

Comitê Gestor Pró-Brumadinho: No dia do rompimento da barragem B I da Mina Córrego do Feijão, foi instituído, temporariamente, o Gabinete de Crise do Estado de Minas Gerais em razão do rompimento, por meio do Decreto com numeração especial 23, de 25 de janeiro de 2019, com o objetivo de mobilizar e coordenar as atividades dos órgãos públicos estaduais e entidades quanto às medidas imediatas a serem adotadas na minimização dos impactos do desastre.

Evento: O rompimento da barragem B I, localizada no complexo minerário do Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, ocorrido em 25 de janeiro de 2019;

Espécie Alvo: Espécie da biota terrestre a aquática que ocorre em uma Área-Alvo para estudos ecológicos que por suas características ecossistêmicas representará um grupo ou guilda de interesse para a Avaliação de Risco Ecológico. Consideradas nos estudos como Receptor Ecológico.

Espécie Índice: Espécies da biota terrestre a aquática que possuam os perfis e parâmetros toxicológicos (DL50, CL50, NOAEL, LOAEL, entre outros) estabelecidos na literatura nacional ou internacional, cujo quais possam ser utilizadas como indicadores de toxicidade para as espécies-alvo a serem avaliadas na Linha de Evidência Química.

Foco de Contaminação (*Hot spot*): Porção de uma área impactada onde são detectadas as maiores concentrações das substâncias químicas de interesse;

Fonte Difusa: Várias pequenas fontes de contaminação que se espalham por áreas que podem alcançar de alguns m² até dezenas de km².

Fonte potencial de contaminação: Instalação ou material a partir do qual os contaminantes podem ser liberados para o ambiente, mas cuja liberação ainda pode não ser associada a um ou mais compartimentos do meio físico.

Fonte Primária de Contaminação: Instalação, equipamento ou material a partir do qual as substâncias químicas de interesse se originam e estão sendo, ou foram liberadas para um ou mais compartimentos do meio físico.

Fonte Secundária de Contaminação: Meio atingido por substâncias químicas de interesse provenientes da Fonte Primária de Contaminação, capaz de armazenar certa massa dessas substâncias e atuar como fonte de contaminação de outros compartimentos do meio físico.

Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC): Procedimento que visa reduzir, para níveis aceitáveis, os riscos a que estão sujeitos à população e o meio ambiente em decorrência de exposição às substâncias provenientes de áreas contaminadas, por meio de um conjunto de medidas que assegurem o conhecimento das características dessas áreas e dos riscos e danos



decorrentes da contaminação, proporcionando os instrumentos necessários à tomada de decisão quanto às formas de intervenção mais adequadas.

Limite de Quantificação (LQ): A menor quantidade do analito em uma amostra que pode ser determinada com precisão e exatidão aceitáveis pelo laboratório/método.

Mapa de controle e monitoramento do risco: Representação espacial das áreas onde os riscos identificados na avaliação de risco ultrapassaram os níveis considerados aceitáveis e/ou os requisitos legais aplicáveis.

Mapa de Intervenção: Plantas e seções com a localização das medidas de intervenção propostas, especificando as áreas e volumes de atuação das medidas de remediação, de controle institucional e de engenharia.

Medidas de controle institucional: Ações implementadas em substituição ou complementarmente às técnicas de remediação, visando afastar o risco, impedir ou reduzir a exposição de um determinado receptor sensível aos contaminantes presentes nas áreas ou águas subterrâneas contaminadas, por meio da imposição de restrições de uso, incluindo, entre outras, ao uso do solo, ao uso de água subterrânea, ao uso de água superficial, ao consumo de alimentos e ao uso de edificações, podendo ser provisórias ou não.

Medidas de engenharia: Ações baseadas em práticas de engenharia, com a finalidade de interromper a exposição dos receptores, atuando sobre os caminhos de migração dos contaminantes.

Medidas de intervenção: Conjunto de ações a serem adotadas visando à reabilitação de uma área para o uso declarado, a saber: medidas emergenciais, de remediação, de controle institucional, de controle de engenharia, medidas de monitoramento;

Medidas de remediação: Conjunto de técnicas aplicadas em áreas contaminadas, divididas em técnicas de tratamento, quando destinadas à remoção ou redução da massa de contaminantes, e técnicas de contenção ou isolamento, quando destinadas a prevenir a migração dos contaminantes.

Meta de remediação: Somatória dos riscos calculados para todas as Substâncias Químicas de Interesse em um determinado compartimento do meio físico que deve ser mitigada ao longo do processo de remediação até atingir o valor de Risco Aceitável (RA) definido pelo Órgão Ambiental Estadual fiscalizador.

Metas de reabilitação ambiental: Conjunto de metas associadas às medidas de controle institucional, medidas de engenharia, medidas de remediação e medidas de monitoramento, que quando aplicadas em conjuntos servirão para indicar o processo de reabilitação ambiental da Área de Estudo Ecológico.

Modelo Conceitual Ambiental (MCA): Relato escrito, acompanhado de representação gráfica, dos processos associados ao transporte das substâncias químicas de interesse na área investigada, desde as fontes potenciais, primárias e secundárias de contaminação, até os potenciais ou efetivos receptores, contendo a identificação das substâncias químicas de interesse, das fontes de contaminação, dos mecanismos de liberação das substâncias, dos meios pelos quais as substâncias serão transportadas, dos receptores e das vias de ingresso das substâncias nos receptores.

Monitoramento ambiental: Medição contínua ou periódica da qualidade ou características de um compartimento do meio físico, matriz ambiental, fauna e flora;

Nexo causal: Avaliação da ocorrência de substâncias químicas de interesse na Área de Estudo Ecológico e a relação de suas concentrações com o rompimento da barragem B I. Essa avaliação inclui o levantamento dos níveis de concentrações basais na área estudada, comparação com concentrações em localidades de referência (áreas controle) e avaliação da distribuição espacial das concentrações. O nexo de causa não é utilizado para fins de quantificação do risco à saúde humana ou ecológico.

Nível de base regional (*background*): Concentrações de substâncias químicas de interesse que ocorrem naturalmente no meio ambiente associadas à geoquímica regional.

Partes Interessadas (*Stakeholders*): Pessoas e organizações que possuem interesses e/ou são envolvidas, de forma direta ou indireta, positiva ou negativamente, pelo projeto.

Perigo: Situação em que estejam ameaçadas a vida humana, o meio ambiente ou o patrimônio público e privado, em razão da presença de agentes tóxicos, patogênicos, reativos, corrosivos ou inflamáveis.

Padrão Legal Aplicável (PLA): Valor de referência adotado pelo órgão ambiental regulador para definir quais níveis de concentração serão adotados como critérios de corte para ocorrência de anomalias químicas em compartimentos ambientais, alimentos de origem animal e alimentos de origem vegetal.

Plano de Intervenção Integrado para Saúde e Meio Ambiente: Documento técnico desenvolvido com base nos resultados obtidos nas etapas de investigação e de avaliação de risco, no qual são apresentadas, discutidas e justificadas, a nível conceitual, as metas de reabilitação de áreas contaminadas. O Objetivo final é viabilizar, de forma segura, o uso pretendido para estas áreas e nos casos de ecossistemas à recuperação da qualidade do meio degradado.

PRA: Avaliação de Risco Probabilístico desenvolvido com base na metodologia descrita no "U.S. EPA. Risk Assessment Guideline for Superfund (RAGS), Human Health Evaluation

Manual (EPA 540-R-02-002). PART A, Volume III. Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment”.

Ponto de conformidade (PDC): Pontos de monitoramento situados junto aos receptores potencialmente expostos aos contaminantes, cujas concentrações estão em conformidade com as metas estabelecidas.

Ponto de exposição (PDE): Local onde ocorre a exposição de um dado receptor às substâncias químicas provenientes de uma fonte de contaminação.

Reabilitação ambiental: Processo que tem por objetivo proporcionar o uso seguro de áreas contaminadas por meio da adoção de um conjunto de medidas que levam à eliminação ou redução dos riscos impostos.

Receptor ecológico: Indivíduo ou grupo de indivíduos de espécies de fauna e flora, expostos, ou que possam estar expostos, a uma ou mais estressores ambientais (físico, químico ou biológico) a uma área contaminada.

Receptor humano: Indivíduo ou grupo de indivíduos humanos, expostos, ou que possam estar expostos, a uma ou mais substâncias químicas associadas a uma área contaminada.

Recuperação: Resultado das medidas de intervenção que levam um ecossistema degradado a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original.

Rejeito: Rejeito de minério de ferro associado ao rompimento da barragem B I da Mina do Córrego do Feijão. Resíduo do tratamento do material extraído na mineração ferro depois da separação do metal de interesse. A barragem B I armazenava rejeito desse tipo.

Risco: Compreende o risco à saúde humana e risco ecológico.

Risco adicional: Decorrente da exposição de uma comunidade receptora a uma contaminação, sendo esta avaliação é feita em cenários associados a uma área contaminada. O risco é dito adicional por se tratar do acréscimo verificado nos fatores de risco já existentes na área em estudo. Podendo-se citar, como exemplo a baixa escolaridade, baixa renda, subemprego, condições precárias de saneamento que podem gerar múltiplas doenças infecciosas, subnutrição, doenças crônicas, entre outras.

Risco à saúde humana: Probabilidade adicional teórica de ocorrência de câncer em um determinado receptor exposto a substâncias carcinogênicas presentes em uma área contaminada ou a possibilidade de ocorrência de outros efeitos adversos na saúde humana decorrentes da exposição às substâncias não carcinogênicas.

Risco carcinogênico: Probabilidade adicional teórica de ocorrência de câncer em função de um evento de exposição associado a uma contaminação ambiental, considerando a SQI e o caminho de exposição avaliado.

Risco ecológico: Possibilidade de ocorrência teórica de efeitos adversos nos organismos presentes nos ecossistemas.

Risco não carcinogênico: Quociente que expressa a potencial ocorrência teórica de efeitos adversos não carcinogênicos à saúde, considerando a SQI e o caminho de exposição.

Rota ou caminho de exposição: Percurso desenvolvido, ou que possa ser desenvolvido, por uma substância química de interesse desde a fonte de contaminação até o receptor.

Sedimentos: Material sólido desagregado, originado da alteração de rochas preexistentes e depositados na Bacia do rio Paraopeba ou transportados pela água superficial desta bacia. Podem ser encontrados no leito ou na coluna d'água.

Situação anterior: Situação socioambiental e socioeconômica imediatamente anterior a 25 de janeiro de 2019.

Solo subsuperficial: Fração de solo situada abaixo de 0,1 metros, incluindo solos aluvionais, coluvionais e tecnogênicos.

Solo superficial: Fração de solo compreendida desde a superfície do terreno até 0,1 metros de profundidade, incluindo solos aluvionais, coluvionais e tecnogênicos.

Solo: Todo material situado abaixo da superfície do terreno, incluindo o solo, conforme definido pedologicamente, e as rochas;

Substância Química de Ocorrência Natural: Substâncias químicas que ocorrem naturalmente no nível de base regional (*background*), que possuam gênese associada à geoquímica das rochas que formam a geologia da área em estudo.

Substâncias Químicas de Interesse (SQI): Substâncias químicas detectadas em um compartimento do meio físico que apresenta níveis acima do padrão legal aplicável, ou aquela substância que não possui padrão legal aplicável para o compartimento analisado.

Unidade de exposição (UE): Áreas que são estabelecidas durante a avaliação de risco e que se caracterizam por possuírem receptores que podem ser ou são expostos a cenários de exposição comuns, considerando os caminhos de exposição e contaminantes presentes.

Valor de investigação (VI): é a concentração de determinada substância em um compartimento do meio físico, alimentos de origem animal ou vegetal, acima da qual existe riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado.

Valor de Prevenção (VP): é a concentração de valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções principais de acordo com o art. 3º do CONAMA 420 (“Art. 3o A proteção do solo deve ser realizada de maneira preventiva, a fim de garantir a manutenção da sua funcionalidade ou, de maneira corretiva, visando restaurar sua qualidade ou recuperá-la de forma compatível com os usos previstos”).

Valores Orientadores (VO): Concentrações de substâncias químicas, determinadas por meio de critérios numéricos e dados existentes na literatura científica, que visam subsidiar e definir a necessidade de que sejam executadas ações de prevenção e/ou controle da poluição. Devem nortear o gerenciamento de áreas contaminadas.

Valor de Referência de Qualidade (VRQ): é a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos.

Via de Ingresso: Mecanismo pelo qual uma substância química de interesse (SQI) adentra o organismo do receptor.



1 INTRODUÇÃO

Em termos ambientais, um dos grandes desafios da sociedade atual é o gerenciamento de impactos ambientais associados a grandes eventos que promovam alterações a nível regional na saúde e qualidade de vida das populações, bem como alterações nas condições de equilíbrio da fauna e da flora.

LANDIS e WIEGERS (1997) apud LANDIS (2004) definem a avaliação de risco em escala regional como a inclusão de múltiplos *habitats*, com diferentes agentes de estresse em pontos de exposição, além de diferentes características do meio físico que afetam a quantificação do risco.

ZABEO *et al.* (2011) indicam que para identificação da vulnerabilidade de receptores humanos e ecológicos em escala regional devem ser consideradas a inclusão de diferentes receptores potencialmente impactados, inclusão de uma análise especial no gerenciamento do risco, e a aplicação de metodologias que incluam técnicas de análise de decisões baseadas em multicritérios.

O rompimento da barragem de B I da Mina Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, ocorreu em 25 de janeiro de 2019 e causou a liberação de um grande volume de rejeito de minério de ferro para o sistema fluvial e seu entorno imediato, localizado a jusante da barragem e ao longo de cursos d'água da Bacia do rio Paraopeba.

Este rompimento acarretou alterações ambientais em escala regional, levando à necessidade do desenvolvimento de *Estudos de Avaliação de Risco Ecológico* (ARE), para avaliação dos potenciais riscos a fauna e flora, e, caso necessário, definição de estratégias de reabilitação e monitoramento ambiental.

Diversos fatores caracterizam o evento supramencionado, destacando-se:

- Caráter regional, ocasionando alterações ambientais em, aproximadamente, 320 km na Bacia do rio Paraopeba;
- Fonte primária única corresponde à barragem de B I;
- Fontes secundárias associadas ao processo de deposição da lama de rejeitos ao longo da Bacia do rio Paraopeba;
- Fontes secundárias dispostas em diferentes localidades e em diferentes compartimentos ambientais;
- Concentrações difusas de substâncias químicas (antrópicas e de ocorrência natural) não relacionadas à fonte primária (rompimento da barragem de rejeitos);
- Condições de contorno regionais de difícil fixação/caracterização;

- Múltiplos Cenários de exposição, variando do específico ao diversificado;
- Múltiplas partes interessadas.

O presente documento apresenta o projeto detalhado dos *Estudos de Avaliação de Risco Ecológico* (ARE) a serem aplicados à bacia do rio Paraopeba, o qual foi desenvolvido com base na metodologia *Risk Assessment Guidelines for Superfund (RAGS)*, *Ecological Risk Assessment Guidance* (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018) e no *Ecological Risk Assessment Guidance* (ECCC, 2012).

Para o desenvolvimento adequado de estudos de ARE que possuam contexto regional, é fundamental que sejam estabelecidos os aspectos regionais para definição clara de níveis de base (*background*), bem como investigar aspectos exposicionais associados às espécies potencialmente expostas. Neste documento serão apresentadas de forma detalhada, as etapas de geração de dados ambientais e ecológicos, seleção e validação de dados que sirvam de base para quantificação do risco e avaliação da exposição, considerando características específicas de cada espécie potencialmente exposta, análise de ecotoxicidade detalhada e orientada ao entendimento do risco de efeitos adversos por *endpoint*² na fauna e flora, associado a exposição à múltiplos contaminantes.

Os Estudos de Avaliação de Risco Ecológico (ARE) quantificarão o risco³, considerando aspectos ligados à fauna e flora expostas ao rompimento da barragem B I, definindo ações de gerenciamento ambiental.

² Um *endpoint* é característico de um indivíduo/organismo a ser observado (receptor) que foi ou será afetado por agentes estressantes (estressores).

³ Conforme definido na *RAGS Ecological Risk* (US.EPA, 1997a), em estudos de ARE o risco corresponde à probabilidade da ocorrência efeitos ecológicos adversos à uma espécie de fauna ou de flora exposta a um estressor químico, físico ou biológico associado a um evento de contaminação ambiental.

2 OBJETIVOS

O objetivo do presente projeto é apresentar o detalhamento técnico a ser aplicado para a execução dos *Estudos de Avaliação de Risco Ecológico* para a região da Bacia do rio Paraopeba, que foi impactada pelo rompimento da barragem B I, considerando as metodologias *RAGS Ecological Risk Assessment Guidance* (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018) e *Ecological Risk Assessment Guidance* (ECCC, 2012).



3 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente documento foi desenvolvido com base nos seguintes protocolos e procedimentos técnicos:

- [1] US.EPA - Environmental Protection Agency. 1997. Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessments. Interim Final. June.
- [2] ENVIRONMENTAL AND CLIMATE CHANGE CANADA (ECCC). 2012. Ecological Risk Assessment Guidance. Federal Contaminated Sites Action Plan (FCSAP). Canadian Minister of the Environment, Government of Canada.
- [3] US.EPA – Environmental Protection Agency. 2018. Ecological Risk Assessment Supplemental Guidance. Washington DC

Para suporte ao Gerenciamento de Áreas Contaminadas por Metais

- [1] RESOLUÇÃO CONAMA nº 420/2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas;
- [2] COPAM/CERH. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02/2010, de 6 de setembro de 2010, que estabelece diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por substâncias químicas;
- [3] US.EPA - *Environmental Protection Agency (2007). Framework for Metals Risk Assessment. Washington, DC, EPA 120/R-07/001. Março de 2007;*
- [4] COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Decisão de Diretoria nº 038/2017/C. São Paulo, 2017.

Os *Estudos de Avaliação de Risco Ecológico* utilizam os princípios apresentados pelo *Framework for Metals Risk Assessment* (USEPA, 2007), os quais têm como base as propriedades fundamentais dos metais no meio ambiente, que devem ser abordadas e incorporados em todas as avaliações de risco para metais, a saber:

- [1] Os metais são constituintes que ocorrem naturalmente no meio ambiente e suas concentrações variam regionalmente;



- [2] Todos os compartimentos do meio físico possuem ocorrências naturais de metais, sendo estes frequentemente introduzidos no ambiente como misturas;
- [3] Alguns metais são essenciais para manter a saúde adequada de seres humanos, animais, plantas e microrganismos;
- [4] Os metais, diferentemente dos produtos químicos orgânicos, não são criados nem destruídos por processos biológicos ou químicos; embora, esses processos possam transformar metais de uma espécie para outra (estados de valência) e convertê-los entre formas inorgânicas e orgânicas;
- [5] A absorção, distribuição, transformação e excreção de um metal dentro de um organismo depende do metal, da forma de ocorrência do metal ou do composto metálico, e da capacidade do organismo de regular e armazenar o metal.

Conforme discutido em *Framework for Metals Risk Assessment* (USEPA, 2007), é importante apresentar os princípios que diferenciam os compostos metálicos inorgânicos de outros produtos químicos. Esses princípios básicos merecem consideração cuidadosa ao avaliar os riscos para a saúde humana e o meio ambiente associados à exposição aos metais ou compostos metálicos e serão abordados e incorporados nos *Estudos de Avaliação de Risco Ecológico* a serem executados para a Bacia do Paraopeba, no âmbito do Meio Ambiente. Os principais princípios básicos a serem adotados são listados a seguir.

- [1] Os metais são constituintes naturais do meio físico e variam em concentração e distribuição no ambiente em superfície e subsuperfície, sendo que:
 - Animais e plantas evoluíram na presença de metais e são adaptados a vários níveis de metais. Muitos animais e plantas exibem distribuições geográficas que refletem requisitos variáveis e tolerância a certos metais. Essas diferenças regionais em requisitos e tolerâncias devem ser lembradas ao realizar testes de toxicidade, avaliar riscos e extrapolar entre regiões que diferem naturalmente nos níveis de metais.
 - Como resultado da atividade humana, os níveis atuais de metais podem ser elevados em relação aos níveis que ocorrem naturalmente. Dependendo do objetivo da avaliação de riscos, deve-se tomar cuidado para entender e distinguir entre os níveis naturais, os níveis atuais de base (isto é, fontes naturais e antropogênicas) e as contribuições para os níveis atuais de atividades específicas.
- [2] Animais se alimentam de diversas formas e com alimentos de diversas origens. Sendo assim, pode haver grande variabilidade na ingestão de alguns metais (por exemplo, em foliáceas,



tubérculos, frutas, carnes ou frutos do mar), resultando em variabilidade temporal e geográfica.

[3] Em todos os compartimentos do meio físico ou compartimentos ambientais, ocorre misturas ou associações naturais de metais, sendo que:

- Alguns metais agem de maneira aditiva quando estão associados a outros metais; outros agem independentemente de outro metal; e outros ainda são antagonísticos ou sinérgicos. Tais interações são aspectos importantes da avaliação da exposição e dos efeitos.
- Interações entre metais dentro de organismos podem ocorrer quando competem por locais de ligação em enzimas ou receptores específicos durante os processos de absorção, excreção ou sequestro ou diretamente no *endpoint* (órgãos e sistemas).
- A presença e a quantidade de outros metais são importantes ao realizar e interpretar testes de laboratório.

[4] Alguns metais são essenciais para manter a saúde adequada de seres humanos, animais, plantas e microrganismos, sendo que:

- Efeitos nutricionais adversos podem ocorrer se metais essenciais não estiverem disponíveis em quantidades suficientes. Os déficits nutricionais podem ser inerentemente adversos e podem aumentar a vulnerabilidade de organismos a outros estressores, incluindo aqueles associados a outros metais.
- Quantidades excessivas de metais essenciais podem resultar em efeitos adversos se sobrecarregarem os mecanismos hemostáticos de um organismo.
- Assim, a essencialidade deve ser vista como parte da relação dose-resposta geral para os metais que se mostram essenciais, e a forma dessa relação pode variar entre os organismos. Para uma determinada população, as "doses de referência" projetadas para proteger da toxicidade do excesso não devem ser definidas abaixo das doses identificadas como essenciais. As doses essenciais são tipicamente específicas da fase da vida e do sexo.

[5] A química ambiental dos metais influencia fortemente seu transporte e atenuação, bem como nos efeitos nos receptores humanos e ecológicos. Ao contrário dos produtos químicos orgânicos, os metais não são criados nem destruídos por processos biológicos ou químicos. No entanto, esses processos podem transformar metais de uma espécie para outra (estados de valência) e convertê-los entre formas inorgânicas e orgânicas. Os metais também estão presentes em vários tamanhos, de pequenas partículas a grandes massas, sendo que:

- A forma do metal (espécie química, composto, matriz e tamanho de partícula) influencia a bioacessibilidade, biodisponibilidade, destino e efeitos do metal.
- A forma do metal é influenciada por propriedades ambientais, como pH, tamanho de partícula, umidade, potencial redox, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica e sulfetos voláteis ácidos.
- Certas formas de metais são usadas para avaliar a exposição e os efeitos. Por exemplo, o íon metálico livre é usado para avaliações de exposição com base na ligação competitiva do metal a locais específicos de ação no organismo.
- Os metais ligados a pequenas partículas transportadas pelo ar são de importância primordial para exposições por inalação, embora alguns metais e compostos metálicos possam existir como vapores (por exemplo, mercúrio).
- As informações desenvolvidas sobre o transporte e atenuação, bem como os efeitos de uma forma de um metal, podem não ser diretamente aplicáveis a outras formas.
- As formas organometálicas têm características diferentes dos metais inorgânicos e compostos metálicos, e os mesmos princípios e abordagens gerais para avaliação de riscos não se aplicam.

[6] A toxicocinética e a toxicodinâmica dos metais dependem do metal, da forma do metal ou do composto de metal e da capacidade do organismo de regular e/ou armazenar o metal. Esses processos geralmente são altamente dinâmicos (por exemplo, variam de acordo com a rota e a concentração de exposição, metal e organismo) e, portanto, exercem uma influência direta na expressão da toxicidade do metal, sendo que:

- Sabe-se que certos compostos metálicos se bioacumulam nos tecidos e essa bioacumulação pode estar relacionada à sua toxicidade.
- Atualmente, os dados científicos mais recentes sobre bioacumulação não suportam o uso dos valores de fator de bioconcentração (BCF) e fator de bioacumulação (BAF), quando aplicados como critérios genéricos de limiar para o potencial de risco de metais inorgânicos nas avaliações de riscos humanos e ecológicos (por exemplo, para classificação como um produto químico tóxico bioacumulável [PBT] persistente).
- Os BAF / BCFs de valor único mantêm o maior valor para avaliações específicas do local quando a extrapolação em diferentes condições de exposição é minimizada.
- Para avaliações regionais, os BAF / BCFs devem ser expressos em função da química dos meios e da concentração de metais para espécies específicas (ou organismos intimamente relacionados).



- A transferência trófica pode ser uma importante via de exposição para metais, embora a biomagnificação de formas inorgânicas de metais nas redes alimentares geralmente não seja uma preocupação nas avaliações de metais.
- Modelos de bioacumulação baseados em cinética (por exemplo, DYNBAM) foram montados para descrever com precisão a bioacumulação resultante de diferentes rotas de exposição para vários metais e organismos aquáticos e devem ser considerados como alternativas à abordagem BCF / BAF quando houver dados adequados disponíveis.
- Muitos organismos desenvolveram meios fisiológicos ou anatômicos para regular e/ou armazenar certos metais até certos níveis de exposição, de modo que os metais não estejam presentes nos organismos em uma concentração, forma ou local que possa resultar em um efeito tóxico.
- O órgão ou tecido em que ocorre o efeito tóxico do metal pode diferir do órgão ou tecido em que o metal se bioacumula e pode ser afetado pela cinética do metal. Os órgãos-alvo podem diferir por espécie, principalmente devido a diferenças na absorção, distribuição e excreção. Os efeitos no portal de entrada em um organismo são menos dependentes de processos cinéticos internos a um organismo.
- A sensibilidade aos metais varia com a idade, sexo, estado da gravidez, estado nutricional e genética (devido a polimorfismos genéticos).



4 ABRANGÊNCIA DO PROJETO

A definição da abrangência do escopo é fundamental para o desenvolvimento dos estudos de ARE para meio ambiente, haja vista a amplitude conceitual e metodológica, e a extensão territorial de influência do rompimento da barragem B I da Mina Córrego do Feijão.

O escopo territorial dos *Estudos de Avaliação de Risco Ecológico* para meio ambiente abrange toda a extensão da bacia do rio Paraobeba em Minas Gerais, que foi impactada pelo rompimento da barragem B I, desde o município de Brumadinho até a represa de Três Marias no município de mesmo nome.

