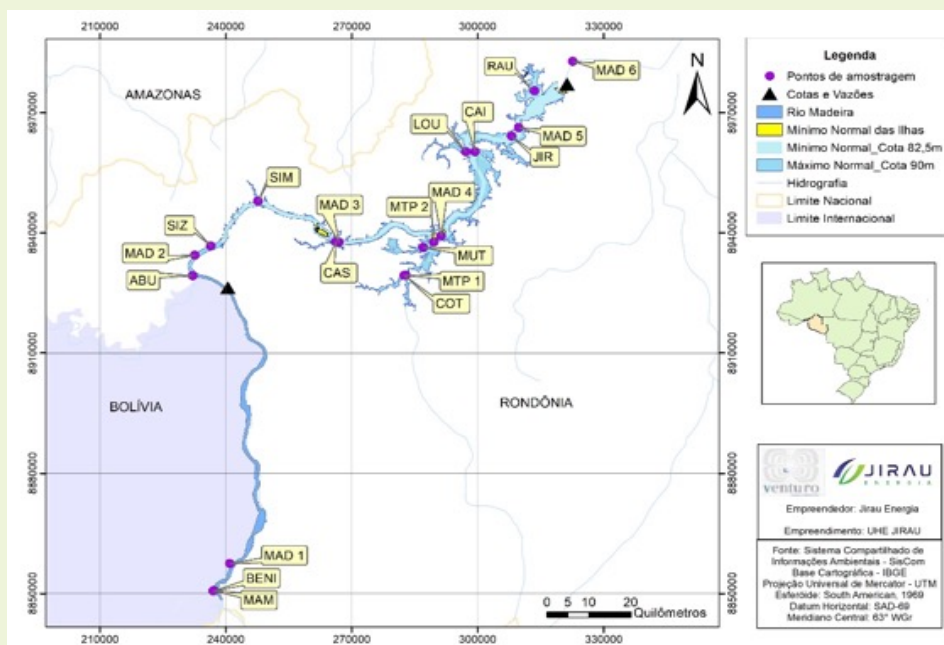


Figura 1 – Mapa do desenho amostral do Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico na área de influência, direta e indireta, da UHE Jirau, no rio Madeira e seus tributários.

Compartimento	Técnica	Limite de quantificação
Água superficial	Espectrofotometria de fluorescência acoplada a sistema de geração de vapor frio e pré-concentração em coluna de ouro (CVAAF)	0,001 – 0,01 ng mL ⁻¹
Solo	Espectroscopia de absorção atômica acoplada a um sistema de geração de vapor frio (CVAAS)	0,01 – 1 ng g ⁻¹
Peixe	Espectroscopia de absorção atômica acoplada a um sistema de geração de vapor frio (CVAAS)	0,01 – 1 ng g ⁻¹
Cabelo	Espectrofotometria de fluorescência acoplada a um sistema de geração de vapor frio e pré-concentração em coluna de ouro (CVA-AF)	0,001 – 0,01 ng g ⁻¹

Tabela 1 - Técnicas analíticas e limites de quantificação aplicados às determinações de mercúrio total (HgT) para os compartimentos ambientais como água superficial, solo, peixes e cabelo humano, referentes ao plano de monitoramento ambiental de mercúrio no âmbito do Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico da UHE Jirau.



Resultados

Componente Ambiental

1. Água superficial

Na fase rio do empreendimento (seca de 2009 à vazante de 2012) as concentrações de mercúrio total (HgT) nas amostras de água superficial coletadas na calha do rio Madeira apresentaram mediana 10,15 e média $11,95 + 11,07$ ng L-1. Nos tributários, a mediana foi 11,03 e a média $12,53 + 15,15$ ng L-1.

Durante a fase de enchimento do reservatório (seca 2012 à cheia de 2014) as concentrações de HgT nas amostras de água superficial coletadas na calha do rio Madeira apresentaram mediana 31,74 e valor médio $32,16 + 8,57$ ng L-1, nos tributários a mediana foi 26,77 e o valor médio $27,61 + 11,87$ ng L-1.

Na fase operacional do empreendimento, (vazante de 2014 à enchente de 2023) as concentrações de HgT nas amostras de água coletadas na calha do rio Madeira apresentaram mediana 24,80 e valor médio $24,80 \pm 8,17$ ng L-1, nos tributários a mediana foi 25,38 e o valor médio foi

$26,61 \pm 11,31$ ng L-1.

A Resolução CONAMA nº 430/2011, dispõe sobre as classificações dos corpos de água e as diretrizes ambientais para seu enquadramento. Preconiza, para sistema de águas doces Classe II, o padrão máximo de HgT de 200 ng L-1. A Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde, que estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano, e seu padrão de potabilidade recomenda o valor máximo permitido de HgT de 1.000 ng L-1. Portanto, todas as amostras analisadas estão abaixo do valor determinado pela legislação brasileira para os corpos de água e consumo humano.

