



DIRETRIZES GERAIS DE RECUPERAÇÃO SUSTENTÁVEL PARA A BACIA DO RIBEIRÃO FERRO-CARVÃO



Belo Horizonte – MG
Setembro/2020

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| <i>DISCLAIMER</i> | 9 |
| 1 Apresentação | 10 |
| 2 Introdução..... | 11 |
| 2.1 Histórico do processo | 11 |
| 3 Objetivos..... | 15 |
| 3.1 Objetivo Geral..... | 15 |
| 3.2 Objetivos Específicos | 15 |
| 4 Processo de Tomada de Decisão para a Recuperação Sustentável..... | 16 |
| 4.1 Conceito da Análise Multicritério..... | 17 |
| 4.1.1 Definição dos Critérios..... | 18 |
| 4.2 Metodologia..... | 22 |
| 4.2.1 Processo interdisciplinar de valoração de pesos para os critérios | 24 |
| 5 Fundamentação Técnica | 26 |
| 5.1 Premissas Gerais | 26 |
| 5.1.1 Remoção total dos rejeitos | 26 |
| 5.1.2 Descomissionamento das estruturas de contenção..... | 27 |
| 5.1.3 Recuperação da área total impactada | 27 |
| 5.2 Marco Zero | 27 |
| 5.2.1 Implantação do Marco Zero..... | 29 |
| 5.2.2 Avaliação do projeto piloto - Marco Zero..... | 44 |
| 5.2.3 Lições aprendidas | 51 |
| 5.2.4 Monitoramentos previstos..... | 52 |
| 5.3 Plano Integrado de Levantamento de Dados..... | 58 |
| 5.3.1 Sondagens | 59 |
| 5.3.2 Geofísica | 61 |
| 5.3.3 Estudos Geoquímicos..... | 62 |
| 5.3.4 Estudos Hidrogeomorfológicos e Hidrodinâmicos..... | 65 |
| 5.3.5 Avaliação de áreas prioritárias para conectividade: análises de ecologia da paisagem..... | 72 |
| 5.4 Uso pretérito x Uso futuro pretendido | 94 |
| 6 Avaliação das Alternativas de Recuperação..... | 103 |
| 6.1 Reconfiguração das Calhas Fluviais (Leitos e Margens)..... | 103 |
| 6.2 Reconformação e Estabilização de Margens..... | 110 |
| 6.3 Recuperação de planícies de inundação e áreas de entorno..... | 119 |
| 6.3.1 Recomposição topográfica e pedológica | 119 |
| 6.3.1.1 <i>Caracterização do material de recomposição do solo</i> | 120 |
| 6.3.1.2 <i>Reconformação superficial mecanizada</i> | 122 |
| 6.3.2 Técnicas de revegetação inicial..... | 123 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.3.3 | Técnicas de restauração florestal | 125 |
| 6.3.4 | Métodos alternativos de recuperação | 130 |
| 7 | Cronograma de Desenvolvimento, Implantação e Restauração Sustentável | 134 |
| 7.1 | Plano Plurianual de Remoção de Rejeitos e Recuperação Ambiental | 134 |
| 7.2 | Cronograma dos <i>Workshops</i> | 136 |
| 7.3 | Governança de processo | 136 |
| 8 | Referências Bibliográficas | 137 |
| 9 | Equipe Técnica Envolvida..... | 142 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 4.1. Elementos para a recuperação sustentável (adaptado de Bardos, Lazar e Willenbrock, 2009)..... | 17 |
| Figura 4.2. Fluxograma do sistema decisório para a recuperação da bacia do Ferro-Carvão aplicando a Análise Multicritério..... | 23 |
| Figura 5.1. Cortina de Estacas Prancha 1 na região da estrada Alberto Flores..... | 28 |
| Figura 5.2. Estação de Tratamento de Água Fluvial - ETAF 1..... | 28 |
| Figura 5.3. Processos erosivos formados na região da faixa de dutos da Transpetro..... | 29 |
| Figura 5.4. Referência locacional das iniciativas do Marco Zero..... | 30 |
| Figura 5.5. Aspecto das condições naturais do ribeirão Ferro-Carvão no trecho do Marco Zero..... | 31 |
| Figura 5.6. Traçado preliminar obtido a partir de imagem de satélite indicado no estudo da Potamos..... | 32 |
| Figura 5.7. Estudos do traçado do canal..... | 33 |
| Figura 5.8. Traçado parcialmente construído antes da foz com o rio Paraopeba. Fonte: Vale. Imagem de 13/03/2020..... | 34 |
| Figura 5.9. Esquemático do estudo de cotas da confluência do rio Paraopeba com o ribeirão Ferro-Carvão..... | 34 |
| Figura 5.10. Esquemático da solução de estabilização com a cortina de estaca prancha..... | 35 |
| Figura 5.11. Seção típica do solo reforçado com geossintéticos..... | 36 |
| Figura 5.12. Traçado do canal na região do Marco Zero – Planta..... | 37 |
| Figura 5.13. Seção típica do canal em solo reforçado – Sistema Vertical <i>Green Wall Water</i> [®] | 37 |
| Figura 5.14. Seção da região dos dutos da Transpetro em <i>Concret Channel</i> | 38 |
| Figura 5.15. Seção escavada e início do processo construtivo do <i>Green Wall Water</i> [®] | 38 |
| Figura 5.16. Detalhe da margem do canal com aterro compactado..... | 39 |
| Figura 5.17. Vista geral da construção da seção do canal e preenchimento das laterais com aterro compactado..... | 39 |
| Figura 5.18. Aplicação de <i>topsoil</i> | 40 |
| Figura 5.19. Adubação fosfatada..... | 41 |
| Figura 5.20. Aplicação de retentor de sedimentos, revestimento com biomanta e plantio de capim Vetiver..... | 41 |
| Figura 5.21. Plantio de muda de espécie arbórea nativa..... | 41 |
| Figura 5.22. Indicadores de desempenho e impacto e respectivas dimensões de análise..... | 44 |
| Figura 5.23. Detalhe da seção construída onde é possível notar o escoamento no leito e início do desenvolvimento da vegetação nas margens do canal..... | 46 |
| Figura 5.24. Efeito das cheias do rio Paraopeba sobre a foz do ribeirão do Ferro-Carvão. Foto de 26/01/2020..... | 47 |
| Figura 5.25. Detalhe do revestimento do leito do canal..... | 48 |
| Figura 5.26. Detalhe do revestimento do leito das drenagens à montante do canal.... | 48 |
| Figura 5.27. Técnicas de conservação de solo adotadas no Marco Zero..... | 49 |
| Figura 5.28. Ribeirão Ferro-Carvão na área do Marco Zero antes do rompimento..... | 50 |
| Figura 5.29. Interação entre as escalas de estudo e vertentes da avaliação da integridade ecológica dos ambientes aquáticos (Ferreira et al., 2017; Melo et.al.,2016; Castro, et al., 2005)..... | 56 |
| Figura 5.30. Representação gráfica da qualidade ecológica dos ambientes fluviais (Ferreira et al., 2017)..... | 58 |
| Figura 5.31. Estudo inicial de volumes depositados no ribeirão Ferro-Carvão..... | 59 |
| Figura 5.32. Listagem da estimativa de investigações – Córrego Ferro-Carvão e Remansos..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.33. Extrato da Carta Topográfica, originalmente na escala de 1:25.000. Folha Brumadinho: SF-23-X-A-II-2-SO (DSG, 1980). | 66 |
| Figura 5.34. Mapeamento hidrogeomorfológico da área afetada pelo rejeito. | 68 |
| Figura 5.35. Representação da análise multicritério de combinação linear ponderada para identificar áreas prioritárias para restauração florestal na bacia do ribeirão Ferro-Carvão, que eram originalmente ocupadas por Floresta Estacional Semidecídua (FES). Cada camada representa um benefício que se pretender promover com a restauração florestal, com diferentes pesos de importância. A soma das camadas gerou o mapa de benefícios ecológicos, que quando cruzado com os dados do mapa de uso e cobertura do solo, gera o mapa de Áreas Prioritárias para conservação. | 75 |
| Figura 5.36. Camada Área Terrestre Diretamente Afetada e os níveis de importância para restauração florestal desta camada. A região da área afetada pelos rejeitos, que originalmente era ocupada por Floresta Estacional semidecídua (FES), é definida como de extrema importância para restauração florestal desta camada. | 76 |
| Figura 5.37. Camada Água representando a importância da proteção dos recursos hídricos para a análise de priorização da bacia do ribeirão Ferro-Carvão. As áreas de preservação permanente (APP), que eram originalmente ocupadas por Floresta estacional Semidecidual, foram classificadas como de extrema importância para restauração florestal nesta camada de análise. Foram excluídas as APPs que caíram em área de mineração, em função de que não há mais corpos d'água neste tipo de uso do solo da bacia. Fonte de dados de hidrografia: IBGE. | 78 |
| Figura 5.38. Representação esquemática da paisagem segunda a teoria dos grafos. Os fragmentos, nesse caso de Floresta Estacional Semidecidual, são representados por pontos e as linhas tracejadas representam as ligações. Adaptado de Tambosi et al., (2013). | 79 |
| Figura 5.39. Fragmentos florestais (de todos tipos vegetacionais) considerados para a análise de conectividade da paisagem da bacia do ribeirão Ferro-Carvão, com foco na biodiversidade. A fonte para os fragmentos fora da área da bacia, são: SOS Mata Atlântica 2013/2014. | 80 |
| Figura 5.40. Camada Conservação da biodiversidade gerada por meio da reclassificação dos valores de importância para restauração florestal das áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional Semidecidual. | 81 |
| Figura 5.41. Proposição de Corredor Ecológico a partir dos resultados da análise de conectividade. A maior distância dentro de cada hexágono é de 124 metros. | 82 |
| Figura 5.42. Dados de declividade em graus à esquerda e localização das áreas de solo exposto em ambiente declivoso no mapa de uso do solo após o rompimento das barragens. | 83 |
| Figura 5.43. Camada: áreas degradadas, abandonadas ou de baixa aptidão para a bacia Ferro-Carvão. Dados de solo exposto e declividade reclassificados para compor a camada. | 84 |
| Figura 5.44. Identificação de áreas degradadas, originalmente ocupadas com Floresta Estacional Semidecidual, que mais irão promover benefícios ecológicos se restauradas. | 85 |
| Figura 5.45. Mapa de uso e cobertura do solo para a bacia do ribeirão Ferro-Carvão antes e depois do rompimento das barragens. | 88 |
| Figura 5.46. Áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional semidecídua que foram indicadas para restauração florestal na bacia Ferro-Carvão, classificadas em nível de prioridade de restauração a fim de atingir os benefícios ecológicos da bacia. À esquerda temos o mapa de uso e cobertura do solo da bacia de 2019, à direita o mapa de benefícios ecológicos que se pretende promover com a restauração florestal, classificando a bacia em níveis de importância de restauração. Quanto maior a importância, mais benefícios serão atendidos com a restauração da área. Abaixo o cruzamento do mapa de uso e cobertura do solo com o mapa de benefícios e o recorte no uso do solo de cada classificação de importância. | 93 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.47. Cenário da bacia do ribeirão Ferro-Carvão antes da ruptura da barragem | 98 |
| Figura 5.48. Cenário da bacia do ribeirão Ferro-Carvão com a recuperação no Marco Zero | 99 |
| Figura 5.49. Cenário da bacia do ribeirão Ferro-Carvão com a remoção total do rejeito. | 100 |
| Figura 5.50. Cenário da bacia do ribeirão Ferro-Carvão com a implementação da infraestrutura. | 101 |
| Figura 5.51. Cenário da bacia do ribeirão Ferro-Carvão antes da ruptura da barragem. | 102 |
| Figura 6.1. Características de piscinas e corredeiras observada em cursos de água naturais da região. a) Trecho de corredeira e meandros no córrego Tejuco; b) Caracterização de piscinas e corredeiras em cursos de água naturais e c) Trecho de corredeira e piscina no ribeirão Casa Branca. | 105 |
| Figura 6.2. Ilustração de utilização de biomantas e blocos de rochas na contenção da erosão fluvial em margens, através da proteção em relação a ação direta das águas sobre a mesma | 106 |
| Figura 6.3. Exemplo prático de uma aplicação de manta geotêxtil para proteção das feições convexas das margens fluviais. | 107 |
| Figura 6.4. Ilustração de estrutura natural, tipo J Hooks, que auxilia no disciplinamento do escoamento superficial no eixo do leito propriamente dito e na contenção da erosão de margens..... | 108 |
| Figura 6.5. Exemplo prático de estrutura natural, tipo J Hooks, que auxilia no disciplinamento do escoamento superficial no eixo do leito propriamente dito e na contenção da erosão de margens..... | 108 |
| Figura 6.6. Exemplo ilustrativo da reconformação fluvial e proteção das calhas do curso de água..... | 109 |
| Figura 6.7. Ilustração de estrutura natural, tipo Toe Wood, que auxilia no disciplinamento do escoamento superficial no eixo do leito propriamente dito e na contenção da erosão de margens, além de proporcionar habitat, com proteção e cobertura para as espécies aquáticas. | 109 |
| Figura 6.8. Exemplo de proteção do leito para trechos fluviais com declividades longitudinais de maior magnitude..... | 110 |
| Figura 6.9. Proteção de margens com a técnica de enrocamento vivo. | 111 |
| Figura 6.10. Proteção de margens com a técnica de estacas vivas..... | 111 |
| Figura 6.11. Proteção de margens com a técnica de feixe de galhos. | 112 |
| Figura 6.12. Proteção de margens com a técnica de camada de ramos. | 112 |
| Figura 6.13. Proteção de margens com a técnica de empacotamento de ramos. | 113 |
| Figura 6.14. Proteção de margens com a técnica de solo envelopado. | 113 |
| Figura 6.15. Proteção de margens com a técnica parede Krainer..... | 114 |
| Figura 6.16. Proteção de margens com a técnica de colchão de galhos..... | 114 |
| Figura 6.17. Proteção de margens com a técnica de revestimento com troncos de árvores..... | 115 |
| Figura 6.18. Proteção de margens com o uso de retentores de sedimentos..... | 116 |
| Figura 6.19. Proteção de margens com o uso de biomantas antierosivas..... | 116 |
| Figura 6.20. Proteção de margens com o uso de geotubos. | 117 |
| Figura 6.21. Proteção de margens com o uso de gabiões vivos. | 117 |
| Figura 6.22. Proteção de margens com o uso de geocélulas..... | 118 |
| Figura 6.23. Proteção de margens com a técnica do sistema <i>Green Wall Water</i> ®. ... | 118 |
| Figura 6.24. Proteção de margens com a técnica de plantio de capim Vetiver..... | 119 |
| Figura 6.25. Proteção de margens com a técnica de grade viva..... | 119 |
| Figura 6.26. Arranjo Geral: Disposição do solo na região de revegetação e restauração florestal. | 120 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.27. Esquema de preenchimento de solo na área de revegetação e restauração florestal..... | 121 |
| Figura 6.28. Detalhe da disposição das camadas superficiais em função do tipo de <i>topsoil</i> utilizado. | 121 |
| Figura 6.29. Esquema de recomposição do solo em áreas de terreno natural..... | 123 |
| Figura 6.30. Exemplo ilustrativo de plantio de mudas associado com adubação verde, após a remoção dos rejeitos, e com exemplo de aplicação de biorretentores ao lado de cada muda, em nível no terreno. | 130 |
| Figura 6.31. Ilustração esquemática de nucleação com galharia, que pode ser uma técnica para contribuir com a restauração. | 131 |
| Figura 6.32. Esquema da estrutura do poleiro artificial do tipo “seco”, construído com colmos de bambu. Fonte: Bechara (2006). | 132 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.1. Critérios para a análise multicritério | 19 |
| Tabela 4.2. Atribuição de pesos para os critérios..... | 22 |
| Tabela 5.1. Mix de espécies herbáceas e arbustivas utilizado nos programas de revegetação no Marco Zero. | 42 |
| Tabela 5.2. Lista de espécies arbóreas já introduzidas no Marco Zero. | 43 |
| Tabela 5.3. Síntese metodológica do desenvolvimento e aplicação do índice de integridade ecológica. | 54 |
| Tabela 5.4. Benefícios esperados com a restauração na bacia do ribeirão Ferro-Carvão das áreas originalmente ocupadas por Floresta Estacional Semidecidual, para compor a análise de priorização de áreas para restauração florestal. | 74 |
| Tabela 5.5. Valores de importância de recuperação florestal das áreas originalmente ocupadas por Floresta Estacional Semidecidual, atribuídos ao resultado da análise de conectividade..... | 81 |
| Tabela 5.6. Valores de importância para restauração florestal das áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional Semidecidual, atribuídos de acordo com a declividade para a área da bacia do Ferro-Carvão. | 83 |
| Tabela 5.7. Valores da soma das camadas divididos em quintis para a classificação de importância para promover benefícios ecológicos com a restauração florestal das áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional Semidecidual. Os valores de importância para promover os benefícios são provenientes da soma das camadas. .. | 85 |
| Tabela 5.8. Área (ha e %) e tipo de usos e cobertura do solo da bacia do ribeirão Ferro-Carvão antes e depois do rompimento das barragens. | 86 |
| Tabela 5.9. Matriz de transição antes e depois do rompimento das barragens, unidade de área calculada em hectares. A sigla FES corresponde à Floresta Estacional Semidecidual. | 89 |
| Tabela 5.10. Métricas da paisagem calculadas para a classe Floresta Estacional semidecídua em estado Médio/Avançado na bacia do ribeirão Ferro-Carvão..... | 90 |
| Tabela 5.11. Prioridade de recuperação florestal para atingir os benefícios ecológicos da bacia Ferro-Carvão. | 91 |
| Tabela 6.1. Mix de espécies utilizado nos programas de revegetação inicial em Brumadinho. | 124 |
| Tabela 6.2. Espécies de preenchimento recomendadas para restauração da floresta estacional semidecídua na bacia do ribeirão Ferro-Carvão, em Brumadinho (MG), classificadas em dois tipos de ambientes: aluviais (AL) e matas ciliares ou de encosta (MCE). | 129 |
| Tabela 7.1. Cronograma plurianual de remoção de rejeitos, recuperação sustentável e descomissionamento das áreas..... | 134 |
| Tabela 7.2. Cronograma da realização dos <i>workshops</i> | 136 |

DISCLAIMER

Referência: Processo nº 2090.01.0003518/2019-57.

Este documento foi elaborado em resposta ao **Ofício FEAM/GERAI nº. 59/2020**, encaminhado à Gerente Executiva de Gestão Ambiental da Vale, Gleuza Jesue, em 26 de maio de 2020.

No **Ofício FEAM/GERAI nº. 59/2020** foram apresentadas as manifestações dos órgãos do SISEMA quanto às ações de recuperação realizadas no Marco Zero, por meio do envio dos seguintes memorandos e nota técnica elaborados pelas instituições que compõem o SISEMA:

IGAM

- Memorando IGAM/DPLR nº 49/2020 (12321771)

IEF

- Memorando IEF/GRAPE nº 12/2020 (12367970)
- Nota Técnica nº 3/IEF/DFAU/2020 (14678510)

FEAM

- Memorando FEAM/GERAQ nº 41/2020 (14473526)
- Memorando FEAM/GERES nº 19/2020 (14549566)

Conforme acordado na reunião realizada em 01/07/2020, a Vale se comprometeu a elaborar o presente relatório contemplando a fundamentação técnica e as diretrizes de recuperação sustentável planejadas para o ribeirão Ferro-Carvão em que deverá constar todas as respostas às questões trazidas pelos documentos mencionados e especificamente pela Nota Técnica nº 3/IEF/DFAU/2020 e pelo Memorando IEF/GRAPE nº 12/2020.

1 APRESENTAÇÃO

Considerando que o presente documento apresenta as diretrizes gerais de recuperação sustentável para a bacia do ribeirão Ferro Carvão, pós-rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA, cabe ressaltar a diferença entre restauração e recuperação, definida pela Lei nº 9.985/2000, que regulamenta o artigo 225, §1º, incisos I, II, III e VII, da Constituição Federal, e institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC).

Restauração consiste na restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada o mais próximo possível da sua condição original, já a **recuperação** se baseia na restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original.

Historicamente, a Lei do SNUC, de 2000, foi a primeira a diferenciar e conceituar os termos “restauração” e “recuperação”. Até então os termos eram utilizados como sinônimos, ora um, ora outro.

Dessa forma, todos os esforços e estudos que estão sendo realizados, na área impactada pelo rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA, objetivam a recuperação dos ambientes afetados, buscando estabelecer no mínimo as condições vigentes a situação pré-rompimento e, sempre que possível, a restauração do ambiente natural.

2 INTRODUÇÃO

Este documento apresenta as diretrizes gerais para recuperação sustentável da bacia do ribeirão Ferro – Carvão, abrangendo a fundamentação técnica proveniente dos dados obtidos e lições aprendidas a partir da implementação do projeto piloto de recuperação sustentável na região do Marco Zero e também dos levantamentos hidrogeomorfológicos, hidrodinâmicos e hidrológicos realizados na bacia para estabelecer as premissas e alternativas de recuperação viáveis, bem como os usos futuros pretendidos para região.

Além disso é apresentado um cronograma para o desenvolvimento e implementação da recuperação sustentável proposta em acordo com o plano plurianual de remoção de rejeitos. Ao final, para as alternativas de recuperação sustentável viáveis e a partir da definição de uma metodologia de análise multicritérios se propõe a realização de *workshops* com a participação dos órgãos do SISEMA para a definição da solução a ser adotada, baseada na aplicação da referida análise multicritérios, sobre as alternativas de projetos de implantação da recuperação apresentadas, divididas por compartimento da bacia do ribeirão Ferro – Carvão.

Desta forma, este estudo apresenta os seguintes tópicos principais:

- Fundamentação técnica;
- Análise multicritério como suporte à tomada de decisão para a recuperação sustentável;
- Avaliação das alternativas de recuperação;
- Compatibilização da Recuperação Ambiental com o Plano Plurianual de Remoção de Rejeitos;
- Cronograma dos *workshops*.

Cabe ressaltar que a elaboração do referido documento ainda levou em consideração o atendimento aos questionamentos constantes no Memorando IEF/GRAPE nº 12/2020 (12367970) e Nota Técnica nº 3/IEF/DFAU/2020 (14678510) apresentados por meio do Ofício FEAM/GERAI nº. 59/2020, referente às manifestações dos órgãos do SISEMA quanto às ações de recuperação realizadas no Marco Zero.

Encontram-se anexos a este estudo os seguintes documentos:

- Anexo 1 - Censo Arbóreo - Trecho do Marco Zero Margem Esquerda do ribeirão Ferro-Carvão;
- Anexo 2 - Plano Manejo vs Recuperação vs Descomissionamento Estruturas Contenção.

2.1 Histórico do processo

Em 25/01/2019, ocorreu o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA do Complexo da mina de Córrego do Feijão, espalhando rejeitos do processo de beneficiamento a úmido de minério de ferro pela calha do ribeirão Ferro-Carvão.

Por meio do Auto de Fiscalização nº 64.499/2019 de 26/01/2019 a SEMAD determinou inicialmente a suspensão de todas as operações da Vale S.A. na mina de Córrego do Feijão, ressalvadas as ações emergenciais pertinentes. Dentre as ações requeridas

pelo Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SISEMA imediatamente após o rompimento da barragem pode-se citar a devida remoção e adequada disposição da massa de rejeito vazada, de modo a garantir que fossem cessados os fluxos de sedimentos e, assim, eliminar os possíveis efeitos geoquímicos inadequados às áreas afetadas, bem como demais providências relacionadas à proteção ambiental dadas as consequências do evento, notadamente sobre a fauna silvestre e doméstica, terrestre e aquática, a flora e recursos hídricos.

Em 08 de fevereiro de 2019, com base no art. 126, inciso II do Decreto Estadual nº 47.383 de 02/03/2018 e Artigo 8º da Resolução Conjunta SEMAD/IEF Nº 1.905/2013, foi protocolado na Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM comunicado informando o início das obras emergenciais, dragagem e contenção de rejeitos no rio Paraopeba e no ribeirão Ferro – Carvão. Também foram anexados ao comunicado, os primeiros relatórios desenvolvidos pela equipe técnica, referentes as “Ações a Serem Realizadas no ribeirão Ferro-Carvão – Trecho 1” e as “Ações Planejadas a Serem Realizadas no Rio Paraopeba – Trecho 2”. O mesmo comunicado e relatórios anexos foram protocolados nos demais órgãos, DEAMB, IGAM, SEMAD, SUPPRI, em 11/02/19.

Em 09 de maio de 2019, 90 dias após o protocolo do comunicado do início das obras emergenciais realizado em 08/02/2019, conforme estabelece a Resolução Conjunta SEMAD/IEF 1905/2013, foi formalizado na SUPRAM/CM processo de Licença de Operação Corretiva – LOC (PA COPAM 245/2004/052/2019) para a regularização ambiental das intervenções emergenciais comunicadas aos órgãos, referentes as obras de reparação do dano ambiental causado pelo rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA. Para este processo, em atendimento ao FOBI, foram gerados, Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA-RIMA) e o respectivo, Plano de Controle Ambiental (PCA) elaborados pela empresa Amplo Engenharia e Gestão de Projetos Ltda.

Devido à dinâmica e à governança que norteiam o objetivo das intervenções reparatórias, mesmo após a formalização do processo da Licença de Operação Corretiva – LOC, os avanços/atualizações dos projetos e soluções para as obras emergenciais continuaram sendo consensados e avaliados em fóruns periódicos e multidisciplinares formados pelas instituições do SISEMA, representantes do MPMG e do município de Brumadinho. Assim, as revisões pertinentes seguiram sendo formalizadas através de protocolos na SUPRAM/CM e nos demais órgãos componentes do SISEMA, por meio de versões atualizadas do Plano de Obras Emergenciais do ribeirão Ferro-Carvão e do rio Paraopeba a partir de 17/04/2019 até o presente momento, conforme se fazem necessárias.

Adicionalmente, aos fóruns periódicos e multidisciplinares formados pelas instituições do SISEMA, a Vale ainda participa de reuniões periódicas semanais/mensais com a AECOM, auditoria técnica e ambiental independente contratada pelo Ministério Público de Minas Gerais, para avaliação e acompanhamento das atividades de reparação em curso no Complexo Paraopeba, em decorrência da ruptura das barragens B-I, B-IV e B-IVA da mina de Córrego do Feijão.

Dentre as várias reuniões ocorridas, fóruns multidisciplinares periódicos e fiscalizações em campo dos órgãos ambientais para acompanhamento das atividades realizadas na região do Marco Zero, posteriores protocolos e demais compromissos assumidos em atendimento as solicitações feitas cabe destacar:

- Em 27 de maio de 2019 foi protocolada a proposta de restauração da calha do ribeirão Ferro-Carvão, em atenção aos assuntos tratados na reunião do Comitê Pró-Brumadinho da Vice Governadoria de MG de 14 de maio de 2019. Esta mesma proposta foi apresentada em anexo ao Plano de Obras Emergenciais do ribeirão Ferro-Carvão protocolado em 31 de maio de 2019, onde foi apresentada a proposta

de utilização do sistema *Vertical Green Wall Water*® para reconformação da calha do ribeirão Ferro-Carvão no trecho entre a estrada Alberto Flores e sua confluência com o rio Paraopeba;

- Em 19 de junho de 2019 foram protocolados o relatório “Plano de Recuperação de Áreas Degradadas Atualização” e o estudo elaborado pela UFV sobre a avaliação da necessidade de remoção do rejeito no Marco Zero, em atendimento ao solicitado em reunião de alinhamento ocorrida em 18/06/2019;
- Em 09 de agosto de 2019 foi protocolado relatório com as atualizações referentes as obras emergenciais, onde constavam as atividades que integram o conjunto de ações no trecho denominado Marco Zero em atendimento a solicitação feita em reunião de acompanhamento ocorrida em 31/07/2019;
- Em 19 de agosto de 2019 foi realizada vistoria dos órgãos fiscalizadores (AF 82638) para acompanhamento em campo da implantação das obras e do cumprimento das ações planejadas, apresentadas e discutidas nas reuniões periódicas. Na oportunidade, foi vistoriada a região do Marco Zero;
- Em 13 de setembro de 2019 em atendimento a solicitação feita em reunião de acompanhamento ocorrida em 03/09/2019 foi apresentado relatório consolidado atualizado de ações relativas ao Marco Zero, com detalhamento das informações de acessos, sistema *Vertical Green Wall Water*®, dragagem, monitoramentos, cortina estaca prancha 2 e todas as demais ações já informadas e protocoladas anteriormente;
- Em 25 de setembro de 2019 foi realizada vistoria dos órgãos fiscalizadores (AF 82640) para acompanhamento em campo da implantação das obras e do cumprimento das ações planejadas, apresentadas e discutidas nas reuniões periódicas. Na oportunidade, foi vistoriada a região do Marco Zero;
- Em 09 de outubro de 2019 foi realizada vistoria dos órgãos fiscalizadores (AF 82641) para acompanhamento em campo da implantação das obras e do cumprimento das ações planejadas, apresentadas e discutidas nas reuniões periódicas. Na oportunidade, foi vistoriada a região do Marco Zero;
- Em 23 de outubro de 2019 foi realizada vistoria dos órgãos fiscalizadores (AF 82643) para acompanhamento em campo da implantação das obras e do cumprimento das ações planejadas, apresentadas e discutidas nas reuniões periódicas. Na oportunidade, foi vistoriada a região do Marco Zero;
- Em 29 de outubro de 2019 foi realizada reunião de acompanhamento com as instituições do SISEMA em que foi apresentada a proposta de solução a ser adotada pela Vale no Marco Zero para o trecho acima dos dutos da Transpetro (*Concrete Channel*), sendo que a solução proposta, para a área em questão, ainda estava em discussão e pendente de aprovação pela Transpetro;
- Em 17 de janeiro de 2020, em atendimento ao solicitado via e-mail do IEF datado de 13/01/20, foram enviadas as especificações técnicas relativas ao mix de sementes e critérios para definição das áreas onde o mix seria utilizado, bem como mapa das áreas em processo de revegetação;
- Em 21 de janeiro de 2020 foi realizada visita técnica nas obras da reparação, inclusive no Marco Zero, por representantes do Poder Judiciário, do MPMG e do SISEMA, que na oportunidade presenciaram, em campo, os trabalhos executados pela Vale em Brumadinho;
- Em 07 de fevereiro de 2020 foi protocolada complementação do relatório das ações emergenciais do Marco Zero em atendimento aos compromissos assumidos nas reuniões realizadas em 14/01/2020 e 30/01/2020;

- Em 20 de fevereiro de 2020 foi protocolada complementação do relatório do mix de sementes solicitada no Memorando IEF/GFOR nº 5/2020 acerca das especificações técnicas e do mapeamento de áreas em processo de revegetação;
- Em 26 de março de 2020 foi encaminhado relatório contendo os esclarecimentos e avaliações diante das complementações apontadas no Ofício FEAM/GERAI nº 25/2020 – Memorando IEF/GFOR nº 11/2020 referentes ao mix de sementes;
- Em 07 de abril de 2020 em atenção ao solicitado na reunião realizada no dia 01/04/2020, entre Vale e IEF, foi encaminhado relatório contendo as ações gerais de Recuperação de Áreas Degradadas – RAD.

Assim, diante do histórico dos acompanhamentos e entendimentos em curso foi com surpresa que a Vale recebeu em 26 de maio de 2020 as manifestações dos órgãos referentes às ações de recuperação implementadas na região do Marco Zero. A abordagem realizada ao longo da Nota Técnica nº 3/IEF/DFAU/2020 e do Memorando IEF/GRAPE nº 12/2020, apresentam entendimento divergente ao apresentado pela FEAM por meio do Memorando FEAM/GERES nº 19/2020 e Memorando FEAM/GERAQ nº 41/2020 e não refletem os posicionamentos nas reuniões e documentos supracitados.

Diante desse contexto, a fim de preservar a segurança jurídica dos entendimentos havidos entre as partes e evitar a configuração de comportamento contraditório por parte da Administração Pública, foi solicitado por meio da Carta Ger. Executiva de Reparação nº C.EXT. 0640/2020, protocolada em 09 de junho de 2020, suspensão dos prazos constantes tanto na Nota Técnica nº 3/IEF/DFAU/2020 quanto no Memorando IEF/GRAPE. nº 12/2020, até que se fosse realizada uma reunião técnica para os devidos esclarecimentos.

Em 01 de julho de 2020 realizou-se a reunião técnica entre a Vale, as instituições do SISEMA e a AECOM onde foi possível esclarecer as ações de recuperação implementadas na região do Marco Zero, bem como iniciar uma discussão ampla sobre as propostas de recuperação a serem adotadas na bacia do ribeirão Ferro-Carvão, a partir das seguintes apresentações:

1. Conceito e metodologia de análise multicritério para recuperação sustentável da bacia do ribeirão Ferro-Carvão;
2. Atividades realizadas na área do Marco Zero com ênfase nos critérios que foram adotados para implantação de um projeto piloto, a saber: (i) necessidade de proteção dos dutos da Transpetro na área, de modo a minimizar o risco de um acidente ambiental; (ii) necessidade de cessar a continuidade do dano ambiental (transporte de rejeitos depositados na área de mancha para o rio Paraopeba);
3. Compartimentação da bacia por trechos hidrogeomorfológicos, soluções alternativas de recuperação, uso pretérito e propostas de uso futuro.

Conforme acordado nesta reunião, a Vale se comprometeu a elaborar o presente relatório.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O presente relatório tem como objetivo geral apresentar os fundamentos técnicos adotados pela VALE S.A para a implementação do Projeto de Recuperação Sustentável do ribeirão Ferro-Carvão, desenvolvido a partir da implementação do projeto piloto de recuperação no Marco Zero e dos estudos hidrogeomorfológicos, hidrodinâmicos e hidrológicos da bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

3.2 Objetivos Específicos

- Apresentar a conceituação da metodologia a ser aplicada no processo de seleção das alternativas;
- Discutir os cenários previstos;
- Desenvolver as soluções técnicas e ambientais para as intervenções propostas;
- Propor um sistema de monitoramento ambiental a ser utilizado;
- Responder os questionamentos apresentados na Nota Técnica nº 3/IEF/DFAU/2020 e no Memorando IEF/GRAPE nº 12/2020;
- Apresentar o cronograma previsto para as diversas etapas.

4 PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO PARA A RECUPERAÇÃO SUSTENTÁVEL

O processo de tomada de decisão, diante de problemas complexos, requer o embasamento da decisão em critérios multidisciplinares que permitam a segurança da melhor escolha entre as alternativas possíveis.

Dessa forma o processo de tomada de decisão precisa passar por 05 (cinco) etapas principais:

1. Identificação do problema;
2. Coleta de dados;
3. Identificação das alternativas;
4. Escolha da melhor alternativa e
5. Decisão e monitoramento.

Contextualizando o processo de tomada de decisão para a recuperação da bacia do ribeirão Ferro Carvão, tem se bem definida a etapa 1, ou seja, o problema já está identificado e consiste na reparação do dano ambiental causado pelo rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA apresentando como premissas básicas a remoção da totalidade dos rejeitos espalhados pela bacia e a previsão de descomissionamento das estruturas implantadas pós rompimento das barragens com a finalidade de contenção dos rejeitos.

Para a etapa 2, foram realizados estudos hidrogeomorfológicos e levantamento de outras informações (topografia pré e pós rompimento, sondagens, estudos geotécnicos e geofísicos, estudos hidrológicos, uso do solo pré-rompimento) que são de extrema importância para a tomada de decisão em relação às soluções de recuperação a serem implementadas.

A hidrogeomorfologia tem por objetivo fornecer as bases geomorfológicas e hidrodinâmicas necessárias à elaboração de um plano de recuperação ambiental da área afetada, bem como a compartimentação da bacia em trechos homogêneos, tendo como referência a paisagem existente antes do rompimento das barragens de rejeitos da mina Córrego do Feijão.

A etapa 3 consiste na busca de alternativas, que tenham por premissa a garantia de conectividade biológica ao longo da calha fluvial do ribeirão e o favorecimento da conexão entre habitats ao longo da bacia considerando o eixo ao longo da escarpa da Serra do Curral e o eixo desta em relação à calha do rio Paraopeba, ou seja, a conectividade fluvial e terrestre no seu sentido paralelo às curvas de nível e perpendicular a estas.

Aliada as premissas básicas citadas, a busca por alternativas de práticas de restauração com foco na naturalização dos canais de modo que a dinâmica hidrogeomorfológica possa ser, o mais breve possível, restabelecida e alinhada com a funcionalidade pré-rompimento, de modo a garantir ou favorecer o desenvolvimento de habitats diversos identificados na bacia, passa a ser também uma premissa fundamental do projeto.

Na etapa 4 será escolhida a melhor opção dentre as alternativas apresentadas na etapa 3, com base no estabelecimento de critérios técnicos, ambientais e sociais para cada uma das alternativas, que serão analisadas a partir da aplicação de uma metodologia de análise multicritério, que será detalhada no item 4.1. Cabe lembrar que a seleção e escolha das alternativas apresentadas será realizada para cada um dos compartimentos da bacia identificados ao longo dos estudos hidrogeomorfológicos realizados.

E por fim na etapa 5, a melhor alternativa escolhida será implementada e, para garantir sua eficiência, é preciso monitorá-la, a partir de metas e indicadores de eficiência que

serão definidos de forma a verificar o quão efetivas foram as ações implantadas ao longo do tempo.

As soluções de recuperação sustentável, propostas e implantadas, através do processo descrito anteriormente, para a bacia do ribeirão Ferro-Carvão, precisam estar embasadas em três dimensões: ambiental, técnica e social (Figura 4.1).



Figura 4.1. Elementos para a recuperação sustentável (adaptado de Bardos, Lazar e Willenbrock, 2009).

Como suporte à tomada de decisão, tem-se a metodologia de Análise Multicritério (MCA), que apresenta conceitos e bases para estruturar e modelar problemas complexos, envolvendo os *stakeholders* nas decisões, interesses ambíguos, por meio da técnica de identificação/construção de critérios e avaliação de ações com potencialidade para solucionar o problema segundo critérios específicos propostos para cada uma das três dimensões, apresentadas na Figura 4.1. A adoção desta metodologia busca garantir que a seleção realizada seja o resultado de um processo participativo e multidisciplinar, tornando a decisão equilibrada e balanceada.

4.1 Conceito da Análise Multicritério

A metodologia de análise multicritério apresenta uma vantagem em relação a outras metodologias de tomada de decisão, uma vez que não há, em geral, decisões que sejam simultaneamente ótimas sob todos os pontos de análise. Dessa forma a metodologia permite que seja realizada a seleção da melhor opção possível, frente a vários critérios (Vincke, 1992).

A MCA consiste na análise de alternativas para a resolução de problemas que utilizam vários critérios relacionados ao objeto de estudo, permitindo identificar alternativas

prioritárias para o problema considerado (Francisco et al., 2007). No Brasil diversos estudos ambientais utilizaram a análise multicritério, com enfoque na priorização de áreas destinadas a restauração florestal e definidas por diversos tipos de metodologia (Ferraz e Vettorazzi, 2003; Valente, 2005; Vettorazzi, 2006; Francisco et al., 2008). A aplicação da análise multicritério facilitou a tomada de decisões, indicando as áreas prioritárias à restauração florestal para cada objetivo considerado durante os estudos.

As metodologias de análise multicritério configuram-se como uma importante ferramenta de suporte ao agente decisor, ou seja, um indivíduo, um grupo de pessoas ou um comitê de técnicos ou dirigentes, a tomar decisões acerca de um problema complexo, avaliando e escolhendo alternativas para solucioná-lo segundo diferentes critérios e pontos de vista.

A MCA tem como propósito, portanto, auxiliar pessoas e/ou organizações em situações nas quais é necessário identificar prioridades, considerando, ao mesmo tempo, diversos aspectos. É uma técnica quali-quantitativa, que separa as abordagens puramente exploratórias e pouco estruturadas de tomada de decisão dos modelos quantitativos rigidamente estruturados.

Nos modelos quantitativos busca-se sempre a solução ótima para um objetivo específico, já na análise multicritérios busca-se uma solução de compromisso, negociada frente aos vários objetivos que se deve atender, ou seja, a busca não é pela solução estritamente ótima, mas a solução de consenso.

Portanto, diante dos questionamentos realizados em relação à recuperação implementada no Marco Zero, acredita-se que esta metodologia permitirá que a decisão seja pautada com base nos critérios considerados relevantes para o problema em questão pelos agentes decisores, em que a importância dos critérios será definida em conjunto entre a Vale e outros *stakeholders*.

4.1.1 Definição dos Critérios

Os critérios são definidos visando a análise multidisciplinar que a metodologia se propõe, portanto são definidos critérios técnicos, ambientais e sociais.

