

PARECER RAMBOLL – METODOLOGIA DE MONITORAMENTO DO LAG LAYER
ANÁLISE TÉCNICA DO "RELATÓRIO FINAL – METODOLOGIA PARA AVALIAR A
ESTABILIDADE DO LAG LAYER E A POSSIBILIDADE DE REMOBILIZAÇÃO DA CALHA
FLUVIAL EM EVENTOS HIDROLÓGICOS" (ANEXO 12580719)

Project name **Samarco: Programs Monitoring Phase III-IV**
Recipient **Ministério Público Federal**
Document type **Parecer técnico**
Date **Abril de 2020**
Prepared by **Alessandra Peil, Bárbara Alves e Thiago Corrêa**
Checked by **Aldérico Marchi e Jonas Nascimento**
Approved by **Alejandra Devecchi, André Cintra e Ricardo Camargo**
Description **Atendimento ao despacho ref.: PR-MG-00016877/2020, que deferiu o pedido da Câmara Técnica de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental (CT-GRSA) endereçado ao Ilmo. Sr. Dr. José Adércio Leite Sampaio contido no ofício FEAM/CT-GRSA nº 24/2020. A solicitação encaminhada à Ramboll (expert do MPF) tem por objetivo avaliar o documento protocolado pela Fundação Renova em 20 de março de 2020 (ofício OFI.NII.122019.8481) intitulado "Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos" (anexo 12580719)**

PARECER TÉCNICO

Em atendimento ao despacho ref.: PR-MG-00016877/2020, que deferiu o pedido da Câmara Técnica de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental (CT-GRSA) endereçado ao Ilmo. Sr. Dr. José Adércio Leite Sampaio contido no ofício FEAM/CT-GRSA nº 24/2020, a Ramboll (expert do MPF) acolheu o encaminhamento e neste parecer procede as avaliações demandadas.

No presente parecer a Ramboll tem por objetivo avaliar o documento protocolado pela Fundação Renova em 20 de março de 2020 (ofício OFI.NII.122019.8481) intitulado "Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos" (anexo 12580719) de autoria da Golder Associates (2020).

Nos Planos de Manejo de Rejeitos dos Trechos 6 a 11 (Jacobs, 2018), a alternativa selecionada para os depósitos de rejeitos Intracalha foi "Capeamento natural do rejeito na calha através da formação do lag layer e monitoramento". Essa decisão foi tomada com base nas constatações de campo (por meio de sondagens estratigráficas em transectos do rio) que mostraram a formação de uma camada de "rejeito lavado" sobre a camada de "rejeito inconsolidados". A Fundação Renova passou a chamar essa camada de "lag layer".

A Câmara Técnica de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental (CT-GRSA) publicou em 21 de maio de 2019 a NOTA TÉCNICA CT-GRSA 02/2019, cuja Requisição 03 estabelece o seguinte:

"A Fundação Renova deverá apresentar proposta de estudos (em execução ou a serem executados) que visem avaliar como está ocorrendo o transporte de sedimentos nos rios impactados bem como estudos para avaliar o comportamento do lag layer em eventos de pluviosidade/vazão maiores, como períodos de recorrência de 25, 50 e 100. Esta proposta deverá conter a previsão de realização de workshop com especialistas para discussão do tema". PRAZO: 30 dias

Dessa forma, após o encaminhamento do Ofício SEMAD/CT-REJEITOS nº 98/2019 à Fundação Renova em 18 de novembro de 2019, a CT-GRSA oficializou a ausência de entrega da proposta requerida e concedeu 15 dias adicionais para atendimento da requisição 03. A Fundação Renova respondeu a CT-GRSA através

do Ofício OFI.NII.022019.8481 em 02 de dezembro de 2019, no qual alegou que o assunto foi judicializado e, portanto, os eixos prioritários foram apresentados ao Juízo da 12ª Vara Federal de Belo Horizonte/MG, sendo o assunto do lag layer incluído nesses eixos.

Por fim, para atender à Requisição 3 da NOTA TÉCNICA CT-GRSA 08/2019, a Fundação Renova protocolou em 20 de março de 2020 o ofício OFI.NII.122019.8481-02, no qual foi entregue o “Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos” (Golder, 2020), objeto de análise deste parecer.

O documento avaliado possui um objetivo geral e três objetivos específicos (Golder, 2020), conforme citado abaixo *ipsis litteris*:

- **Objetivo geral:** *Este projeto tem como objetivo elaborar um plano metodológico para avaliar o comportamento do lag layer do leito no qual ele encontra-se inserido e sua influência na liberação de rejeitos retidos na calha do rio Doce em eventos extremos de vazão. O estudo será realizado para os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, priorizando os trechos do rio até a barragem da UHE Risoleta Neves (Candonga) e considerando as especificidades de cada um dos trechos.*
- **Objetivo específico I:** *Definir o conceito de lag layer para o contexto da situação atual dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce.*
- **Objetivo específico II:** *Definir o conceito de grandes eventos de vazão (ou eventos extremos) no contexto de análise do lag layer.*
- **Objetivo específico III:** *Apresentar uma metodologia para avaliar o comportamento do lag layer e do leito no qual ele encontra-se inserido em eventos de pluviosidade/vazão maiores, como períodos de recorrência de 25, 50 e 100 anos.*

Atendimento ao objetivo específico I

No documento avaliado o capítulo 6 – “Conceito de lag layer e modelo conceitual” se propõe a atender o objetivo específico I. A avaliação detalhada do atendimento a este objetivo está na seção 3.2 do Apêndice 1.

Golder (2020) apresenta um “modelo conceitual da variação temporal do lag layer na bacia do rio Doce” dividido em quatro momentos:

- i. “Situação pré-evento”,
- ii. “Durante o evento de rompimento”,
- iii. “Situação pós-evento (atual)” e
- iv. “Situação futura”.

Apesar desse modelo conceitual apresentado pela Golder (2020) possuir uma ordem lógica de alteração de camadas ao longo do tempo, essa abordagem é segmentada nos aspectos espacial e temporal. Conforme ilustrado na Figura 0-1, os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce (nos trechos 6 a 11) apresentam maior declividade longitudinal nos 6, 8 e 9, além de maior quantidade de habitats aquáticos como corredeiras e cachoeiras.

Por isso, a transição de um momento para o outro pode ocorrer em datas diferentes para as diversas seções do rio, afinal os rios Galaxo do Norte, Carmo e Doce possuem diversos habitats aquáticos. Ademais, essa abordagem é segmentada em seções, o que limita a avaliação da morfologia fluvial porque desconsidera os processos de transição entre as seções, como por exemplo a variação na conformação de fundo do leito.

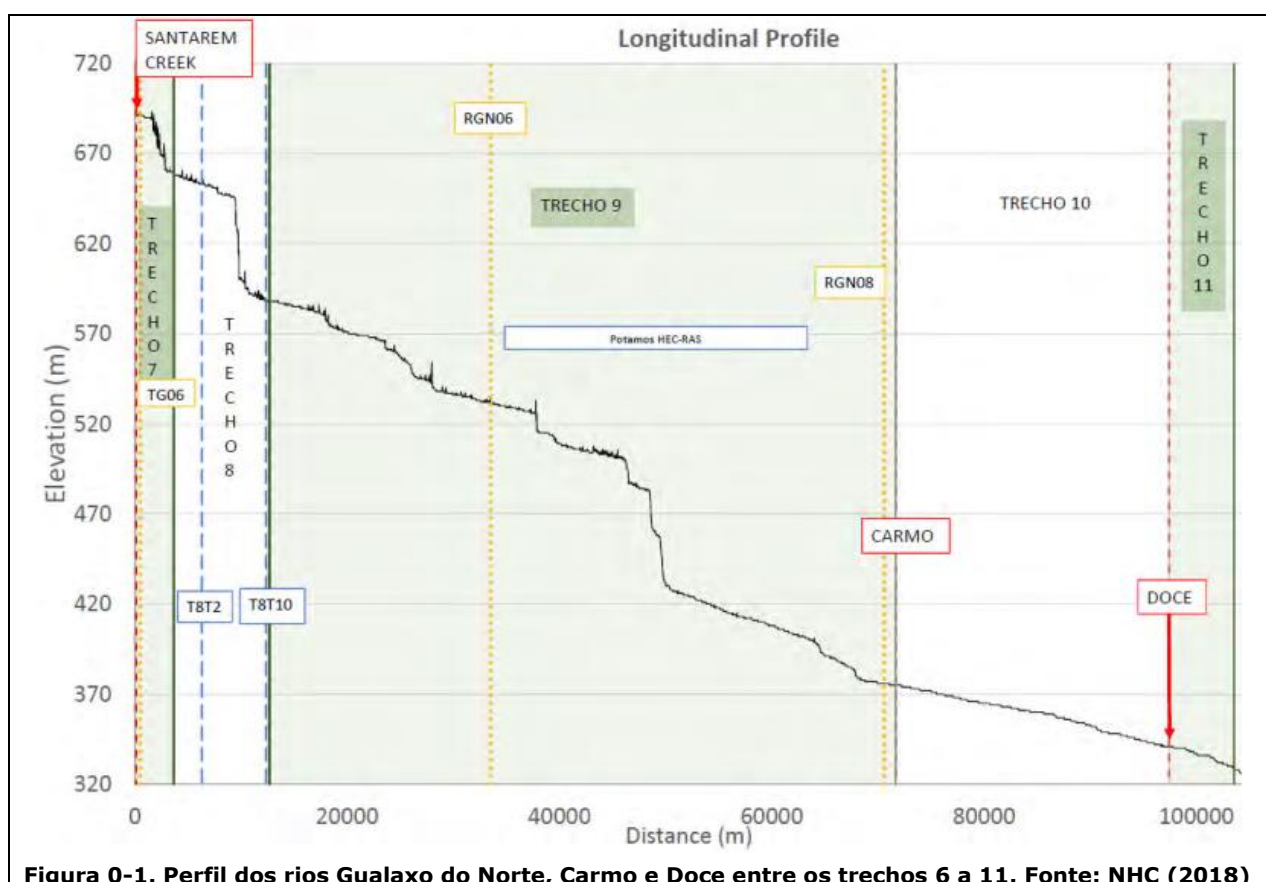


Figura 0-1. Perfil dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce entre os trechos 6 a 11. Fonte: NHC (2018)

Portanto, o objetivo específico I não foi cumprido. Esse modelo conceitual desconsidera qualquer teoria básica de transporte de sedimentos ou sequer menciona como será a mobilização desses sedimentos da camada superior, seja por arraste de fundo, saltitação ou transporte por suspensão. Logo, essa explicação está incompleta e precisa ser melhor embasada.

Atendimento ao objetivo específico II

No documento avaliado, o capítulo 7 – “Definição de grandes eventos” se propõe a atender o objetivo específico II. A avaliação detalhada do atendimento a este objetivo está na seção 3.3 do Apêndice 1.

Golder (2020) apresenta a sequência metodológica adotada para definir vazões de grandes eventos: “(i) Coleta de dados históricos de vazão em uma determinada seção; (ii) Análise de frequência para dados de vazão e determinação de quantis de vazão associados a tempos de retorno; (iii) Determinação da curva-chave representativa da seção avaliada; (iv) Determinação da descarga de leito com base na curva-chave e na seção transversal da seção; e (v) Definição do tempo de recorrência da descarga de leito” (sic.).

Em seguida é apresentado um exemplo de aplicação da metodologia adotada na seção da estação fluviométrica Fazenda Ocidente (código 56337000), localizada no rio Gualaxo do Norte, município de Barra Longa/MG (Trecho 9).

Na análise de frequência para os dados de vazão para determinar os Tempos de Retorno (TRs) na estação fluviométrica, além de não especificar qual método estatístico foi adotado para distribuição de máximos, a Golder (2020) utilizou as vazões médias diárias para determinar as vazões de eventos extremos.

Como o uso de vazões médias diárias para determinação de vazões máximas configura um erro conceitual de hidrologia, os passos seguintes apresentados (i) “Determinação da curva-chave representativa da seção avaliada”, (ii) “determinação da descarga de leito” e (iii) “determinação do tempo de recorrência da descarga de leito” não foram avaliados neste parecer e devem ser desconsiderados para quaisquer outros fins.

Diante do exposto, o objetivo específico II não foi atendido porque a metodologia aplicada no exemplo da estação fluviométrica Fazenda Ocidente (código 56337000) apresenta falhas conceituais na determinação de vazões com TRs de 2, 10, 25 e 50 anos.

Atendimento ao objetivo específico III

No documento avaliado o capítulo 9- “*Metodologias recomendadas para avaliação do lag layer*” se propõe a atender o objetivo específico III. A avaliação detalhada do atendimento a este objetivo está na seção 3.4 do Apêndice 1.

Golder (2020) propõe a adoção de três etapas combinadas, conforme resumido abaixo:

- **Métodos analíticos:** para determinar o limiar de mobilidade do leito, Golder (2020) propõe a aplicação do Diagrama de Shields (1936) modificado por Yalin (1963;1977), que é baseado na tensão crítica de fundo. Para determinar a profundidade de remoção do leito e do lag layer, Golder (2020) propõe a aplicação da Teoria do Regime com equações de Blench (1969), Lacey (1930) e Neill (1973).
- **Modelagem numérica:** Segundo Golder (2020), caso se defina por sua realização, a modelagem numérica serviria como um complemento à parte analítica, onde as variações espaciais no fornecimento de sedimentos de montante e a erosão do leito são dinâmicas e consideradas temporalmente.
- **Monitoramento de campo:** Segundo a Golder (2020) esta etapa informará se os resultados obtidos analiticamente e numericamente estão sendo observados na natureza. Esta parte, conforme consta na proposta, por necessitar de um longo período amostral e uma grande equipe de coleta e análise, ocorre de forma contínua, com entregas de produtos pontuais referentes às estações secas e úmidas que caracterizam o clima regional.

Métodos analíticos

Na proposta dos métodos analíticos, além de não prever uma fase de coleta de dados de campo para viabilizar esta etapa, Golder (2020) cometeu um erro na aplicação do Diagrama de Shields (1936) ao confundir o parâmetro “viscosidade cinemática” (m^2/s) com “*velocidade da água (m/s)*” (sic.) na fórmula de rugosidade do grão, fator que compõe a equação governante do método analítico proposto.

Cabe ressaltar que isso denota um erro conceitual, porque todos os métodos derivados de Shields (1936) são baseados na tensão crítica de fundo e não na velocidade do escoamento fluvial. Logo, como há esse erro conceitual na aplicação do método analítico, o exemplo de aplicação apresentado por Golder (2020) não foi avaliado neste parecer e deve ser desconsiderado para quaisquer outros fins.

Para estimar a profundidade de remoção do leito e do lag layer, Golder (2020) propõe a aplicação da Teoria do Regime, com formulações analíticas desenvolvidas por Blench (1962; 1969) e Lacey (1930), além do conceito de velocidade competente de Neill (1968; 1973).

É fundamental esclarecer que a aplicação de Teoria do Regime não é recomendada para rios, essa abordagem foi desenvolvida para canais artificiais retílineos com leitos erodíveis, como canais de irrigação. A Teoria do Regime de canais artificiais foi iniciada por Lindley (1919) e complementada por Lacey (1930) para auxiliar engenheiros britânicos no dimensionamento de canais de irrigação na Índia e no Paquistão.

Além disso, em relação ao conceito de velocidade competente, cuja definição é a velocidade média capaz de mobilizar os sedimentos do leito com um dado tamanho e peso, Garde & Raju (2000) apontam uma falha nesta abordagem porque nela não há menção sobre qual elevação deve ser feita a medição da velocidade do escoamento fluvial em relação ao leito.

Portanto, considerando o fato de que as formulações recomendadas por Golder (2020) não são aplicáveis para os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, e considerando também que as vazões máximas extremas estimadas para os TRs de 2, 10, 25 e 50 anos não foram definidas corretamente (ver seção 3.3), o exemplo de aplicação para os trechos 6 a 11 não foi avaliado neste parecer e seus resultados devem ser desconsiderados para quaisquer outros fins.

Modelagem numérica

Golder (2020) considerou a adoção de um modelo numérico bidimensional para amparar o monitoramento do lag layer nos Trechos 6 a 11. Os resultados esperados são (citação *ipsis litteris*):

- *leito móvel, isto é, a morfologia do leito que varia espacialmente (de montante a jusante) e temporalmente (no mesmo lugar ao longo do tempo);*
- *Mudanças de velocidade, profundidade e cisalhamento do fluxo em suas dimensões espaciais e temporais;*
- *Dinâmica estratigráfica, isto é, à medida que o leito recebe ou remove sedimentos de diferentes granulometrias, ele se distingue em termos de processos;*
- *Fornecer um mapa de remoção potencial das camadas do leito e do lag layer;*

Em seguida, Golder (2020) propõe a calibração do modelo numérico e simulação de cenários com diferentes condições hidráulicas, considerando hidrogramas com vazões de pico de TRs 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos. Entretanto, a proposta da Golder (2020) não aponta qual modelo numérico será utilizado, diz somente que será um modelo bidimensional. Cabe salientar que a escolha do modelo é fundamental para entender:

- quais equacionamentos governam o modelo hidrodinâmico e o morfodinâmico,
- quais equações de transporte de sedimentos estão disponíveis no modelo morfodinâmico,
- qual é o método de atualização de batimetria no modelo morfodinâmico,
- quais dados de entrada são necessários para desenvolver os modelos hidrodinâmico e morfodinâmico,
- acima de tudo, quais dados são necessários para calibrar os modelos hidrodinâmico e morfodinâmico.

Portanto, considerando: (i) a escassez de dados de campo fluviométricos e de sedimentos nos Trechos 6 a 11 (ver seção 3.1 e relatório da NHC, 2018), (ii) o mapeamento incompleto de fontes e sumidouros de sedimentos, (iii) a ausência de batimetrias do leito do rio para verificar as etapas de calibração e de validação do modelo, e (iv) o caráter superficial da proposta da Golder (2020) para o modelo numérico, a Ramboll não recomenda a adoção de modelagem morfodinâmica acoplada a modelo hidrodinâmico como ferramenta de monitoramento do lag layer nos Trechos 6 a 11.

Monitoramento de campo

O monitoramento de campo proposto pela Golder (2020) consiste na manutenção do plano de coleta vigente da Fundação Renova de dados hidrológicos e sedimentológicos e na amostragem “em três pontos ao longo da seção transversal Intracalha: próximo à margem esquerda, centro do talvegue e próximo à margem direita” (sic.).

A amostragem recomendada pela Golder (2020) consiste na coleta de testemunhos verticais com registro granulométrico, fotográfico e estratigráfico, realizada em pelo menos 20 transectos com espaçamento de 4 a 5 km.