2. Solo

A *Figura 2* apresenta a distribuição das concentrações de HgT nos perfis de 5 a 100 cm de profundidade das amostras de solo coletados nas áreas dos pulsos de inundação do rio Madeira, no período de enchente e vazante de 2010 a 2022. São evidenciados os maiores valores nas



camadas superiores, indicando aporte mais recente de mercúrio, seja por via atmosférica ou por via hídrica. Isso se deve, possivelmente, ao período de intensa atividade de garimpo de ouro na bacia do rio Madeira (ROCHA et al., 2003).

Os solos possuem elevada capacidade de reter e armazenar elementos-traço, devido à complexação destes com a matéria orgânica presente. Solos argilosos geralmente apresentam maior capacidade de complexação com elementos-traço, podendo acumulá-los por muitos anos (ROCHA et al., 2000, 2003). A Resolução CONAMA nº 420/2009, que dispõe sobre os valores orientadores para solos, define como valor de prevenção a concentração de mercúrio de $500 \mu\text{g kg}^{-1}$, acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo e da água subterrânea. Dessa forma, as amostras de solo coletadas nas áreas dos pulsos de inundação do rio Madeira e tributários, nos períodos de enchente e vazante de 2010 a 2022, estão abaixo do valor de prevenção indicado pela referida Resolução.

Figura 2 – Concentrações de

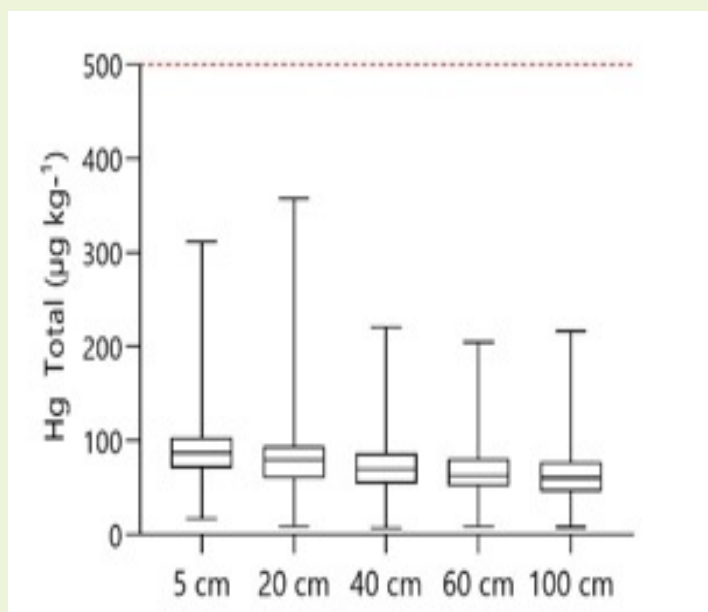


Figura 2 - Concentrações de mercúrio total nas amostras de solo coletadas nas áreas dos pulsos de inundação do rio Madeira, nas fases do empreendimento (rio, enchimento e operativa), período de enchente e vazante e enchente de 2010 a 2022, nos perfis de 5 a 100 cm.

mercúrio total nas amostras de solo coletadas nas áreas dos pulsos de inundação do rio Madeira, nas fases do empreendimento (rio, enchimento e operativa), período de enchente e vazante e enchente de 2010 a 2022, nos perfis de 5 a 100 cm.

3.1.3. Peixes

Os organismos aquáticos apresentam elevada capacidade de absorver os compostos mercuriais, quer sejam de origem orgânica ou inorgânica. Os peixes absorvem o mercúrio com facilidade e o acumulam em seus tecidos, principalmente na forma de metilmercúrio (MetilHg), mes-



mo quando expostos a espécies iônicas de mercúrio, indicando a ocorrência de metilação nestes organismos (BISINOTI et al., 2004).

As concentrações de HgT nas amostras de músculo de peixe, em todas as fases do empreendimento, evidenciam a tendência de maiores concentrações nas espécies carnívoras quando comparadas às espécies não carnívoras. As Figuras 3 e 4 apresentam as concentrações de HgT em amostras de espécies não carnívoras e carnívoras, respectivamente, distribuídas por períodos hidrológicos.

Componente Humano

As comunidades-alvo do presente programa de monitoramento são aquelas situadas na área de influência direta ou indireta do empreendimento hidrelétrico, (Nova Mutum Paraná, Fortaleza do Abunã, Abunã, UHE Jirau, dragas, garimpos em terra firme e comunidades ribeirinhas), nas suas fases rio, enchimento e operacional, sendo acompanhadas desde os remanejamentos para outras áreas.