Na Tabela 4.1 são apresentados os critérios, nas três dimensões, já estabelecidos para a análise multicritério a ser aplicada para a busca por solução de recuperação para a bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

Os critérios apresentados na Tabela 4.1 foram estabelecidos visando a aplicação da MCA para a tomada de decisão em relação à remoção do rejeito sob dossel, o conceito da recuperação geomorfológica, a preparação da área para a implantação da solução de recuperação, a reconformação da calha fluvial e da planície adjacente. Portanto, observa-se na Tabela 4.1 que avaliou se quais critérios influenciam diretamente cada uma das tomadas de decisão, sendo estes marcados como **SIM**, e quando não exercem influência estão marcados como **NÃO**.

Tabela 4.1. Critérios para a análise multicritério

| | | | Critérios | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---------------|---|---------------------------|----------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------|-------|-------------|-----------------|--------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------|------------|-----|-----|-----|-----|
| | | | Técnicos | | | | | | Ambientais | | | | | | | | | | Sociais | | | | | | |
| | | | | | | | | | Implantação | | | | | Recuperação | | | | | | | | | | | |
| | | | Materiais | Tempo de Implantação | Complexidade | Ciclo de Vida Recuperação | Conhecimento da solução | Flexibilidade da solução | S&S | Qualidade do Ar | Qualidade da Água | Ruído e Vibração | Flora | Fauna | Zona Hiporréica | Criação de Habitat | Conectividade Florestal | Conectividade Biota Aquática | Conectividade Biota Terrestre | Buscas CBMMG | Uso futuro | | | | |
| | | | Remoção do Rejeito | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Sob dossel | | | | | | não | não | não | não | não | não | não | não | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | não |
| 1º | 1-2 opções | Conceito da recuperação geomorfológica | não | sim | sim | não | não | não | sim | não | não | não | não | não | sim | sim | sim | sim | sim | não | sim | | | | |
| 2º | 1-2 opções | Preparação | sim | sim | sim | não | sim | não | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | não | não | não | não | não | não | | | | |
| | 1-2 opções | Calha Fluvial | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Fundo | sim | sim | sim | não | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | não | sim | não | não | sim | | | | |
| | | Margem | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | não | sim | | | |
| | 1-2 opções | Planície | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reconformação | sim | sim | sim | sim | sim | não | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | sim | não | sim | | | | |
| | Revegetação | não | sim | não | não | não | não | não | não | não | não | não | não | não | sim | sim | sim | sim | sim | não | sim | | | | |

A remoção do rejeito em áreas abertas, é considerada premissa e será realizada de forma integral. Já para o rejeito em áreas de sub-bosque poderá ser aplicada a metodologia de análise multicritério, de forma a avaliar se a remoção do rejeito em determinadas áreas poderá causar novos impactos, ou seja, será analisado se há ou não a necessidade de intervenção para a remoção, considerando a espessura do rejeito e a integridade da vegetação remanescente. Em casos em que as áreas com rejeito apresentem boas condições de regeneração natural, este poderá ser mantido, desde que a decisão seja compartilhada com as avaliações do Corpo de Bombeiros (CBMMG) quanto a estratégia de buscas. A tomada de decisão nos casos citados deverá ser um critério adotado em consenso entre a empresa, o CBMMG e os órgãos ambientais.

Portanto, para a análise multicritério a ser aplicada quanto a remoção do rejeito serão considerados principalmente os critérios ambientais relacionados a implantação, sendo eles: qualidade do ar, qualidade da água, ruído e vibração, flora e fauna, e os critérios ambientais relacionados a recuperação: conectividade florestal e conectividade da biota terrestre, além do critério social, no que tange às buscas pelo CBMMG, que pode ser critério decisivo quanto a opção por remoção do rejeito em determinada área. Vale ressaltar que pode ocorrer, em alguma situação, em área em que a remoção esteja limitada previamente, a ocorrência ou vestígios de seguimentos de corpos, que levem a necessidade de abertura de novas áreas com supressão que facilitem o trabalho de buscas e, neste caso, represente um impacto adicional sobre os remanescentes de vegetação natural.

Outro aspecto importante e fundamental está relacionado aos estudos hidrogeomorfológicos realizados. A geomorfologia fluvial está relacionada aos processos e as formas relacionadas ao escoamento dos rios, considerando que os rios são os agentes mais importantes no transporte de sedimentos, entre uma zona mais elevada e uma mais baixa. O escoamento fluvial integra o ciclo hidrológico e a sua alimentação se dá através das águas superficiais e subterrâneas. Dessa forma o conceito da recuperação geomorfológica, a ser implantada, torna se decisivo no processo de reparação e precisa ser avaliado em relação aos critérios técnicos e ambientais, de modo a permitir que a opção escolhida promova a efetiva reparação da área impactada. Em resumo a geomorfologia fluvial define os diversos compartimentos a serem trabalhados e, por apresentarem características próprias, também requerem soluções e alternativas específicas.

A preparação da área para a implantação da solução deverá ser avaliada em relação a diversos critérios técnicos e ambientais, identificados com **SIM** na Tabela 4.1. Em relação aos critérios ambientais de implantação, a preparação deverá gerar o menor impacto possível e em relação aos critérios técnicos deverá considerar o menor tempo possível, utilizando técnicas já consolidadas, materiais que estejam facilmente disponíveis e buscando sempre proteger a saúde e segurança dos envolvidos.

Já para a análise quanto a solução de calha fluvial a ser implementada, serão avaliados critérios para opções de fundo e de margem, considerando, nestes casos, praticamente todos os critérios técnicos, ambientais e sociais propostos. O mesmo ocorre em relação a análise de reconformação da planície enquanto para a revegetação aplicam se apenas os critérios ambientais de recuperação.

Os seguintes critérios ambientais, técnicos e sociais que serão avaliados em cada um dos compartimentos, apresentados na Tabela 4.1, estão listados a seguir:

a) Ambientais

Os critérios ambientais são subdivididos em duas categorias, devendo ser observados em relação a implantação e em relação ao potencial de reparação ambiental de cada alternativa.

São critérios técnicos ambientais relacionados a implantação:

- Qualidade do ar
- Qualidade da água
- Ruído e Vibração
- Flora
- Fauna

São critérios técnicos relacionados ao potencial de recuperação ambiental:

- Zona hiporréica
- Criação de habitat
- Conectividade florestal
- Conectividade da biota aquática
- Conectividade da biota terrestre

b) Técnicos

Os critérios técnicos têm por objetivo analisar as características existentes na região pré-rompimento e a viabilidade das soluções do ponto de vista da engenharia, visando a recuperação total da área impactada.

Os seguintes critérios técnicos são considerados para a tomada de decisão em relação as soluções de reparação:

- Materiais
- Tempo de implantação
- Complexidade na Construção
- Ciclo de vida da recuperação
- Conhecimento da solução
- Solução inovadora
- Flexibilidade da Solução
- Saúde e Segurança

c) Sociais

Já os critérios sociais estão diretamente relacionados a interação das soluções avaliadas com a comunidade. Em relação a remoção do rejeito sob dossel a avaliação é realizada, prioritariamente, considerando a necessidade de buscas pelo CBMMG e nas demais tomadas de decisão considera se o uso futuro das áreas para definição da pertinência do critério, bem como sua valoração na decisão. Portanto, são considerados critérios sociais:

- Buscas do CBMMG
- Uso futuro
 - Uso futuro do solo
 - Implantação de atividades socioeconômicas, lazer e recreação
 - Integração paisagística

- Relações curso d'água e população

4.2 Metodologia

A diferença entre os métodos multicritérios de tomada de decisão e outros métodos se dá pelo fato de considerarem diversos aspectos e avaliarem as ações por meio de um conjunto de critérios, derivando de cada conjunto uma função matemática que serve para medir o desempenho de cada ação (Ensslin, 2001).

Diversos métodos matemáticos são utilizados em análises multicritérios. Para a análise das soluções de recuperação da bacia do ribeirão Ferro-Carvão será adotado o método da Análise Hierárquica de Pesos (AHP), que seleciona, ordena e pode ser utilizada para avaliação subjetiva de várias alternativas em termos de um ou mais objetivos. Inicialmente, os objetivos são comparados entre si por uma equipe multidisciplinar. Depois, esses resultados são agregados a fim de se obter uma única ordenação das alternativas.

Para Saaty a teoria reflete o que parece ser um método natural de funcionamento da mente humana que ao deparar-se com muitos elementos controláveis ou não, que abrangem uma situação complexa, o método mais fácil é agregá-los em grupos, de acordo com suas propriedades em comum para poder mensurá-los (Carmo, 2017).

A adoção dos pesos é uma etapa que pode ser realizada com base na Análise Hierárquica de Pesos (AHP), proposta por Saaty em 1978. A AHP auxilia o especialista na tomada de decisão e tem o objetivo de determinar a contribuição de cada critério visando a escolha da melhor opção (MOURA, 2007). O método da AHP é aplicado por meio da comparação de dois a dois dentro de cada um dos critérios apresentados, conforme pesos estabelecidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Atribuição de pesos para os critérios.

| Peso | Análise Hierárquica de Pesos (AHP) |
|------------|---|
| 1 | Importância igual: Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo. |
| 3 | Importância moderada: Um critério é ligeiramente mais importante que o outro. |
| 5 | Importância essencial: Um critério é claramente mais importante que o outro. |
| 7 | Importância demonstrada: Um critério é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática. |
| 9 | Importância extrema: A evidência que diferencia os critérios é da maior ordem possível. |
| 2, 4, 6, 8 | Valores intermediários entre julgamentos. |

O sistema decisório que será adotado para a análise multicritério de tomada de decisão, na reparação da bacia do ribeirão Ferro-Carvão, está exemplificado no diagrama da Figura 4.2.

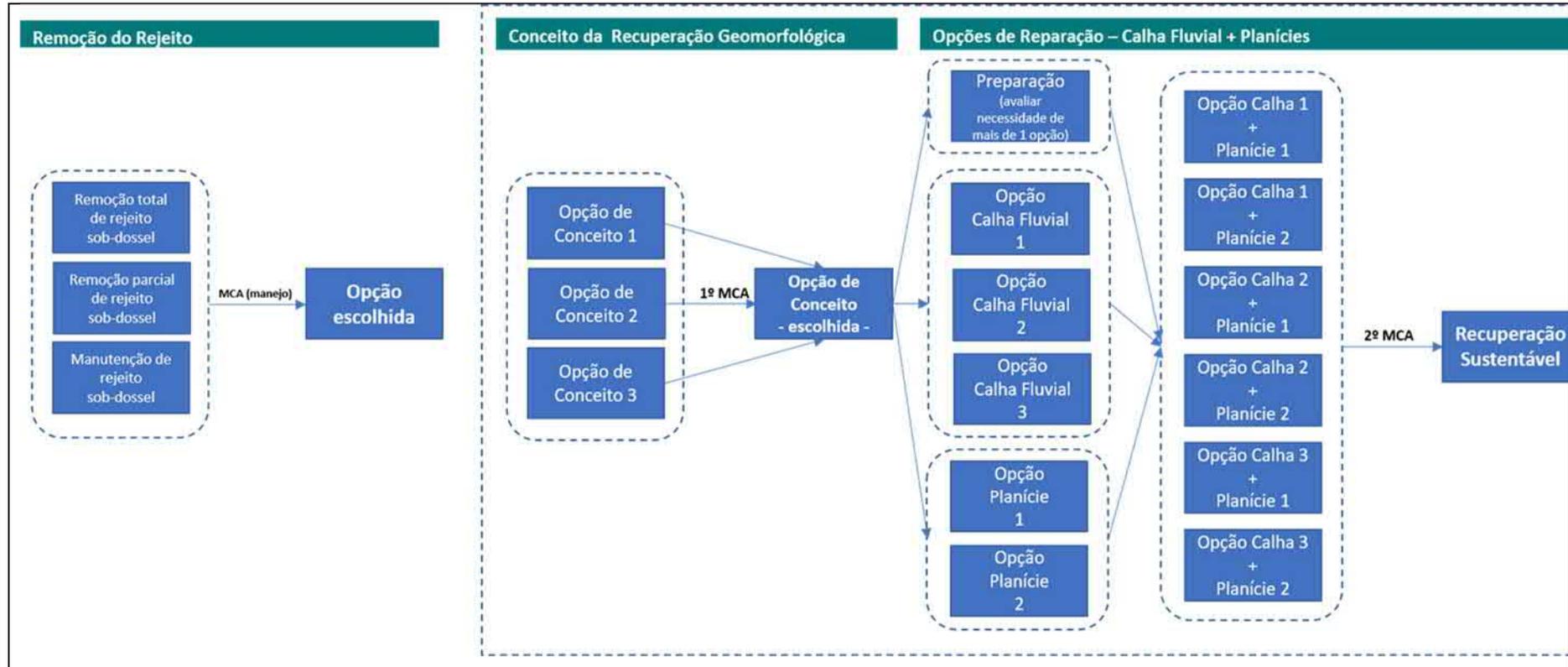


Figura 4.2. Fluxograma do sistema decisório para a recuperação da bacia do Ferro-Carvão aplicando a Análise Multicritério.

Conforme exemplificado no fluxograma da Figura 4.2, a análise multicritério para a remoção do rejeito sob dossel poderá ser aplicada a qualquer momento, não sendo dependente de nenhuma etapa preliminar e nem predecessora de outras etapas. Dessa forma, no caso da necessidade de aplicação da metodologia para a tomada de decisão em relação a remoção total, parcial ou manutenção do rejeito sob dossel a avaliação será realizada de forma independente, considerando os critérios pertinentes, atribuindo se os pesos a estes critérios e solucionando se a expressão matemática.

De acordo com o fluxograma do sistema decisório para a recuperação sustentável, apresentado na Figura 4.2, a primeira análise multicritério (1º MCA) será aplicada para a definição do conceito da recuperação geomorfológica, ou seja, serão apresentadas opções considerando os critérios técnicos, ambientais e sociais relacionados a recuperação geomorfológica e serão atribuídos os pesos, aplicando se a resolução matemática para a definição da melhor opção.

Após a definição do conceito de recuperação geomorfológica, poderá ser ou não realizada mais uma análise multicritério para a preparação da área para a implantação da solução de recuperação, caso haja mais de uma opção. Caso seja realizada a análise, o procedimento será o mesmo, que consiste na verificação das opções de preparação, determinação dos critérios pertinentes, valoração dos mesmos e resolução matemática para a tomada de decisão sobre o método de preparação a ser implementado.

E uma segunda análise multicritério (2º MCA) será aplicada para as opções de recuperação da calha fluvial e das planícies, considerando se as soluções, no caso da calha fluvial, para fundo e margem, e no caso da planície, as opções para reconformação e revegetação, conforme exemplificado no diagrama da Figura 4.2. A metodologia de valoração dos pesos dos critérios, também será a mesma descrita previamente.

4.2.1 Processo interdisciplinar de valoração de pesos para os critérios

A valoração dos critérios que serão utilizados para a tomada de decisão irá ocorrer em *workshops*, a serem realizados com a participação do maior número de especialistas e *stakeholders* possível, com o objetivo de alcançar a qualidade técnica necessária para buscar as melhores soluções para um tema multidisciplinar.

Serão envolvidos especialistas de diversas áreas da Vale e contratadas, representantes dos órgãos reguladores, representantes das associações de atingidos, entre outras partes interessadas, de modo a garantir uma visão interdisciplinar e representatividade social para as tomadas de decisão.

A área atingida está dividida em compartimentos geomorfológicos e para cada compartimento serão feitas análises multicritério para a tomada de decisão quanto a solução de reparação a ser implantada.

Uma primeira análise multicritério, em *workshop*, será realizada para cada compartimento e refere-se a análise para a tomada de decisão quanto ao conceito da recuperação geomorfológica. Serão apresentadas as opções de recuperação geomorfológicas para cada compartimento e com base nos critérios técnicos, ambientais e sociais, que terão seus pesos também definidos em *workshop*, será escolhida a melhor opção.

Uma vez definido o conceito da recuperação geomorfológica, serão realizadas outras análises multicritério, também em *workshop* com participação interdisciplinar, para a definição da preparação para a solução a ser implantada, considerando a existência de mais de uma opção. Para as opções de calha fluvial (incluindo opções de fundo e

margem) e de planície (para reconformação e para revegetação), que irão recuperar a área atingida, sempre deverão ser consideradas as opções disponíveis em relação as dimensões: técnico, ambiental e social.

5 FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA

(Respondendo aos itens do Memorando IEF/GRAPE nº 12/2020 (12367970) e da Nota Técnica nº 3/IEF/DFAU/2020 (14678510)).

Neste item serão apresentadas as diretrizes que darão fundamentação técnica à recuperação sustentável. Estas diretrizes têm o objetivo de esclarecer e identificar os aspectos relevantes necessários para a indicação da solução de recuperação mais adequada para cada trecho do ribeirão Ferro-Carvão, visando o atendimento de aspectos técnicos, ambientais e sociais. Por se tratar de um sistema complexo que foi construído ao longo de vários anos e que precisa de tempo para se reestabelecer novamente, serão desenvolvidas atividades que promovam condições suficientes para que a região atinja seu reequilíbrio em um menor tempo possível.

5.1 Premissas Gerais

As principais premissas gerais que foram acordadas após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA e que nortearam todos os trabalhos e estudos que estão sendo elaborados pela Vale para a recuperação sustentável da bacia do Ferro-Carvão e rio Paraopeba estão apresentadas a seguir.

5.1.1 Remoção total dos rejeitos

A premissa será a remoção integral do rejeito na área da mancha sendo que para o rejeito em áreas de sub-bosque poderá ser aplicada a metodologia de análise multicritério, de forma a avaliar se o rejeito em determinadas áreas poderá causar novos impactos, ou seja, será analisado se há ou não a necessidade de intervenção para a remoção, considerando a espessura do rejeito e a integridade da vegetação remanescente. Em casos em que as áreas com rejeito apresentem boas condições de regeneração natural, este poderá ser mantido, desde que a decisão seja em consenso entre o CBMMG, os órgãos ambientais e a Vale.

O trabalho de delimitação da área de sub-bosque atingida pelos rejeitos, bem como a aferição da espessura dessas camadas encontra-se em desenvolvimento. Tais informações darão subsídio para a tomada decisão sobre sua remoção ou manutenção in situ, tendo em vista o grau de alteração de algumas destas áreas seja pelas intervenções promovidas pelas obras emergenciais e prospecção pelo CBMMG ou mesmo pelo estágio avançado da regeneração natural já observado algumas delas.

Neste relatório, essa diretriz foi considerada como a solução que buscaria o restabelecimento aproximado das condições ambientais pretéritas da bacia do ribeirão Ferro-Carvão e parte de seus afluentes, em especial, a restituição da vegetação associada ao bioma em que está inserido. Nesse caso, antecipa-se que a operação da remoção total da massa de rejeito poderá demandar alguns anos e terá a destinação final na Cava de Feijão.

A revisão dessa premissa se faz necessária junto as partes, visto que vai ao encontro com a diretriz firmada pelo Ministério Público Estadual e a Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, que solicitam a retirada total da massa de rejeito espalhada nas áreas afetadas pelo rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA.

Destaca se ainda a importância da natureza geoquímica dos rejeitos e sua influência sobre o ambiente no qual ele pode estar presente mesmo após os trabalhos de

remoção. Deve se considerar que os rejeitos possuem baixa reatividade, uma vez que encontram-se em fases minerais pouco solúveis na natureza.

5.1.2 Descomissionamento das estruturas de contenção

Para a contenção do avanço dos rejeitos para o rio Paraopeba, foram construídas algumas barreiras de contenção, sendo elas a Cortina de Estacas Prancha 1, a Barreira Hidráulica 1 (BH-01), o Dique 2, a Barreira Hidráulica 0 (BH-00) e as Barreiras de Estabilização de Calha (BEC's). Todas essas estruturas foram concebidas de forma a serem descomissionáveis e tem cronograma de descomissionamento conforme indicado no plano plurianual, apresentado no item 7.1.

5.1.3 Recuperação da área total impactada

Considera-se como premissa também a recuperação da área total impactada visando garantir a conectividade biológica ao longo da calha fluvial do ribeirão e o favorecimento da conexão entre habitats ao longo da bacia, considerando o eixo ao longo da escarpa da serra do Curral e o eixo desta em relação à calha do rio Paraopeba, ou seja, a conectividade fluvial e terrestre no seu sentido paralelo às curvas de nível e perpendicular a estas.

Também como premissa fundamental está a busca persistente da adoção de práticas de restauração com foco na naturalização das calhas fluviais, de modo que a dinâmica hidrogeomorfológica possa ser o mais breve possível restabelecida e alinhada com a funcionalidade pré-rompimento, de modo a garantir ou favorecer o desenvolvimento de habitats diversos identificados na bacia.

Por fim, as definições de uso futuro da área, atualmente representadas pelo sistema de vias e acessos previstos para deslocamento público, estruturas como parque ou área recreativa para atendimento da Comunidade de Feijão, o Memorial em homenagem às vítimas do rompimento das barragens, entre outras estruturas pontuais, serão incorporadas ao conceito de recuperação ora apresentado, ressaltando que demandas sociais oportunas, alinhadas com a manutenção dos pressupostos ou premissas citadas, serão avaliadas e poderão ser acolhidas no arranjo de recuperação da área.

5.2 Marco Zero

No ano de 2019, após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA, várias iniciativas foram adotadas pela Vale com o objetivo de reduzir, e se possível cessar, a continuidade do dano ambiental causado pelo transporte contínuo de rejeitos depositados ao longo da calha e margens do ribeirão Ferro-Carvão para o rio Paraopeba.

Dentre elas, os estudos da consultoria Potamos Engenharia e Hidrologia, indicaram a necessidade de implantação de algumas barreiras de contenção ao longo do ribeirão Ferro-Carvão, que através do processo de sedimentação, conteriam grande parte desse rejeito em seus reservatórios.

Devido a questões de morfologia do terreno, que favoreciam a formação de um reservatório maior, e a necessidade de uma contenção mais eficiente a montante da região da estrada Alberto Flores, para que fosse possível a construção de uma ponte e consequente recuperação dessa estrada, foi implantada a Cortina de Estacas Prancha 1, que seria a última dessas barreiras de contenção, conforme apresentado na Figura 5.1.



Figura 5.1. Cortina de Estacas Prancha 1 na região da estrada Alberto Flores.

Para otimizar e possibilitar a retirada e destinação adequada do rejeito carreado e acumulado no reservatório da Cortina de Estacas Prancha 1, foi implantada a Estação de Tratamento de Água Fluvial - ETAF 1, conforme apresentado na Figura 5.2. Essa ETAF, trataria a água desse reservatório, contendo grande volume dos sólidos carreados, e devolvendo a mesma, conforme CONAMA 430 e com turbidez inferior a 100 NTU, para o rio Paraopeba, através do córrego Casa Branca.



Figura 5.2. Estação de Tratamento de Água Fluvial - ETAF 1.

Mesmo com essas iniciativas ainda existia uma área com aproximadamente 6ha e um volume estimado em 135 mil m³ de rejeitos depositados entre a Cortina de Estacas Prancha 1 e o rio Paraopeba, que no período chuvoso de 2019-2020, teriam a possibilidade de serem carreados para o rio. Além disso, existia a necessidade urgente de se dar uma tratativa para a região da faixa de servidão da Transpetro, por onde passam todas as tubulações de óleo e gás que alimentam a Refinaria Gabriel Passos, que fica nessa região e foi atingida com a passagem do rejeito. Essa faixa de servidão possui 2 dutos de óleo, 1 de gás e 1 fibra óptica.

Após a verificação da Transpetro à integridade dos dutos, constatou-se que os mesmos não tinham sido danificados, mas a Transpetro alertou sobre a importância de implantação de uma solução urgente para a região de forma a evitar que os dutos fossem expostos, pela progressão de processos erosivos, podendo romper e causando assim, um grave acidente ambiental.

A Figura 5.3 abaixo apresenta uma foto da região, 3 meses após o rompimento, onde pode ser observado o acelerado processo erosivo que se formava na região.



Figura 5.3. Processos erosivos formados na região da faixa de dutos da Transpetro.

A recomendação dada pela Transpetro foi que os dutos deveriam ser protegidos antes do próximo período chuvoso, pois a dinâmica existente entre o rio Paraopeba e o ribeirão Ferro-Carvão anualmente, já era objeto de constantes intervenções feitas por eles desde a implantação dos dutos na região.

Pelo exposto, vislumbrou-se a oportunidade de implantação do Marco Zero, que seria um projeto piloto de recuperação sustentável, previsto para ser implantado dentro do ano de 2019. Além de resolver o problema do carreamento de rejeitos dessa região para o rio Paraopeba, protegeria a faixa de dutos e serviria como um conceito de projeto piloto, ou seja, um projeto que visa através de aplicação prática, uma primeira experiência de recuperação sustentável.

A implantação do Marco Zero deu possibilidade a todos os envolvidos de aferir a sua eficácia e a oportunidade de verificação real das facilidades e dificuldades do processo, incluindo uma avaliação efetiva referente aos diversos aspectos técnicos, ambientais e sociais de uma recuperação sustentável.

Importante salientar que a área total impactada no ribeirão Ferro-Carvão é de aproximadamente 300ha e que a região do Marco Zero possui uma área de pouco menos que 6ha, representando assim apenas 2% da área total.

5.2.1 Implantação do Marco Zero

O Projeto Marco Zero teve como conceito inicial o conjunto das 4 iniciativas que “cessariam” o carreamento de rejeito até o primeiro ponto do rio Paraopeba, logo a

jusante da confluência do rio com o ribeirão Ferro-Carvão, sendo elas:

- a Cortina de Estacas Prancha 1 (barreira física para contenção de sedimentos);
- o tratamento da água acumulada no reservatório da barreira e retorno da mesma ao rio Paraopeba;
- a remoção do rejeito depositado e implantação de um projeto piloto de recuperação na região entre a barreira e o rio Paraopeba;
- a dragagem do rio Paraopeba até o primeiro ponto logo a jusante da confluência do rio com o ribeirão Ferro-Carvão.

A Figura 5.4 apresenta a referência locacional das iniciativas apresentadas acima.



Figura 5.4. Referência locacional das iniciativas do Marco Zero.

A concepção do projeto foi baseada nos estudos de alternativas para a restauração da calha do ribeirão Ferro-Carvão elaborados pelas empresas Marcelo Giovannini Eng^a. e Consultoria e Potamos Engenharia e Hidrologia, que indicaram a adoção de uma tecnologia que pudesse reconformar a calha do ribeirão em sua foz, proporcionando fluidez ao canal e estabilidade das suas margens durante eventos de máxima vazão considerando um TR de 2 anos.

O objetivo principal do projeto foi atingir a estabilização do curso de água através da proteção das suas margens contra erosões e, também, aproximar as suas áreas adjacentes aos aspectos morfológicos originais (antes do evento do rompimento das

barragens B-I, B-IV e B-IVA da mina Córrego do Feijão). Nessa região, a estabilização do curso d'água era uma premissa primordial para se garantir a segurança da faixa de dutos.

Após a realização de levantamentos topográficos, batimetrias e sondagens na região, foi possível identificar a morfologia pós-rompimento. Esses dados foram comparados com os dados pretéritos e serviram de base para a definição da morfologia proposta no projeto. Nestes estudos foram identificadas camadas de até 6 metros de rejeito na região.

Outro ponto importante e que direcionou a definição da cota de implantação do projeto, foi a identificação da posição dos dutos e as referências de projeto informadas pela Transpetro de que o cobrimento sobre os dutos era da ordem de 1,0 a 1,5 metros.

Com a informação proveniente da topografia pré-rompimento de que o canal na região tinha aproximadamente 1% de inclinação e a junção da topografia a imagens pretéritas, foi possível a definição de um traçado e perfil para a calha do ribeirão na região.

Para a concepção do projeto de restauração da calha fluvial no trecho do Marco Zero, procurou-se inicialmente identificar o traçado do leito original do ribeirão Ferro-Carvão. Foram pesquisadas as imagens disponíveis no utilitário Google Earth®, verificando-se que a maior parte do trecho era coberta por densa mata ciliar, impossibilitando divisar com precisão o entalhe fluvial. Conforme mostrado na Figura 5.5, visualizava-se apenas um pequeno trecho, já praticamente na foz do rio Paraopeba.



Figura 5.5. Aspecto das condições naturais do ribeirão Ferro-Carvão no trecho do Marco Zero.

Na Figura 5.5 está indicada a região do bueiro que possibilitava a passagem do ribeirão sob a estrada Alberto Flores (LMG-813) e a faixa de servidão da Transpetro. Possivelmente o leito do ribeirão já havia sido alterado no passado, quando da implantação dos dutos. A jusante desta faixa, onde se desenvolve o único trecho visível do leito do ribeirão, nota-se a evolução de um meandro nos depósitos aluviais, de forma a vencer o desnível com menor declividade longitudinal. A montante da faixa de servidão, pode-se apenas inferir de forma aproximada a morfologia de desenvolvimento da calha fluvial do ribeirão.

Esta faixa de servidão representou a principal restrição para os estudos de concepção do Marco Zero. De início, a Transpetro não disponibilizou o projeto dos dutos, onde figurassem as cotas das geratrizes dos tubos que orientariam os trabalhos de remoção dos rejeitos e, principalmente, indicassem uma seção de controle para a definição da declividade do entalhe do leito fluvial do ribeirão.

A Figura 5.6 apresenta o traçado preliminar feito pela Potamos e apresentado no relatório RL-2000GG-X-00007_RevA de 20/08/2019.



Figura 5.6. Traçado preliminar obtido a partir de imagem de satélite indicado no estudo da Potamos.

A Figura 5.7 apresenta os estudos realizados, que foram desenvolvidos a partir de imagens e topografias, que possibilitaram a obtenção de um traçado o mais próximo

possível do existente pré-rompimento, conforme premissas e condicionantes acordadas.

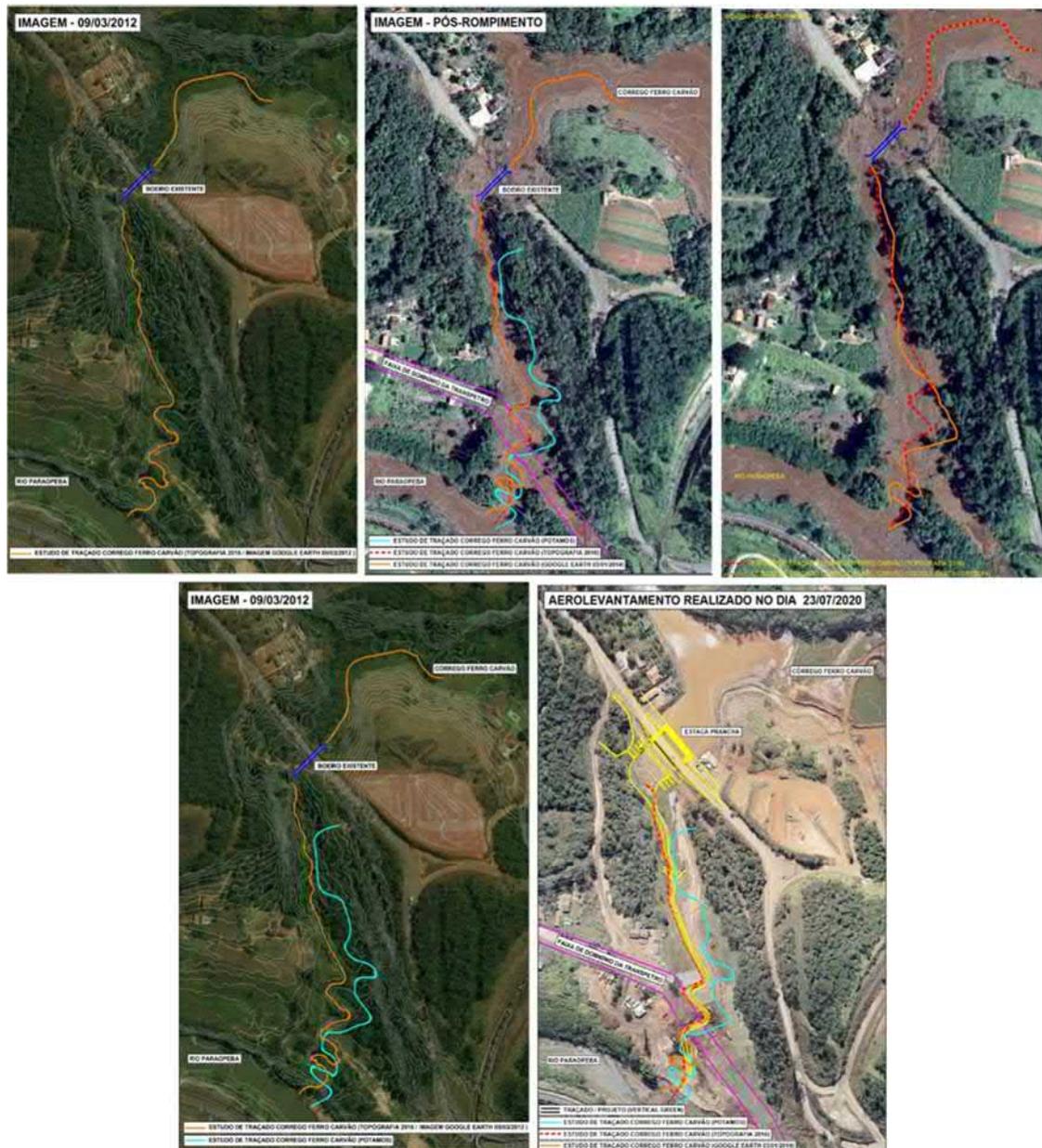


Figura 5.7. Estudos do traçado do canal.

Esses estudos também possibilitaram a aferição da cota em que o canal estava. Possibilitando assim que o projeto fosse feito considerando essas informações e buscando reconstituir as feições originais do relevo pré-rompimento.

A Figura 5.8 mostra uma sobreposição do projeto final com a implantação do mesmo.



Figura 5.8. Traçado parcialmente construído antes da foz com o rio Paraopeba. Fonte: Vale. Imagem de 13/03/2020.

Estudos de análise entre essa geomorfologia proposta e as batimetrias e sondagens realizadas no rio Paraopeba apontaram também um problema na confluência. A diferença de nível entre os dutos e o fundo do rio pré-rompimento era da ordem de 5 metros e com a dragagem dessa região, esse material seria retirado e a tendência era o rio buscar o reequilíbrio. Logo, era fundamental a adoção de medidas que estabilizassem o nível de base do ribeirão Ferro-Carvão. A Figura 5.9 mostra um esquemático do estudo descrito acima.

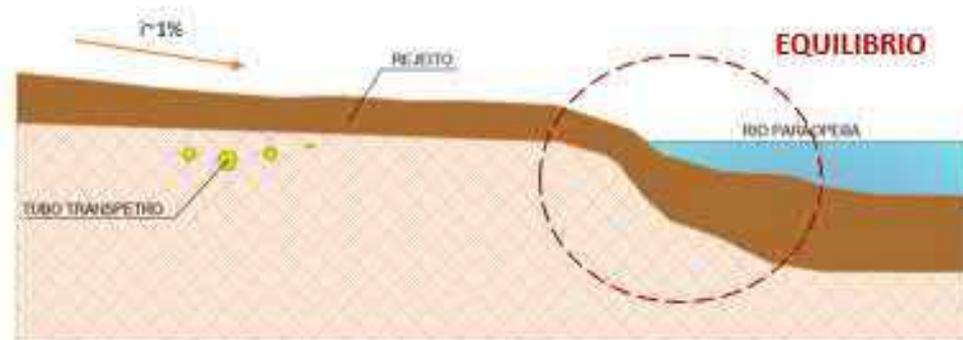


Figura 5.9. Esquemático do estudo de cotas da confluência do rio Paraopeba com o ribeirão Ferro-Carvão.

A solução dada para a obtenção do equilíbrio do nível de base do ribeirão Ferro-Carvão, foi a implantação de uma cortina de estacas prancha, que seria implantada na confluência e seria arrasada conforme a geometria do canal implantado nessa região, visando possibilitar a execução das atividades de construção do canal e dragagem do rio Paraopeba de forma concomitante e independente, e trouxesse a condição necessária para que a região tivesse tempo suficiente para reestabelecer o equilíbrio sistema através de processos de sedimentação.

A Figura 5.10 apresenta o esquemático da solução utilizando a cortina de estacas prancha.



Figura 5.10. Esquemático da solução de estabilização com a cortina de estaca prancha.

Dessa forma, o projeto do canal foi elaborado com base nas seguintes premissas e condicionantes:

- O leito fluvial do ribeirão deveria cortar perpendicularmente a faixa de servidão da Transpetro;
- No trecho de travessia da faixa, o fundo do canal deveria estar a uma profundidade mínima de 1,00 m acima da geratriz superior dos dutos;
- O traçado do canal deveria ser o mais próximo possível da melhor inferência que pudesse ser feita sobre o desenvolvimento do leito original;
- A montante, logo a jusante da travessia da estrada Alberto Flores (LMG-813), existe uma soleira rochosa que impunha uma cota de partida para o perfil longitudinal do canal;
- Entre esta soleira e a travessia da faixa de servidão, a declividade do canal deveria ser subcrítica, para que o escoamento das vazões de cheias ocorresse com baixas velocidades, quando não estivesse remansado pelo rio Paraopeba.

Logo, o dimensionamento hidráulico do canal do ribeirão Ferro-Carvão, foi concebido para atender as premissas descritas acima, considerando os critérios de projeto apresentados a seguir:

- Vazão de projeto = TR 2 anos = 25,0 m³/s (visando concentrar o fluxo de água e evitar o assoreamento da calha fluvial);
- Velocidade de escoamento = 2,65 m/s
- Declividade longitudinal = 1 %;
- Coeficiente de Rugosidade (Manning) = 0,033 (enrocamento) e 0,025 (solo reforçado – Sistema *Green Wall Water*®);

Com base nestes parâmetros, propôs-se uma seção hidráulica em forma trapezoidal, com dimensões de 3,00 m de base (fundo), aproximadamente 5,80 m de abertura no topo e 2,10 m de altura, com taludes com ângulo de inclinação de 65°.

A Figura 5.11 mostra o desenho da seção típica da proteção das margens com a utilização do solo reforçado com geossintéticos, sistema denominado *Green Wall Water*®.

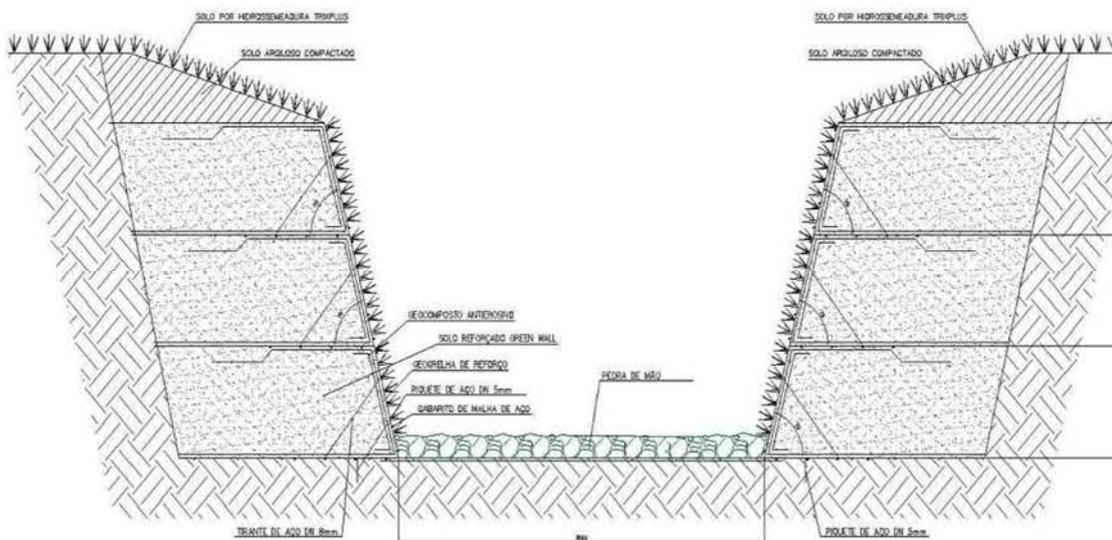


Figura 5.11. Seção típica do solo reforçado com geossintéticos.

O sistema *Green Wall Water*® consiste na elaboração de estratos compactados, envelopados com material geossintético do tipo geotêxtil de alta resistência, disposto em camadas de 0,75 m de altura, cujos horizontes de compactação são de 35 cm de espessura.

Para que fosse possível a implantação desse sistema, foi necessário o estabelecimento de um ângulo de inclinação que possibilitasse a execução do aterro compactado, com o objetivo de se criar uma estrutura que fosse mecanicamente resistente durante os primeiros anos de sua implantação, mas que no médio/longo prazo pudesse dar flexibilidade a nova calha fluvial reconformada.

Considerando a necessidade de implantação do projeto em 2019, pelos motivos já mencionados, optou-se por uma solução que fosse compatível com a dinâmica da praça de trabalho, que apresentava restrições de toda ordem, desde liberação de faixas para acesso de equipamentos à mobilização das equipes das Transpetro para orientação dos serviços da faixa de dutos.