Considerando que Jacobs (2018), nas campanhas de linha de base dos Planos de Manejo de Rejeitos dos Trechos 6 a 11, levantou a estratigrafia em 99 transectos e amostrou granulometria e metais em 33 transectos, a proposta da Golder (2020) configura um retrocesso. Logo, o plano de monitoramento de campo da Golder (2020) deve ser desconsiderado.

Combinação dos métodos propostos

Conforme apresentado nas seções 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3 do Apêndice 1, o objetivo específico III não foi atendido porque na proposta de monitoramento do lag layer da Golder (2020) existem erros conceituais nos métodos analíticos, superficialidade na proposta de modelagem numérica e um retrocesso no monitoramento de campo quando comparado aos levantamentos realizados na linha de base para os Planos de Manejo de Rejeitos. Portanto, a proposta da Golder (2020) deverá ser totalmente desconsiderada e um novo plano de monitoramento deverá ser feito.

Conclusão

Em resposta ao despacho ref.: PR-MG-00016877/2020, que deferiu o pedido da CT-GRSA contido no ofício FEAM/CT-GRSA nº 24/2020, a Ramboll conclui que o documento protocolado pela Fundação Renova em 20 de março de 2020 (ofício OFI.NII.122019.8481) intitulado “*Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos*” (anexo 12580719) de autoria da Golder Associates (2020) não atendeu aos objetivos geral e específicos estabelecidos.

Tampouco a metodologia de monitoramento proposta pela Golder (2020) cumpre a requisição 03 da NOTA TÉCNICA CT-GRSA 08/2019. Ademais, o documento avaliado apresenta erros conceituais de hidrologia (ver seção 3.3 do Apêndice 1) e de fundamentos de transporte de sedimentos (ver seção 3.4.1 do Apêndice 1), além de não prever um plano de coleta de dados fluviométricos e sedimentológicos (ver seção 3.1 do Apêndice 1).

Portanto, o documento avaliado deve ser totalmente desconsiderado e uma nova proposta de metodologia de monitoramento do comportamento do lag layer deve ser apresentada em caráter de urgência.

A nova proposta de monitoramento do comportamento do lag layer deverá seguir as diretrizes recomendadas pela Ramboll (ver seção 4 do Apêndice 1) e o trabalho final deverá ser revisado por uma empresa especializada em hidráulica e transporte de sedimentos (*peer review*). A Ramboll entende que dois meses são suficientes para elaborar a nova proposta e passar o trabalho por uma revisão de pares. Os trabalhos de coleta de dados em campo deverão começar antes do primeiro dia de outubro de 2020, para garantir o registro dos eventos de grandes vazões durante o período chuvoso.

APÊNDICE 1 - NOTA TÉCNICA DO PARECER

1.	Introdução	8
1.1	Lag layer no contexto do Plano de Manejo de Rejeitos	8
2.	Aplicações do lag layer em estudos de transporte de sedimentos fluviais	12
3.	Avaliação da metodologia de monitoramento do lag layer proposta pela Fundação Renova	15
3.1	Considerações sobre os dados coletados	16
3.2	Atendimento ao objetivo específico I	19
3.3	Atendimento ao objetivo específico II	20
3.4	Atendimento ao objetivo específico III	23
3.4.1	Métodos analíticos	24
3.4.2	Modelagem numérica	29
3.4.3	Monitoramento de campo	30
3.4.4	Combinação dos métodos propostos	32
4.	Recomendações propositivas da Ramboll para o monitoramento do lag layer	36
5.	Considerações finais	37
6.	Referências	38

1. Introdução

Em atendimento ao despacho ref.: PR-MG-00016877/2020, que deferiu o pedido da Câmara Técnica de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental (CT-GRSA) endereçado ao Ilmo. Sr. Dr. José Adércio Leite Sampaio contido no ofício FEAM/CT-GRSA nº 24/2020, a Ramboll (expert do MPF) acolheu o encaminhamento e neste parecer procede as avaliações demandadas.

No presente parecer a Ramboll tem por objetivo avaliar o documento protocolado pela Fundação Renova em 20 de março de 2020 (ofício OFI.NII.122019.8481) intitulado “*Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos*” (anexo 12580719) de autoria da Golder Associates (2020).

Antes de prosseguir com a análise propriamente dita, é fundamental entender fatores prévios à avaliação da metodologia de monitoramento do lag layer proposta pela Fundação Renova:

- O contexto no qual o monitoramento do lag layer foi adotado pela Fundação Renova como alternativa de manejo de rejeitos intracalha, sobretudo sua relação com os Plano de Manejo de Rejeitos dos Trechos 6 a 11 (Seção 1.1);
- Avaliar se a teoria do lag layer é aplicável para análises de transporte de sedimentos fluviais (Seção 2);

Em seguida, a Ramboll procede com a avaliação do documento “*Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos*” (Golder, 2020), conforme elencado abaixo:

- Avaliação técnica da metodologia proposta, considerando o estado da arte e melhores práticas de análise de transporte de sedimentos e de monitoramento fluvial (Seção 3);
- Recomendações propositivas da Ramboll para o monitoramento do lag layer (Seção 4);
- Considerações finais (Seção 5);
- Lista das referências consultadas para elaboração deste parecer (Seção 6).

Por fim, cabe ressaltar que este parecer não avalia resultados do monitoramento, o objeto de avaliação é a metodologia de monitoramento proposta pela Golder (2020).

1.1 Lag layer no contexto do Plano de Manejo de Rejeitos

A extensão dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce até o início do remanso do lago da UHE Risoleta Neves (Candonga) são compreendidos nos Planos de Manejo de Rejeitos dos Trechos 6 a 11 (ver o descritivo desses trechos na Tabela 1-1).

Tabela 1-1. Descritivo da divisão dos Trechos 6 a 11, conforme Plano de Manejo de Rejeitos (CH2M, 2017).

Divisão dos Planos de Manejo de Rejeitos em Trechos
Trechos 6 e 7: Rio Gualaxo do Norte, região da confluência com córrego Santarém, incluindo Camargos. Extensão: 10,9 km.
Trecho 8: Rio Gualaxo do Norte na região da PCH Bicas. Extensão: 9 km
Trecho 9: Médio até o final do Rio Gualaxo do Norte, incluindo Paracatu de Baixo e Gesteira. Extensão: 58km
Trecho 10 e 11: Rio do Carmo e Rio Doce, incluindo a parte urbana de Barra Longa/MG até o início do Reservatório de Candonga. Extensão: 30,8 km

Conforme ilustrado no diagrama da Figura 1-1, a razão entre o volume de rejeitos depositados por extensão do rio nos trechos 6 a 11 é menor que os trechos 1, 2, 4, 5 e 12 (observar a altura dos retângulos marrons para entender a concentração de rejeitos e a área desses polígonos para depreender o volume).

Por sua vez, a Tabela 1-2 apresenta a porcentagem de rejeitos depositados intracalha e extracalha. Observa-se que nos trechos 6, 7, 8 e 9, o volume de rejeitos intracalha é menor que 25%. Portanto, nesses trechos as ações de manejo de rejeitos devem ser focadas fora do leito do rio. Por outro lado, os trechos 10 e 11 apresentam majoritariamente deposição dentro do leito do rio, sendo a proporção de deposição intracalha 60,12% e 94,04%, respectivamente. Logo, para esses dois trechos as ações dentro do rio são mais relevantes. Cabe uma ressalva nesta análise expedita: essa estimativa de depósitos de rejeitos está nos Planos de Manejo de Rejeitos desses trechos, cujos trabalhos de campo foram realizados em 2017 e 2018.

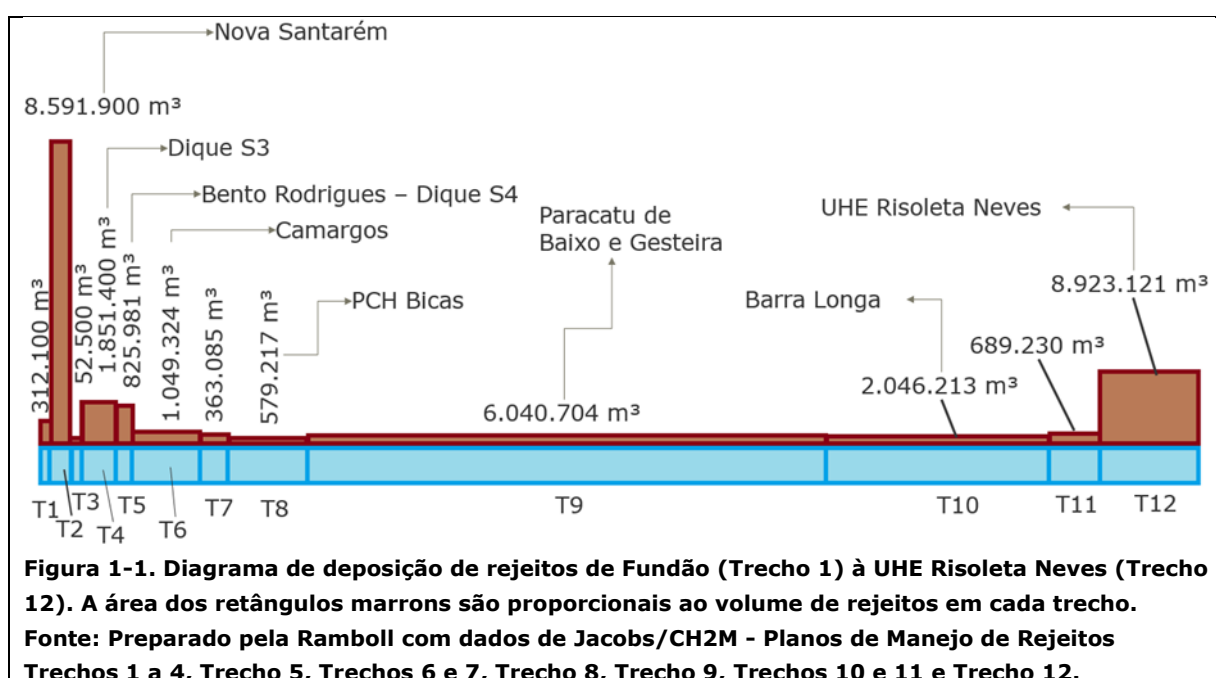


Tabela 1-2. Volume de rejeitos depositados entre Fundão e o início do remanso do lago da UHE Risoleta Neves (Trechos 1 a 11). Fonte: Preparado pela Ramboll com dados de Jacobs/CH2M (2018) - Planos de Manejo de Rejeitos Trechos 1 a 4, Trecho 5, Trechos 6 e 7, Trecho 8, Trecho 9, Trecho 10 e 11.

Manejo de Rejeitos	Volume de Rejeitos (m³)					
	Intracalha	%	Extracalha	%	Total	%
Trecho 1	10.900	3,49%	301.200	96,51%	312.100	100,00%
Trecho 2	5.363.200	62,42%	3.228.700	37,58%	8.591.900	100,00%
Trecho 3	35.600	67,81%	16.900	32,19%	52.500	100,00%
Trecho 4	1.743.800	94,19%	107.600	5,81%	1.851.400	100,00%
Trecho 5 (*)	447.216	54,14%	378.765	45,86%	825.981	100,00%
Trecho 6	87.598	8,35%	961.726	91,65%	1.049.324	100,00%

Tabela 1-2. Volume de rejeitos depositados entre Fundão e o início do remanso do lago da UHE Risoleta Neves (Trechos 1 a 11). Fonte: Preparado pela Ramboll com dados de Jacobs/CH2M (2018) - Planos de Manejo de Rejeitos Trechos 1 a 4, Trecho 5, Trechos 6 e 7, Trecho 8, Trecho 9, Trecho 10 e 11.

Manejo de Rejeitos	Volume de Rejeitos (m ³)					
	Intracalha	%	Extracalha	%	Total	%
Trecho 7	57.074	23,16%	189.391	76,84%	246.465	100,00%
Trecho 8	98.726	17,04%	480.491	82,96%	579.217	100,00%
Trecho 9	831.042	13,76%	5.209.662	86,24%	6.040.704	100,00%
Trecho 10	1.230.174	60,12%	816.039	39,88%	2.046.213	100,00%
Trecho 11	648.170	94,04%	41.060	5,96%	689.230	100,00%
Total	10.553.500	47,36%	11.731.534	52,64%	22.285.034	100,00%

(*) PMR não aprovado pelo sistema CIF

O objetivo do Plano de Manejo de Rejeitos é: *“apresentar diretrizes, conceitos, metodologias, técnicas, critérios e indicadores para tomada de decisão quanto ao manejo dos rejeitos para elaboração e execução de projetos aplicáveis a cada fração territorial nas áreas afetadas pelo rompimento da Barragem de Fundão”*. No mesmo plano, é definido o processo de tomada de decisão composto por cinco etapas, que foi validada pela NOTA TÉCNICA IBAMA/SISEMA/IEMA Nº 002/2017:

- Fase 1A – Caracterização ambiental da área afetada;
- Fase 1B – Complementação da caracterização ambiental da área afetada;
- Fase 2 – Tomada de decisão e seleção das alternativas de manejo;
- Fase 3 – Avaliação governamental da proposta apresentada;
- Fase 4 – Comunicação aos proprietários; e
- Fase 5 – Implementação e monitoramento da alternativa selecionada.

Em cada trecho foram identificados conjuntos de áreas com características similares (contextos) que envolvem questões socioeconômicas, físicas, químicas e biológicas (Ch2m, 2017). Para cada contexto é definido um objetivo específico que norteia a tomada de decisão para escolha da alternativa de manejo de rejeito, prevista na Fase 2.

De acordo com o Plano de Manejo de Rejeito (Ch2m, 2017), a definição da alternativa de manejo de rejeito segue o estabelecido no *Processo Simplificado de Tomada de Decisão de Manejo de Rejeito*¹, que considera os seguintes critérios:

- Efetividade em atingir os objetivos específicos;
- Viabilidade técnica e administrativa;
- Impactos e riscos causados pelo manejo; e
- Tempo de implementação.

Dessa forma, o complemento do Plano de Manejo de Rejeitos do Trecho 8 (Jacobs, 2018) trouxe uma constatação de campo da Fundação Renova. Os corpos de prova das sondagens de caracterização dos sedimentos extraídos em seções (transectos) na calha do rio Gualaxo do Norte, realizado em junho de 2017, apresentaram um perfil típico no qual a camada superior apresentou material granular não coesivo, majoritariamente composto por areia. Essa camada apresentou cor acinzentada diferente da camada abaixo (intermediária) que é composta predominantemente por areia fina e silte, cuja textura e

¹ O processo segue a metodologia descrita na Seção 9.3 do Plano de Manejo de Rejeito – Revisão 01 (CH2M, 2017)

consistência são similares ao rejeito. Abaixo dessa camada, o solo extraído nessas sondagens apresentou característica similar à camada superior. Dessa forma, o Plano de Manejo de Rejeitos alcinhou a camada superior de “Rejeito Lavado” (lag layer), a camada intermediária de “Rejeitos inconsolidados” e a camada inferior de “Substrato natural”.

Com base em quatro campanhas de campo realizadas durante o período chuvoso de 2017-2018 (novembro de 2017, janeiro de 2018, início de fevereiro de 2018 e final de fevereiro de 2018) e uma campanha de linha de base (realizada em julho de 2017), por meio dos resultados das medições estratigráficas, a Fundação Renova observou de maneira geral que a camada superior (lag layer) se manteve, mesmo após eventos de chuva.

Com base nessa constatação de campo, as alternativas de manejo de rejeito intracalha para os Trechos 6 a 11 (Fase 2) foram a mesma: “Capeamento natural do rejeito na calha através da formação do lag layer e monitoramento”.

Durante a Fase 3 (Avaliação governamental da proposta apresentada), a Câmara Técnica de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental (CT-GRSA) publicou em 21 de maio de 2019 a NOTA TÉCNICA CT-GRSA 08/2019, cuja Requisição 03 estabelece o seguinte:

“A Fundação Renova deverá apresentar proposta de estudos (em execução ou a serem executados) que visem avaliar como está ocorrendo o transporte de sedimentos nos rios impactados bem como estudos para avaliar o comportamento do lag layer em eventos de pluviosidade/vazão maiores, como períodos de recorrência de 25, 50 e 100. Esta proposta deverá conter a previsão de realização de workshop com especialistas para discussão do tema”. PRAZO: 30 dias

Por sua vez, a Deliberação CIF nº 304, de 29 de julho de 2019, além de ratificar a NOTA TÉCNICA CT-GRSA 08/2019 também deliberou o seguinte item:

“Protocolar junto a CT-GRSA os relatórios do Plano de Monitoramento para acompanhamento do comportamento/dinâmica do rejeito intracalha para as áreas dos Planos de Manejo de Rejeitos dos Trechos 6 a 11, até o último dia de junho (período chuvoso) e de janeiro de cada ano (período seco)”.

Logo, com base na alternativa de manejo de rejeitos intracalha de monitoramento, selecionada para os trechos 6 a 11 através do processo de tomada de decisão simplificado, a CT-GRSA e o CIF requisitaram a apresentação de uma metodologia de monitoramento do lag layer em 21 de maio de 2019 (requisição 3 da NOTA TÉCNICA CT-GRSA 08/2019) e definiu a periodicidade semestral para apresentação de relatórios de acompanhamento do comportamento do rejeito intracalha nos trechos 6 a 11 (item 2 da Deliberação CIF nº 304).

Em 18 de novembro de 2019, a CT-GRSA encaminhou à Fundação Renova o Ofício SEMAD/CT-REJEITOS nº 98/2019, no qual foi oficializado o não atendimento da Requisição 3 da NOTA TÉCNICA CT-GRSA 08/2019, que estabeleceu prazo para seu atendimento até 20/06/2019, e concedeu 15 dias adicionais à Fundação Renova para atender à requisição.

A Fundação Renova respondeu a CT-GRSA através do Ofício OFI.NII.022019.8481 em 02/12/2019. Neste ofício, a Fundação alegou que em audiência realizada em 15/10/2019, o assunto foi judicializado e que em 11/12/2019 os eixos prioritários foram apresentados ao Juízo da 12ª Vara Federal de Belo Horizonte/MG, sendo o assunto do lag layer incluído nesses eixos.

Por fim, para atender à Requisição 3 da NOTA TÉCNICA CT-GRSA 08/2019, a Fundação Renova protocolou em 20 de março de 2020 o ofício OFI.NII.122019.8481-02, no qual foi entregue o “*Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos*” (Golder, 2020), objeto de análise deste parecer.