No total, o tamanho amostral humano é composto por

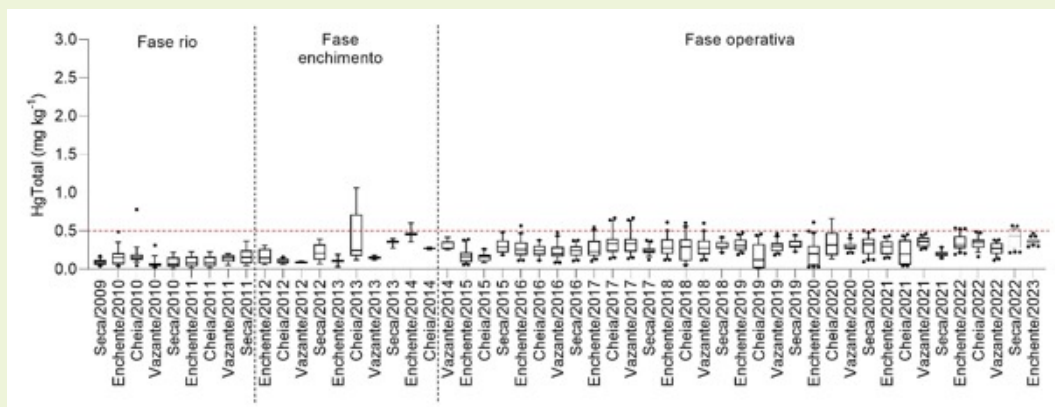


Figura 3 – Concentrações de mercúrio total nas amostras de peixes não carnívoros, coletados no rio Madeira e seus tributários, por período hidrológico (seca de 2009 a enchente de 2023).

1.374 participantes na fase rio, com idade variando entre 1 e 100 anos (média: $34,50 \pm 16,27$), 743 participantes da fase enchimento, com idade variando entre 1 e 87 anos (média: $35,09 \pm 15,38$), e 2.767

pessoas na fase operativa, com idade variando entre 5 e 93 anos (média: $39,53 \pm 15,22$).

Amostras de cabelo para determinar a concentração de Hg total e metilmercúrio em pessoas têm sido amplamente utilizadas em diversos



estudos visando à avaliação de exposição crônica a baixas concentrações deste metal, por via alimentar, no meio ambiente natural. Essas amostras apresentam diversas vantagens metodológicas, como, por exemplo, o fato de se poder estabelecer um histórico da exposição humana ao longo do tempo. Além disso, são coletadas por meio de método não-invasivo, e, portanto, mais aceito pelos participantes, diferentemente de outros fluidos biológicos como, por exemplo, o sangue (PASSOS & MERGLER, 2008).

Essa vantagem metodológica é particularmente interessante em tipos de estudo de avaliação de exposição onde se necessita o voluntariado por parte da população. Os agentes de campo responsáveis pela

coleta das amostras de cabelo não encontraram resistência nas comunidades tradicionais do rio Madeira quanto à participação no programa de monitoramento, inclusive em termos da doação desse tipo de amostra.

As concentrações de Hg variaram entre 0,31 e 50,16 $\mu\text{g g}^{-1}$ (média: $3,79 \pm 3,91 \mu\text{g g}^{-1}$) na fase rio. Na fase enchimento, tais concentrações variaram entre 0,12 e 18,54 $\mu\text{g g}^{-1}$ (média: $3,23 \pm 1,79 \mu\text{g g}^{-1}$), e na fase operativa as concentrações variaram entre 0,21 e 70,73 $\mu\text{g g}^{-1}$ (média: $2,93 \pm 2,83 \mu\text{g g}^{-1}$) (Tabela 2).

É importante ressaltar, que o Programa de Monitoramento Humano (PMH) da UHE Jirau possui uma vertente muito inovadora e cidadã no tocante à extensão junto à comunidade, colaborando significativamente com a Secretaria

	n	Mediana	Média \pm DP	Mínimo	Máximo
TOTAL	4.356	2,53	$3,27 \pm 3,13$	0,12	70,73
Fase rio	1.254	2,69	$3,79 \pm 3,91$	0,31	50,16
Fase enchimento	740	2,85	$3,23 \pm 1,79$	0,12	18,54
Fase operativa	2.821	2,26	$2,93 \pm 2,83$	0,21	70,73

n = tamanho amostral; DP = Desvio Padrão

Tabela 2 – Concentrações medianas, médias (\pm desvios padrões), mínimos e máximos de Hg total ($\mu\text{g g}^{-1}$) em amostras de cabelo das populações abordadas nas fases rio, enchimento e operativa.



ria da Saúde ao esclarecer, à população leiga, aspectos relacionados à toxicidade do mercúrio e do metilmercúrio, principalmente quanto às vias de exposição a esses elementos por meio da alimentação.

Ao produzir cartilhas utilizando uma linguagem acessível sobre o mercúrio, sua toxicidade, as principais rotas de exposição e a análise quantitativa do metal no cabelo de voluntários, o PMH coloca à disposição da população uma equipe de profissionais capacitados, incluindo médicos e psicólogos. Esses profissionais executam a abordagem de saúde humana, fornecendo à sociedade informações fidedignas por meio deste programa.

A inclusão deste programa é comprovada pela quantidade de indivíduos que se voluntariaram a doar amostras de cabelo para a quantificação de mercúrio, conforme apresentado na Tabela 2.