O projeto de canalização do ribeirão Ferro-Carvão no trecho do Marco Zero não será em sua totalidade replicado para os trechos de montante. Conforme informado será adotada uma avaliação multicritério, para possibilitar a definição da solução mais sustentável para cada trecho. A ideia é desenvolver um plano completo de restauração, abrangendo os aspectos hidráulicos, morfológicos e ecológicos. Ressalta-se novamente que a corrida da onda de rejeitos erodiu o leito do ribeirão em toda a sua extensão, incluindo a zona hiporréica.

Assim, as funções ecológicas da zona hiporréica deverão ser reconstituídas gradualmente, a partir do projeto de naturalização da calha fluvial. Ao longo de todo o trecho de implantação da recuperação na bacia do Ferro-Carvão serão implantadas estruturas naturais de madeira e enrocamento, para formar zonas de remanso e ressaltos de aeração, para a progressiva instauração do fluxo subsuperficial que caracteriza a zona hiporréica.

Sendo assim, na Figura 5.12 apresenta se a concepção do projeto executivo da recuperação do Marco Zero.



Figura 5.12. Traçado do canal na região do Marco Zero – Planta.

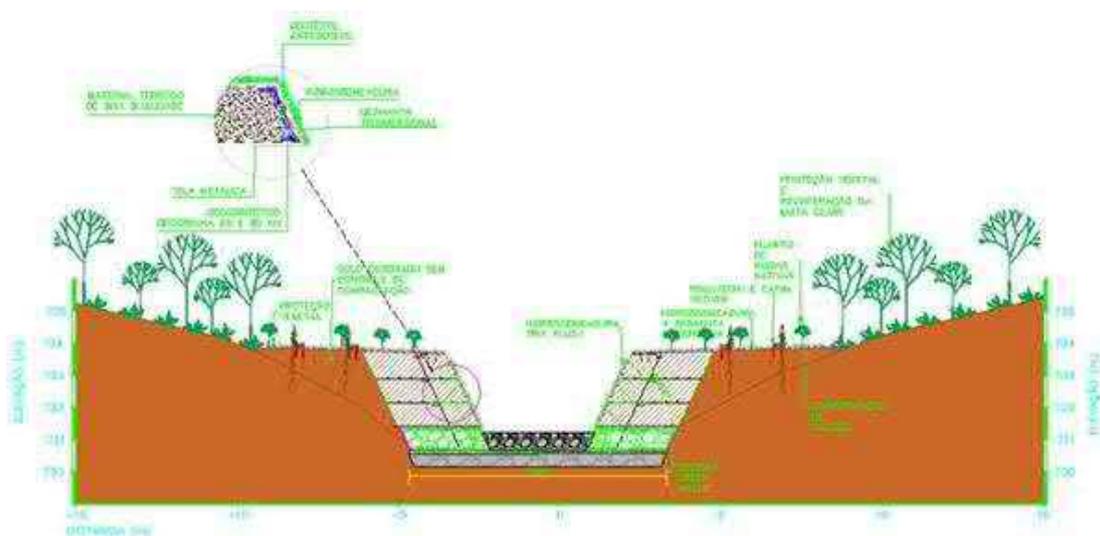


Figura 5.13. Seção típica do canal em solo reforçado – Sistema Vertical *Green Wall Water*®.

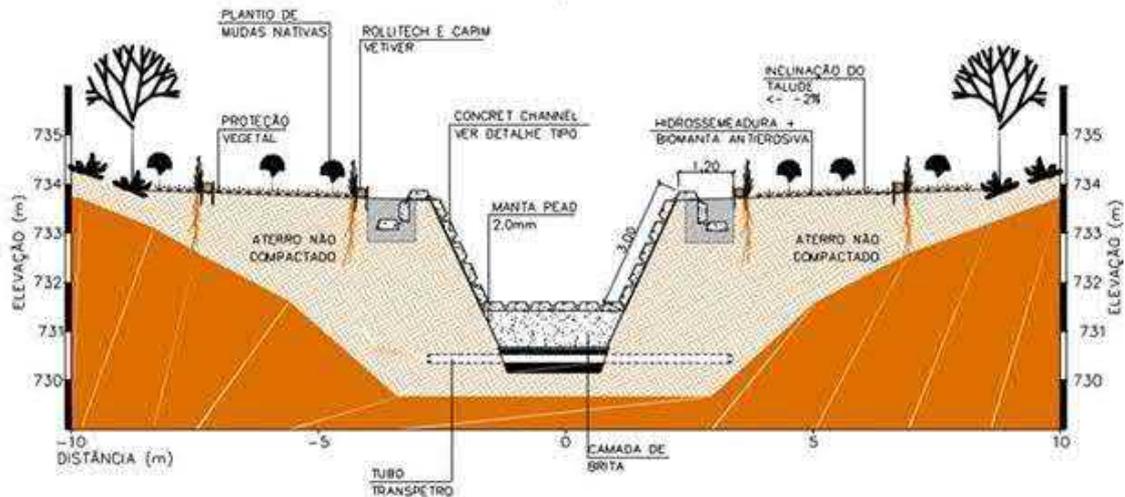


Figura 5.14. Seção da região dos dutos da Transpetro em *Concret Channel*.

Ressalta-se que a calha do ribeirão no trecho do Marco Zero recebia fluxos de sedimentos de sua própria bacia e também das descargas sólidas do rio Paraopeba, que fluíam em remanso até a altura do bueiro da Rodovia LMG-813 durante a ocorrência de cheias.

O processo construtivo adotado pode ser visualizado nas Figura 5.15, Figura 5.16 e Figura 5.17.



Figura 5.15. Seção escavada e início do processo construtivo do *Green Wall Water®*.



Figura 5.16. Detalhe da margem do canal com aterro compactado.



Figura 5.17. Vista geral da construção da seção do canal e preenchimento das laterais com aterro compactado

Numa faixa de 3 metros ao longo das margens do canal foi aplicada uma camada espessa de laterita a qual foi compactada a cada 35 cm de acordo com o processo construtivo do sistema *Green Wall Water*[®]. Em toda a planície adjacente também foi aplicado solo laterítico porém sem a mesma compactação da faixa de 3 m.

O canal implantado apresenta baixa permeabilidade nas margens, da ordem de 10^{-5} cm/s, e no fundo do canal a permeabilidade é bem ampliada pela presença de camadas de brita 3 e pedra de mão, envelopadas com manta geotêxtil de 600g/m², com permeabilidade informada pelo fabricante de 10^{-1} cm/s.

Antes da implantação do canal, todo o rejeito foi removido, até a faixa do solo residual e dos depósitos originais, onde havia pacotes de areia e pedregulho. A base do canal foi implantada sobre este substrato, que apresenta permeabilidade variando entre 10^{-1} a 10^{-3} cm/s.

Para a zona hiporréica não há informações sobre as características originais, uma vez que a passagem do rejeito removeu praticamente todo o material aluvial que antes estava depositado na calha do ribeirão.

Sobre o solo laterítico foi aplicada uma camada mínima de 30 cm de *topsoil* proveniente da supressão de um fragmento florestal em estágio médio de regeneração denominado PDE União (Figura 5.18), localizado nas proximidades da cava de Feijão. O levantamento na área da PDE União envolveu a amostragem dos indivíduos arbóreos com CAP igual ou maior que 15,7 cm, não sendo levantada a flora arbustiva e herbácea. Durante os trabalhos de supressão deste fragmento não foi observada a presença de espécies invasoras. As espécies arbóreas com maior valor de cobertura registradas foram: *Aspidosperma spruceanum*, *Aspidosperma olivaceum*, *Copaifera langsdorffii*, *Tachigali rugosa*, *Eremanthus erythropappus*, *Roupala montana*, *Dictyoloma vandellianum*, *Piptocarpha macropoda*, *Cecropia glaziovii*, *Machaerium oblongifolium*, *Eugenia acutata*, *Swartzia apetala*, *Casearia arborea*, *Laplacea fruticosa*, *Casearia sylvestris*, *Myrcia amazonica*, *Guatteria sellowiana*, *Hyptidendron asperrimum* e *Miconia cinnamomifolia*. Estas espécies somaram 52% do IVC total (índice de valor de cobertura).

Em toda a planície adjacente também foi aplicado solo laterítico, porém sem a mesma compactação da faixa de 3 m. Sobre estas superfícies foi aplicada uma camada mínima de 30 cm de *topsoil* também proveniente da supressão da área denominada PDE União (Figura 5.18).

Posteriormente, estas áreas foram adubadas (Figura 5.19), hidrossemeadas e revestidas com biomantas antierosivas. Técnicas de conservação do solo e da água, como a construção de cordões de contorno com retentores de sedimentos e o plantio de barreiras vivas de capim Vetiver (Figura 5.20), bem como passagens de fauna em caráter experimental também foram implantadas. Após o desenvolvimento inicial da cobertura vegetal herbácea e arbustiva as primeiras mudas de espécies arbóreas nativas foram plantadas (Figura 5.21).



Figura 5.18. Aplicação de *topsoil*.



Figura 5.19. Adubação fosfatada.



Figura 5.20. Aplicação de retentor de sedimentos, revestimento com biomanta e plantio de capim Vetiver.



Figura 5.21. Plantio de muda de espécie arbórea nativa.

A Tabela 5.1 a seguir apresenta o mix de espécies herbáceas e arbustivas utilizado na revegetação da área do Marco Zero com a composição de espécies e respectivas quantidades elencadas conforme relatório enviado pela C.EXT.0074/2020.

Tabela 5.1. Mix de espécies herbáceas e arbustivas utilizado nos programas de revegetação no Marco Zero.

| Família | Nome científico | Nome comum | Quant. (kg/ha) |
|----------------------|---|---------------------------|----------------|
| FABACEAE | <i>Cajanus cajan</i> | feijão-guandu | 15 |
| | <i>Canavalia ensiformis</i> | feijão-de-porco | 20 |
| | <i>Crotalaria juncea</i> | crotalária | 20 |
| | <i>Crotalaria spectabilis</i> | chocalho de cascavel | 20 |
| | <i>Stylosanthes guianensis cv. Campo Grande</i> | estilosantes Campo Grande | 15 |
| | <i>Stylosanthes guianensis cv. BRS Bela</i> | estilosantes Bela | 15 |
| POACEAE | <i>Avena spp.</i> | aveia | 40 |
| | <i>Lolium multiflorum</i> | azevém | 20 |
| | <i>Pennisetum glaucum</i> | milheto | 25 |
| | <i>Pennisetum setosum</i> | capim-custódio | 45 |
| ASTERACEAE | <i>Helianthus annuus</i> | girassol | 15 |
| BRASSICACEAE | <i>Raphanus sativus</i> | nabo forrageiro | 25 |
| AMARANTHACEAE | <i>Altemanthera tenella</i> | apaga-fogo | 25 |
| | TOTAL | | 300 |

A Tabela 5.2 a seguir apresenta a lista de espécies arbóreas já introduzidas no Marco Zero.

Tabela 5.2. Lista de espécies arbóreas já introduzidas no Marco Zero.

| Família | Nome Científico | Nome Comum |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Anacardiaceae | <i>Astronium graveolens</i> | aderne |
| | <i>Schinus terebinthifolia</i> | aroeira |
| Apocynaceae | <i>Aspidosperma olivaceum</i> | pequiá marfim |
| Bignoniaceae | <i>Sparattosperma leucanthum</i> | cinco folhas |
| | <i>Zeyheria tuberculosa</i> | ipê felpudo |
| Boraginaceae | <i>Cordia trichotoma</i> | louro |
| Cecropiaceae | <i>Cecropia pachystachya</i> | imbaúba mirim |
| Dichapetalaceae | <i>Stephanopodium engleri</i> | tambú branco |
| Fabaceae | <i>Anadenanthera peregrina</i> | angico curtidor |
| | <i>Dalbergia nigra</i> | jacarandá caviúna |
| | <i>Enterolobium contortisiliquum</i> | orelha de negro |
| | <i>Lonchocarpus cultratus</i> | óleo amarelo |
| | <i>Peltophorum dubium</i> | angico canjiquinha |
| | <i>Plathymeria reticulata</i> | vinhático |
| | <i>Platycyanus regnellii</i> | cataguá |
| | <i>Senna macranthera</i> | fedogosão |
| <i>Senna multijuga</i> | amarelão | |
| Lamiaceae | <i>Vitex polygama</i> | maria branca |
| Lecythidaceae | <i>Cariniana estrellensis</i> | jequitibá branco |
| Malvaceae | <i>Luehea grandiflora</i> | açoita cavalo |
| Meliaceae | <i>Cedrela fissilis</i> | cedro açu |

A seleção das espécies vegetais arbóreas utilizadas no Marco zero se baseou na relação geral de espécies vegetais registradas nos Censos Arbóreos realizados nas sub-bacias do ribeirão Ferro-Carvão e do córrego Casa Branca, nas áreas destinadas às obras emergenciais. A partir dessa relação de espécies, foram selecionadas aquelas disponíveis no viveiro de mudas da RNV - Linhares e que apresentavam características para recobrimento.

A perda de indivíduos arbóreos ocorrida devida à remoção de rejeito na área do Marco Zero está apresentada no relatório *Censo Arbóreo - Trecho do Marco Zero Margem Esquerda do ribeirão Ferro-Carvão* (Anexo 1) incluindo a delimitação espacial das árvores impactadas. Salienta-se que todos os impactos relacionados a flora decorrentes do processo de remoção dos rejeitos estão sendo devidamente discutidos, avaliados e

quantificados e apresentados no Capítulo 2 do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Paraopeba.

Foi retirado do Marco Zero um volume total de 96mil m³ de rejeito em 2019 e 49mil m³ de rejeito em 2020 que foram destinados aos Depósitos Temporários de Rejeitos – DTR's, localizados nas proximidades das áreas afetadas, sendo que estes terão como destino final a Cava de Feijão.

Todos os materiais que são direcionados para os DTR's possuem o mapeamento de sua origem e o devido acompanhamento quanto ao seu status de buscas por vítimas pelos CBMMG até o momento de sua destinação final. Já os rejeitos dragados no rio Paraopeba são destinados e armazenados nos *geobags* localizados nos platôs da ETAF 2 e terão sua destinação definida após consenso entre os *stakeholders* envolvidos.

Nas próximas estações chuvosas, períodos em que as demais ações de reparação da calha do ribeirão Ferro Carvão já estarão concluídas, serão continuamente avaliados o comportamento hidrogeomorfológico desse segmento fluvial, bem como a evolução da recuperação ambiental pretendida com as ações por ora implementadas.

5.2.2 Avaliação do projeto piloto - Marco Zero

O uso de indicadores para avaliação de alternativas de intervenção em cursos d'água visa facilitar os processos de tomada de decisão no tocante a seleção da solução mais compatível com os objetivos da intervenção e com o cenário existente, à luz das premissas de restauração (BAPTISTA, 2016a). Nestes processos, três principais dimensões de análise devem ser consideradas: a dimensão fluvial, a dimensão ambiental e a dimensão sociocultural (Figura 5.22), em metodologia similar a descrita para a Análise Multicritérios.



Figura 5.22. Indicadores de desempenho e impacto e respectivas dimensões de análise

A dimensão fluvial do curso d'água trata dos parâmetros responsáveis pela determinação da sua configuração física e dinâmica de funcionamento a saber o desenvolvimento longitudinal, a seção transversal, o equilíbrio geomorfológico - aqui representado pela estabilidade das margens – e o regime hidrológico, correspondente às condições hidrológico-hidráulicas.

A dimensão ambiental volta-se para análise dos aspectos que condicionam a qualidade ambiental do sistema fluvial, representada pela diversidade de habitats, áreas verdes adjacentes e qualidade da água, além de, neste caso, considerar o risco ambiental de um eventual rompimento dos dutos.

Já a dimensão sociocultural procura tratar de variáveis relacionadas a questões de ordem social, econômica, histórica e cultural afetas à área de inserção do curso d'água. Os indicadores considerados por esta vertente se referem à integração destes meios à paisagem, à sua relação com a população e a necessidade de desapropriação, remoção e reassentamento de famílias.

No caso do projeto piloto do Marco Zero os principais aspectos observados durante a sua concepção foram aqueles relacionados à segurança ambiental e a dimensão fluvial, uma vez que necessitava-se reconfigurar a calha do ribeirão Ferro-Carvão antes do período chuvoso 2019/2020 para permitir que eventuais vazões que galgassem a Estaca Prancha 1 a montante pudessem ser escoadas através da calha a ser construída, sem riscos a integridade dos dutos, cujo eventual rompimento poderiam causar impactos de alta magnitude a toda a bacia do rio Paraopeba.

A seguir é apresentada uma análise preliminar sobre cada uma das dimensões supracitadas tendo como referência os trechos do ribeirão Ferro-Carvão já concluídos na área do Marco Zero.

5.2.2.1 Dimensão Fluvial

No que se refere ao regime hidrológico, deve-se inicialmente considerar todas as alterações nele promovidas em decorrência do transporte e deposição dos rejeitos sobre as calhas, margens e planícies afetadas a montante, bem como a permanência parcial deste cenário após a conclusão da obra no Marco Zero, dada sua posição no ponto mais à jusante da bacia.

Os eventos pluviométricos atípicos experimentados em janeiro e fevereiro de 2020 e suas respectivas cheias associadas puderam comprovar a eficiência do canal construído tanto no que diz respeito à condutância da seção (mesmo com parte do trecho ainda em obras e a necessidade de bombeamento) quanto à sua integridade morfológica refletida pela estabilidade das margens após a ocorrência destes eventos, conforme apresentado Figura 5.23.



Figura 5.23. Detalhe da seção construída onde é possível notar o escoamento no leito e início do desenvolvimento da vegetação nas margens do canal.

Parte da área sofreu influência das cheias do rio Paraopeba durante a última semana de janeiro de 2020. Durante este evento foram trazidos à área da foz do ribeirão Ferro-Carvão sedimentos depositados no rio Paraopeba, dentre estes, sedimentos aluviais e rejeitos, os quais atingiram uma pequena parte das áreas já em processo de recuperação.

Cabe ressaltar que trata-se de um fenômeno comum regulado pela dinâmica hidrológica existente entre o rio Paraopeba e o ribeirão Ferro-Carvão e será objeto de monitoramento ao longo dos anos de forma a verificar a eficiência das ações implementadas, bem como seu manejo adaptativo.

Salienta-se ainda, que grande parte da área atingida ainda não tinha sido contemplada com as ações de recuperação realizadas em 2019, sendo objeto de intervenções no ano de 2020, o que possibilitou a retirada deste material trazido pelas cheias do Paraopeba. Toda esta área foi objeto de remoção dos rejeitos e sedimentos depositados e as pequenas porções afetadas foram novamente recuperadas. Essa condição pode ser observada na Figura 5.24 a seguir.



Figura 5.24. Efeito das cheias do rio Paraopeba sobre a foz do ribeirão do Ferro-Carvão. Foto de 26/01/2020.

Após o rebaixamento da água acumulada na região da influência das cheias de janeiro de 2020, na região do Marco Zero, foi concluída a remoção de rejeitos na área, sendo necessária apenas inspeções localizadas para se verificar uma possível presença de materiais remanescentes nas regiões de sub-bosque.

Após a finalização dos trabalhos de dragagem na região do Trecho 1 do rio Paraopeba, serão feitas investigações para verificação da eficiência dessa atividade na calha do rio Paraopeba, investigações estas que se estenderão à região da foz do córrego Casa Branca, para aferição da necessidade de intervenções complementares nessas regiões.

5.2.2.2 Dimensão Ambiental

Diante do pouco tempo decorrido desde a conclusão de parte do canal no Marco Zero, a diversidade de habitats não deve ser ainda objeto de avaliação. No entanto, alguns aspectos construtivos que condicionarão mais tarde a formação de habitats são passíveis de análise como a heterogeneidade do leito e das margens.

Condicionado pela necessidade de se vencer o desnível da faixa de servidão da Transpetro, procurou-se manter a declividade em 1% ao longo de todo o traçado do canal o que levou a redução de sua sinuosidade em relação ao traçado anterior hipotético. Tal condição dificultou a proposição de alternativas de variação longitudinal no leito, sendo este revestido com enrocamento em pedras rachão D50 = 30cm sobre uma camada de brita número 3 (três) assentada sobre manta geotêxtil (Figura 5.25). Nas drenagens à montante, responsáveis por conduzir o escoamento superficial de acessos e áreas adjacentes, o leito foi revestido com pedra argamassada em toda a sua extensão com as margens construídas no sistema *Green Wall Water*[®] (Figura 5.26).



Figura 5.25. Detalhe do revestimento do leito do canal.



Figura 5.26. Detalhe do revestimento do leito das drenagens à montante do canal.

É importante considerar que se trata da área mais a jusante no contexto da bacia e que, por consequência, receberá todas as vazões afluentes bem como grande parte do volume de sedimentos gerados na bacia, alterando sazonalmente a disponibilidade de habitats, em especial aqueles relacionados ao leito do canal construído. Dados de monitoramento hidrossedimentológico auxiliarão na compreensão do comportamento do leito no trecho já construído e subsidiarão intervenções que busquem aumentar sua heterogeneidade.

Quanto às margens procurou-se, com o conceito adotado, garantir preferencialmente a sua estabilidade através da confecção de estratos compactados, o que também traz reflexos para a heterogeneidade, seja pela inclinação das paredes do canal ou mesmo pela dificuldade de enraizamento das plantas devido à compactação do solo. A alteração dos padrões de fluxos entre águas que infiltram nas planícies adjacentes e o canal também pode trazer consequências negativas à formação e diversificação de habitats. Adicionalmente, a compactação das margens também poderá representar restrição ao desenvolvimento de espécies arbóreas retardando o processo de fechamento da copa das árvores sobre a calha fluvial, condição existente anteriormente. A evolução destes aspectos será monitorada e as intervenções necessárias serão introduzidas de forma gradual para favorecer a formação e diversificação de habitats.

Acompanhar o surgimento e desenvolvimento de espécies vegetais perenes nas paredes do canal é fundamental para avaliar o potencial de colonização e diversificação das margens. A presença de vegetação arbórea nas margens além de auxiliar na sua

estabilização, contribui para o sombreamento e aporte de nutrientes ao curso d'água (condições que apresentam correlação direta com a cadeia trófica associada), protegem o leito do aporte de sedimentos e contribuem para a melhoria da qualidade da água. Tal condição é um dos objetivos a serem garantidos principalmente nos tributários onde a vegetação ciliar exerce papel fundamental na proteção do curso d'água e em toda a dinâmica ecológica associada aos ambientes de cabeceira, fundamentais na transferência de energia entre as teias tróficas. Dados preliminares do monitoramento de fauna apontam a necessidade de restauração dos ambientes florestais inseridos nos tributários dos remansos 3D e 3E bem como a necessidade de conexão destes com os fragmentos florestais adjacentes.

Além da faixa de 3 m da borda do canal, a vegetação herbáceo-arbustiva vem se desenvolvendo de forma satisfatória promovendo a proteção e melhoria do substrato e contribuindo no processo inicial de sucessão ecológica. A aplicação de *topsoil* proveniente de áreas florestais suprimidas contribuiu sobremaneira no desenvolvimento da cobertura vegetal atualmente presente, seja pela melhor condição de fertilidade deste solo aplicado ou mesmo pelo aporte de outras espécies oriundas do banco sementes presente no *topsoil*.

Técnicas de conservação do solo adotadas ao longo das planícies de inundação além de promoverem a retenção de sedimentos ao longo da vertente, favorecem a infiltração da água no solo e podem contribuir para o desenvolvimento da vegetação na área do Marco Zero (Figura 5.27). Como exemplos pode-se citar a aplicação de biomantas antierosivas e de retentores de sedimentos, todos compostos por fibra de coco, naturais, biodegradáveis e que se integram de forma rápida à paisagem natural.

O monitoramento dos parâmetros físicos do solo ao longo de todas as áreas reconformadas vem sendo realizado periodicamente, contribuindo tanto no entendimento do comportamento da água no perfil quanto na seleção de espécies florestais que mais se adaptam a tais condições neste ambiente de análise.



Figura 5.27. Técnicas de conservação de solo adotadas no Marco Zero.

O estágio de desenvolvimento das mudas já plantadas ainda não deve ser tomado como medida para se inferir sobre sua capacidade de explorar e crescer sobre o substrato reconformado. Todas as recomendações técnicas necessárias durante o plantio foram adotadas e as mudas estão sendo sistematicamente monitoradas.

No que se refere à qualidade da água, as condições atuais têm sido garantidas pela série de estruturas construídas à montante e quando há galgamento da Estaca Prancha 1, o que de certa forma dificulta sua análise somente para o trecho construído no ribeirão Ferro-Carvão na área do Marco Zero. De todo modo, as condições de montante ainda acomodam grandes volumes de rejeitos que estão sendo retidos pelas estruturas de contenção de forma satisfatória e em breve serão devidamente removidos (descomissionados), favorecendo o alcance de indicadores desejados para a qualidade das águas da bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

Apesar de se ter iniciado a recuperação do Ferro-Carvão pelo ponto mais à jusante da bacia, alterações no Plano de Manejo de Rejeitos em função da estratégia de busca definida pelos bombeiros permitirão que as obras nos demais segmentos se deem das cabeceiras em direção aos segmentos mais baixos. Isso permitirá que melhorias nas porções cimeiras contribuam na potencialização das ações de melhoria da qualidade do ambiente nas áreas a jusante acelerando sua restauração.

5.2.2.3 Dimensão Sociocultural

Uma análise da integração paisagística do trecho em processo de recuperação na área do Marco Zero, mesmo com toda a subjetividade que a envolve, só será possível quando os diversos elementos que compõem a restauração do trecho tiverem evoluído ao longo do tempo e de que forma a comunidade perceberá essa evolução.

Nesse contexto, a conectividade exerce papel fundamental uma vez que estabelece, para alguns elementos da paisagem, um gradiente de percepção que com o tempo se torna cada vez mais tênue e, de certa forma, ameniza o sentimento de paisagem antes degradada. Considerando que a paisagem na área do Marco Zero se caracterizava, antes do rompimento, em um ambiente de floresta em estágio avançado de regeneração onde as copas das árvores se tocavam e que, segundo relatos das famílias que ali habitavam, o curso d'água era um local de recreação e pesca (Figura 5.28), há um longo caminho a ser perseguido para se atingir uma condição de paisagem próxima a condição pré-rompimento.



Figura 5.28. Ribeirão Ferro-Carvão na área do Marco Zero antes do rompimento.

Resgatar a relação das comunidades inseridas na bacia com o ribeirão Ferro-Carvão, num contexto que extrapole o uso da água para abastecimento e inclua todos os seus diferentes usos (pesca, recreação etc.), é necessário e desejável durante as tomadas de decisão acerca do projeto, em especial naqueles trechos onde já se tem conhecimento destas relações pretéritas como é caso do trecho adjacente ao distrito de Parque das Cachoeiras.

Como a área de localização do Marco Zero foi fortemente impactada pelo rompimento e foi, desde o primeiro momento, considerada como prioridade dos trabalhos, seja como medida de segurança relacionada aos dutos da Transpetro, seja como área de obras e dragagem no rio Paraopeba, todas as ações de retirada e reassentamento da população local foram tomadas. Assim a área de desenvolvimento e implantação do Projeto Marco Zero encontra-se atualmente sob a propriedade e domínio da Vale, não havendo, portanto, restrições para o uso adequado ou conflitos relativos ao uso do solo.

Tal condição levou a adoção de modelo de recuperação e reconstituição de margens por definição da equipe técnica, não tendo havido, neste caso específico, a participação de representantes comunitários na definição do formato final. Tal procedimento será adotado obrigatoriamente nos trechos de montante, com a aplicação da metodologia de análise multicritérios proposta.

Avaliações de percepção ambiental e de históricos de uso da área constituem importantes subsídios para introduzir oportunidades de uso para práticas de recreação, contemplação, pesca e outros alinhadas com o desejo do público que usualmente buscava o local para tais finalidades. Tais usos devem estar compatíveis com o projeto de restauração do curso d'água em si e serão incorporadas em todas as demais etapas do projeto de recuperação sustentável proposto.

5.2.3 Lições aprendidas

As avaliações realizadas em relação a implantação do compartimento denominado Marco Zero levam, de imediato, a busca de novas diretrizes para a continuidade do projeto de recuperação proposto, entre as quais destacam-se:

- Considerar no dimensionamento hidráulico da seção a possibilidade de ocorrência de processos erosivos como um processo natural de busca de equilíbrio da dinâmica fluvial;
- Evitar a retificação do eixo dos cursos d'água, buscando a maior similaridade com o meandro original contribuindo para a criação de habitats;
- Buscar soluções que minimizem os efeitos da compactação dos solos nas margens como ocorrido na implantação do modelo do Green Wall Water® de forma a garantir o desenvolvimento satisfatório da vegetação ciliar e de todos os processos ecológicos relacionados;
- Zona Hiporréica - A extinção da planície de inundação e a potencial impermeabilização do leito do canal fragmentam verticalmente o ecossistema aquático pela desconexão entre o corpo hídrico e zona hiporréica. A comunicação entre o leito de inundação e águas subterrâneas permite fluxos biologicamente relevantes, influenciados pela sazonalidade, nos dois sentidos. Nutrientes importantes para a biota fluvial e hiporréica (microbiota e fauna invertebrada) transitam entre os dois compartimentos por ressurgência e percolação. A própria água circula entre eles, recarregando o aquífero ou contribuindo à vazão do rio e condicionando, portanto, a disponibilidade de habitat e recursos nos dois ambientes. Diante desta constatação, nos compartimentos de montante a serem trabalhados atenção especial deverá ser dada a esta questão, evitando-se a impermeabilização

- de fundos e margens, assim como procurando criar condições de reconstituição da zona hiporréica;
- Considerar o descomissionamento das estruturas provisórias no tempo e no espaço durante a concepção do projeto de restauração do ribeirão Ferro-Carvão sob a ótica da formação de ambientes lênticos e lóticos de modo a restituir a funcionalidade ambiental das áreas;
 - Entender os anseios das comunidades afetadas e refleti-los na concepção do projeto de restauração do ribeirão Ferro-Carvão.

Diante de todas as avaliações acima apresentadas, a Vale entende que o projeto executado tem caráter definitivo e atendeu até o momento as principais premissas para o qual o mesmo foi concebido. As ações de monitoramento previstas permitirão avaliar sua eficácia e efetividade, e direcionar ações visando a melhoria de aspectos relacionados a sua naturalização.

5.2.4 Monitoramentos previstos

Os impactos no ambiente natural advindos do rompimento de barragens são inúmeros e complexos. Os ambientes aquáticos, em particular os fluviais, são submetidos a diferentes tipos de alterações, tanto nas condições ecofísicas como nas biológicas.

O estado de preservação de um ambiente aquático deve ser entendido e definido ao compará-lo com ambientes em estado prístino, ou o mais próximo de condições naturais, em termos das características ecofísicas do habitat, das condições físico-químicas das águas e sedimentos e da composição e estrutura das comunidades biológicas aquáticas. (FERREIRA, CASTRO, 2003; CASTRO et al., 2005; FERREIRA, CASTRO, 2005a, 2005b; LANA et al. 2005; CASTRO et al., 2007; FERREIRA, CASTRO, MELO, 2007; LÓPEZ et al., 2007). Em somatório, visam a contribuir para elucidar as possíveis diferenciações decorrentes dos usos da bacia e de seu comprometimento na manutenção da integridade ecológica dos sistemas aquáticos.

A utilização de abordagens integradoras, que considerem os múltiplos fatores que condicionam a estrutura e funcionamento dos ambientes aquáticos, e que interferem na dinâmica de sua integridade ecológica, são premissas fundamentais para o sucesso da restauração do ambiente. Estratégias de maior abrangência, que possibilitem medir a “saúde” do ecossistema aquático, fundamentadas na identificação dos problemas associados ao uso dos recursos hídricos, na avaliação e monitoramento das alterações ambientais e seus efeitos sobre os ambientes aquáticos e não somente sobre a qualidade das águas devem, portanto, serem utilizadas.

Desta forma, além dos programas e métricas tradicionais de monitoramento ambiental, tais como, parâmetros físicos, químicos e biológicos das águas e dos sedimentos, aplicação de índices de qualidade de água, avaliação da diversidade das comunidades, dentre outros, também será elaborado um **índice de integridade ecológica**. O desenvolvimento e aplicação deste índice segue o modelo europeu e norte americano de monitoramento de ambientes aquáticos, além de estar ancorado na legislação estadual, através das orientações da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº001/2008, permitem ampliar as abordagens adotadas na avaliação e monitoramento dos corpos de água inovando-as com tecnologias de apoio ao gerenciamento dos recursos hídricos e os enfoques no trato dos problemas associados aos usos desses recursos.

O **índice de integridade ecológica** tem por objetivo a integração dos dados para avaliação da qualidade ecológica dos ambientes monitorados, adequado às condições geomorfológicas da bacia em estudo e das especificidades do distúrbio do rompimento das barragens.

Para o alcance dos objetivos propostos o monitoramento será desenvolvido de forma interdisciplinar agregando métodos e técnicas específicas de diversos campos das ciências, seguindo protocolos internacionais amplamente aplicados no mundo.

- Objetivos específicos:
- Tipificar cursos de água afluentes do alto curso do rio Paraopeba;
- Selecionar cursos de água de bacias de drenagem similares às do ribeirão Ferro-Carvão, para adensamento de estudos;
- Avaliar a qualidade ecológica dos cursos de água selecionados;
- Monitorar o processo de restauração do ribeirão Ferro-Carvão.

As etapas englobam um conjunto de atividades, agrupadas em módulos, que se complementam e se interconectam, conforme Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Síntese metodológica do desenvolvimento e aplicação do índice de integridade ecológica.

| Módulo | Atividade |
|--|---|
| Etapa 1 – Proposição do Modelo de Referência para Restauração | |
| 1. Bases operacionais | 1.1. Pesquisa documental e de fontes em meio eletrônico e mídia |
| | 1.2. Geração de cartografia |
| | 1.3. Estruturação de arquivos georreferenciados de dados |
| 2. Tipificação de cursos de água da margem direita do rio Paraopeba e a montante da foz do ribeirão Ferro-Carvão | 2.1. Tipificação via descritores do Sistema A |
| | 2.2. Tipificação via descritores do Sistema B |
| | 2.3. Representação cartográfica da tipificação |
| 3. Seleção de cursos de água para adensamento de estudos | 3.1. Análise do uso e ocupação de bacias similares |
| | 3.2. Reconhecimento in situ das bacias |
| | 3.3. Seleção de bacias de drenagem similares ao ribeirão Ferro-Carvão. |
| 4. Avaliação da qualidade ecológica das bacias de drenagem selecionadas | 4.1. Estabelecimento da rede de coleta |
| | 4.2. Mapeamento do uso e ocupação do solo regional e local |
| | 4.3. Caracterização dos ambientes aquáticos: |
| | 4.3.1. Condições ecohidromorfológicas do habitat |
| | 4.3.2. Condições físico-químicas das águas e dos sedimentos |
| | 4.3.3. Composição e estrutura das comunidades biológicas |
| | 4.4. Identificação do gradiente de distúrbio |
| 4.5. Estabelecimento do índice de integridade ecológica: | |
| 4.5.1: Avaliação das condições ecológicas dos sítios de coleta | |
| 4.5.2: Representação dos níveis de qualidade ecológica | |
| Etapa 2 – Monitoramento, Avaliação e Manejo Adaptativo do Processo de Restauração | |
| AÇÃO CONTINUADA | |
| 5. Monitoramento da qualidade ecológica do ambiente aquático | 8.1. Avaliação da restauração da integridade ecológica do ribeirão Ferro-Carvão |
| | 8.1.1. Avaliação ecohidromorfológica do habitat |
| | 8.1.2. Avaliação da qualidade das águas e dos sedimentos |
| | 8.1.3. Avaliação das comunidades aquáticas |
| 6. Avaliação e manejo adaptativo | 9.1. Avaliação das metas de restauração alcançadas |
| | 9.2. Manutenção e reparos de instalações |
| | 9.3. Adequações de medidas instaladas e projetos implantados |
| 7. Monitoramento participativo | 10.1. Implantação do monitoramento participativo |
| | 10.2. Monitoramento participativo continuado |
| | 10.3. Avaliação periódica do monitoramento participativo |

Etapa 1 – Módulo 1 - Bases Operacionais

As bases operacionais visam o levantamento de informações disponíveis sobre os temas previstos na proposta com a finalidade de obter o acervo bibliográfico e cartográfico para uso no desenvolvimento dos trabalhos. Incluirá a pesquisa de

relatórios técnicos, imagens de satélite, fotos aéreas, cartografia, artigos científicos, dissertações e teses disponíveis em bibliotecas, entidades públicas e em bancos virtuais pela Internet.

Etapa 1 – Módulo 2 - Tipificação de cursos de água da margem direita do rio Paraopeba e a montante da foz do ribeirão Ferro-Carvão

A tipificação está fundamentada na identificação de segmentos que são porções longitudinais do sistema fluvial com “características próprias, inseridos em um dado tipo de substrato geológico e posicionado em determinada área caracterizada por largura e declive relativamente uniformes” (FRISSEL et al., 1986). Para tal, incorpora sistemas de análise em diferentes escalas, agregando em escala ampla a geologia e a altimetria (Sistema A) e em mesoescala variáveis da geomorfologia fluvial (Sistema B: declividade, padrão do canal e tipos de vale). Da interseção desses sistemas são identificados os tipos de segmentos que norteiam a caracterização da integridade ecológica do sistema, em escala de detalhe (condições ecoidromorfológicas do habitat, condições físico-químicas das águas e sedimentos, e composição e estrutura das comunidades biológicas).

Os dados obtidos e gerados são processados e georreferenciados utilizando software de GIS, que subsidiam a análise temporal e espacial das variáveis de estudo. São produzidas bases cartográficas, a representação espacial da tipificação dos cursos de água e mapas temáticos que darão suporte as avaliações do gradiente de distúrbio e a representação da qualidade ecológica dos ambientes.

Etapa 1 - Módulo 3 - Seleção de cursos de água para adensamento de estudos

A seleção de bacias de drenagem de afluentes do rio Paraopeba da margem direita e a montante da foz do ribeirão Ferro-Carvão se deve ao fato da total alteração do ambiente fluvial do referido ribeirão. A escolha das bacias similares à da área em estudo contempla a tipificação fluvial e análise de uso e ocupação do solo.

Etapa 1 – Módulo 4 - Avaliação da qualidade ecológica das bacias de drenagem selecionadas

As condições ecoidromorfológicas dos habitats aquáticos serão levantadas por meio de avaliação de atributos ecofísicos do habitat (CASTRO et al., 2005) com base em interpretações e registros “in situ” de um conjunto de descritores e suas variáveis para distinguir, dentre outros os seguintes aspectos: (i) sedimentológicos e geomorfológicos; (ii) características associadas ao fluxo; (iii) características associadas à vegetação ripária; (iv) alterações visuais nas águas e nos substratos minerais; (v) características da diversidade biológica aquática; (vi) usos das águas e uso e ocupação do solo, local e a montante.

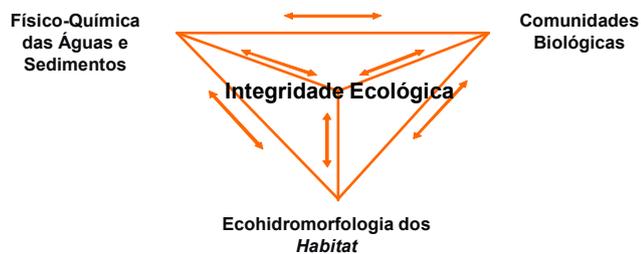
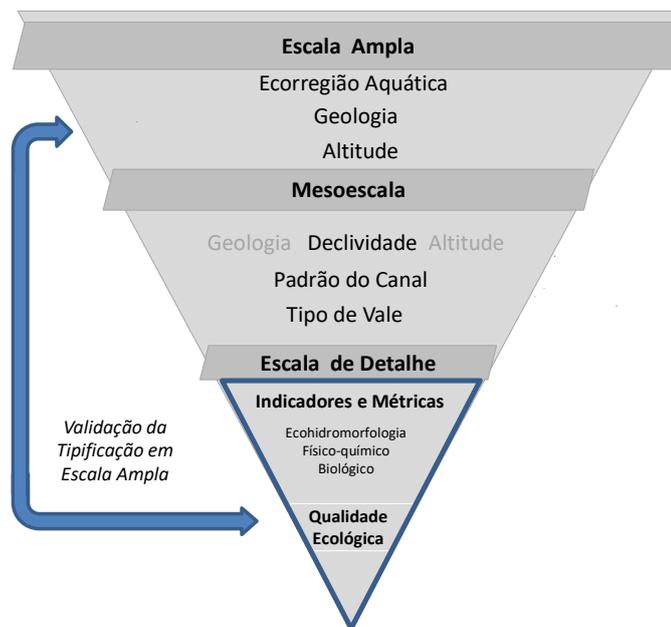
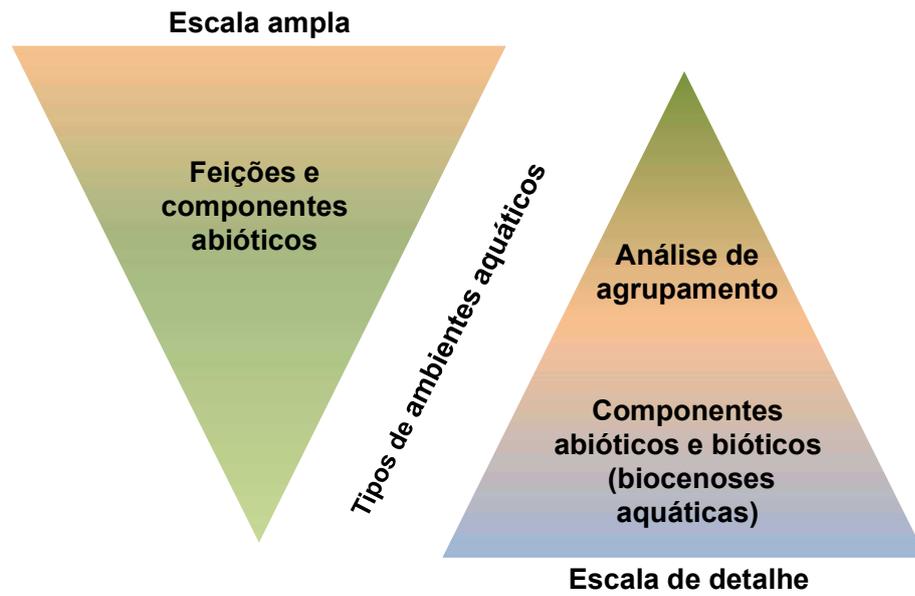


Figura 5.29. Interação entre as escalas de estudo e vertentes da avaliação da integridade ecológica dos ambientes aquáticos (Ferreira et al., 2017; Melo et.al.,2016; Castro, et al., 2005).