2. Aplicações do lag layer em estudos de transporte de sedimentos fluviais

A caracterização do lag layer apresentada pela Fundação Renova no Plano de Manejo de Rejeito do Trecho 8 (Jacobs, 2018), contida no capítulo 6, é consistente do ponto de vista de resultados de campo. Neste capítulo as observações de campo, que foram coletadas em quatro campanhas de coleta de campo durante o período chuvoso de 2017-2018, embasam uma argumentação sólida do ponto de vista lógico.

No entanto, essa argumentação carece de referências técnico-científicas, fato que gera lacunas na conceituação teórica apresentada e também traz insegurança para os atores responsáveis pela avaliação da viabilidade ambiental da alternativa de manejo de rejeitos selecionada para o contexto intracalha dos trechos 6 a 11: “Capeamento natural do rejeito na calha através da formação do lag layer e monitoramento”.

Por isso, a Ramboll faz uma avaliação prévia ao objetivo principal deste parecer, que visa a checar se a abordagem do lag layer é aplicável para transporte de sedimentos fluviais.

A Ramboll realizou uma revisão bibliográfica expedita de estado da arte em Bases de Dados de literatura científica procurando por termos em inglês como: “lag layer”, “bank”, “bed roughness”, “ripple”, “barchan”, “barkhan dune” e “dune” combinados com “river”, “fluvial”, “bedload” e “sediment transport”. O resultado dessa revisão sistemática apontou que, apesar de lag layer ser pouco aplicado para avaliação de transporte de sedimentos (sendo considerado sobretudo no transporte por arraste de fundo de sedimentos arenosos), essa abordagem foi adotada por autores em todo o mundo, inclusive em publicações das duas últimas décadas.

Como o objetivo deste parece não é levantar o estado da arte, a Ramboll selecionou algumas referências atuais que consideraram lag layer (ou somente lag) em suas análises de transporte de sedimentos e/ou de morfologia fluvial:

- Kleinhans (2002) avaliou mudanças na morfologia fluvial e estudou o comportamento em escala de curto prazo por meio de modelos físicos no laboratório da Delft Hydraulics, resultados posteriormente foram validados em trechos do rio Reno (Holanda);
- Carling et al. (2000) avaliaram a morfodinâmica fluvial de dunas de areia no rio Reno, próximo a Mainz na Alemanha;
- Houbrechts et al. (2012) compararam métodos de quantificação da dinâmica da camada ativa e do arraste de fundo em rios com leito rochoso;
- Warrick et al. (2015) fizeram uma análise de fonte e sumidouro de sedimentos até a foz do rio Elwha (Washington, Estados Unidos da América), durante a remoção faseada de duas grandes barragens (*Elwha dam* e *Glines Canyon dam*) que liberaram 21 ± 3 milhões de m³ (cerca de 30 milhões de toneladas) de sedimentos.
- Woodruff (1999) utilizou geofísica e dados de campo de sedimentologia do estuário do baixo rio Hudson (cidade de Nova Iorque, Estados Unidos) para identificar a resposta deposicional de sedimentos oriundos da cabeceira a eventos de grandes vazões.

Em relação ao estudo do descomissionamento (remoção) das duas barragens no rio Elwha (Warrick et al., 2015) duas observações são relevantes para o caso do rompimento da barragem da Samarco em Fundão no rio Doce:

- Remoções de barragens faseadas liberam menos sedimentos ao rio, isso se deve ao fato da remoção ou rompimento em fase única gerar altas vazões fluviais que suspendem sedimentos mais grosseiros. Essa fração de sedimentos com diâmetros maiores continuariam em repouso em remoções faseadas;
- O descomissionamento da *Elwha dam* começou em setembro de 2011 e finalizou em setembro de 2013 (duração de 2 anos) e o descomissionamento da *Glines Canyon dam* estava em andamento durante o estudo. De maneira geral, os autores observaram em 2013 que no médio rio Elwha no início do ano houve deposição de sedimentos sobre o leito natural e no final do ano observaram uma redução dessa camada superior de sedimentos por conta da erosão fluvial. No caso do baixo rio Elwha, eles observaram deposição de sedimentos sobre o leito natural no início do ano e leves variações (tanto aumento como diminuição) na espessura da camada superior de sedimentos ao final do ano.

Em relação à publicação de Woodruff (1999), que estudou o baixo rio Hudson, em Nova Iorque, as seguintes observações foram importantes para a confirmação da formação de lag layer com sedimentos da cabeceira do rio:

- Neste caso, os sedimentos observados abaixo do lag layer são muito mais finos, onde foi observada a alternância camadas de argila e silte;
- Os sedimentos que depositaram no estuário do baixo rio Hudson alimentaram a região durante eventos de grandes vazões tiveram como fonte a parte alta e média do rio;
- Conforme apresentado na Figura 2-1, o baixo rio Hudson apresentou a formação de lag layer.

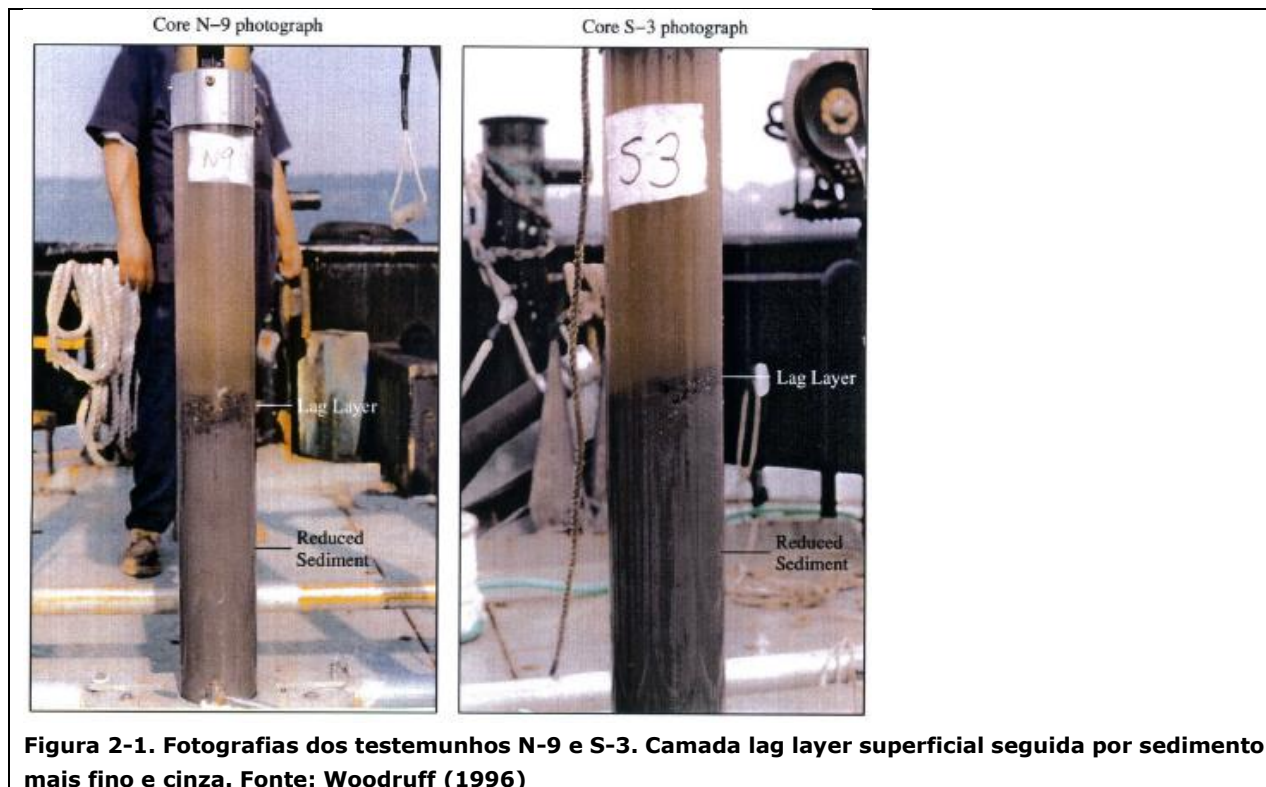
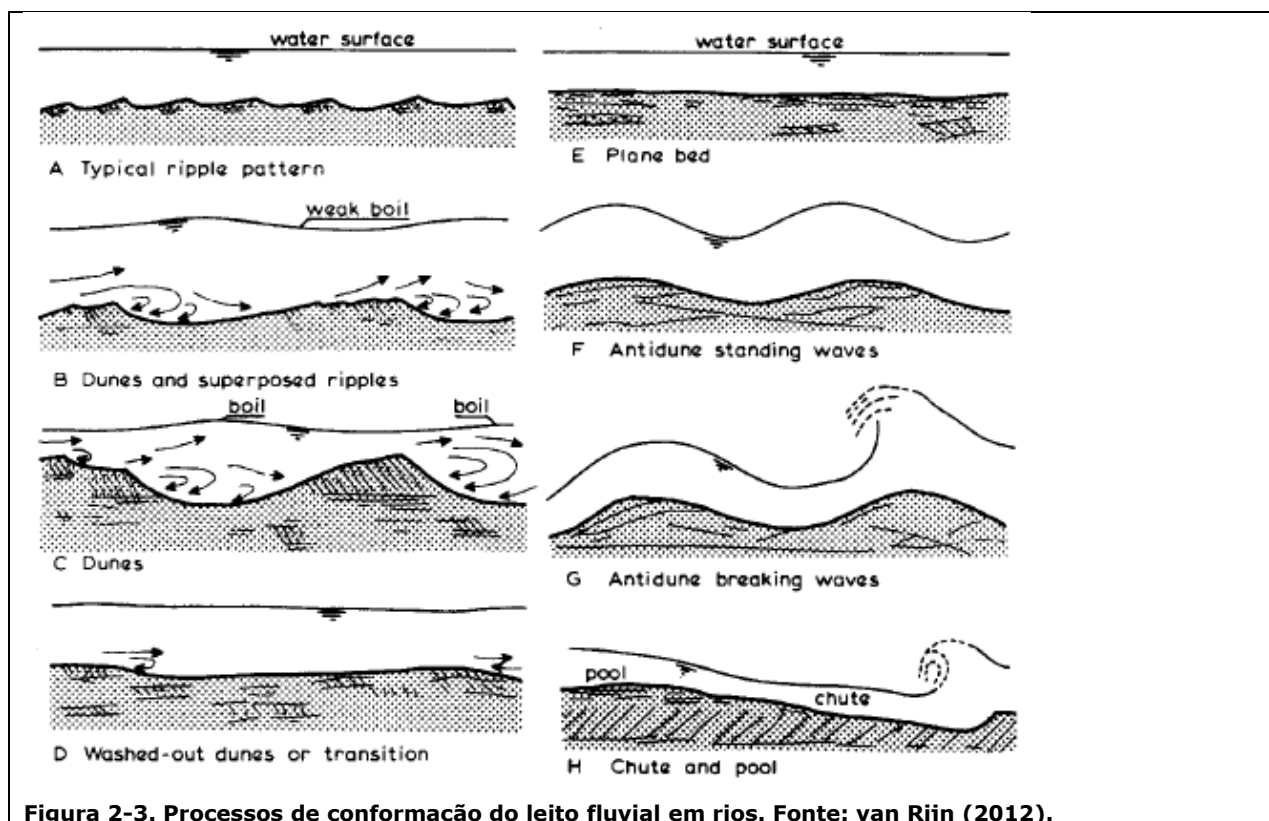
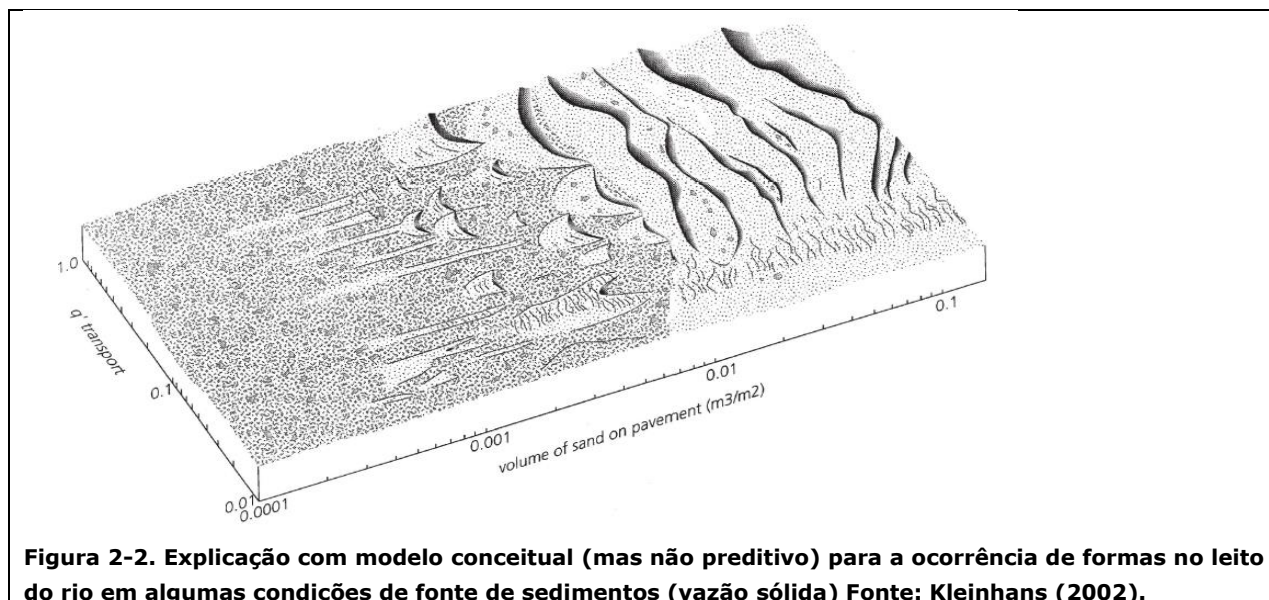


Figura 2-1. Fotografias dos testemunhos N-9 e S-3. Camada lag layer superficial seguida por sedimento mais fino e cinza. Fonte: Woodruff (1996)

Dessa forma, depreende-se que o lag layer é uma teoria válida para amparar a avaliação de transporte de sedimentos, sobretudo por arraste de fundo (*bedload*), e morfologia fluvial. No entanto, um fator comum em todas essas publicações científicas citadas, que não foi contemplada na abordagem da Fundação Renova, é avaliação e observação das conformações do leito do rio. Conforme apresentado na Figura 2-2, a conformação de fundo do leito do rio depende da vazão sólida (transporte de sedimentos), sobretudo do arraste de fundo (*bedload*).



De fato, conforme ilustrado na Figura 2-3, essas conformações de fundo variam desde (a) leito com padrão de rugas, (b) dunas e rugas superpostas, (c) dunas, (d) dunas lavadas ou transição, (e) leito plano, (f) antidunas com formação de ondas, (g) antidunas com quebra de ondas, e (h) formação de rampa com ressaltos (van Rijn, 2012).

A consideração de conformação de fundo é fundamental para entender se o leito do rio está com tendência de remobilização (formação de leito de transição e de antidunas). Além disso, quando o leito do rio não é plano, a variação da macro rugosidade do fundo diminui a influência das características do grão do sedimento no transporte de sedimentos.

3. Avaliação da metodologia de monitoramento do lag layer proposta pela Fundação Renova

No capítulo 1 (Introdução), o documento “*Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos*” (Golder, 2020) apresenta uma contextualização das constatações de campo da Fundação Renova entre 2017 e 2018, quando foi observada a formação de camada superior do leito fluvial com sedimentos de granulometria mais grossa depositada sobre outra camada com sedimentos mais finos (rejeito inconsolidado). Eles denominaram a camada superior de lag layer (ou rejeito lavado) e reconheceram que existem incertezas acerca da efetividade dessa camada na contenção da camada inferior (rejeito inconsolidado).

Dessa forma, no capítulo seguinte, o documento prossegue com a apresentação do objetivo geral e dos três objetivos específicos. Conforme apresentado na Tabela 3-1, cada objetivo é endereçado em capítulos do documento.

Tabela 3-1. Objetivos geral e específicos do “Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos” (Golder, 2020)

Objetivo	Descrição	Capítulos relacionados
Geral	Este projeto tem como objetivo elaborar um plano metodológico para avaliar o comportamento do <i>lag layer</i> do leito no qual ele encontra-se inserido e sua influência na liberação de rejeitos retidos na calha do rio Doce em eventos extremos de vazão. O estudo será realizado para os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, priorizando os trechos do rio até a barragem da UHE Risoleta Neves (Candonga) e considerando as especificidades de cada um dos trechos.	9- Metodologias recomendadas para avaliação do lag layer 10- Cronograma da metodologia recomendada 11- Conclusões
Específico I	Definir o conceito de <i>lag layer</i> para o contexto da situação atual dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce.	5- Dados coletados 6- Conceito de lag layer e modelo conceitual
Específico II	Definir o conceito de grandes eventos de vazão (ou eventos extremos) no contexto de análise do <i>lag layer</i> .	5- Dados coletados 7- Definição de grandes eventos
Específico III	Apresentar uma metodologia para avaliar o comportamento do <i>lag layer</i> e do leito	5- Dados coletados

Tabela 3-1. Objetivos geral e específicos do “Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos” (Golder, 2020)

Objetivo	Descrição	Capítulos relacionados
	no qual ele encontra-se inserido em eventos de pluviosidade/vazão maiores, como períodos de recorrência de 25, 50 e 100 anos.	8- Metodologias estudadas para avaliação do lag layer 9- Metodologias recomendadas para avaliação do lag layer

Como este parecer avalia o atendimento aos objetivos propostos pelo próprio documento, a avaliação está estruturada da seguinte forma:

- Considerações sobre os dados coletados;
- Avaliação do atendimento ao objetivo específico I;
- Avaliação do atendimento ao objetivo específico II;
- Avaliação do atendimento ao objetivo específico III; e
- Avaliação da combinação dos métodos propostos.

3.1 Considerações sobre os dados coletados

Golder (2020) fez um levantamento por trecho dos dados disponíveis de vazão líquida, seções topobatimétricas, distribuição granulométrica (% e g/kg) e análise físico-química. As fontes adotadas foram o PMQQS (Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático), PMQQVAI (Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo de Vigilância para Avaliação de Impactos), Portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA), coletas de campo do Plano de Manejo de Rejeitos (PMR), seções topobatimétricas da empresa Ambilev e coletas de campo durante o período emergencial da BHP Billiton e da Samarco.