O escopo dos *Estudos de Avaliação de Risco Ecológico* para meio ambiente abrange a aplicação integral da metodologia *Risk Assessment Guidelines for Superfund (RAGS)*, *Ecological Risk Assessment Guidance* (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018), e outras metodologias adicionais que orientam as técnicas de amostragem, controle e garantia da qualidade na amostragem e análises químicas, e padrões legais aplicáveis (PLA).



5 PREMISSAS TÉCNICAS

A seguir serão apresentadas as premissas técnicas que fornecerão a base necessária para execução adequada dos *Estudos de Avaliação de Risco Ecológico* para a bacia do rio Paraopeba no âmbito do meio ambiente.

5.1 RISCO

Conforme definido no *Ecological Risk Assessment Guidance* (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018), o risco corresponde à probabilidade da ocorrência de efeitos adversos a indivíduos de espécies de fauna e flora expostos a uma ou mais estressores ambientais presentes em uma área contaminada por meio de um, ou mais, cenário(s) de exposição ecológica.

No contexto da avaliação de risco ecológico, o risco é calculado pela quantificação e qualificação das linhas de evidência química, ecológica, ecotoxicológica e física.

Após a quantificação e qualificação de cada linha de evidência, é realizada o Balanço de Evidências - *Weight of Evidence* (WOE), com o objetivo de identificar quais evidências são as mais críticas e quais devem ser priorizadas no processo de reabilitação ambiental e monitoramento.

5.2 QUANTIFICAÇÃO DO RISCO

Serão quantificados apenas os riscos associados às substâncias químicas de interesse que estiveram localizadas em pontos de amostragem em Unidades de Exposição⁴ (UE) do tipo RED (Região de Exposição Direta) e REI (Região de Exposição Indireta). Este procedimento garante que sejam quantificados os riscos para concentrações obtidas em pontos de amostragem dentro de uma área impacta, ou seja, fora da região de *background*. Sendo assim, não serão calculados riscos à saúde humana para a RNE (Região de Não Exposição) associado aos níveis basais locais (*background*).

5.3 UTILIZAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS

Em função dos modelos conceituais de cada área de estudo ecológico e os resultados da investigação ambiental, fatores de atenuação natural obtidos de modelos de transporte de SQI nos compartimentos do meio físico de interesse para ARE poderão ser utilizados para auxiliar

⁴ áreas que são delimitadas durante a Avaliação de Risco e que se caracterizam por conter receptores expostos, ou potencialmente expostos, a cenários comuns de exposição, considerando os caminhos de exposição e as substâncias químicas de interesse presentes (DD 038/CETESB, p. 13).

no entendimento da distribuição espacial do risco quantificado e não para quantificação de concentrações máximas nos pontos de exposição (C_{MAX}). Os referidos modelos só serão utilizados para estimar concentrações em pontos/regiões que não foram amostradas pela execução do *Plano de Investigação para Meio Ambiente*. As concentrações a serem utilizadas para o cálculo do risco ecológico serão sempre as Máximas Concentrações no *endpoint* de avaliação (C_{MAX}) determinadas a partir de análises químicas de amostras para cada compartimento do meio físico de interesse para linha de evidência química, considerando os cenários de exposição ecológica válidos e completos.

5.4 ACREDITAÇÃO LABORATORIAL

Serão aceitos para fins de Avaliação de Risco Ecológico, considerando de todas as amostras obtidas em campo para os diferentes compartimentos do meio físico e matrizes ambientais, os resultados analíticos laboratoriais emitidos por laboratórios acreditados pela norma ABNT NBR ISO 17.025:2017.

Caso as análises químicas tenham sido realizadas em laboratórios de universidades para trabalhos acadêmicos, que não possuam acreditação conforme ABNT NBR ISO 17.025:2017, essas análises não poderão ser aceitas como válidas diretamente para fins de ARSH. Neste caso, poderão ser aceitos resultados de laboratórios sem acreditação ABNT NBR 17.025:2017, desde que seja feita validação dos procedimentos laboratoriais com base nos critérios estabelecidos por essa norma com emissão de parecer técnico de profissional especialista, e seja apresentado o Manual de Boas Práticas Laboratoriais - BPL conforme NIT-DICLA-035, para avaliar a possibilidade de validação dos resultados analíticos laboratoriais.

Para ensaios ecotoxicológicos poderão ser aceitos resultados de laboratórios sem acreditação ABNT NBR 17.025:2017, desde que seja feita validação dos procedimentos laboratoriais com base nos critérios estabelecidos por essa norma com emissão de parecer técnico de profissional especialista, e seja apresentado o Manual de Boas Práticas Laboratoriais - BPL conforme NIT-DICLA-035, para avaliar a possibilidade de validação dos resultados analíticos laboratoriais.

Caso sejam necessárias análises químicas específicas para as quais não exista no Brasil laboratório acreditado pela norma ABNT NBR ISO 17.025:2017, serão aceitos para fins de Avaliação de Risco Ecológico, resultados analíticos de laboratórios nacionais e internacionais não acreditados para estas análises químicas específicas. Desde que os critérios de avaliação descritos no item anterior sejam satisfeitos.

A aquisição de amostras deverá ser realizada somente por empresas e laboratórios acreditados para esta finalidade pela norma ABNT NBR ISO 17.025:2017. Caso não haja

empresas acreditadas no Brasil para uma matriz específica, esta poderá ser amostrada por empresa não acreditada, desde que seja seguida a metodologia de amostragem descrita neste documento.

5.5 PADRÕES LEGAIS APLICÁVEIS⁵

A seguir são apresentados os padrões legais a serem utilizados para cada matriz ambiental.

5.5.1 Solo Superficial⁶

Como valor de corte para seleção das Substâncias Químicas de Interesse (SQI) deverá, na ausência de lista específica para o Estado no qual se encontra a Área de Estudo Ecológico em estudo, ser utilizado o Valor de Prevenção (VP) previsto no CONAMA 420. Para substâncias químicas de interesse ou meios não contemplados no CONAMA 420, serão utilizados os padrões definidos no *Ecological Soil Screening Level (Eco-SSL) Guidance and Documents* (US.EPA, 2005c).

5.5.2 Solo Subsuperficial⁷

Como valor de corte para seleção das Substâncias Químicas de Interesse (SQI) deverá, na ausência de lista específica para o Estado no qual se encontra a Área de Estudo Ecológico em estudo, ser utilizado o Valor de Prevenção (VP) previsto no CONAMA 420. Para substâncias químicas de interesse ou meios não contemplados no CONAMA 420, serão utilizados os padrões definidos no *Ecological Soil Screening Level (Eco-SSL) Guidance and Documents* (US.EPA, 2005c).

5.5.3 Sedimento Superficial e Subsuperficial

Como valor de corte para seleção das Substâncias Químicas de Interesse (SQI) deverá ser utilizada a Resolução CONAMA n° 454, de 1° de novembro de 2012, a qual estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. Para substâncias químicas de interesse ou meios não

⁵ Esta sessão foi adaptada para atendimento das **Recomendações da Auditoria Técnica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais.**

⁶ Esta sessão foi adaptada para atendimento das **Recomendações da Auditoria Técnica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais.**

⁷ Esta sessão foi adaptada para atendimento das **Recomendações da Auditoria Técnica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais.**

contemplados na CONAMA 454, serão utilizadas as últimas atualizações do *Region 4 Ecological Risk Assessment Supplemental Guidance* (US.EPA, 2018) e *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life* (CCME, 1999).

5.5.4 Água Superficial⁸

Como valor de corte para seleção das Substâncias Químicas de Interesse (SQI), deverão ser utilizados os padrões de qualidade estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 e suas atualizações. Para substâncias químicas de interesse ou meios não contemplados no CONAMA 420, serão utilizados os padrões definidos no *National Recommended Surface Water Criteria* (US.EPA, 2004).

5.6 EQUIPES TÉCNICAS

Abaixo é apresentada a estrutura de equipe proposta para a execução dos Estudos de Avaliação de Risco Ecológico:

- Especialista em Avaliação de Risco Ecológico;
- Geólogo;
- Biólogo Especialista em Fauna;
- Especialista em Ecotoxicologia;
- Biólogo, Agrônomo ou Engenheiro Especialista em Flora;
- Engenheiro Ambiental ou Gestor Ambiental;
- Estatístico e Geoestatístico.

A execução dos Estudos de ARE será acompanhada por profissionais de meio ambiente, ligados às Secretarias Estaduais e Municipais de Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais. Estes profissionais estarão presentes nas etapas de coleta de dados primários em campo. A solicitação para este acompanhamento será formalmente realizada pelo Comitê Gestor Pró-Brumadinho (<https://www.mg.gov.br/conteudo/pro-brumadinho>), a partir de convite escrito com previsão de data de início e término do referido acompanhamento, sendo que ficará a cargo das Secretarias Estaduais e Municipais de Meio Ambiente, indicarem os profissionais que farão esse acompanhamento.

⁸ Esta sessão foi adaptada para atendimento das **Recomendações da Auditoria Técnica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais**.

6 EXCLUSÕES E LIMITAÇÕES

Esta seção apresenta os itens considerados ou não nos Estudos de Avaliação de Risco Ecológico a serem desenvolvidos para a bacia do rio Paraopeba.

Itens fora do escopo:

- [1] Os Estudos de ARE **não consideram** a caracterização do nexos de causa associado a valores resultantes da avaliação de risco ecológico (nexos de causa entre exposição e doença/efeito adverso) para a metodologia RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018). Sendo assim, não serão avaliados os nexos causais associados à quantificação do risco ecológico.
- [2] Os Estudos de ARE **não consideram** para a linha de evidência química, concentrações em pontos de exposição ecológico (PDE) obtidas por modelagem matemática. As concentrações utilizadas para quantificação do Quociente de Risco (QR) serão as máximas concentrações obtidas nos *endpoints* de medição.

Itens do escopo:

- [1] Os Estudos de ARE **consideram** a avaliação da ocorrência de substâncias químicas de interesse na área estudada e sua relação (nexos de causalidade) com o rompimento da barragem B I. Essa avaliação inclui o levantamento dos níveis de concentrações basais na área estudada, comparação com concentrações em localidades de referência e avaliação da distribuição espacial das concentrações.
- [2] Os Estudos de ARE **consideram** que para quantificação do Quociente de Risco (QR) poderão ser considerados o NOAEL, LOAEL, ou tratamento estatístico ANOVA para definição de um Valor de Referência Tóxica, conforme definido no RAGS *Ecological Risk* (US.EPA 1997a; US.EPA, 2018).



7 Fontes Primárias Potenciais Ligadas ao Rompimento

O “Plano Integrado de Gerenciamento de Rejeitos e Resíduos Carreados pelo Rompimento da barragem B I” tem o objetivo de estabelecer os procedimentos e critérios técnicos a serem adotados no manejo dos rejeitos e gestão dos resíduos e rejeitos provenientes das escavações na “zona quente”, localizada na bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

No documento citado acima, a gestão de resíduos e rejeitos seguem as seguintes premissas:

- Deve atender aos requisitos legais aplicáveis, consonante com a Política Nacional e Estadual de Resíduos Sólidos, principalmente no que se refere às condições de destinação final;
- Os rejeitos advindos da ruptura foram caracterizados e classificados como não perigosos, conforme Capítulo 4 do documento citado;
- Os resíduos com potencial de contaminação devem ser segregados na fonte geradora, ou seja, na “zona quente”, antes do envio para seus respectivos DIR’s.

Os principais resíduos encontrados na área de escavação “zona quente” são:

1. Resíduos diversos, como madeira, dormentes;
2. Rejeito contaminado com óleos, graxas e/ou combustíveis;
3. Resíduos da construção civil;
4. Tambores, bombonas e tanques;
5. Veículos leves, sendo estas caminhonetes, veículos pequenos, ônibus, vans, ambulâncias;
6. Veículos pesados, como caminhões, carretas, foras de estrada, guindastes
7. Máquinas (trator, retroescavadeira, motoniveladora etc.);
8. Equipamentos, como locomotivas, transformadores, cilindros, GPL, caçamba, perfuratrizes, plataformas elevatórias, cilindros hidráulicos, containers, inversores e máquinas de solda, painéis elétricos, bombas hidráulicas, baterias, empilhadeiras de cargas, pneus inservíveis, entre outros.

A localização destes resíduos, não relacionados ao rejeito de minério de ferro que estava presente na barragem B I da Mina Córrego do Feijão antes de seu rompimento, são classificados como “Fontes Primárias Potenciais Ligadas ao Rompimento”. Sendo assim, serão mapeadas a partir dos dados secundários gerados no Plano Integrado de Gerenciamento de Rejeitos e Resíduos Carreados pelo Rompimento da Barragem B I, e serão integrados ao Modelo Conceitual para Meio Ambiente (MCA_{EC}).

Uma vez executado o descrito no item 6.6 (Gestão e Manejo dos Resíduos com Potencial de Contaminação) do Plano Integrado de Gerenciamento de Rejeitos e Resíduos Carreados pelo Rompimento da Barragem B I, os dados gerados serão incorporados aos estudos de ARE e será desenvolvido um *Plano de Investigação para Meio Ambiente* específico para estas regiões.

As “fontes primárias potenciais ligadas ao rompimento” serão identificadas, qualificadas e listadas no MCA_{EC}. Neste caso, estas fontes também serão investigadas a partir do plano de amostragem definido no *Plano de Investigação para Meio Ambiente*. Sendo assim, não haverá necessidade de desenvolvimento de um *Plano de Investigação para Meio Ambiente* específico para estas fontes primárias.

Em alguns casos, em função do avanço da escavação, remoção e destinação dos rejeitos oriundos do rompimento da barragem B I, estas fontes primárias ainda não foram identificadas, qualificadas e removidas, já que muitas delas estão soterradas e o processo de escavação irá expô-las para posterior investigação. Neste caso, se o projeto estiver adiantado no momento da descoberta destas fontes primárias, será desenvolvido um *Plano de Investigação para Meio Ambiente* específico para estas fontes. Os resultados da execução deste plano serão consolidados e inseridos no estudo de ARE.

Neste contexto, as “Fontes Primárias Potenciais Ligadas ao Rompimento” identificadas e avaliadas pelo Plano Integrado de Gerenciamento de Rejeitos e Resíduos, passarão a fazer parte dos Estudos de Avaliação de Risco Ecológico.

Adicionalmente, o Plano de Reparação da Bacia do rio Paraopeba será utilizado para correlação dos limites da Área de Estudo a serem estudadas, com a área de abrangência dos impactos previamente identificados pelo referido plano, visando estabelecer a correlação destes impactos com a quantificação do risco ecológico⁹.

⁹ Esta sessão foi adaptada para atendimento das **Recomendações da Auditoria Técnica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais**.

8 ÁREAS DE ESTUDO ECOLÓGICO (AE_{ECO})

As Áreas de Estudos Ecológicos (AE_{ECO}) são regiões representadas espacialmente, delimitadas pelos biomas que ocorrem em toda extensão da região impactada, fitofisionomias presentes em cada bioma identificado e das espécies de fauna e flora associadas a cada fitofisionomia. Sendo assim, o procedimento de segmentação das AE_{ECO} visa dividir a área impactada a partir dos biomas e da vegetação (fitofisionomia) presente na Bacia do rio Paraopeba.

A determinação preliminar das AE_{ECO} se dará considerando as seguintes camadas de informação:

- Limites dos biomas identificados na Bacia do rio Paraopeba considerando a extensão impactada;
- Limites das diferentes coberturas vegetais (fitofisionomias) considerando os biomas identificados;
- Distribuição espacial das espécies de fauna terrestre e aquática, considerando as fitofisionomias identificadas;
- Distribuição espacial das espécies de flora terrestre e aquática considerando as fitofisionomias identificadas;
- Avaliação da mobilidade das espécies de fauna dentro de cada fitofisionomia identificada;
- Identificação de espécies em naturais, exógenas, em extinção, exóticas, raras, sensíveis, migratórias, entre outras.

Para isso será usado o mapa de Biomas do Brasil (IBGE, 2019) e a cobertura vegetal mapeada a partir do mapa de vegetação do Banco de Dados de Informações Ambientais (BDIA).

Adicionalmente, serão usados os mapas Hipsométricos e Hidrográficos de MG disponíveis na base de dados secundários a serem consolidados na primeira etapa dos ERSHRE, o QF e o manual técnico da vegetação brasileira do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Neste contexto serão estabelecidos os diferentes tipos de formações dentro de cada vegetação.

Serão segmentadas preliminarmente todas as Áreas de Estudo Ecológico (AE_{ECO}) visando o estabelecimento de uma região preliminar para estes estudos, sendo que estas não servirão como limitante para o desenvolvimento da etapa de Formulação do Problema, ou seja,

os limites da AE_{ECO} previamente definidos poderão ser redefinidos em função da execução desta etapa e da realização das expedições de campo para validação da extensão dos biomas, ocorrência das fitofisionomias e identificação das espécies de fauna e flora previamente levantadas a partir da base de dados secundários.



9 AVALIAÇÃO E VALIDAÇÃO DE DADOS AMBIENTAIS

A *Avaliação e Validação de Dados Ambientais* será executada ao final da etapa de *Compilação e Análise de Dados* e ao final da execução do *Plano de Investigação para Meio Ambiente*. Sendo assim, neste item, serão descritas as metodologias para avaliar e validar os dados secundários obtidos na etapa de *Compilação e Análise de Dados* e os dados primários obtidos pela execução do *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente*.

A **primeira tarefa** da *Avaliação e Validação de Dados Ambientais* consiste na validação dos dados secundários disponíveis para os compartimentos do meio físico, fauna e flora, considerando as rotas de exposição definidas como válidas no MCA_{ECO}, tarefa esta que será executada após a etapa de *Compilação e Análise de Dados* (ver seção 10.1.2 – *Validação de Dados Secundários*). As seguintes fontes de dados ambientais serão utilizadas:

- Programas de Monitoramento e estudos de caracterização ambiental executados para acompanhamento da qualidade ambiental da região atingida;
- Dados de monitoramento de órgãos regulatórios (ex.: IGAM, IEF, FEAM, IEMA);
- Dados relacionados ao rompimento da barragem B I coletados por especialistas do Ministério Público;
- Estudo de Biodiversidade desenvolvido para a bacia do rio Paraopeba;
- Trabalhos acadêmicos (ex.: Universidades, Órgãos de Pesquisa);
- Outros relatórios técnicos, estudos e artigos técnico-científicos publicados.

Para matrizes ambientais que possuem variação temporal e sazonal, como água superficial e sedimentos, deverão ser priorizados dados coletados no âmbito de programas de monitoramento como: o Plano de Monitoramento da Qualidade da água do rio Paraopeba; monitoramento de águas superficiais do Estado de Minas Gerais executado pelo IGAM; Programa de diagnóstico de danos ambientais sobre meio biótico atualmente desenvolvido para a bacia do rio Paraopeba pela Amplo. Quando disponíveis, serão consolidados dados de amostras coletadas nas três regiões de exposição definidas para a Área de Estudo Ecológico em estudo: Região de Exposição Direta (RED), Região de Exposição Indireta (REI) e Região de Não Exposição (RNE).

Entende-se que a amostragem na RED permitirá identificar qualquer substância que esteja acima do padrão legal aplicável (PLA) e que possa ter relação com o rompimento da barragem B I, incluindo o grupo de substâncias que podem ter sido remobilizadas pelo evento.

A **segunda tarefa** da *Avaliação e Validação de Dados Ambientais* consiste na validação dos dados gerados pela execução do *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente*.

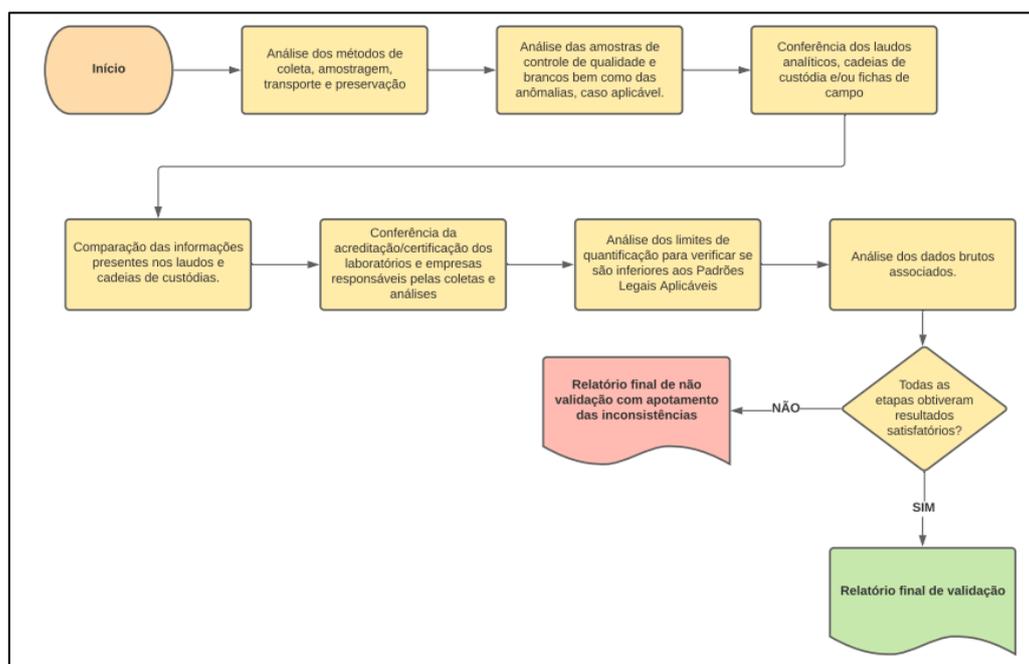
A Avaliação e Validação de Dados Ambientais (secundários e primários) será dividida nas seguintes etapas:

- Dados Analíticos Laboratoriais;
- Dados do Meio Físico;
- Dados Ecológicos e Ecotoxicológicos;
- Avaliação de suficiência e Representatividade.

Na

Figura 1 estão representadas as etapas resumidas da metodologia de avaliação.

Figura 1 – Fluxograma da Metodologia



É importante ressaltar que a Avaliação e Validação de Dados Ambientais é executada em dois momentos dos estudos de ARE com base no RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018), a saber:

- Ao final da etapa de *Compilação e Análise de Dados*, e
- Ao final da execução do *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente*.

Para o desenvolvimento da etapa de Avaliação e Validação de Dados Ambientais será levado em consideração à temporalidade da geração dos dados ambientais secundários e



primários, principalmente dados associados ao processo de amostragem dos diferentes compartimentos do meio físico e biótico para realização de análises químicas laboratoriais¹⁰.

9.1 Dados Analíticos Laboratoriais

Para cada conjunto de dados secundários obtidos na etapa de *Compilação e Análise de Dados Secundários* (seção 10.1.1), bem como dados primários gerados pela execução do *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente*, serão realizadas as seguintes tarefas de validação, conforme descrito no documento “*Guidance for Data Usability in Risk Assessment – Part A*” da US EPA (1991). A Tabela 1 apresenta a consolidação dos principais procedimentos e metodologias que serão utilizadas para validação dos dados analíticos laboratoriais.

Tabela 1 – Procedimentos e metodologias utilizadas para validação dos dados analíticos laboratoriais

REFERÊNCIA	SOLO		SEDIMENTO		ÁGUA		POEIRA DOMICILIAR	COMUNIDADES AQUÁTICAS	ALIMENTOS		RESÍDUOS
	SUPERFICIAL	SUBSUPERFICIAL	SUPERFICIAL	SUBSUPERFICIAL	SUPERFICIAL	SUBSUPERFICIAL			VEGETAIS	ANIMAIS	
Guia Nacional de coleta e Preservação de Amostras da Agência Nacional de Águas (2011): Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos.			X	X	X			X			
NORMA ABNT NBR 16.435/2005	X	X	X	X	X	X	X				
Field Sampling Procedures Manual (USEPA, 2005)	X	X	X	X	X	X					
Preparation of Soil Sampling Protocols: Sampling Techniques and Strategies (USEPA, 2005)	X	X									
Capítulo 5.4 do RAGS da USEPA (1989a)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
ASTM, 2016. D7144. Standard Practice for Collection of Surface Dust by Micro-vacuum Sampling for Subsequent Metals Determination: Poeira Domiciliar							X				
ASTM, 2017. D5438 - 17. Standard Practice for Collection of Floor Dust for Chemical Analysis: Poeira Domiciliar							X				
SES-PR. Secretaria de Estado de Saúde do Paraná (2007). Manual de coleta de amostras de ovos										X	
ANVISA. Procedimentos Operacionais Padrão (POP) - PROGRAMA DE ANÁLISE DE RESÍDUOS DE AGROTÓXICOS EM ALIMENTOS - Gerência Geral de Toxicologia, 2008											
Ministério da Agricultura. MANUAL DE COLETA DE AMOSTRAS DO PLANO NACIONAL DE CONTROLE DE RESÍDUOS E CONTAMINANTES EM PRODUTOS DE ORIGEM VEGETAL, 2013									X		
Agência de Defesa Agropecuária do Paraná. MANUAL DE PROCEDIMENTOS PARA AMOSTRAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS PARA ANÁLISE DE RESÍDUOS, 2014									X		
Ministério da Agricultura. Plano de amostragem e os limites de referência para o Plano Nacional de Controle de Resíduos e Contaminantes em Produtos de Origem Animal										X	
Ministério da Agricultura. Manual de coleta de amostras do Plano Nacional de Controle de Resíduos e Contaminantes em Produtos /MAPA									X	X	
Ministério da Agricultura. Plano nacional de controle de resíduos e contaminantes/Animal										X	
Ministério da Agricultura. Manual de procedimentos para laboratórios - Área de microbiologia e físico-química de produtos de origem animal.										X	
Agriculture Victoria/Australia. Sampling soil, vegetables, fruit and grain for residue testing	X								X	X	
Normas NBR 10.004 (Resíduos sólidos – Classificação)	X										X
Normas NBR 10.007 (Amostragem de resíduos sólidos)	X										X

1. Identificação dos pontos de coleta de amostras

Para a validação desse item, inicialmente, serão identificadas as coordenadas dos pontos de coleta de amostra que foram reportadas. A partir dessa identificação será avaliado se as

¹⁰ Esta sessão foi adaptada para atendimento à Nota Técnica nº 6/FEAM/GERAQ/2021



coordenadas reportadas permitem o georreferenciamento dos pontos de coleta e se esses pontos estão localizados dentro dos limites da Área de Estudo Ecológico (AE_{ECO}) em estudo.

Na impossibilidade de georreferenciamento dos pontos de coleta, esses pontos e seus respectivos dados não serão utilizados em um primeiro momento. Nesses casos, com o objetivo de não descartar nenhum dado disponível para a Área de Estudo Ecológico em estudo, será feito contato com a equipe responsável pela produção dos dados para verificar a possibilidade de obtenção da identificação e coordenadas corretas que possam ser georreferenciadas.