Etapa 2 – Módulo 5 – Monitoramento da Qualidade Ecológica dos Ambientes Aquáticos

Serão realizadas medições “in situ” para levantamento das condições físicas e físico-químicas das águas e sedimentos segundo normas internacionais e nacionais.

A caracterização da composição e estrutura das comunidades aquáticas estará focada na identificação de táxons bioindicadores da qualidade ecológica dos ambientes aquáticos, além de fornecer dados sobre a diversidade biológica dos ambientes e a disponibilidade de recursos alimentares para a ictiofauna.

O índice de integridade ecológica será estabelecido adotando-se a abordagem multimétrica segundo metodologia descrita em KARR & CHU (1999), BARBOUR et al. (1999) e AQEM (2002). Esta abordagem se fundamenta nos desvios em relação à condição de referência para avaliar a qualidade ambiental em níveis distintos de modificação e estruturar um sistema de classificação da qualidade ecológica dos cursos de água, em observância aos seguintes passos:

- passo 1: seleção e calibração de métricas e subsequente agregação em um índice. Esse processo será essencialmente para caracterização das condições de referência e dará suporte à fase subsequente.
- passo 2: avaliação das condições ecológicas dos sítios de coleta e definição do seu estado de degradação.

Para assegurar o registro dos diversos aspectos da estrutura, função ou outra característica mensurável dos componentes abióticos e bióticos dos ambientes fluviais, pretende-se selecionar métricas das seguintes categorias (BARBOUR et al., 1999):

- métricas de riqueza para indicar a diversidade e a variedade da comunidade;
- métricas de composição para identificar as espécies e a dominância;
- métricas de tolerância que representam a sensibilidade à perturbação;
- métricas tróficas para obter informações acerca da estratégia alimentar e de guildas;
- métricas da paisagem para obter informações sobre os componentes abióticos da bacia e atributos ecofísicos do habitat.

Etapa 2 – Módulo 6 – Avaliação e Manejo Adaptativo

O manejo adaptativo é o caminho que estabelece as hipóteses do plano de restauração e conduz o processo como um experimento para testar essas hipóteses. Envolve ajustes a partir da obtenção de novos dados e informações.

As medidas a serem propostas devem buscar a retomada da capacidade funcional do rio, que consiste em principalmente:

- No fluxo contínuo das águas e do material transportado, bem como, da mobilidade e condições naturais do fundo do leito (dinâmica do fundo).
- Na mobilidade e condições naturais das margens (dinâmica das margens).
- Nas condições naturais para inundação, relacionada ao uso adequado das baixadas inundáveis (dinâmica das zonas inundáveis) (YOCHUM, 2018).

Etapa 2 – Módulo 7 – Monitoramento Participativo

Os resultados obtidos deverão ser facilmente assimilados e entendidos pela comunidade em geral. Dessa forma, além de garantir o rigor técnico e científico, os resultados devem obter saídas em classes e em cores, de maneira a garantir o entendimento da população, mesmo para público sem conhecimento técnico.

As classes que irão compor o sistema de avaliação da qualidade ecológica dos sistemas fluviais serão representadas espacialmente considerando as diferentes condições de qualidade definidas, cuja simbologia gráfica (Figura 5.30) permitirá a visualização da qualidade nos diversos trechos da rede de drenagem da bacia.

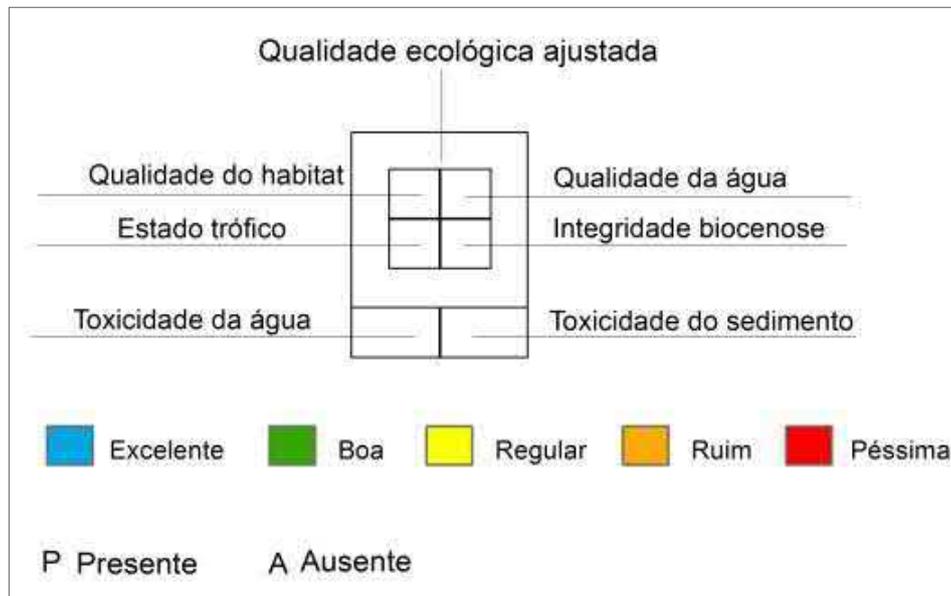


Figura 5.30. Representação gráfica da qualidade ecológica dos ambientes fluviais (Ferreira et al., 2017).

Além das cores das classes, o índice de integridade ecológica deverá estar associado aos programas de educação ambiental, de maneira que a população possa acompanhar os procedimentos adotados, propor novas ações e métricas, e validar as alterações na qualidade ambiental dos ambientes restaurados. A participação ativa da população promoverá não somente legitimidade ao processo, como transformará a população, em membros integrantes do processo de monitoramento e acompanhamento da recuperação destes ambientes.

5.3 Plano Integrado de Levantamento de Dados

Alguns dias após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA foi feito um levantamento topográfico da região afetada com o objetivo de mapear e identificar os impactos físicos gerados pela passagem do rejeito pela planície fluvial e mapear o volume de rejeito que havia sido depositado na mesma. Em um primeiro momento, foi feito um estudo de comparação das topografias pré e pós rompimento, que possibilitou a obtenção dos volumes depositados ao longo do Ferro-Carvão, conforme apresentado na Figura 5.31 a seguir.

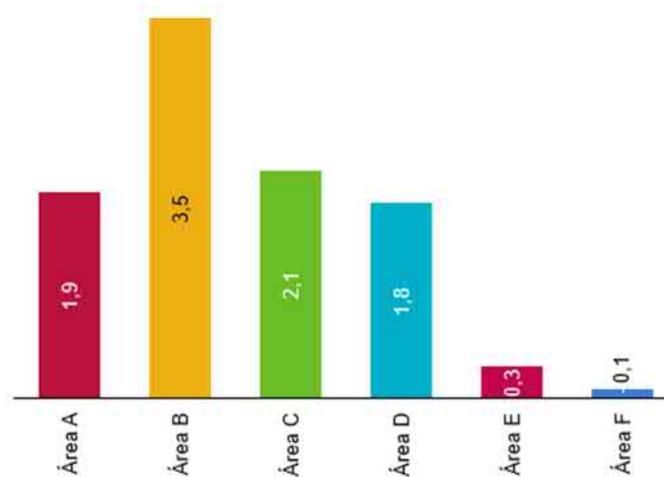


Figura 5.31. Estudo inicial de volumes depositados no ribeirão Ferro-Carvão.

Com a continuidade das atividades na região e realização de alguns furos de sondagem, observou-se que as seções obtidas através da comparação das topografias, estavam um pouco diferentes da condição encontrada na região, observada através dos logs de sondagem.

Como a base dos estudos técnicos e projetos da recuperação depende dessas informações, foi necessária a elaboração de um plano integrado de investigações com o objetivo estimar as espessuras dos depósitos de rejeito e diagnosticar a interface entre a superfície do terreno natural (primitiva pré-ruptura) e a base do rejeito que foi depositado na região do ribeirão Ferro-Carvão.

Além desses objetivos, as investigações também orientarão o reconhecimento de regiões onde houve erosões significativas do terreno ao longo da área afetada.

No plano integrado de investigações estão previstos métodos diretos (sondagens) e indiretos (geofísicos) que possibilitarão o refinamento dos volumes apresentados e a identificação real da posição do substrato atualmente.

5.3.1 Sondagens

O plano integrado de investigações geotécnicas foi feito contemplando o trecho entre o estaqueamento E000 e E450 do ribeirão Ferro-Carvão (aproximadamente 9000 m de extensão montante-jusante) e regiões de remansos. Serão executadas sondagens à trado (ST), sondagens à percussão (SP) e sondagens mistas (SM) distribuídas ao longo do traçado de seções longitudinais e transversais. Os levantamentos geofísicos percorrerão as mesmas extensões das seções supracitadas com o objetivo de obter perfis geofísicos 2D que permitam a interpretação de interfaces geofísicas ou feições estruturais que serão correlacionadas com os resultados das sondagens.

A Figura 5.32 indica, por trecho uma estimativa do quantitativo previsto para realizar as investigações na área de interesse:

| Quantitativo estimado - Trecho E00 a E65 | | |
|--|----------|-----------|
| Método de Investigação | Qtd.(un) | Total (m) |
| Sondagem Mista (SM) | 24 | 270 |
| Seção geofísica (GPR e/ou Geolétrico e/ou Sísmica) | 10 | 7.150 |
| Quantitativo estimado - Trecho E65 a E123 | | |
| Método de Investigação | Qtd.(un) | Total (m) |
| Sondagem à percussão (SP) | 13 | 150 |
| Sondagem Mista (SM) | 32 | 350 |
| Seção geofísica (GPR e/ou Geolétrico e/ou Sísmica) | 16 | 13.400 |
| Quantitativo estimado - Trecho E123 a E208 | | |
| Método de Investigação | Qtd.(un) | Total (m) |
| Sondagem à percussão (SP) | 25 | 270 |
| Sondagem Mista (SM) | 5 | 60 |
| Seção geofísica (GPR e/ou Geolétrico e/ou Sísmica) | 20 | 5.880 |
| Quantitativo estimado - Trecho E208 a E340 | | |
| Método de Investigação | Qtd.(un) | Total (m) |
| Sondagem à percussão (SP) | 46 | 500 |
| Sondagem Mista (SM) | 3 | 40 |
| Seção geofísica (GPR e/ou Geolétrico e/ou Sísmica) | 26 | 10.050 |
| Quantitativo estimado - Trecho E340 a E390 | | |
| Método de Investigação | Qtd.(un) | Total (m) |
| Sondagem à percussão (SP) | 29 | 330 |
| Sondagem Mista (SM) | 3 | 40 |
| Seção geofísica (GPR e/ou Geolétrico e/ou Sísmica) | 14 | 3.300 |
| Quantitativo estimado - Trecho E390 a E450 | | |
| Método de Investigação | Qtd.(un) | Total (m) |
| Sondagem à percussão (SP) | 24 | 270 |
| Sondagem Mista (SM) | 4 | 60 |
| Seção geofísica (GPR e/ou Geolétrico e/ou Sísmica) | 16 | 3.400 |
| Quantitativo estimado - Remansos 1,2,3 | | |
| Método de Investigação | Qtd.(un) | Total (m) |
| Sondagem à percussão (SP) | 79 | 600 |
| Sondagem à trado | 39 | 250 |
| Seção geofísica (GPR e/ou Geolétrico e/ou Sísmica) | 52 | 17.900 |

Figura 5.32. Listagem da estimativa de investigações – Córrego Ferro-Carvão e Remansos.

Os tipos de investigação realizados serão:

- Ensaio de Penetração Padronizado (SPT - *Standard Penetration Test*)

A sondagem à percussão é utilizada para a determinação dos tipos de solo em suas respectivas profundidades de ocorrência e determinação dos índices de resistência à penetração do amostrador padrão (SPT) a cada metro.

- Sondagens Mistas

O método investigação misto (SPT e rotativa mecanizada) será utilizado nos locais onde, possivelmente, ocorrem consideráveis quantidade de blocos imersos no depósito de rejeito.

- Coleta de Amostras

A coleta de amostra deverá ser contínua sem interrupção e, obrigatoriamente, quando interceptado materiais distintos deverá ser informado em boletim toda mudança de

material, sejam essas: cor, granulometria, estrutura, reconhecimento de unidade geológico-geotécnica.

5.3.2 Geofísica

De forma complementar serão realizados métodos geofísicos GPR e Geolétricos que se complementarão e serão calibrados e correlacionados com os resultados das sondagens. Adicionalmente, em casos onde haja a necessidade de investigações mais profundas e/ou confirmação das interfaces será utilizado o método sísmico de refração para complementar os perfis de GPR e geolétricos.

Como citado no item 3, os caminhamentos geolétricos, bem como os levantamentos com GPR, serão executados ao longo das mesmas seções onde foram programadas as seções geológico-geotécnicas (investigações diretas). Seções complementares poderão ser necessárias, a depender da complexidade dos depósitos investigados.

Considerando o objetivo principal, reconhecer a interface rejeito-superfície de deposição (terreno natural), os meios de aquisição de dados devem garantir a penetração e resolução satisfatórias, assumindo que, majoritariamente, os seguintes materiais (saturados ou não) poderão ser atravessados:

- Materiais correspondentes ao rejeito de origem da barragem B-I;
- Solos transportados: Depósitos fluviais (aluviões recentes e terraços antigos), depósitos coluvionares;
- Solos de alteração e perfil de alteração de granito-gnaisses.

Em situações onde não há resolução suficiente para reconhecer o contato entre depósitos aluvionares recentes/terraços antigos com depósitos de rejeito essa interface poderá ser detalhada a partir de métodos diretos, como abertura de trincheiras de inspeção.

5.3.2.1 GPR (*Ground Penetrating Radar*)

O GPR é um método que emprega ondas eletromagnéticas em altas frequências (entre 10 – 2000 MHz), para localizar estruturas e feições geológicas e/ou objetos enterrados (PORSANI, 2004).

Fundamentalmente, o método convencional consiste em uma antena transmissora localizada na superfície que emite ondas eletromagnéticas que vão se propagar em subsuperfície e quando interceptada uma interface (refletor) entre meios de diferentes propriedades elétricas, parcela da energia dessas ondas será refletida. Essas reflexões são captadas por uma antena receptora também em superfície, registrando o tempo de trânsito dessas ondas (e convertido em profundidade).

Esses refletores podem diagnosticar possíveis superfícies contínuas de interesse, como contatos geológicos, bem como outros objetos enterrados. Nesse âmbito, o GPR demonstra ser um método que fornece condições de uso para a interpolação e extrapolação das informações obtidas quando correlacionados com métodos diretos de investigação.

A qualidade (atenuação e dispersão) da propagação das ondas eletromagnéticas e, conseqüentemente da resolução e penetração, depende da frequência da onda transmitida, da permissividade dielétrica e condutividade elétrica dos materiais. Essas

propriedades estão intimamente associadas ao teor de umidade, saturação e teor de argila dos materiais geológicos atravessados.

Desta forma, para atender o objetivo deste trabalho, buscar-se-á, a partir de ajuste adequado de frequência das ondas eletromagnéticas emitidas, uma penetração de no mínimo 8 m de profundidade com resolução que possibilite o reconhecimento de superfícies contínuas e diagnósticas de contatos entre a superfície pré-ruptura da barragem B-I e a base do rejeito, além de possíveis contatos erosivos.

Considerando a diversidade dos materiais e as possíveis espessuras do pacote de rejeitos, esse ajuste de frequências deverá ser testado e comprovado a partir da execução de dois perfis pilotos, onde serão executadas investigações diretas simultaneamente para fins de calibração do método. A soma dos erros associados às etapas de aquisição e processamento de dados geofísicos, que influenciam diretamente na resolução, não deve ser superior a 0,30 m.

5.3.2.2 Métodos Geométricos – Eletrorresistividade

O método de eletrorresistividade, essencialmente, se dá com a aplicação de uma corrente artificial elétrica e contínua (ou de baixa frequência) no solo a partir de um par de eletrodos. A diferença de potencial pode ser medida por outro par situado nas proximidades. Conseqüentemente, conhecendo o valor da corrente elétrica e as diferenças de potenciais é possível extrair a resistividade elétrica do meio (Gandolfo, 2007).

A utilização deste método será imprescindível em condições onde haja baixa penetração ou baixa resolução das informações do GPR devida às variações das profundidades da base do rejeito e às condições impostas pelos demais materiais que podem atenuar a propagação das ondas eletromagnéticas. A eletrorresistividade, portanto, integrará a composição dos modelos geofísicos 2D e, principalmente, será utilizada em profundidades onde o método GPR não tiver respostas efetivas para objetivo deste trabalho.

Dentre as técnicas de aquisição de dados deve-se utilizar o caminhamento elétrico, ou seja, um alinhamento de eletrodos deverá ser realizado nas seções propostas, considerando a premissa que a distância entre os pares eletrodos é diretamente proporcional ao alcance do método em profundidade.

Nesse sentido, frente às condições que serão encontradas do local de interesse, o ajuste e a validação do arranjo dos eletrodos é de extrema importância para obter resoluções satisfatórias no perfil levantado (horizontal e vertical).

Desta forma, deverá testar nos perfis pilotos e justificar qual o melhor arranjo (Dipolo-Dipolo, Wenner, etc) e distanciamento entre pares de eletrodos forneceu a resolução que atenderá o objetivo principal de mapear a superfície de interesse (interface – rejeito depositado e terreno natural pré-ruptura). O método também deve garantir uma penetração de pelo menos 25m e a soma dos erros associados às etapas de aquisição e processamento de dados geofísicos não deve ser superior a 0,50m.

5.3.3 Estudos Geoquímicos

Após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA, na mina do Córrego de Feijão em Brumadinho/MG, em 25 de janeiro de 2019, foi iniciado um amplo programa de investigação geoquímica dos rejeitos liberados pelo rompimento e seu potencial em impactar o ambiente afetado. De maneira geral, o que se pretende com o programa de caracterização geoquímica é entender a reatividade ambiental dos rejeitos que estavam

depositados na barragem. De maneira mais específica, o objetivo principal do programa será responder a questões chave relacionadas com a presença dos rejeitos liberados no ambiente.

Para tanto foram amostrados rejeitos com características originais (CO), dentro da própria estrutura da barragem (rejeitos remanescentes) e rejeitos misturados (RM) que se misturaram aos solos e sedimentos naturais das áreas afetadas (127 amostras), solos não afetados (SNA) (13 amostras), sedimentos não afetados e afetados pela deposição de rejeitos (i.e., banco de sedimentos/margens do rio Paraopeba e sedimentos de fundo do rio (45 amostras), totalizando 185 amostras.

De forma a produzir uma maior representatividade amostral, em complementação ao estudo geoquímico, amostras de rejeitos dos Depósitos Temporários de Rejeito (DTRs) estão sendo caracterizadas com o mesmo protocolo do programa de geoquímica e os resultados foram analisados de forma integrada (78 amostras de rejeitos das pilhas das áreas de espera, número disponível no momento das primeiras interpretações). Ainda nesse contexto para melhorar o diagnóstico em relação as amostras coletadas, uma nova campanha para amostragem de rejeitos em profundidade está sendo executada. Estão previstas coletas de aproximadamente 200 amostras distribuídas em 28 furos ao longo da mancha de rejeitos.

O programa de investigação geoquímica está sendo executado em três fases.

A Fase I engloba a caracterização da composição química, granulométrica e avaliação de atendimento a padrões legais dos rejeitos liberados da barragem B-I (i.e., rejeitos originais e misturados) e solos naturais (amostras para serem utilizadas como referência). O programa de análise compreendeu ainda, testes de lixiviação de curto prazo, incluindo testes relevantes em termos regulatórios (ABNT NBR 10.005/2004 – Lixiviação e ABNT NBR 10.006/2004 – Solubilização) com o objetivo de determinar se o material é tóxico e se é inerte ou não inerte, de acordo com os termos de regulamentação de resíduos sólidos do Brasil (ABNT NBR 10.004/2004).

O programa Fases II e III visa determinar a estabilidade química (i.e., potencial de mobilização de metais a partir da fase sólida para a fase aquosa) dos rejeitos e sedimentos afetados. Os resultados dessas fases possibilitarão o entendimento do potencial de mobilização de metais e a comparação com padrões brasileiros de qualidade da água aplicáveis, no curto e longo prazo. O programa contempla ainda testes para avaliar o potencial de mobilização de metais na água do rio (ABNT NBR 15469:2015), e testes para avaliar o potencial de mobilização de metais sob diferentes condições de pH (i.e., USEPA 1313 e 1316). Análises mineralógicas foram executadas para identificar os hospedeiros mineralógicos de metais em cada amostra, sendo os resultados de extração sequencial usados para identificar a forma mineralógica em que um elemento é mantido, o que fornece informação quanto à sua origem e seu potencial de mobilidade.

Por fim, estão sendo conduzidos testes cinéticos como parte do programa Fase III em um subconjunto de 29 amostras, visando determinar o potencial de mobilização de metais no longo prazo, sob condições atmosféricas e inundadas (submersas). Estes testes encontram-se em execução na data de preparação deste relatório.

As principais conclusões do programa de caracterização geoquímica até o momento foram as seguintes:

- O estudo geoquímico conta com um conjunto de amostras que é representativo do ponto de vista da composição dos materiais presentes nas regiões afetadas pelo rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA;

- Os rejeitos possuem a mais baixa reatividade dentre os materiais analisados no conjunto de dados geoquímicos, devido ao fato de que eles consistem de fases minerais pouco solúveis na natureza. As concentrações de metais-traço nos rejeitos atendem a legislação brasileira de solos em 87% do total de dados avaliados, entretanto, cerca de 60% das amostras excederam ao menos um parâmetro. As amostras RM apresentaram maior atendimento a legislação em relação às amostras CO. Não houve excedentes para rejeitos ou rejeitos misturados em relação a Cr, Hg, Mo, Pb e Zn;
- Os parâmetros com maior quantidade de extrapolações aos limites de referência da legislação foram: Cu, Ba, Co, As e Ni;
- Análises de Cluster (AC) foram utilizadas para agrupar as amostras de rejeitos em grupos (clusters), de acordo com suas similaridades, de modo que dentro do grupo resultante há uma homogeneidade e uma heterogeneidade entre os grupos, possibilitando uma avaliação da efetiva diferenciação das características das amostras entre os rejeitos com características originais e potencialmente misturados. Para auxiliar na interpretação da diferença entre os grupos da AC, foi aplicada a Análise de Componentes Principais (ACP).
- Em geral, as amostras de rejeitos com características originais (CO) foram agrupadas também com amostras de características de rejeitos misturados (RM), exceto para o grupo 1 e pequenos grupos (2, 4 e 7), e subgrupos, onde é possível identificar algumas similaridades quanto a tipologia do rejeito (ex granulometria e etc).
- Este fato indica que as amostras CO e RM possuem características em comum, sugerindo que o grau de mistura com outros materiais não implicou em diferenças significativas como se poderia imaginar inicialmente.
- As amostras podem ser enquadradas em sete grupos, os quais se diferenciaram principalmente em relação aos teores de Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 e MnO .
- Todas as amostras de rejeitos foram classificadas como material Classe II (não perigoso), sendo que a maioria delas classificadas como Inertes (II-B) e algumas como não inertes (II-A) devido ao fato de excederem o padrão de solubilização da Norma ABNT NBR 10.004/2004 para Fe, Mn e Al;
- A mistura do rejeito com solos e sedimentos naturais resulta em material com concentrações de metais traço mais baixas que as verificadas nos materiais não afetados para alguns casos (ex; Cromo nas amostras de sedimentos não afetados). Em relação aos demais metais, o comportamento para as amostras de sedimentos foi também similar às amostras de rejeitos. Apesar disto, de maneira geral, as amostras dos bancos de sedimentos/rejeitos apresentaram concentrações mais elevadas em relação aos rejeitos, para alguns metais (Ba, Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn), mesmo com amplitudes dos dados similares.
- Os resultados das análises das amostras de sedimentos afetados (sedimentos de fundo e acúmulo de rejeitos/sedimentos na calha do rio Paraopeba) sugerem que há influência composicional dos rejeitos nessas amostras. No entanto, quando comparadas aos rejeitos puros, há diferenças em relação à mobilidade dos elementos, avaliada através dos ensaios ABNT NBR 10.004/2004, sendo por vezes mais próxima do comportamento de amostras de solo não afetadas.
- Os resultados sugerem que, assim como os rejeitos, os sedimentos e bancos de sedimentos do rio Paraobepa podem ser uma fonte pontual de Mn para as áreas afetadas, devendo essa característica ser verificada em ensaios em condições mais próximas dos diferentes ambientes geoquímicos deposicionais aos quais esses materiais se encontram depositados.
- Os resultados mineralógicos confirmam a presença de fases minerais menos solúveis nos rejeitos (i.e., hematita e goethita).

- Os resultados indicam que não há correlação direta entre os metais mobilizáveis (avaliados via ABNT NBR 10.004/2004) e os teores totais desses metais nas amostras correspondentes, ou seja, os teores totais dos metais nos materiais avaliados não devem ser utilizados como únicos indicadores do comportamento ambiental dos mesmos em termos de mobilização de metais. Outros ensaios, em outras condições serão também realizados visando avaliar esse tipo de correlação (Fase II e III).

5.3.4 Estudos Hidrogeomorfológicos e Hidrodinâmicos

5.3.4.1 *Mapeamento hidrogeomorfológico do vale do ribeirão Ferro-Carvão: recomposição da situação anterior ao rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA da mina Córrego do Feijão*

➤ **A paisagem da bacia do ribeirão Ferro-Carvão**

A análise hidrogeomorfológica tem por objetivo fornecer as bases geomorfológicas e hidrodinâmicas necessárias à elaboração de um plano de recuperação ambiental da área afetada tendo como referência a paisagem existente antes do rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA da mina Córrego do Feijão.

A área de análise já se encontrava afetada por processos de antropização em estado avançado. Por um lado, várias intervenções do setor de mineração tinham alterado, profundamente, o comportamento natural da rede hidrográfica. Barramentos para retenção de sedimentos alteraram formas de seções de vale e níveis de base dos cursos d'água que compõem a alta bacia: trechos de vales com perfis em "V" e dinâmica de escavação foram transformados em áreas planas, resultados de levantamento do nível de base, localmente, e consequentes assoreamentos suportando áreas lacustres e brejos.

Alguns trechos de estradas assumiam, também, a função de diques de barramentos para retenção de sedimentos gerados na área minerada, com travessias das águas dos córregos conduzidas em manilhas enterradas. Nesses casos, também, os levantamentos dos níveis de base resultaram na formação de áreas brejosas.

Por outro lado, atividades agropastoris ligadas a grande número de fazendas ocuparam várias áreas de vertentes declivosas, terraços aluviais e rampas colúvio-aluviais, para plantios e pastos. O mapeamento topográfico de 1980 já mostrava uma forte ocupação da bacia por este tipo de uso do solo. Finalmente, a visita preliminar ao campo permitiu observar que a maioria das baixas vertentes era coberta por matas secundárias em estágio secundário de regeneração sobre solos extremamente delgados, na classe dos neossolos e, raramente, cambissolos.

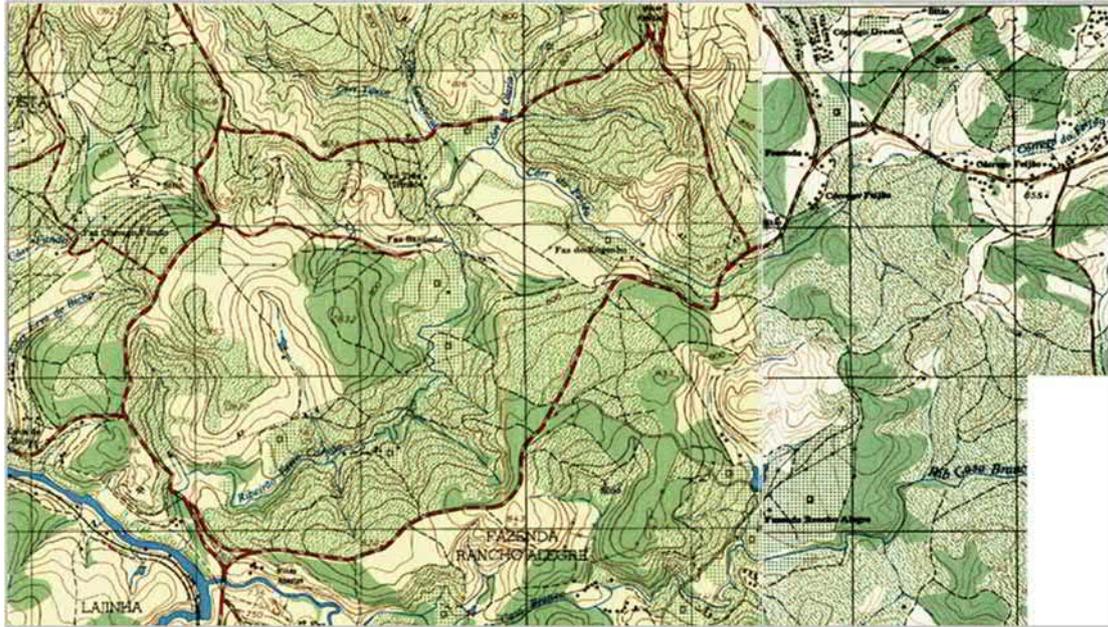


Figura 5.33. Extrato da Carta Topográfica, originalmente na escala de 1:25.000. Folha Brumadinho: SF-23-X-A-II-2-SO (DSG, 1980).

➤ O contexto geológico

A área em estudo está situada na vertente sul da serra Três Irmãos, que é drenada por bacias afluentes da margem direita do rio Paraopeba. Essa serra, junto com várias outras, formam, ao longo de 100 km, um sinuoso alinhamento SW-NE de cristas sustentadas por uma das principais estruturas do Quadrilátero Ferrífero.

Localmente, a serra Três Irmãos configura uma crista sinuosa de, aproximadamente, 20 km, na direção geral WSW-ENE e culminando a 1.450 metros, aproximadamente.

Essa crista, armada pelas rochas das sequências lito-estruturais paleoproterozóicas do Sgr. Minas (quartzitos da Fm. Moeda/Gr. Caraça e Itabiritos da Fm. Cauê/Gr. Itabira, intercalados por filitos da Fm. Batatal/Gr. Caraça), domina o embasamento granito-gnaissico arqueano que abriga a bacia em estudo.

Esta foi moldada nos Gnaisses Souza Noschese (Neoarqueano), que são gnaisses graníticos de granulação média, contendo quartzo e plagioclásio, com clorita, moscovita e biotita como acessórios. O divisor oriental da bacia é constituído (quase exatamente, pois uma pequena porção da sub-bacia do córrego do Feijão o atravessa) pelo contato dessas rochas com os gnaisses do Complexo Bonfim (Mesoarqueano), que são gnaisses graníticos ligeiramente porfíricos.

Nota-se que os interflúvios mais importantes continuam recobertos por depósitos elúvio-colúviais. Esses são, na realidade, lateritas ferruginosas (ou cangas), compostas por fragmentos de itabirito e hematita compacta e cimentados por limonita.

Do ponto de vista estrutural, deve-se notar duas características:

- O contato entre duas unidades geoestruturais: um embasamento granito-gnaissico arqueano ao sul e uma crista homoclinal ao norte, representando um elemento de uma cadeia dobrada proterozóica;

- Um sistema de falhas de idade não definida, no entanto mais jovens que o arranjo lito-estrutural.

No que diz respeito à área da bacia em estudo, são três as direções de falhas reconhecidas no Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero (CODEMIG 2005, Folha Brumadinho): NNW-SSE, NW-SE e NNE-SSW a NE-SW. As duas primeiras direções representam maior interesse para este estudo, pois foram reconhecidas na área da bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

As falhas da direção NNW-SSE controlam os degraus topográficos, e consequentes níveis de base locais, que induziram a localização das barragens B-IV e B-IVA. A direção NW-SE controla a depressão alongada onde foi implantado o povoado de Feijão. Outras ocorrências muito prováveis desta direção foram detectadas pela análise geomorfológica, enquanto controladoras de trechos retilíneos da média bacia e caracterizados por forte instabilidade morfodinâmica. Quanto à direção NNE-SSW a NE-SW, ela aparenta uma expressão mais discreta, sendo, principalmente no controle de trechos da rede hidromorfológica.

➤ Geomorfologia

Organização geomorfológica geral da bacia do ribeirão Ferro-Carvão

A organização geomorfológica da bacia do ribeirão Ferro-Carvão é o claro resultado de intensos processos de dissecação fluvial controlados por:

- Uma forte diferença de resistência lito-estrutural entre as sequências metamórficas proterozóicas e os granitos-gnaisses do embasamento arqueano;
- A maior alterabilidade química das rochas do embasamento arqueano, e
- Processos de soerguimento crustal de escala regional ocorridos em vários pulsos.

Dessa conjunção de fatores da evolução morfogenética resultou um perfil topográfico longitudinal padrão, de direção N-S, onde se nota uma distância de 7.000m para um desnível topográfico de 720m (1.450m na crista para 730m na calha do rio Paraopeba). No entanto, esta descida contém duas partes bastante diferenciadas, pois a escarpa contida entre as cotas de 1.450m e 1.000m (sobre as sequências metamórficas proterozóicas) resulta numa declividade média de 22,5%, enquanto a média e baixa bacia, com percurso em linha reta de 5.000m (sobre o embasamento granito-gnáissico), apresentam uma declividade média de apenas 5,4%, entre as cotas de 1.000m e 730m.

Um quarto fator interveniente na evolução geomorfológica, representado pelos sistemas de falhamento mais recentes, que afetaram ambas as unidades geoestruturais, efetuou seu controle sobre o trabalho da dissecação fluvial no desenho dos vales. Observa-se que, além da sustentação de níveis de base elevados já citados, vários trechos de vales da média bacia se articulam em desenho ortogonal com as direções NW-SE e NNE-SSW a NE-SW.

Metodologia do mapeamento hidrogeomorfológico

O mapeamento hidrogeomorfológico do vale do ribeirão Ferro-Carvão foi elaborado para atender à sua recuperação ambiental, com base na organização de suas paisagens anterior ao espalhamento dos rejeitos ao longo de sua bacia. Nesse sentido, este mapeamento foi limitado à área que foi soterrada pelos rejeitos. Para elaboração deste

trabalho utilizou-se de uma metodologia que articulou as seguintes etapas e respectivas técnicas:

- Leitura das paisagens, em períodos anteriores e posterior ao rompimento, a partir das imagens de satélite existentes na plataforma Google Earth;
- Análise da geologia da área, com base no Mapa Geológico da CODEMIG (Folha Brumadinho), em arquivo vetorial;
- Leitura e interpretação detalhada da paisagem anterior ao rompimento, a partir de imagem de satélite no formato TIFF (2015_worldview_qfer) com boa resolução, fornecida pela Vale;
- Análise do relevo e da hidrografia da região, relativas ao ano 1980, a partir de uma base topográfica (Folha Brumadinho: SF-23-X-A-II-2-SO, DSG, 1980), divulgada pelo IBGE, sob forma de arquivo digital raster, na escala de 1:20.000;
- Análise detalhada da topografia local anterior ao rompimento, com base em uma base topográfica vetorial (encaminhado pela Vale) com equidistância das curvas de nível de 1 (hum) metro;
- Elaboração de vários perfis hidrogeomorfológicos com base nas informações topográficas e geológicas e morfológicas interpretadas;
- Observações de feições hidrogeomorfológicas e materiais litológicos e pedológicos em campo;
- Definição, classificação e implantação cartográfica das feições hidrogeomorfológicas, com base na integração das informações levantadas e dos conceitos de geomorfologia fluvial e de vertentes vigentes.

Resultados do mapeamento

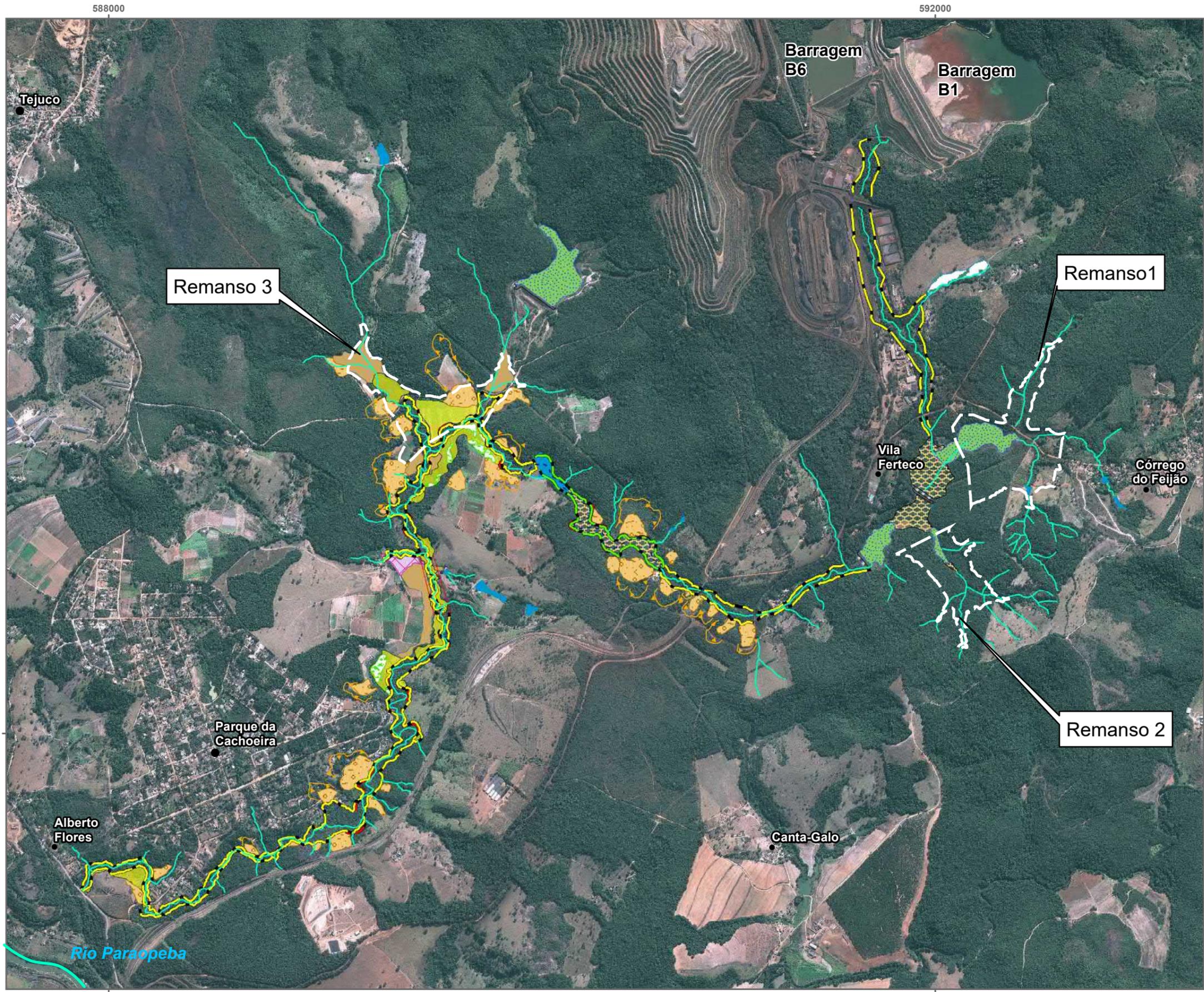
Como paisagem hidrogeomorfológica objeto de reconstituição definiu-se aquela consolidada nos últimos anos que precederam a ruptura da barragem da mina Córrego do Feijão, inclusive assimilando a permanência de alguns elementos de origem antrópica consolidados antes do recobrimento pela lama.