Antes de avaliar se a espacialização, periodicidade de amostragem e duração de coleta desses dados são adequadas, é fundamental fazer considerações sobre o PMQQVAI, o PMQQS e recomendações da NHC (2018) contida no estudo de “*Análise de processos fluviais transporte de sedimentos no Trecho 8*”:

- O PMQQVAI foi suspenso por determinação da Deliberação CIF nº 275 de 23 de abril de 2019, logo seus dados podem ser utilizados somente como linha de base (caracterização do lag layer pós desastre e anterior às campanhas de monitoramento).
- A Ramboll recomenda que a Fundação Renova adote as recomendações da NHC (2018) presentes no capítulo 7 (Recomendações) também para os trechos 6 a 11, conforme segue abaixo o resumo:
 - *Atividade-Chave 1: Levantamentos do leito do rio e amostragem nos trechos pré-estabelecidos para estabelecer um monitoramento morfológico que apoie a recuperação do rio.*
 - *Atividade-Chave 2: Realizar medições contínuas e de longo prazo de Sólidos Suspensos Totais (mg / L) e de turbidez (NTU), incluindo a avaliação da distribuição granulométrica em locais importantes em todo o Rio Gualaxo do Norte.*
 - *Atividade-Chave 3: Amostragem, classificação e mapeamento de sedimentos do leito do rio em múltiplos locais ao longo do perfil do Rio Gualaxo do Norte*
- Adotar as recomendações da NHC (2018) presentes no apêndice B, que podem ser implementadas no PMQQS ou em outros planos de monitoramento.

Conforme resumido na Tabela 3-2, os trechos 6, 7 e 8 não possuem monitoramento vigente e os dados pretéritos nesses trechos são pontuais ou de programas suspensos (texto em vermelho na tabela). Em relação aos trechos 9, 10 e 11, existem apenas coletas vigentes de vazão líquida, distribuição granulométrica (%) e análises físico químicas.

Tabela 3-2. Quadro síntese com dados utilizados pela Golder (2020) para elaborar a metodologia de monitoramento do lag layer, em vermelho estão os dados com medição descontinuada ou amostragem única. Fonte: Adaptado de Golder (2020)

Trecho	Pontos de medição de vazão	Seções topobatimétricas	Pontos de distribuição granulométrica (%)	Pontos de distribuição granulométrica (g/kg)	Análises Físico-Químicas
Trecho 6 (7,7 km)	- 2 pontos (PMQQS) com medição mensal; - 1 ponto (PMQQVAI) com medição mensal.	- 65 amostras únicas (Ambilev); - 1 amostra única (ANA).	- 17 testemunhos do PMR (amostra única); - 1 testemunho de 1m do PMQQS (amostragem semestral); - 1 ponto de amostra do PMQQS (trimestral).	- 3 pontos de amostra do PMQQVAI (mensal).	- 29 amostragens únicas da BHP; - 1 ponto de amostra do PMQQS (mensal); - 3 pontos de amostra do PMQQVAI (mensal).
Trecho 7 (3.2 km)	- 1 ponto (PMQQVAI) com medição mensal.	- 23 amostras únicas (Ambilev).	- 10 testemunhos de PMR (amostra única).	- 1 ponto de amostra de sedimento (Emergencial -diária, semanal ou quinzenal).	- 2 amostragens únicas da BHP; - 1 ponto de amostra do PMQQS (mensal);
Trecho 8 (9 km)	- 1 ponto (PMQQVAI) com medição mensal.	- 38 amostras únicas (Ambilev)	-	- 29 testemunhos do PMR (amostra única); - 2 pontos de amostra do PMQQVAI (mensal).	- 22 amostragens únicas da BHP; - 2 pontos de amostra do PMQQVAI (mensal).
Trecho 9 (58 km)	- 2 pontos da ANA (sendo um deles em tributário) com medição diária; - 7 pontos (PMQQS) com medição mensal; - 3 pontos (PMQQVAI) com medição mensal.	- 106 amostras únicas (Ambilev); - 2 amostras únicas (ANA).	- 95 testemunhos do PMR (amostra única); - 2 testemunhos de 1m do PMQQS (amostragem semestral); - 2 pontos de amostra do PMQQS (trimestral).	- 1 ponto de amostra de material particulado (Emergencial - diária, semanal ou quinzenal); - 2 pontos de amostra de sedimento (Emergencial - diária, semanal ou quinzenal); - 11 pontos de amostra do PMQQVAI (mensal).	- 99 amostragens únicas da BHP; - 2 pontos de amostra do PMQQS (mensal); - 11 pontos de amostra do PMQQVAI (mensal).
Trecho 10 (25 km)	- 6 pontos (PMQQS) com medição mensal; - 1 ponto (PMQQVAI) com medição mensal.	- 2 amostras únicas (ANA)	- 38 testemunhos do PMR (amostra única); - 1 testemunho de 1m do PMQQS (amostragem semestral); - 1 ponto de amostra do PMQQS (trimestral).	- 4 pontos de amostra de material particulado (Emergencial - diária, semanal ou quinzenal); - 4 pontos de amostra de sedimento (Emergencial - diária, semanal ou quinzenal); - 2 pontos de amostra do PMQQVAI (mensal).	- 61 amostragens únicas da BHP; - 5 pontos de amostra do PMQQS (mensal); - 2 pontos de amostra do PMQQVAI (mensal).
Trecho 11 (5.8 km)	- 1 ponto (ANA) com medição diária, semanal ou quinzenal.	- 1 amostra única (ANA).	- 17 testemunhos de PMR (amostra única).	- 1 ponto de amostra de material particulado (Emergencial - diária, semanal ou quinzenal); - 2 pontos de amostra de sedimento (Emergencial - diária, semanal ou quinzenal).	- 11 amostragens únicas da BHP.

Especificamente em relação ao PMQQS (Fundação Renova, 2020), a Tabela 3-3 mostra que este programa de monitoramento fluvial possui algumas lacunas para ser aproveitado em trabalhos de transporte de sedimentos:

- os trechos 6, 7, 8 não possuem estações automáticas de monitoramento;
- as medições de vazão (descarga líquida) deveriam ter maior periodicidade, é recomendável acompanhar o nível com estação automática telemétrica (com frequência de medição de 5 a 15 minutos) e gerar uma curva-chave “cota X vazão líquida”. Logo medições periódicas de vazão líquida (amostrada com *ADCP - Acoustic Doppler current profiler*) devem ter periodicidade recomendada semanal durante pelo menos um ano hidrológico completo são necessárias, a fim de obter pelo menos 52 medições durante o ano e possibilitar a elaboração da curva-chave;
- a periodicidade trimestral para medição de descarga sólida não é adequada para amparar estudos de transporte de sedimentos. O recomendável é acompanhar a descarga sólida de forma contínua, com frequência mínima semanal e medindo eventos de altas vazões, e gerar uma curva-chave “vazão sólida X vazão líquida” com dados coletados durante pelo menos um ano hidrológico completo que contemple o primeiro evento de vazão extrema;

Tabela 3-3. Pontos de amostragens do PMQQS (Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático) com a periodicidade de coleta para parâmetros físicos. Fonte: Fundação Renova, 2020.

Código do Ponto	Trecho	Físico-Químico-Biológico Água	Físico-Químico Sedimento	Físico-Químico Testemunho (1m)	Descarga Líquida	Descarga Sólida	Material Particulado em Suspensão (MPS)
RGN 01	Fora da área atingida	Mensal	Trimestral	Semestral	-	-	-
RGN 02	Trecho 9	Mensal	-	-	Mensal	-	-
RGN 03	Trecho 9	Mensal	-	-	Mensal	-	-
RGN 04	Trecho 9	Mensal	-	-	Mensal	-	-
RGN 05	Trecho 9	Mensal	-	-	Mensal	-	-
RGN 06	Trecho 9	Mensal	Trimestral	Semestral	Mensal	-	-
RCA 01	Fora da área atingida	Mensal	Trimestral	Semestral	Mensal	-	-
RGN 07	Trecho 9	Mensal	-	-	Mensal	-	-
RGN 08	Trecho 9	Mensal	Trimestral	Semestral	Mensal	Trimestral	Trimestral
RCA 02	Trecho 10	Mensal	Trimestral	Semestral	-	-	-
RCA 03	Trecho 10	Mensal	-	-	Mensal	-	-
RCA 04	Trecho 10	Mensal	-	-	Mensal	-	-
RCA 05	Trecho 10	Mensal	-	-	Mensal	-	-
RCA 06	Trecho 10	Mensal	-	-	Mensal	-	-
RPG 01	Fora da área atingida	Mensal	Trimestral	Semestral	Mensal	-	-
RDO 01	Trecho 11	Mensal	Trimestral	Semestral	-	Trimestral	Trimestral

Por fim, cabe ressaltar que as lacunas identificadas pela Ramboll nos dados considerados pela Golder (2020) para o monitoramento do lag layer geram limitações na aplicação de muitas metodologias. Considerando o exposto, dependendo da proposta escolhida, um novo plano de coleta de dados será

necessário. A avaliação de dados adicionais ou de adequação na coleta de dados vigentes depende da metodologia escolhida, portanto será avaliada na seção 3.4.

3.2 Atendimento ao objetivo específico I

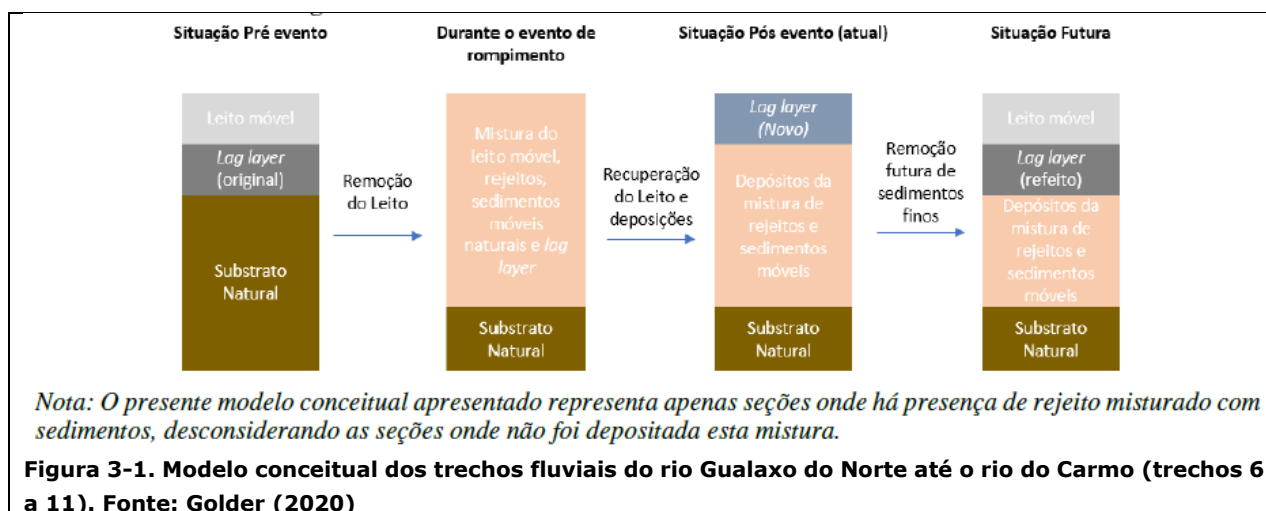
O objetivo específico I é “Definir o conceito de lag layer para o contexto da situação atual dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce”. No documento avaliado o capítulo 6 – “Conceito de lag layer e modelo conceitual” se propõe a atender a esse objetivo.

Apesar de não usar referências da literatura para embasar os argumentos, a abordagem adotada na conceituação geral do lag layer, ou seja, a explicação básica para entendimento da formação dessa camada, é apresentada de forma satisfatória.

Especificamente em relação ao modelo conceitual do lag layer na bacia do rio Doce, a área de estudo é dividida em três grupos, sendo que o último não é objeto da metodologia desse monitoramento:

- I. *Trechos 6 a 9*: remoção significativa do leito próximo às cabeceiras de drenagem durante a passagem de detritos e lama do rompimento da barragem da Samarco. Logo, a profundidade de remoção do leito fluvial e a energia do escoamento foram suficientes para mobilizar o lag layer antes existente. Posteriormente, houve deposição de nova camada;
- II. *Trechos 10 e 11*: trechos de transição entre o padrão estratigráfico do leito observado entre a confluência do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo até o início do remanso do lago da UHE Risoleta Neves, onde em alguns trechos não houve remoção total do lag layer formado antes do rompimento da barragem de Fundão.
- III. *Trechos 13 a 16*: Camada superior é formada por mistura de sedimentos natural com rejeito lavado depositada sobre o lag layer natural, formado anteriormente ao rompimento da barragem de Fundão.

A caracterização apresentada por Golder (2020) é uma interpretação baseada em observação de amostras de sedimentos em transectos (seções) ao longo dos rios estudados, inclusive a separação de trechos nos três grupos descritos acima é uma boa abordagem para amparar o entendimento da dinâmica fluvial. Como essa interpretação apresentada não é suficiente para entender a morfologia fluvial e o transporte de sedimentos nos trechos 6 a 11, a Golder (2020) apresenta um “modelo conceitual da variação temporal do lag layer na bacia do rio Doce”.



Apesar de não se basear em referências técnico-científicas, Golder (2020) apresenta uma hipótese de modelo conceitual para os trechos 6 a 11 (Figura 3-1) dividida em quatro momentos:

- “Situação pré-evento”: Camada superior composta por leito móvel, camada intermediária composta pelo lag layer original e camada inferior composta pelo substrato natural;
- “Durante o evento de rompimento”: após remoção do leito há formação de camada espessa com mistura do leito móvel, rejeitos, sedimentos móveis naturais e lag layer e manutenção de parte da camada inferior, o substrato natural;
- “Situação pós-evento (atual)”: após recuperação do leito e deposições há formação de novo lag layer na camada superior, manutenção de parte da camada composta por depósitos da mistura de rejeitos e sedimentos móveis e manutenção do substrato natural na camada inferior;
- “Situação futura”: formação de leito móvel sobre o novo lag layer, abaixo uma camada composta por depósitos da mistura de rejeitos e sedimentos móveis e manutenção do substrato natural na camada inferior.

Cabe ressaltar, que essa hipótese não foi baseada em referências técnico-científicas. Apesar disso, mesmo sem fazer menção ao lag layer, uma abordagem de transporte de sedimentos em modelos computacionais é análoga à abordagem da Golder (2020). Alguns modelos consideram o transporte de sedimentos em camadas ativa e inativa, algo análogo ao lag layer na qual a camada superior é remobilizada pela erosão fluvial. Nesse caso, há vasta teoria das equações de Enxer, que não foram consideradas no documento avaliado (Coleman et al., 2009; Parker et al., 2000; Pelosi et al., 2014; 2016).

Apesar desse modelo conceitual apresentado pela Golder (2020) possuir uma ordem lógica de alteração de camadas ao longo do tempo, essa abordagem é segmentada nos aspectos espacial e temporal. A transição de um momento para o outro pode ocorrer em datas diferentes para as diversas seções do rio, afinal os rios Galaxo do Norte, Carmo e Doce possuem diversos habitats aquáticos. Ademais, essa abordagem é segmentada em seções, isso limita a avaliação da morfologia fluvial porque desconsidera os processos de transição entre as seções, como por exemplo a variação na conformação de fundo do leito.

Por fim, o objetivo específico I não foi cumprido. Esse modelo conceitual desconsidera qualquer teoria básica de transporte de sedimentos ou sequer menciona como será a mobilização desses sedimentos da camada superior, seja por arraste de fundo, saltitação ou transporte por suspensão. Portanto, essa explicação está incompleta e precisa ser melhor embasada.

3.3 Atendimento ao objetivo específico II

O objetivo específico II é “Definir o conceito de grandes eventos de vazão (ou eventos extremos) no contexto de análise do lag layer”. No documento avaliado o capítulo 7 – “Definição de grandes eventos” se propõe a atender a esse objetivo.

Dessa forma, inicialmente Golder (2020) apresenta três abordagens para determinação de vazões máximas extremas (citação abaixo *ipsis litteris*):

- “Descarga de leito: descarga máxima capaz de ocupar a calha menor do curso d’água”
- “Descarga efetiva: descarga média capaz de transportar a maior fração da carga do sedimento anual durante um período (Andrews, 1980 apud. Copeland et al., 2005)”
- “Descarga de pico: descarga de leito associada à determinada frequência de ocorrência”

Em seguida, Golder (2020) apresenta a sequência metodológica adotada para definir vazões de grandes eventos: “(i) Coleta de dados históricos de vazão em uma determinada seção; (ii) Análise de frequência para dados de vazão e determinação de quantis de vazão associados a tempos de retorno; (iii) Determinação da curva-chave representativa da seção avaliada; (iv) Determinação da descarga de leito

com base na curva-chave e na seção transversal da seção; e (v) Definição do tempo de recorrência da descarga de leito” (sic.).

Depois a Golder apresenta um exemplo dessa abordagem aplicado à seção da estação fluviométrica Fazenda Ocidente (código 56337000), localizada no rio Gualaxo do Norte, município de Barra Longa/MG (Trecho 9). Cabe ressaltar que essa é a única estação fluviométrica nos trechos 6 a 11 com série histórica superior a 30 anos, o que permite essa abordagem somente na seção desta estação fluviométrica.

Na análise de frequência para os dados de vazão para determinar os Tempos de Retorno (TRs) na estação fluviométrica Fazenda Ocidente (distribuição de máximos), além de não especificar qual método estatístico foi adotado para distribuição de máximos, a Golder (2020) utilizou as vazões médias diárias para determinar as vazões de eventos extremos.

O uso de vazões médias diárias não é adequado para determinação de vazões máximas extremas e para definição do tempo de retorno das mesmas, porque a distribuição de vazões máximas, sobretudo para avaliar transporte de sedimentos, deve ser feita com vazões instantâneas. Caso o posto fluviométrico possua apenas médias diárias, estas devem ser transformadas para vazões instantâneas antes de fazer a análise estatística de vazões máximas. Segundo Silva & Tucci (1998), a determinação da vazão máxima instantânea é importante para evitar subdimensionamentos e propõe metodologia para estimar a vazão instantânea diária com base na maior de duas medições diárias (utilizadas para calcular a vazão média).