2. Controle de Qualidade do Processo de Amostragem

Os procedimentos de controle e garantia da qualidade do processo de amostragem e preservação de amostras utilizadas para geração de cada conjunto de dados serão avaliados para garantir que foram utilizadas as metodologias nacionais e internacionais adequadas para cada compartimento do meio físico e biótico amostrado. Para compartimentos que não possuem procedimentos nacionais de amostragem e preservação, serão utilizadas referências internacionais. Os procedimentos de coleta a serem priorizados são apresentados neste documento.

No caso de amostragem de rejeitos (puro sem mistura com solo ou sedimento), estes serão considerados resíduos, conforme orientação das NBR 10.004 e 10.007, sendo assim todo o processo de amostragem e controle e garantia da qualidade deverão seguir as NBR citas neste parágrafo.

Adicionalmente, será avaliado se as amostras coletadas são adequadas para utilização em estudos de avaliação de risco ecológico. Para esse fim, as seguintes referências serão utilizadas:

- Capítulo 4 do *Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund* da US EPA (1997a);
- Capítulo 2 do *Ecological Risk Assessment Guidance* (ECCC, 2012).

Serão observados se procedimentos de controle e garantia de qualidade da amostragem foram utilizados para a coleta das amostras. Os seguintes documentos serão utilizados como referência de procedimentos de controle e garantia de qualidade da amostragem:

- Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras da Agência Nacional de Águas (2011);
- Norma ABNT NBR 16.435 de 2015;
- *Field Sampling Procedures Manual* (US.EPA, 2005a)
- *Preparation of Soil Sampling Protocols: Sampling Techniques and Strategies* (US.EPA, 2005b);

- Capítulo 5.4 do RAGS da US EPA (1989a).

Neste contexto, partindo da aplicação metodológica dos documentos supramencionados, serão realizadas minimamente as seguintes análises:

- Os métodos de coleta e amostragem devem estar de acordo com a norma utilizada, quando aplicável, e claramente descritos no relatório ou nos laudos laboratoriais. Ressalta-se que os procedimentos devem seguir, preferencialmente, normas nacionais. Quando não há normas nacionais ou internacionais, é necessário que o procedimento aplicado seja detalhadamente descrito e esteja alinhado com o procedimento proposto neste documento;
- Os métodos de acondicionamento, transporte, recebimento e analíticos devem ser citados/descritos no relatório ou nos laudos laboratoriais e devem estar de acordo com o estabelecido na norma técnica ou guia previamente aceitos pelo órgão ambiental do estado de Minas Gerais (MG), considerando a matriz e o parâmetro analisado;
- As coletas de amostras de controle (campo, equipamento, viagem e temperatura) e branco devem ter sido obrigatoriamente obtidas no processo de aquisição de amostras em número adequado para cumprimento da metodologia nacional, ou em sua ausência, metodologia internacional aceita pelo órgão ambiental do estado de Minas Gerais (MG), considerando a matriz e o parâmetro analisado. As amostras de controle de qualidade serão avaliadas e validadas quanto à presença de concentrações anômalas, representatividade do lote controlado e confiabilidade dos resultados.
- Todas as informações sobre a coleta, amostragem e análise em laboratório devem ser registradas em cadeia de custódia (COC) e/ou ficha de campo. É necessário que esses documentos sejam apresentados devidamente preenchidos para que sejam avaliados e validados. Seguindo, então, o proposto na norma ABNT NBR 16.435, a ficha de campo ou COC deve apresentar:
 - a. Identificação do projeto, nome e endereço da área de interesse;
 - b. Empresa responsável pela coleta;
 - c. Identificação e assinatura do técnico responsável pela coleta;
 - d. Identificação e assinatura do responsável pelo transporte;
 - e. Identificação e assinatura do técnico responsável pelo recebimento das amostras no laboratório;
 - f. Identificação da amostra;

- g. Identificação da matriz a ser analisada;
- h. Parâmetros de interesse a serem analisados;
- i. Quantidade de frascos utilizados por amostra;
- j. Especificação dos preservantes eventualmente utilizados;
- k. Data e horário de amostragem;
- l. Data e horário de entrega ao laboratório;
- m. Temperatura de chegada ao laboratório.

Serão avaliadas as amostras coletadas para branco de campo, considerando uma por atividade ou a cada lote de 10 amostras. Já os brancos de equipamento devem ter sido coletados toda vez que o equipamento for utilizado e, por fim, as duplicatas devem representar 5% do total de amostras.

Serão consideradas representativas as amostras de branco de equipamento, campo e viagem sempre que se enquadrem no seguinte processo de validação:

- Será realizada a verificação analito analisado ocorre em concentrações na Amostra Branco acima do LQ (Limite de Quantificação):
 - Se sim, será verificado se 5x a concentração do metal na Amostra Branco é maior do que a menor ocorrência do metal nas outras amostras do lote:
 - Se sim, branco indica problemas de Qa/Qc no processo de amostragem do lote;
 - Se não, branco não indica problemas de Qa/Qc na amostragem do lote.

As amostras duplicatas serão consideradas suficientes uma vez que representam mais de 5% do total de amostras. Serão consideradas normais variações de amostras duplicatas na ordem de 20% (ANA, 2011) entre o Resultado Original (R1) e o Resultado da Duplicata (R2), através da fórmula para variações entre resultados (RPD):

$$RPD = \left[\frac{(R1 - R2)}{\frac{(R1 + R2)}{2}} \right] \times 100$$

Também serão utilizados outros critérios em função da heterogeneidade amostral. USEPA (2018) avalia variações em matrizes aquosas e não aquosas entre o Resultado Original (R1) e o Resultado da Duplicata (R2) para amostras com concentração superior ou igual a cinco vezes o LQ, dados os seguintes critérios, para matrizes não aquosas:

- $RPD < 50\%$, as duplicatas são válidas;
- $RPD \geq 50\%$, as duplicatas são avaliadas como:
- $|R1-R2| \geq 2*LQ$, o resultado da amostra é impreciso e deve ser discutido com ressalva;
- $|R1-R2| < 2*LQ$, as duplicatas são válidas.

3. Procedimentos de preservação e envio de amostras

A validação desse item ocorrerá por meio da avaliação das fichas de campo ou cadeias de custódia (COCs) das campanhas de amostragem de cada conjunto de dados a ser validado. A preservação e envio de amostras serão validados quando as cadeias de custódia e o *check-list* de recebimento de amostras forem apresentados devidamente assinados pelo laboratório utilizado para as análises químicas.

Quando as cadeias de custódia e o *check-list* de recebimento de amostras não estiverem disponíveis, com o objetivo de não descartar nenhum dado disponível para a AE_{ECO} em estudo, será feito contato com a equipe responsável pela produção dos dados para verificar a documentação disponível que comprove a validação dos procedimentos de preservação e envio de amostras.

4. Laboratórios

Para validação deste item, a acreditação do laboratório utilizado para análises químicas e seu respectivo escopo de acreditação serão avaliadas, tendo como referência a ABNT NBR ISO 17.025:2017. Essa avaliação visa garantir que o laboratório utilizado possui escopo de acreditação ou aceitável para análises químicas de todas as substâncias químicas a serem analisadas em todos os compartimentos do meio físico e matrizes ambientais a serem amostradas. A seguinte regra está prevista para esta avaliação nos estudos de ARE:

- Serão aceitos para fins de Avaliação de Risco Ecológico, considerando de todas as amostras obtidas em campo para os diferentes compartimentos do meio físico e matrizes ambientais, os resultados analíticos laboratoriais emitidos por laboratórios acreditados pela norma ABNT NBR ISO 17.025:2017.
- Caso as análises químicas tenham sido realizadas em laboratórios de universidades para trabalhos acadêmicos, que não possuam acreditação conforme ABNT NBR ISO 17.025:2017, essas análises não poderão ser aceitas como válidas diretamente para fins de ARSH. Neste caso, poderão ser aceitos resultados de laboratórios sem acreditação ABNT NBR 17.025:2017, desde que seja feita validação dos

procedimentos laboratoriais com base nos critérios estabelecidos por essa norma com emissão de parecer técnico de profissional especialista, e seja apresentado o Manual de Boas Práticas Laboratoriais - BPL conforme NIT-DICLA-035, para avaliar a possibilidade de validação dos resultados analíticos laboratoriais.

- Para ensaios ecotoxicológicos poderão ser aceitos resultados de laboratórios sem acreditação ABNT NBR 17.025:2017, desde que seja feita validação dos procedimentos laboratoriais com base nos critérios estabelecidos por essa norma com emissão de parecer técnico de profissional especialista, e seja apresentado o Manual de Boas Práticas Laboratoriais - BPL conforme NIT-DICLA-035, para avaliar a possibilidade de validação dos resultados analíticos laboratoriais.
- Caso sejam necessárias análises químicas específicas para as quais não exista no Brasil laboratório acreditado pela norma ABNT NBR ISO 17.025:2017, serão aceitos para fins de Avaliação de Risco Ecológico, resultados analíticos de laboratórios nacionais e internacionais não acreditados para estas análises químicas específicas. Desde que os critérios de avaliação descritos no item anterior sejam satisfeitos.

5. Procedimentos Laboratoriais

A validação desse item será feita com base nos métodos analíticos utilizados para a determinação das concentrações das substâncias químicas a serem analisadas, bem como os métodos de preparação das amostras. Será garantido que os métodos analíticos utilizados pelos diferentes conjuntos de dados são comparáveis, incluindo a verificação de ensaios de recuperação, quando disponíveis.

Adicionalmente, serão avaliados os limites de quantificação e detecção dos métodos analíticos utilizados, garantindo-se que: os limites de quantificação da amostra (LQ) são inferiores aos Padrões legais Aplicáveis à matriz analisada; os limites de detecção (LD) sejam disponibilizados sempre que disponíveis; na ocorrência de resultados inferiores ao LQ, ou seja, quando a concentração de um determinado composto não pôde ser determinada com o nível de confiança máximo do método analítico, seja reportado se houve ou não detecção do composto.

Neste contexto, serão avaliados minimamente os seguintes itens:

- Todos os laudos analíticos laboratoriais devem ser apresentados no documento;
- Os laudos laboratoriais, segundo ABNT (2015) devem apresentar valores de recuperação de traçadores (*surrogates*), valores adicionados e recuperados no branco



fortificado do laboratório (*spike*), com a unidade, incerteza de medição para cada resultado reportado e branco de método (deve ser inferior ao limite de quantificação);

- Os limites de detecção ou quantificação dos métodos analíticos devem estar expressos no documento. É imprescindível que os limites de quantificação dos métodos analíticos sejam inferiores aos Padrões Legais Aplicáveis.
- É indispensável que no laudo analítico ou em documento oficial expedido pelo laboratório, seja declarado o método de preparação das amostras utilizado. Entre os principais métodos de preparação de amostras para análise química podem ser listados:
 - Digestão Ácida: ácido nítrico (HNO₃), ácido clorídrico (HCl), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), ácido fluorídrico (HF); ácido sulfúrico (H₂SO₄) e ácido fosfórico (H₃PO₄); Digestão por aquecimento convencional; Digestão por micro-ondas; Digestão por pressão; Digestão por forno mufla;
 - Dissolução em meio aquoso;
 - Abertura por fusão, entre outros.
- Não serão aceitas amostras preparadas com método de extração total do metal.

9.1.1 Critérios de Validação de Dados Secundários¹¹

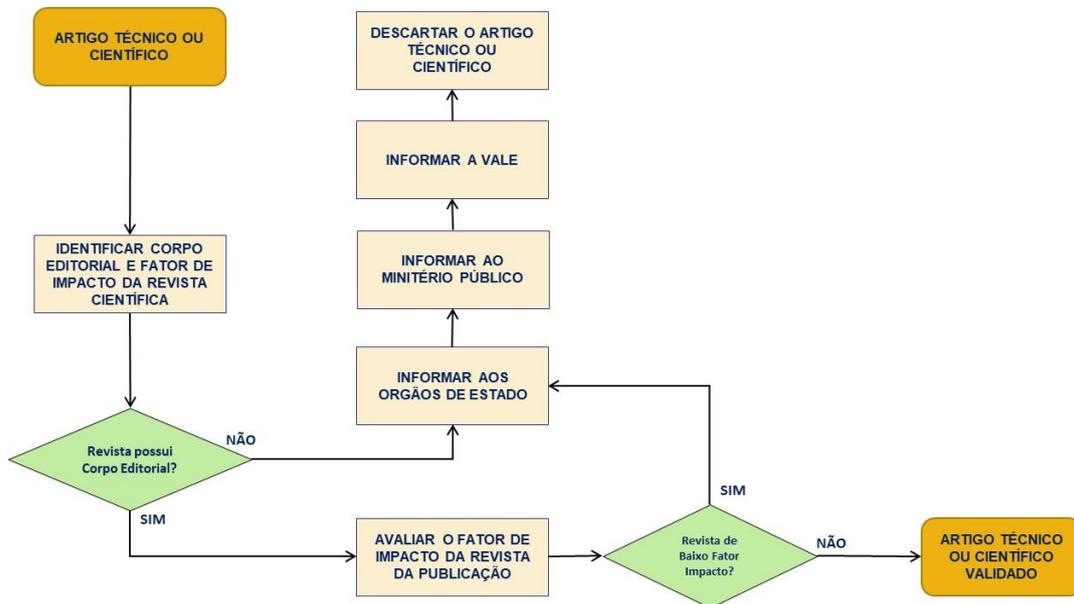
Ao final da verificação dos itens descritos acima, serão executadas tarefas com objetivo de validação, validação com ressalvas ou invalidação¹² dos dados avaliados para efeitos dos ERSHRE. Os seguintes critérios de validação serão adotados.

1. Artigos Técnicos e Científicos

O fluxograma abaixo apresenta o processo de validação para Artigos Técnicos e Científicos, sendo os critérios apresentados a seguir.

¹¹ Esta sessão foi adaptada para atendimento das **Recomendações da Auditoria Técnica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais**.

¹² A invalidação de dados secundários está tão somente relacionada a aplicabilidade dos dados consolidados para efeito do desenvolvimento dos ERSHRE, não influenciando em sua aplicação nos relatórios originais onde estes foram obtidos, bem como não definindo juízo de valor sobre a qualidade dos estudos, relatórios e projetos avaliados para formar a base de dados secundários prevista no presente projeto.

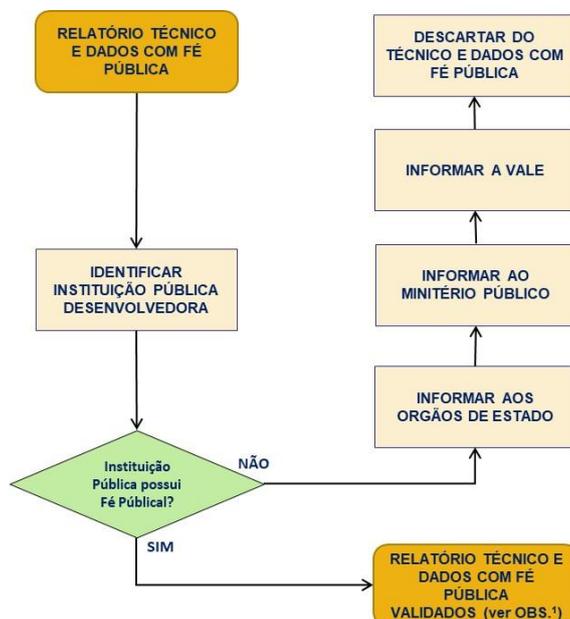


- Revista ou periódico no qual a publicação foi realizada deve ter Corpo Editorial, ou seja, pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento a partir de suas especialidades formam um grupo diversificado para realizar a revisão dos trabalhos científicos, baseada em critérios acadêmicos e científicos.
- Revista ou periódico no qual a publicação foi realizada deve ter Fator de Impacto (método usado para qualificar as revistas científicas com base nas citações que ela recebe - $FI = \frac{\text{No Citações}}{\text{No Publicações}}$ acima de B2 (a partir de 0,8).

2. Relatórios Técnicos e Dados Com Fé Pública

O fluxograma abaixo apresenta o processo de validação para Relatórios Técnicos e Dados com Fé Pública, sendo os critérios apresentado a seguir.





Fé Pública é o termo jurídico que denota um crédito que deve ser dado, em virtude de lei expressa, aos documentos e certidões emitidos por alguns servidores públicos ou pessoas com delegação do poder público no exercício de suas funções, reconhecendo-os como fidedignos.

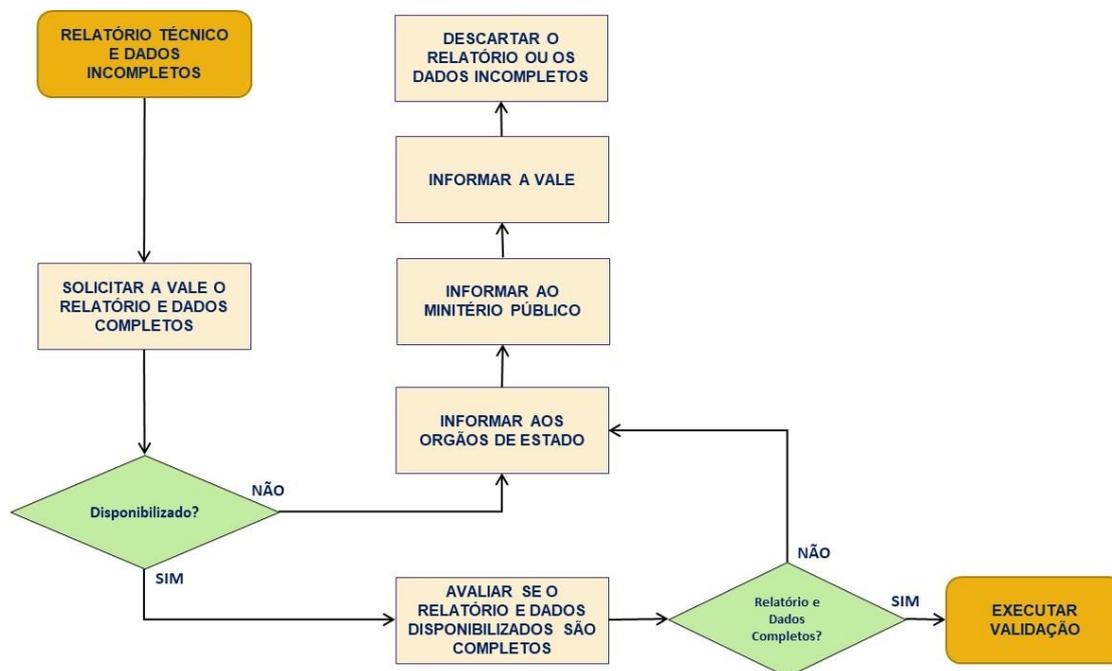
- Órgãos Federais de Estado;
- Órgãos Estaduais de Estado;
- Órgãos Municipais de Estado;
- Universidades.

OBS.¹: Caso o Laboratório de Análises Químicas utilizado pela Instituição com Fé Pública não seja ISO NBR 17.025, a Empresa Executora buscará informações de Qa/Qc e BPL (NIT-DICLA-035) para avaliar a possibilidade de validação dos resultados analíticos laboratoriais.

3. Relatórios Técnicos e Dados Incompletos

O fluxograma abaixo apresenta o processo de validação para Relatórios Técnicos e Dados Incompletos, sendo os critérios apresentado a seguir.





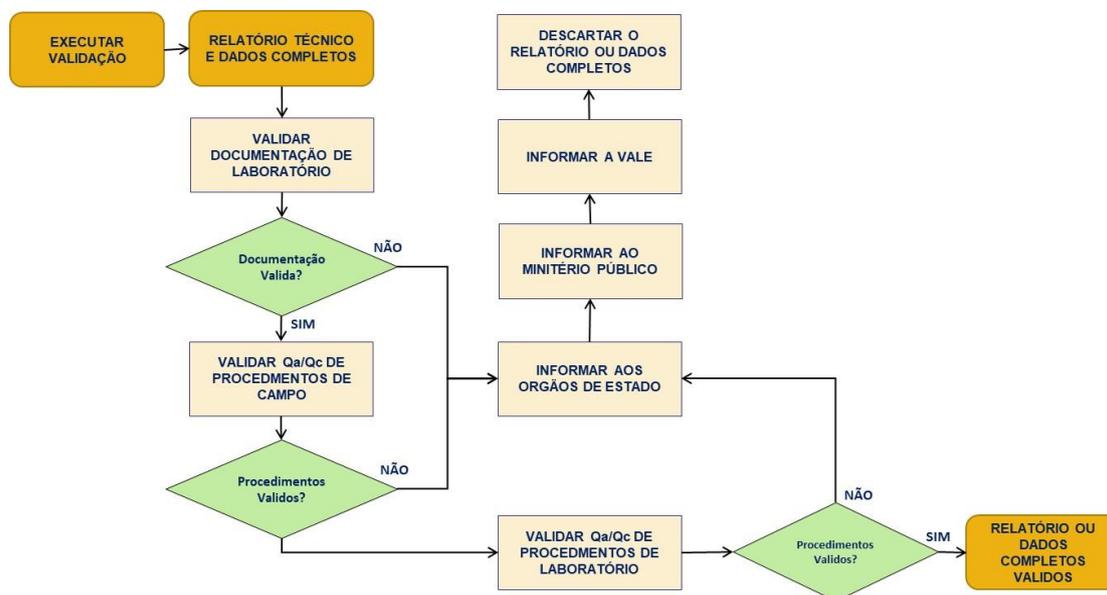
Relatórios e dados serão classificados como incompletos quando ocorrer:

- Ausência de Relatório;
- Ausência de Laudos Laboratoriais;
- Ausência de Descrição Metodológica;
- Ausência de Ficha de Campo ou Cadeia de Custódia;
- Ausência de *Check List* de Recebimento;
- Ausência de Anexos;
- Ausência de Responsabilidade Técnica.

4. Relatórios Técnicos e Dados Completos

O fluxograma abaixo apresenta o processo de validação para Relatórios Técnicos e Dados Completos, sendo os critérios apresentados a seguir.





Abaixo são apresentados os critérios para validação de relatórios e dados completos.

CRITÉRIO	RESPOSTA	VALIDAÇÃO POSSÍVEL	ANÁLISE
1. DOCUMENTAÇÃO DE LABORATÓRIO			
1.1. Laboratório Acreditado?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Laudo
1.2. Cadeia de Custódia Adequada (assinadas e completa)?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado / Aprovado com Ressalva	Lote
1.3. Check List de Recebimento Presente?	SIM / NÃO	Aprovado / Aprovado com Ressalva	Lote
1.4. Check List de Recebimento Adequado?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado / Aprovado com Ressalva	Lote
1.5. Holding Time Obedecido para a Matriz e Preservante?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
1.6. Amostra Identificada e georreferenciada?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Amostra
1.7. Temperatura fora da faixa adequada (4°C ± 2)?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
1.8. Frascarias Adequada para Matriz Coletada?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
1.9. Método de Extração (sequencial ou não) Adequado?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado / Aprovado com Ressalva	Laudo
1.10. Limite de Quantificação maior de Padrão Legal Aplicável?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
1.11. Controle e Garantia da Qualidade laboratorial Presente?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Laudo

CRITÉRIO	RESPOSTA	VALIDAÇÃO POSSÍVEL	ANÁLISE
2. QA/QC DE AMOSTRAGEM E DE TAREFAS DE CAMPO			
2.1. Método de Amostragem Previsto em Metodologia Aplicável descrita nacional, internacional ou nos EARSHRE?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Laudo
2.2. Equipamento de Amostragem Adequado a Metodologia Aplicável descrita nacional, internacional ou nos EARSHRE?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado / Aprovado com Ressalva	Lote
2.3. Acondicionamento e Transporte das Amostras Adequado a Metodologia Aplicável descrita nacional, internacional ou nos EARSHRE?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado / Aprovado com Ressalva	Lote
2.4. Evidências de Campo que comprovem o processo de amostragem presentes no Relatório Técnico?	SIM / NÃO	Aprovado / Aprovado com Ressalva	Lote
2.5. Amostras Georreferenciadas e Identificadas, bem como correlacionáveis entre Relatório Técnico e Laudo Analítico?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
2.6. Amostras Duplicatas Realizadas?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
2.7. Critérios de Qa/Qc Validados para as Amostras Duplicatas?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
2.8. Amostras Duplicatas em Quantidade Adequada a Metodologia descrita nacional, internacional ou nos EARSHRE?	SIM / NÃO	Aprovado / Aprovado com Ressalva	Lote



CRITÉRIO	RESPOSTA	VALIDAÇÃO POSSÍVEL	ANÁLISE
2. QA/QC DE AMOSTRAGEM E DE TAREFAS DE CAMPO			
2.9. Amostras de Branco de Campo Realizadas?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
2.10. Critérios de Qa/Qc Validados para as Amostras de Branco de Campo?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
2.11. Amostras de Branco de Campo em Quantidade Adequada a Metodologia descrita nacional, internacional ou nos EARSHRE?	SIM / NÃO	Aprovado / Aprovado com Ressalva	Lote
2.12. Amostras de Branco de Equipamento Realizadas?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
2.13. Critérios de Qa/Qc Validados para as Amostras de Branco de Equipamento?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
2.14. Amostras de Branco de Equipamento em Quantidade Adequada a Metodologia descrita nacional, internacional ou nos EARSHRE?	SIM / NÃO	Aprovado / Aprovado com Ressalva	Lote
2.15. Amostras de Branco de Viagem Realizadas?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
2.16. Critérios de Qa/Qc Validados para as Amostras de Branco de Viagem?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
2.17. Amostras de Branco de Viagem em Quantidade Adequada a Metodologia descrita nacional, internacional ou nos EARSHRE?	SIM / NÃO	Aprovado / Aprovado com Ressalva	Laudos

CRITÉRIO	RESPOSTA	VALIDAÇÃO POSSÍVEL	ANÁLISE
3. QA/QC DE LABORATÓRIO			
3.1. Amostras de Branco de Método Laboratorial Realizadas?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
3.2. Critérios de Qa/Qc Validados para as Amostras de Branco de Método Laboratorial?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
3.3. Amostras Fortificadas (<i>Spike</i>) Realizadas?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
3.4. Critérios de Qa/Qc Validados para Amostras Fortificadas (<i>Spike</i>)?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
3.5. Amostras para de Análise de Traçador (<i>surrogates</i>) Realizadas?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote
3.6. Critérios de Qa/Qc Validados para Amostras para de Análise de Traçador (<i>surrogates</i>)?	SIM / NÃO	Aprovado / Não Aprovado	Lote

9.2 Dados do Meio Físico

Os dados secundários obtidos serão suficientes para geração de uma base de dados ambientais que possa ser utilizada para o desenvolvimento da Avaliação de Risco Ecológico. Caso contrário, serão complementados pela execução do *Plano de Investigação para Meio Ambiente*.

Os parâmetros do meio físico a serem avaliados devem estar relacionados às características geológicas, hidrogeológicas e hidrológicas que podem influenciar o comportamento do contaminante no meio físico. A *Validação dos Dados do Meio Físico* envolverá uma avaliação técnica dos resultados, considerações e interpretações constantes nos relatórios avaliados, não sendo um processo de exclusão do dado base para interpretação, mas sim uma checagem quanto às conclusões e recomendações do texto técnico.