Nesse contexto, considera-se que a configuração paisagística para que o “projeto de recuperação” adquira a finalidade pretendida que inclui dotar a bacia da diversidade fitofisionômica que a caracterizava, considere o retorno de uma dinâmica que envolva o retorno de ambientes florestais, de áreas de brejos e alagados como instrumentos de um projeto que integre uma visão mais ampla de “diversificação ecológica” nessa paisagem.

A identificação e implantação cartográfica das feições hidrogeomorfológicas considerou a sua posição morfológica, entre vertente e fundo de vale; sua origem, entre natural e indução antrópica; e, seu processo de formação, entre dissecação e deposição. Essas feições serão descritas, a seguir, com base nesses critérios de classificação.

A Figura 5.34 apresenta o mapeamento das feições hidrogeomorfológicas identificadas na área de estudo.

Figura 5.34. Mapeamento hidrogeomorfológico da área afetada pelo rejeito.



- Legenda**
- Sede Municipal
 - Localidade
 - Aglomerado Rural Isolado
 - Limite Municipal
 - Hidrografia
 - - - Curso d'água entulhado
 - Borda do canal
 - Borda de canal assoreada
 - Margem de canal frágil
 - ▲ Cicatriz de movimento de massa
 - Queda d'água
 - Plano d'água
 - Alagado de barramento
 - Brejo natural
 - Depressão de transbordamento
 - Planície de assoreamento
 - Rampa de cplúvios
 - Planície aluvial natural
 - Área de intervenção especial
 - Leque aluvial
 - Terraço alto
 - Terraço baixo
 - Estrutura de barragem
 - Talude de barragem

7772000

7772000

588000

592000



Base Cartográfica (Fonte): limites políticos (IBGE, 2015); hidrografia (IGAM, 2002).

Sistema de Coordenadas: SIRGAS 2000 UTM Zone 23S
 Projeção: Transverse Mercator
 Datum: SIRGAS 2000

1:19.000



Projeto:

**PLANO DE RESTAURAÇÃO AMBIENTAL
 BACIA DO RIBEIRÃO FERRO-CARVÃO**



Título:

Figura 11: Mapeamento Hidro-geomorfológico da área afetada pelo rejeito

Elaboração:

Geoprocessamento Amplo

Data:

05/08/2020

Formato:

A3

Arquivo:

- Feições de Fundo de Vale

São trechos de fundos de vale encaixados e florestados, mapeados como canal considerando a dificuldade de observação real devido à densa cobertura florestal. Importante destacar que, na realidade, trata-se de leitos maiores fortemente encaixados, podendo representar:

- Na alta bacia, trechos de fundos de vales em forma de “V”, profundos (até 20m. na alta bacia) e estreitos, encaixados na rocha local, com vertentes muito íngremes;
- Na baixa bacia, trechos de fundos de vales planos com vertentes íngremes, largos de até 150m, abrigando pequenas várzeas com leitos menores meandantes, mapeáveis por análise fina da imagem em interação com a base topográfica e confirmados por representações topo-hidrográficas dos anos 1980.

- Áreas Úmidas e Brejosas

São áreas planas como resultados de bacias de represamento assoreadas pelos sedimentos oriundos da erosão em zonas de montante, incluindo domínios de mineração, podendo corresponder:

- Área de barramento por barragens como no caso das barragens B-IV e B-IVA situados na alta bacia. Nesses casos, a passagem da lama ligada à ruptura da barragem, destruiu as estruturas de barragem e raspou os sedimentos acumulados, transportando-os para jusante, sendo substituídos por acumulações de rejeitos. Não deve, portanto, esperar vestígio deposicional da situação anterior;
- Áreas de retenção de sedimentos barradas por pequenos diques ou aterro de estradas como no caso da média bacia. Nesses casos, sendo que as áreas se situam em zonas de remanso, é provável que as acumulações sedimentares tenham sido parcialmente preservadas por baixo de uma delgada cobertura de rejeitos depositada com baixa energia.

- Feições de terraços Aluviais

São pequenas áreas planas bordejadas por taludes subverticais e dominando o canal fluvial, cuja origem foi relacionada com a evolução natural do vale do ribeirão Ferro-Carvão: formação de uma planície aluvial com abandono posterior, em nível mais elevado, na ocasião de um aprofundamento do canal relacionado com uma variação do nível de base local ou regional.

- Terraço alto correspondendo ao nível mais elevado e mais antigo dos testemunhos de deposição fluvial, e que representam poucas ocorrências;
- Terraço baixo correspondendo ao nível intermediário e de idade também intermediária dos testemunhos de deposição fluvial, e que representam um número significativo de ocorrências;
- Planície de inundação natural, correspondendo ao nível mais baixo e de idade mais nova dos testemunhos de deposição fluvial, e que representam as áreas de inundação periódica ocasionada pela subida das águas do ribeirão Ferro-Carvão, durante as cheias da estação úmida.

- Rampas de colúvio e colúvio-aluviais

Correspondem a áreas das baixas encostas, com formas de anfiteatro aberto e perfil suavemente côncavo, correspondendo locais de escorregamentos, lentos ou rápidos, de solos e coberturas coluviais, podendo se conectar com níveis de terraços altos ou baixos. Frequentemente, se encontravam utilizadas como áreas de cultivo e/ou pasto, por apresentar declividades baixas, solos mais desenvolvidos e maior retenção de umidade.

- Áreas Alagadas

Trata-se, geralmente de áreas com planos de água livre resultantes de barramentos com assoreamentos, sendo, portanto, feições antrópicas.

Considerações Finais

Deve-se ressaltar as dificuldades encontradas na realização da caracterização das feições geomorfológicas. Em primeiro lugar, a imagem “2015_worldview_qfer” mostrou fundos de vales cobertos por vegetação arbórea que ocultou a visibilidade exata das bordas dos canais fluviais, dificultando sua delimitação com o grau de exatidão desejável. Em segundo lugar, a base topográfica digital fornecida mostrou uma topografia influenciada por essa mesma cobertura florestal, principalmente nos fundos de vales mais fechados, dificultando a aquisição da exatidão desejada. Finalmente, as observações de campo só permitiram adquirir visões de conjunto, pois os fundos de vales estavam cobertos pelos rejeitos. Porém, a observação de trechos de canais situados a montante das áreas soterradas permitiu fazer-se avaliações razoáveis dos trechos soterrados. Análises de porções de vertentes e alguns fragmentos de terraços e rampas coluviais ou colúvio-aluviais forneceram valiosas informações sobre as formações superficiais anteriormente existentes

Esse mapeamento representou o resultado do máximo esforço em fornecer uma imagem da paisagem anterior à ruptura da barragem e consequente derramamento de lama que ocultou a parte baixa da paisagem. Considerando a escala espacial necessária à adoção de um projeto de recuperação com o cortejo de medidas de intervenção da engenharia, é necessário levantamentos de base que favoreçam a aplicação de projetos executivos.

5.3.4.2 Estudos hidrológicos

Quanto aos estudos hidrológicos desenvolvidos para obtenção das vazões de margens plenas, foram observadas as peculiaridades de cada trecho como as variações entre calhas encaixadas e regiões com planícies de inundação. A vazão de margens plenas é a vazão em que o escoamento começa a extravasar a calha principal do curso de água e acessar as planícies de inundação. Conceitualmente, a vazão de margem plena é equivalente a vazão de formação do canal. Para obtenção da descarga líquida nos trechos de interesse foram utilizados períodos de retorno utilizados variaram entre TR 1,02 a TR 5 anos, devido à recorrência em que esse intervalo de tempo de retorno aparece na literatura para esse tipo de dimensionamento.

Não existe um consenso universal para definição da vazão de margens plenas na metodologia de dimensionamento da calha. Indicadores de campo podem ser utilizados para determinar as dimensões da calha de margens plenas. As dimensões do canal nos trechos dos cursos de água que não foram impactados podem ser utilizados como referência, ou então, cursos de água de mesmo porte próximos.

Frequentemente a vazão de margens plenas é associada a um tempo de recorrência específico. Wolman e Leopold (1957) sugeriram a utilização da recorrência entre 1 e 2 anos. Dury (1973) concluiu que é 97% da vazão com tempo de retorno de 1,58 anos. Hey (1975) calculou para três cursos de águas britânicos preponderantemente de cascalho o valor de 1,5 anos. Richard (1982) sugeriu 1 ano. Leopold (1994) em revisão de literatura constatou que a faixa de variação é de 1 a 2,5 anos. Evidentemente que na natureza ocorrem exceções, como constatado por Pickup and Warner (1976) e Williams (1978) que notificaram cursos de água com margens plenas de 5 a 10 anos de vazões de recorrência. Um curso de água considerado em equilíbrio não significa que em curtos espaços de tempo não ocorrem variações da calha causado por erosão ou deposição, portanto, medições em campos podem ocorrer em ocasiões que a calha sofreu alteração devido a eventos de escoamento menos frequentes. Esse princípio levou Williams (1978) a calcular calhas com tempo de recorrência de até 200 anos.

Adotar o valor da vazão de margem plenas com tempo de recorrência entre 1,02 a 5 anos é razoável para projetos em nível conceitual. Porém, para implantação do canal é fortemente recomendado que um levantamento de campo seja realizado de maneira sistemática e aprofundada, principalmente para cursos de água que sofreram grandes impactos, como em áreas urbanas e de minas, conforme repostado pelo Grupo de trabalho da agência federal de restauração de cursos de água (FISRWG, 1998).

Para dimensionamento da calha do curso de água algumas importantes características geométricas e estruturais devem ser consideradas no processo. De maneira geral as principais são: A formação do vale topográfico, a conectividade ambiental e o porte do curso de água. Em relação aos vales, importantes aspectos são a conexão dos afluentes com o curso de água principal, declividade laterais dos talvegues e dos trechos com presença de inundação recorrente.

A definição do dimensionamento da calha do curso de água envolve definir a sua largura e profundidade média. O seu cálculo abrange critérios de vazão, sedimento, granulometria do leito, cobertura vegetal, resistência ao escoamento e declividade média. Além do mais, características específicas in loco de cursos de água de referência também devem ser sempre consideradas para avaliar o dimensionamento proposto, porém, não tirando do foco que cursos de água similares devem ser utilizados apenas como referência e avaliação do dimensionamento proposto no curso de água impactado. O nível de incerteza tende a diminuir quanto maior o número de cursos de água de referência utilizado. Para propiciar riqueza e diversidade biofísica, o curso de água deve apresentar variações geométricas, principalmente em relação a largura, profundidade e declividade, resultando dessa forma em convergência e divergência das linhas de fluxo.

5.3.5 Avaliação de áreas prioritárias para conectividade: análises de ecologia da paisagem

Após o levantamento da topografia primitiva e do mapeamento das características hidrogeomorfológicas foram analisadas, à luz da cobertura vegetal e do uso do solo presente na bacia do ribeirão Ferro-Carvão anterior ao rompimento da barragem, a realidade atual em termos de rupturas ocorridas na conectividade das formações naturais, bem como na identificação de áreas de outros usos que possam ser restauradas de modo a garantir maior funcionalidade ao contexto da biodiversidade presente na área de estudo.

5.3.5.1 Metodologia

As análises de Ecologia da Paisagem foram utilizadas como ferramenta de diagnóstico

para a região da bacia do ribeirão Ferro-Carvão com o objetivo de apoiar as ações de recuperação florestal tanto na área diretamente afetada com o rompimento da barragem, quanto na bacia como um todo, priorizando a área onde a vegetação original era predominantemente de Floresta Estacional Semidecídua (FES). Embora o foco principal seja a área atingida pelo rejeito, essa recomendação na bacia pode ampliar as ações de recuperação florestal.

A identificação de áreas prioritárias para a recuperação florestal da FES foi o primeiro passo para elaboração do plano. Essa etapa se iniciou com a análise do uso e cobertura do solo, a fim de explorar, descrever e compreender quais são os principais pontos da área de estudo que devem ser considerados e por onde se deve iniciar as ações de recuperação florestal das áreas originalmente ocupadas pela FES. Para tanto os dados de uso e cobertura do solo antes e depois do rompimento da barragem foram comparados a fim de embasar o estudo de áreas prioritárias.

➤ **Análise de matriz de transição para a área de estudo**

A fim de analisar com maior profundidade a alteração na paisagem, foi feita uma matriz de transição (matriz de *Markov*) para a comparação dos dois períodos. A matriz de transição permite compreender e quantificar quais classes foram convertidas para outro tipo de uso e cobertura do solo após o rompimento da barragem. Esta análise permite afirmar o quanto de cada classe de uso e cobertura do solo foi tomada pelos rejeitos oriundos do rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA da mina do Córrego do Feijão.

A análise de priorização de áreas para recuperação florestal considerou uma série de fatores que foram selecionados e avaliados a fim de representarem os objetivos de recuperação florestal e conservação da bacia. Um destes fatores é a recuperação da área que foi tomada pelo rejeito da barragem, que originalmente era ocupada por Floresta Estacional semidecídua (FES). Deste modo, estas regiões constituíram uma camada (dentre outras) dentro da análise de áreas prioritárias para recuperação florestal, favorecendo primeiro a aquelas que já eram naturais de FES antes do rompimento da barragem e apoiando o controle de processos erosivos.

➤ **Métricas da paisagem após o rompimento da barragem na bacia do ribeirão Ferro-Carvão**

A paisagem da bacia após o rompimento das barragens foi analisada segundo as métricas de classes de uso e cobertura do solo, visando definir as áreas prioritárias de conservação e recuperação florestal na área afetada e originalmente ocupada pela FES. As métricas calculadas foram: área total da classe em hectares (CA), porcentagem da classe na paisagem PLand.

A perda de habitat foi calculada por meio da matriz de transição e foi incorporada na análise de priorização de áreas para recuperação florestal. Já a fragmentação da paisagem foi avaliada por meio do cálculo de outras métricas da paisagem como: número de manchas (NumP), tamanho médio das manchas (MPS), tamanho mediano das manchas (MedPS) e desvio padrão do tamanho das manchas (PSSD).

➤ **Análise de áreas prioritárias para restauração florestal na bacia do ribeirão Ferro-Carvão**

Após a análise dos dados, descrição e reconhecimento das principais condições da paisagem, foi realizada uma avaliação para eleger quais benefícios ecológicos se pretende promover com a recuperação florestal das áreas originalmente ocupadas pela

FES (Tabela 5.4). Os benefícios definidos devem ser representativos dos objetivos de conservação e recuperação florestal da bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

Tabela 5.4. Benefícios esperados com a restauração na bacia do ribeirão Ferro-Carvão das áreas originalmente ocupadas por Floresta Estacional Semidecidual, para compor a análise de priorização de áreas para restauração florestal.

| Benefícios | Variável representativa | Dados e análises SIG para elaborar as camadas | Nome da camada | Peso |
|---|---|---|---|------|
| Recuperação da área terrestre diretamente afetada pelo rompimento das barragens | Área terrestre diretamente afetada | Shape de uso e cobertura do solo, polígono da área de rejeito | Área terrestre diretamente afetada | 3 |
| Proteção dos recursos hídricos | APP | Dados de hidrografia (IBGE) e APPs | Água | 3 |
| Conservação da Biodiversidade | Conectividade e corredores ecológicos | Análise de conectividade | Biodiversidade | 2 |
| Recuperação de áreas degradadas e improdutivas | Áreas degradadas, abandonadas ou com baixa aptidão agrícola | Dados de uso do solo e declividade | Áreas degradadas ou de baixa aptidão agrícola | 1 |

A análise de áreas prioritárias está baseada na espacialização desses benefícios, sendo que foram selecionadas como prioritárias as áreas que mais promovem benefícios ecológicos e que necessitam de restauração. Os benefícios foram representados em camadas em ambiente SIG e expressaram a informação sobre o nível de importância para a restauração florestal das diferentes localidades da bacia de acordo com o objetivo que se pretende atingir.

Benefícios considerados de maior importância para a restauração florestal receberam maiores pesos de importância dentre as camadas. Para a bacia do ribeirão Ferro-Carvão, levando em consideração principalmente a situação do rompimento das barragens, foram elencados quatro benefícios que foram representados em mapas para compor camadas em ambiente SIG (Figura 5.35).



Figura 5.35. Representação da análise multicritério de combinação linear ponderada para identificar áreas prioritárias para restauração florestal na bacia do ribeirão Ferro-Carvão, que eram originalmente ocupadas por Floresta Estacional Semidecídua (FES). Cada camada representa um benefício que se pretende promover com a restauração florestal, com diferentes pesos de importância. A soma das camadas gerou o mapa de benefícios ecológicos, que quando cruzado com os dados do mapa de uso e cobertura do solo, gera o mapa de Áreas Prioritárias para conservação.

Baseado nessas informações, cada benefício que se pretende promover com a recuperação florestal foi representado em um mapa, elaborado a partir do conjunto de dados geoespaciais secundários levantados contendo informações ambientais. Para gerar esses mapas (camadas) representativos dos benefícios, os dados geoespaciais foram reclassificados em níveis de importância de recuperação florestal (que variaram entre 0 - 100), de acordo com o objetivo que se pretende atingir. Áreas de extrema importância para a recuperação receberam o valor máximo de importância dentro da camada (100) e áreas em que a recuperação florestal apresentou baixa importância, considerando o benefício e camada em questão, foi atribuído o valor zero. Valores intermediários entre 0 e 100 foram determinados em camadas que apresentaram dados não binários, como a camada de biodiversidade e a camada áreas degradadas, abandonadas ou de baixa aptidão agrícola.

Deste modo, a camada água, que representa a proteção dos recursos hídricos por meio da localização das áreas de preservação permanente, constituiu um *layer* em que as APPs foram classificadas como de extrema importância para restauração florestal, com valor 100; e o restante da bacia recebeu o valor zero. Já a camada Biodiversidade, por exemplo, foi classificada em níveis de importância para a restauração florestal por meio do resultado da análise de conectividade, índice de probabilidade de conectividade (PC) dividido em cinco quantis (quintis). Foi considerado que quanto mais importante para a conectividade (quanto maior o valor de PC e mais alto o quintil), mais importante a região é para a restauração florestal, pois irá promover maior conservação da biodiversidade. Assim, o quintil superior (valores mais altos de PC) recebeu valor de importância 100, o segundo quintil mais alto, 75; o terceiro 50, o quarto 25 e o quintil inferior recebeu o valor de importância 0. As camadas estão descritas nos tópicos a seguir, onde é feito um detalhamento sobre como foi realizada a atribuição dos valores de importância dentro de cada uma delas.

Ao elaborar as camadas representativas dos benefícios, os mapas foram convertidos para *raster* com resolução de 0,5m. Além da variação dos valores de importância dentro das camadas (0 - 100), foram definidos pesos de importância dentro das camadas. Os pesos de importância comparam as camadas entre si, considerando que alguns benefícios ecológicos são de maior interesse para a bacia do que outros. Deste modo, cada camada recebeu um peso de importância considerando os objetivos de recuperação florestal e conservação da bacia. A relevância dos pesos de importância das camadas foi representada em uma escala de 1 a 3, sendo 3 uma camada de grande

importância. Foi considerado que para este estudo, as camadas Área terrestre diretamente afetada e Água são de grande importância para a priorização de ações de restauração florestal (peso 3), depois a maior importância se dá para a camada Biodiversidade (peso 2) e; por fim, a camada Áreas degradadas, abandonadas ou de baixa aptidão agrícola (Peso 1). O critério para definição dos pesos de importância das camadas também é descrito com maiores detalhes nos itens de cada camada.

Após a atribuição de pesos, foi realizada uma análise multicritério de combinação linear ponderada por meio de álgebra de mapas em ambiente SIG. As camadas com os pesos atribuídos foram somadas a fim de identificar quais regiões atendem à maior quantidade de benefícios. Esse mapa de benefícios foi então cruzado com o mapa de uso e cobertura do solo a fim de definir quais áreas deverão ser priorizadas para recuperação florestal.

a) Camada: Área Terrestre Diretamente Afetada

A camada Área Terrestre Diretamente Afetada tem como objetivo promover o benefício de recuperação das áreas que foram tomadas pelo rejeito com o rompimento das barragens. Dentro da camada, esta área invadida pelo rejeito foi considerada como de extrema importância para recuperação florestal com o propósito principal de apoiar o controle de processos erosivos no ribeirão Ferro-Carvão, além de recuperar a vegetação nativa da FES que existia antes do rompimento. À área ocupada pelo rejeito foi atribuído o valor de extrema importância (100) e para o restante da bacia foi atribuído o valor zero de nível de importância para restauração florestal. A área ocupada pelo rejeito foi identificada por meio do *shape* de uso do solo (Figura 5.36). Dentre as quatro camadas avaliadas, essa camada recebeu o mais alto peso de importância (peso 3) na análise multicritério de combinação linear ponderada, juntamente com a camada água.

Camada ÁREA TERRESTRE DIRETAMENTE AFETADA – Peso 3



Figura 5.36. Camada Área Terrestre Diretamente Afetada e os níveis de importância para restauração florestal desta camada. A região da área afetada pelos rejeitos, que originalmente era ocupada por Floresta Estacional semidecídua (FES), é definida como de extrema importância para restauração florestal desta camada.

b) Camada: Água

A camada água representa áreas que se forem restauradas irão promover o benefício proteção dos recursos hídricos. A identificação dessas áreas e a definição dos níveis de importância para recuperação florestal foi feita por meio do cálculo da distância da área ao curso d'água e com base na Lei de Proteção da Vegetação Nativa (Brasil, 2012), que estabelece que áreas próximas aos corpos hídricos devem ser preservadas e constituídas por vegetação nativa original, que nesse caso era a Floresta Estacional Semidecidual. As áreas de preservação permanente (APP) foram definidas como de extrema importância para recuperação florestal na bacia do ribeirão Ferro-Carvão (valor de importância 100). Esta camada foi elaborada a partir dos dados de hidrografia do IBGE e as nascentes foram delimitadas. Foi gerado um buffer de 30 metros para cursos d'água e 50 metros para nascentes de acordo com as determinações da Lei de Proteção da Vegetação Nativa. Considerou-se que todas as APPs contribuem para a proteção dos recursos hídricos e tem a mesma importância. As localidades que não foram englobadas pelas APPs receberam baixo valor de importância para a restauração florestal (Figura 5.37). Um refinamento foi feito para as APPs da bacia ao considerar a informação de que nas áreas em que há mineração na bacia não existe mais corpos hídricos. Como não há mais essa hidrografia, as áreas de APPs foram excluídas das regiões classificadas como de mineração no mapa de uso e cobertura do solo.

A proteção dos recursos hídricos é de grande importância para a bacia, visto o impacto que o rompimento ocasionou nos cursos d'água. Ações de recuperação florestal que busquem promover o benefício proteção dos recursos hídricos são essenciais para que a bacia seja reestabelecida e seus fluxos biológicos retomados. Por esses motivos, a camada Água também recebeu peso 3 na análise multicritério de combinação linear ponderada (maior peso), salientando sua grande importância para recuperação florestal na soma das camadas representativas dos benefícios que se pretende promover.

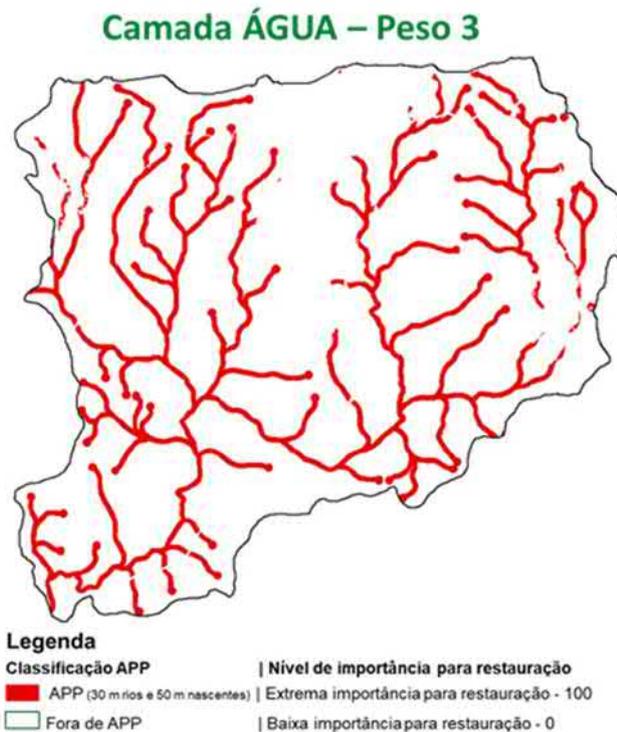


Figura 5.37. Camada Água representando a importância da proteção dos recursos hídricos para a análise de priorização da bacia do ribeirão Ferro-Carvão. As áreas de preservação permanente (APP), que eram originalmente ocupadas por Floresta estacional Semidecidual, foram classificadas como de extrema importância para restauração florestal nesta camada de análise. Foram excluídas as APPs que caíram em área de mineração, em função de que não há mais corpos d'água neste tipo de uso do solo da bacia. Fonte de dados de hidrografia: IBGE.

c) Camada: Biodiversidade

Esta camada representa o benefício conservação da biodiversidade e define as áreas que se restauradas irão promover aumento da conectividade da paisagem e o estabelecimento de corredores ecológicos. Foi realizada a análise de conectividade segundo Tambosi et al. (2014) para o cálculo do índice de probabilidade de conectividade. Quanto maior o índice de probabilidade de conectividade, mais importante para a conectividade e estabelecimento de corredores ecológicos é a área. A identificação das áreas com maior conectividade define os locais com maior importância para a recuperação florestal, considerando que são áreas cruciais para a conservação da biodiversidade.

A análise de conectividade, foi feita utilizando os conceitos de Teoria dos Grafos, conforme proposto por Urban & Keitt (2001). Segundo esta teoria, um grafo é um conjunto de nós e ligações que conecta esses nós. Para a análise da paisagem, os fragmentos florestais são considerados como nós e a conectividade entre eles é representada pelas ligações (Figura 5.38).

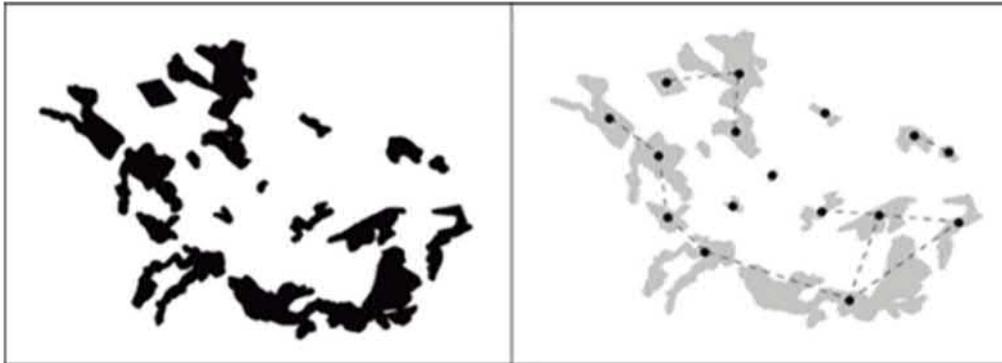


Figura 5.38. Representação esquemática da paisagem segundo a teoria dos grafos. Os fragmentos, nesse caso de Floresta Estacional Semidecidual, são representados por pontos e as linhas tracejadas representam as ligações. Adaptado de Tambosi et al., (2013).

Os nós incluem como parte de suas informações atributos como a área total do fragmento de Floresta Estacional semidecídua (FES) e de outros tipos vegetacionais, que é fator essencial a ser considerado na análise de conectividade, quando consideramos biodiversidade. Deste modo, não somente toda a área da bacia do ribeirão Ferro-Carvão foi avaliada, mas também a extensão dos fragmentos florestais da FES e de outros tipos vegetacionais fora deste limite, que somados com a área da bacia, abrangem 5.420ha. Esta abordagem que abarca toda a extensão dos fragmentos que estão localizados na bacia é de extrema importância para que o resultado seja representativo da paisagem. Os fragmentos fora do limite da bacia que foram incorporados são provenientes do atlas SOS Mata Atlântica de 2013/2014 e que fazem contato com os fragmentos da bacia (Figura 5.39).

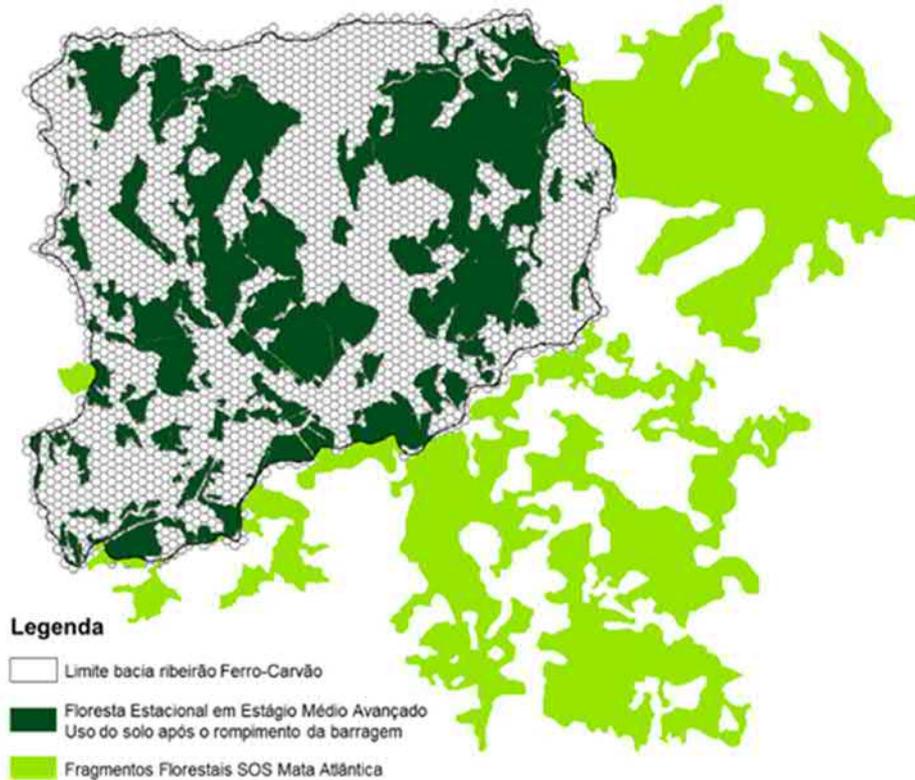


Figura 5.39. Fragmentos florestais (de todos tipos vegetacionais) considerados para a análise de conectividade da paisagem da bacia do ribeirão Ferro-Carvão, com foco na biodiversidade. A fonte para os fragmentos fora da área da bacia, são: SOS Mata Atlântica 2013/2014.

A análise de conectividade da paisagem simula a criação de fragmentos florestais e calcula o incremento da conectividade para essas áreas. Os fragmentos florestais simulados, foram criados em formato hexagonal e para o estudo desta área a análise mais refinada possível foi a simulação de geração de áreas restauradas com 1 hectare (Figura 5.40).

Depois da criação dos hexágonos, a simulação foi realizada no *software* Conefor Sensinode 2.6. O programa simula a criação de áreas restauradas (cada um dos hexágonos em branco se torna floresta) e então calcula-se o índice de conectividade (probabilidade de conectividade - PC) para cada situação simulada. Para esta análise considerou-se a probabilidade de 50% de um organismo cruzar uma distância de 50 metros entre fragmentos de estágio médio/avançado, segundo método utilizado por Tambosi et al. (2014). Este valor de 50 metros foi adotado com base nos dados de literatura de deslocamento de organismos com sensibilidade intermediária à fragmentação da Mata Atlântica como pequenos mamíferos e aves de sub-bosque (Awade & Metzger, 2008, Boscolo *et al.*, 2008).

O resultado da análise indicou onde a restauração florestal vai promover maior incremento da conectividade para a paisagem. A categorização dos dados para compor a camada biodiversidade foi feita com a reclassificação de valores de PC atribuídos aos hexágonos, agrupados em cinco classes de quantil (quintis) (Figura 5.40). O quintil superior, que apresenta é o que mais irá contribuir para a conectividade da bacia e por isso recebeu o valor de importância mais alto: 100. Por este mesmo motivo, este quintil também irá compor o corredor ecológico calculado para a bacia. Os demais quintis de

PC foram reclassificados dos quintis mais altos até o quintil inferior que recebeu o valor zero (Tabela 5.5).

Tabela 5.5. Valores de importância de recuperação florestal das áreas originalmente ocupadas por Floresta Estacional Semidecidual, atribuídos ao resultado da análise de conectividade.

| Variação da Probabilidade de conectividade (PC) | Nível de importância atribuído à camada considerando o benefício conservação da biodiversidade |
|---|--|
| Quintil superior: $3,759 \times 10^{-3}$ a 1 | 100 |
| Segundo quintil: $2,787 \times 10^{-3}$ a $3,756 \times 10^{-3}$ | 75 |
| Terceiro quintil: $1,994 \times 10^{-3}$ a $2,781 \times 10^{-3}$ | 50 |
| Quarto quintil: $1,039 \times 10^{-3}$ a $1,993 \times 10^{-3}$ | 25 |
| Quintil inferior: 0 a $1,035 \times 10^{-3}$ | 0 |

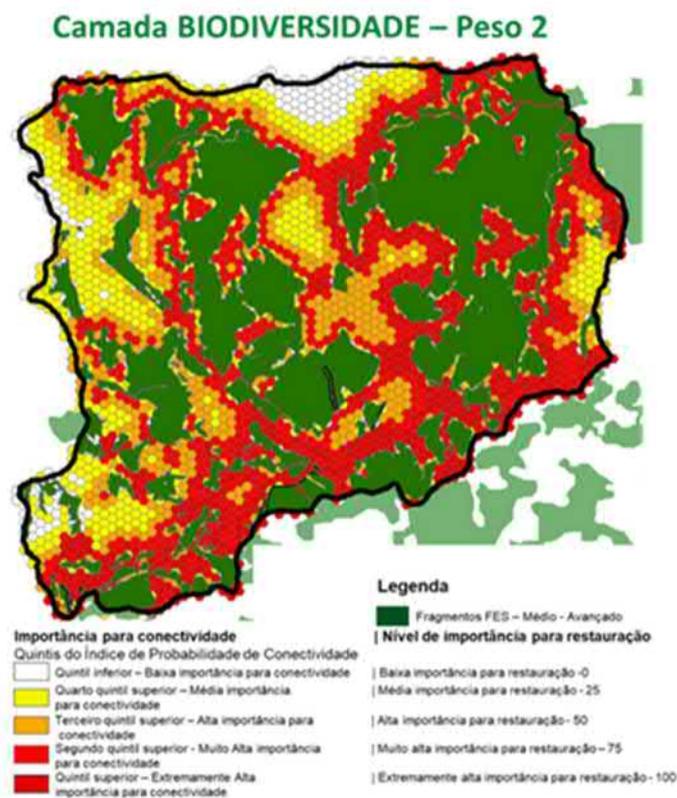


Figura 5.40. Camada Conservação da biodiversidade gerada por meio da reclassificação dos valores de importância para restauração florestal das áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional Semidecidual.

Na análise de priorização de áreas para recuperação florestal da bacia, o benefício conservação da biodiversidade é uma camada importante e por isso recebeu o peso 2 de importância na análise multicritério de combinação linear ponderada. Os valores das camadas foram transformados em *raster* a fim de compor a análise de priorização.

Além de compor a camada de conectividade para a análise de priorização de áreas para recuperação das áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional Semidecidual, esta análise de conectividade também pode definir corredores ecológicos para a bacia. Para esta delimitação do corredor, definiu-se que ele deve ser composto pelo quintil superior de valores de PC, visto que se restauradas, essas áreas são as que mais promoverão a conectividade na paisagem. Esta delimitação também promove a conectividade estrutural da paisagem da bacia, ligando estruturalmente todos os fragmentos de Floresta Estacional semidecídua Médio/Avançado. Como a fragmentação da paisagem é o segundo fator determinante para a manutenção da biodiversidade, atrás da perda de habitat, considerou-se também importante para o corredor ter uma área de interesse além do limite definido pelo quintil superior dos valores de PC, localizando também os segundos maiores valores do quintil de PC (Figura 5.42). Ao adotar também essa área de interesse, o corredor promoverá ligações mais robustas entre os fragmentos da paisagem, estruturando mais fortemente o corredor.



Figura 5.41. Proposição de Corredor Ecológico a partir dos resultados da análise de conectividade. A maior distância dentro de cada hexágono é de 124 metros.

d) Camada: Áreas Degradadas, Abandonadas ou de Baixa Aptidão Agrícola

Essa camada tem como propósito representar o benefício de recuperar áreas degradadas e promover a recuperação florestal em locais degradados e improdutivos, nos quais cultivos, pastagens, mineração, entre outros, não são mais rentáveis. O objetivo é promover a recuperação das áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional Semidecidual, mas que atualmente são áreas agrícolas de baixa aptidão, baixa produtividade ou baixo retorno econômico. Nestes casos a opção é de sua

reocupação com vegetação nativa da FES, aumentando assim, a porcentagem de vegetação nativa da bacia e promovendo a recuperação de áreas. Essa recuperação florestal poderia ser feita inclusive com fins econômicos, dentro do conceito de Reserva Legal, que traria maior rendimento econômico que a atividade agrícola atual. Esta camada foi elaborada a partir do pressuposto de que quanto mais declivosa a área, menos apta para produção ela é, e, portanto, mais prioritária para restauração florestal. Áreas de solo exposto também foram consideradas inaptas para produção, definidas como área degradada, embora possam ser áreas com preparo de solo para plantio (Figura 5.42).

Dados utilizados para compor a camada Áreas degradadas, abandonadas ou de baixa aptidão agrícola

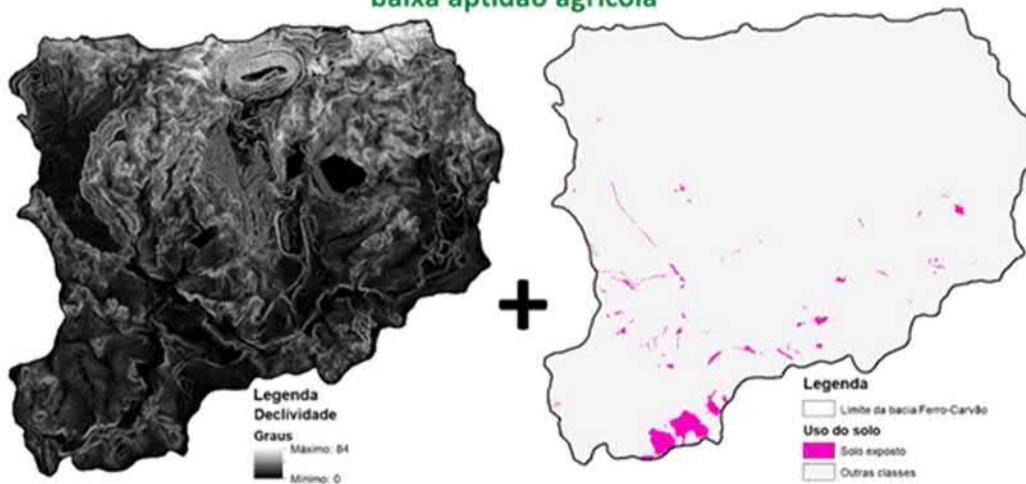


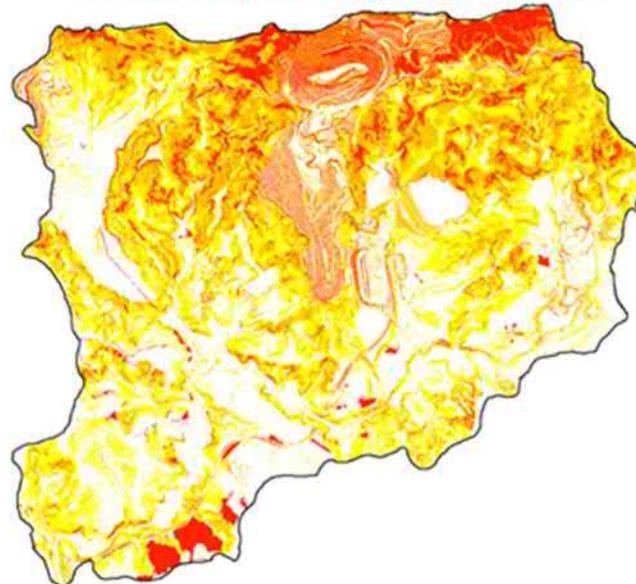
Figura 5.42. Dados de declividade em graus à esquerda e localização das áreas de solo exposto em ambiente declivoso no mapa de uso do solo após o rompimento das barragens.