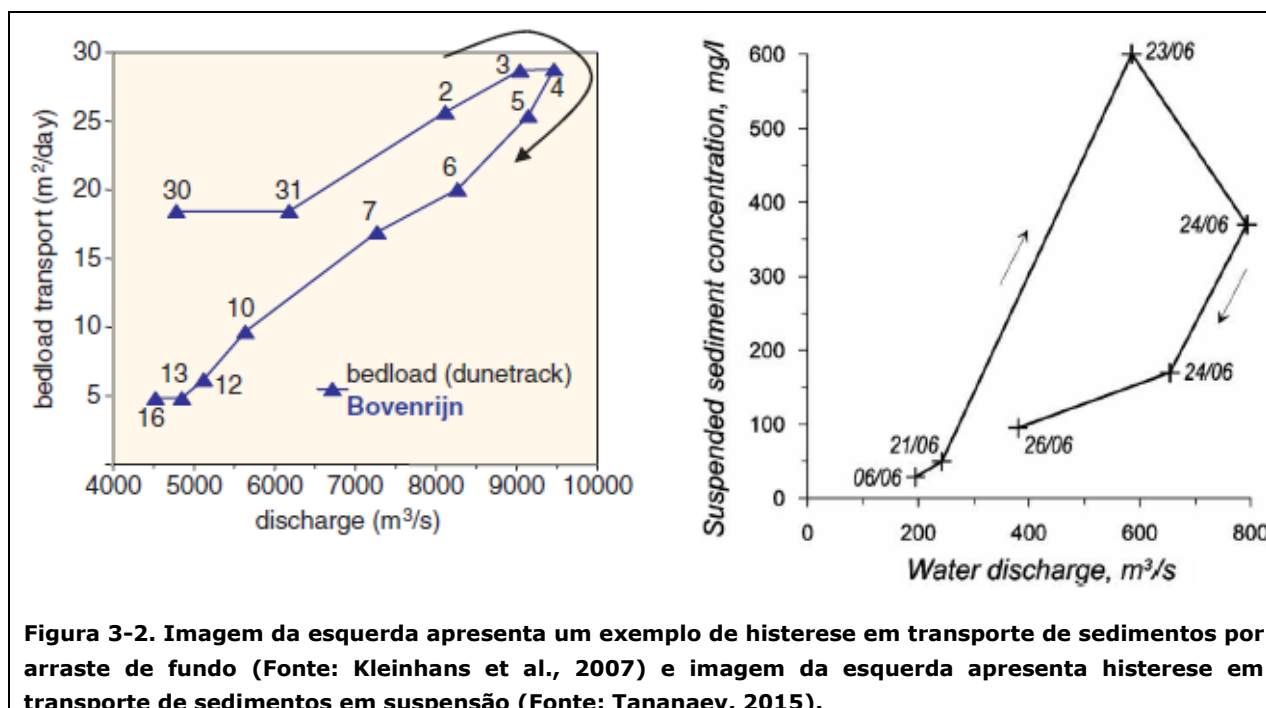
Dessa forma, os passos seguintes apresentados (i) “Determinação da curva-chave representativa da seção avaliada”, (ii) “determinação da descarga de leito” e (iii) “determinação do tempo de recorrência da descarga de leito” não serão avaliados neste parecer e devem ser desconsiderados para quaisquer outros fins.

Ademais, a Golder (2020) justifica a adoção da “descarga de leito” pelo fato da cota relacionada à vazão com TR 50 anos não extravasar a calha menor do curso da água na seção estudada. Considerando o exposto nos dois últimos parágrafos essa escolha perde embasamento de resultados e também deve ser desconsiderada para outros fins.

Considerando também que cada seção do rio possui uma característica morfológica diferente, em algumas seções uma vazão de mesmo TR pode extravasar para a região extracalha, mesmo que na seção monitorada isso não aconteça.

Portanto, a Ramboll recomenda a adoção de uma abordagem integrada da descarga efetiva (*effective discharge* em inglês) com o conceito de histerese (*hysteresis* em inglês). A abordagem da descarga efetiva é mais adequada para o transporte de sedimentos porque ela determina a vazão líquida que transporta o sedimento por arraste de fundo (*bedload* em inglês) e por suspensão (Emmett & Wolman, 2001; Nash, 1994).

Por sua vez, a histerese é a dependência do estado de um sistema em relação ao seu histórico. Ou seja, em transporte de sedimentos isso significa que a ocorrência de vazões máximas extremas após longo tempo de estiagem ocorre mobilização de mais sedimentos quando comparado nos casos de vazões máximas extremas após períodos com altas vazões (Figura 3-2). Esse conceito explica o motivo pelo qual vazões líquidas idênticas medidas na mesma seção do rio podem transportar volumes de sedimentos distintos (Ahanger et al., 2008; Bogen, 1980; Kleinhans et al., 2007; Quadrini et al., 2003; Tananaev, 2015)



Logo, considerando que o objetivo do monitoramento é determinar o potencial de mobilização do lag layer e determinar as vazões máximas e seus tempos de retorno nos trechos 6 a 11, é fundamental considerar uma abordagem que esteja integrada com transporte de sedimentos, sobretudo por arraste de fundo.

No final do capítulo 7 – “Definição de grandes eventos”, Golder (2020) faz cinco recomendações. Em uma delas a Golder (2020) reconhece que “a aplicação desta metodologia, conforme descrita acima, está restrita às seções fluviais com monitoramento histórico de descarga líquida, levantamento de seção topobatimétrica e curva-chave construída através de medições *in loco* de vazão e nível de água” (sic.), em seguida recomenda a “utilização de pelo menos 30 anos hidrológicos de monitoramento” (sic.). Para os trechos onde não há estações fluviométricas, Golder (2020) recomenda a extrapolação dos resultados através da aplicação de regionalização de vazões. A regionalização de vazões é um método utilizado quando há carência de dados fluviométricos na bacia estudada, mas exige cuidados na avaliação de seus resultados (da Silva Junior et al. 2003; Obregon et al. 1999). Neste contexto, cabe citar o estudo de Barbosa et al. (2005), no qual foram desenvolvidos modelos de regionalização de vazões máximas para a bacia do rio Carmo, os resultados para vazões máximas com TR 10 anos não obtiveram a significância estatística desejada pelos autores.

Diante do exposto, o objetivo específico II não foi atendido porque a metodologia aplicada no exemplo da estação fluviométrica Fazenda Ocidente (código 56337000) apresenta falhas conceituais na determinação de vazões com TRs de 2, 10, 25 e 50 anos. Ademais, considerando que existe apenas uma estação fluviométrica nos trechos 6 a 11 com série histórica que permite realizar uma análise estatística de distribuição de máximos e, assim, determinar o tempo de retorno dessas vazões, é necessário avaliar se as técnicas de regionalização de vazões e de transformação de vazão média diária em vazão instantânea são aplicáveis neste contexto. A abordagem mais segura é elaborar um plano de coleta de dados consistente que viabilize a abordagem proposta, ou seja, instalar mais estações fluviométricas automáticas telemétricas, a fim de possibilitar a validação das vazões regionalizadas.

3.4 Atendimento ao objetivo específico III

O objetivo específico III é “*Apresentar uma metodologia para avaliar o comportamento do lag layer e do leito no qual ele encontra-se inserido em eventos de pluviosidade/vazão maiores, como períodos de recorrência de 25, 50 e 100 anos*”. No documento avaliado o capítulo 9- “*Metodologias recomendadas para avaliação do lag layer*” se propõe a atender a esse objetivo. O capítulo anterior, 8- “*Metodologias estudadas para avaliação do lag layer*”, apresenta as metodologias estudadas pela Golder (2020). Logo, este parecer foca a avaliação no capítulo 9.

Segundo Golder (2020), os critérios adotados para escolha das metodologias levantadas foram: “(i) *simplicidade e tempo necessários para obtenção de resultados*, (ii) *menor necessidade de novos dados*, (iii) *parcimônia em relação à quantidade de dados/variáveis e a robustez dos resultados* e (iv) *equações empiricamente robustas ao invés de novas formulações, ainda que estas últimas sejam mais complexas*” (sic.). A partir desses critérios, a escolha da Golder (2020) foi aplicar uma metodologia de monitoramento em etapas:

- Métodos analíticos: considera a utilização do método analítico como um estudo piloto. Conforme consta na proposta, espera-se que forneça uma primeira aproximação do comportamento do lag layer ao utilizar dados já disponíveis e de equações, que segundo a Golder (2020), demandam um número reduzido de variáveis;
- Modelagem numérica: Segundo Golder (2020), caso se defina por sua realização, a modelagem numérica serviria como um complemento à parte analítica, onde as variações espaciais no fornecimento de sedimentos de montante e a erosão do leito são dinâmicas e consideradas temporalmente. Desta forma, a proposta diz que a modelagem numérica representaria um produto posterior, a depender dos dados disponíveis; e
- Monitoramento de campo: Segundo a Golder (2020) esta etapa informará se os resultados obtidos analiticamente e numericamente estão sendo observados na natureza. Esta parte, conforme consta na proposta, por necessitar de um longo período amostral e uma grande equipe de coleta e análise, ocorre de forma contínua, com entregas de produtos pontuais referentes às estações secas e úmidas que caracterizam o clima regional.

Antes de analisar cada um dos métodos propostos para verificar o atendimento ao objetivo específico III, cabe uma ressalva em relação à ordem lógica da metodologia de monitoramento proposta. Na etapa de “Monitoramento de campo”, Golder (2020) diz: “*A parte de monitoramento de campo, assim como já realizado pela Fundação Renova, visa informar se os resultados obtidos analítica e numericamente estão sendo observados na natureza*” (sic.).

Essa abordagem proposta por Golder (2020) inverte a ordem lógica de trabalho adotada no desenvolvimento de modelos analíticos e numéricos. Além disso, nas seções 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3, a Ramboll mostra que o monitoramento vigente da Fundação Renova não é suficiente para realizar as metodologias de monitoramento do comportamento do lag layer proposto pela Golder (2020). Para ilustrar este argumento vale apresentar a abordagem adotada por Leo van Rijn, a maior referência em transportes de sedimentos contemporânea, e por Hans Albert Einstein, que desenvolveu uma avançada formulação de transporte de sedimentos por arraste de fundo (*bedload function*).

Nos modelos analíticos de transporte de sedimentos de arraste de fundo (van Rijn, 1984a), de sedimentos em suspensão (van Rijn, 1984b) e de conformação de fundo e rugosidade (van Rijn, 1984c) os modelos foram calibrados após a coleta de dados, experimentos laboratoriais e observações de campo, sendo estas etapas experimentais prévias e necessárias para o desenvolvimento, calibração e validação dos modelos analíticos.

Por sua vez, Einstein (1950), antes de desenvolver a formulação para transporte de sedimentos de fundo, observou vários rios dos Estados Unidos, entendeu suas dinâmicas, coletou dados de campo, baseou sua teoria em experimentos laboratoriais, estudou o estado da arte e, por último, formulou as equações e calibrou seus parâmetros com dados de campo e experimentos laboratoriais.

3.4.1 Métodos analíticos

Golder (2020) adotou dois métodos analíticos para responder a duas perguntas, conforme apresentado na Tabela 3-4.

Tabela 3-4. Métodos analíticos adotados para estimar respostas fluviais no monitoramento do lag layer. Fonte: Adaptado de Golder (2020).

Metodologia proposta	Resposta esperada
Aplicação do parâmetro de Shields (1936) modificado por Yalin (1977)	Estimar o limiar de mobilidade do leito
Teoria do Regime com aplicação de equações de Blench (1969), Lacey (1930) e Neill (1973)	Estimar a profundidade de remoção do leito e do lag layer

Como são duas metodologias distintas, este parecer avaliou cada uma separadamente antes de concluir se a abordagem proposta por Golder (2020) é satisfatória.

Métodos para estimar o limiar de mobilidade do leito

Golder (2020) adotou o método de Shields (1936) modificado por Yalin (1963; 1977). A aplicação somente dessa abordagem não é suficiente para estimar o limiar de mobilidade do leito. Inclusive, Yalin (1963), quando apresentou esse método modificado de Shields disse² (tradução livre):

"... a seguinte derivação ainda não é considerada como sendo a expressão final da lei governante de descarga sólida. Isso é uma mera forma simplificada da lei real, na qual pode ter alguma aplicação prática útil".

Conforme explicado nos parágrafos seguintes, o transporte de sedimentos depende tanto de características do sedimento como também de conformação do leito do rio. Adotar somente o método analítico de Yalin (1963; 1977) não é suficiente para determinar o limiar de mobilidade do leito para alguns regimes de transporte de sedimentos. Além disso, esses métodos analíticos não devem ser interpretados de forma determinística. A modelagem analítica de transporte de sedimentos por arraste de fundo e por suspensão foram estudadas por diversos autores, que chegaram a limiares diversos. Esse ponto será apresentado de forma mais detalhada nos parágrafos seguintes.

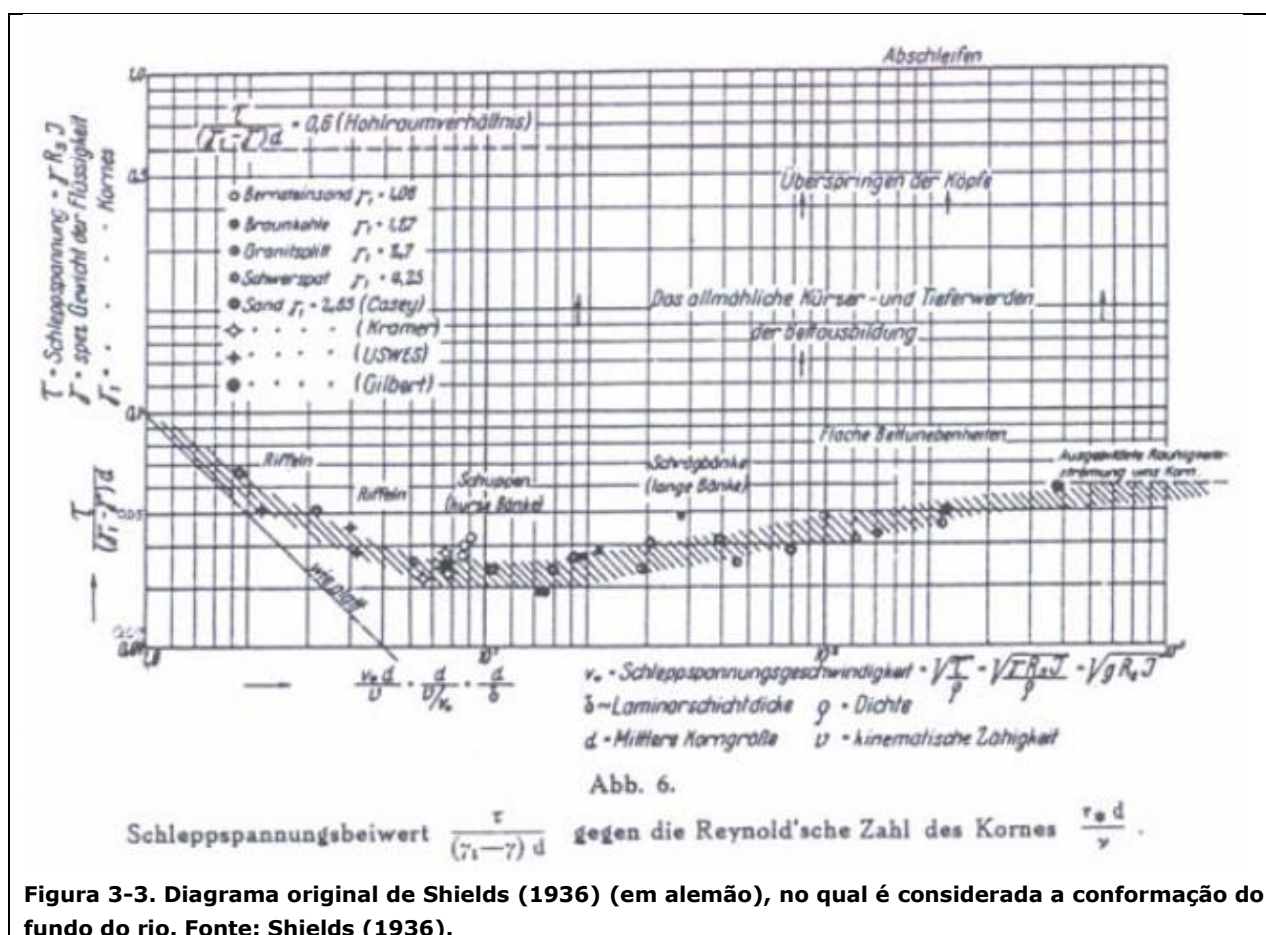
Ademais, a própria Golder (2020) admite a seguinte limitação na metodologia por ela proposta:

"Os resultados são específicos aos trechos fluviais investigados. Consequentemente, como o leito e o lag layer se comportam entre as seções fluviais permanece incompreendido. Uma possível solução seria utilizar uma interpolação/correlação entre as características estratigráficas e hidrológicas entre as seções transversais de forma a criar um continuum espacial". (sic.)

² "... the following derivation is still not considered as being the final expression of the law governing the solids discharge. It is merely a simplified form of the real law, which might have some useful practical applications"

Logo, a própria proponente da metodologia de monitoramento do lag layer admite que sua proposta não é suficiente para o objetivo e sugere uma interpolação entre seções, abordagem que carece de embasamento técnico-científico. Por isso, ao final desta subseção do parecer, a Ramboll recomenda uma abordagem adequada para este monitoramento.

Antes de apresentar a avaliação da abordagem adotada por Golder (2020), é necessário entender como surgiu o diagrama de Shields (1936). Originalmente, o método de Shields (1936), baseado em coletas de dados e observações de campo, propôs uma forma analítica para determinar o limiar de início de mobilização de sedimentos de fundo fluvial baseado na tensão crítica no leito. Ao observar o diagrama original (Figura 3-3) percebe-se que Shields (1936) levou em consideração a conformação de fundo (em consonância com o esquema ilustrado na Figura 2-3 por van Rijn, 1993), ou seja, a formação de rugas, dunas, antidunas e rampas com ressalto no leito do rio são importantes também.



A consideração da conformação de fundo é necessária para entender o transporte de sedimentos por completo. Conforme sumarizado por van Rijn (1993), existem três regimes de transporte, dos quais a influência predominante pode ser de características do grão ou da conformação de fundo:

- *Regime superior*: conformações de fundo de dunas praticamente simétricas ou em trechos de rio com fundo composto por antidunas ou leito plano móvel. Neste regime há maior influência da conformação de fundo no transporte de sedimentos.
- *Transição*: caracterização física obscura por se tratar de um regime de transição.
- *Regime inferior*: conformação de fundo de leito plano, rugas e dunas. Neste regime há maior influência das características do grão no transporte de sedimentos.

Diante do exposto, a abordagem adotada por Golder (2020) não é suficiente para estimar o transporte de sedimentos justamente no regime de maior energia do escoamento fluvial, o regime superior. O regime superior deve também considerar os métodos analíticos de conformação de fundo, sendo uma das muitas referências no assunto a publicação de van Rijn (1984c) "*Sediment transport, Part III: Bed forms and aluvial roughness*".