9.2.1 Solo e Rocha

A descrição pedológica e litológica da área deve seguir o descrito na ABNT NBR 15492 (Sondagem de reconhecimento para fins de qualidade ambiental - Procedimento), bem como estar adequada para possibilitar a caracterização do comportamento dos contaminantes no meio físico, sendo necessário, para tanto verificar:

- Se os métodos analíticos laboratoriais, bem como métodos de preparação e extração estão de acordo e compatíveis com as metodologias propostas para quantificação analítica para fins ambientais. Agrupar os resultados analíticos dos estudos avaliados por método analítico e metodologia de preparação utilizada para as amostras.
- Se as amostras de solo superficial foram coletadas até no máximo 10 centímetros de profundidade, sendo esta composta a partir de oito alíquotas obtidas a partir da definição de um círculo de dois metros de raio, conforme descrito no Apêndice 04;
- Se os pontos de amostragem nas áreas não impactadas foram definidos nas mesmas condições geomorfológicas e pedológicas relativas à área impactada;
- Se o número e a distribuição das sondagens realizadas são adequados, suficientes e representativos para a área em estudo;
- Se a descrição das sondagens ambientais, no caso de solo subsuperficial, foi realizada pela identificação de extratos diferenciados ao longo do perfil de sondagem identificando o que é solo natural e lama de rejeitos, bem como coletando amostras de solo para análise granulométrica para cada variação textural. Este procedimento não é válido para solo superficial, haja vista que este é coletado até 10cm de profundidade no máximo, entretanto sempre deve ser coletada uma amostra de solo superficial para análise granulométrica.
- Se as amostras de solo subsuperficial destinadas à análise química obtidas em um determinado perfil de sondagem foram coletadas para cada extrato descrito no perfil de sondagem, considerando as diferentes composições texturais descritas em campo;
- Se as profundidades alcançadas pelas sondagens ultrapassaram a espessura local da lama de rejeito, quando esta ocorrer, e se a descrição do material amostrado foi realizada adequadamente;
- A consistência da interpretação dos dados geofísicos, quando disponíveis;
- Se na interpretação da geologia e geoquímica local foram levadas em consideração as características geológicas e geoquímicas regionais;

- Se foi realizada descrição da composição química do solo, e sua relação com as características texturais identificadas.
- A qualidade e consistência dos dados provenientes das determinações realizadas para cada uma das camadas representativas para a caracterização do solo e rocha são (quando aplicável), tais como granulometria, pH, potencial redox, fração de carbono orgânico, capacidade de troca catiônica (CTC), Carbono Orgânico Total (COT), densidade aparente, umidade, permeabilidade, porosidade total e efetiva.

9.2.2 Aquífero

A caracterização hidrogeológica da Área de Estudo Ecológico em estudo deve ser avaliada, quando previsto no Modelo Conceitual, visando ao entendimento do comportamento dos contaminantes, sendo necessário, para tanto, verificar:

- Se os métodos analíticos laboratoriais, bem como métodos de preparação e extração estão de acordo e compatíveis com as metodologias propostas para quantificação analítica para fins ambientais. Agrupar os resultados analíticos dos estudos avaliados por método analítico e metodologia de preparação utilizada para as amostras.
- Se os poços cacimba, cisternas, nascentes e o poços de monitoramento foram adequadamente georreferenciados e identificados conforme custodiamento;
- Se a instalação dos poços de monitoramento, quando aplicável, foi realizada conforme a ABNT NBR 15495-1 e 15495-2 (Poços de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Aquíferos Granulares).
- Se a classificação do aquífero, conforme a Resolução Conama nº 396/2008 e suas revisões posteriores;
- Se na interpretação da hidroquímica local foram levadas em consideração as características hidroquímica regionais;
- Quando disponível, se o mapa potenciométrico foi elaborado adequadamente, considerando o número de pontos de medição de nível d'água, a data de medição e o nivelamento dos poços, localização dos filtros em relação aos tipos litológicos e aquífero a ser avaliado;
- Quando disponível, se a geometria das linhas equipotenciais é consistente com a geologia e o relevo locais e se possibilita a identificação de áreas de recarga ou descarga eventualmente existentes ao longo da seção do rio compreendida na área de estudo;



- Quando disponível, se o sentido de fluxo das águas subterrâneas é consistente, considerando a potenciometria;
- Se a taxa de infiltração/recarga, porosidade efetiva, condutividade hidráulica, carga hidráulica, espessura saturada e gradiente hidráulico foram determinados ou se foram estimados. Em caso de estimativa, verificar a adequação desses parâmetros para o uso pretendido e a fonte de dados, caso contrário, verificar se a quantidade de dados é suficiente e identificar se a metodologia utilizada para as determinações foi a adequada;
- Quando previsto e identificado no Modelo Conceitual da Área em estudo, aquíferos profundos devem ser avaliados quanto as suas características e utilização, em caso de aquíferos confinados e semi-confinados, verificar a possibilidade de estarem conectados com o aquífero livre;
- A existência de aquitardes, aquicludes e aquíferos suspensos, estabelecendo a conexão entre eles;
- A existência e localização de poços de captação de água subterrânea, suas características construtivas, dados de produção, dados de teste de bombeamento, informações sobre zona de captura, bem como a geologia a eles associada;
- Se foram realizadas determinações de granulometria, pH, potencial redox, carga hidráulica, condutividade hidráulica, espessura saturada, gradiente hidráulico e porosidade efetiva, e caso necessário a fração de carbono orgânico;
- A existência de interpretação da relação hidrodinâmica entre aquíferos e cursos d'água superficial.

9.2.3 Águas superficiais

Para os corpos d'água encontrados na Área de Estudo Ecológico em estudo, será necessário verificar:

- Se os métodos analíticos laboratoriais, bem como métodos de preparação e extração estão de acordo e compatíveis com as metodologias propostas para quantificação analítica para fins ambientais. Agrupar os resultados analíticos dos estudos avaliados por método analítico e metodologia de preparação utilizada para as amostras.
- O enquadramento, conforme a Resolução CONAMA nº 357/2005, e suas revisões posteriores;
- O sentido de escoamento e sua relação com o sistema de drenagens regional;



- A vazão do corpo d'água (preferencialmente a Q7,10 - vazão mínima de 7 dias seguidos em um período de recorrência de 10 anos), para o caso de rios;
- Sua perenidade e a vazão de recarga ou descarga associada ao aquífero local;
- A largura e a profundidade do corpo d'água, considerando quando disponíveis seções topo batimétricas;
- As variações de maré, quando aplicável;
- Avaliar estudos de hidrosedimentologia, modelamento de fluxos de água superficial, balanços hídricos da bacia de contribuição na qual está inserida a área em estudo, quando disponíveis;
- Os resultados de determinações realizadas, tais como pH, condutividade elétrica, potencial redox, oxigênio dissolvido, temperatura, sólidos totais em suspensão e dissolvidos. Verificar se os pontos de medidas realizadas para os parâmetros mencionados acima são suficientes e representativos.

9.3 Dados Ecológicos e Ecotoxicológicos

9.3.1 Ensaios Ecotoxicológicos e Dados Ecológicos

Os dados ecotoxicológicos e ecológicos da biota aquática e terrestre disponíveis em estudos que atualmente vem sendo desenvolvidos para o monitoramento da biodiversidade associados ao rompimento da barragem B I, serão validados com o objetivo de identificar um grupo de informações secundárias a serem utilizadas para identificar possíveis impactos ou efeitos associados pelos compostos presentes no rejeito, solo, sedimento e água superficial impactados pelo rompimento, englobando mecanismos, processos e respostas de química ambiental, ecologia e toxicologia. Também serão validadas informações sobre a distribuição, o comportamento e as alterações do meio biótico em função do rompimento da barragem B I.

Com o intuito de verificar os efeitos sobre os diversos grupos biológicos presentes nos ecossistemas a serem estudados, serão avaliados parâmetros letais e subletais sobre espécies de diferentes níveis tróficos. Para dados secundários gerados a partir de ensaios de ecotoxicidade, será avaliado se as espécies utilizadas representam grupos ou guildas, e diferentes níveis tróficos, gerando assim subsídios para uma melhor avaliação e caracterização dos efeitos agudos e crônicos dos estressores ambientais (físicos, químicos e biológicos).

Os ensaios ecotoxicológicos devem ter sido realizados por laboratório acreditados pela NBR ISO 17025 ou que apresente o Manual de Boas Práticas Laboratoriais - BPL conforme NIT-DICLA-035, para avaliar a possibilidade de validação dos resultados laboratoriais ecotoxicológicos.

Caso disponíveis, serão avaliados e validados minimamente os dados secundários de ensaios de ecotoxicidade considerando o descrito abaixo:

- Biota Aquática:
 - Alga *Raphidocelis subcapitata* (ensaio crônico conforme ABNT NBR 12648:2018);
 - Microcrustáceos *Daphnia similis* (ensaio agudo conforme ABNT NBR 12713:2016) e *Ceriodaphnia dubia* e *Ceriodaphnia silvestrii* (ensaio crônico conforme ABNT NBR 13373:2017);
 - Peixe *Danio rerio* (ensaio agudo conforme ABNT NBR 15088:2016);
 - Bactéria *Vibrio fischeri* (ensaio agudo conforme ABNT NBR 15411-3:2021);
 - *Hyalella azteca* (ensaio agudo conforme ABNT NBR 15470:2021);
 - *Mysidopsis juniae* (ensaio agudo conforme ABNT NBR 15308:2017);
 - *Skeletonema costatum* (ensaio crônico conforme ABNT NBR 16181:2021);
 - *Grandidierella sp.*(ensaio agudo conforme ABNT NBR 15638:2016).
- Biota Terrestre:
 - Ensaio agudo conforme ABNT NBR 15537:2014 - Ecotoxicologia terrestre - Toxicidade aguda - Método de ensaio com minhocas (Lumbricidae);
 - Ensaio agudo e crônico conforme ABNT NBR ISO 16387:2012 - Qualidade do solo — Efeitos de poluentes em Enchytraeidae (*Enchytraeus sp.*) — Determinação de efeitos sobre reprodução e sobrevivência;
 - Ensaio agudo e crônico conforme ISO 17512-2:2011 – Qualidade do solo – Teste de prevenção para determinar a qualidade dos solos e os efeitos dos produtos químicos no comportamento – Parte 2: Teste com colêmbolos (*Folsomia candida*);
 - Ensaio agudo conforme ISO 11268-1:2012 – Qualidade do solo – Efeitos de poluentes em minhocas – Parte 1: Determinação da toxicidade aguda para *Eisenia fetida* / *Eisenia andrei*;
 - Ensaio agudo e crônico conforme ISO 11268-2:2012 – Qualidade do solo – Efeitos dos poluentes nas minhocas – Parte 2: Determinação dos efeitos na reprodução de *Eisenia fetida* / *Eisenia andrei*
 - Ensaio agudo e crônico conforme ABNT NBR ISO 11269-2:2014 - Qualidade do solo — Determinação dos efeitos de poluentes na flora

terrestre – Parte 2: Efeitos do solo contaminado na emergência e no crescimento inicial de vegetais superiores.

- Ensaios Ecotoxicológicos na Lama de Rejeitos
 - ABNT NBR 10.004:2004 (item 4.2.1.4).
- Ensaios de Genotoxicidade¹³ em Solos/Sedimentos e ou Rejeitos:
 - Guia OECD Guidelines for the Testing of Chemicals; Sensibilização cutânea em cobaias OECD 406 (1992);
 - Teste de Micronúcleos em células de mamíferos in vivo OECD 407 (2008);
 - Teste de Mutação Reversa em *Salmonella typhimurium* (AMES) OECD 471 (1997), ABNT NBR 15537/2014, ABNT NBR 15469/2021;
 - Toxicidade cutânea aguda para ratos OECD 402 (2017);
 - Toxicidade dermal para ratos - Doses repetidas (21/28 dias) OECD 410 (1981);
 - Toxicidade inalatória aguda para ratos OECD 403 (2009);
 - Toxicidade para ratos doses repetidas - 28 dias - dose limite OECD 407 (2008);
 - Toxicidade oral aguda para ratos OECD 423 (2001).

Os testes acima devem obedecer às alterações do CONCEA (setembro/2019), sendo realizados *in vitro*, quando possível, ou substituídos por testes equivalentes.

A Tabela 1 apresenta os ensaios de ecotoxicidade que se disponíveis serão avaliados e validados, e poderão ser incorporados à base de dados secundários para espécies de flora identificadas na AE_{ECO} em estudo.

¹³ Os agentes genotóxicos são aqueles que interagem com o DNA produzindo alterações em sua estrutura ou função e quando essas alterações se fixam de forma capaz de serem transmitidas, denominam-se mutações. As mutações são a fonte de variabilidade genética de uma população, sendo portanto fundamentais para a manutenção das espécies. Porém, podem causar doenças tanto nos indivíduos como nos seus descendentes, dependendo da quantidade, do tipo e local onde ocorrem e alterar o balanço dos ecossistemas.

Tabela 1 – Ensaio Ecotoxicidade em Plantas Terrestres e Aquáticas

Espécie	Grupo taxonômico	Tipo de Ambiente	Duração do ensaio	Tipo de exposição	Expressão dos resultados	Referência
<i>Zea mays</i>	Plantas	Rural	Ciclo de crescimento a partir de sementes	Aguda	PT50, LD50, Tóxico, Não Tóxico	Chang et al. 1992
<i>Allium cepa</i>	Plantas	água superficial	Germinação das sementes e desenvolvimento de radículas	Aguda	CENO, CEO	Sobrero et al. 2004
<i>Lactuca sativa</i>	Plantas	Solo	Germinação de sementes (5 dias)	Aguda	Tóxico, Não Tóxico	Bowers et al. 2009
-	Plantas terrestres	Solo	Germinação de sementes de 14 a 21 dias	-	NOEC, LOEC	OECD, 2003
-	Plantas terrestres	Solo	Germinação de sementes e estágios iniciais de crescimento	-	-	ABNT NBR 11.269-2/2014
-	Plantas terrestres e aquáticas	Solo e Água superficial	Germinação de sementes e estágios iniciais de crescimento	-	-	USEPA, 1996

9.3.2 Procedimentos de Captura e Obtenção de Indivíduos de Fauna e Flora

Os procedimentos de captura e obtenção de indivíduos de fauna e flora para fins de desenvolvimento dos Estudos de Avaliação de Risco Ecológico serão validados conforme metodologia descrita no *Dimensionamento do Plano de Investigação para Meio Ambiente*. É importante ressaltar que a fim de diminuir o impacto e estresse provocado pela abertura de novas trilhas e coletas, serão utilizados os resultados dos dados coletados no âmbito do Programa de diagnóstico de danos ambientais sobre meio biótico que está sendo desenvolvido pela Amplo.

9.4 Avaliação de Suficiência e Representatividade de Dados

Uma vez cumpridas às tarefas descritas anteriormente que visam a *Avaliação e Validação de Dados Ambientais*, será desenvolvida a *Avaliação de Suficiência e Representatividade de Dados* secundários (ao final da *Compilação e Análise de Dados*) e primários (ao final da execução do *Plano de Investigação para Meio Ambiente*).

Sendo assim, serão aplicadas técnicas estatísticas e geoestatísticas visando identificar não conformidades relativas à suficiência dos dados disponíveis para a quantificação da ARE, bem como análise de representatividade espacial dos dados avaliados e validados. O detalhamento metodológico a ser aplicado na *Avaliação de Suficiência e Representatividade de Dados* é apresentado no Apêndice 01¹⁴ deste documento.

¹⁴ Este apêndice foi adaptado para atendimento à **Nota Técnica nº 13/IGAM/GEMOQ/2021**



É importante ressaltar que A utilização de Krigagem Ordinária¹⁵ será utilizada em duas etapas distintas do presente projeto:

- na *Avaliação de Suficiência e Representatividade* (como descrito no Apêndice 01). Nessa etapa, o foco da modelagem estará voltado à avaliação da cobertura espacial dos modelos geoestatísticos, à qualidade de seus ajustes bem como ao quantitativo de pontos disponível na área investigada.
- Em um segundo momento, com dados já suficientes e representativos, a krigagem poderá ser aplicada no contexto de análise e interpretação de dados. Neste caso, não somente a SQI crítica bem como outras SQIs poderão ser modeladas espacialmente (desde que apresentem estrutura de correlação espacial bem como ajustes adequados), de forma a auxiliar no entendimento da distribuição espacial das concentrações e, portanto, no entendimento espacial do risco. Esse entendimento será obtido a partir dos mapas interpolados com a definição de contornos de concentrações. É importante observar que a modelagem permitirá a estimação de resultados em locais não amostrados e essa informação será utilizada para a compreensão da matriz e do risco. Porém, somente os resultados amostrados em concentrações analíticas máximas serão utilizados para o cálculo de risco.

¹⁵ Este item foi adequado para atendimento à Nota **Técnica nº 6/FEAM/GERAQ/2021**



10 AVALIAÇÃO DE RISCO ECOLÓGICO

A ARE tem por objetivo caracterizar os riscos ao meio biótico (flora e fauna) relacionados à potencial exposição às substâncias químicas de interesse identificadas em uma Área de Estudo Ecológico (AE_{ECO}) em estudo e, a partir dessa caracterização, auxiliar a tomada de decisão quanto à necessidade de implementação de medidas de intervenção para reabilitação do meio ambiente e monitoramento ambiental. Os riscos a serem caracterizados na ARE são aqueles relacionados à potencial exposição da fauna e flora às Substâncias Químicas de Interesse (SQI) associadas ao rompimento da barragem B I.

A ARE será desenvolvida com base nas diretrizes constantes na Decisão de Diretoria nº 038/2017/C, de 07 de fevereiro de 2017 (CETESB, 2017), na metodologia RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a e 1998) e no Guia Canadense para *Ecological Risk Assessment* (ECCC, 2012). Conforme descrito no RAGS (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018) a ARE deve seguir as etapas abaixo:

- [1] Etapa 1 (Tier 1): *Screening Level Ecological Risk Assessment* (SLERA);
- [2] Etapa 2 (Tier 2): *Baseline Ecological Risk Assessment* (BERA).

A SLERA será baseada em dados secundários obtidos da etapa *Compilação, Análise e Validação de Dados*, sendo constituída pelas seguintes tarefas:

- Formulação do Problema;
- Avaliação de Efeitos Ecológicos;
- Estimativa de Exposição;
- Cálculo Preliminar do Risco Ecológico.

Se os resultados da SLERA indicarem possíveis riscos ecológicos, a Etapa Tier 2 - BERA será executada. A BERA será iniciada pelo refinamento da formulação do problema, avaliação de efeitos ecológicos, estimativa de exposição e cálculo de detalhado do risco, com base nos dados primários obtidos pela execução do *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente*.

Serão quantificados apenas os riscos associados às substâncias químicas de interesse que estiveram localizadas em pontos de amostragem em Unidades de Exposição do tipo RED (Região de Exposição Direta) e REI (Região de Exposição Indireta). Este procedimento garante que sejam quantificados os riscos para todas as concentrações obtidas em pontos de amostragem dentro de uma área impacta e fora desta área na região de *background*. Sendo assim, não serão

calculados riscos ecológicos para a RNE (Região de Não Exposição) associado aos níveis basais locais (*background*).

As etapas que compõem o SLERA e BERA dos Estudos de ARE encontram-se listadas abaixo:

- [1] Formulação do problema, conforme capítulo 3 *Baseline Risk Assessment Problem Formulation* do RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a);
- [2] Caracterização da exposição, conforme capítulo 4 *Study Design and Data Quality Objective Process* do RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a);
- [3] Análise de toxicidade, conforme capítulo 6.3 *Analysis of Ecological Exposures and Effects* do RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a);
- [4] Caracterização dos riscos – Linhas de evidências, conforme capítulo 7 *Risk Characterization* do RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a);
- [5] Análise de incerteza, conforme capítulo 7.4 *Uncertainty Analysis do RAGS Ecological Risk* (US.EPA, 1997a);
- [6] Cálculo dos valores máximos permissíveis no meio, conforme capítulo 8 *Risk Management* do RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a).

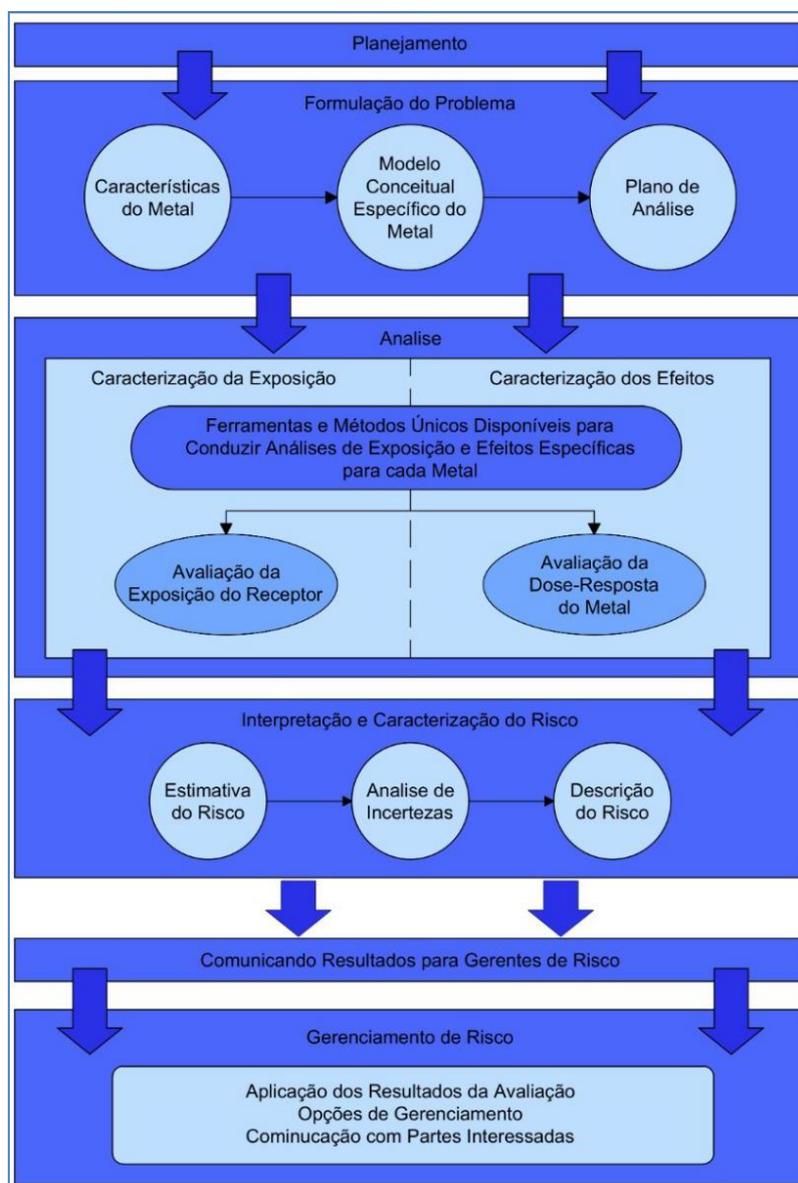
Será importante que o Estudo de ARE a ser desenvolvido para bacia do rio Paraopeba utilize o equacionamento adequado das equações de cálculo de risco ecológico para animais silvestres e estabeleça um processo sistemático de avaliação de causalidade entre efeitos observados e exposição a contaminantes, incluindo a avaliação de diferentes linhas de evidência. De igual importância, para o caso do rompimento da barragem B I, será necessário a identificação de estressores¹⁶ não só químicos, mas também físicos e biológicos.

A **Figura 7** apresenta a estrutura que será utilizada para a quantificação do risco.

¹⁶ Estressores são substâncias (estressores químicos, tais como substâncias tóxicas ou nutrientes), entidades físicas (estressores físicos, tais como sedimentos em suspensão) ou entidades biológicas (estressores biológicos, tais como espécies não nativas) que cause efeitos indesejáveis à saúde ou condição biológica de um espécime (ECCC, 2012).



Figura 2 – Processo de Gerenciamento com Base no Risco adotado pelo estudo. Modificado de Framework for Metals Risk Assessment (USEPA, 2007).



Para o adequado desenvolvimento dos estudos de ARE para a Bacia do rio Paraopeba, serão consideradas:

[1] Concentrações de *Background* (Níveis Basais)

- Como os níveis de base (naturais e antropogênicos) dos metais devem ser caracterizados para a escala espacial selecionada da avaliação?
- As informações específicas da Área de Estudo Ecológico estão disponíveis ou o uso de médias ou distribuições espaciais é compatível com o nível de relevância e certeza ecológica exigido pela análise de risco?

- Para avaliações de riscos ecológicos, estão disponíveis dados de aclimatação, adaptação e tolerância para organismos preocupantes e essas questões estão sendo consideradas?

[2] Misturas Complexas e Interações Metais-Organismo

- Como serão consideradas as interações que afetam o Ingresso e os efeitos sistêmicos associados a ele?
- Serão consideradas questões como redução da reatividade e aumento da mobilidade de compostos orgânicos que formam complexos com metais e possíveis aumentos nos efeitos tóxicos de compostos orgânicos que formam complexos lipofílicos com metais?
- As interações com outros metais e com compostos orgânicos (por exemplo, As e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) serão abordadas?

[3] Essencialidade

- Os déficits nutricionais, que podem ser inerentemente e podem aumentar a vulnerabilidade de indivíduos de espécies alvo a estressores, estão incluídos na avaliação de risco ecológico?
- Como serão caracterizadas a toxicidade e as deficiências de metais essenciais?

[4] Formas de ocorrência dos metais

- A química ambiental é um fator primário que influencia a especiação de metais e subsequente transporte, absorção e toxicidade, como será incluída na avaliação de risco ecológico?
- Como as condições ambientais (por exemplo, reações de pH e redução da oxidação, sólidos totais em suspensão) serão abordadas para determinar a especiação e a mobilidade do metal?

[5] Toxicocinética / Toxicodinâmica de Metais

- Quais respostas relacionadas a metais são mais preocupantes na avaliação de riscos?
- Como os fatores bióticos e abióticos que influenciam a bioacumulação e a biomagnificação na cadeia trófica dos metais de interesse serão incorporados na avaliação de risco ecológico?



- Como serão considerados os fatores ambientais que afetam a especiação de metais e a capacidade metabólica da biota para regular as concentrações internas de metais (controles homeostáticos) no cálculo do potencial de bioacumulação de metais?