Outro ponto digno de destaque quanto aos aspectos inovadores deste PMH é a sua interação com outros programas existentes no empreendimento. Desde as primeiras campanhas, o PMH recebeu forte apoio tan-

to do Programa de Educação Ambiental quanto do Programa de Comunicação Social, num trabalho conjunto de divulgação por meio de palestras nos centros comunitários e escolas, assim como na divulgação de material escrito e suporte nas ações desenvolvidas junto aos centros de saúde das comunidades ribeirinhas.

A forte interação entre o PMH e o Programa de Hidrossedimentologia também merece destaque devido à parceria profícua estabelecida ao longo de todo o período de monitoramento. Além disso, foi desenvolvido um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento considerando aspectos ambientais do Hg, metalômica e ictiofauna, e metalômica e leite materno, o qual teve como resultado 9 doutoramentos e 6 mestrados.

Conclusões

Os valores das concentrações de mercúrio total, mercúrio orgânico e mercúrio reativo em amostras de água superficial estão em conformidade com a literatura para esta matriz na região Amazônica. O valor da concentração de mercúrio total observado está



abaixo dos níveis preconizados tanto pela resolução CONAMA 430/2011 e quanto pela Portaria MS 888/2021, não evidenciando contaminação pontual deste metal na bacia.

As amostras de solo coletadas nas áreas dos pulsos de inundação do rio Madeira e tributários apresentaram valores de mercúrio total abaixo do valor de prevenção, preconizado pela Resolução CONAMA nº 420/2009.

As concentrações de mercúrio total encontrados em amostras de peixe analisadas, em geral, estão abaixo do valor preconizado pelo Regulamento Técnico do Mercosul, RDC nº 42, de 29 de agosto de 2013. Além disso, os valores observados são concordantes com os resultados da literatura científica para a região Amazônica.

Os estudos de saúde humana apresentaram níveis de mercúrio, nos voluntários, compatíveis aos relatados pela literatura para a população tradicional da região Amazônica. Com base na estratificação em diferentes faixas de exposição e considerando os limites de exposição publicados pela Organização Mundial de Saúde em

2003, aproximadamente 88,7% dos voluntários na fase rio, 99,3% na fase enchimento e 99,3% na fase operativa, apresentaram concentrações de HgT abaixo de 14 µg g-1 de Hg no cabelo, ou seja, não apresentam níveis de exposição indicadores de possíveis riscos de neurotoxicidade mercurial.

Adicionalmente, as avaliações clínicas médicas e neurológicas, associadas à interpretação da bateria de testes neuropsicológicos, não evidenciaram possíveis danos neurotóxicos do mercúrio nos voluntários.

Cabe ressaltar que o Programa de Monitoramento Hidrobiogeoquímico da UHE Jirau trouxe uma série de benefícios sociais não apenas para as comunidades que vivem sob a área de influência do empreendimento, mas também para as populações que habitam na região amazônica, sejam elas ribeirinhas ou não. Certamente, ao trabalhar com propostas mais integradas dentro da paisagem monitorada, é possível construir um banco de dados de incalculável valor social e científico para o Brasil, em especial quanto aos aspectos biogeoquímicos sazonais do rio Madeira e seus afluentes.

O banco de dados sobre a concentração de mercúrio em



cabelo humano de populações ribeirinhas da bacia do rio Madeira é, sem dúvida, o maior e possui um valor inestimável no campo da saúde pública.

Referências

BISINOTI, M. C.; JARDIM, W. F.; Production of organica mercury from Hg0: Experiments using microcosms, Braz. Chem. Soc. 2004, 14, 242.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, RESOLUÇÃO CONAMA n° 430, de março de 2011. Brasília, 2011.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, RESOLUÇÃO CONAMA n° 420, de março de 2009. Brasília, 2009.

BRASIL. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde Coordenação-Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. Portaria MS n.º 888, de maio de 2021, 2011.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução RDC n° 42, de 29 de agosto de 2013, 2013.

PASSOS, CJS., MERGLER, D.

(2008). Human Mercury Exposure and Health Effects in the Amazon: a review. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 24 sup 4: S503-S520.

ROCHA, J.C.; SARGENTINI JÚNIOR, É.; ZARA, L.F.; ROSA, A.H.; SANTOS, A.; BURBA, P. Reduction of mercury(II) by tropical river humic substances (Rio Negro) - A possible process of

PASSOS, CJS., MERGLER, D. (2008). Human Mercury Exposure and Health Effects in the Amazon: a review. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 24 sup 4: S503-S520.

ROCHA, J.C.; SARGENTINI JÚNIOR, É.; ZARA, L.F.; ROSA, A.H.; SANTOS, A.; BURBA, P. Reduction of mercury(II) by tropical river humic substances (Rio Negro) - A possible process of the mercury cycle in Brazil, Talanta 2000, 53, 551.

ROCHA, J.C.; SARGENTINI JÚNIOR, É.; ZARA, L.F.; ROSA, A.H.; SANTOS, A.; BURBA, P. Reduction of mercury(II) by tropical river humic substances (Rio Negro) - Part II. Influence of structural features (molecular size, aromaticity, phenolic groups, organically bound sulfur), Talanta 2003, 61, 699.