Além disso, como os estudos de transportes de sedimentos dependem da coleta de dados e observações de campo, é fundamental entender qual é o limiar de mobilização e de suspensão de sedimentos para os rios Gualaxo do Norte, Carmo de Doce nos Trechos 6 a 11. Conforme apresentado por van Rijn (1993) em diagrama de Shields completo, tanto o limiar de mobilização como o de suspensão de sedimentos dependem de cada rio, por isso diversos autores encontraram limiares distintos (ver Figura 3-4).

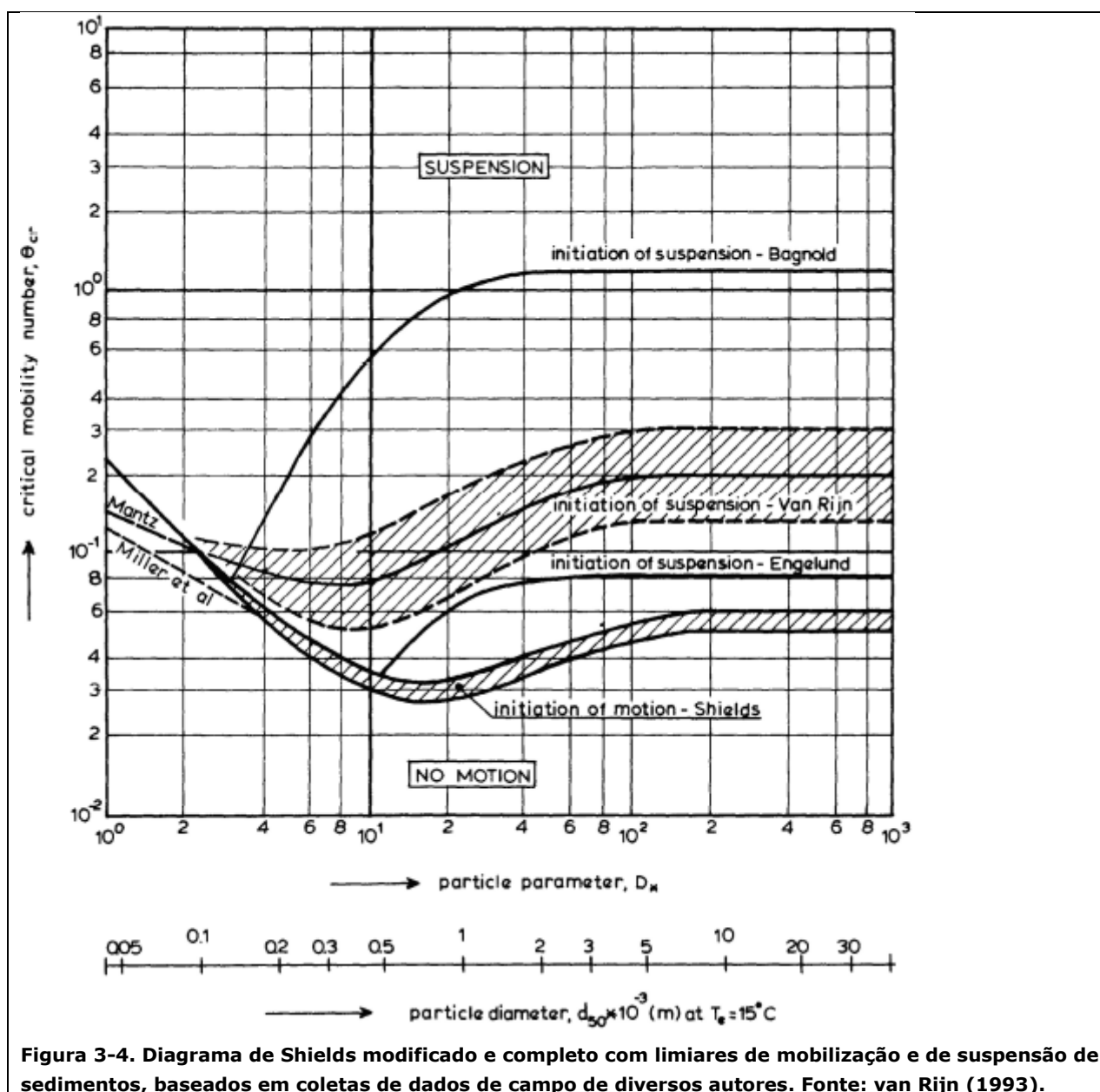


Figura 3-4. Diagrama de Shields modificado e completo com limiares de mobilização e de suspensão de sedimentos, baseados em coletas de dados de campo de diversos autores. Fonte: van Rijn (1993).

Por sua vez, a Golder (2020) propõe a aplicação do método analítico de Shields modificado por Yalin (1963; 1977), que é baseado na tensão crítica de fundo para determinar o limiar de mobilização dos sedimentos no leito do rio.

No entanto, Golder (2020) confundiu o parâmetro “viscosidade cinemática” (m^2/s) com “*velocidade da água (m/s)*” (sic.) na fórmula de rugosidade do grão, fator que compõe a equação governante do método analítico proposto. Cabe ressaltar que isso denota um erro conceitual, porque todos os métodos derivados de Shields (1936) são baseados na tensão crítica de fundo e não na velocidade do escoamento fluvial. Logo, como há esse erro conceitual na aplicação do método analítico, o exemplo de aplicação apresentado por Golder (2020) não será avaliado neste parecer e deve ser desconsiderado para quaisquer outros fins.

Caso Golder (2020) pretendesse adotar a velocidade do escoamento do rio, o método recomendável seria o Diagrama de Hjulström (1935). Conforme apresentado na Figura 3-5, este diagrama relaciona a velocidade do escoamento com o diâmetro do grão de sedimento.

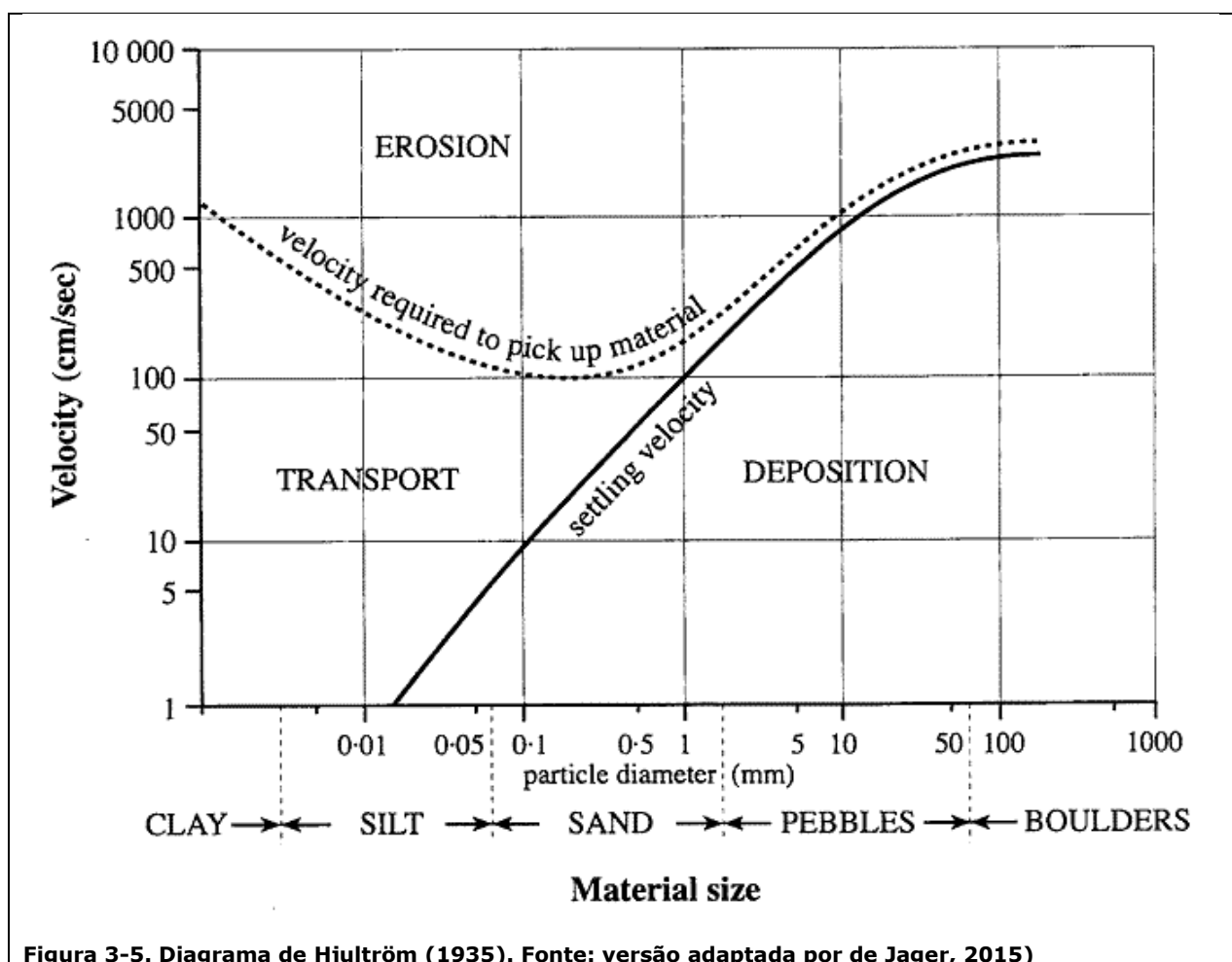


Figura 3-5. Diagrama de Hjulström (1935). Fonte: versão adaptada por de Jager, 2015)

Apesar do diagrama de Hjulström (1935) ser uma abordagem mais simples, ele depende de menos variáveis e sua aplicação é mais fácil. Portanto, a Ramboll recomenda que esta abordagem também seja considerada como uma forma preliminar de avaliar a mobilização de sedimentos de fundo. Ademais, considerando também que os dados atualmente disponíveis são escassos (ver seção 3.1 deste parecer e

relatório da NHC, 2018), essa abordagem permite uma resposta inicial antes de partir para uma abordagem analítica mais complexa derivada de Shields (1936).

Outra lacuna, reconhecida pela Golder (2020), na metodologia de monitoramento do lag layer é a descontinuidade, ou seja, o método analítico proposto considera apenas seções de estudo. Neste sentido a Ramboll recomenda que o leito do rio seja monitorado por meio de levantamentos batimétricos com periodicidade mensal para gerar uma série de Modelo Digital de Terreno (MDT) nos Trechos 6 a 11. A fim de entender quais locais apresentam tendência de deposição e quais apresentam erosão, essas campanhas de batimetrias mensais devem mapear toda a calha do rio (alguns habitats aquáticos onde o leito é rochoso como corredeiras e cachoeiras não precisam ser mapeados). Os locais onde for identificado processo persistente de erosão progressiva devem ser monitorados com transectos adicionais para ver se a camada de lag layer continua sobre a camada de “rejeito inconsolidado”.

Esta recomendação é embasada em diversas referências técnico-científicas, para citar algumas:

- van Rijn (1993) recomenda o mapeamento do perfil longitudinal do leito do rio e de suas conformações de fundo por meio de batimetrias sucessivas e periódicas.
- Lane et al. (1994) combinou Modelo Digital de Terreno (MDT)³ para a calha do rio com fotogrametria e coleta de campo durante o período do estudo considerando uma resolução temporal (periodicidade) que permite entender as mudanças do leito do rio.
- Walker & Willgoose (1999) apresenta a importância do MDT para trazer maior acurácia na hidrologia e na geomorfologia.
- Hemmelder et al. (2018) aplicou uma série multi temporal de imagens de alta resolução capturadas por VANT (Veículo Aéreo Não-Tripulado)⁴ para entender alterações na morfologia fluvial, como desvios no canal e formação de bancos, do rio Buëch na França.

Por fim, cabe ressaltar que essas campanhas de batimetrias mensais nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce (Trechos 6 a 11) são necessárias porque a Fundação Renova não possui essas informações. Esse posicionamento da Ramboll está alinhado com uma constatação da NHC (2018) no produto contratado pela Fundação Renova “*Análise de processos fluviais transporte de sedimentos no Trecho 8*”, conforme segue citação *ipsis litteris*:

“Portanto, não existem dados topográficos e batimétricos suficientemente frequentes e densos disponíveis para o Rio Gualaxo do Norte. Consequentemente, não é possível realizar um balanço de massa de sedimentos usando o método morfológico, pois não há dados disponíveis para estimar com precisão as mudanças no armazenamento do material do leito. O desenvolvimento de modelos digitais de elevação (DEMs) contínuos do canal do rio devem ser incluídos no programa de monitoramento do rio”.

Portanto, as recomendações da Ramboll contidas nesta subseção do parecer vêm reforçar recomendações já feitas pela NHC à Fundação Renova em 2018.

Métodos para estimar a profundidade de remoção do leito e do lag layer

Golder (2020) tem por objetivo estimar a “*profundidade de remoção do leito e do lag layer*” e recomendou a aplicação de Teoria do Regime, com formulações analíticas desenvolvidas por Blench (1962; 1969) e Lacey (1930), além do conceito de velocidade competente de Neill (1968; 1973).

³ Este conceito pode ser chamado por alguns autores como MDE – Modelo Digital de Elevação

⁴ Em inglês UAV – Unmanned Airborne Vehicle (UAV)

É fundamental esclarecer que a aplicação de Teoria do Regime não é recomendada para rios, essa abordagem foi desenvolvida para canais artificiais com leitos erodíveis, como canais de irrigação. A Teoria do Regime de canais artificiais foi iniciada por Lindley (1919) para auxiliar engenheiros britânicos no dimensionamento de canais de irrigação na Índia e no Paquistão. Posteriormente, Lacey (1930) complementou a Teoria do Regime. Conforme relatado por Stevens & Nordin (1987), atualmente muitos canais dimensionados através da teoria de Lacey (1930) e de outras formulações derivadas necessitam de grandes reformas por falhas nos projetos originais, fato que evidencia a fragilidade da Teoria do Regime. Barr & Herbertson (1968) ressaltam outro fator que mostra a limitação da Teoria do Regime: as formulações foram desenvolvidas para dimensionamento de canais de irrigação retilíneos e ainda concluem que as teorias derivadas de Lacey (1930) não são recomendadas para rios.

De fato, o próprio Blench (1962) conclui em seu trabalho que a Teoria do Regime é útil, porém devido às limitações da mesma, quando essa abordagem for adotada o profissional deve entender de geomorfologia e hidráulica para evitar resultados inadequados.

Em relação ao conceito de velocidade competente, cuja definição é a velocidade média capaz de mobilizar os sedimentos do leito com um dado tamanho e peso, Garde & Raju (2000) apontam uma falha nesta abordagem porque nela não há menção sobre qual elevação deve ser feita a medição da velocidade do escoamento fluvial em relação ao leito.

Portanto, considerando o fato de que as formulações recomendadas por Golder (2020) não são aplicáveis para os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, e considerando também que as vazões máximas extremas estimadas para os TRs de 2, 10, 25 e 50 anos não foram definidas corretamente (ver seção 3.3), o exemplo de aplicação para os trechos 6 a 11 não será avaliado neste parecer e seus resultados devem ser desconsiderados para quaisquer outros fins.

Por fim, para monitorar a profundidade de remoção do leito e do lag layer a Ramboll reforça sua recomendação contida na subseção anterior de que o leito do rio seja monitorado por meio de levantamentos batimétricos com periodicidade mensal para gerar uma série de Modelo Digital de Terreno (MDT) nos Trechos 6 a 11. Essa recomendação está em consonância com as recomendações já feitas pela NHC à Fundação Renova em 2018.

3.4.2 Modelagem numérica

Golder (2020) considerou a adoção de um modelo numérico bidimensional para amparar o monitoramento do lag layer nos Trechos 6 a 11. Os resultados esperados são (*ipsis litteris*):

- *leito móvel, isto é, a morfologia do leito que varia espacialmente (de montante a jusante) e temporalmente (no mesmo lugar ao longo do tempo);*
- *Mudanças de velocidade, profundidade e cisalhamento do fluxo em suas dimensões espaciais e temporais;*
- *Dinâmica estratigráfica, isto é, à medida que o leito recebe ou remove sedimentos de diferentes granulometrias, ele se distingue em termos de processos;*
- *Fornecer um mapa de remoção potencial das camadas do leito e do lag layer;*

Em seguida, Golder (2020) propõe a calibração do modelo numérico e simulação de cenários com diferentes condições hidráulicas, considerando hidrogramas com vazões de pico de TRs 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Apesar de não estar explícito na proposta da Golder (2020), baseado nos resultados esperados pela proponente, a Ramboll entende que o modelo numérico compreende um modelo morfodinâmico acoplado a um modelo hidrodinâmico.

Entretanto, a proposta da Golder (2020) não aponta qual modelo numérico será utilizado, diz somente que será um modelo bidimensional. A escolha do modelo é fundamental para entender:

- quais equacionamentos governam o modelo hidrodinâmico e o morfodinâmico,
- quais equações de transporte de sedimentos estão disponíveis no modelo morfodinâmico,
- qual é o método de atualização de batimetria no modelo morfodinâmico,
- quais dados de entrada são necessários para desenvolver os modelos hidrodinâmico e morfodinâmico,
- acima de tudo, quais dados são necessários para calibrar os modelos hidrodinâmico e morfodinâmico.

Conforme apresentado nas seções 3.1 e 3.3, não há dados de monitoramento de vazão líquida suficientes, tanto na dimensão espacial como temporal, para validar regionalização de vazões nos trechos 6 a 11. Logo, os dados de entrada de vazão líquida do modelo hidrodinâmico ficam comprometidos. Em relação ao modelo morfodinâmico, todos os modelos disponíveis (para citar alguns: Mike 21 ST da DHI (2017); Delft3D da Deltares (2020); TELEMAC-SYSPHE da EDF (2019) e SisBaHia da COPPETEC (2020)) dependem de etapa prévia de calibração do parâmetro de Shields (1936) como entrada no modelo, além dos dados de campo de caracterização dos grãos e de transporte de sedimentos.

Para montar um modelo morfodinâmico também é fundamental entender e mapear as fontes e sumidouros de sedimentos no domínio (neste caso Trechos 6 a 11), o que não foi feito pela Golder (2020). Por enquanto, a Fundação Renova tem os resultados do balanço de massas para parte do rio Gualaxo do Norte no Trecho 9 para os períodos chuvosos de 2017-2018 e 2018-2019 realizados pela NHC.