Também será considerado:

- As substâncias oriundas de outras atividades antrópicas ou constituintes do ambiente geoquímico local também devem ser consideradas como estressores químicos potenciais não relacionados ao acidente em investigação, mas que podem causar efeitos toxicológicos e ecológicos (note: a desconsideração destas pode dificultar a interpretação dos efeitos a níveis de população e comunidade);
- A análise deve se concentrar no cenário atual sendo que dados históricos só devem ser utilizados para discutir a evolução temporal do risco;
- O cálculo de valores máximos permissíveis (VMP) no meio não deve ser realizado se a lacuna de dados da linha química for importante (p.ex. número limitado de amostras que permitam análise estatística tanto para o cenário impactado como cenário não impactado);
- Conclusões sobre a necessidade de medidas de intervenção só devem ser feitas se a qualidade e quantidade de dados disponíveis permitirem;
- Proposições de medidas de gerenciamento do risco devem detalhadamente verificar a relação causal entre efeitos ecológicos e toxicológicos potencialmente observados e estressores físicos e químicos resultantes do acidente da barragem B I.

Neste contexto, inicialmente será realizada a etapa de Compilação, Análise e Validação de Dados Secundários, válida para a metodologia RAGS *Ecological Risk*, destinada a gerar a Base de Dados iniciais para execução da ARE.

Após a consolidação de dados prevista na *Compilação, Análise e Validação de Dados*, será realizada a Formulação do Problema, isto é, formular hipóteses preliminares do perigo associado a cada SQI e dos efeitos ecológicos, e assim, determinar o escopo e objetivos globais da ARE a ser realizada conforme descrito no *Framework for Metals Risk Assessment* (US EPA, 2007) e capítulo 3 *Baseline Risk Assessment Problem Formulation* do RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a).



10.1 COMPILAÇÃO, ANÁLISE E VALIDAÇÃO DE DADOS SECUNDÁRIOS

Esta etapa foi desenvolvida utilizando o capítulo 3 *Baseline Risk Assessment Problem Formulation* do RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a) e capítulo 2 *Framework for Metals Risk Assessment* do *Framework for Metals Risk Assessment* (US.EPA, 2007).

A etapa de Compilação Análise e Validação de dados será realizada utilizando dados secundários, de modo a identificar rotas de exposição aplicáveis aos estudos de ARE. As informações levantadas por essa etapa serão utilizadas para a definição do Modelo Conceitual Ecológico (MCA_{EC}). O modelo MCA_{EC} documentará todas as informações relativas aos potenciais receptores ecológicos identificados na AE_{ECO} em estudo, os quais podem estar em contato com as Substâncias Químicas de Interesse (SQI) associadas ao rejeito originado pelo rompimento da barragem B I.

Em projetos de Avaliação de Risco Ecológico, o desenvolvimento de modelos conceituais de exposição ecológica é fundamental para definir os cenários de exposição que venham a ocorrer na área em estudo, bem como definir claramente as fontes secundárias de contaminação, compartimentos de interesse no meio físico, estressores ambientais e substâncias químicas de interesse, rotas de exposição ecológicas, vias de ingresso e receptores ecológicos.

Todas as informações serão avaliadas segundo a sua fidedignidade, considerando as fontes de informação utilizadas, metodologia aplicada, e processo de controle e garantia da qualidade na geração de dados.

A etapa de Compilação, Análise e Validação de Dados será dividida em:

- Compilação e Análise de Dados;
- Validação de Dados Secundários.

10.1.1 Compilação e Análise de Dados Secundários

A *Compilação e Análise de Dados Secundários* será desenvolvida considerando os seguintes grupos de dados:

- Uso e Ocupação do Solo;
- Impacto e Alterações Ambientais;
- Aspectos do Meio Físico;
- Aspectos do Meio Biótico.



10.1.1.1 Uso e Ocupação do Solo

Consiste no levantamento detalhado do uso e ocupação do solo na Área de Estudo Ecológico Alvo a ser avaliada, contemplando todas as características que possam tipificar as características ocupacionais e de uso do solo que possam influenciar biota aquática e biota terrestre presentes na região na qual está contida a AA_{ECO}.

Dentre os principais grupos de informações que serão levantadas estão:

- Tipo de ocupação (residencial urbana ou rural, comercial, industrial, agrícola extensiva ou de subsistência, pecuária, pesca, área de preservação permanente, recreação, entre outros);
- Densidade e Extensão da ocupação;
- Receptores ambientais (ex.: rios, córregos) e construções civis que impeçam a migração de espécies;
- Dinâmica de uso como tipo de atividade agrícola (ex.: cacaueteira, cana de açúcar, café), tipo de indústrias identificadas, entre outras.

10.1.1.2 Impacto e Alterações Ambientais

Consiste no levantamento detalhado das substâncias químicas e suas concentrações identificadas em cada compartimento de interesse do meio físico e ambiental da AE_{ECO} em estudo.

As seguintes fontes de dados ambientais serão utilizadas:

- Programas de Monitoramento e estudos de caracterização ambiental executados para acompanhamento da qualidade ambiental da região atingida;
- Dados de monitoramento de órgãos regulatórios (ex.: IGAM, FEAM, IEMA);
- Dados coletados por especialistas do Ministério Público relacionados ao rompimento da barragem B I;
- Trabalhos acadêmicos (ex.: Universidades, Órgãos de Pesquisa);
- Outros relatórios técnicos e estudos publicados.

Nesta etapa serão desenvolvidos mapas de distribuição espacial das concentrações identificadas nos diferentes compartimentos do meio físico e matrizes alimentares investigadas, com objetivo de auxiliar no estabelecimento de regiões impactadas pelo rompimento da barragem de Fundão e região de *background*.

10.1.1.3 Aspectos do Meio Físico

Consiste, inicialmente, na análise dos dados e informações disponíveis, em projetos, trabalhos acadêmicos, bancos de dados, entre outras fontes, que tenham sido desenvolvidos para toda a região impactada pelo rompimento da barragem, conforme capítulo 3 *Baseline Risk Assessment Problem Formulation do RAGS Ecological Risk* (US.EPA, 1997a). Dentre os principais grupos de informações que serão levantadas estão:

- Morfologia;
- Climatologia;
- Geologia e Geoquímica;
- Hidrogeologia e Hidrogeoquímica;
- Hidrologia e Hidroquímica;
- Pedologia e Química de Solos.

Nesta etapa serão desenvolvidos mapas de distribuição espacial de características físicas, físico-químicas e químicas dos diferentes compartimentos do meio físico estudados, com objetivo de auxiliar no estabelecimento de regiões de *background* baseadas em estudos regionais.

A interpretação entre os resultados do item 10.1.1.210.1.1.2 e do item 10.1.1.310.1.1.3, auxiliaram no entendimento da ocorrência e distribuição da contaminação associada ao rompimento da barragem de Fundão.

10.1.1.4 Aspectos Biótico

Será realizada a análise detalhada dos dados e informações disponíveis em projetos, trabalhos acadêmicos, bancos de dados, entre outras fontes, como objetivo da caracterização das comunidades de fauna e flora para toda a região que compreende a Área de Estudo Ecológico (AE_{ECO}) em estudo.

As seguintes informações serão identificadas para Caracterização dos Ecossistemas presentes na Área de Estudo Ecológico:

- Levantamento da ocorrência de espécies de fauna e flora a partir de banco de dados como Specieslink (<http://www.splink.org.br>), Re flora (<https://collectory.sibbr.gov.br/collectory/public/show/dp5>), GBIF (<https://www.gbif.org/>), WikiAves (<https://www.wikiaves.com.br>), ICMBio (<https://www.gov.br/icmbio>), Sociedade Brasileira de Herpetologia

(<https://www.sbherpetologia.org.br/>) e estudos referentes anteriormente desenvolvidos na região como o Plano de Reparação da Bacia do Paraopeba elaborado pela empresa Arcadis. As espécies serão caracterizadas quanto aos seguintes aspectos:

- Status de conservação (ex. raras, ameaçadas, endêmicas e protegidas);
- Distribuição geográfica;
- Habitat;
- Valor econômico, cultural, ecológico e social;
- Níveis tróficos e guildas (produtores primários, herbívoros, predadores); e
- Susceptibilidade da biodiversidade a impactos ecológicos negativos (perda ou degradação do habitat) considerando probabilidade, especialidade, ordem reversibilidade, forma de interferência e duração de estressores.
 - Para a Biota Aquática serão avaliados os seguintes fatores:
 - Alteração da produtividade primária;
 - Alteração das teias tróficas;
 - Perda de indivíduos da ictiofauna;
 - Bioacumulação e eco toxicidade em ictiofauna;
 - Alteração da composição e estrutura da ictiofauna;
 - Alteração da composição e estrutura das comunidades hidrobiológicas.
 - Para a Biota terrestre serão avaliados os seguintes fatores:
 - Redução da cobertura vegetal;
 - Redução do fluxo gênico em espécies vegetais;
 - Desregulação fisiológica de indivíduos da flora;
 - Alteração na ciclagem de nutrientes;
 - Injúria e/ou perda de indivíduos da fauna silvestre;
 - Bioacumulação de indivíduos de Fauna silvestre;
 - Áreas protegidas;
 - Interferência em Áreas de Preservação Permanente (APP);
 - Interferência em Unidade de Conservação (UC).

10.1.2 Validação de Dados Secundários

A validação de dados secundários obtidos na etapa anterior será realizada pela aplicação da metodologia descrita na seção 9 (*Avaliação e Validação de Dados Ambientais*).



Ao final da *Validação de Dados Secundários*, será realizada visita técnica a Área de Estudo Ecológico em estudo com o intuito de georreferenciar e buscar informações sobre os acessos aos locais com impacto ambiental, identificação em campo das espécies de fauna e flora consolidadas em escritório, avaliação dos limites físicos da AE_{ECO}.

Cabe ressaltar que não ocorrerão capturas de espécies de fauna e flora nesta etapa de expedições ao campo. Nenhuma espécie vegetal ou animal e/ou partes dela será coletada. Estas capturas serão realizadas pela empresa que executará o *Plano de Investigação para Meio Ambiente*, sendo que esta empresa deverá solicitar as devidas licenças emitidas pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) e IEF¹⁷ (Instituto Estadual de Florestas).

10.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Conforme descrito na seção *Compilação, Análise e Validação de Dados*, estudos bibliográficos regionais, resultados analíticos disponíveis para os compartimentos do meio físico de interesse para ARE (solo, sedimento e água superficial), características das espécies potencialmente expostas, características e extensão dos impactos no meio biótico (fauna e flora) causados pelo rompimento da barragem B I, serão a base de informações necessárias para o desenvolvimento da etapa SLERA.

A *Formulação do Problema* será conduzida com o objetivo de formular hipóteses preliminares do perigo associado a cada Substância Química de Interesse (SQI) e dos efeitos ecológicos, e assim, determinar o escopo e objetivos globais da ARE a ser realizada conforme descrito no *Framework for Metals Risk Assessment* (US EPA, 2007) e capítulo 3 *Baseline Risk Assessment Problem Formulation do RAGS Ecological Risk* (US.EPA, 1997a) e Guia Canadense para *Ecological Risk Assessment* (ECCC, 2012).

Na Formulação do Problema, serão executadas as seguintes etapas:

- Seleção de Substâncias Químicas de Interesse (Estressores Químicos);
- Caracterização do Meio Físico;
- Caracterização do Ecossistema Impactado;

A etapa de Formulação do Problema, prevista no *Tier 1* (*Screening Level Ecological Risk Assessment – SLERA*), será finalizada na primeira etapa dos estudos de ARE e subsidiará o desenvolvimento do *Plano de Investigação para Meio Ambiente*. Adicionalmente, ressalta-se

¹⁷ O Instituto Estadual de Florestas é uma autarquia do Governo de Minas Gerais, criada em 5 de janeiro de 1962 pela Lei 2.606 e vinculado à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais.

que a Formulação do Problema poderá ser detalhada e revisada após a execução do *Plano de Investigação para Meio Ambiente*, com base nos dados primários obtidos em campo.

10.2.1 Seleção de Substâncias Químicas de Interesse (Estressores Químicos)

Uma Substância Química de Interesse (SQI), para projetos de ARE os estressores químicos, é aquela substância química quantificada em amostras de pelo menos um compartimento do meio físico ou matrizes ambientais dentro de uma Área de Estudo Ecológico, cuja concentração esteja acima dos padrões legais aplicáveis (PLA) a esse compartimento ou que não possua PLA definido.

Neste contexto, a seleção das SQIs para uma determinada AE_{ECO} terá como base as informações disponíveis na etapa de *Compilação, Avaliação e Validação de Dados* e os resultados analíticos obtidos para as amostras coletadas na execução do *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente*, bem como dos procedimentos técnicos descritos no RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018) e Guia Canadense para *Ecological Risk Assessment* (ECCC, 2012).

A seleção será realizada por meio da identificação das substâncias químicas para cada compartimento do meio físico de interesse para a ARE, conforme os critérios a seguir:

- (1) Listar para cada compartimento de interesse do meio físico e pontos onde ocorrem concentrações das substâncias químicas pelo seguinte critério:
 - a. As identificadas analiticamente acima do Limite de Quantificação da Amostra (LQ);
 - b. As que possuem resultados válidos;
 - c. As que estão acima dos Padrões Legais Aplicáveis (Valores de Prevenção CONAMA 420, Nível 1/2 CONAMA 454, entre outros). A comparação das concentrações obtidas nas amostras de cada compartimento do meio físico com PLA seguirá a seguinte ordem de priorização:
 - Comparação com Padrões Legais Locais (Municipais e Estaduais);
 - Comparação com Padrões Legais Federais Nacionais;
 - Comparação com Padrões Legais de outros Municípios e Estados;
 - Comparação com Padrões Legais Internacionais reconhecidos nacionalmente.



- (2) Listar as substâncias químicas que não possuem Padrão Legal Aplicável para um determinado compartimento ambiental.

As substâncias químicas selecionadas, conforme os critérios especificados acima, também serão avaliadas de forma complementar pelos seguintes critérios:

1. No caso da avaliação da Linha de Evidência Química, deve possuir dados toxicológicos validados cientificamente e disponíveis para uma espécie alvo ou espécie índice;
2. Deve possuir dados físico-químicos validados cientificamente e disponíveis;
3. Deve possuir relação R_{ij}/R_j (fator de risco para a substância i no meio j /fator de risco total no meio j) superior a 0,01.

Conforme destacado anteriormente, toda substância química cujas concentrações forem superiores ao PLA, assim como aquelas que não possuem PLA para um determinado compartimento ambiental, serão classificadas como SQIs para uma ou mais linhas de evidências e, portanto, avaliadas na ARE, mesmo que em concentrações inferiores aos níveis basais na Região de Exposição Direta (RED). Também será realizada a avaliação comparativa das SQIs selecionadas com a composição química dos rejeitos.

Os valores a serem considerados como valores de corte para seleção de SQI, serão aqueles correspondentes ao compartimento do meio físico na qual a substância química ocorre, ou seja, sempre serão comparadas concentrações de substâncias químicas de um compartimento do meio físico com o seu PLA correspondente.

10.2.2 Caracterização do Meio Físico

A *Caracterização do Meio Físico* será desenvolvida com base:

- Nos dados secundários disponíveis e válidos (ver seção 9) a partir da execução da *Compilação, Análise e Validação de Dados* (na etapa SLERA, ver seção 10.1), e
- Nos dados primários disponíveis e válidos (ver seção 9) a partir da execução do *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente* (na etapa BERA, ver seção 10.3).

Para fins de ARE, os solos, sedimentos e água superficial são definidos como compartimentos do meio físico de interesse, pelos quais os receptores terrestres e aquáticos poderão estar expostos, sendo o solo/sedimento natural ou impactados pelos rejeitos, e água superficial associada à Bacia do rio Paraopeba.

As amostras de áreas que são inundadas sazonalmente serão agrupadas de acordo com sua relevância para os *endpoints* a serem avaliados. As amostras de regiões sazonalmente inundadas serão estudadas para o risco de exposição direta à comunidade de invertebrados usando valores orientadores de sedimentos e solo. Para esta avaliação será considerada a profundidade de amostragem, uma vez que se espera que a atividade biológica no solo e nos sedimentos seja maior nas zonas mais superficiais (rasas).

10.2.3 Caracterização do Ecossistema Impactado

A caracterização do ecossistema será realizada por meio da descrição da fauna e da flora que habitam cada AE_{ECO}, dos tipos de comunidades presentes e sua distribuição geográfica, identificação das espécies componentes de cada guilda, bem como demonstração da representatividade do ecossistema e do meio ambiente impactado. Para efeito de levantamento de espécies para *Caracterização do Ecossistema Impactado*, serão consideradas:

- Espécies terrestres de fauna e flora (biota terrestre);
- Espécies aquáticas de fauna e flora (biota aquática).

Neste contexto, serão identificadas espécies nativas, exógenas ou exóticas, raras, em perigo ou ameaçadas de extinção. A descrição das espécies irá considerar características como exigências de reprodução e nidificação, ciclo de vida, alimentação e outras peculiaridades que sejam importantes para cada espécie.

A *Caracterização do Ecossistema Impactado* será dividida nas seguintes tarefas:

- Identificação de Estressores Ambientais;
- Seleção de Espécies-Alvo;
- Seleção de *Endpoints*.

10.2.3.1 Identificação de Estressores Ambientais

Serão identificados os estressores ambientais, que se caracterizam por ser qualquer condição que imponha perturbação, desequilíbrio, pressão ou impacto negativo em espécies de fauna e flora. Serão considerados como estressores qualquer substância (estressores químicos, tais como substâncias tóxicas ou nutrientes), entidade física (estressores físicos, tais como sedimentos em suspensão) ou entidade biológica (estressores biológicos, tais como espécies não nativas) que cause efeitos indesejáveis à saúde ou condição biológica de um organismo (ECCC, 2012).

Serão identificadas e descritas as possíveis fontes de estresse químico (ver seção 10.2.1), físico e biológico, tanto para o ambiente terrestre como para o ambiente aquático, considerando:

1. A identificação preliminar dos estressores incluirá não só as substâncias químicas de interesse, mas também quais quer outros estressores que possam impactar a fauna e flora em avaliação associados ao rompimento da barragem B I;
2. A avaliação dos efeitos incluirá a análise da toxicidade e, também, a discussão sobre os efeitos ecológicos resultantes da exposição aos estressores previamente identificados.

No caso de estressores químicos (SQIs), uma vez identificadas serão utilizados seguintes critérios:

- Limite de Detecção (LD): identificação dos casos onde todas as amostras de um determinado compartimento do meio físico apresentaram resultados abaixo do LD, considerando todo o período de medição;
- Valor de Referência (VR): Serão avaliados prioritariamente valores de referência estaduais ou nacionais (VRQ), sendo que, nos casos que não exista valores de referência, será adotado um valor de referência internacional. Será observado se ocorre pelo menos um (1) valor amostrado acima da referência, ao longo de todo o período avaliado;
- Concentração de Referência (CR): Será adotada como CR a concentração mínima observada nas áreas de controle (AC_{ECO}) previamente identificadas (ou na área impactada, mas antes do evento do rompimento da barragem), considerando cada substância individualmente. Para os casos com CR, foi observado se ocorre pelo menos um (1) valor acima da referência ao longo do período avaliado. Também será avaliada a possibilidade de definição de CR a partir das amostras obtidas nas Regiões de Controle que serão estabelecidas para o desenvolvimento da ARE, conforme descrito em ECCC (2012);
- Para o grupo de substâncias sem referências será realizada uma seleção caso a caso, avaliando a frequência de detecção total e, no último ano, a classificação das substâncias considerando persistência, bioacumulação e toxicidade para o ambiente aquáticos. Nestes casos os critérios foram:
 - i. Substância tóxica para o ambiente aquático segundo a classificação da etiquetagem e rotulagem (toxicidade crônica);

- ii. Substância persistente se a meia-vida for superior a 40 dias em água ou superior a 120 dias em sedimento ou solo, segundo a Agência Europeia das Substâncias Químicas (ECHA, 2017);
- iii. Substância bioacumulativa se o fator de bioacumulação em peixes for superior a 2000 (ECHA, 2017).

Os valores de meia-vida e fatores de bioacumulação serão pesquisados nos seguintes bancos de dados:

- US Risk Assessment Information System RAIS (https://rais.ornl.gov/tools/eco_search.php)
- US National Library of Medicine – National Center for Biotechnology Information (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2268#section=Environmental-Fate>)
- West Texas A&M University (https://pcl.wtamu.edu/pcl/PCL_Calculator.jsp)

10.2.3.2 Seleção de Espécies-Alvo

A partir do *Levantamento de Dados Secundários do Meio Biótico*, serão selecionadas espécies-alvo que representam os diferentes compartimentos ecológicos do ecossistema da AE_{ECO} em estudo. Serão selecionadas espécies-alvo que representem os receptores ecológicos em ambientes terrestres e aquáticos.

Uma espécie-alvo selecionada deverá obrigatoriamente caracterizar uma guilda¹⁸ ou guilda local de interesse para os estudos de ARE da AE_{ECO} em estudo. Uma espécie-alvo (fauna ou flora) deverá possuir minimamente as seguintes características:

- Possuir indivíduos que ocorrem em abundância e podem ser avaliados na AE_{ECO} em estudo;
- Para linha de evidência química, possuir perfil toxicológico definido, ou possuir espécie-índice que tem perfil toxicológico definido e correlacionável;
- Ser correlacionável diretamente a uma Rota de Exposição Ecológica válida e completa, ou indiretamente por sua posição a partir da cadeia trófica.

¹⁸ conjunto de todas as espécies que exploram o mesmo tipo de recurso de forma similar, sem a necessidade de co-ocorrência; sendo o termo "guilda local" refere-se ao subconjunto de espécies da guilda que co-ocorrem em uma mesma comunidade.



O levantamento de espécies alvo será feito para cada Área de Estudo Ecológico (AE_{ECO}) para estruturação do MCA_{EC}, com base nas referências: Specieslink (<http://www.splink.org.br>), Reflora (<https://collectory.sibbr.gov.br/collectory/public/show/dp5>), GBIF (<https://www.gbif.org/>), WikiAves (<https://www.wikiaves.com.br/>), ICMBio (<https://www.gov.br/icmbio>), Sociedade Brasileira de Herpetologia (<https://www.sbherpetologia.org.br/>) e estudos referentes anteriormente desenvolvidos na região como o Plano de Reparação da Bacia do Paraopeba elaborado pela empresa Arcadis.

As espécies alvo serão selecionadas a partir do levantamento inicial de espécies da fauna e flora que possam ocorrer na região da AE_{ECO}, ou seja, qualquer organismo que possa ser adversamente impactados pelo rompimento da barragem B I, haja vista que não é possível, e geralmente desnecessário, avaliar o risco para todas as espécies presentes em uma área em estudo. A avaliação será focada em algumas espécies que são valorizados pela sociedade, de relevância ecológica e que estão potencialmente expostas aos estressores ambientais.

Os critérios para a seleção dos receptores de interesse ecológicos incluirão:

- Ocorrência (real / potencial) na área AE_{ECO};
- Grau e mecanismo de exposição aos estressores (estágio de vida, duração média de vida, comportamento, dieta alimentar, tamanho do território, entre outros), possíveis vias de exposição (compartimento do meio físico impactado, bioacumulação, biomagnificação, entre outros);
- Sensibilidade aos estressores ambientais;
- Relevância
 - Espécies de importância ecológica, como as que servem de alimento para outras espécies;
 - Espécies raras, ameaçadas, protegidas;
 - Espécies de importância social, econômica ou cultural (animais de estimação, de criação e de importância comercial).
- Disponibilidade de dados ecotoxicológicos, sobre a biologia e ecologia das espécies (constituição da dieta, área de uso e territoriais, entre outros).

Durante a fase de levantamento das espécies alvo potenciais, serão contemplados todos os possíveis níveis da teia trófica do meio aquático e meio terrestre. Dentro dos receptores dos níveis primários da teia trófica têm-se: produtores primários, invertebrados bentônicos e pelágicos, microrganismos e plantas. Já nos receptores da teia trófica nos níveis superiores serão contemplados: ictiofauna, invertebrados terrestres e vertebrados terrestres incluindo consumidores primários, secundários e terciários.

10.2.3.3 Seleção de *Endpoints*

Dentro da etapa de formulação do problema, também será realizada a seleção dos *endpoints*. Um *endpoint* é característico de um indivíduo/organismo a ser observado (receptor) que foi ou será afetado por agentes estressantes (estressores).

Os *endpoints* serão de dois tipos:

- *Endpoint* de avaliação (*assessment endpoints*): será definido por uma entidade ecológica ou por seus atributos¹⁹ a serem protegidos;
- *Endpoint* de medição (*measurement endpoints*): será definido pelas características mensuráveis destes atributos utilizados para estimar o grau de impacto que ocorreu ou pode ocorrer.

Será considerado que os ***endpoints* de avaliação** se referem a atributos de populações ou comunidades biológicas que serão utilizados para avaliar componentes específicos do ecossistema impactado, que serão afetados negativamente pelas SQIs presentes na AE_{ECO} em estudo. São caracterizados por conterem uma entidade, que é frequentemente representada por um grupo ou guilda no ecossistema da área (por exemplo, aves onívoras), e atributos ecologicamente relevantes dessa entidade (por exemplo, taxa de sobrevivência e/ou reprodução). Ao selecionar *endpoints* de avaliação, serão considerados os processos ecológicos relevantes e o valor do serviço ecossistêmico.

Os ***endpoints* de medição** serão utilizados para avaliação dos receptores ecológicos, a partir da quantificação da exposição considerando concentrações em água superficial, solo e sedimento, bem como biota aquática e terrestre quando aplicável. Esta avaliação será realizada a partir da medida dos efeitos deletérios pela comparação da quantificação da exposição com valores orientadores toxicológicos disponíveis na literatura, bem como dados de campo sobre a comunidade ou estrutura populacional.

10.3 CARACTERIZAÇÃO DA EXPOSIÇÃO

A caracterização da exposição é definida em Estudos de ARE como a co-ocorrência ou o contato do estressor com os componentes ecológicos, tanto no tempo quanto no espaço (US. EPA, 2007). Assim, tanto o estressor quanto o ecossistema serão caracterizados em escalas temporais e espaciais semelhantes, considerando as Rotas de Exposição Ecológicas válidas dimensionadas no MCA_{ECO}.

¹⁹ Um atributo é a característica da espécie que deve ser protegida e está potencialmente em risco associado a exposição aos rejeitos do rompimento da barragem B I.



O resultado desta etapa será o perfil de exposição que caracteriza a magnitude, os padrões espaciais e temporais de exposição, indicando a forma na qual estes se relacionam com os *endpoints* de avaliação e as informações constantes no MCA_{ECO} .

No primeiro relatório parcial dos ERSHRE a serem desenvolvidos para cada Área de Estudo Ecológico definida para a bacia do rio Paraopeba, serão listados e analisados todos os parâmetros de exposição, taxas e fatores de exposição a serem utilizados no cálculo da Dose de Exposição ecológica, bem como serão discutidas e justificadas todas as premissas utilizadas para quantificação da exposição ecológica²⁰.