Plano de Gestão Espeleológico

Complexo Minerador S11D

Admir Fernando Resende
Lenadro Caldeira Luzzi
Iuri Viana Brandi
Rafael Simões V. de Moura
Leonardo A. S. V. de Moura

Introdução

O Brasil possui atualmente 23.378 cavidades naturais subterrâneas catalogadas nos órgãos ambientais, das quais 3.060 pertencem à classe de rochas ferruginosas. As cavidades ferruginosas estão frequentemente presentes nas áreas circunvizinhas às operações de extração de minério de ferro.

O Plano de Gestão Espeleológica da Vale consiste em uma série de ações adotadas pela empresa em seus empreendimentos, visando garantir a preservação das cavidades naturais subterrâneas. Essas ações estão em conformidade com as diretrizes e orientações da legislação vigente, bem como as recomendações dos órgãos ambientais.

O Plano de Gestão Espeleológica contempla o monitora-

mento de diversos parâmetros, incluindo o meio físico e o biológico. Os temas abordados são:

1. Monitoramento Sismográfico;
2. Monitoramento Geoestrutural;
3. Monitoramento Fotográfico;
4. Monitoramento de Processos Erosivos;
5. Monitoramento de Fauna e Flora.

Foi desenvolvida a Plataforma de Controle Espeleológico para integrar todos os temas de monitoramento e gerenciar as campanhas ambientais. Essa plataforma é baseada nos registros obtidos nos monitoramentos, constituindo-se como uma ferramenta de suporte ao Plano de Gestão Espeleológica.

Dada a importância do monitoramento sismográfico para a integridade física das cavidades, a Plataforma de Controle Espeleológico possui um simulador sismográfico. Esse recurso permite calcular antecipadamente, em função



do plano de fogo planejado, os níveis das vibrações potencialmente causadas pelas detonações. Esse cálculo prévio permite, quando necessário, reajustar as variáveis do plano de fogo, para garantir que os níveis de vibração permaneçam dentro do recomendado pelos Órgãos ambientais ou sejam compatíveis com a fragilidade de determinada cavidade, garantindo, assim, sua integridade física.

Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é otimizar os mecanismos de monitoramento sismográfico das cavidades naturais subterrâneas localizadas no entorno das áreas operacionais da VALE, com foco na conciliação entre as atividades de extração e a preservação integral do patrimônio espeleológico e ambiental.

Metodologia

A extração do minério de ferro em lavra a céu aberto ocorre em larga escala, envolvendo a execução de desmontes de rocha com o uso de

explosivos. Posteriormente, o material é retirado com o auxílio de escavadeiras e transportado para o processo de beneficiamento. O plano de fogo determina a quantidade de explosivos necessária, bem como a configuração de todo o processo de detonação da malha planejada.

Durante a execução do desmonte de rocha com uso de explosivos, são gerados alguns efeitos provenientes da detonação. Cerca de 40% da energia liberada é dissipada em forma de vibração no solo, a qual, dependendo de sua intensidade, pode afetar estruturas próximas.

A Norma Brasileira que regula os efeitos causados pelo uso de explosivos na mineração, estabelecendo seus limites e parâmetros, é a ABNT NBR 9653(2018). Esta norma estabelece um limite de vibração de pico de partícula em função da faixa de frequência sísmica em que os eventos ocorrem, geralmente iniciando em 15 mm/s até 20 mm/s para litologias ferríferas (faixa de frequência 4Hz a 15Hz).

O CECAV (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas), órgão vinculado ao Instituto Chico Mendes

de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), publicou em 2016 o documento “Sismografia aplicada ao Patrimônio Espeleológico - Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais”. Utilizando o princípio da precaução e na ausência de um diagnóstico geotécnico da cavidade, o CECAV estabeleceu um limite de vibração pico de partícula correspondente a 1/3 do limite mínimo previsto na ABNT 9653/2018 para cavidade de máxima relevância, ou seja, 5 mm/s. Esse limite aplica-se a fontes emissoras caracterizadas pelas atividades de desmonte de rochas com uso de explosivos.

Para estabelecer um modelo projcional de atenuação das vibrações e garantir o controle dos níveis gerados durante as detonações, é necessário medir as ondas sísmicas. Na Vale, o monitoramento sismográfico é realizado por meio de sismógrafos de engenharia.

Os dados coletados no monitoramento retroalimentam o modelo projcional de atenuação e auxiliam na elaboração do plano de fogo, permitindo o acompanhamento dos níveis de vibração previstos e verificando se estão dentro dos limites

adotados ou estabelecidos por estudos específicos nas cavidades. Em geral, o monitoramento sismográfico serve como um indicador operacional, para garantir que os níveis de vibração não causem impactos nas cavidades.

A Plataforma de Controle Espeleológico integra todas as informações de monitoramento sismográfico da Mina S11D e do Corredor Norte da Vale, em um sistema que utiliza os registros sismográficos para alimentar um simulador. Isso permite o controle preditivo dos efeitos das detonações e o respectivo cumprimento do PBA (Plano Básico Ambiental).