A fase de calibração é ainda mais trabalhosa que a montagem dos modelos hidrodinâmico e morfodinâmico. A fim de realizar uma calibração adequada, o modelo hidrodinâmico precisa de no mínimo séries temporais de vazões líquidas e de nível d'água espalhados pelo domínio do modelo e o modelo morfodinâmico precisa de no mínimo três batimetrias completas do leito do rio em datas distintas para calibrar o transporte por arraste de fundo e de séries temporais de sedimentos em suspensão totais espalhados pelo domínio do modelo para calibrar o transporte de sedimentos por suspensão.

Portanto, considerando:

- a escassez de dados de campo fluviométricos e de sedimentos nos Trechos 6 a 11 (ver seção 3.1 e relatório da NHC, 2018),
- o mapeamento incompleto de fontes e sumidouros de sedimentos,
- a ausência de batimetrias do leito do rio para verificar as etapas de calibração e de validação do modelo, e
- o caráter superficial da proposta da Golder (2020) para o modelo numérico.

A Ramboll não recomenda a adoção de modelagem morfodinâmica acoplada a modelo hidrodinâmico como ferramenta de monitoramento do lag layer nos Trechos 6 a 11.

3.4.3 Monitoramento de campo

O monitoramento de campo proposto pela Golder (2020) consiste na manutenção do plano de coleta vigente da Fundação Renova de dados hidrológicos e sedimentológicos e na amostragem "em três pontos

ao longo da seção transversal Intracalha: próximo à margem esquerda, centro do talvegue e próximo à margem direita” (sic.).

A amostragem recomendada pela Golder (2020) consiste na coleta de testemunhos verticais com registro granulométrico, fotográfico e estratigráfico, realizada em pelo menos 20 transectos com espaçamento de 4 a 5 km. Essa proposta recomenda que sejam realizadas amostragens no período seco e no período chuvoso, sem especificar a periodicidade.

Ao analisar a proposta da Golder (2020) é possível notar que, caso ela seja implementada, haveria incertezas acerca da localização dessas seções transversais onde seriam realizadas as sondagens de caracterização estratigráfica e granulométrica. Ademais, a quantidade recomendada pela Golder (2020) de 20 transectos é inferior à quantidade de seções de amostragens realizadas para linha de base, utilizadas para os Planos de Manejo de Rejeitos dos Trechos 6 a 11, conforme apresentado na Tabela 3-5.

Tabela 3-5. Quantidade de transectos com sondagens de caracterização estratigráfica por meio de sondagens para linha de base, apresentadas nos Planos de Manejo de Rejeitos dos Trechos 6 e 7, 8, 9 e 10 e 11. Fonte (Jacobs, 2018)

Trecho	Quantidade de seções com estratigrafia	Quantidade de seções com amostragem de granulometria e metais
6	8 transectos	6 transectos
7	2 transectos	2 transectos
8	9 transectos	4 transectos
9	52 transectos	10 transectos
10	22 transectos	9 transectos
11	6 transectos	2 transectos
TOTAL	99 transectos	33 transectos

Além da proposta da Golder (2020) prever uma diminuição na amostragem dos transectos com estratigrafia em relação à linha de base, também haveria prejuízo pela perda de informações relativas à caracterização química dos sedimentos, ou seja, a análise de metais.

Diante do exposto, a metodologia de monitoramento do lag layer por coleta de campo proposta pela Golder (2020) configura um retrocesso quando comparada aos levantamentos de campo realizados para a caracterização ambiental dos Trechos 6 a 11 nos seus respectivos Planos de Manejo de Rejeitos preparados pela Jacobs (2018). Além disso, a proposta da Golder (2020), quando comparada com o levantamento de linha de base dos Planos de Manejo de Rejeitos, teria o prejuízo de não realizar amostragens com análises de metais nos sedimentos coletados.

Portanto, o monitoramento de campo proposto pela Golder (2020) é insuficiente, configura um retrocesso aos resultados já realizados na linha de base pela Jacobs (2018) nos Planos de Manejo de Rejeitos e não considera a formulação de um plano complementar de coleta de dados hidrológicos e de transporte de sedimentos em campo. Logo, o plano de monitoramento de campo da Golder (2020) deve ser desconsiderado.

Ademais, adotar somente as sondagens nos transectos limita o monitoramento do lag layer, uma vez que essa abordagem é segmentada na dimensão espacial. Novamente a Ramboll reforça a recomendação de que para monitorar o limiar de mobilização de sedimentos e a profundidade de remoção do lag layer (ver seções 3.1, 3.4.1 e 3.4.2), é necessário que o leito do rio seja monitorado por meio de levantamentos batimétricos com periodicidade mensal para gerar uma série de Modelo Digital de Terreno (MDT) nos

Trechos 6 a 11. Essa recomendação está em consonância com as recomendações já feitas pela NHC à Fundação Renova em 2018.

A abordagem integrada de monitoramento da estratigrafia, granulometria e metais nos transectos deve ser combinada às campanhas de batimetria mensais. A Ramboll recomenda que todos os transectos monitorados na linha de base dos Planos de Manejo de Rejeitos sejam mantidos nas campanhas posteriores para amparar o entendimento do comportamento do lag layer ao longo dos trechos 6 a 11.

Com base nas campanhas mensais de batimetria ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce será possível identificar locais onde há erosão persistente e progressiva, nesses locais deverão ser amostrados transectos adicionais e, a depender dos resultados, a Fundação Renova deverá proceder com alguma intervenção de contenção para evitar a disponibilização de rejeitos incolidados na coluna d'água. A Recomendação da Ramboll está melhor explicada na seção 4 deste parecer.

3.4.4 Combinação dos métodos propostos

A Golder (2020), no documento avaliado, apresenta na seção 9.4 as "*Possíveis abordagens combinadas aos métodos propostos*" e no capítulo 10 o "*Cronograma da metodologia recomendada*".

Conforme apresentado nas seções 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3, o objetivo específico III não foi atendido porque na proposta de monitoramento do lag layer da Golder (2020) existem erros conceituais nos métodos analíticos, superficialidade na proposta de modelagem numérica e um retrocesso no monitoramento de campo quando comparado aos levantamentos realizados na linha de base para os Planos de Manejo de Rejeitos. Portanto, a proposta da Golder (2020) deverá ser totalmente desconsiderada e um novo plano de monitoramento deverá ser feito.

A Ramboll entende que os métodos de monitoramento do lag layer devem ser complementares e sinérgicos, iniciando por uma abordagem mais simples que permita seu desenvolvimento com dados disponíveis e paralelamente a Fundação Renova deve proceder com um plano de coleta de dados de campo contínuo que suporte os outros métodos de monitoramento. Esse monitoramento deve ser suficiente para embasar a tomada de decisão no tocante a formas de intervenção no leito do rio para evitar a disponibilização de rejeito inconsolidado para a coluna d'água, na seção 4 deste parecer a Ramboll apresenta diretrizes de monitoramento integrado do lag layer.

Dessa forma, a fim de entender a importância da combinação de métodos propostos e conhecer técnicas de remediação de rios com sedimentos potencialmente poluidores depositados no leito, a Ramboll apresenta duas subseções "Considerações sobre a alternativa de manejo de rejeito de depósitos Intracalha definida nos Planos de Manejo de Rejeitos" e "Considerações sobre técnicas de remediação do leito dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce".

Considerações sobre a alternativa de manejo de rejeito de depósitos Intracalha definida nos Planos de Manejo de Rejeitos

Com base nos objetivos específicos definidos nos Planos de Manejo de Rejeitos para os depósitos intracalha (citação *ipsis litteris* de Jacobs, 2018), abaixo elencadas, e nos parágrafos seguintes a Ramboll fez considerações acerca das alternativas de manejo de rejeitos apresentadas por Jacobs (2018):

- Evitar a ressuspensão da fração fina do material depositado para atendimento padrão legal da qualidade da água para rios Classe II (turbidez e cor);
- Promover a formação de um substrato granulometricamente estável e adequado para a recuperação da vida aquática; e
- Possibilitar a recuperação do ecossistema aquático.

De fato, os objetivos estabelecidos para os depósitos intracalha no processo de tomada de decisão dos Planos de Manejo de Rejeitos dos Trechos 6 a 11 são claros e bem definidos. Em seguida, Jacobs (2018) avalia três alternativas de manejo de rejeitos (1-Remoção mecânica, 2-Capeamento *in situ* e 3-Capeamento natural) sob a óptica de quatro critérios. Conforme ilustrado na Figura 3-6, a alternativa escolhida foi “capeamento natural e monitoramento” (sic.).

Alternativa	Efetividade em realizar os objetivos	Viabilidade técnica e administrativa	Impactos e riscos do manejo	Tempo de implementação	Pontuação
Remoção mecânica do rejeito na calha, destinação para área de disposição ambientalmente adequada, reconstituição do substrato e monitoramento	5 	3 	1 	1 	$5 \times 3 \times 1 \times 1 = 15$
2. Capeamento do rejeito na calhas e monitoramento.	3 	5 	3 	3 	$3 \times 5 \times 3 \times 3 = 135$
3. Capeamento natural e monitoramento.	4 	5 	5 	4 	$4 \times 5 \times 5 \times 4 = 400$

Figura 3-6. Análise Simplificada de Tomada de Decisão para os depósitos de rejeito intracalha - exemplo do Trecho 8. Fonte Jacobs (2018).

No entanto, a pontuação da “Análise Simplificada de Tomada de Decisão” para os depósitos intracalha não foram atribuídas em consonância com os critérios estabelecidos e as três alternativas avaliadas apresentam falhas nas premissas.

Resumidamente, considerando o exemplo do Trecho 8 como ilustração, o volume de remoção mecânica (alternativa 1) e a área de capeamento do rejeito na calha (alternativa 2) são demasiadamente grandes. Partindo da premissa da Jacobs (2018) que considera o lag layer como um “capeamento natural” (alternativa 3) não é coerente considerar o montante de 145 mil m³ de remoção de rejeitos na alternativa 1 e a área de 1,28 milhão de m² de capeamento na alternativa 2. Mesmo assim, segundo as estimativas da Jacobs (2018), a alternativa 1 levaria 11 meses para ser implementada e a alternativa 2 somente um mês e meio.

Dessa forma, considerando que no caso da alternativa 2 (capeamento *in situ*) os impactos são menores que na alternativa 1 (remoção mecânica) e que o tempo de implementação poderia ser reduzido ao considerar a intervenção somente nas áreas onde houver erosão persistente e progressiva, tanto a área de capeamento *in situ* como também o tempo de implementação seriam reduzidos consideravelmente. Concernente à escolha, vale salientar que se recomenda que qualquer alternativa, deve ser articulada e divulgada em formato acessível para a participação dos impactados seja por ferramentas de comunicação e participação social ou por instrumento de educação ambiental. Como referência inclui-se a cláusula nº 12 do Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC, 2016), que dispõe que todos os Programas decorrentes do acordo devem ser de acesso público e divulgados em linguagem acessível aos impactados, devendo ser apresentados de uma forma transparente, clara e sempre que possível, objetiva.

Considerações sobre técnicas de remediação do leito dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce

Caso o monitoramento de campo mostre que a camada de lag layer apresente erosão persistente e progressiva a Fundação Renova deverá proceder com a técnica de remediação do leito na extensão onde for identificada a iminência de disponibilização de rejeitos inconsolidados ao ambiente. Conforme definido por USEPA (1998) de forma geral há quatro formas de remediação de sedimentos potencialmente contaminados: contenção no local, tratamento no local, remoção e contenção e remoção e tratamento.

Todas essas intervenções necessitam programa de monitoramento dedicado, inclusive para verificar a eficácia da remediação. As técnicas de capeamento podem ser passivas, pelo cobrimento físico dos sedimentos contaminados, ou ativas, pela adição de reagentes químicos naturais ou artificiais que sequestram os metais ou outros poluentes presentes no sedimento contaminado e inibem sua disponibilização. Por sua vez, a remoção consiste em empreitadas que mobilizam dragas de sucção ou de remoção mecânica que precisam de áreas adicionais para secagem e disposição final dos sedimentos contaminados.

Na aplicação de técnicas de capeamento, tanto ativa como passiva, é necessário fazer um monitoramento sistemático prévio, durante e posterior à intervenção que contemple parâmetros de qualidade de água, sedimentos, avaliação de comunidade bentônica, mapeamento topobatimétrico do leito e das margens e medições fluviométricas locais (Quadrini et al., 2003).

Além disso, a Ramboll sugere também que se aplique o biomonitoramento definido pelo uso sistemático das respostas de organismos vivos para avaliar a degradação ou melhoria ambiental sobre a qualidade da água e sedimentos da área de intervenção, seguindo diretrizes de biomonitoramento e coleta adequados, principalmente com macroinvertebrados aquáticos que são organismos que possuem grande interface entre água e sedimentos (EMBRAPA, 2004; Brandão et al., 2011; Kuhlmann et al., 2012). Além disso, também se sugere avaliação da toxicidade do componente aquático a partir de ensaios de ecotoxicidade crônica com amostras de sedimento integral e preferencialmente com organismos do grupo dos anfípodas, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA nº 454/2012. Ou, para fins de comparação com o PMQQS, realização de ensaios de ecotoxicidade crônica utilizando *Ceriodaphnia dubia* seguindo a ABNT NBR 13.373:2016 – “Ecotoxicologia aquática - Toxicidade crônica - Método de ensaio com *Ceriodaphnia* spp (Crustacea, Cladocera)”. Independente do organismo escolhido, o teste deverá seguir norma da ABNT.

O projeto de capeamento deve ser específico para as células de remediação e devem seguir critérios de escolha dos materiais de isolamento e construção das camadas (Mohan et al., 2000; Palermo, 1998; Quadrini et al., 2003) e no caso das técnicas de capeamento ativo também é necessário escolher a forma de remediação mais adequada para conter o poluente (Jacobs & Förstner, 1999; Kim et al., 2009; Randall et al., 2013). A Ramboll recomenda que na adoção de capeamento *in situ* sejam respeitadas as diretrizes

contidas no guia da USEPA (1998) "Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) Program".

Em relação às técnicas de remoção mecânica, o guia de dragagem ambiental de sedimentos contaminados da USACE (2008) "*Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments*" estabelece uma série de avaliações prévias que devem ser conduzidas antes de considerar a dragagem como alternativa de remediação possível, que incluem:

- a avaliação das condições da área e das características dos sedimentos da área alvo em relação a outras áreas onde foram realizadas dragagens de remediação de forma adequada;
- Considerar as vantagens e desvantagens da dragagem em comparação com outras formas de remediação ou combinação de abordagens para a área alvo;
- Considerar a dragagem (remoção) como parte da estratégia de remediação, que envolve também o tratamento e disposição final dos sedimentos dragados;
- Identificar os requerimentos e restrições que podem impactar a eficácia e a eficiência da dragagem ambiental como forma de remediação;
- Determinar a viabilidade potencial da dragagem ambiental em atingir os objetivos da ação de remediação.

Após avaliar se a técnica de dragagem pode ser considerada como alternativa de remediação, as condições da área alvo também devem ser verificadas. USACE (2008) estabelece dez condicionantes que devem ser atendidas para verificar a viabilidade da dragagem ambiental, essas condicionantes tratam de questões locais, de navegabilidade do rio e perturbações no ambiente. Posteriormente, deve ser feito um estudo de custo-benefício para avaliar as potenciais vantagens e desvantagens.

Caso a dragagem ambiental seja selecionada, devem ser mapeadas todas as etapas do processo para auxiliar na mitigação dos impactos negativos. Conforme apresentado na Nota Técnica da USACE (2008) "*The four Rs of Environmental Dredging: Resuspension, Release, Residual and Risk: Dredging Operations and Environmental Research Program*", os principais problemas a serem mitigados na dragagem são:

- Ressuspensão de sedimentos em decorrência da operação de dragagem;
- Liberação de contaminantes do leito;
- Liberação de sedimentos contaminados residuais da operação de dragagem;
- Riscos ambientais associados à dragagem.

Por fim, lembra-se que a atividade de dragagem se sujeita ao licenciamento ambiental, nos termos da Resolução CONAMA nº 237/1997, e, quando couber, da Resolução CONAMA nº 01/1986. E que, segundo a Resolução CONAMA nº 454/2012 que "estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional", são necessárias a apresentação de um plano conceitual de dragagem e a caracterização do material a ser dragado de acordo com as diretrizes gerais e os procedimentos definidos pela Resolução.

Para avaliação das alternativas de disposição em solo, os resultados da caracterização química devem ser comparados com os valores orientadores nacionais estabelecidos para solos pela Resolução CONAMA nº 420/2009 ou norma vigente estadual.

Para avaliação das alternativas de disposição em águas sob jurisdição nacional, os resultados da caracterização química devem ser comparados com os valores orientadores previstos na Resolução CONAMA 454/2012, e, dependendo dos resultados da caracterização química, ensaios de ecotoxicidade deverão ser realizados acompanhados da determinação de nitrogênio amoniacal na fração aquosa e correspondente à concentração de amônia não ionizada, bem como dos resultados referentes ao pH,

temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido. Outros ensaios, como os realizados para sulfetos, poderão ser solicitados, quando necessário, pelo órgão ambiental licenciador.

Portanto, a Ramboll recomenda que nas áreas onde for identificada erosão persistente e progressiva no leito do rio a técnica de remediação prioritária seja o capeamento *in situ*.

4. Recomendações propositivas da Ramboll para o monitoramento do lag layer

Como o monitoramento do lag layer proposto pela Golder (2020) não atendeu aos objetivos por ela estabelecidos (ver objetivos geral e específicos na Tabela 3-1), a Ramboll apresenta nesta seção as diretrizes do plano de monitoramento a ser desenvolvido:

1. Elaboração de um plano de coleta de dados de campo que alimentem os métodos de monitoramento do lag layer. Necessariamente esse plano deve seguir as recomendações da NHC (2018) e as recomendações da Ramboll presentes na seção 3.1:
 - a. Definir quantidade, posicionamento e forma de instalação das estações fluviométricas adicionais de forma a permitir a avaliação de transporte de sedimentos, sobretudo o balanço de massas e a validação dos resultados de técnicas de regionalização de vazões ao longo dos trechos 6 a 11;
 - b. Vazão (descarga líquida): acompanhar o nível d'água com estação automática telemétrica (com frequência de medição de 5 a 15 minutos) e gerar uma curva-chave "cota X vazão líquida". Logo, medições periódicas de vazão líquida (amostrada com *ADCP - Acoustic Doppler current profiler*) devem ter periodicidade recomendada semanal durante pelo menos um ano hidrológico completo;
 - c. Descarga sólida: acompanhar a descarga sólida de forma contínua, com frequência mínima semanal e medindo eventos de altas vazões, e gerar uma curva-chave "vazão sólida X vazão líquida" com dados coletados durante pelo menos um ano hidrológico completo que contemple o primeiro evento de vazão extrema;
 - d. Incrementar o método já em curso estabelecido pelo PMQQS no que tange à descarga líquida e sólida, aumentando periodicidade e pontos de coleta para atendimento ao escopo delineado no item "c".
2. Determinação das vazões máximas extremas com Tempos de Retorno (TRs) de 2, 10, 25, 50 e 100 anos por meio de pelo menos quatro métodos de distribuição estatística (para citar alguns, mas não se restringindo a estes: Weibull, California, Gumbel, Log-Pearson Tipo III, Normal etc.)
 - a. Nos postos onde houver séries histórica de monitoramento de vazão superior a 30 anos basta aplicar as metodologias de determinação de vazões máximas extremas para os TRs escolhidos;
 - b. Nos postos onde as medições forem recentes (menos de 30 anos de medições de vazão), anteriormente deve-se regionalizar as vazões de um posto próximo com série histórica longa (igual ou superior a 30 anos) e validar os resultados com as medições de vazão medidas em campo.
3. Manutenção de todos os transectos monitorados na linha de base dos Planos de Manejo de Rejeitos (Jacobs, 2018) nas campanhas posteriores para amparar o entendimento do comportamento do lag layer ao longo dos trechos 6 a 11 e mantê-los até o final do monitoramento. Coletar dados de estratigrafia, granulometria e metais do lag layer e do rejeito inconsolidado.
4. Monitorar o leito do rio por meio de levantamentos batimétricos com periodicidade mensal para gerar uma série de Modelo Digital de Terreno (MDT) nos Trechos 6 a 11.