Para a composição da camada, as áreas de solo exposto foram definidas como de extrema importância para restauração florestal e receberam o valor máximo de nível de importância (100). As demais áreas da bacia foram classificadas de acordo com a declividade: quanto mais declivosa, maior a importância para restauração florestal (Tabela 5.6) (Figura 5.43).

Tabela 5.6. Valores de importância para restauração florestal das áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional Semidecidual, atribuídos de acordo com a declividade para a área da bacia do Ferro-Carvão.

| Declividade em graus | Nível de importância para restauração florestal atribuído à camada |
|----------------------|--|
| > 30 | 100 |
| 15 - 30 | 70 |
| 8 - 15 | 50 |
| 0 - 8 | 20 |

Camada Áreas degradadas, abandonadas ou de baixa aptidão agrícola – Peso 1



Legenda
Áreas degradadas, abandonadas | Nível de importância para restauração e baixa aptidão agrícola
Determinação das áreas

| | |
|---|--|
|  Declividade 0 – 8° | Baixa importância para restauração - 20 |
|  Declividade 8 – 15° | Média importância para restauração - 50 |
|  Declividade 15 – 30° | Alta importância para restauração - 70 |
|  Solo exposto ou declividade > 30° | Extremamente Alta importância para restauração - 100 |

Figura 5.43. Camada: áreas degradadas, abandonadas ou de baixa aptidão para a bacia Ferro-Carvão. Dados de solo exposto e declividade reclassificados para compor a camada.

➤ Definição das áreas prioritárias para recuperação florestal

A análise de priorização de áreas para recuperação florestal das áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional semidecídua foi realizada por meio da análise multicritério com combinação linear ponderada considerando as quatro camadas descritas anteriormente para gerar o mapa de benefícios ecológicos. Este mapa de benefícios, cruzado com o mapa de uso e cobertura do solo gerou o mapa final de áreas prioritárias para recuperação florestal.

A fim de obter um resultado representativo da realidade e da importância para a recuperação florestal das áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional semidecídua da bacia Ferro-Carvão, foram atribuídos pesos para as camadas. A camada Área Terrestre Diretamente Afetada e a camada Água receberam o maior peso de importância (3), seguida pela camada Biodiversidade que recebeu peso 2 e a camada Áreas degradadas, abandonadas ou de baixa aptidão agrícola, com peso 1. Após a incorporação dos pesos, as camadas foram somadas em ambiente SIG por meio de álgebra de mapas (Figura 5.44).

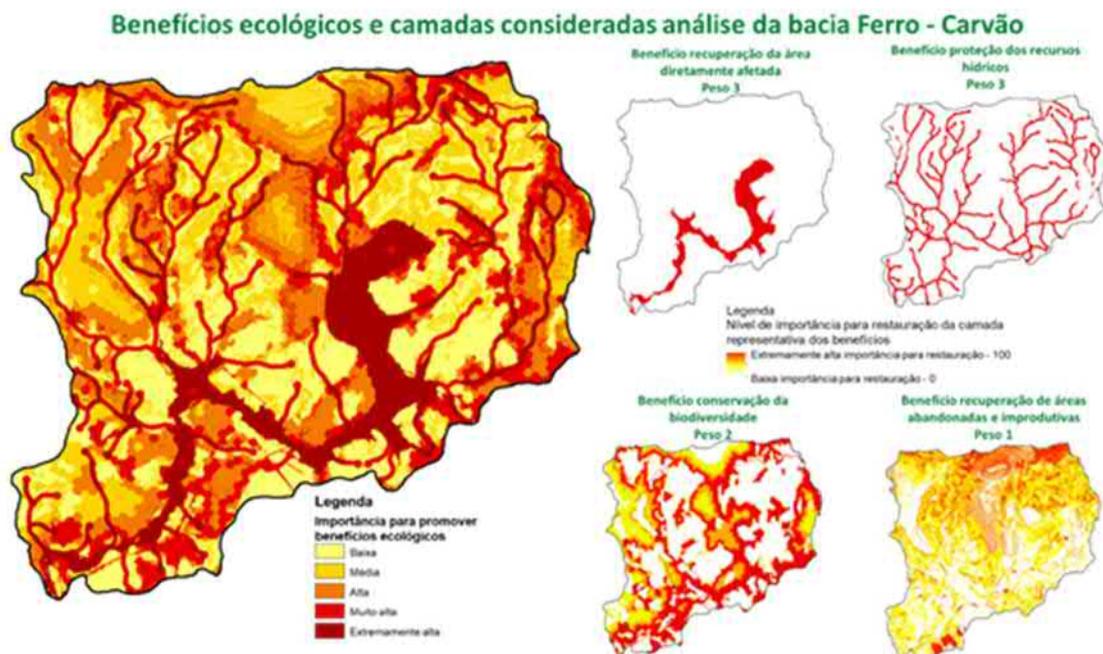


Figura 5.44. Identificação de áreas degradadas, originalmente ocupadas com Floresta Estacional Semidecidual, que mais irão promover benefícios ecológicos se restauradas.

O resultado da soma das camadas foi dividido em quintis (5 quintis), agrupando os dados nas classes do quintil superior ao inferior. As classes de importância para promover os benefícios ecológicos foram: “Extremamente alta”, “Muito alta”, “Alta”, “Média” e “Baixa”. O quintil superior é o que apresenta os valores mais elevados de importância para a área analisada e o quintil inferior correspondente aos valores mais baixos de importância para promover os benefícios ecológicos da bacia (Tabela 5.7).

Tabela 5.7. Valores da soma das camadas divididos em quintis para a classificação de importância para promover benefícios ecológicos com a restauração florestal das áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional Semidecidual. Os valores de importância para promover os benefícios são provenientes da soma das camadas.

| Valores de importância para promover os benefícios ecológicos na bacia | Importância para promover benefícios ecológicos na bacia |
|--|--|
| Quintil superior: 350 a 900 | Extremamente alta |
| Segundo quintil superior: 200 a 350 | Muito alta |
| Terceiro quintil superior: 100 a 200 | Alta |
| Quarto quintil superior: 50 a 100 | Média |
| Quintil inferior: 20 a 50 | Baixa |

O resultado da análise indicou as regiões mais importantes, em que mais benefícios ecológicos poderão ser promovidos em áreas que necessitam de recuperação. As áreas de importância “Extremamente alta” para a promoção de benefícios ecológicos foram as que obtiveram maiores valores com o somatório das camadas representativas dos benefícios. A restauração florestal nas localidades classificadas como de “Extremamente alta” e “Muito alta” importância para promover os benefícios amplia os

efeitos positivos da recuperação e é a mais vantajosa para a bacia. Tendo isto em vista, as áreas que necessitam de recuperação que se encontram nestas duas classificações são as indicadas para serem restauradas.

Após a definição das áreas mais importantes para promover os benefícios ecológicos na bacia, os dados de uso e cobertura do solo (atualizados com checagem de campo), foram cruzados para identificar que tipo de uso ou cobertura existe nestas áreas. A identificação do tipo de uso e cobertura do solo viabiliza uma base para o próximo passo que é a elaboração do plano de restauração florestal. Dependendo do tipo de uso e cobertura do solo, uma ação diferente de recuperação florestal deverá ser adotada. Essas ações podem demandar alta intervenção, como um plantio total em áreas de com rejeito, sobre solo exposto ou em pastagem, por exemplo; ou podem demandar uma pequena intervenção como isolamento e enriquecimento de áreas de Floresta Estacional em Estágio Inicial.

5.3.5.2 Resultados

➤ Descrição da paisagem da bacia do ribeirão Ferro-Carvão

A área da bacia do ribeirão Ferro-Carvão foi analisada em dois momentos: antes e após o rompimento das barragens. O total de classes de tipos de uso e cobertura do solo foi 12 (Tabela 5.8), o mesmo número de classes para os dois tempos, sendo que antes do rompimento havia a classe “Áreas Úmidas”, que deixou de existir e foi substituída pela classe “Rejeito” (Figura 5.45).

Tabela 5.8. Área (ha e %) e tipo de usos e cobertura do solo da bacia do ribeirão Ferro-Carvão¹ antes e depois do rompimento das barragens.

| Tipologia | Antes | | Depois | | Diferença | |
|--|-------|------|--------|------|-----------|------|
| | (ha) | (%) | (ha) | (%) | (ha) | (%) |
| F. Est. Semid. em Estágio Médio Avançado | 1.428 | 43,4 | 1.308 | 39,7 | -120 | -3,7 |
| Mineração | 571 | 17,3 | 485 | 14,7 | -86 | -2,6 |
| Campo/Pastagem | 502 | 15,2 | 472 | 14,4 | -30 | -0,8 |
| F. Est. Semid. em Estágio Inicial | 372 | 11,3 | 356 | 10,8 | -16 | -0,5 |
| Campo Rupestre | 138 | 4,2 | 138 | 4,2 | 0 | 0 |

¹ Os quantitativos e nomenclaturas das classes desta análise podem diferir daquele apresentado no mapeamento da cobertura vegetal e uso do solo, devido a atualizações que não foram aqui aplicadas. As diferenças não mudam os resultados e propostas desta análise de paisagem.

| Tipologia | Antes | | Depois | | Diferença | |
|----------------|-------|-----|--------|-----|-----------|------|
| | (ha) | (%) | (ha) | (%) | (ha) | (%) |
| Área Urbana | 132 | 4,1 | 129 | 3,9 | -3 | -0,2 |
| Cultivo | 58 | 1,7 | 44 | 1,4 | -14 | -0,3 |
| Solo Exposto | 46 | 1,4 | 45 | 1,4 | -1 | 0 |
| Área Edificada | 20 | 0,6 | 18 | 0,5 | -2 | -0,1 |
| Área Úmida | 10 | 0,3 | 0 | 0 | -10 | -0,3 |
| Rejeito | 0 | 0 | 289 | 8,8 | +289 | +8,8 |
| Corpo d'água | 8 | 0,3 | 3 | 0,1 | -5 | -0,2 |
| Estrada/Acesso | 7 | 0,2 | 5 | 0,1 | -2 | -0,1 |

Para os dois momentos analisados, a classe que englobou a maior área da paisagem foi a Floresta Estacional em Estágio Médio/Avançado (43,4% da paisagem antes e 39,7% da paisagem depois do rompimento). A segunda classe com maior extensão na paisagem foi a Mineração, representando 17,3% da paisagem antes, e 14,7% da paisagem depois do rompimento. O dado que mais se destaca ao analisar os diferentes períodos é a diminuição da classe Floresta Estacional semidecídua em Estágio Médio/Avançado. Esta foi a classe que mais sofreu alterações, com a perda de 120 ha de área de um período de análise para o outro.

Ao visualizar os mapas, observa-se que o Rejeito soterrou ou suprimiu grande parte desta Floresta Estacional semidecídua em Estágio Médio/Avançado. A onda de Rejeitos se estendeu por 289 ha (posteriormente atualizado para 285 ha).

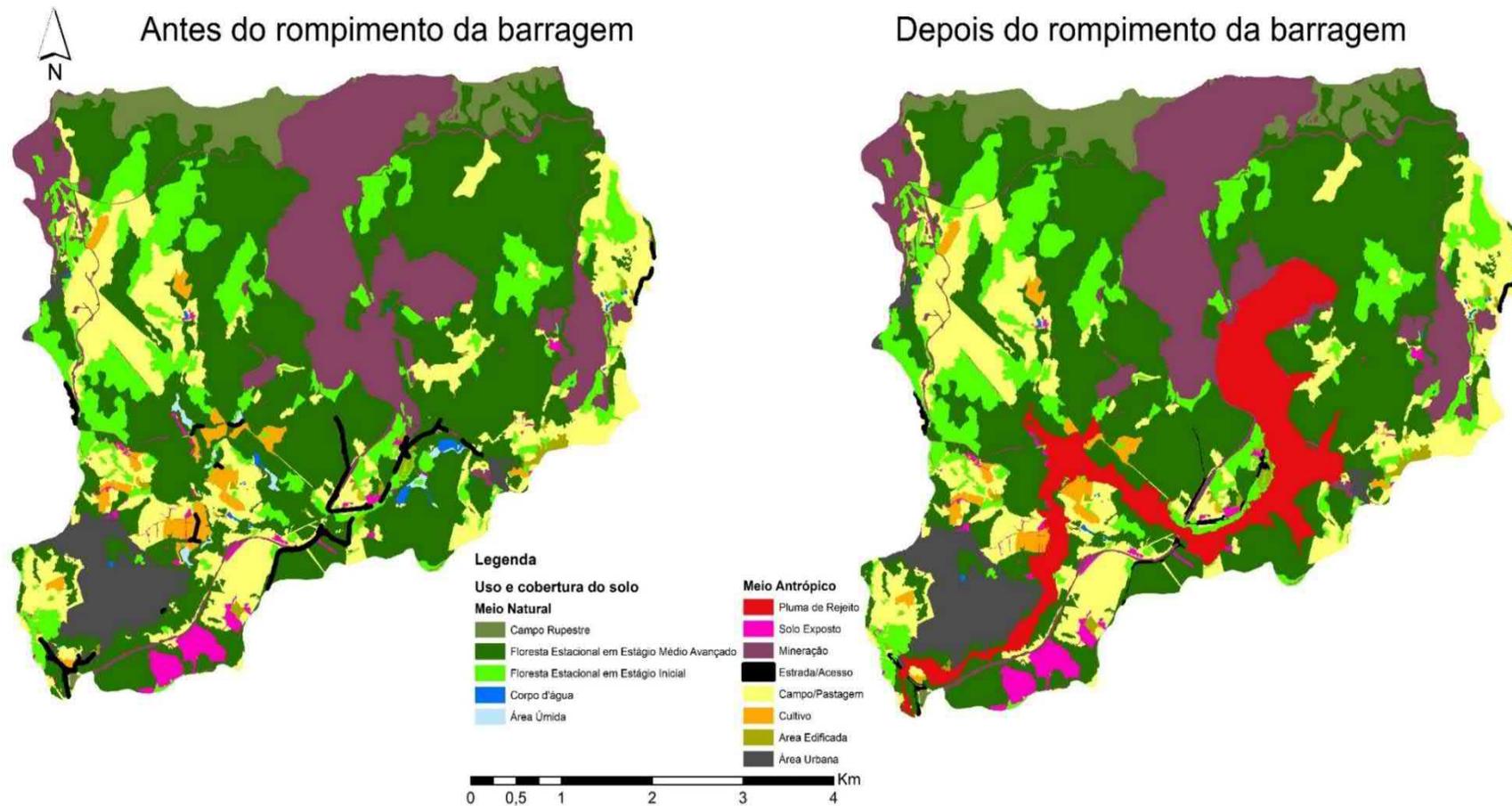


Figura 5.45. Mapa de uso e cobertura do solo para a bacia do ribeirão Ferro-Carvão antes e depois do rompimento das barragens.

➤ **Análise da matriz de transição para a área de estudo**

As linhas da matriz de transição indicam a quantidade de área em hectares de cada classe antes do rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA, enquanto que as colunas indicam a quantidade de área em hectares de cada classe depois do rompimento (Tabela 5.9). Na coluna de Rejeito, pode-se observar o quanto de cada classe (representado nas linhas) foi perdido com a invasão do rejeito. Nesta coluna, temos que a maior quantidade de área que a classe Rejeito afetou foi a de Floresta Estacional semidecídua em estágio Médio/Avançado, totalizando 120 hectares. A segunda classe com área mais invadida pelo rejeito foi a Mineração, que totalizou 86 ha. O total da área de extensão do rejeito foi de 285 hectares, representado pela classe Rejeito.

Tabela 5.9. Matriz de transição antes e depois do rompimento das barragens, unidade de área calculada em hectares. A sigla FES corresponde à Floresta Estacional Semidecidual.

| Uso e cobertura depois do rompimento da barragem | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|----------------|-------------|----------------|----------------|--------------|-----------|----------------|-------------|--------------------|------------|------------------|--------------|--------------|-------|
| | Classes | Área Edificada | Área Urbana | Campo Rupestre | Campo Pastagem | Corpo d'água | Cultivo | Estrada Acesso | FES Inicial | FES Médio Avançado | Mineração | Pluma de Rejeito | Solo Exposto | Total | |
| | Uso e cobertura antes do rompimento da barragem | Área Edificada | 18 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | - | 20 |
| Área Urbana | | - | 129 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | - | 131 | |
| Campo Rupestre | | - | - | 138 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 138 | |
| Campo Pastagem | | - | - | - | 472 | - | - | - | - | - | - | - | 29 | - | 502 |
| Corpo d'água | | - | - | - | - | 3 | - | - | - | - | - | - | 6 | - | 8 |
| Cultivo | | - | - | - | - | - | 44 | - | - | - | - | - | 14 | - | 58 |
| Estrada Acesso | | - | - | - | - | - | - | 5 | - | - | - | - | 2 | - | 7 |
| FES Inicial | | - | - | - | - | - | - | - | 356 | - | - | - | 16 | - | 372 |
| FES Médio Avançado | | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.308 | - | - | 120 | - | 1.428 |
| Mineração | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 485 | - | 86 | - | 571 |
| Solo Exposto | | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 45 | 47 |
| Área inutilizada | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 10 | - | 10 |
| Total | | 19 | 129 | 138 | 472 | 3 | 44 | 5 | 356 | 1.308 | 485 | 289 | 45 | 3.292 | |
| Uso e cobertura depois do rompimento da barragem | | | | | | | | | | | | | | | |

➤ **Métricas da paisagem após o rompimento das barragens na bacia do ribeirão Ferro-Carvão**

A classe Floresta Estacional semidecídua em estado Médio/Avançado, ocupa 39,7% da paisagem (Tabela 5.10). Se considerarmos que essa classe é área de habitat para muitas formas de vida, de acordo com os estudos de ecologia da paisagem (Andrén, 1994; Fahrig, 2003), essa porcentagem de cobertura está acima do limiar de fragmentação (30% de ocupação da paisagem), apontado na literatura científica. Em paisagens com essas características, a literatura científica mostra que a perda de diversidade biológica se dá principalmente devido à perda de habitat. Nestas condições (acima de 30% de habitat ocupando a paisagem), o efeito da distribuição do habitat é menos decisivo para a manutenção da biodiversidade do que a perda de habitat em si. Em outras palavras, o fator mais prejudicial para a biodiversidade desta paisagem é a perda de habitat e depois disso vem a segunda causa, que é a fragmentação.

Os cálculos de número de manchas (NumP), tamanho médio das manchas (MPS), tamanho mediano das manchas (MedPS) e desvio padrão do tamanho das manchas (PSSD) indicaram que temos uma paisagem com muitas manchas (NumP 101) e com tamanhos bem diferentes entre elas (PSSD 56 ha), sendo que 50% dos fragmentos é pequeno (MedPS 1 ha). Uma análise exploratória dos dados indicou que a classe Floresta Estacional semidecídua em estado Médio/Avançado apresentou poucos fragmentos com grande extensão e muitos fragmentos de tamanho pequeno. Ao analisar as métricas, constata-se que a fragmentação ocorre nesta paisagem visto que existem muitos fragmentos pequenos (MPS 13 ha, Tabela 5.10). A priorização para uma estratégia de recuperação florestal na bacia irá levar esse fator em consideração, e a análise de conectividade da paisagem indicará onde a recuperação pode ser mais efetiva a fim de diminuir os efeitos da fragmentação e proporcionar a conservação da biodiversidade.

Tabela 5.10. Métricas da paisagem calculadas para a classe Floresta Estacional semidecídua em estado Médio/Avançado na bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

| Tipologia | (ha) |
|--|----------|
| CA - área total da classe (ha) | 1.308 ha |
| PLand - % da classe na paisagem | 39,7% |
| NumP - número de manchas | 101 |
| MPS - tamanho médio das manchas (ha) | 13 ha |
| MedPS - tamanho mediano das manchas (ha) | 1 ha |
| PSSD - desvio padrão do tamanho das manchas (ha) | 56 |

➤ **Análise de áreas prioritárias para restauração florestal da bacia do ribeirão Ferro-Carvão**

A área foco deste estudo que é a área afetada pelo rejeito ao longo da bacia do ribeirão Ferro-Carvão apresenta a quase totalidade de sua área de 285 ha como prioridade “extremamente alta” ou “muito alta. Entretanto, numa visão estratégica para toda a bacia, o total de áreas classificadas nas categorias de importância “Extremamente alta” e “Muito alta” para promover os benefícios ecológicos com a restauração somou 805,5 ha, sendo que 657,5 ha são áreas originalmente ocupadas por Floresta Estacional Semidecidual, que atualmente estão desprovidas de fisionomia florestal, e 148,0 ha são áreas de Floresta Estacional semidecídua degradadas (Tabela 5.11. Prioridade de

recuperação florestal para atingir os benefícios ecológicos da bacia Ferro-Carvão.).

Dentro desta visão estratégica da bacia, ressalta-se que as áreas produtivas (Campo/Pastagem, cultivo) dependem obviamente do interesse do proprietário em fazer a restauração. As áreas com Solo Exposto podem ser áreas preparadas para cultivo e também dependem do interesse do proprietário e as áreas de mineração foram incluídas porque ainda não se sabe sobre o destino final destas áreas. Na situação atual é considerado como certo o encerramento definitivo das atividades na mina do Córrego do Feijão e grande parte das propriedades particulares vem sendo adquiridas pela Vale, seja para a implantação de áreas de compensação florestal legal, seja como forma de indenização aos proprietários atingidos direta ou indiretamente pelo rompimento. (Figura 5.46).

Tabela 5.11. Prioridade de recuperação florestal para atingir os benefícios ecológicos da bacia Ferro-Carvão.

| Classes de Uso e Cobertura do Solo | Extremamente Alta | Muito Alta | Alta | Média | Baixa | Total |
|--|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| Classes que necessitam de elevada intervenção para promover restauração florestal | | | | | | |
| Área Afetada por Rejeitos | 281,7 | 2,7 | 0,04 | 0,02 | 0,08 | 285,0 |
| Campo/Pastagem | 53,5 | 122,4 | 163,99 | 68,07 | 21 | 429,03 |
| Área Urbana | 16,3 | 23,9 | 36,85 | 44,31 | 7,3 | 128,71 |
| Solo Exposto | 3,7 | 30,4 | 9,49 | 2,09 | 0,05 | 45,69 |
| Área Edificada | 2,4 | 3,75 | 9,74 | 1,79 | 0,2 | 17,9 |
| Cultivo | 2,3 | 8,4 | 22,5 | 10,21 | 1,2 | 44,59 |
| Mineração | 0,07 | 106,0 | 230,13 | 103,04 | 28,49 | 467,72 |
| Subtotal | 360,0 | 297,5 | 472,7 | 229,5 | 58,3 | 1.418,1 |
| Classes que necessitam de baixa intervenção para promover a restauração florestal | | | | | | |
| F.E. Semid. em Estágio Inicial | 59,2 | 88,8 | 121,32 | 38,44 | 9,44 | 317,24 |
| Classes que não necessitam de intervenção, com vegetação em bom estado de conservação | | | | | | |
| F. Semid. em Estágio Médio Avançado | 81,71 | 121,6 | 1,48 | 386,28 | 718,69 | 1.309,76 |
| Campo Rupestre | 18,34 | 51,91 | 52,59 | 14,19 | 0,79 | 137,82 |
| Cerrado Strictu Sensu | 0,91 | 2,75 | 46,21 | 28,42 | 1,56 | 79,85 |
| Subtotal | 100,96 | 176,26 | 100,28 | 428,89 | 721,04 | 1.527,43 |
| Classes em que intervenções para restauração não se aplicam | | | | | | |
| Sistema de Barragem da Mineração | 4,58 | 5,57 | 9,94 | 0,97 | 0,28 | 21,34 |
| Corpos d'água | 0,95 | 0,09 | 0,78 | 0,38 | 0,05 | 2,25 |
| Estrada/Acesso | 0,23 | 1,59 | 1,94 | 0,81 | 0,64 | 5,21 |
| Subtotal | 5,76 | 7,25 | 12,66 | 2,16 | 0,97 | 28,8 |
| Total | 525,93 | 569,84 | 707,00 | 699,02 | 789,77 | 3.291,6 |

A intervenção em áreas urbanas se difere da intervenção nas demais classes pois o propósito da restauração nestas áreas não é converter áreas urbanas em floresta

estacional, mas sim melhorar a permeabilidade da área urbana para a biodiversidade e recursos hídricos. A recuperação nesta área deve ser promovida pela ocupação dos espaços públicos com espécies nativas, formando bosques urbanos e; quando isso não for possível, inserindo árvores isoladas na paisagem, dentro do conceito de corredores e trampolins ecológicos, além da recuperação de APPs.

Já a classe correspondente às áreas que necessitam de baixa intervenção para promover a restauração são de Floresta Estacional em Estágio Inicial, onde pode ser feito adensamento e ou enriquecimento com espécies nativas. Entretanto caso seja mostrado que estas florestas estejam em um processo adequado de sucessão natural, com enriquecimento crescente da diversidade de formas de vida vegetal e animal, a recuperação nestas áreas pode ser dispensada. É importante salientar que esta classe deve ser considerada na avaliação, a fim de garantir os benefícios da restauração e conservação na bacia. Para áreas de vegetação natural em bom estado de conservação em toda a bacia, ações de restauração florestal não são indicadas, mas é primordial promover a conservação dessa vegetação natural, representadas pelas classes Floresta Estacional em Estágio Médio/Avançado, Campo Rupestre e Cerrado *Strictu Sensu*, também para garantir os benefícios da recuperação e conservação na bacia.

Cabe destacar que as áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional Semidecídua não definidas como de importância “Extremamente alta” e “Muito alta” para promoção dos benefícios ecológicos não deixam de ser necessárias para receber ações de recuperação florestal. A análise realizada nos gera uma hierarquização das áreas mais importantes de acordo com os benefícios que se pretende promover com a recuperação para a bacia e indicam por onde estas ações devem ser iniciadas, atendendo à maior quantidade de benefícios prioritários. As regiões não identificadas como de importância “Extremamente alta” e “Muito alta” também irão promover benefícios e a recuperação destas áreas também é indicada em um segundo momento. O total de áreas a serem restauradas que são prioridades num segundo momento soma 929,79 ha, sendo 760,59 ha com necessidade de alta intervenção e 169,20 ha com baixa necessidade de intervenção.

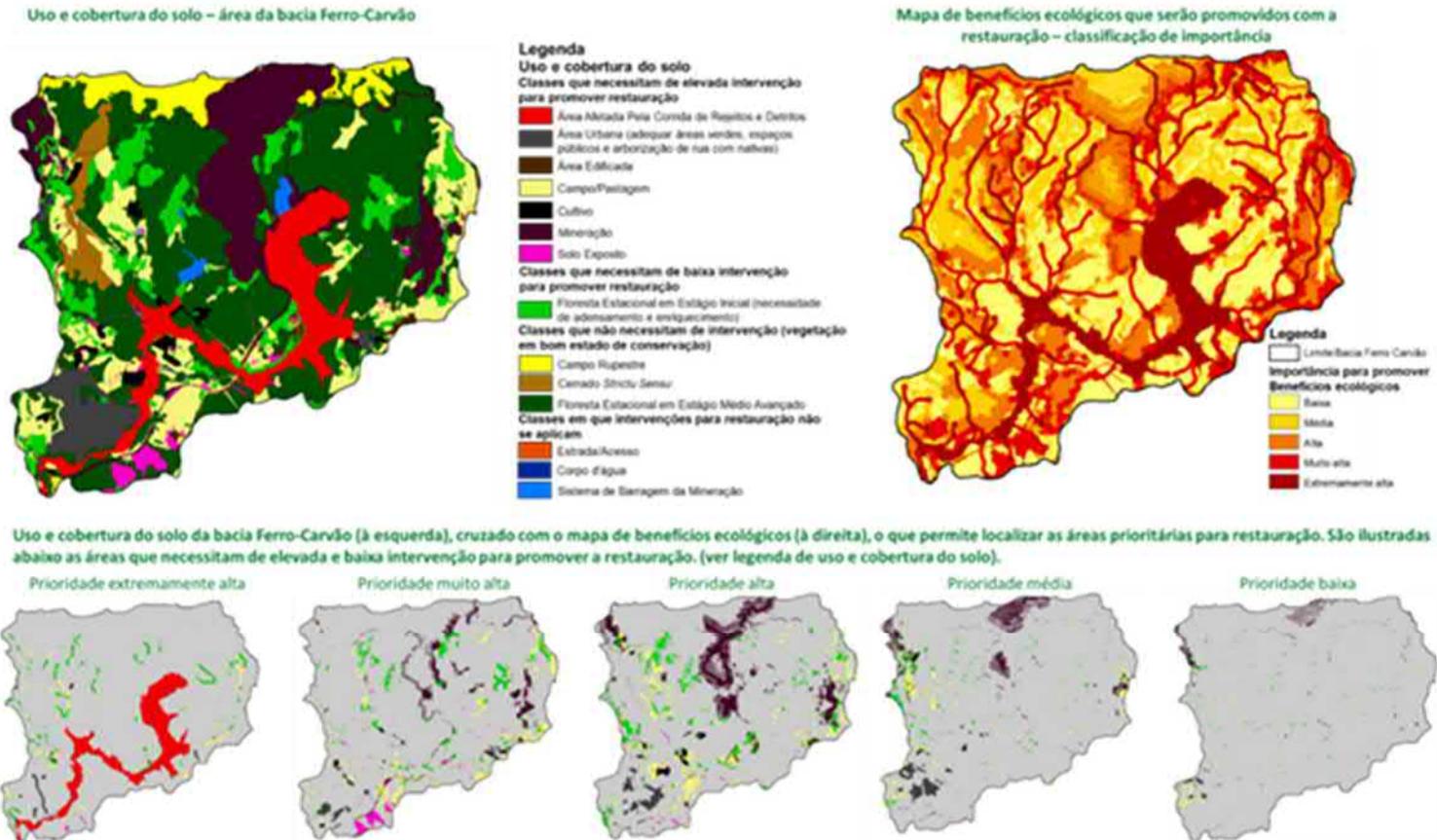


Figura 5.46. Áreas originalmente ocupadas com Floresta Estacional semidecídua que foram indicadas para restauração florestal na bacia Ferro-Carvão, classificadas em nível de prioridade de restauração a fim de atingir os benefícios ecológicos da bacia. À esquerda temos o mapa de uso e cobertura do solo da bacia de 2019, à direita o mapa de benefícios ecológicos que se pretende promover com a restauração florestal, classificando a bacia em níveis de importância de restauração. Quanto maior a importância, mais benefícios serão atendidos com a restauração da área. Abaixo o cruzamento do mapa de uso e cobertura do solo com o mapa de benefícios e o recorte no uso do solo de cada classificação de importância.

5.4 Uso pretérito x Uso futuro pretendido

Conforme descrito no decorrer deste trabalho, o que se busca como foco primordial no cenário a ser consolidado na bacia do ribeirão Ferro-Carvão é o retorno da diversidade de habitats que caracterizava a área afetada pelo fluxo de rejeitos, o restabelecimento das conexões terrestres e fluviais que foram igualmente interrompidas, tudo isso focando na incorporação de habitat e permeabilidade da biodiversidade existente na área estudada.

De modo também importante, a restauração garantirá o equilíbrio morfodinâmico da área em análise e ainda poderá resultar em melhorias das condições de conectividade e oferta de habitat na bacia do Ferro-Carvão, favorecendo a conexão no gradiente de ecossistemas entre às margens do rio Paraopeba e os altos escarpados dos alinhamentos serranos da serra do Curral, bem como a conexão entre toda a faixa de terras que marcam uma importante e imponente área ocupada por vegetação nativa espalhada ao longo de todo o citado alinhamento serrano.

O incremento na melhoria da qualidade ambiental da área se dará não somente pela restauração das áreas ocupadas pelo rejeito, mas também pela incorporação de alguns locais ou de definição de políticas para os mesmos, orientadas para o restabelecimento de vegetação nativa nesses domínios.

Situações dessa natureza foram identificadas em segmentos fluviais na bacia do Ferro-Carvão fora do domínio afetado por rejeitos, em áreas de pastagens ou de cultivos que representam rupturas ou perda de conectividades importantes, entre outras.

Nessa perspectiva, considerando o conjunto de premissas destacados no início deste trabalho, representados objetivamente pelo conhecimento do uso do solo e da cobertura vegetal nativa antes do rompimento das barragens, da restituição da topografia primitiva, do conhecimento das feições hidrogeomorfológicas modeladas ao longo do ribeirão Ferro-Carvão, do conhecimento da dinâmica hidrológica e dimensionamento de calhas e outros mecanismos para que a mesma opera em condições similares, da definição de práticas de restauração alinhadas com o desejo de máxima naturalização da bacia apresenta-se na sequência um conceito evolutivo de intervenção na área de interesse em plena observância da sequência citada como processo a ser empenhado na recuperação da área em apreço.

Importante destacar que o encobrimento de parte da bacia pelo rejeito não permite ainda a definição efetiva de todo o procedimento operacional a ser empenhado à mesma. Entretanto, com base nos estudos já realizados até o momento, é possível idealizar o que se pretende para a bacia do ribeirão Ferro-Carvão como um todo, cujo resultado será possível a partir do conhecimento do detalhamento das operações que serão apresentadas para as áreas conhecidas como Remanso 1 e Remanso 3 já liberadas para o emprego das ações orientadas para o processo de restauração.

Neste tópico serão apresentados os cenários sequenciais do processo de restauração proposto para a bacia do ribeirão Ferro-Carvão considerando as premissas já elencadas neste trabalho.

Os cenários que serão materializados nas pranchas esquemáticas demonstradas na sequência, representam os processos de restauração que são marcados pela remoção do rejeito, pela adequação topográfica, pela implantação das obras hidráulicas, pela melhoria pedológica, introdução da vegetação, gestão da área em restauração. Nesta perspectiva, são apresentados os seguintes cenários, detalhados a seguir:

- Cenário Pré-Ruptura;
- Cenário Pós-Ruptura;

- Cenário de Remoção de Rejeito;
- Cenário de Implantação da Infraestrutura; e,
- Cenário da Restauração da Bacia.

a) Cenário Pré-Ruptura

Este cenário, conforme demonstrado no item que detalha a caracterização da área em análise, permite identificar um a bacia hidrográfica fortemente ocupada por usos antrópicos com amplo destaque para estruturas de mineração. O cenário pré-rompimento mostra também certa descontinuidade na conexão fluvial devido a implantação de barragens para o uso de mineração e também barragens menores destinadas ao uso rural. A descontinuidade ou fragmentação também se evidenciava pela presença de acessos rodoviários e eixo ferroviário.

De todo modo, ao longo de alguns segmentos do ribeirão Ferro-Carvão, a conectividade terrestre era evidente, bem como boa parte do eixo fluvial até onde este era modificado por barramentos. Em alguns segmentos ao longo da calha da citada drenagem, seu leito não era visível através de imagens aéreas, revelando a conexão terrestre claramente possível pelo dossel arbóreo e pela proteção dada pela presença de densa vegetação nativa dos fragmentos florestais presentes na bacia.

O cenário pré-ruptura é também revelador de ambientes sujeitos a dinâmicas hidrogeomorfológicas distintas como alagadiços, várzeas/brejos, espelhos de água, trechos fluviais com corredeiras, meandros e modelados de vertentes ocupadas por colúvios ou solos in situ ocupados por florestas. Este cenário diverso não é visível na escala de apresentação das pranchas utilizadas neste item, mas podem ser conhecidas através do uso do solo e das unidades hidrogeomorfológicas já apresentadas neste trabalho. Podem também ser visualizadas nas pranchas eu detalham as intervenções para o Remanso 1 e Remanso 3.

b) Cenário Pós-Ruptura

O cenário pós-ruptura revela a supressão de toda a diversidade dos ambientes citados e caracterizados neste e outros documentos já apresentados ao longo dos últimos 16 meses.

Revela a fragmentação da paisagem com grande distanciamento entre as manchas de vegetação nativa da bacia, bem como do desaparecimento da variedade de ambientes aquáticos que caracterizam o segmento fluvial do Ferro-Carvão e segmentos de seus afluentes.

Em termos de bacia hidrográfica o que se observa é o fluxo de porções naturais de drenagens que lançam suas águas na grande macha de rejeitos que se formou com o rompimento das barragens, isolando cada uma dessas pequenas microbacias em termos de fluxos biológicos possivelmente existentes no cenário pré-rompimento.

Em termos terrestres, o espalhamento do rejeito possivelmente confinou grupos de fauna a uma determinada margem do ribeirão Ferro-Carvão, restringindo o uso ou a permeabilidade do território ofertada pela pretérita conectividade mapeada.

A prancha que caracteriza este momento permite a clara identificação desse cenário tanto em termos terrestres como em termos fluviais, indicando que trata-se da área alvo a ser imediatamente trabalhada para restituição da dinâmica observada no cenário pré-ruptura, mas também da possibilidade de ampliar a restauração para uma perspectiva mais ampla que aquela estritamente focalizada na área afetada por rejeitos.

c) Cenário de Remoção de Rejeito

O cenário de remoção de rejeitos será revelador da topografia primitiva e ao mesmo tempo de que forma esta foi alterada pelo efeito de arraste mecânico do fluxo de sedimentos e fluídos que transitaram pela calha fluvial do ribeirão Ferro-Carvão, trechos de afluentes e margens fluviais.

Nessa perspectiva, esse cenário apontará a dimensão dos trabalhos orientados à preparação topográfica dos terrenos de modo que os mesmos possam favorecer a manifestação das dinâmicas hidrológicas favorecedoras do desenvolvimento da diversidade de habitats desejados para a bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

Com a retirada dos rejeitos será avaliada a necessidade do dimensionamento de uma dinâmica fluvial que possa, por exemplo, favorecer o desenvolvimento de ambientes de várzeas ou de planícies de inundações correlatas àquelas existentes antes do rompimento das barragens e que já representavam ambientes que traduziam a diversidade de habitats na área de estudo.

De princípio, avaliações geomorfológicas sugerem que em alguns trechos do caminho da lama, os depósitos aluviais foram empurrados e a feição geomorfológica pretérita inteiramente alterada. Noutras porções, acredita-se a entrada do fluxo de rejeitos fossilizou as feições hidrogeomorfológicas resultando na possibilidade de sua exposição após retirada dos depósitos que as encobrem.

Trata-se de uma realidade que será conhecida com maior propriedade com a conclusão dos estudos de geofísica, das sondagens e com os trabalhos de remoção dos rejeitos.

A relevância dessa informação é grande pois será indutora das decisões sobre a natureza pedológica das áreas a serem restauradas, resultando na possibilidade de incremento de depósitos remanescentes ou na perspectiva de propiciar dinâmicas que favoreça a gênese de solos desejáveis para os ambientes que se são desejáveis para a diversificação da bacia.

A prancha apresentada neste trabalho não permite a visualização dos detalhes discutidos aqui, pois a topografia a ser revelada só será conhecida após o desenvolvimento dos trabalhos citados acima e da própria remoção dos rejeitos, entretanto, é ilustrativa do que será revelado.

Observações mais detalhadas da relevância desse cenário podem ser observadas nas pranchas que tratam das ações de restauração apresentadas a seguir em relação aos Remansos 1 e 3.

d) Cenário de Implantação da Infraestrutura

Apesar de apresentado esquematicamente para toda a bacia do ribeirão Ferro-Carvão, este cenário será desenvolvido setorialmente. O exemplo disso é o detalhamento já apresentado neste trabalho para os Remansos 1 e 3.

De toda forma, o que se pretende demonstrar é que ao longo de toda a área afetada por rejeitos, serão desenvolvidas intervenções de natureza estrutural com o objetivo de favorecer a manifestação de uma dinâmica hidrológica que permitirá o desenvolvimento dos modelados geomorfológicos que vão favorecer o desenvolvimento da diversidade de ambientes desejáveis para a área de estudo.

Para cada trecho da bacia do ribeirão Ferro-Carvão cuja intervenção para a restauração for autorizada, serão detalhadas as intervenções necessárias, à exemplo do que se apresenta na sequência para os Remansos 1 e 3.

De todo modo, o cenário integral do eixo fluvial do ribeirão Ferro-Carvão prevê intervenções estruturais que favorecem a formação de espelhos de águas, de retenção de sedimentos, de contenções da velocidade de escoamento da água, da contenção da erosão em margens fluviais, de favorecimentos de manifestações erosivas pontuais, de corredeiras entre outros aspectos. Essa intervenção estrutural, como citado anteriormente, será detalhada com base no pleno conhecimento da topografia original e detalhamentos dos estudos hidrológicos que a cada ano incrementam informações mais precisas ao conhecimento dos deflúvios da bacia.

e) Cenário da Restauração da Bacia

O cenário de restauração da bacia é revelador da estrutura funcional da bacia. Mostra a área onde a vegetação florestal será implantada com objetivo de garantir a conectividade perdida entre as duas margens do ribeirão Ferro-Carvão, bem como a estruturação de ambientes de menores dimensões como as várzeas e domínios lacustres também importantes para devolver à área a diversidade de ecossistemas que continha.