Os dados utilizados para gerar e calibrar os modelos matemáticos, são alimentados continuamente e oriundos do próprio monitoramento sismográfico, realizado por meio de estações automatizadas em campo.

Além de calibrar as constantes locais de 10 modelos matemáticos prognósticos validados pela comunidade científica e comumente adotados, foi proposto um novo modelo matemático, gerado através dos registros do monitoramento sismográfico e ajus-



tado com machine learning e métodos de otimização, a título de comparação e garantia de

confiabilidade, conforme ilustra a Figura 1.

Método	Equação	CME [Kg]	D [m]	RPearson [%]	RSpearman [%]	R² [%]	VP [mm/s]
USBM	$VP = k \left[\frac{D}{\sqrt{CME}} \right]^{-\alpha}$	30	728.97	59,53%	51,56%	35,44%	0,346
Amraseys-Hendron	$VP = k \left[\frac{D}{\sqrt{CME^{1/2}}} \right]^{-\alpha}$	30	728.97	70,65%	69,64%	49,92%	1,855
Langefors-Kihlstrom	$VP = k \left[\frac{CME}{D^2} \right]^{\beta}$	30	728.97	2,59%	23,41%	5,57%	0,401
Bureau of Indian Standard	$VP = k \left[\frac{CME}{D^2} \right]^{\beta}$	30	728.97	2,03%	23,41%	8,43%	0,01
CMRI	$VP = n + k \left[\frac{D}{\sqrt{CME}} \right]^{-1}$	30	728.97	65,12%	64,81%	42,41%	0,375
General Predictor	$VP = k \cdot CME^{-\beta} \cdot D^{\alpha}$	30	728.97	72,73%	72,14%	52,90%	1,031
Ghosh-Daemen 1	$VP = k \left[\frac{D}{\sqrt{CME}} \right]^{-\beta} \cdot e^{-\alpha D}$	30	728.97	72,26%	72,19%	52,22%	0,224
Ghosh-Daemen 2	$VP = k \left[\frac{D}{\sqrt{CME^{1/2}}} \right]^{-\beta} \cdot e^{-\alpha D}$	30	728.97	72,72%	72,21%	52,89%	0,671
Gupta	$VP = k \left[\frac{D}{\sqrt{CME^{1/2}}} \right]^{-\beta} \cdot e^{-\alpha \left(\frac{D}{\sqrt{CME}} \right)}$	30	728.97	70,65%	69,64%	49,92%	0,522
Rai Singh	$VP = k \cdot D^{-\beta} \cdot CME^{\alpha} \cdot e^{-\alpha D}$	30	728.97	72,95%	72,21%	53,21%	0,77
SE-Y1173	$VP = \varphi + \left[\frac{\alpha_1 + (\beta_1 \cdot CME) + (\gamma_1 \cdot CME^{1/2}) + \ln(CME \cdot \eta_1) + (\lambda_1 \cdot \sqrt{CME})}{[\alpha_2 + (\beta_2 \cdot D) + (\gamma_2 \cdot D^2) + \ln(D \cdot \eta_2) + (\lambda_2 \cdot D^2)]} \right] + \left(\frac{D}{CME^{-\alpha_3}} \right) \left(\frac{D}{\sqrt{CME^{\alpha_4}}} \right)$	30	728.97	73,23%	72,09%	61,62%	0,639

Figura 1 – Métodos de cálculo de previsão de vibração no solo

Machine Learning é um sistema que pode modificar seu comportamento autonomamente, baseando-se em sua própria experiência, por meio de premissas pré-definidas.

Neste trabalho, duas ferramentas de machine learning foram utilizadas para atingir o objetivo proposto: Algoritmo de Otimização GRG Não Linear e Rede Neural Artificial Feed Forward.

Além da aplicação das duas ferramentas de Machine Learning, também foram definidas e utilizadas três premissas para

geração do novo modelo matemático:

1. Minimização do Erro
2. Maximização do Coeficiente de Correlação
3. Maximização do Coeficiente de Determinação

Para a calibração da equação, foi elaborada uma equação genérica, utilizando dados de CME (Carga Máxima de Espera), que corresponde a carga de explosivos detonada instantaneamente em um determinado tempo, e D (Distância), que corresponde à distância do lo-



Machine Learning é um sistema que pode modificar seu comportamento autonomamente, baseando-se em sua própria experiência, por meio de premissas pré-definidas.

Neste trabalho, duas ferramentas de *machine learning* foram utilizadas para atingir o objetivo proposto: Algoritmo de Otimização GRG Não Linear e Rede Neural Artificial Feed Forward.

Além da aplicação das duas ferramentas de *Machine Learning*, também foram definidas e utilizadas três premissas para geração do novo modelo matemático:

1. Minimização do Erro
2. Maximização do Coeficiente de Correlação
3. Maximização do Coeficiente de Determinação

Para a calibração da equa-

ção, foi elaborada uma equação genérica, utilizando dados de CME (Carga Máxima de Espera), que corresponde a carga de explosivos detonada instantaneamente em um determinado tempo, e D (Distância), que corresponde à distância do local do desmonte em relação ao ponto de medição. Operadores algébricos lineares e não lineares foram inseridos no modelo matemático, gerando um modelo multivariável pela interseção de todas as equações sugeridas pela bibliografia.