- a. Os locais onde for identificado processo persistente de erosão progressiva devem ser monitorados com transectos adicionais para ver se a camada de lag layer continua sobre a camada de “rejeito inconsolidado”;
 - b. Caso seja identificada a necessidade de intervenção (priorizando o capeamento *in situ*), desenvolver um plano de monitoramento da área e elaborar os projetos de intervenção. Tal escopo inclusive já está previsto para ser desenvolvido no âmbito do sistema CIF, conforme estabelecido pela cláusula 178, que possui um programa atualmente em suspensão (Deliberação CIF nº 275).
5. Avaliação do potencial de mobilização e suspensão de sedimentos do lag layer para os TRs 25, 50 e 100 anos (atendimento à requisição 03 da Nota Técnica CT-GRSA 08/2019):
 - a. Preliminarmente, enquanto não houver os dados do plano de coleta de campo adicional, adotar o diagrama de Hjulström (1935) para estimar a quantidade de sedimentos mobilizados e suspensos entre cada seção.
 - b. Após o segundo mês de implantação do plano de coleta de dados de campo e de campanhas de levantamento batimétrico mensal, iniciar a avaliação da mobilização e suspensão de sedimentos por meio do Diagrama de Shields (1936), considerando os limiares apresentados no diagrama modificado de van Rijn (1993).
 - c. Combinar a análise de transporte de sedimentos do Diagrama de Shields (1936) com o monitoramento de conformação de fundo, seguindo as diretrizes de van Rijn (1984c; 1993). Essa avaliação combinada permite entender a tendência de mobilização e suspensão de sedimentos do lag layer.

5. Considerações finais

A avaliação da Ramboll sobre a proposta de metodologia para monitoramento do lag layer (Golder, 2020) mostrou que este documento não atendeu aos objetivos geral e específicos estabelecidos (Tabela 3-1). Tampouco a metodologia de monitoramento proposta pela Golder (2020) cumpre a requisição 03 da NOTA TÉCNICA CT-GRSA 08/2019. Ademais, o documento avaliado apresenta erros conceituais de hidrologia (ver seção 3.3) e de fundamentos de transporte de sedimentos (ver seção 3.4.1), além de não prever um plano de coleta de dados fluviométricos e sedimentológicos (ver seção 3.1).

Portanto, o “*Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos*” (2020) deve ser totalmente desconsiderado e uma nova proposta de metodologia de monitoramento do comportamento do lag layer deve ser apresentada em caráter de urgência.

A nova proposta de monitoramento do comportamento do lag layer deverá seguir as diretrizes recomendadas pela Ramboll (ver seção 4) e o trabalho final deverá ser revisado por uma empresa especializada em hidráulica e transporte de sedimentos (*peer review*). A Ramboll entende que dois meses são suficientes para elaborar a nova proposta e passar o trabalho por uma revisão de pares. Os trabalhos de coleta de dados em campo deverão começar antes do primeiro dia de outubro de 2020, para garantir o registro dos eventos de grandes vazões durante o período chuvoso.

6. Referências

ABNT NBR 13.373. (2016). Ecotoxicologia aquática - Toxicidade crônica - Método de ensaio com *Ceriodaphnia* spp (Crustacea, Cladocera).

Ahanger, M. A., Asawa, G. L., & Lone, M. A. (2008). Experimental study of sediment transport hysteresis. *Journal of hydraulic research*, 46(5), 628-635.

ANA – Agência Nacional de Águas (2014). Orientações para elaboração do relatório de instalação de estações hidrométricas. Brasília/DF, 2014.

APLYSIA (2019). Resultados da Classificação das Amostras do Perfil Sedimentológico. Anexo B. Março, 2019.

Barbosa, S.E. da S., Barbosa Júnior, A.R., Silva, G.Q. da, Campos, E.N.B., & Rodrigues, V. de C. (2005). Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a bacia do rio do Carmo, Minas Gerais. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 10(1), 64-71. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000100008>

Barr, D.I. H., Herbertson, J.G., & YALIN, M. (1968). A SIMILITUDE FRAMEWORK OF REGIME THEORY. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 41(4), 761-781.

Blench, T. (1962). Quantitative interrelation of erosion and river regime by regime theory methods. *Universidad de Alberta, Canadá*.

Bogen, J. (1980). *The hysteresis effect of sediment transport systems*. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 34(1), 45-54. doi:10.1080/00291958008545338

Brandão, C. J., Botelho, M. J. C., Sato, M. I. Z., & Lamparelli, M. C. (2011). Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. *São Paulo: CETESB*.

Carling, P. A., Golz, E., Orr, H. G., & Radecki-Pawlik, A. (2000). The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine, near Mainz, Germany. I. Sedimentology and morphology. *Sedimentology*, 47(1), 227-252.

Ch2m (2017). Plano de Manejo de Rejeito – revisão 00. Abril/2017.

Ch2m (2017). Plano de Manejo de Rejeito – revisão 01. Julho/2017.

Ch2m (2017). Volume 1 - Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no trecho 8 – Revisão 0. Julho/2017.

CIF – Comitê Interfederativo (2017). NOTA TÉCNICA IBAMA/SISEMA/IEMA Nº 002/2017: Análise do Plano de Manejo de Rejeitos apresentado pela Fundação Renova. Belo Horizonte, 22 de junho de 2017.

CIF – Comitê Interfederativo (2019). NOTA TÉCNICA CT-GRSA 08/2019: Análise do documento “Volume 6 – Complementação da Aplicação do Plano de Manejo de Rejeitos no Trecho 8 – Rev-02 – Julho de 2018” e estabelece requisições relacionadas aos depósitos de rejeitos intracalha no âmbito do Plano de Manejo de Rejeitos Belo Horizonte, 21 de maio de 2019.

CIF – Comitê Interfederativo (2019). Deliberação CIF nº 275: Suspensão temporária do Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo de Vigilância para Avaliação de Impactos. Brasília, 23 de abril de 2019.

CIF – Comitê Interfederativo (2019). Deliberação CIF nº 304: Aprovação do Plano de Manejo de Rejeitos no Trecho 8, no que diz respeito aos contextos relacionados aos depósitos de rejeitos Intracalha. Brasília, 29 de julho de 2019.

Coleman, S. E., & Nikora, V. I. (2009). Exner equation: A continuum approximation of a discrete granular system. *Water Resources Research*, 45(9).

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (1986). Resolução nº 01 que dispõe sobre o impacto ambiental.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (1997). Resolução nº 237 que dispõe do licenciamento ambiental.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (2012). Resolução nº 454 - Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional.

Copeland, R., Soar, P., & Thorne, C. (2005). Channel-Forming Discharge and Hydraulic Geometry Width Predictors in Meandering Sand-Bed Rivers. *Impacts of Global Climate Change*. doi:10.1061/40792(173)568

COPPETEC (2020). Referência Técnica do SisBaHiA. Última Revisão 19/02/2020.

da Silva Júnior, O. B., BUENO, E., Tucci, C. E., & Castro, N. M. (2003). Extrapolação espacial na regionalização da vazão. *RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8(1), 21-37.

de Jager, M. (2015). An analysis of soil properties associated with badland and gully erosion in rural catchments of the Ngqushwa District, Eastern Cape Province. 10.13140/RG.2.1.4180.6242.

Deltares (2020). Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments – User manual. March 2020.

DHI – Danish Hydraulic Institute (2017). Mike 21 ST: Non-Cohesive Sediment Transport Module – user Guide.

EDF - LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE ET ENVIRONNEMENT MODELISATION DES APPORTS HYDRIQUES ET TRANSFERTS HYDRO-SEDIMENTAIRES (2019). Sisphe User Manual – Version v8p1. December 2019.

Einstein, H. A. (1950). *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows* (Technical Bulletin No. 1026). US Government Printing Office.

EMBRAPA (2004). Aplicação de biomonitoramento para avaliação da qualidade da água em rios. Autora: Silveira, M.S. – Jaguariúna/SP: EMBRAPA Meio Ambiente – Documento 36, 68p.

Emmett, W. W., & Wolman, M. G. (2001). Effective discharge and gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(13), 1369–1380. doi:10.1002/esp.303

Fundação Renova (2019). Ofício OFI.NII.022019.8481: Resposta ao Ofício Semad/CT-REJEITOS nº 98/2019 – Requisição nº 03 da Nota Técnica CT-GRSA nº 08/2019, Deliberação nº 304/2019. Belo Horizonte, 02 de dezembro de 2019.

Fundação Renova (2020). Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos – PMQQS. Relatório Trimestral do PMQQS, março de 2020.

Garde, R.J., Raju, K.G.R. (2000). *Mechanics of sediment transportation and alluvial streams problems*. New Age International limited, Publishers. Revised Third Edition.

Golder Associates (2020). Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do Lag Layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos. Revisão 02 – RT-002_199-515-2557_02. São Paulo, 20 de março de 2020.

Governo do Estado de Minas Gerais – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) (2019). Ofício SEMAD/CT-REJEITOS nº. 98/2019: Não atendimento da Requisição 03 da Nota Técnica CT-GRSA nº 08/2019.

Governo do Estado de Minas Gerais – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) (2020). Ofício FEAM/CT - GRSA nº. 24/2020: Solicitação de apoio dos experts do Ministério Público Federal.

Hemmelder, S., Marra, W., Markies, H., & De Jong, S. M. (2018). Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery–A case study of the river Buëch, Hautes-Alpes, France. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 428-437.

Hjulström, F. (1935). *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris: Inaugural dissertation*. Uppsala: Almqvist & Wiksells.

Houbrechts, G., Van Campenhout, J., Levecq, Y., Hallot, E., Peeters, A., & Petit, F. (2012). Comparison of methods for quantifying active layer dynamics and bedload discharge in armoured gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(14), 1501-1517.

Jacobs (2018). Volume 6 – Complementação da Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no trecho 8 – Revisão 2. Julho/2018.

Jacobs (2018). Volume 2 - Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos trechos 6 e 7 – Revisão 1. Agosto/2018.

Jacobs (2018). Volume 4 - Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no trecho 9 – Revisão 1. Agosto/2018.

Jacobs (2018). Volume 5 - Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos trechos 10 e 11 – Revisão 1. Dezembro/2018.

Jacobs, P. H., & Förstner, U. (1999). Concept of subaqueous capping of contaminated sediments with active barrier systems (ABS) using natural and modified zeolites. *Water Research*, 33(9), 2083-2087.

- Kim, Y. S., Jafvert, C. T., Yoon, S., Hyun, S., & Johnson, B. (2009). Potential consolidation-induced NAPL migration from coal tar impacted river sediment under a remedial sand cap. *Journal of hazardous materials*, 162(2-3), 1364-1370.
- Kleinhans, M. G. (2002). *Sorting out sand and gravel: sediment transport and deposition in sand-gravel bed rivers* (Doctoral dissertation). The Royal Dutch Geographical Society/Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University.
- Kleinhans, M. G., Wilbers, A. W. E., & Ten Brinke, W. B. M. (2007). Opposite hysteresis of sand and gravel transport upstream and downstream of a bifurcation during a flood in the River Rhine, the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences/Geologie en Mijnbouw*, 86(3).
- Kuhlmann, M. L., Johnscher-Fornasaro, G., Ogura, L. L., & Imbimbo, H. R. V. (2012). Protocolo para o biomonitoramento com as comunidades bentônicas de rios e reservatórios do estado de São Paulo. *São Paulo: CETESB*.
- Lacey, G. (1930). Stable Channels in Alluvium. In *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers* (Vol. 229, No. 1930, pp. 259-292). Thomas Telford-ICE Virtual Library.
- Lane, S. N., Richards, K. S., & Chandler, J. H. (1994). Developments in monitoring and modelling small-scale river bed topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19(4), 349-368.
- Lindley, E. S. (1919). Regime channels. In *Proceedings of Punjab Engineering Congress* (Vol. 7, pp. 63-74).
- Ministério Público Federal – MPF (2020). Despacho da Procuradoria da República – Minas Gerais – Força Tarefa Barragens. Ref.: PR-MG-00016877/2020. Belo Horizonte, 25 de março de 2020.
- Mohan, R., Brown, M., & Barnes, C. (2000). Design criteria and theoretical basis for capping contaminated marine sediments. *Applied Ocean Research*, 22(2), 85-93. doi:10.1016/s0141-1187(00)00003-1
- Nash, D. B. (1994). Effective Sediment-Transporting Discharge from Magnitude-Frequency Analysis. *The Journal of Geology*, 102(1), 79-95. doi:10.1086/629649
- Neill, C. R. (1968). Note on initial movement of coarse uniform bed-material. *Journal of hydraulic research*, 6(2), 173-176.
- NHC (2018). Análise de processos fluviais transporte de sedimentos no Trecho 8 – rio Gualaxo do Norte. São Paulo, junho de 2018.
- Obregon, E., Tucci, C. E., & Goldenfum, J. A. (1999). Regionalização de vazões com base em séries estendidas: bacias afluentes à Lagoa Mirim, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 4(1), 57-75.
- Palermo, M. R. (1998). Design considerations for in-situ capping of contaminated sediments. *Water Science and Technology*, 37(6-7), 315.

- Parker, G., Paola, C., & Leclair, S. (2000). *Probabilistic Exner Sediment Continuity Equation for Mixtures with No Active Layer*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(11), 818–826. doi:10.1061/(asce)0733-9429(2000)126:11(818)
- Pelosi, A., Parker, G., Schumer, R., & Ma, H. B. (2014). Exner-Based Master Equation for transport and dispersion of river pebble tracers: Derivation, asymptotic forms, and quantification of nonlocal vertical dispersion. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(9), 1818-1832.
- Pelosi, A., Schumer, R., Parker, G., & Ferguson, R. I. (2016). The cause of advective slowdown of tracer pebbles in rivers: Implementation of Exner-Based Master Equation for coevolving streamwise and vertical dispersion. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(3), 623-637.
- Quadrini, J. D., VanDewalker, H. M., Mihm, J. E., & McShea, L. J. (2003). Pilot-scale demonstration of in situ capping of PCB-containing sediments in the lower Grasse River. *Remediation Journal: The Journal of Environmental Cleanup Costs, Technologies & Techniques*, 14(1), 33-53.
- Randall, P. M., Yates, B. J., Lal, V., Darlington, R., & Fimmen, R. (2013). In-situ subaqueous capping of mercury-contaminated sediments in a fresh-water aquatic system, Part II-evaluation of sorption materials. *Environmental research*, 125, 41-51.
- Shields, A. (1936). Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *PhD Thesis Technical University Berlin*. [em alemão]
- Silva, E. A., & Tucci, C. E. (1998). Relação entre as vazões máximas diárias e instantâneas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 3(1), 133-151.
- Stevens, M. A., & Nordin Jr, C. F. (1987). Critique of the regime theory for alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(11), 1359-1380.
- Tananaev, N. I. (2015). Hysteresis effects of suspended sediment transport in relation to geomorphic conditions and dominant sediment sources in medium and large rivers of the Russian Arctic. *Hydrology research*, 46(2), 232-243.
- Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC). 2 mar. 2016. Dispõem sobre acordo entre o Governo Federal, Governo do estado de Minas Gerais, Governo do estado Espírito Santo e as mineradoras Samarco Mineração S/A, Vale S/A e BHP Billiton Brasil Ltda. Brasília, 2016.
- USACE – US Army Corps of Engineers (2008). The four Rs of Environmental Dredging: Resuspension, Release, Residual and Risk: Dredging Operations and Environmental Research Program (ERDC/EL TR-08-4). Authors: Todd S. Bridges, Stephen Eells, Donald Hayes, David Mount, Steven C. Nadeau, Michael R. Palermo, Clay Patmont, and Paul Schroeder. Washington, DC January 2008.
- USACE – US Army Corps of Engineers (2008). Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments (ERDC/EL TR-08-29). Authors: Michael R. Palermo, Paul Schroeder, Trudy J. Estes, and Norman R. Francingues. Washington, DC January 2008.
- USEPA – Environmental Protection Agency (1998). Guidance for in situ subaqueous capping of contaminated sediments (EPA 905-B96-0004). Authors: Palermo, M., Maynard, S., Miller, J., and Reible, D. Great lake National Office, Chicago, IL.

van Rijn, L.C. (1984a). Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(10), 1431-1456.

van Rijn, L.C. (1984b). Sediment transport, part II: suspended load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(11), 1613-1641.

van Rijn, L.C. (1984c). Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of hydraulic engineering*, 110(12), 1733-1754.

van Rijn, L.C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.

Walker, J. P., & Willgoose, G. R. (1999). On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. *Water Resources Research*, 35(7), 2259-2268.

Warrick, J.A., Bountry, J.A., East, A.E., Magirl, C.S., Randle, T.J., Gelfenbaum, G., Ritchie, A.C., Pess, G.R., Leung V. & Duda, J.J. (2015). Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Source-to-sink sediment budget and synthesis. *Geomorphology*, 246, 729-750.

Woodruff, J. D. (1999). *Sediment deposition in the lower Hudson River estuary* (Master dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

Yalin, M.S. (1963). An expression for bed-load transportation. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 89(3): 221–250.

Yalin, M.S. (1977). *Mechanics of sediment transport*. 2nd ed. Pergamon Press, Oxford, UK. 360 pp.