10.3.1 Caracterização da Exposição dos Receptores Ecológicos

O perfil da exposição será combinado com o perfil dos efeitos toxicológicos para estimar os riscos associados à exposição de um receptor, sendo que o perfil de exposição será compatível com a relação entre o estressor e a resposta gerada para caracterização dos efeitos.

Será apresentada uma descrição completa de como, quando e onde a exposição ocorreu, serão avaliadas as fontes primárias e secundárias de impacto ambiental, a distribuição dos estressores no meio ambiente, e a extensão e o modo de contato ou de coocorrência.

Para tanto será necessário avaliar as transferências ambientais dos estressores identificados e avaliar se os mecanismos gerais de transporte e dispersão do estressor físico, químico e biológico envolvem: as correntes de água superficial (sistemas fluviais, lacustres ou lagunares), transporte através do solo / sedimento (superfície ou subsuperfície) e/ou cadeia trófica (em especial para estressores químicos).

10.3.1.1 Índice de Vulnerabilidade e Utilidade de Receptores Ecológicos²¹

A caracterização eficaz da exposição, envolve a adequada seleção das espécies alvo, ditos receptores ecológicos. A escolha destas espécies, será realizada (1) inicialmente a partir da revisão dos dados regionais de ocorrência de espécies da biota aquática e terrestre ao longo da bacia do Paraopeba nas regiões impactadas pelo rompimento da barragem B I; (2) por meio de expedições ao campo para identificação de sua presença, abundância e acessibilidade nas AE_{ECO} em estudo; (3) pela avaliação toxicológica voltada para analisar a capacidade de acumular as SQIs em seus órgãos. Adicionalmente, será realizado o refinamento do processo de

²⁰ Esta sessão foi adaptada para atendimento das **Recomendações da Auditoria Técnica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais.**

²¹ Esta sessão foi adaptada para atendimento das **Recomendações da Auditoria Técnica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais.**

identificação de receptores ecológicos, a partir da análise do impacto que as SQIs podem gerar dentro de suas populações, e não apenas nas alterações da aptidão individual.

Para tanto, será utilizado o índice desenvolvido por Golden e Rattner (2003) que classificam a vulnerabilidade e a utilidade das espécies, a partir de informações ecológicas, populacionais, distribuição geográfica e entendimento biológico, para gerar um ranking das melhores espécies alvo para desenvolvimento da ARE.

Para utilizar o Índice de Vulnerabilidade e Utilidade de Receptores Ecológicos (IVURE) será necessário resgatar dados ecológicos a partir da compilação de dados secundários, utilizando como base publicações em artigos científicos, monografias, dissertações e teses, como também bancos de dados online (ex. Amphibio e EltonTraits 1.0). Tais informações, conhecidas por traços ecológicos tornará a caracterização ecológica das espécies mais exequível e aplicável para melhoria das análises de risco.

Em geral, entende-se então que associando a metodologia desenvolvida por Golden e Rattner (2003) aos traços ecológicos disponíveis em bancos de dados online, adaptados ao caso do rompimento da barragem B I, otimizará a determinação das espécies alvo.

10.3.1.2 Definição de Áreas de Ocorrência de Receptores Ecológicos²²

É fundamental para caracterização da exposição dos receptores ecológicos que seja realizada criteriosamente a definição dos limites de distribuição geográfica das espécies alvo na AE_{ECO} estudada. Para tanto, na etapa formulação do problema será realizado a consolidação de dados ligados a perfis comportamentais, interação com o meio físico, preferências climáticas e alimentares. Tais características, associadas a fitofisionomia, hidrografia e morfologia, definirão a distribuição das espécies alvo na AE_{ECO} em estudo. Também serão considerados alguns critérios de escolha para filtrar a lista de espécies: i) considerar as espécies que possuem ao menos 25% de suas distribuições na área avaliada; ii) considerar as espécies que ocupam ao menos 10% da área avaliada.

A escolha da área de ocorrência de espécies da biota terrestre e aquática, de forma padronizada e homogênea, será de grande importância para diminuir o viés amostral. Isso ocorre quando o formato e tamanho da área a ser avaliada, está estritamente relacionado com a quantidade de dados que estariam inseridos em suas distribuições. Uma solução, é utilizar uma extrapolação (ou tecnicamente chamado de “Buffer”) da área identificada como fonte de

²² Esta sessão foi adaptada para atendimento das **Recomendações da Auditoria Técnica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais.**

impacto da fauna e flora, o que será dimensionado para definição do Plano de Investigação para Meio Ambiente em função da ocorrência geográfica das espécies alvo.

Com tais aspectos definidos, a seleção de espécies e pontos de ocorrência, considerando um espaço geográfico amostral homogêneo e padronizado, associados a critérios predefinidos, eliminariam espécies que podem ser receptores ecológicos de outras fontes poluidoras, que transitam na área de interesse.

10.3.2 Identificação das Rotas de Exposição

Para que uma Rota de Exposição para ARE seja completa, a SQI deverá entrar em contato com um receptor ecológico a partir de um compartimento do meio físico de interesse.

A avaliação da toxicidade dará a base de informações para que o estudo de ARE esteja focado apenas nas SQIs que podem entrar em contato com os receptores ecológicos e gerarem efeitos adversos. Serão consideradas como rotas de exposição para diferentes grupos de organismos, minimamente as seguintes:

- a) Para animais terrestres, três vias básicas de exposição serão avaliadas: ingestão, absorção e contato dérmico;
- b) Para plantas terrestres, a absorção radicular de SQIs presentes no solo;
- c) Para folhas, a absorção de SQIs que se depositam nestas folhas;
- d) Para animais aquáticos, o contato direto (de água ou sedimentos com as brânquias ou tegumento) e ingestão de alimentos e sedimentos;
- e) Para plantas aquáticas, o contato direto com a água, com o ar ou sedimentos.

Para caracterização das rotas de exposição as SQIs serão quantificadas em todos os compartimentos do meio físico interesse definidos no MCA_{ECO} e que possam gerar efeitos adversos pela linha de evidência química nas espécies alvo definidas para fauna e flora.

Sendo assim, serão coletadas amostras para quantificação das SQIs nos compartimentos solo superficial e subsuperficial (se necessário), água superficial e subterrânea (se necessário), sedimentos superficiais e subsuperficiais (se necessário), rejeitos e quaisquer outras matrizes que se façam necessárias para a quantificação do risco ecológico.

Nos Estudos de ARE, os processos de bioacumulação e biomagnificação de SQI na cadeia alimentar são tratados a partir de ensaios específicos a serem realizados para quantificação do potencial de bioacumulação, conforme descrito nos documentos:

- a) United States Environmental Protection Agency. (US.EPA, 2007). Framework for Metals Risk Assessment, EPA 120/R-07/001. Washington, DC, EUA. Março, 2007.

- b) United State Environmental Protection Agency. (US.EPA, 1997). Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessments. Interim Final. June.
- c) United State Environmental Protection Agency. (US.EPA, 2000a). Bioaccumulation Testing and Interpretation for the Purpose of Sediment Quality Assessment - Status and Needs. EPA-823-R-00-001. February.
- d) United State Environmental Protection Agency. (US.EPA, 2018). Region 4 Ecological Risk Assessment Supplemental Guidance Interim Draft. Region 4.

10.3.3 Modelo Conceitual Ecológico²³

O Modelo Conceitual Ecológico (MCA_{ECO}) será desenvolvido conforme especificado nos itens 1.2, 3.4, 3.5 e 3.6 do RAGS *Ecological Risk* (USEPA, 1997a).

O Modelo Conceitual Ecológico (MCA_{ECO}) consiste em definir todas as formas em que os possíveis contaminantes possam ser transportados da área de origem até os receptores ecológicos potencialmente exposta. Segundo Suter II (1999) em avaliações de risco ecológico, modelos conceituais são representações das hipóteses pelas quais uma atividade, ou um conjunto de atividades induz efeitos nos receptores ecológicos. O MCA_{ECO} esclarecerá as interrelações entre fontes de agentes estressores, comportamentos e padrões de transferência de estressores entre compartimentos ambientais e receptores ecológicos (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018).

Os elementos que comporão as rotas de exposição validas do MCA_{ECO} são apresentados a seguir:

- Caracterização ambiental e substâncias químicas existentes na área: seguindo a Seção 3.6.1 do RAGS *Ecological Risk* (USEPA, 1997a);
- Destino da contaminação e mecanismos de transporte: seguindo a Seção 1.2.2 e 3.4.1 do RAGS *Ecological Risk* (USEPA, 1997a);
- Mecanismo geral de ecotoxicidade associada às contaminações e categorias prováveis de receptores que poderiam ser afetados: seguindo a Seção 3.4.2 do RAGS *Ecological Risk* (USEPA, 1997a);

²³ Esta sessão foi adaptada para atendimento das **Recomendações da Auditoria Técnica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais**.



- Funções ecológicas importantes que podem afetar os receptores seguindo a Seção 3.3 do RAGS *Ecological Risk* (USEPA, 1997a);
- As vias de exposição completas que podem existir na área seguindo a Seção 3.4.3 do RAGS *Ecological Risk* (USEPA, 1997a);
- Seleção de *endpoints* para detectar riscos ecológicos seguindo a Seção 3.5 do RAGS *Ecological Risk* (USEPA, 1997a);

O MCA_{ECO} deverá incluir as considerações relacionadas à presença de espécies nativas, exógenas, raras ou ameaçadas de extinção.

No MCA_{ECO} será considerado que o *endpoint* de avaliação contemplará um receptor ou grupo de receptores ecológicos e os atributos/características específicas desse receptor ou grupo de receptores (densidade e distribuição da população de indivíduos, biomassa, variabilidade genética, estrutura trófica, diversidade da espécie receptora, reprodução e abundância da espécie receptora, entre outros). Neste contexto, serão definidos no MCA_{ECO} os objetivos de avaliação para o receptor ou grupo de receptores ecológicos identificados com alvo do estudo.

No MCA_{ECO} será considerado que o *endpoint* de medição será qualquer ponto para quantificação da exposição ecológica ou avaliação de efeitos para um receptor ecológico, bem como qualquer medida identificada de mudança nos atributos/características de um *endpoint* de avaliação. Os *endpoints* de medição formarão a base quantitativa e qualitativa para as linhas de evidência dos Estudos de ARE a serem desenvolvidos para a Bacia do rio Paraopeba. Neste contexto, serão definidos no MCA_{ECO} os objetivos de medição para o receptor ou grupo de receptores ecológicos identificados com alvo do estudo.

A partir da base de dados ecológica gerada na *Compilação, Análise e Validação de Dados* (SLERA), e durante as expedições de campo a serem realizadas para execução do *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente* (preliminar a etapa BERA), será possível a confirmação das espécies de fauna e flora previamente levantadas e a seleção dos receptores ambientais específicos que serão utilizados na etapa BERA dos Estudos de ARE.

Neste contexto, o MCA_{ECO} deverá abordar as seguintes questões:

1. Caracterização ambiental e substâncias químicas existentes na área;
2. Destino da contaminação e mecanismos de transporte;



3. Mecanismo geral de ecotoxicidade associada às contaminações e categorias prováveis de receptores que poderiam ser afetados;
4. Funções ecológicas importantes que podem afetar os receptores;
5. As vias de exposição completas que podem existir na área;
6. Seleção de *endpoints* para detectar riscos ecológicos;
7. Estressores potenciais não relacionados à contaminação em investigação.

Será apresentada a integração e sumarização das rotas de exposição e os receptores ecológicos de forma diagramática, definida como Modelo Conceitual Ecológico (MCA_{ECO}).

Com objetivo de integrar os resultados acerca do desenvolvimento do MCA_{ECO} e sumarizar as rotas de exposição, bem como as características dos receptores ecológicos, será desenvolvida ao final da etapa de *Formulação do Problema* um quadro resumo consolidando as seguintes informações: (1) receptores ecológicos identificados; (2) objeto de proteção; (3) linha de evidência a ser avaliada para cada receptor ecológico identificado; (3) medida de avaliação a ser adotada e magnitude destas medidas; (4) incertezas associadas a magnitude das medidas de avaliação; (5) escala espacial da medida de avaliação; (6) relação de causa; (7) relevância ecológica; (8) tipo de avaliação²⁴.

10.4 PLANO DE INVESTIGAÇÃO PARA MEIO AMBIENTE

O *Plano de Investigação para Meio Ambiente* será desenvolvido com base na etapa de *Formulação do Problema* e *Caracterização da Exposição*, bem como nas orientações metodológicas constantes no capítulo 4.4 *Contents Of Work Plan And Sampling And Analysis* do RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a; US. EPA, 2018).

O Plano de investigação será desenvolvido e executado com objetivo de complementar a representatividade do conjunto de dados disponíveis para a Área de Estudo Ecológico em estudo, considerando as necessidades de representatividade de cada compartimento do meio físico e biótico. A seleção dos pontos de coleta de amostras para cada compartimento terá como base a avaliação estatística e geoestatística de representatividade.

Todos os dados secundários gerados em estudos anteriores, consolidados na etapa anterior de *Compilação Análise e Validação*, serão utilizados após processo de validação para

²⁴ Esta sessão foi adaptada para atendimento à Nota **Técnica nº 6/FEAM/GERAQ/2021**

definição da representatividade estatística e geoestatística. Os dados considerados válidos serão utilizados para o dimensionamento do *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente*.

O *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente* poderá prever, com base no MCA_{ECO}, testes de bioacumulação, biodisponibilidade e especiação de Fe²⁺, Fe³⁺, MnCl₂, Mn(II), Mn(III), Cd livre (CdL), Cd(II), Pb(II), metil Mercúrio, bem como análise de substâncias húmicas aquáticas (ácido húmico (AH) e ácido fúlvico (AF)).

As amostras coletadas para execução dos testes supramencionados ficarão armazenadas adequadamente no laboratório aguardando os resultados analíticos laboratoriais para metais totais e dissolvidos não especiados. Somente para os pontos amostrados que apresentaram concentrações acima dos Padrões Legais Aplicáveis serão executados os testes supramencionados.

Os pontos de coleta de amostras selecionados para a complementação do conjunto de dados serão identificados com nomenclatura única, em mapas, com as respectivas coordenadas geográficas, e outras informações georreferenciadas.

10.4.1 Dimensionamento

O *Plano de Investigação para Meio Ambiente* será desenvolvido utilizando os seguintes critérios básicos:

1. Definição do primeiro grupo de pontos de amostragem definidos com base nos dados secundários obtidos da etapa de *Compilação, Avaliação e Validação de Dados*, tendo como objetivo estabelecer uma malha amostral representativa de toda a Área de Estudo Ecológico;
2. Definição do segundo grupo de pontos de amostragem definidos com base no MCA_{ECO}, tendo como objetivo estabelecer uma malha amostral representativa para pontos de captura específico de indivíduos das espécies alvo²⁵. Estes pontos serão locados nos *endpoints* de medição, e de acordo com *Caracterização da Exposição* (item 10.3).

Os pontos de amostragem serão distribuídos em função da ampla cobertura de investigação da área de estudo ecológico em estudo, de pontos previamente estabelecidos pelo Programa de Monitoramento da Biodiversidade ora desenvolvido para Bacia do rio Paraopeba, bem como a distribuição de pontos direcionados a locais específicos de investigação definidos no MCA_{ECO}.

²⁵ Este parágrafo foi modificado para atendimento à **Nota Técnica nº 6/FEAM/GERAQ/2021**

A definição da estratégia de aquisição de dados para avaliação de risco quantitativa seguirá a metodologia RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018). A definição da localização e quantidade de pontos será consistente e garantirá a redução das incertezas associadas à avaliação do risco, redução de prazos de projeto, geração de menor impacto para às comunidades potencialmente impactadas, e ser suficiente para o seu propósito.

Neste contexto, métodos estatísticos e geoestatísticos para definição do número mínimo de amostras a serem coletadas e sua distribuição espacial deverão ser considerados conforme descrito no Apêndice 02²⁶, visando a definição de planos de amostragens que garantam a suficiência de dados para todos os compartimentos do meio físico e biótico de interesse para a ARE. O Apêndice 02 foi desenvolvido com base nos documentos: “*Methods for Evaluating Attainment of Cleanup Standards for Soils and Solid Media*” (US.EPA, 1989b) e “*Data Quality Assessment: Statistical Methods for Practitioners*” (US.EPA, 2006).

Todos os dados secundários gerados em estudos anteriores serão utilizados, após processo de validação, para definição da representatividade estatística e geoestatística. Os dados considerados válidos serão utilizados para o dimensionamento do *Plano de Investigação para Meio Ambiente*, e poderão ser utilizados em estudos ARE.

Neste contexto, para execução adequada da aquisição de dados ambientais, o *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente* terá o seguinte conteúdo mínimo e obrigatório:

1. Introdução e Justificativas;
2. Objetivos;
3. Caracterização da Área de Estudo Ecológico;
4. Avaliação de Suficiência Estatística para Dimensionamento da Malha Amostral;
5. Plano de Amostragem Ecológica;
6. Metodologia de Amostragem por Compartimento do Meio Físico;
7. Metodologia para captura de Indivíduos de Espécies Alvo;
8. Procedimentos de Controle e Garantia da Qualidade Durante Amostragem;
9. Controle de Garantia da Qualidade Laboratorial;
10. Limitações e Exceções;
11. Conclusões e Recomendações;
12. Cronograma de Execução;
13. Referências Bibliográficas.

²⁶ Este apêndice foi adaptado para atendimento à **Nota Técnica nº 13/IGAM/GEMOQ/2021**

10.4.2 Avaliação de Suficiência para Dimensionamento da Malha Amostral

Como indicado no documento “*Guidance for Data Useability in Risk Assessment (Part A)*” produzido pela USEPA em 1991, o cálculo do número de pontos para elaboração de plano de amostragem depende da variabilidade esperada para a matriz analisada, bem como dos objetivos de performance estatísticos esperados. A fórmula indicada no Apêndice 02²⁷, que detalha o procedimento metodológico do ponto de vista estatístico e geoestatístico dos estudos de ARE, pode ser utilizada para o cálculo do número mínimo de elementos amostrais necessário ($n_{\text{necessário}}$). O cálculo é descrito da seguinte maneira:

$$n_{\text{necessário}} = [(Z_{1-\alpha} + Z_{1-\beta})/D]^2 + 0.5 * Z_{1-\alpha}^2$$

Em que:

$n_{\text{necessário}}$ = número de pontos necessário

$Z_{1-\alpha}$, $Z_{1-\beta}$ = valores da distribuição normal padrão para os erros tipo I e tipo II, respectivamente. O erro tipo I ocorre ao afirmar, a partir de teste estatístico, que uma região não está “contaminada” (abaixo de um parâmetro de risco, Cs, por exemplo) quando de fato ela está. O valor adotado nas análises para esse erro (α) é 5%. O erro tipo II (β) ocorre ao se afirmar que uma região está “contaminada” (acima de um parâmetro de risco, Cs, por exemplo) quando de fato ela não está. Uma vez que esse tipo de erro para as análises considerando avaliação de risco é um erro a favor da segurança, ou seja, ao ocorrer é fornecida uma abordagem mais conservadora seu valor adotado na presente metodologia é 20%.

D = quociente entre a resolução de detecção (ou diferença relativa detectável mínima) especificada, simbolizada por Δ , e o coeficiente de variação esperado para a matriz (CV). Dessa forma, $D = \Delta/CV$.

A resolução de detecção (Δ) é a diferença relativa entre o parâmetro de risco Cs do analito analisado pela média representativa de uma população não-exposta (μ_1) em relação à Cs, expressa em porcentagem. A resolução de detecção pode ser detalhada como $\Delta = (Cs - \mu_1) / Cs$. Pode-se entender a resolução de detecção como a diferença mínima entre Cs e μ_1 detectada pela análise estatística dos dados. Em um exemplo com resolução Δ de 15%, a análise de dados permitirá distinguir resultados abaixo de Cs, provenientes de uma população com concentrações menores ou iguais que 85% de Cs, de outra população de dados, com concentrações mais próximas ou superiores à Cs. Dessa forma, quanto menor Δ , mais elementos ($n_{\text{necessário}}$) serão necessários para distinguir resultados entre as duas populações de dados.

O documento USEPA (1991) também indica que a variabilidade dos resultados varia em função da matriz analisada e, nesse caso, se a variabilidade natural dos analitos químicos de

²⁷ Este apêndice foi adaptado para atendimento à **Nota Técnica nº 13/IGAM/GEMOQ/2021**

interesse for alta ($CV > 30\%$), um esforço de planejamento deve ser realizado no sentido de aumentar o número de amostras.

A partir do coeficiente de variação e dos objetivos de performance estatística especificados para o plano de amostragem, o número mínimo de amostras resultante é calculado. Os itens 2.2 e 2.3 do Apêndice 02²⁸ indicam como os dados secundários podem ser utilizados no dimensionamento de malha amostral bem como define os parâmetros de performance estatística desejados.

10.4.3 Plano de amostragem

O plano de amostragem, parte integrante do *Plano de Investigação Detalhada para Meio Ambiente*, consiste na associação de amostragem sistemática (do inglês “*Systematic/Grid Sampling*”) com amostragem direcionada (do inglês “*Judgmental Sampling*”). Como indicado no documento “*Guidance on Choosing a Sampling Design for Environmental Data Collection*”, elaborado pela USEPA em 2002, a malha de pontos sistemática fornece cobertura mais completa que amostragem aleatória simples. De acordo com o documento, esse tipo de associação utilizada em planos de amostragem é o mais eficiente quando se deseja fazer inferências acerca de parâmetros populacionais (como a média populacional, por exemplo) e identificação de hot-spots. A geometria triangular da malha de amostragem é adotada, uma vez que apresenta maior eficiência de cobertura em contornos irregulares quando comparada à outras geometrias regulares.

O programa utilizado para geração dos pontos de amostragem é o Visual Sample Plan (VSP), desenvolvido pelo Laboratório Nacional do Pacífico Noroeste do Departamento de Energia dos Estados Unidos (*Pacific Northwest National Laboratory of U.S. Department of Energy*). A escolha dos parâmetros de entrada no programa parte de hipóteses acerca da normalidade da distribuição da média das concentrações, amostragem ordinária e geometria triangular para a malha de pontos gerada.

10.4.4 Execução

Após o dimensionamento do *Plano de Investigação para Meio Ambiente*, serão realizadas expedições de campo visando sua execução com objetivo de formar a base de dados ambientais primários relativos a AE_{ECO} em estudo, que somados aos dados secundários válidos

²⁸ Este apêndice foi adaptado para atendimento à **Nota Técnica nº 13/IGAM/GEMOQ/2021**

obtidos na etapa de *Compilação, Avaliação e Validação de Dados*, formarão a base de dados que será utilizada para qualificação e quantificação do risco ecológico.

Para execução do *Plano de Investigação para Meio Ambiente*, serão definidas o Região de Exposição Direta (RED), Região de Exposição Indireta (REI) e Região de Não Exposição (RNE), conforme conceituado abaixo:

- Região de Exposição Direta (RED): região definida pelo limite físico da ocorrência do rejeito associada ao rompimento da barragem B I e que foi depositado no leito e nas margens dos cursos d'água, imediatamente após o rompimento ou em eventos de inundação posteriores. Dentre as áreas típicas que caracterizam a LC, citam-se a título de exemplo: i) leitos (calhas), planícies aluviais recentes e terraços mais antigos dos cursos d'água ao longo dos quais ocorreu a passagem ou a deposição da lama de rejeito após a ruptura; ii) planícies aluviais invadidas pela onda de cheia decorrente do fluxo da lama de rejeito; iii) reservatórios associados às UHE existentes no rio Paraopeba, açudes ou reservatórios em áreas rurais ou urbanas, lagoas naturais marginais aos cursos d'água e outros tipos de corpos d'água afetados seja pela passagem ou deposição da lama de rejeitos; e iv) áreas urbanas ou rurais que tenham sido afetadas pela passagem ou pela deposição da lama de rejeito; v) poço ou conjunto de poços (escavados ou tubulares) e respectivos aquíferos de onde as águas subterrâneas eram ou são captadas, os quais tenham sido afetados pela passagem ou deposição da lama de rejeitos.
- Região de Exposição Indireta (REI): região adjacente às áreas de deposição do rejeito, que pode ser influenciada indiretamente por estas devido a mecanismos de transporte físico (inundação de terrenos adjacentes aos rios impactados, dispersão atmosférica da lama exposta etc.) e químico (migração de contaminantes da RED em direção à região adjacente, através de processos de percolação, lixiviação, solubilização, advecção, difusão, dispersão, dentre outros). Dentre as áreas típicas que caracterizam a REI, citam-se, a título de exemplo: i) leitos (calhas), planícies aluviais recentes e terraços mais antigos de trechos dos cursos d'água ou de tributários que não tenham sido afetados diretamente, que sejam adjacentes à RED e que podem sofrer (ou ter sofrido) influência indireta em razão de processos de dispersão atmosférica ou de inundação(ões) decorrente(s) do período chuvoso ocorrido entre os meses de novembro/2015 e abril/2016; e ii) quaisquer terrenos (áreas urbanas, comunidades rurais, áreas de plantio ou de pecuária, ecossistemas específicos etc.) adjacentes à RED e que foram (ou possam ser) afetados indiretamente pela dispersão atmosférica ou pela(s) cheia(s) decorrente(s) de períodos chuvosos.



- Região de Não Exposição (RNE): Área de Controle localizada dentro da Área de Estudo Ecológico em estudo que não possui influência direta ou indireta da deposição do rejeito decorrente do rompimento da barragem B I, e que tenha características fisiográficas e de uso e ocupação similares àquelas da REI e/ou da RED a ela adjacentes. A RNE é caracterizada por ser a região de ocorrência dos níveis de base regionais (*background*).

O *Plano de Investigação para Meio Ambiente* avaliará, a depender das características de cada AE_{ECO}, o sedimento (superficial e subsuperficial), solo (superficial e subsuperficial), água (subterrânea e superficial), e indivíduos de espécies de fauna e flora.

A execução do *Plano de Investigação para Meio Ambiente* será acompanhada por representantes das Secretarias Estaduais e Municipais de Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais. São mandatários a disponibilização diária de Diários de Campo (devidamente assinadas) desenvolvidos pela equipe de amostragem, de fotos e vídeos realizados durante o processo de amostragem, bem como cadeias de custódias das amostras em cada etapa do estudo. O Plano prevê a elaboração de relatório fotográfico, que documente e evidencie a aplicação de todos os procedimentos definidos no Plano.

10.4.4.1 Metodologias para Aquisição dos Dados Ambientais para Meio Ambiente

A tarefa *Metodologias para Aquisição dos Dados Ambientais para Meio Ambiente* cumpre o disposto no RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018) no que diz respeito a avaliação de técnicas de amostragem.

O *Plano de Investigação para Meio Ambiente* deverá contemplar métodos padronizados nacionalmente e internacionalmente para coleta de amostras de compartimentos do meio físico e biótico, conforme descrito nos Apêndices 04 e 05.