Os modelos matemáticos com calibração contínua estão programados no Simulador Sismográfico. Este simulador de eventos sismográficos (Figura 2), calcula previamente os níveis de vibração que podem atingir as cavidades naturais subterrâneas, a partir dos planos de fogo

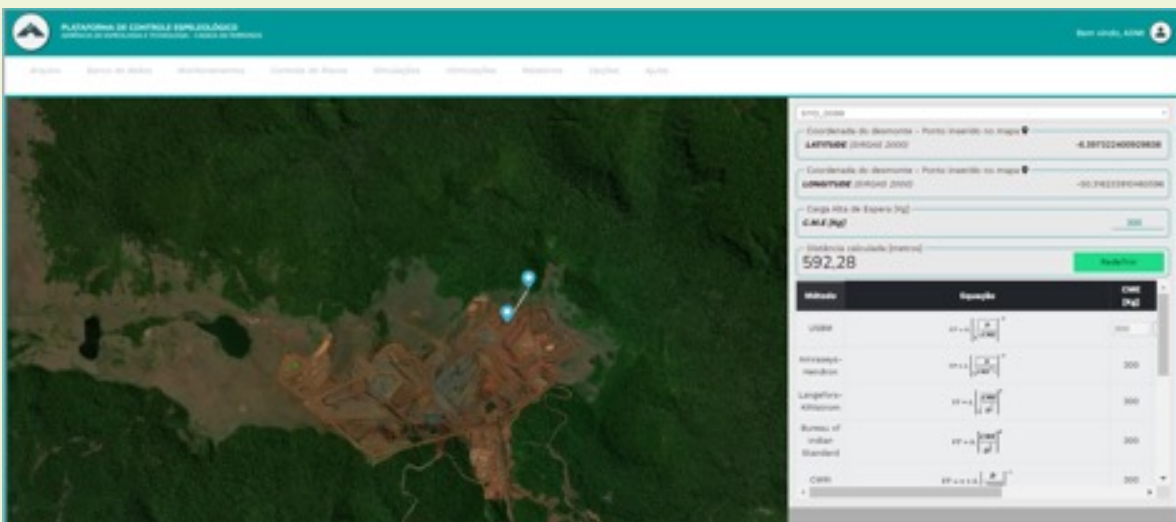


Figura 2 – Simulador Sismográfico da Plataforma de Controle Espeleológico Caverna S11D_0099



elaborados pela equipe de Operação de Mina. Isso possibilita o ajuste de carga e distância dos desmontes antecipadamente, garantindo a observância aos limites críticos de vibração antes da execução das atividades de desmonte de rocha por explosivos.

Além da informação sobre o método e a equação utilizada, o simulador apresenta os campos editáveis de CME (Carga Máxima de Espera – Kg) e D (Distância – m), os quais ge-

ram um valor calculado de PPV (Velocidade Pico de Partícula – mm/s). Ao simular um valor de PPV acima do limite crítico estabelecido (predefinidos no simulador como 5 mm/s para cavidades de máxima relevância e 15 mm/s para cavidades de alta relevância), um alerta em vermelho aparecerá (Figura 3), indicando que a carga (CME) ou a distância (D) da detonação devem ser ajustados para adequação dos parâmetros de segurança.

Método	Equação	CME [Kg]	D [m]	RPearson [%]	RSpearman [%]	R² [%]	VP [mm/s]
Amraseys-Hendron	$VP = k \left[\frac{D}{\sqrt{CME}} \right]^x$	250	600.45	70,65%	69,64%	49,92%	5,435

Figura 3 – Indicação de limite crítico de vibração ultrapassado

Resultados

Com base nos dados de monitoramento adicionados ao simulador e utilizando os critérios de carga e distância da detonação, 61,62% dos resultados simulados foram aderentes aos medidos posteriormente pelo monitoramento contínuo. Foi observado que, ao assumir o maior valor simulado, adicionando um fator de segurança com desvio de 10,0%, a ade-

rência de 61,62% aumenta para 99,5%, garantindo que não haja ultrapassagem do limite de referência de vibração, conforme ilustra a Figura 4.