Importante destacar que o desenvolvimento dos processos de restauração em segmentos distintos que são autorizados após conclusão dos atores intervenientes neste procedimento, podem resultar num contexto em que determinados espaços podem ter consolidação dos trabalhos e o desenvolvimento de sua vegetação antecipada frente a outras porções.

De todo modo, o cenário em tela revela a consolidação de importante conectividade entre os altos serranos e a calha do rio Paraopeba e também a conexão ao longo de todo o segmento escarpado e de altas vertentes que se estendem ao longo de toda a serra.

O resgate desses arranjos de conectividade, incrementados com conversão de espaços antropizados a domínios florestais representará uma importante ação na direção do fortalecimento de um arranjo de áreas naturais com reflexos positivos em áreas vizinhas, onde a proteção já é uma realidade como o caso do Inhotim, do Parque Estadual Serra do Rola Moça e áreas protegidas vizinhas.

Neste sentido de consolidação de áreas permeáveis na bacia, para o cenário de restauração, considerou-se também a incorporação da área ocupada pelas Pilhas de Estéril Menezes e Menezes II, das áreas utilizadas pela Vale para as obras de remoção do rejeito e reconformação da calha do ribeirão Ferro-Carvão e ainda de áreas, outrora de terceiros, ocupadas por pastagens ou cultivos e que após a ruptura das barragens foram adquiridas pela Vale.

A exemplo das pranchas anteriores, a que ora se apresenta permite uma avaliação do contexto macroespacial a ser restaurado, cujos detalhes de ambientes que serão alvo de recuperação podem ser observados nas informações espaciais contidas nesse trabalho que tratam do uso do solo e da cobertura vegetal e dos domínios hidrogeomorfológicos.

Os detalhes do que se espera para os diferentes segmentos da bacia do ribeirão Ferro-Carvão podem ser observados nos detalhes destacados para a ações de restauração dos Remansos 1 e 3. Obviamente, aspectos particulares e aplicáveis a contextos pontuais da bacia serão evidenciados após a conclusão e conhecimento de todas as informações necessárias ao desenvolvimento de projetos executivos de restauração.

Encontra-se apresentado nas figuras a seguir, em pranchas ilustrativas, os cenários sequenciais do processo de restauração proposto para a bacia do ribeirão Ferro-Carvão.



Figura 5.47. Cenário da bacia do ribeirão Ferro-Carvão antes da ruptura da barragem



Figura 5.48. Cenário da bacia do ribeirão Ferro-Carvão com a recuperação no Marco Zero.



Figura 5.49. Cenário da bacia do ribeirão Ferro-Carvão com a remoção total do rejeito.



Figura 5.50. Cenário da bacia do ribeirão Ferro-Carvão com a implementação da infraestrutura.



Figura 5.51. Cenário da bacia do ribeirão Ferro-Carvão antes da ruptura da barragem.

6 AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE RECUPERAÇÃO

6.1 Reconfiguração das Calhas Fluviais (Leitos e Margens)

Após a identificação da distribuição das feições hidrogeomorfológicas ao longo das margens do ribeirão Ferro-Carvão bem como de seu leito, os esforços para o conhecimento das vazões que caracterizam o escoamento fluvial na bacia precisam ser conhecidos de modo a subsidiar o dimensionamento das características geométricas do novo eixo do leito fluvial que será definido/adaptado após a retirada dos pacotes de rejeitos espalhados na área de estudo.

O conhecimento da hidrogeomorfologia da bacia permitirá o modelamento de calhas fluviais adequadas ao trânsito fluvial da mesma e, ao mesmo tempo, sua adequação aos pressupostos da funcionalidade ecológica.

As novas calhas fluviais devem priorizar uma geometria que seja acessível à fauna para a dessedentação, devem proporcionar um padrão de escoamento que favoreça a continuidade ou o reestabelecimento da dinâmica fluvial como ciclos de inundações, erosões, deposições para que processos de consolidação de várzeas, formação de planícies, entulhamentos pontuais, colmatação entre outros possam dar ao curso de água a diversidade de nichos apropriados ao desenvolvimento da biota aquática.

Além dessa perspectiva, devem ser definidas intervenções estruturais ao longo das calhas fluviais com foco na devida manutenção da integridade de suas margens, no controle da velocidade do escoamento superficial, na estabilização de bordas de terraços, na implantação de bacias de amortecimento associadas a trechos de corredeiras, no dimensionamento de estruturas hidráulicas apropriadas para potencialização da formação de ambientes onde retenções ou redução do fluxo da água forem necessárias para o restabelecimento das feições hidrogeomorfológicas da bacia. Para o dimensionamento de calhas fluviais estáveis com o devido controle dos processos erosivos e de deposição ao longo do curso de água aplicou-se a metodologia apresentada pelo FISRWG (1998) no *“Stream Corridor Restoration – Principles, Processes and Practices”*.

Assim ao longo das calhas fluviais dimensionadas serão recomendadas intervenções estruturais distintas, que deverão ser objeto de avaliação conforme descrito no MCA. As intervenções projetadas objetivam a mínima intervenção no arranjo fluvial sempre buscando a indução de um comportamento que promova um modelamento equivalente ao que se verificava na área de interesse em período anterior ao espalhamento do rejeito pela bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

Os cursos de água naturais são caracterizados pela presença de trechos intercalados com corredeiras (rifles) e piscinas (pools), erosão do leito na face externa dos trechos em curvas, que servem de habitats, permitindo a proteção e cobertura para as espécies aquáticas, além de promover a oxigenação da água. Essas características de sistemas fluviais naturais são decorrentes de processos hidrogeomorfológicos, constituídos de ações erosivas de margens, de transporte e deposição de sedimentos ao longo das calhas fluviais, buscando uma condição de equilíbrio, conforme a Balança de Lane. A Figura 6.1 ilustra o conceito da formação das piscinas e corredeiras e estas características podem ser observadas em cursos de água locais, tais como no córrego Tejuco (afluente do ribeirão Ferro-Carvão) e no ribeirão Casa Branca (bacia natural adjacente e similar à bacia do ribeirão Ferro-Carvão).

A distância entre uma corredeira a outra ou de uma piscina a outra possui grande variação em cursos de água naturais, entretanto, essa variação é apresentada na literatura de referência como em torno de 5 a 7 vezes a largura da calha de margens plenas (Leopold, 1964).

Em trechos com maior energia de escoamento, a composição do leito do canal tem importante papel para garantir a estabilidade e formação da calha. Nos trechos de corredeiras, a composição granulométrica do leito tende a ser maior do que nos trechos de piscinas, onde os depósitos apresentam menor granulometria. Isso ocorre naturalmente pois, quanto maior a velocidade de escoamento maior a capacidade de transporte de sedimentos.

Nos trechos de corredeiras, devido à velocidade do fluxo de água, os sedimentos mais finos são transportados, permanecendo os sedimentos de granulometria mais grosseira (cascalhos a pedras de mão). O fluxo de água nessas regiões possui menor profundidade de escoamento, resultando em maior turbulência e com maior potencial de oxigenação e de volatilização de alguns constituintes químicos na água. Outro importante ganho na variação de profundidade de escoamento e granulometria ao longo de um curso de água é a criação de diferentes habitats aquáticos, o que propicia uma maior variabilidade de fauna e flora.

As calhas fluviais do sistema hídrico da bacia hidrográfica do ribeirão Ferro-Carvão devem ser dimensionadas considerando os aspectos supracitados, buscando geometrias, estruturas e revestimentos mais próximos à condição natural para que a condição de equilíbrio morfodinâmico seja estabelecida em um menor tempo possível.

Ressalta-se que, apesar das soluções propostas buscarem essa condição de equilíbrio, processos hidrossedimentológicos (erosão, transporte e assoreamento) ocorrerão ao longo dos anos, durante o processo de renaturalização, sendo necessário o acompanhamento e monitoramento constante e, caso sejam observados processos mais intensos, devem ser realizadas intervenções e manutenções corretivas.

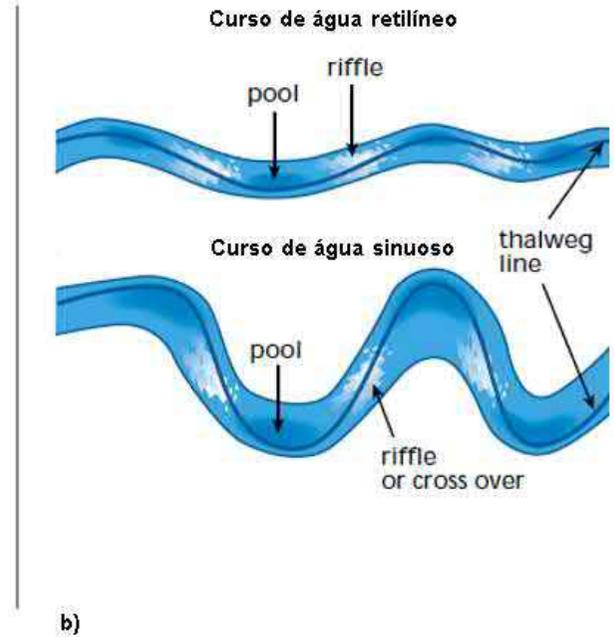
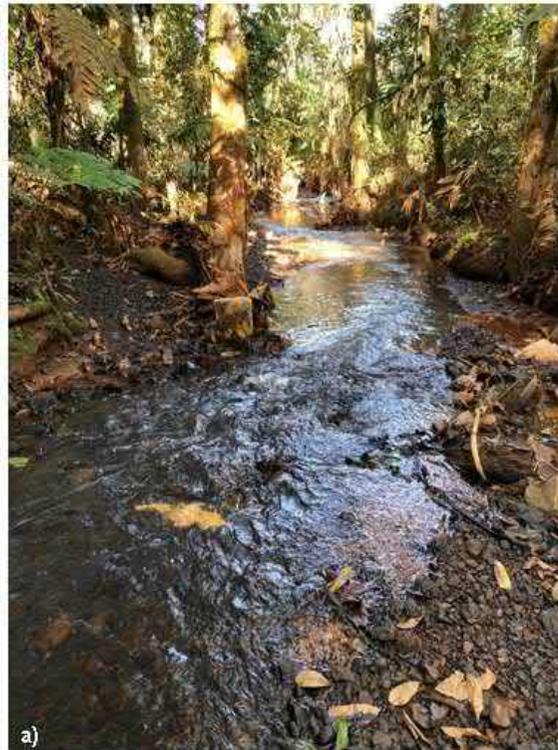


Figura 6.1. Características de piscinas e corredeiras observada em cursos de água naturais da região. a) Trecho de corredeira e meandros no córrego Tejuco; b) Caracterização de piscinas e corredeiras em cursos de água naturais e c) Trecho de corredeira e piscina no ribeirão Casa Branca.

Além da implementação de trechos de corredeiras e piscinas, como exemplo das possibilidades de intervenções recomendadas, foram selecionados modelos, apresentados a seguir, que também poderão ser utilizados. Importante destacar que os modelos propostos, em sua maioria, visam a naturalização dos leitos fluviais, fato que ocorrerá na bacia em análise através dos processos morfodinâmicos esperados para as calhas fluviais.

A Figura 6.2 mostra a utilização de geotêxtil e blocos de rochas na contenção da erosão fluvial em margens, através da proteção em relação à ação direta das águas sobre as mesmas.

A Figura 6.3 mostra exemplo prático de uma aplicação que deverá ser corrente em muitos pontos ao longo da bacia do ribeirão Ferro-Carvão como se verá no decorrer deste trabalho. Trata-se de um sistema que oferece elevada proteção às feições convexas das margens fluviais que sempre são retrabalhadas pela dinâmica fluvial. Nas áreas marginais aos diques que compõem a borda dos canais, biomantas (fibra de coco) poderão ser utilizadas para favorecer manutenção do banco de sementes e mudas em terrenos frequentemente afetados por inundações. Essas coberturas contribuem para favorecimento de processos pedogenéticos pois promovem retenção de umidade, reduzem a velocidade do escoamento superficial e contribuem para redução da temperatura do solo.

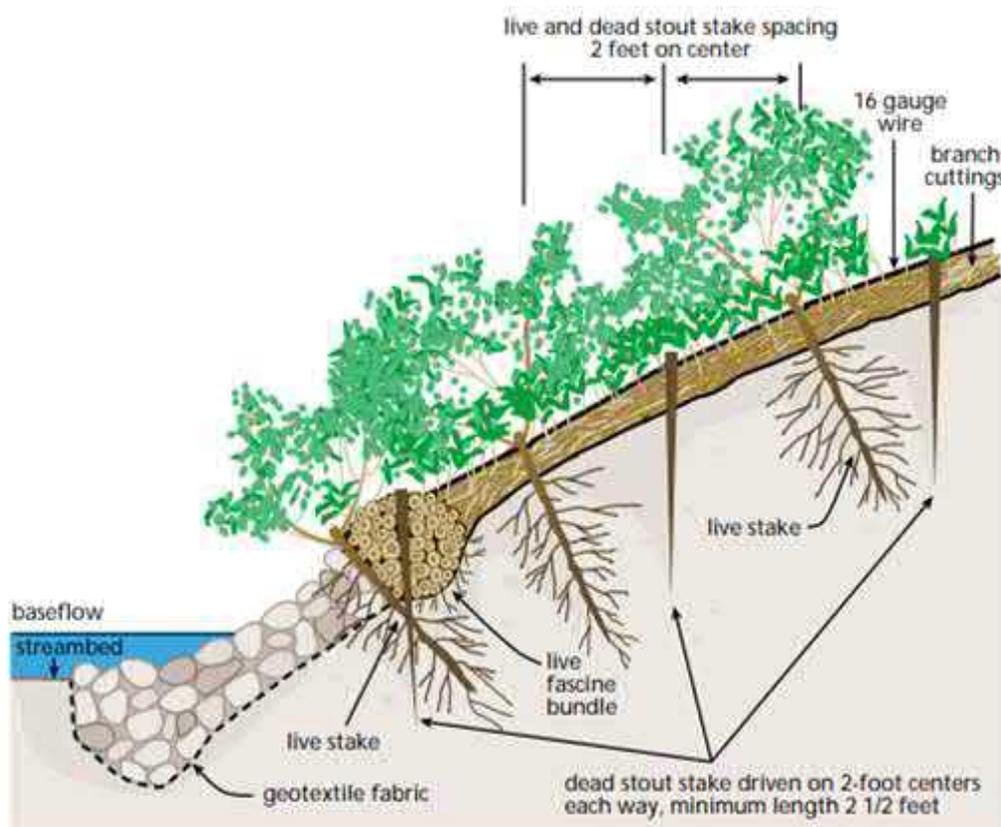


Figura 6.2. Ilustração de utilização de biomantas e blocos de rochas na contenção da erosão fluvial em margens, através da proteção em relação a ação direta das águas sobre a mesma



Figura 6.3. Exemplo prático de uma aplicação de manta geotêxtil para proteção das feições convexas das margens fluviais.

Já a Figura 6.4 e a Figura 6.5 apresentam modelos simples e práticos a serem adotados para o disciplinamento dos escoamentos superficiais.



Figura 6.4. Ilustração de estrutura natural, tipo J Hooks, que auxilia no disciplinamento do escoamento superficial no eixo do leito propriamente dito e na contenção da erosão de margens.



Figura 6.5. Exemplo prático de estrutura natural, tipo J Hooks, que auxilia no disciplinamento do escoamento superficial no eixo do leito propriamente dito e na contenção da erosão de margens.

Na Figura 6.6 e na Figura 6.7, apresentadas na sequência, se observam intervenções de pequena monta no curso de água, que representam estruturas que auxiliam no disciplinamento do escoamento superficial no eixo do leito propriamente dito e na contenção da erosão de margens. Em ambos exemplos, as interferências representam oportunidades de desenvolvimento de nichos específicos de biota aquática, sem alterar a dinâmica fluvial do curso de água a ponto de priorizar a dominância de algum grupo

biológico.

Importante destacar que todos os exemplos citados favorecem a manifestação da dinâmica hidrogeomorfológica identificada previamente ao rompimento, potencializando erosão, deposição, pedogênese, diversidade de nichos e, por conseguinte, a permeabilidade da diversidade de fauna entre as margens do canal, ao longo do mesmo e importantes trocas entre os terrenos laterais e o nível de base representado pelo leito fluvial. Trata-se da dinâmica que resultará na naturalização da área num processo de dinâmica sucessional esperado para as áreas restauradas.



Figura 6.6. Exemplo ilustrativo da reconformação fluvial e proteção das calhas do curso de água.



Figura 6.7. Ilustração de estrutura natural, tipo Toe Wood, que auxilia no disciplinamento do escoamento superficial no eixo do leito propriamente dito e na contenção da erosão de margens, além de proporcionar habitat, com proteção e cobertura para as espécies aquáticas.

Ressalta-se que o tipo de proteção do leito está condicionado ao regime hidrológico, especialmente às vazões de cheias, e às características geométricas da calha fluvial, especialmente ao perfil longitudinal, fator principal que condiciona o regime de escoamento e a velocidade e energia do fluxo de água. Trechos fluviais com declividades mais suaves poderão ser utilizados para as alternativas apresentadas acima, com maior espaçamento entre as estruturas que proporcionarão a formação de corredeiras e piscinas., Para a proteção do leito poderão ser utilizados enrocamentos menos graúdos ou sedimentos recuperados das regiões de calhas durante o processo de remoção e limpeza do rejeito, mediante peneiramento do material, enquanto que para os trechos de maiores declividades deverão ser adotadas soluções mais robustas, com materiais de granulometria bem maiores, tal como apresentado na Figura 6.8.

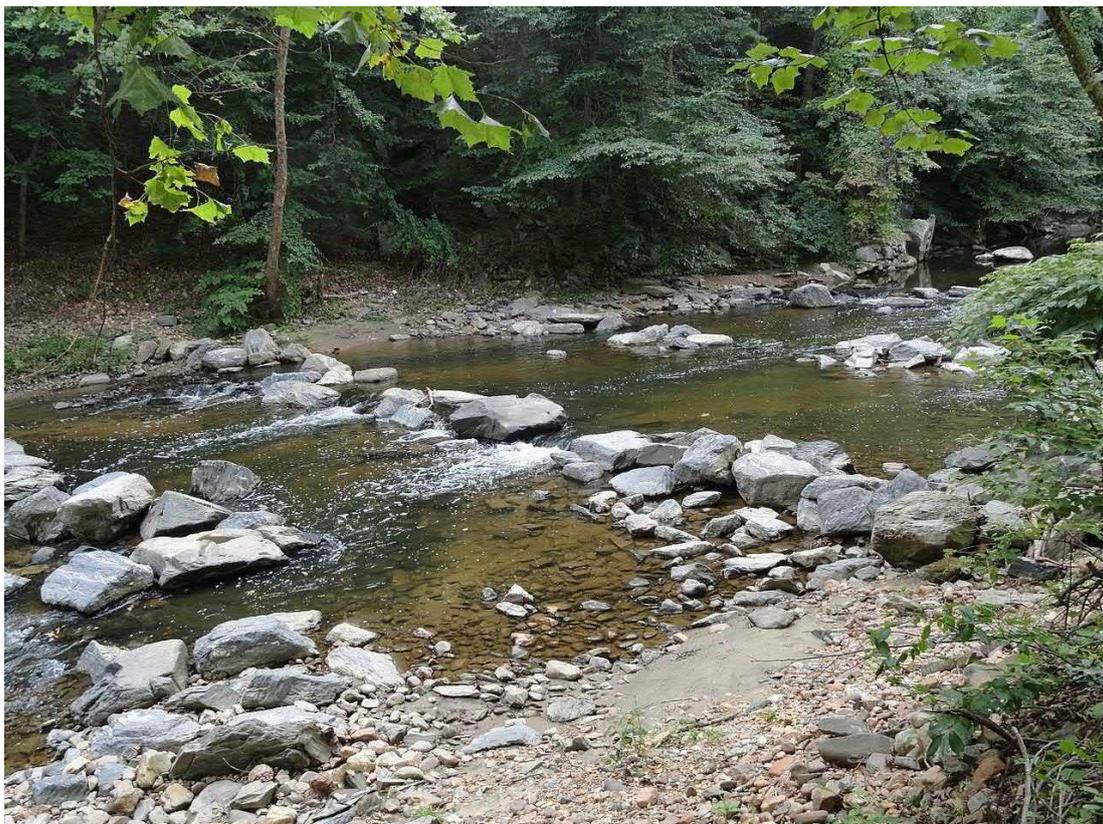


Figura 6.8. Exemplo de proteção do leito para trechos fluviais com declividades longitudinais de maior magnitude.

6.2 Reconformação e Estabilização de Margens

Além das alternativas de soluções para a proteção e estabilização do leito fluvial, em busca de uma condição de equilíbrio hidrossedimentológico, buscando a naturalização dos sistemas fluviais do ribeirão Ferro-Carvão e afluentes impactados pela onda de rejeitos decorrente da ruptura das Barragens, existem várias técnicas de recuperação e proteção das margens as quais poderão ter sua aplicabilidade verificada com base na dinâmica hidrogeomorfológica desejada para cada porção a ser recuperada e restaurada, conforme apresentadas a seguir.

- Enrocamento vivo

Consiste na disposição de pedras ao longo das margens do corpo hídrico (Figura 6.9). Nos espaços entre pedras são colocadas estacas vivas de espécies com capacidade de reprodução vegetativa. Com o desenvolvimento do sistema radicular das estacas vivas aumenta-se o efeito estabilizador no solo.

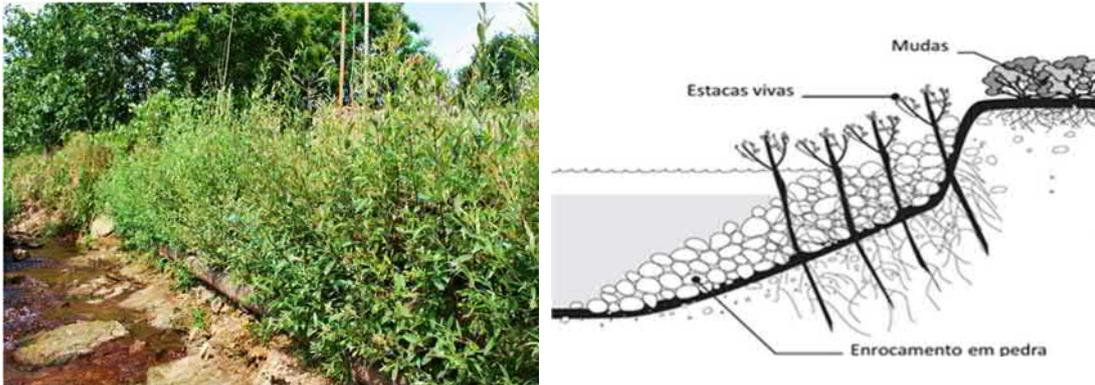


Figura 6.9. Proteção de margens com a técnica de enrocamento vivo.

- Estacas vivas

Consiste na inserção de estacas vivas ou ramagens de espécies com capacidade de propagação vegetativa e sua aplicação no solo (Figura 6.10), com a função de promover um efeito estabilizante em profundidade, o qual aumentará consoante o comprimento da estaca colocada. Quanto maior a estaca, maior a profundidade a que se irão desenvolver as raízes e, portanto, maior estabilidade em profundidade. Podem ser aplicadas associadas ou não ao enrocamento.

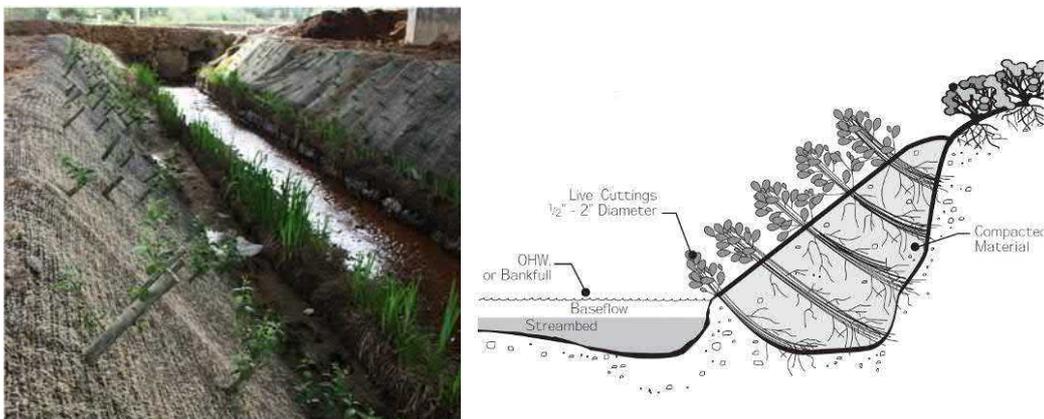


Figura 6.10. Proteção de margens com a técnica de estacas vivas.

- Feixes de galhos / galhadas

Consiste na confecção de feixes de estacas vivas de espécies com capacidade de propagação vegetativa, atadas por corda de sisal ou arame, que são fixadas ao terreno através de prumos de madeira vivos ou mortos (Figura 6.11). Inseridos nas margens do curso d'água em valetas rasas, instaladas perpendicularmente à inclinação da margem, atuam como barreiras de contenção, reduzindo a velocidade do escoamento laminar na encosta. Devem ser aplicados em linhas de água de energia média (caudais e níveis médios relativamente constantes).

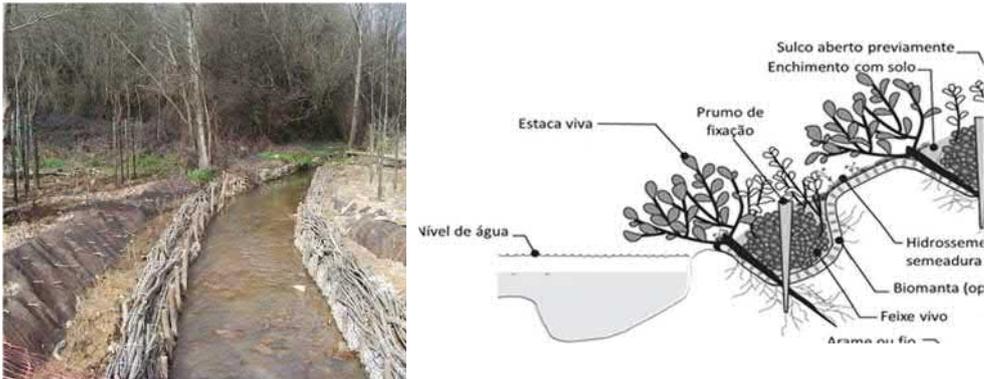


Figura 6.11. Proteção de margens com a técnica de feixe de galhos.

- Camada de ramos (ramos vivos intercalados com camadas de terra) ou vassouras

Essa opção envolve estacas vivas de espécies arbustivas amarradas juntas, instaladas de forma parcialmente sobreposta entre camadas de solo (Figura 6.12). Essa colocação sobreposta de galhos e solo corre perpendicularmente à inclinação da margem. Os galhos que despontam para fora da superfície da encosta aumentam a rugosidade e reduzem a velocidade de escoamento.



Figura 6.12. Proteção de margens com a técnica de camada de ramos.

- Empacotamento de ramos (estaca de madeira, aterro compactado, ramos vivos)

Essa opção utiliza uma combinação da camada de ramos fixados nas margens do curso d'água com estacas de madeira, colocadas entre camadas de aterro compactado (Figura 6.13). Essas camadas de galhos/madeira e aterro compactado correm perpendicularmente à encosta. Essa opção é mais indicada para áreas de depressões nas margens do curso d'água.

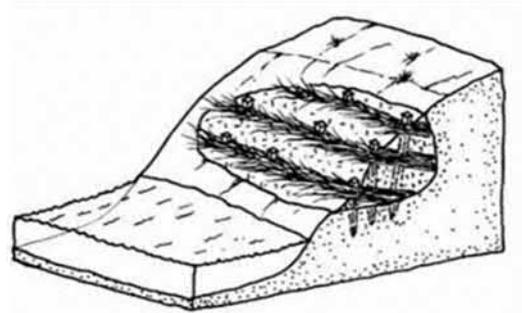


Figura 6.13. Proteção de margens com a técnica de empacotamento de ramos.

- Solo envelopado

A metodologia consiste no confinamento do solo em camadas protegidas por um geotêxtil de alta resistência (Figura 6.14); no paramento externo são aplicadas sementes de espécies herbáceas e arbustivas e estacas vivas; utilizadas em taludes de até 60 graus.

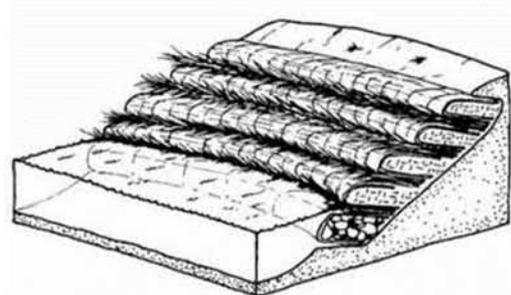


Figura 6.14. Proteção de margens com a técnica de solo envelopado.

- Muro de Suporte Vivo / Parede Krainer

É um muro de suporte gravítico, formado por uma estrutura de madeira, a qual poderá apresentar diferentes configurações, dependendo do objetivo de aplicação (Figura 6.15). O seu revestimento interior poderá ser feito com diferentes tipos de materiais, utilizando-se com frequência a pedra, terreno local, terra vegetal, estacas vivas, plantas em torrão, entre outros.

O desenvolvimento dos sistemas radiculares das plantas irá criar um efeito de armadura do terreno, o qual substituirá o efeito estabilizante dado inicialmente pela estrutura de madeira.

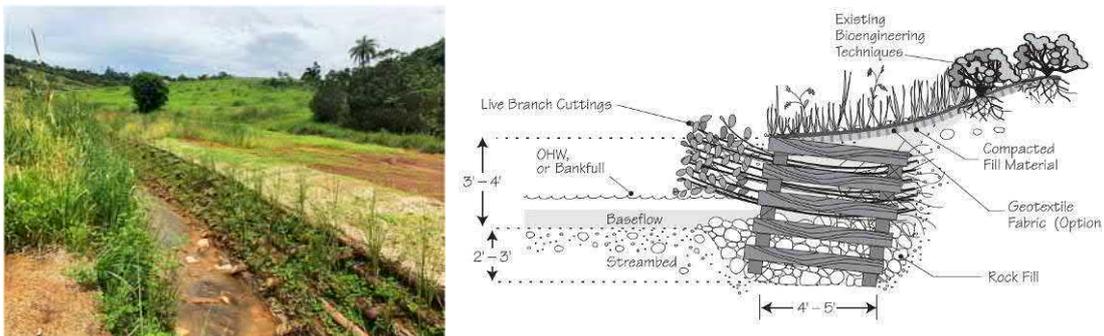


Figura 6.15. Proteção de margens com a técnica parede Krainer.

- Colchão de galhos

Essa opção envolve estacas vivas e galhos instalados paralelamente à direção do caimento do talude da margem, para formar um colchão (Figura 6.16). Este colchão pode ser afixado com ancoras ou grampos. As estacas vivas e galhos são chavetados no pé da encosta da margem em valetas rasas revestidas com pedras.

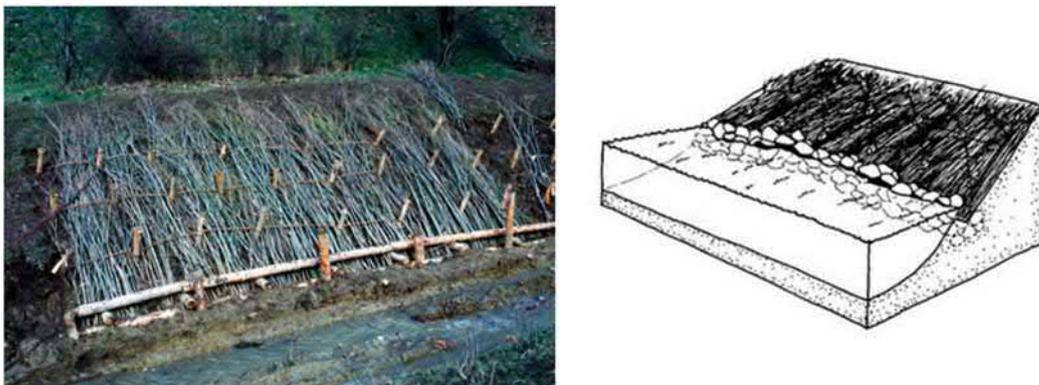


Figura 6.16. Proteção de margens com a técnica de colchão de galhos.

- Revestimento com troncos de árvores

Essa opção envolve amarrar árvores mortas inteiras e ancorá-las no pé da margem (Figura 6.17). Tem vantagem pois no site existem muitas árvores para uso. Essa técnica possibilita a melhora da drenagem do talude, quando aplicada em sua rampa, pois cria linhas intermediárias de drenagem, reduzindo o volume e velocidade da água oriunda da chuva. Quando utilizada nas margens propicia a proteção imediata das mesmas e conseqüente redução da erosão. A principal vantagem dessa técnica é que é de realização rápida e simples.

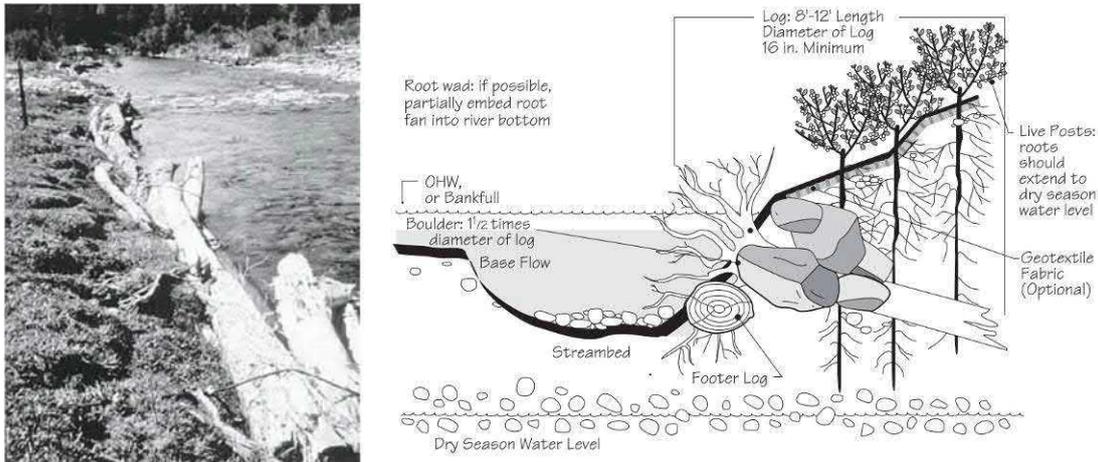


Figura 6.17. Proteção de margens com a técnica de revestimento com troncos de árvores.

- Retentores de sedimentos

São rolos constituídos por uma matriz de fibra de coco compacta, com densidade homogênea ao longo de todo o rolo (Figura 6.18). Externamente são reforçados por uma rede estrutural em polipropileno, e no seu interior podem ser colocados rizomas ou bulbos de espécies aquáticas. A sua função é reter a sedimentação de material erodido, além de servir como substrato à colonização de espécies aquáticas. Os rolos são ancorados ou estaqueados no pé interno da margem do curso d'água. Pode ser aplicado associado com estacas vivas intercaladas. Técnica amplamente utilizada e com eficácia comprovada na recuperação de cursos d'água na bacia do rio Doce e testadas na área do Marco Zero.

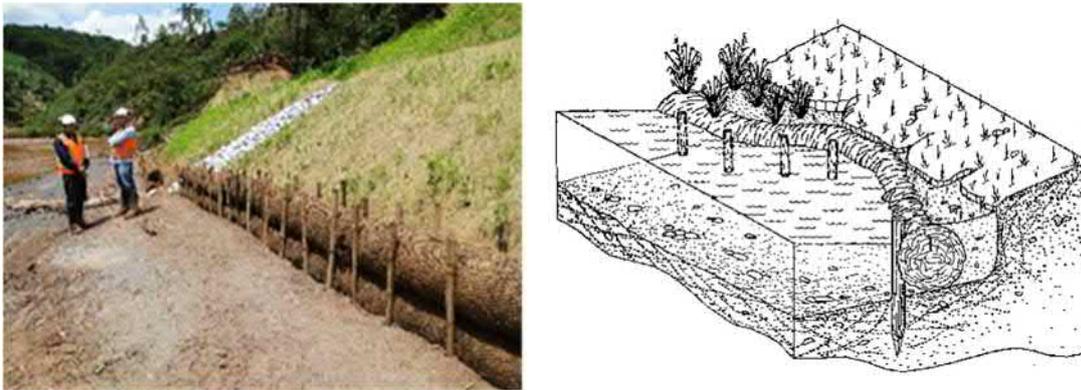


Figura 6.18. Proteção de margens com o uso de retentores de sedimentos.

- Biomantas Antierosivas

Essa opção envolve o uso de materiais orgânicos biodegradáveis e auxilia no estabelecimento de vegetação nas margens bem como no revestimento do leito em riachos (Figura 6.19). A biomanta é feita de fibra de coco ou palha costurada com uma rede de polipropileno fotodegradável. A biomanta além de reduzir os efeitos do *runoff*, contribui na retenção da umidade no solo, no incremento de matéria orgânica e consequentemente no desenvolvimento da vegetação. Pode ser utilizada associada a diversas outras técnicas



Figura 6.19. Proteção de margens com o uso de biomantas antierosivas.

- Geotubos

Essa opção envolve tubos feitos de material geotêxtil preenchidos com sedimentos (Figura 6.20). Os tubos são colocados em paralelo à direção do fluxo ao longo do curso d'água, seja no alto da margem ou no pé da encosta da margem. Os tubos podem ser empilhados para fornecer maior profundidade de proteção contra erosão ou cobertos com aterro para permitir o estabelecimento de vegetação.



Figura 6.20. Proteção de margens com o uso de geotubos.

- Gabiões Vivos

Essa opção envolve o uso de gaiolas de tela de aço preenchidas com pedras e colocadas uma junto da outra para criar um colchão que pode cobrir grandes áreas ao longo da margem do curso d'água (Figura 6.21). Utilizado em locais que necessitam de proteção maior contra erosão. Os gabhões são uma opção robusta para proteção contra erosão e comportam um recalque diferenciado.

Em seu interior podem ser plantadas estacas vivas como forma proporcionar o recobrimento vegetal da estrutura, tornando-a quase imperceptível com o passar do tempo.

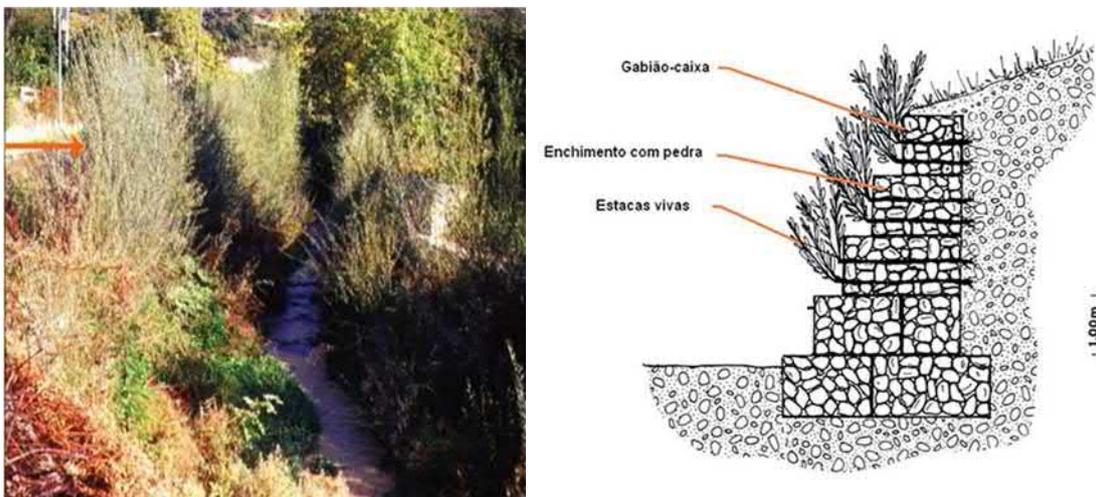


Figura 6.21. Proteção de margens com o uso de gabhões vivos.

- Geocélulas

Essa opção é versátil e oferece diversas configurações para proteção contra erosão. Uma configuração usa geotêxtil de fibra de polipropileno ou polietileno moldado em formato de colmeia, criando um sistema de confinamento celular que tem condições de cobrir a superfície toda da encosta da margem (Figura 6.22). O material de

preenchimento pode variar, desde brita a solos nativos.



Figura 6.22. Proteção de margens com o uso de geocélulas.

- Sistema *Green Wall Water*®

O sistema *Green Wall Water*® consiste na elaboração de estratos compactados, envelopados com material geossintético do tipo geotecido de alta resistência, disposto em camadas de 0,75 m de altura, cujos horizontes de compactação são de 35 cm de espessura (Figura 6.23). Sobre a superfície reconformada da margem aplica-se hidrossemeadura para a revegetação das paredes do canal. Este foi o modelo utilizado no trecho do Marco Zero.