10.4.5 Validação de Dados Primários

A validação de dados primários obtidos pela execução do *Plano de Investigação para Meio Ambiente* será realizada pela aplicação da metodologia descrita na seção 9 (*Avaliação e Validação de Dados Ambientais*).

10.5 ANÁLISE DE TOXICIDADE

Na análise de toxicidade será determinada a dose ou concentração aceitável para receptores específicos que podem estar expostos em condições sem risco ou com um risco mínimo de desenvolvimento de efeitos adversos. O Apêndice 06 apresenta a consolidação de

dados toxicológicos divididos por espécies que poderão ser classificadas como espécies alvo para os estudos de ARE a serem desenvolvidos para a Bacia do rio Paraopeba.

Um contaminante pode exercer efeitos ecológicos adversos de muitas maneiras. Em primeiro lugar, um contaminante pode afetar um organismo após a exposição por um curto período (agudo) ou após a exposição durante um longo período (crônico). Em segundo lugar, o efeito de um contaminante será letal (matar o organismo) ou subletal (causando efeitos adversos além da morte, como crescimento reduzido, mudanças comportamentais etc.).

Os efeitos subletais podem reduzir o tempo de vida ou o sucesso reprodutivo de um organismo. Em terceiro lugar, um contaminante pode atuar direta ou indiretamente em um organismo. Os efeitos diretos incluem efeitos letais ou subletais do produto químico no organismo. Os efeitos indiretos ocorrem quando o contaminante danifica os alimentos, o habitat, as relações predador-presas ou a competição do organismo em sua comunidade.

A toxicidade será aferida por meio de testes ecotoxicológicos com os organismos de interesse que geram como resultado algum parâmetro de toxicidade. Quando o parâmetro de toxicidade ou efeito observado é a mortalidade, o resultado do teste será dado em CL_{50} ou DL_{50} , que representam, respectivamente, a concentração ou a dose estimada que está associada com a morte de 50% da população testada. Tanto a CL_{50} como a DL_{50} são resultados de testes agudos, ou seja, testes que são realizados em curto espaço de tempo – até no máximo 96h – e que buscam observar qual o efeito de uma única exposição (exposição aguda) a uma alta dose ou concentração do agente estressor.

Para investigar o efeito da exposição repetida em níveis subletais do estressor, são utilizados os testes crônicos, cuja duração engloba um período maior de vida do organismo, ou são realizados em estágios de vida mais críticos, como por exemplo, na fase larval. Os resultados dos testes crônicos geralmente são dados em termos de CENO – Concentração de Efeito Não Observado (inglês: NOEC - *No-Observed Effect Level*) ou CEO – Concentração de Efeito Observado (inglês: LOEC - *Lowest Observed Effect Concentration*), que representam, respectivamente, o maior nível no qual não se observou nenhum efeito, ou o menor nível no qual se observou algum efeito.

Uma vez caracterizadas a exposição e a toxicidade, o risco será caracterizado. Isso se dá pela integração das informações sobre exposição e sobre toxicidade.

10.6 Caracterização dos Riscos e Linhas de Evidências

A caracterização do risco inclui dois componentes principais: estimativa de risco e descrição do risco. A "estimativa de risco" envolve a integração da análise da exposição e

efeitos de exposição, para cada parâmetro específico de avaliação. A "descrição do risco" fornece informações importantes para a interpretação dos resultados de risco e identifica um nível de efeitos nocivos em espécies de fauna e flora (por exemplo, calculando a concentração de exposição na qual um QR de 1 é excedido) (Suter II, 1996).

A caracterização dos riscos irá considerar a extensão espacial dos riscos e da sua magnitude, a distribuição da contaminação dentro de uma área, o peso da evidência, o potencial significado ecológico dos riscos identificados e os pontos fortes, limitações e incertezas da análise geral.

Será levado em consideração que, com exceção de espécies raras ou ameaçadas de extinção, o objetivo da avaliação do risco ecológico é proteger as populações de espécies, e não indivíduos (espécimes).

Para a caracterização do risco deve ser considerado:

- No mínimo 4 linhas de evidências: química, ecotoxicológica, ecológica (abordagem peso de evidência) e física;
- Apresentar os critérios de avaliação para cada linha de evidência;
- Base dos cálculos do risco, informando nível de risco aceitável.

Para avaliação desta linha de evidência serão definidas Áreas de Controle (AC_{ECO}) que possuam as mesmas espécies alvo e mesmas características do meio físico, mas que não tenham sido atingidas pelos impactos associados ao rompimento da barragem B I. Preferencialmente as AC_{ECO} serão definidas dentro da AE_{ECO} em estudo em regiões de Background. Nas AC_{ECO} serão realizados os mesmos testes ecotoxicológicos visando estabelecer a base adequada e suficiente de resultados para análise dos possíveis efeitos ecotoxicológicos nas espécies alvo a serem avaliadas. Para a água superficial também serão definidos Pontos de Controle (PC_{ECO}), caracterizados por estarem a montante da AE_{ECO} em estudo e possuírem série histórica de dados conhecida de antes e depois do rompimento da barragem B I.

10.6.1 Linha de Evidência Química

Nesta etapa, a caracterização do risco será feita por meio do quociente de risco (QR), que é obtido pela razão entre a dose de exposição e os valores de referência toxicológica (VRT).

$$QR = \frac{\text{Dose de Exposição (mg/kg - dia)}}{\text{Valores de Referência Toxicológica (mg/kg - dia)}}$$

No caso da exposição direta de peixes, plantas e invertebrados será utilizada como referência para os cálculos a Concentração de Exposição (CE), conforme abaixo.

$$QR = \frac{\text{Concentração de Exposição (mg/kg ou mg/L)}}{\text{Valores de Referência Toxicológica (mg/kg ou mg/L)}}$$

Conceitualmente o QR é quociente que indica a relação de uma Dose de Exposição (DE) ou Concentração de Exposição (CE) pelo Valor de Referência Tóxica (CL₅₀, DL₅₀, NOAEL, NOEC, LOAEL, LOEC), para uma espécie submetida a cenário de exposição ecológico, considerando um estressor químico específico e um *endpoint* de avaliação também específico.

Uma vez calculado o QR, será calculado o Índice de periculosidade (HI) pela somatória dos QR individuais para uma determinada SQI em um determinado compartimento do meio físico, considerando as vias de ingresso identificadas e a espécie alvo a ser avaliada na linha de evidência química, conforme abaixo. Sendo assim os HI serão calculados por SQI.

$$HI = \left(\frac{DE_1}{VRT_1} \right) + \left(\frac{DE_2}{VRT_2} \right) + \dots + \left(\frac{DE_n}{VRT_n} \right)$$

Ou

$$HI = \left(\frac{CE_1}{VRT_1} \right) + \left(\frac{CE_2}{VRT_2} \right) + \dots + \left(\frac{CE_n}{VRT_n} \right)$$

Conforme descrito em ECCC (2012), embora um HI muitas vezes maior do que 1 sugira um Risco maior do que um HI ligeiramente maior que 1, não é possível tirar conclusões sobre o risco relativo com base nas diferenças em HI (por exemplo, HQs de 1 a 10 indicam risco moderado, enquanto HI acima de 10 indicam alto risco). Neste sentido será adotado de HI < 1 indicarão um risco negligenciável e HI > 1 um risco não negligenciável. Caso não seja possível o cálculo dos His, esta análise será realizada considerando os QRs.

10.6.1.1 NOAEL, NOEC, LOAEL, LOEC

Os NOAEL são observados em estudos toxicológicos de Dose vs. Resposta e significam a maior dose para a qual não houve efeito tóxico ou adverso observado (variação biológica ou estatisticamente significante). O NOAEL não caracteriza a duração, define o risco ou intensidade do efeito adverso. Já os LOAEL significam a menor dose na qual foi observado um efeito tóxico ou adverso, também obtidos a partir de estudos toxicológicos de Dose vs. Resposta. Conforme descrito no RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a) em estudos de ARE o NOAEL sempre significará a condição de contorno mais conservadora para os cálculos da linha

de evidência física, enquanto que o LOAEL a menos conservadora. Sendo assim, o limite para efeitos adversos será considerado entre o NOAEL e o LOAEL e uma avaliação estatística, conforme sugerido no apêndice D do RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a), poderá ser desenvolvida para identificar o valor mais significativo considerando o conjunto de dados validos para resultados analíticos e de toxicidade quando disponíveis e suficientes. Quando os dados anteriormente citados não forem suficientes para a avaliação estatística adequada, será sempre utilizado o NOAEL como Valor de Referência Tóxica.

Os NOEC também obtidos em estudos toxicológicos de Dose vs. Resposta significam maior concentração na qual não houve efeito tóxico. O NOEC não equivale a “concentração sem efeito”, ou seja, é a concentração mais alta utilizada em estudo de Dose vs. Resposta e que não causou efeito estatisticamente significativamente diferente da cobaia controle. Os LOEC significam a menor concentração na qual foi observado um efeito tóxico ou adverso observado.

10.6.1.2 BIOACUMULAÇÃO E BIOMAGNIFICAÇÃO E BIOTRANSFERÊNCIA

A bioacumulação descreve um processo pelo qual as SQIs de interesse para linha de evidência química são absorvidas pelas espécies alvo (biota terrestre ou aquática) a serem avaliadas pela linha de evidência química. Será considerado que a bioacumulação é direta quando a SQI for assimilada a partir de um compartimento do meio físico impactado pelo rompimento da barragem B I (rejeito, solo, mistura solo-rejeito, sedimento, mistura sedimento-rejeito, água superficial, na camada orgânica da rizosfera (serrapilheira) e região de rejeito sob dossel) ou indireta quando o processo de bioacumulação ocorrer pela transferência pela cadeia trófica.

A bioacumulação será avaliada pelo Fator de Bioacumulação (FB) em indivíduos de espécies alvo que estão associados a *endpoints* de medição, por meio da quantificação das Substâncias Químicas de Interesse (SQI) nestes pontos, bem como nas espécies alvo da biota terrestre e aquática que possam estar potencialmente expostas.

O Fator de Bioacumulação, adaptado por Trevizani et al. (2016), será calculado seguindo a fórmula abaixo:

$$FB = \frac{CMO}{CMS}$$

Onde:

CMO - Concentração da SQI no individuo da espécie alvo (fauna na musculatura e fígado; flora nas raízes);

CMS - Concentração no Compartimento do Meio Físico Avaliado (rejeito, solo, mistura solo-rejeito, sedimento, mistura sedimento-rejeito, água superficial, na camada orgânica da rizosfera e região de rejeito sob dossel).

Para análise dos resultados do FB, será utilizada a Classificação de Bioacumulação de Kabata (Pendias & Pendias, 1992), apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação de Bioacumulação (Kabata-Pendias & Pendias, 1992)

FATOR DE BIOACUMULAÇÃO	GRAU DE ACUMULAÇÃO
0,001 a 0,01	Ausente
0,01 a 0,1	Baixo
0,1 a 1	Médio
1 a 10	Alto
Acima de 10	Muito Alto

Outra possibilidade de cálculo do FB é a utilização do software Modelo DYNBAM (modelo para bioacumulação de metais com base em modelamento cinético), o qual prevê com precisão a bioacumulação de ampla gama de metais, organismos e habitats. Caso o DYNBAM venha ser utilizado para o dimensionamento da bioacumulação, parâmetros específicos como taxas de absorção e eliminação, eficiência de assimilação, taxas de ingestão de alimentos, entre outros, deverão estar disponíveis para cada espécie alvo.

O Fator de Biomagnificação na teia trófica (FBM), que define a cinética da SQI ao longo da cadeia trófica, será calculado dividindo-se a concentração média de cada SQI observada em cada espécie alvo pela concentração da espécie de menor nível trófico. Será considerado que a biomagnificação trófica ocorre quando ocorrer acúmulo progressivo de determinada SQI encontrada em um nível trófico para outro ao longo da teia alimentar.

Para avaliação da linha de evidência química, também será utilizado o Fator de Biotransferência (FBT), o qual descreve a taxa de transferência de metais de uma fonte de alimento (presa) para um consumidor (predador), conforme a equação abaixo (Trevizani, 2018).

$$FBT = \frac{SQI_{consumidor}}{SQI_{presa}}$$

Onde:

$SQI_{consumidor}$ - Concentração da SQI no consumidor (predador);

SQI_{presa} - Concentração da SQI fonte de alimento (presa).

A biotransferência será positiva entre os níveis tróficos quando FBT for maior que uma unidade.



No caso da avaliação da biomagnificação na teia trófica partindo de espécies alvo de flora terrestre e aquática, será calculado, antes do cálculo do FBM, o Fator de Translocação (TF), o qual indicará a capacidade da planta para transportar as SQIs da raiz para a parte sua parte aérea, ficando desta forma disponíveis para entrar na teia trófica. O TF será calculado pela seguinte equação:

$$FBT = \frac{C_{Aérea}}{C_{Raiz}}$$

Onde:

$C_{Aérea}$ - Concentração da SQI para parte aérea da planta;

C_{Raiz} - Concentração da SQI na raiz da planta.

10.6.2 Linha de Evidência Ecotoxicológica

Para a obtenção das evidências ecotoxicológicas serão utilizados os resultados obtidos para os ensaios ecotoxicológicos que vêm sendo realizados desde o rompimento da barragem B I, bem como de coletas e análise química de amostras de solo, sedimento e água superficial periódicas ao longo da bacia do rio Paraopeba e encaminhadas para ensaios ecotoxicológicos em laboratórios.

Os objetivos da avaliação das evidências ecotoxicológicas com base em ensaios de ecotoxicidade serão:

- Determinar se as SQI (estressores químicos) estão biodisponíveis;
- Avaliar efeitos tóxicos agregados de todas as SQIs identificadas nos compartimentos do meio físico impactados;
- Caracterizar a natureza do efeito tóxico;
- Caracterizar a distribuição espacial da toxicidade.

Caso ensaios ecotoxicológicos adicionais em espécies alvo específicas definidas no MCA_{ECO} sejam necessários para complementação da base de dados secundários sobre o meio biótico, estes serão previstos no *Plano de Investigação para Meio Ambiente*, conforme lista de ensaios abaixo:

- Biodiversidade Aquática:
 - Alga *Raphidocelis subcapitata* (ensaio crônico conforme ABNT NBR 12648:2018);

- Microcrustáceos *Daphnia similis* (ensaio agudo conforme ABNT NBR 12713:2016) e *Ceriodaphnia dubia* e *Ceriodaphnia silvestrii* (ensaio crônico conforme ABNT NBR 13373:2017);
- Peixe *Danio rerio* (ensaio agudo conforme ABNT NBR 15088:2016);
- Bactéria *Vibrio fischeri* (ensaio agudo conforme ABNT NBR 15411-3:2021);
- *Hyalella azteca* (ensaio agudo conforme ABNT NBR 15470:2021);
- *Mysidopsis juniae* (ensaio agudo conforme ABNT NBR 15308:2017);
- *Skeletonema costatum* (ensaio crônico conforme ABNT NBR 16181:2021);
- *Grandidierella sp.*(ensaio agudo conforme ABNT NBR 15638:2016).
- Biodiversidade Terrestre:
 - Ensaio agudo conforme ABNT NBR 15537:2014 - Ecotoxicologia terrestre - Toxicidade aguda - Método de ensaio com minhocas (Lumbricidae);
 - Ensaio agudo e crônico conforme ABNT NBR ISO 16387:2012 - Qualidade do solo — Efeitos de poluentes em Enchytraeidae (*Enchytraeus sp.*) — Determinação de efeitos sobre reprodução e sobrevivência;
 - Ensaio agudo e crônico conforme ISO 17512-2:2011 – Qualidade do solo – Teste de prevenção para determinar a qualidade dos solos e os efeitos dos produtos químicos no comportamento – Parte 2: Teste com colêmbolos (*Folsomia candida*);
 - Ensaio agudo conforme ISO 11268-1:2012 – Qualidade do solo – Efeitos de poluentes em minhocas – Parte 1: Determinação da toxicidade aguda para *Eisenia fetida* / *Eisenia andrei*;
 - Ensaio agudo e crônico conforme ISO 11268-2:2012 – Qualidade do solo – Efeitos dos poluentes nas minhocas – Parte 2: Determinação dos efeitos na reprodução de *Eisenia fetida* / *Eisenia andrei*
 - Ensaio agudo e crônico conforme ABNT NBR ISO 11269-2:2014 - Qualidade do solo — Determinação dos efeitos de poluentes na flora terrestre – Parte 2: Efeitos do solo contaminado na emergência e no crescimento inicial de vegetais superiores.
- Ensaios Ecotoxicológicos na Lama de Rejeitos
 - ABNT NBR 10.004:2004 (item 4.2.1.4).
- Ensaios de Genotoxicidade em Solos/Sedimentos e ou Rejeitos:



- Guia OECD Guidelines for the Testing of Chemicals; Sensibilização cutânea em cobaias OECD 406 (1992);
- Teste de Micronúcleos em células de mamíferos in vivo OECD 407 (2008);
- Teste de Mutação Reversa em *Salmonella typhimurium* (AMES) OECD 471 (1997), ABNT NBR 15537/2014, ABNT NBR 15469/2021;
- Toxicidade cutânea aguda para ratos OECD 402 (2017);
- Toxicidade dermal para ratos - Doses repetidas (21/28 dias) OECD 410 (1981);
- Toxicidade inalatória aguda para ratos OECD 403 (2009);
- Toxicidade para ratos doses repetidas - 28 dias - dose limite OECD 407 (2008);
- Toxicidade oral aguda para ratos OECD 423 (2001).

A Tabela 1 apresenta os ensaios de ecotoxicidade que servirão de base para análise da Linha de Evidência Ecotoxicológica considerando as espécies alvo definidas para avaliação dos impactos na flora da AE_{ECO} em estudo.

Adicionalmente todos os resultados serão tratados estatisticamente com objetivo de avaliar tendências, dispersões, executar testes de normalidade e espacialização dos resultados ecotoxicológicos.

10.6.3 Linha de Evidência Ecológica

Para a obtenção das evidências ecológicas (abordagem pelo peso da evidência ecológica), serão utilizados nos resultados obtidos para os índices ecológicos, como riqueza, diversidade, abundância, constância de ocorrência, diversidade de espécies, distribuição de grupos taxonômicos, números e proporções de espécies alvo, taxas mortalidade, crescimento, deformidades, erosões, lesões e tumores, equitabilidade, índice de qualidade integrado (IQ), que vem sendo monitorados desde o rompimento da barragem B I até o momento do desenvolvimento dos estudos de ARE.

Será montada uma matriz de índices ecológicos monitorados por espécie alvo de fauna e flora, nativas e exógenas. Esta consolidação terá um caráter temporal com objetivo de avaliar as variações no tempo dos índices ecológicos monitorados.

A Tabela 3 resume os grupos que poderão ser avaliados na linha de evidência ecológica, bem como os indicadores ecológicos a serem acompanhados.



Tabela 3 – Grupos possíveis de avaliação para linha de evidência ecológica

	GRUPOS	REPRESENTANTES	INDICADORES ECOLÓGICOS
MICROORGANISMOS	Bactérias	Bactérias Gram-negativas	Presença e ausência; Frequência como fitopatógenos; Riqueza;
	Micro Algas	Algas verdes	Presença e ausência; Abundância; Riqueza; Tamanho celular; Quantidade de clorofila;
	Fungos	<i>Batrachochytrium dendrobatidis</i> (micose letal de Anfíbios), <i>Macrophomina phaseolina</i> (fitopatogênico), <i>Fusarium sp.</i> (fitopatogênico), <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> (fitopatogênico), entre outros	Presença e ausência; Frequência como fitopatógenos ou zoonoses; Riqueza;
	Líquens	Líquens Crostosos	Presença e ausência; Riqueza;
FAUNA INVERTEBRADA	Anelídeos	Minhocão (<i>Rhinodrilus alatus</i>)	Presença e ausência; Abundância; Deformidades e lesões cutâneas;
	Insetos Aquáticos	Libélulas (Odonoptera), Epheméridas (Ephemeroptera) e Trichópteros	Abundância; Riqueza de Espécies; Morfometria para avaliar assimetria flutuante; Alteração da pigmentação corpórea; Números e proporções de espécies alvo;
	Insetos Terrestres	Besouros, Moscas, Mosquitos, Formigas, Abelhas, Borboletas entre outros Endopterygota	Abundância; Riqueza de Espécies; Morfometria para avaliar assimetria flutuante; Alteração da pigmentação corpórea; Números e proporções de espécies alvo (endêmicas, raras, em risco);
FAUNA VERTEBRADA	Ictiofauna	Perciformes, Siluriformes, Characiformes, Cyprinodontiformes e outros	Abundância; Riqueza de Espécies; Morfometria para avaliar assimetria flutuante; Números e proporções de espécies alvo (endêmicas, raras, em risco); Zoonoses na Epiderme, causadas por fungos ou bactérias;
	Anfíbios	Sapos, Perereca, Rãs, Salamandras e Cecílias	Deformidade nos girinos; Dificuldades na regeneração; Proxys de diversidade ecológica (tipos de microhabitat, média corpórea, tipo alimentar, tipo reprodutivo); Abundância; Riqueza de Espécies; Morfometria para avaliar assimetria flutuante; Alteração da pigmentação corpórea; Números e proporções de espécies alvo (endêmicas, raras, em risco); Zoonoses na Epiderme, causadas por fungos ou bactérias; Deformidades nas extremidades (patas) causadas por tumores, erosões e lesões;
	Répteis (Squamata)	Lagartos, Serpentes e Anfisbenas	Abundância; Riqueza de Espécies; Morfometria para avaliar assimetria flutuante; Números e proporções de espécies alvo (endêmicas, raras, em risco); Zoonoses na Epiderme, causadas por fungos ou bactérias; Deformidades nas extremidades (patas) causadas por tumores, erosões e lesões; Dificuldades na regeneração; Proxys de diversidade ecológica (tipos de microhabitat, média corpórea, proporção alimentar, tipo reprodutivo);
	Répteis (Testudines)	Cágados e Jabutis	Abundância; Riqueza de Espécies; Números e proporções de espécies alvo (endêmicas, raras, em risco); Zoonoses na Epiderme, causadas por fungos ou bactérias; Deformidades nas extremidades (patas e cauda) causadas por tumores, erosões e lesões; Dificuldades na regeneração;
	Répteis (Crocodilianos)	Jacaré-de-papo-amarelo (<i>Caiman latirostris</i>)	Tamanho populacional; Presença e ausência; Abundância; Zoonoses na Epiderme, causadas por fungos ou bactérias; Deformidades nas extremidades (patas e cauda) causadas por tumores, erosões e lesões; Dificuldades na regeneração;
	Mamíferos Alados	Morcegos	Guilddas tróficas (determinadas pelos 6 tipos de forrageio); Abundância; Riqueza de Espécies; Números e proporções de espécies alvo (endêmicas, raras, em risco); Zoonoses na Epiderme, causadas por fungos ou bactérias; Deformidades nas extremidades (patas, asas e cauda) e partes moles (focinho e orelhas) causadas por tumores, erosões e lesões;
	Mamíferos Terrestres de Pequeno Porte	Roedores e Marsupiais	Guilddas tróficas; Abundância; Riqueza de Espécies; Números e proporções de espécies alvo (endêmicas, raras, em risco); Zoonoses na Epiderme, causadas por fungos ou bactérias; Deformidades nas extremidades (patas e cauda) e partes moles (focinho e orelhas) causadas por tumores, erosões e lesões; Presença e Riqueza de ectoparasitas;
	Mamíferos Terrestres de Médio e Grande Porte	Felinos, Canídeos, Primatas entre outros.	Guilddas tróficas; Abundância; Riqueza de Espécies; Números e proporções de espécies alvo (endêmicas, raras, em risco); Zoonoses na Epiderme, causadas por fungos ou bactérias; Deformidades nas extremidades (patas e cauda) e partes moles (focinho e orelhas) causadas por tumores, erosões e lesões; Presença e Riqueza de ectoparasitas;
	Aves	Rapinantes, Passeriformes, Anseriformes, Pelacaniformes entre outros	Morfometria para avaliar assimetria flutuante e a capacidade de vôo; Proxys de diversidade ecológica (tipos de microhabitat, massa corpórea, proporção alimentar); Abundância; Riqueza de Espécies; Números e proporções de espécies alvo; Zoonoses na Epiderme, causadas por fungos ou bactérias; Deformidades nas extremidades (bico, patas e asas) causadas por tumores, erosões e lesões; Presença e Riqueza de ectoparasitas;
FLORA	Plantas Ornitófilas	Acanthaceae, Bromeliaceae, Bignoniaceae, Cactaceae	Presença/Ausência, Abundância, Sucesso reprodutivo, Riqueza de espécies;
	Macrófitas Aquáticas	Angiospermas: Aguapé (<i>Eichornia crassipes</i>), Ninféia (<i>Nymphaea spp.</i>), Cabomba (<i>Cabomba spp.</i>), Taboa (<i>Thypha spp.</i>); Monilofitas: Salvinia (<i>Salvinia spp.</i>)	Abundância, Riqueza de espécies, Taxa de crescimento;
	Plantas vasculares epífitas	Angiospermas: Cactaceae - Cactos macarrão (<i>Rhipsalis spp.</i>); Monilofitas: Psilotaceae - <i>Psilotum nudum</i>	Presença/Ausência, Riqueza de espécies, Diversidade de espécies, Número e proporção de espécies alvo (endemismo, grau de ameaça, raridade),
	Trepadeiras Lenhosas (lianas ou cipós)	Bignoniaceae: <i>Adenocalymma spp.</i> , <i>Bignonia spp.</i> , <i>Lundia spp.</i> ; Dilleniaceae: <i>Tetracera spp.</i> ; Fabaceae: <i>Diolea spp.</i> , <i>Mucuna spp.</i> ; Menispermaceae: <i>Cissampelos spp.</i> ; Sapindaceae: <i>Serjania spp.</i>	Presença/Ausência, Abundância, Estrutura, Riqueza de espécies, Número e proporção de espécies alvo (endemismo, grau de ameaça, raridade),
	Plantas Holoparasitas	Balanophoraceae: <i>Langsdorffia hypogaea</i> , <i>Lophophytum spp.</i> ; Apodanthaceae: <i>Apodanthes caseariae</i> , <i>Pilostyles blanchetii</i> ; Convolvulaceae: <i>Cuscuta racemosa</i>	Presença/Ausência, Número e proporção de espécies alvo (endemismo, grau de ameaça, raridade), Sucesso reprodutivo, Diversidade de espécies
	Espécies arbóreas nativas		Número e proporção de espécies alvo (endemismo, grau de ameaça, raridade), Riqueza e diversidade de espécies, Presença e frequência de espécies invasoras, Banco e chuva de sementes, Estrutura de espécies, equitabilidade, Biomassa de lenho (por área),
	Plantas Rupícolas	Pteridaceae: Avencas (<i>Adiantum spp.</i>); Araceae: Imbés (<i>Philodendron fragrantissimum</i>); Bromeliaceae: Bromélias (<i>Aechmea spp.</i> , <i>Vriesea spp.</i>); Orchidaceae: Orquídeas (<i>Epidendrum spp.</i>)	Presença/Ausência, Diversidade e Riqueza de espécies, Número e proporção de espécies alvo (endemismo, grau de ameaça, raridade), Presença e frequência de espécies invasoras, IQ



Para a avaliação dos indicadores ecológicos serão utilizados os seguintes índices:

- Índice de *Margalef* - expressa a riqueza de espécies, considerando o número de espécies (S-1) e o logaritmo (base 10 ou natural) do número total de indivíduos;
- Índice de Simpson – expressa a dominância de espécies e a probabilidade de dois indivíduos selecionados ao acaso serem da mesma espécie;
- Índice de *Pielou* – exprime a análise da equitabilidade, o qual refere-se ao padrão de distribuição dos indivíduos entre as espécies;
- Índice de *Jaccard* – utilizado para a análise da similaridade de espécies entre as diferentes regiões estudadas dentro da AE_{ECO} em estudo. Este coeficiente é utilizado para estudar a coexistência de espécies ou a similaridade entre áreas amostradas.
- Shannon-Weaver: fornece uma ideia do grau de incerteza em prever, a qual espécie pertenceria um indivíduo retirado aleatoriamente da população;
- Coeficiente de Mistura de Jentsch: indica, em média, o número de indivíduos de cada espécie que é encontrado no povoamento. Dessa forma, tem-se um fator para medir a intensidade de mistura das espécies.