Conclusão

As constantes ações adotadas para garantir a preservação do patrimônio espeleológico no entorno das áreas operacionais da VALE, têm se convertido em resultados efetivos. Desde o início das operações do Projeto



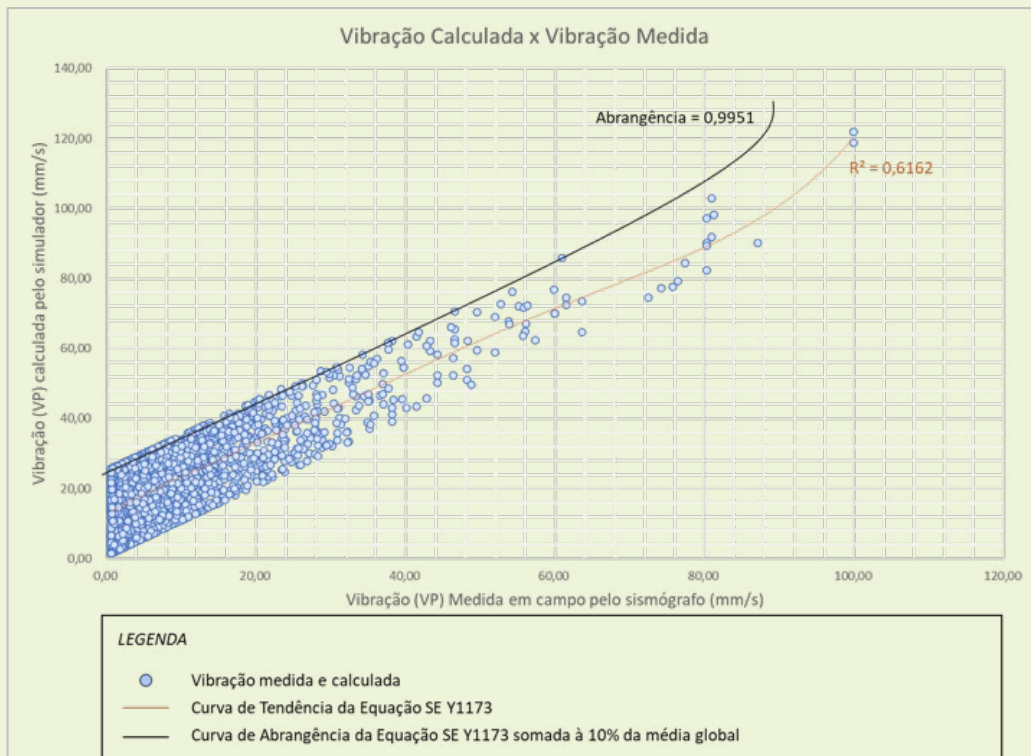


Figura 4 – Resultados de aderência do simulador, e sua abrangência ao prever valores de vibração quando somado o valor de 10% da média global

nenhum impacto negativo irreversível foi observado nas cavidades monitoradas.

Utilizando os dados de monitoramento sismográfico para simular os efeitos das vibrações, é possível prever cenários críticos e antecipar os ajustes operacionais necessários para garantir a integridade das cavidades do entorno em relação às vibrações induzidas. Dessa forma, o Simulador Sismográfico integrado à Plataforma de Controle Espeleológico, torna-se uma importante ferramenta de acompanhamento do Plano de Gestão Espeleológica da Vale.

Referências

ABADIE, J.; HAGGAG, A. Brève communication. Performance du gradient réduit généralisé avec une méthode quasi newtonienne pour la programmation non linéaire. *RAIRO-Operations Research*, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 209–216, 1979.

BALDICK, R. *Applied optimization: formulation and algorithms for engineering systems*. [S. l.]: Cambridge University Press, 2006.

BOON, C. W.; OOI, L. H.; DIGHT, P. M. Rock blasting — peak particle velocity against distan-



ce. [S. l.]: Australian Centre for Geomechanics, 2015. Disponível em: https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1508_23_Boon/. Acesso em: 19 nov. 2022.

BRANDI, I. V. et al. Instrumented geotechnical monitoring of a natural cave in a near mine operation – Towards a sustainable approach to mining and preservation of speleological heritage. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 239, p. 118040, 2019.

BRASIL. Decreto no 6.640, de 7 de novembro de 2008. 7 nov. 2008.

BRASIL; ANM, A. N. de M.; DNPM, D. N. de P. M. Boletim do Setor Mineral. Brasília: DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral, 2020.

BRASIL; CONAMA, C. N. do M. A.; IBAMA, I. B. do M. A. e dos R. N. R. Resolução nº 347, de 10 de setembro de 2004. 10 set. 2004.

BRASIL; DNPM, D. N. de P. M. NRM (Norma Reguladora de Mineração) 16 - Operações com Explosivos e Acessórios. 18 out. 2001.

BRASIL; IBAMA, I. B. do M. A. e dos R. N. R. Portaria IBAMA 887, de 15 de junho de 1990. 15 jun. 1990.

JACOBI, C. M. et al. Iron

geosystems: priority areas for conservation in Brazil. *Mining in ecologically sensitive landscapes*, [s. l.], p. 55–78, 2015.

NIELSEN, M. *Neural Networks and Deep Learning*. [s. l.], p. 224, 2019.

NOCEDAL, J. *Wright St. Numerical optimization*. New York, Springer, , 2006.

PRASHANTH, R.; NIMAJE, D. S. Estimation of peak particle velocity using soft computing technique approaches: a review. *Noise & Vibration Worldwide*, [s. l.], v. 49, n. 9–10, p. 302–310, 2018.