10.6.3.1 Índice de Estado Trófico (IET)

O Índice de Estado Trófico (IET) tem como objetivo classificar corpos de água em diferentes graus de trofia e avaliar a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes, e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo do fitoplâncton ou ao aumento de macrófitas aquáticas. Alguns dos efeitos decorrentes da eutrofização incluem (Lamparelli, 2004):

- Diminuição da diversidade de espécies e alteração da biota;
- Aumento da biomassa de plantas e animais;
- Aumento da turbidez;
- Aumento da taxa de sedimentação;
- Possibilidade de desenvolvimento de condições anóxicas

O Índice de Estado Trófico depende de dois parâmetros, o fósforo (P) e a clorofila-*a* (CL). O fósforo é a medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como agente causador do processo. Em quanto que a clorofila-*a*, é a medida da reposta do corpo hídrico ao agente causador, indicando o nível de crescimento do fitoplâncton devido ao enriquecimento de nutrientes (CETESB, 2007).



Por tanto para calcular o Índice do Estado Trófico (IET) primeiro deve ser calculado o Índice do Estado Trófico da clorofila IET (CL) e o Índice do Estado Trófico do fósforo IET (P), sendo suas respectivas equações (Lamparelli, 2004):

$$IET (CL)= 10 \{ 6 - [(2,04 - 0,695 \ln CL) / \ln 2] \}$$

$$IET (P)= 10 \{ 6 - [\ln (80,32/P) / \ln 2] \}$$

Onde:

P = concentração de fósforo total medida a superfície da água (µg/L)

CL= concentração de clorofila a medida a superfície da água (µg/L)

ln= logaritmo natural

O cálculo do Índice do Estado Trófico a partir do IET (P) e IET (CL) é a seguinte:

$$IET = [IET (P) + IET (CL)] / 2$$

Os valores do IET são classificados em categorias do estado trófico que indicam a resposta biológica de lagos ou rios á introdução de nutrientes. Essas categorias são:

Categoria Estado Trófico	Valor de IET	Características
Oligotrófico	47 < IET ≤ 52	Corpos de agua de baixa produtividade primaria e baixa produção de nutrientes
Mesotrófico	52 < IET ≤ 59	Corpos de agua com produtividade primaria intermediaria e com possíveis implicações sobre a qualidade da agua mas em níveis aceitáveis
Eutrófico	59 < IET ≤ 63	Corpos de agua com alta produtividade primária e alta produção de nutrientes, redução da transparência e alterações indesejáveis na qualidade da agua

Fontes: (CETESB, 2007; Lamparelli, 2004)



10.6.4 Linha de Evidência Física

A Linha de Evidência Física não está prevista nos protocolos da US.EPA para desenvolvimento de ARE. Entretanto, esta linha de evidência poderá ser avaliada, considerando que os impactos na qualidade de água e sedimentos da Bacia do rio Paraopeba e/ou a presença de rejeitos provenientes do rompimento da barragem que causou perda e alterações nos habitats identificados na AE_{ECO} em estudo.

Não há uma metodologia definida para a avaliação de risco considerando a linha de evidência física. Sendo assim, os dados serão utilizados de forma qualitativa, e na sua grande maioria comparando a situação pré e pós o evento. A linha de evidência física será baseada na avaliação principalmente de 3 aspectos:

- Dados de parâmetros físicos de qualidade de água: turbidez, carga transportada por arraste e sólidos em suspensão totais (SST);
- Espessura do rejeito nas porções intracalha e extracalha;
- Perda e modificação física de habitats terrestres e aquáticos.

Sendo assim, a avaliação dos efeitos deve incluir não só a análise da toxicidade estressores que as alterações físico-químicas associadas ao estressor físico podem causar na biota terrestre e aquática, mas também a discussão sobre os efeitos ecológicos resultantes da exposição a estressores físicos dos habitats identificados na AE_{ECO} em estudo.

Para tanto serão desenvolvidas séries históricas de dados de monitoramento para avaliação temporal dos parâmetros listados acima e comparação com a variação espacial dos efeitos sobre biota terrestre e aquática.

10.6.5 Análise de Incertezas e Sensibilidade²⁹

10.6.5.1 Incertezas

A Análise de Incertezas e Sensibilidade será desenvolvida com base na metodologia descrita nos itens 1.3.3, 2.2.2, 7.4, do RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a) e suas

²⁹ Esta sessão foi adaptada para atendimento à Nota Técnica nº 6/FEAM/GERAQ/2021



posteriores revisões. Adicionalmente serão consideradas as premissas definidas no *Guidance on Risk Characterization for Risk Managers and Risk Assessors* (US.EPA, 1992).

A etapa da análise de incertezas consiste para a ARE no âmbito dos ERSHRE a serem desenvolvidos para a Bacia do rio Paraopeba será dividida nas seguintes tarefas:

1. Análise crítica dos dados secundários validados utilizados para desenvolver a etapa de Formulação do Problema na etapa SLERA;
2. Análise crítica dos dados secundários e primários validados utilizados para desenvolver a etapa de Formulação do Problema na etapa BERA;
3. Análise crítica das premissas utilizadas para o desenvolvimento do Modelo Conceitual Ecológico da Área (MCA_{ECO}), bem como os critérios para definição de Substâncias Químicas de Interesse (SQI);
4. Análise crítica das premissas utilizadas para definição dos receptores ecológicos de fauna e flora;
5. Análise crítica das premissas utilizadas para definição dos definições de *endpoints* de medição e avaliação;
6. Análise crítica das premissas utilizadas para definição das espécies alvo de fauna e flora
7. Análise crítica de incertezas associadas a etapa de avaliação da exposição, como consequência da incerteza nos dados secundários e primários usados para estimar as concentrações ou doses de exposição;
8. Análise crítica das premissas utilizadas para definição das espécies índice, bem como os dados toxicológicos a serem utilizados no cálculo do Quociente de Risco Ecológico (QR). Neste caso serão analisadas incertezas associadas às estimativas de toxicidade para receptores ecológicos da área em estudo a partir dados toxicológicos de outras espécies (espécies índice) associadas a outros ecossistemas distintos. Nesta tarefa também serão analisadas incertezas associadas as estimativas de risco quando ocorrem exposições simultâneas a várias SQIs.

As análises críticas descritas acima terão caráter qualitativo e objetivaram identificar incertezas técnicas no processo de consolidação e geração de dados, bem como quantificação das quatro linhas de evidência previstas no projeto detalhado de ARE.

Para minimização ou eliminação das incertezas identificadas, serão utilizadas duas abordagens com base na quantificação do risco ecológico:

1. Utilizar vários pontos de exposição para mesma rota de exposição ecológica prevista no MCA_{ECO} , visando estimar o risco ecológico para estes pontos de exposição a partir de diferentes dados secundários e primários;

2. Conduzir uma análise minimização ou eliminação de sensibilidade para prever a distribuição dos riscos ecológicos calculados para diferentes níveis de exposição.

10.6.5.2 Sensibilidade

A análise de sensibilidade, utilizada para mitigação ou eliminação de incertezas, será desenvolvida com o objetivo de identificar os parâmetros de cálculo utilizados para quantificação da dose de exposição. Neste caso, a análise de sensibilidade será realizada através da Avaliação de Risco Probabilística (PRA).

A PRA é uma avaliação de risco que usa distribuições de probabilidade para caracterizar variações ou incertezas nas estimativas de risco. Serão utilizadas uma ou mais variáveis das equações para quantificação do risco como distribuição de probabilidade, substituindo desta forma o valor único utilizado anteriormente. Sendo assim, o resultado desta etapa será um intervalo ou distribuição de probabilidade dos riscos quantificados para cada cenário de exposição válido.

A Avaliação de Risco Probabilística será desenvolvida com base na metodologia descrita no “U.S. EPA. *Risk Assessment Guideline for Superfund (RAGS), Human Health Evaluation Manual (EPA 540-R-02-002). PART A, Volume III. Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment*” e suas posteriores revisões.

Os objetivos da PRA são:

1. Descrever quantitativamente o grau de variabilidade e incerteza nas estimativas de risco para efeitos adversos para fauna e flora, fornecendo desta forma uma caracterização abrangente do risco;
2. Avaliar a utilização dos parâmetros exposicionais com valores que representem a Máxima Exposição Razoável (RME);
3. Avaliar a utilização dos parâmetros exposicionais com valores que representem o perfil exposicional específico da AE_{ECO} em estudo;
4. Definir os valores para os parâmetros exposicionais que representam o trecho em estudo com limite de confiança de 95%.

Serão utilizadas Simulações de Monte Carlo para desenvolvimento da PRA que consiste num processo de iterações matemáticas para resolução da fórmula de cálculo da dose de exposição, variando-se os valores dos parâmetros de entrada, dentro de uma determinada faixa aceitável, até que o resultado destas iterações identifique faixas de tendência aceitável para os resultados. Para o desenvolvimento da PRA serão utilizadas rotinas desenvolvidas em

linguagem de programação R (multi-paradigma orientada a objetos) conforme especificado nos documentos:

- *Guiding Principles for Monte Carlo Analysis – US EPA, 1997b.*
- *Risk Assessment Forum White Paper: Probabilistic Risk Assessment Methods and Case Studies – US EPA, 2014.*

O *software* Crystal Ball® desenvolvido pela empresa Decisioneering (www.decisioneering.com) também poderá ser utilizado para a análise de sensibilidade com base na PRA.

Os resultados da análise de incerteza e sensibilidade serão integrados com o objetivo de estabelecer quais limitações estão presentes nos resultados da avaliação de risco, considerando análise das aproximações qualitativas/semiquantitativas/quantitativas que podem ter influenciado diretamente nos resultados da quantificação do risco. Caso seja considerado que o nível de incerteza é inaceitável, estudos complementares poderão ser necessários.



10.6.6 Balanço de Evidências - *WEIGHT OF EVIDENCE* (WOE)

Em 2016 a US.EPA desenvolveu as diretrizes para *Weight of Evidence* (WHO) aplicáveis para ARE. A metodologia desenvolvida para esta finalidade pela US.EPA (US.EPA, 2016), será adotada para realização do balanço das quatro (4) linhas de evidências nos Estudos de Avaliação de Risco Ecológico (ARE) a serem desenvolvidos para os impactos na fauna e flora associados ao rompimento da barragem B I.

O WOE a ser desenvolvido nos Estudos de ARE será um processo inferencial que reunirá, avaliará e integrará evidências para realização de inferências técnicas com base nas linhas de evidências discutidas anteriormente, não sendo uma avaliação quantitativa. O WOE será desenvolvido em três etapas, conforme descrito por Suter II e Cormier (2011): (1) Consolidação, avaliação e quantificação das quatro evidências previstas nos ERSHRE; (2) Estabelecimento de pesos e ponderação das quatro evidências previstas nos ERSHRE; (3) Comparação entre as evidências a partir do peso e ponderações realizadas na etapa anterior.

A consolidação, avaliação e quantificação das linhas de evidências que participarão do processo WHO, serão desenvolvidas com base no descrito nos itens 10.6.1, 10.6.2, 10.6.3 e 10.6.4.

O estabelecimento de pesos e ponderações entre as evidências será estabelecido com base no descrito por Suter II (2017). Sendo assim, um sinal mais “forte” indicará evidência mais crítica do que um sinal “fraco”, portanto, um sinal forte recebe mais peso. Fortes evidências mostram: (1) uma grande magnitude entre os resultados que indiquem algum impacto a fauna e flora e os controles estabelecidos para cada linha de evidência; (2) um alto grau de associação entre uma causa e efeito; (3) um grande número de indicadores biológicos demonstrando impactos na fauna e flora. A força é uma propriedade das evidências obtidas a partir dos resultados dos ERSHRE. Sendo assim inicialmente será realizada:

1. Consolidação das linhas de evidência por *endpoint* de avaliação com base na:
 - a. magnitude dos efeitos (incluindo extensão espacial),
 - b. evidências de relações causais entre contaminantes e efeitos
 - c. relevância ecológica.
2. Avaliação as incertezas relacionadas à magnitude dos efeitos e a evidência de causalidade para cada linha de evidência para caracterizar a incerteza específica em relação à magnitude e causalidade.

3. Para cada *endpoint* de avaliação, será realizada uma avaliação integrada dos resultados para todas as linhas de evidencia, levando em consideração o grau de concordância entre as várias evidências para o *endpoint* avaliado.

Neste contexto, será definido uma pontuação para comparação entre as evidências partindo dos pesos e ponderações com o objetivo de (1) reduzir a ambiguidade das avaliações evidência, (2) esclarecer o padrão dos resultados e (3) facilitar a combinação de pesos entre propriedades. Sendo assim será definido um sistema de +, - e 0, símbolos para representar evidências que, respectivamente, apoiam, enfraquecem ou não têm efeito sobre a credibilidade de uma hipótese estabelecidas com base nos resultados dos itens 10.6.1, 10.6.2, 10.6.3 e 10.6.4, sendo que mais símbolos representam maior peso. Por exemplo, +++ pode representar evidências de apoio extremamente confiáveis e 0 pode representar relevância ambígua. Os critérios para as pontuações serão especificados ao final da primeira etapa SLERA (US.EPA, 2016).

10.7 Cálculo dos Valores Máximos Permissíveis (VMP)³⁰

Os valores máximos permissíveis no meio são definidos como as concentrações máximas das substâncias químicas de interesse - SQI (contaminantes) no meio físico que não causem risco ao ecossistema, caso ocorra uma situação de exposição dos receptores ecológicos.

Serão apresentados os valores máximos permitidos calculados para cada AE_{ECO}, a partir da fixação do quociente de risco aceitável.

Os VMP deverão ser calculados por compartimento do meio físico de interesse que tenha apresentado risco ecológico (QR) classificado como “potencialmente elevado”. Os VMP que serão utilizados para ações de monitoramento e reabilitação do meio biótico serão selecionados com base na magnitude do QR (seção 10.6.1) calculado para linha de evidência química, bem como considerando o *Balanço de Evidências* desenvolvido para as quatro linhas de evidência previstas nos Estudos de ARE para a Bacia do rio Paraopeba.

10.8 Conclusões e Recomendações

As conclusões das etapas anteriores do estudo de avaliação de risco ecológico desenvolvido com a metodologia do RAGS *Ecological Risk* (US.EPA, 1997a; US.EPA, 2018)

³⁰ Esta sessão foi adaptada para atendimento das **Recomendações da Auditoria Técnica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais.**

serão apresentadas de forma a indicar se essas são associadas à uma ou mais substâncias químicas de interesse relacionada ao rompimento da barragem B I ou não.

Quando possível, as conclusões e recomendações desse estudo serão integradas aos Estudos de ARSH desenvolvidos utilizando a metodologia RAGS *Human Health* (US.EPA, 1989a).

As recomendações e conclusões serão desenvolvidas visando o estabelecimento de critérios e ações voltadas para gestão e mitigação a níveis aceitáveis dos riscos teóricos calculados, os quais serão tratados no Plano de Intervenção para Gestão Ambiental de forma a estabelecer medidas de controle institucional, medidas de engenharia, medidas de remediação, medidas monitoramento, medidas de comunicações do risco e medidas de monitoramento ambiental para a área em estudo.

Sendo assim, todas as ações de reabilitação ambiental a serem dimensionadas no Plano de Gestão Ambiental visando a mitigação do risco teórico a níveis aceitáveis, serão ser integradas ao *Plano de Reparação Ambiental Integral da Bacia do rio Paraopeba*.



11 REFERÊNCIAS

- ABBAS, G.; MURTAZA, B.; BIBI, I.; SHAHID, M.; NIAZI, N. K.; KHAN, M. I.; AMJAD, M.; HUSSAIN, M.; NATASHA. 2018. Arsenic uptake, toxicity, detoxification, and speciation in plants: physiological, biochemical, and molecular aspects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 15(1): 59.
- AGAH, H. et al. 2009. Accumulation of trace metals in the muscle and liver tissues of five fish species from the Persian Gulf. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 157, n. 1–4, p. 499–514.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA). 2011. “Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras. Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos”. Brasília, DF.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). 2013. “Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 42”. Brasília, 29 de agosto de 2013. Disponível em: http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/2568070/rdc0042_29_08_2013.pdf/c5a17d2d-a415-4330-90db-66b3f35d9fbd.
- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). 2005a. *Public Health Assessment Guidance Manual (Update)*. Atlanta, USA.
- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). 2005b. *Public Health Assessment Guidance Manual (Update)*. U.S. Department of Health and Human Services. January.
- ALBUJA, L. 1999. *Murciélagos del Ecuador*. 2da Edición, Cicetronic Cía. Ltda. Offset Quito, Ecuador.
- AL-JOHANY, A. M.; HAFFOR, A. S. 2009. Effects of Cadmium Exposure on the Ultrastructural Pathology of Different Pulmonary Cells, Leukocyte Count, and Activity of Glutathione Peroxidase and Lactate Dehydrogenase in Relation to Free Radical Production in *Uromastix aegyptius*. *Ultrastructural Pathology*, 33(2): 39-47.
- ANDRESEN, E.; PEITER, E.; KUPPER, H. 2018. Trace metal metabolism in plants. *Journal of Experimental Botany*. 69(5): 909-954.



- ANZOLIN, D. G. 2011. Análise de contaminantes e biomarcadores em peixes-bois marinhos (*Trichechus manatus*). Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Centro de Ciências Biológicas – Programa de Pós Graduação em biologia animal.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ISO 11.268-1:2012. “Soil quality — Effects of pollutants on earthworms — Part 1: Determination of acute toxicity to *Eisenia fetida*/*Eisenia andrei*”. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ISO 11.268-2:2012 “Soil quality — Effects of pollutants on earthworms — Part 2: Determination of effects on reproduction of *Eisenia fetida*/*Eisenia andrei*”. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ISO 17.512-2:2011. “Soil quality — Avoidance test for determining the quality of soils and effects of chemicals on behaviour — Part 2: Test with collembolans (*Folsomia candida*)”. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9.897:1987 “Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores - Procedimento”. 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9.898:1987 “Preservação e técnicas de amostragem de afluentes líquidos e corpos receptores - Procedimento”. 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.004:2004 “Resíduos Sólidos - Classificação”. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.005:2004. “Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos”. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.006:2004 “Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos”. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.007:2004 “Amostragem de resíduos sólidos”. Rio de Janeiro, 2004.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12.648:2018. “Ecotoxicologia aquática - Toxicidade crônica - Método de ensaio com algas (Chlorophyceae)”. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12.713:2016. “Ecotoxicologia aquática - Toxicidade aguda - Método de ensaio com Daphnia spp (Crustacea, Cladocera)”. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13.373:2017. “Ecotoxicologia aquática - Toxicidade crônica - Método de ensaio com Ceriodaphnia spp (Crustacea, Cladocera)”. 5ª edição da ABNT NBR 13373:2017, equivale ao conjunto ABNT NBR 13373:2016 e Emenda 1, de 28.03.2017. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.088:2016. “Ecotoxicologia aquática - Toxicidade aguda - Método de ensaio com peixes (Cyprinidae)”. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.308:2017. “Ecotoxicologia aquática — Toxicidade aguda — Método de ensaio com misídeos (Crustacea)”. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.350:2012. “Ecotoxicologia aquática – Toxicidade crônica de curta duração - Método de ensaio com ouriço-do-mar (Echinodermata: Echinoidea)”. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 21p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.411-3:2021. “Ecotoxicologia aquática - Efeito inibitório sobre a bioluminescência de Vibrio fischeri. Parte 3: Método utilizando bactérias liofilizadas”. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.469:2007, cancelada em 16/12/2015 e substituída por ABNT NBR 15.469:2015, cancelada em 30/07/2021 e substituída por ABNT NBR 15.469:2021. “Ecotoxicologia aquática - Preservação e preparo de amostras”. Rio de Janeiro, 2021. 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.470:2021. “Ecotoxicologia aquática - Toxicidade aguda e crônica - Método de ensaio com Hyalella spp (Amphipoda) em sedimentos”. Rio de Janeiro, 2021.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.492:2007
“Sondagem de reconhecimento para fins de qualidade ambiental - Procedimento”. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.515-1:2007
Versão Corrigida: 2011 “Passivo ambiental em solo e água subterrânea- Parte 1: Avaliação preliminar”. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.515-2:2011
“Passivo ambiental em solo e água subterrânea- Parte 2: Investigação confirmatória”. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.515-3:2013
“Passivo ambiental em solo e água subterrânea- Parte 3: Investigação detalhada”. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.537:2014
“Ecotoxicologia terrestre - Toxicidade aguda - Método de ensaio com minhocas (Lumbricidae)”. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.638:2016
“Ecotoxicologia aquática - Toxicidade aguda - Método de ensaio com anfípodos marinhos e estuarinos em sedimentos”. 3ª edição da ABNT NBR 15.638:2016 equivale ao conjunto ABNT NBR 15.638:2015 e Emenda 1, de 11.04.2016. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15.847:2010
“Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento - Métodos de purga”. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16.181:2013
“Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica — Método de ensaio com microalgas marinhas”. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16.209:2013
“Avaliação de risco a saúde humana para fins de gerenciamento de áreas contaminadas”. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16.435:2015
“Controle da qualidade na amostragem para fins de investigação de áreas contaminadas – Procedimento”. Rio de Janeiro, 2015.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 11.269-2:2014. “Qualidade do solo — Determinação dos efeitos de poluentes na flora terrestre. Parte 2: Efeitos do solo contaminado na emergência e no crescimento inicial de vegetais superiores”. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 16.387:2012. “Qualidade do solo — Efeitos de poluentes em Enchytraeidae (Enchytraeus sp.) — Determinação de efeitos sobre reprodução e sobrevivência”. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO/IEC 17025:2017. “Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração”. Rio de Janeiro, 2017.
- ASTM INTERNATIONAL. 2006. ASTM D6634-01 “Standard Practice for the Selection of Purging and Sampling Devices for Groundwater Monitoring Wells”. 2016.
- ASTM INTERNATIONAL. 2016. ASTM D7144 “Standard Practice for Collection of Surface Dust by Micro-vacuum Sampling for Subsequent Metals Determination”. West Conshohocken, PA. 2016.
- ÁSTUA, D.; MOURA, R.; GRELE, C. E. V.; Fonseca, M. 2006. Influence of Baits, Trap Type, and Position for Small Mammals Capture in a Brazilian Lowland Atlantic Forest. *Bol. Mus. Biol. Mello Leitão*, v. 19, p. 31-44.
- BARCELOUX, D. G. 1999. Donald G. Barceloux. v. 37, n. 2, p. 173–194.
- BARRETO, C. T. 2013. Aves aquáticas como indicadores de contaminação por metais em áreas úmidas no Sul do Brasil. Universidade Federal do Rio Grande – Instituto de Ciências Biológicas – Programa de Pós-Graduação em Biologia de Ambientes Aquáticos Continentais.
- BENEDETTO, A. et al. 2010. Extracellular dopamine potentiates Mn-induced oxidative stress, lifespan reduction, and dopaminergic neurodegeneration in a BLI-3-dependent manner in *Caenorhabditis elegans*. *PLoS Genetics*, v. 6, n. 8.
- BOERI, M.; OLIVEIRI, C.; CAMURATI, C.; VIARENGO, A.; SFORZINI, S. 2017. Effects of Cr (VI) on Ca²⁺-ATPase activity in the earthworm *Eisenia andrei*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 203: 21-28.

- BOSCH, A. C. et al. 2016. Heavy metals in marine fish meat and consumer health: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 96, n. 1, p. 32–48.
- BOYD, W. A. et al. 2010. Medium- and high-throughput screening of neurotoxicants using *C. elegans*. *Neurotoxicology and Teratology*, v. 32, n. 1, p. 68–73.
- BRASIL. “Decreto Nº 55.871”. Brasília, 26 de março de 1965.
- BRASIL. Conselho Nacional de Saúde (CNS). Resolução nº 588, de 12 de julho de 2018. Disponível em: <<https://www.conasems.org.br/wp-content/uploads/2019/02/Reso588.pdf>>. Acesso em: 13.05.2020.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). 2017. “Manual de Procedimentos para Laboratórios – Área de microbiologia e físico-química de produtos de origem animal”. 2ª Edição. Brasília, DF. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/laboratorios/arquivos-publicacoes-laboratorio/manual-finalizado-com-foto-dipoa-cgal-14_09_16.pdf.
- BRASIL. Ministério da Saúde (MS). 2016. “Diretriz Nacional do Plano de Amostragem da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano”. Brasília. Disponível em: http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/diretriz_nacional_plano_amostragem_agua.pdf. Acessado em Outubro de 2018.
- BRASIL. Ministério da Saúde (MS). 2010. “Diretrizes para elaboração de estudo de avaliação de risco à saúde humana por exposição a contaminantes químicos”. Brasília. Disponível em: <https://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2015/janeiro/06/Avaliacao-de-Risco---Diretrizes-MS.pdf>.
- BRASIL. Ministério da Saúde (MS). “Portaria de consolidação nº 5”. Brasília, 28 de setembro de 2017. Disponível em: <https://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolidacao-n-5-de-28-de-setembro-de-2017.pdf>.
- BRASIL. Ministério da Saúde (MS). Gabinete do Ministro. Portaria nº 445, de 17 de dezembro de 2014. Lista Nacional Oficial de Espécies da Fauna Ameaçadas de Extinção – Peixes e Invertebrados Aquáticos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 dez. 2014. Seção 1, p.126.
- BRASIL. Ministério da Saúde (MS). 2014. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Vigilância em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador. Plano de Resposta às Emergências em Meio ambiente / Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em