Figura 6.23. Proteção de margens com a técnica do sistema *Green Wall Water*®.

- Plantio de capim Vetiver

Essa opção envolve o plantio de vegetação para estabilizar o solo da margem (Figura 6.24). Além do mix de gramíneas e leguminosas já utilizados na revegetação inicial de crescimento rápido, utiliza-se o capim Vetiver, por ser perene e possuir sistema de

enraizamento profundo que ajuda a estabilizar as margens.

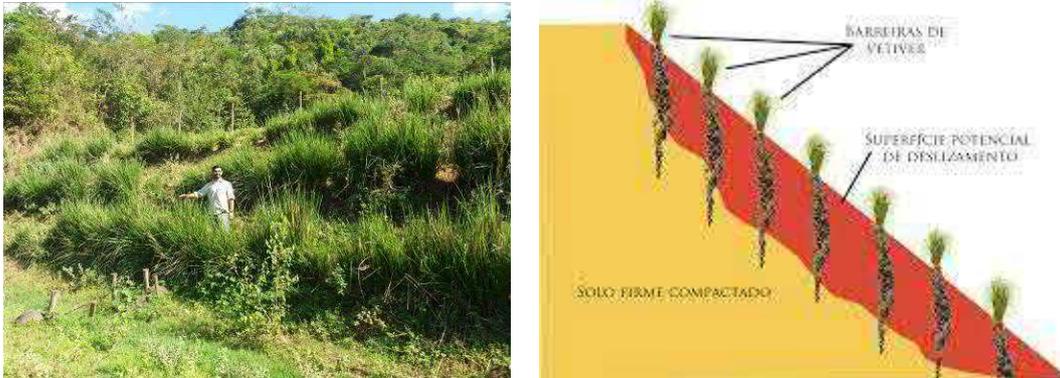


Figura 6.24. Proteção de margens com a técnica de plantio de capim Vetiver.

- Grade viva

Estrutura em madeira obtida através da colocação de troncos de madeira horizontais e verticais dispostos perpendicularmente entre si, e suportada por prumos de madeira cravados no solo que servem de suporte à estrutura (Figura 6.25).



Figura 6.25. Proteção de margens com a técnica de grade viva.

6.3 Recuperação de planícies de inundação e áreas de entorno

6.3.1 Recomposição topográfica e pedológica

No que diz respeito à recomposição topográfica há que se considerar todo o cenário presente pós remoção do rejeito conforme foi explanado no item c) Cenário de Remoção de Rejeito. Os trabalhos orientados à preparação topográfica dos terrenos se darão de modo que se possa favorecer a manifestação das dinâmicas hidrológicas indutoras do desenvolvimento da diversidade de habitats desejados e ao mesmo tempo garantindo a estabilidade física das áreas objeto de recuperação na bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

A seguir são apresentadas as técnicas que poderão ser utilizadas na recomposição de solo nas margens direita e esquerda do ribeirão Ferro-Carvão e afluentes

concomitantemente à obra de construção da calha fluvial, cujas margens e leito serão definidos em projeto específico.

A Figura 6.26 representada no desenho abaixo (sem escala) demonstra o arranjo geral da disposição da “faixa” alvo da recomposição pedológica.

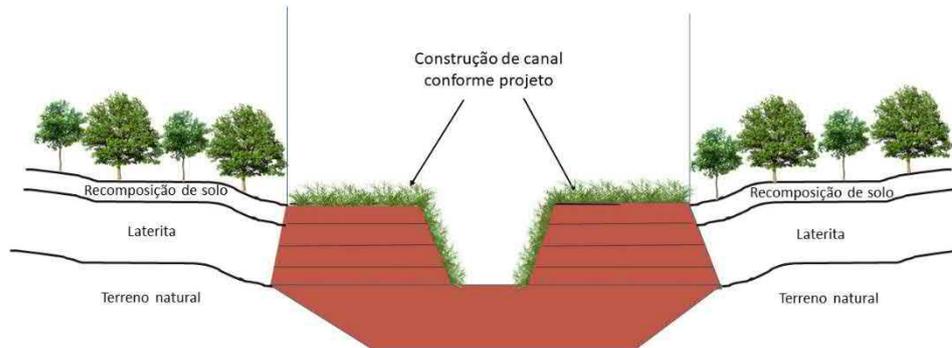


Figura 6.26. Arranjo Geral: Disposição do solo na região de revegetação e restauração florestal.

6.3.1.1 Caracterização do material de recomposição do solo

É fundamental para o sucesso da implantação da mata ciliar a escolha correta do tipo de material para a recomposição do solo na faixa destinada ao plantio das mudas bem como o controle de sua compactação. Nesse sentido, o material para a recomposição de solo apto ao plantio, pode muitas vezes, diferir daquele comumente utilizado para obras de aterro em projetos de construção de canais.

A seguir são apresentados os tipos de solos (material) a serem aplicados na recomposição das planícies adjacentes à calha fluvial do ribeirão Ferro-Carvão e afluentes. Ressalta-se aqui, que a constituição deste material poderá variar em função de peculiaridades associadas a recuperação de uma determinada área que possa vir a surgir ao longo de todo o processo de restauração da bacia.

- Solo Argiloso

Conforme o esquema da Figura 6.27, o material a ser utilizado para a recomposição pedológica das áreas adjacentes a calha fluvial projetada, será dividido em duas camadas, sendo a camada subsuperficial composta por solo, estéril ou “laterita”; e a camada superficial, com espessura mínima de 100 cm, obrigatoriamente composta por horizontes A e/ou B de um solo argiloso com teor de argila entre 40 a 55%.

Será utilizado o horizonte A somente se o solo não tiver sido removido de áreas de pastagens ou áreas com presença de espécies exóticas como braquiária e capim gordura. Essa granulometria permitirá manter condições físicas de solo adequadas ao estabelecimento de plantas, principalmente relacionada a capacidade de retenção de água, e ao mesmo tempo reduzir a possibilidade de compactação adicional, que limita de forma significativa o estabelecimento da maior parte das espécies arbóreas.

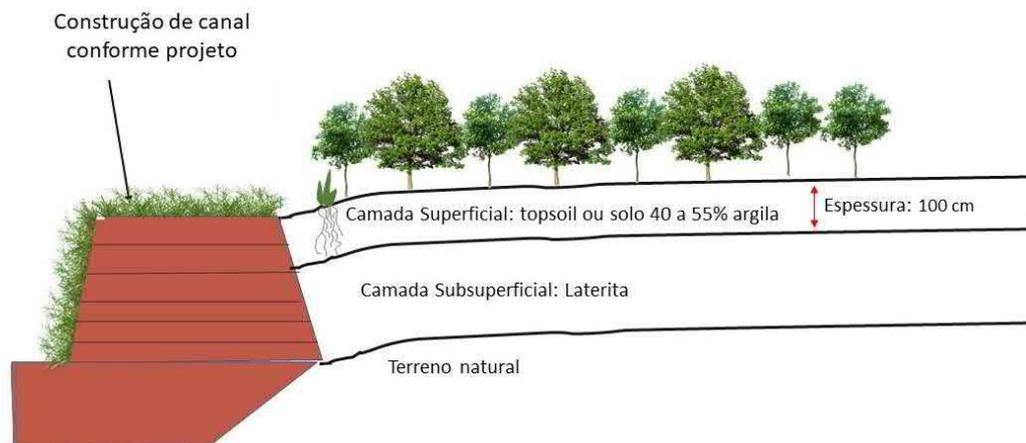


Figura 6.27. Esquema de preenchimento de solo na área de revegetação e restauração florestal.

- *Topsoil*

No caso da utilização de *topsoil* ou solo vegetal proveniente de florestas suprimidas, este será aplicado preferencialmente nos primeiros 30 cm da camada superficial visando possibilitar maior emergência das plântulas provenientes do banco de sementes.

Já nos casos em que se torne necessário o uso de *topsoil* proveniente de áreas de pastagem, este deverá ser incorporado à camada de solo argiloso numa profundidade abaixo de 30 cm da superfície até a camada subsuperficial. Este procedimento torna-se necessário com o objetivo de minimizar a emergência de gramíneas exóticas invasoras comumente presentes no banco de sementes do *topsoil* de áreas de pastagem e que podem prejudicar o desenvolvimento das espécies utilizadas na restauração florestal, o aumento da diversidade de espécies e levar a necessidade de manutenções periódicas constantes.

A Figura 6.28 apresenta o esquema de disposição das camadas superficiais em função do tipo de *topsoil* utilizado.

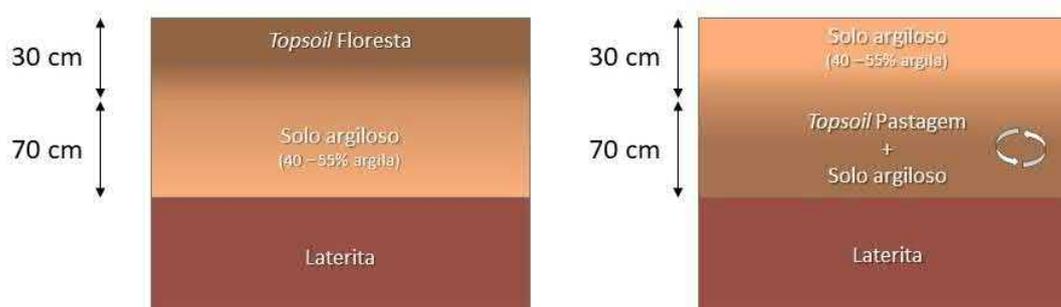


Figura 6.28. Detalhe da disposição das camadas superficiais em função do tipo de *topsoil* utilizado.

Todas as pilhas de *topsoil* serão caracterizadas quanto a sua origem (floresta, pastagem etc) com o objetivo de se ter uma informação preliminar da composição do banco de sementes presente bem como serão amostradas para conhecimento de suas características físico-químicas. Tais informações direcionarão o manejo dos volumes de *topsoil* gerados conforme método de utilização mencionado acima.

- Áreas de Empréstimo

Os locais de fornecimento destes materiais, poderão ser: (i) estoques de *topsoil* disponíveis na área oriundos de atividades de supressão de vegetação, (ii) estoques de solos originários de cortes para a instalação de canteiro de obras ou estruturas diversas no âmbito das obras emergenciais, bem como (iii) áreas de empréstimo de solos previamente prospectadas e licenciadas na região. As áreas de empréstimo serão previamente mapeadas pela engenharia da Vale e os solos serão amostrados para a realização de análises físico-químicas, com objetivo de se aferir a textura do material, bem como as necessidades de correção de acidez e recomendações de adubação.

Após o resultado das análises as melhores áreas de empréstimo serão selecionadas, a fim de planejar o transporte do material até pátios em áreas próximas as obras da calha fluvial para realizar os devidos tratamentos tais como correções e fertilização antes do espalhamento nas planícies e áreas de entorno.

Ao final da exploração do material, as áreas de empréstimo serão devidamente recuperadas.

- Mistura de composto orgânico ou correção de acidez do solo

Caso necessário, o solo destinado à recomposição poderá exigir a correção da acidez a partir da aplicação de calcário ou a incorporação de composto orgânico, a depender do resultado dos ensaios prévios de caracterização do solo, como pH, teor de nutrientes, capacidade de troca catiônica (CTC) etc. A partir do conhecimento destes parâmetros serão aplicados os insumos necessários para a correção da acidez e aumento da disponibilidade de nutrientes por meio das adubações orgânica e mineral.

Essa atividade será executada no próprio local de espalhamento do material ou em áreas adjacentes as obras para preparo do solo. A mistura deverá ser realizada com pá carregadeira ou escavadeira hidráulica executando “tombos” no material até a obtenção de uma mistura homogênea.

6.3.1.2 Reconformação superficial mecanizada

Os trabalhos de reconformação superficial e/ou espalhamento de material nas áreas planas e semi-planas adjacentes a calha fluvial, serão realizados, preferencialmente, por equipamentos mecanizados do tipo trator sobre esteiras e/ou escavadeira hidráulica e, eventualmente, com a utilização de ferramentas manuais do tipo enxada, enxadão ou pá para acabamentos na borda da mata existente.

A compactação para esta “faixa” será aquela “sem controle”, ou seja, somente com a passagem dos próprios equipamentos utilizados no espalhamento.

A camada superficial de recomposição de solo (material argiloso 40 a 55 % de argila + *topsoil* ou somente *topsoil*) ocorrerá nos últimos 100 cm finais até a cota estipulada em projeto. A camada sub-superficial, ou seja, aquela que antecede a recomposição de solo

poderá ser executada com laterita, comumente encontrada nas proximidades da mina de Córrego do Feijão.

Nos locais destinados ao acesso de veículos pesados durante a execução da obra da calha fluvial ou durante a recomposição de solo, deverá ser realizada uma escarificação antes da aplicação dos últimos 30 cm de material, garantindo a não compactação excessiva em locais de futuros plantios de mudas arbóreas.

Para o tratamento do solo nas margens do canal escavado em terreno natural, onde não houver a necessidade de preenchimento de solo para acertar o “greide” do terreno, serão preconizados dois tipos de tratamento, sendo (i) a escarificação do terreno e o espalhamento de *topsoil* com espessura de 0,15 m ou (ii) somente a escarificação do terreno natural, a correção do solo e a incorporação da matéria orgânica, conforme ilustrado na Figura 6.29.

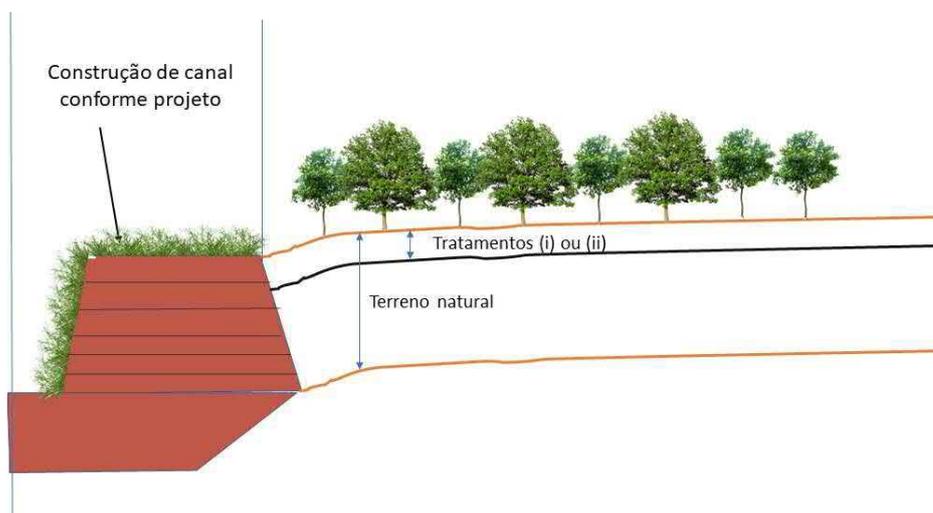


Figura 6.29. Esquema de recomposição do solo em áreas de terreno natural

6.3.2 Técnicas de revegetação inicial

No caso de áreas degradadas, com horizonte superficial erodido, condições físicas críticas (compactação, impermeabilização) ou no caso de solos saprolíticos, pouco desenvolvidos, pouco férteis, é importante inserir espécies de adubação verde. As espécies de adubação verde contribuem para a descompactação do substrato, melhorando a aeração e a infiltração das águas pluviais, permitindo o estabelecimento da fauna de solo (microorganismos em geral, minhocas, cupins, besouros, etc.), adicionam matéria seca e melhoram a fertilidade, além de contribuir para reter sedimentos e diminuir o assoreamento, um serviço ambiental muito importante nas condições da bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

É recomendado o uso de uma combinação de espécies na área a ser restaurada (Tabela 6.1), uma vez que a adaptação deficiente de algumas espécies às condições locais pode ser compensada por outras, mantendo uma cobertura vegetal satisfatória em uma fase importante do processo de recuperação da área, inibindo o crescimento de gramíneas exóticas competidoras. É importante salientar que a lista de adubos verdes é uma recomendação, podendo ser utilizadas outras espécies com características semelhantes, de acordo com a disponibilidade de sementes na região, com o objetivo que se pretende ao revegetar determinada área dentre outros fatores.

A partir do estabelecimento da cobertura de adubação verde, outros benefícios se agregam, como é o caso da proteção do solo contra a erosão e ao dessecamento da superfície pela radiação solar, possibilitando conservação da estrutura do solo e permitindo melhor desenvolvimento das plantas. Neste contexto é importante a inclusão das gramíneas na composição do mix de espécies uma vez que, mesmo não contribuindo de forma tão representativa nas trocas simbióticas como fazem as leguminosas, auxiliam de sobremaneira na estruturação das camadas mais superficiais do solo por meio do seu sistema radicular, minimizando a erosão laminar no início do processo de recuperação.

A tabela abaixo apresenta o mix de espécies utilizado na revegetação da área do Marco Zero e que está sendo utilizado pela Vale nos demais plantios, seja através de semeios manuais ou hidrossemeadura. Mix com a composição de espécies elencadas no relatório enviado pela C.EXT.0074/2020.

Tabela 6.1. Mix de espécies utilizado nos programas de revegetação inicial em Brumadinho.

| Família | Nome Científico | Nome Comum | Quant. (kg/ha) |
|---------------|---|---------------------------|----------------|
| FABACEAE | <i>Cajanus cajan</i> | feijão-guandu | 15 |
| | <i>Canavalia ensiformis</i> | feijão-de-porco | 20 |
| | <i>Crotalaria juncea</i> | crotalária | 20 |
| | <i>Crotalaria spectabilis</i> | chocalho de cascavel | 20 |
| | <i>Stylosanthes guianensis</i> cv. Campo Grande | estilosantes campo grande | 15 |
| | <i>Stylosanthes guianensis</i> cv. BRS Bela | estilosantes Bela | 15 |
| POACEAE | <i>Avena</i> spp. | aveia | 40 |
| | <i>Lolium multiflorum</i> | azevém | 20 |
| | <i>Pennisetum glaucum</i> | milheto | 25 |
| | <i>Pennisetum setosum</i> | capim-custódio | 45 |
| ASTERACEAE | <i>Helianthus annuus</i> | girassol | 15 |
| BRASSICACEAE | <i>Raphanus sativus</i> | nabo forrageiro | 25 |
| AMARANTHACEAE | <i>Altemanthera tenella</i> | apaga-fogo | 25 |
| TOTAL | | | 300 |

Nota: O mix de espécies, listado acima, foi apresentado ao IEF e chancelado por meio do Memorando.IEF/GRAPE.nº 12/2020 em 13 de março de 2020. A partir de recomendações manifestada na Nota Técnica nº 3/IEF/DFAU/2020 em 26 de maio de 2020, a espécie *Crotalaria spectabilis* está sendo substituída pela espécie *Crotalaria ochroleuca*. Além disso, propõe-se a redução das quantidades de *Altemanthera tenella* para 15 kg/ha e aumento de 5 kg/ha nas quantidades das espécies *Stylosanthes guianensis* cv. Campo Grande e *Stylosanthes guianensis* cv. BRS Bela elevando-as para 20 kg/ha cada, mantendo os mesmos 300 kg/ha totais.

As espécies de adubação verde serão estabelecidas por hidrossemeadura ou semeadura a lanço manual em diferentes épocas do ano. O mix de espécies

apresentado tem em comum a tolerância a baixos níveis de fertilidade ou a altos teores de alumínio, ou então a capacidade de se desenvolverem em solos compactados ou mal drenados. Outras espécies podem ser usadas, mas neste mix optou-se por não usar espécies trepadeiras, para facilitar a manutenção e não comprometer o crescimento das mudas. Foi incluída uma espécie de forrageira não leguminosa (o nabo forrageiro), que não fixa nitrogênio, mas tem todas as outras características citadas: crescimento vigoroso, mesmo em solos pobres, forma boa cobertura vegetal, controla plantas invasoras, auxilia na descompactação do solo e apresenta boa capacidade de reciclar nutrientes. As espécies leguminosas da adubação verde, além de boas produtoras de biomassa, têm ainda a capacidade de incorporar mais nutrientes no processo de ciclagem. Isso é normalmente obtido por meio da associação simbiótica entre estas plantas e microrganismos, principalmente pela interação com rizóbios, bactérias que fixam nitrogênio (Franco & Faria, 1997; Sprent, 2001; Lammel et al., 2007), e com fungos micorrízicos, que contribuem decisivamente para absorção de fósforo (Siqueira et al., 1998).

A importância dessas associações tem sido verificada com mais frequência em ambientes altamente degradados, como é o caso da bacia do ribeirão Ferro-Carvão. Entretanto, mesmo em ambientes não tão alterados, a incorporação e a ciclagem de nutrientes por meio de associações simbióticas exercem influência fundamental no desenvolvimento e manutenção da comunidade vegetal em áreas em processo de recuperação (Siddique, 2008, citado por Brancalion et al., 2009).

Um exemplo do potencial de adubação verde pode ser citado: *Stylosanthes guianensis* cv. Campo Grande é um cultivar da EMBRAPA, obtido a partir de espécies nativas de cerrado (*S. capitata* vs *S. macrocephala*), com alta produtividade e eficiência. Em plantios puros, a capacidade de fixar nitrogênio chega a quase 180 kg/ha/ano (Fernandes et al., 2005) e a produção de matéria seca chega a mais de 12 t/ha/ano (Andrade et al., 2010), valores semelhantes do produzido pelo *Stylosanthes guianensis* cv. BRS Bela.

6.3.3 Técnicas de restauração florestal

As atividades na Floresta Estacional são apresentadas considerando a execução de 4 métodos de restauração da diversidade vegetal, que serão usados em tempos diferentes e conforme cada situação: a) plantio de mudas; b) semeadura direta com espécies arbóreas, arbustivas e herbáceas; c) enriquecimento com epífitas; d) nucleação. Além disso, é recomendada a adubação verde como complemento para melhorar a cobertura e características do solo.

6.3.3.1 Isolamento e retirada do fator de degradação

Antes da implantação de qualquer ação de restauração florestal, é preciso inicialmente identificar a existência de fatores de degradação e, caso existam, promover a sua eliminação ou, caso necessário, o isolamento das áreas que se pretende recompor. Dessa forma, evita-se o desperdício de esforços e recursos (financeiros, mudas, mão-de-obra etc.), pois muitas das atividades executadas antes ou mesmo durante a restauração podem ser totalmente perdidas em função da possível continuidade desses fatores de degradação. Além disso, a partir do controle desses fatores, a vegetação nativa tem melhores condições de regeneração, aumentando a eficácia da restauração e, conseqüentemente, levando a redução dos custos associados a essa atividade.

O fator de degradação dominante nas áreas afetadas da bacia do ribeirão Ferro-Carvão foi a passagem e a deposição dos rejeitos de minério sobre o solo. Em extensas áreas,

a espessa camada de rejeitos soterrou o banco de sementes dificultando a regeneração natural, que poderia surgir, nos sítios onde esse banco estivesse íntegro.

Há que se considerar também a presença de espécies exóticas invasoras (como capins dos gêneros *Uruchloa* e *Melinis*) que extremamente adaptadas às condições ambientais da região, tornam-se um importante fator de degradação que muitas vezes desacelera os processos de restauração florestal quando não manejadas de forma eficiente.

A aquisição de propriedades diretamente afetadas pelo rompimento, muitas delas importantes no contexto da conectividade florestal, é um fator positivo na redução dos fatores de degradação sobre as áreas a serem restauradas, permitindo maior controle sobre a área e reduzindo outros fatores de degradação (como pastoreio, extração ilegal etc).

➤ **Acerto e regularização do terreno**

Após a remoção do rejeito, principal fator de degradação, deve-se atentar que feições erosivas poderão estar presentes nas áreas recém expostas. Dessa forma, antes da implementação das atividades vegetativas, será feita uma vistoria, para verificar a ausência de erosões e ou ravinamentos e o grau adequado de estabilização nas encostas. Apenas em áreas estáveis é que se podem realizar as medidas vegetativas. O acerto e a regularização do terreno deverão ser feitos buscando eliminar os sulcos erosivos, o preenchimento dos espaços vazios ou a ancoragem dos sedimentos soltos em encostas. Essa atividade pode ser realizada com o uso de máquinas ou de forma manual.

➤ **Controle de plantas competidoras**

Todas as atividades têm papel importante no sucesso da restauração, mas o controle de plantas competidoras em especial pode determinar o sucesso ou insucesso do projeto, influenciando diretamente nos custos de restauração. É importante deixar claro que espécies competidoras são aquelas que porventura possam vir a prejudicar o desenvolvimento das espécies nativas que se queira implantar. Dessa forma, as espécies competidoras podem ser desde gramíneas invasoras, até lianas em desequilíbrio ou mesmo espécies arbustivo-arbóreas exóticas. Para a eliminação destas espécies deverá ser utilizado preferencialmente o controle mecânico, embora não se descarte o eventual controle químico, em situações específicas e devidamente avaliadas.

➤ **Controle de formigas cortadeiras**

A herbívora, principalmente por formigas cortadeiras, pode ser também um fator restritivo no estabelecimento de espécies (Nepstad et al., 1990; Camargo et al., 2002). Portanto, essa é uma atividade primordial para o sucesso do plantio, tendo influência marcante na sobrevivência e no desenvolvimento das mudas, em função da elevada capacidade de danos associados ao ataque das formigas dos gêneros *Atta* (saúvas) e *Acromyrmex* (quenquéns).

O método de controle será químico, realizado com iscas granuladas à base de Sulfluramida ou Fipronil, tendo normalmente bagaço de laranja como atrativo, podendo ser encontradas comercialmente nas formas granulada solta e granulada acondicionada (saquinhos de 10 gramas, conhecidos como MIPs – micro-porta-iscas), devendo ser distribuídas pela área para que as próprias formigas as levem para dentro do formigueiro. Trata-se do método mais utilizado atualmente no combate a formigas

cortadeiras em florestas, tanto comerciais como nativas plantadas, devido à facilidade de aplicação, à baixa toxicidade e, principalmente, aos bons resultados de controle obtidos com a sua aplicação.

6.3.3.2 Aplicação de biorretentores de sedimentos

Os biorretentores são materiais indicados para encostas, taludes e margens de cursos d'água, agindo como uma barreira permeável, diminuindo a velocidade de escoamento das águas superficiais em áreas inclinadas. São capazes de absorver em até cinco vezes o seu peso em água, além disso, não permitem a passagem de sedimentos, evitando, dessa forma, a erosão e perda de insumos e materiais utilizados na recuperação das áreas. Possuem formato de um cilindro, geralmente com 1 a 3 m de comprimento e 30 cm de diâmetro, flexível, composto por fibras de coco ou palha agrícola, reforçado por uma rede de polipropileno. O período de degradação deste material é de até cinco anos.

Recomenda-se seu uso nas áreas declivosas no tamanho de 1,0 a 1,5 m de comprimento com 25 a 30 cm de diâmetro, colocados em nível no terreno, alinhado com as covas do plantio de mudas (Figura 6.2). Quando necessários, devem ser colocados antes do plantio de mudas.

Nas áreas mais aplainadas podem ser utilizados para formar pequenos terraços em associação com barreiras de capim Vetiver, favorecendo a infiltração das águas no solo e conseqüentemente os fluxos na zona hiporréica e protegendo as margens da calha fluvial reconstituída. O biorretentor deve ser fixado com grampos de aço, madeira ou bambú, de modo a acomodá-lo adequadamente, evitando que os sedimentos passem por debaixo do produto. Os detalhes de fixação devem seguir as orientações dos fabricantes. A quantidade de biorretentores poderá variar de acordo com necessidades específicas da área a ser recuperada.

6.3.3.3 Plantio de mudas

A Vale irá fornecer grande parte das mudas de espécies arbóreas nativas destinadas aos reflorestamentos no município de Brumadinho e na bacia do Paraopeba. Estas mudas estão sendo produzidas na Reserva Natural Vale (RNV) em Linhares-ES a partir de sementes coletadas na região de Brumadinho. Viveiros da região também constituirão fontes de mudas para os projetos de restauração, e serão envolvidos em uma iniciativa mais ampla de fomento no contexto da Rede de Sementes Nativas da bacia do rio Paraopeba, um projeto amplo ainda em processo de construção.

➤ Espaçamento e abertura de covas

Sabidamente, espaçamentos, arranjos de plantios de mudas e dimensões das covas podem variar amplamente em função dos objetivos a serem alcançados nos projetos de reflorestamento/restauração florestal e das características da área ou sítio a ser restaurado.

Para o plantio em áreas abertas a maior parte dos projetos de reflorestamento utiliza, principalmente, o espaçamento 3 x 3 m, o que resulta numa densidade 1.111 plantas/ha. No entanto, conforme alguns autores destacam, espaçamentos grandes não permitem a cobertura total do solo até pelo menos o terceiro ano a partir do plantio (Melo e Durigan, 2007; Rodrigues et al., 2009). Portanto, espaçamentos menores podem ser requeridos para obter um efeito mais rápido de recobrimento da área ou sítio. A adoção de espaçamentos menores pode se tornar inviável em função da disponibilidade de

mudas, tanto em quantidade quanto em riqueza de espécies. Dessa forma, a definição do espaçamento adequado para cada local, e a consequente distribuição das mudas conforme os grupos ecológicos e/ou funcionais em campo será detalhado nos projetos específicos de cada área objeto de recuperação. Tanto o espaçamento quanto os tratamentos culturais, devem estar de acordo com a situação encontrada, levando em consideração o maior ou menor grau de degradação do solo, tipo de cobertura, proximidade de remanescentes florestais e o potencial da regeneração natural no local.

Outra modalidade de plantio de mudas que poderá ser adotado é o individual, principalmente naquelas situações em que há necessidade de plantar poucas mudas por unidade de área, como, por exemplo, para fins de enriquecimento ou ainda para fins de conservação (plantio de mudas de espécies ameaçadas, raras ou protegidas) empregando-se espaçamentos maiores e, portanto, menores densidades de plantio.

Todos os cuidados relacionados às atividades de adubação e coroamento que envolvem a atividade de plantio serão observados e detalhados nos projetos executivos de cada área a ser recuperada.

➤ **Espécies para plantio**

A área de domínio da Floresta Estacional Semidecídua apresenta dois ambientes para restauração: uma onde o lençol freático será mais superficial, em ambiente aluvionar com espécies mais adaptadas a alagamentos frequentes e outra onde as espécies podem suportar raras elevações do lençol freático, mais distantes da calha do rio, e nos trechos das encostas adjacentes.

Por serem sistemas contínuos, a transição entre esses segmentos ocorre de forma gradual e nem sempre são facilmente delimitáveis. Assim, principalmente na faixa de contato destes dois ambientes, deverá ocorrer uma acomodação natural das espécies mais aptas a cada um dos ambientes, principalmente em função da variação do lençol freático. Os procedimentos operacionais descritos anteriormente são os mesmos para estes dois ambientes, ressaltando-se que os biorretentores não são necessários nas áreas mais planas. Além disso, a lista de espécies para plantio também é diferente.

Dado o solo pobre e com impeditivos recomenda-se realizar um plantio com espécies mais rústicas, de rápido crescimento e com boa cobertura de copa, para um rápido recobrimento ou preenchimento da área. A Tabela 6.2 a seguir apresenta uma lista de 45 espécies ocorrentes nas matas ciliares e nas encostas de floresta estacional da região de Brumadinho, sendo 33 adaptadas a ambientes sujeitos a inundações mais frequentes. Dessa lista recomenda-se o plantio de 25 a 30 espécies por hectare. Considera-se que a lista de espécies não é definitiva e pode ser alterada/complementada de acordo com a disponibilidade de sementes coletadas e mudas produzidas nos viveiros regionais, desde que sejam de ocorrência regional.

Posteriormente deverá ser feito um enriquecimento com espécies mais exigentes, de crescimento mais lento, mas de maior longevidade, conhecidas como espécies de diversidade e, por isso, fundamentais para garantir a perpetuação da área plantada substituindo gradualmente substituir o grupo de recobrimento e ocupando definitivamente a área de restauração. É um sistema de plantio denominado como “recobrimento ou preenchimento + diversidade” (Gandolfi et al., 2009; Brancalion et al., 2009).

Tabela 6.2. Espécies de preenchimento recomendadas para restauração da floresta estacional semidecídua na bacia do ribeirão Ferro-Carvão, em Brumadinho (MG), classificadas em dois tipos de ambientes: aluviais (AL) e matas ciliares ou de encosta (MCE).

| Família | Nome Científico | AL | MCE |
|-----------------|---|----|-----|
| Anacardiaceae | <i>Lithraea molleoides</i> (Vell.) Engl. | X | X |
| Anacardiaceae | <i>Tapirira guianensis</i> Aubl. | X | X |
| Asteraceae | <i>Vernonanthura discolor</i> (Spreng.) H.Rob. | X | X |
| Cannabaceae | <i>Trema micranta</i> Blumer | | X |
| Euphorbiaceae | <i>Alchornea glandulosa</i> Poepp. & Endl. | X | X |
| Euphorbiaceae | <i>Alchornea triplinervia</i> (Spreng.) Mull.Arg | X | X |
| Euphorbiaceae | <i>Aparisthium cordatum</i> (A.Juss.) Baill. | X | X |
| Euphorbiaceae | <i>Croton floribundus</i> Spreng. | X | X |
| Euphorbiaceae | <i>Croton urucurana</i> Baill. | X | X |
| Euphorbiaceae | <i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong | X | X |
| Fabaceae | <i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg. | | X |
| Fabaceae | <i>Bauhinia forficata</i> Link | X | X |
| Fabaceae | <i>Cassia ferruginea</i> (Schrad.) Schrad. Ex DC. | X | X |
| Fabaceae | <i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong | X | X |
| Fabaceae | <i>Erythrina falcata</i> Benth. | | X |
| Fabaceae | <i>Erythrina speciosa</i> Andrews | X | X |
| Fabaceae | <i>Erythrina verna</i> Vell. | | X |
| Fabaceae | <i>Inga edulis</i> | X | X |
| Fabaceae | <i>Inga laurina</i> (Sw.) Willd. | X | X |
| Fabaceae | <i>Inga sessilis</i> | X | X |
| Fabaceae | <i>Inga striata</i> Benth. | X | X |
| Fabaceae | <i>Inga vera subsp. affinis</i> (DC.) T.D.Penn. | X | X |
| Fabaceae | <i>Inga vera</i> Willd. | X | X |
| Fabaceae | <i>Machaerium brasiliense</i> Vogel | X | X |
| Fabaceae | <i>Machaerium nyctitans</i> (Vell.) Benth. | X | X |
| Fabaceae | <i>Piptadenia gonoacantha</i> (Mart.) J.F.Macbr. | X | X |
| Fabaceae | <i>Platypodium elegans</i> Vogel | | X |
| Fabaceae | <i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) Blake | | X |
| Fabaceae | <i>Senegalia polyphylla</i> (DC.) Britton & Rose | | X |
| Fabaceae | <i>Senna macranthera</i> (DC. ex Collad.) H.S.Irwin & Barneby | X | X |
| Fabaceae | <i>Senna multijuga</i> (Rich.) H.S.Irwin & Barneby | X | X |
| Fabaceae | <i>Stryphnodendron polyphyllum</i> Mart. | X | X |
| Fabaceae | <i>Tachigali vulgaris</i> L.G.Silva & H.C.Lima | | X |
| Malpighiaceae | <i>Byrsonima sericea</i> DC. | X | X |
| Malvaceae | <i>Guazuma ulmifolia</i> Lam. | X | X |
| Melastomataceae | <i>Miconia albicans</i> (Sw.) Triana | | X |
| Melastomataceae | <i>Miconia cinnamomifolia</i> (DC.) Naudin | X | X |
| Melastomataceae | <i>Pleroma fissinervium</i> Schrank et Mart. ex DC. | X | X |
| Melastomataceae | <i>Trembleya parviflora</i> (D.Don) Cogn. | | X |
| Phytolaccaceae | <i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms | X | X |
| Rutaceae | <i>Zanthoxylum rhoifolium</i> Lam. | X | X |
| Solanaceae | <i>Solanum granulosooleprosum</i> Dunal | | X |
| Urticaceae | <i>Cecropia pachystachya</i> Trécul | X | X |
| Verbenaceae | <i>Citharexylum myrianthum</i> Cham. | X | X |



Figura 6.30. Exemplo ilustrativo de plantio de mudas associado com adubação verde, após a remoção dos rejeitos, e com exemplo de aplicação de biorretentores ao lado de cada muda, em nível no terreno.

6.3.4 Métodos alternativos de recuperação

Assim como a indução (condução) da regeneração natural e o plantio de espécies arbustivo-arbóreas de ocorrência regional, os métodos alternativos de recuperação podem ser utilizados separadamente ou em conjunto, inclusive junto com os métodos usuais de recuperação tanto passiva quanto assistida.

Ressalta-se novamente que a opção eventual por um e outro método alternativo para uma dada área será feita de maneira criteriosa e conforme definido em projeto, tendo em vista as condições locais propícias e o custo-benefício da estratégia/abordagem de recuperação.

Quando a área alterada e/ou degradada é muito extensa pode-se optar pela aplicação de métodos de nucleação como uma alternativa ou complemento à condução da regeneração natural, semeadura e/ao plantio de mudas em área total. Além das vantagens técnicas, aplicação dos métodos de nucleação implica em custos menores do que aqueles necessários à implantação de planos, programas e/ou projetos baseados no plantio de espécies arbustivo-arbóreas em área total (Bechara et al., 2007).

A recuperação através da nucleação é caracterizada por diversas técnicas que são implantadas em núcleos (nunca em área total), a fim de deixar espaços abertos para a expressão de eventualidades, ou eventos e processos de natureza estocástica, ocupando em média 5% da área total a ser restaurada. A seguir são apresentados os métodos de nucleação que podem ser utilizados e devidamente dimensionados de acordo com diretrizes, metas e objetivos de planos, programas e/ou projetos de recuperação em função dos atributos locais e demais necessidades

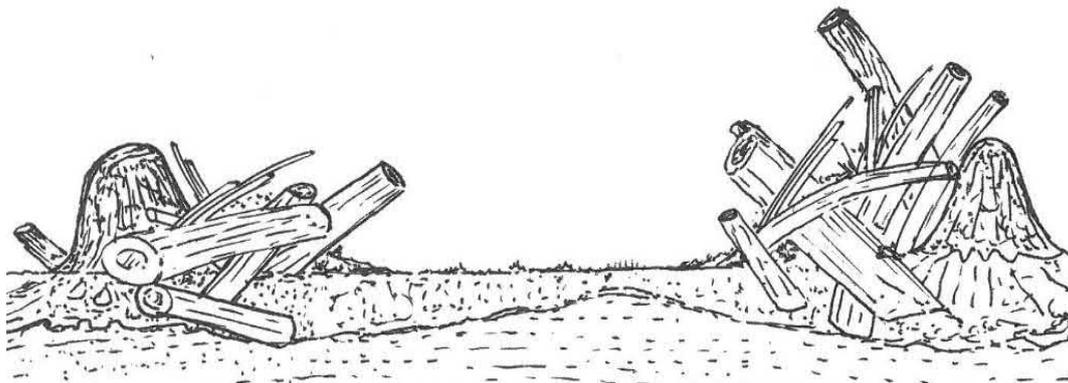


Figura 6.31. Ilustração esquemática de nucleação com galharia, que pode ser uma técnica para contribuir com a restauração.

6.3.4.1 Transposição de solo superficial/serrapilheira

A transposição de solo superficial, visando a recuperação da micro, meso e macrofauna e flora (sementes, propágulos, microrganismos, artrópodes, moluscos etc.), é uma forma direta de formar núcleos em áreas degradadas. Com o uso desta técnica são resgatados, além do banco de sementes e outros tipos de propágulos, a biota do solo e a serrapilheira dos fragmentos de vegetação nativa, precipitando o desenvolvimento de diversas formas de vida vegetal e animal (Bechara, 2006; Martins, 2009) e a intensificação dos processos biogeoquímicos no solo degradado.

A serrapilheira e a camada superficial do solo provenientes das ações de supressão de vegetação deverão ser depositadas em áreas pré-definidas e espera-se que, com o tempo, essas áreas tornem-se núcleos de alta diversidade de espécies, desencadeando o processo sucessional na área degradada como um todo (Martins, 2009).

Como a maior parte das sementes concentra-se nos primeiros 5 cm de solo superficial, normalmente coleta-se uma fina camada de solo de 5 a 10 cm de profundidade. Uma vez coletados, o solo e a serrapilheira devem ser prontamente depositados na área ser restaurada, já que o armazenamento por longo tempo pode resultar na perda da viabilidade das sementes e na morte dos demais organismos. A largura das faixas ou a área das pilhas de solo/serrapilheira, bem como o espaçamento entre elas, serão definidas em projeto.

6.3.4.2 Poleiros artificiais e naturais

Este método consiste na instalação de poleiros naturais ou artificiais (Figura 6.32) em áreas abertas com a função de atrativos para a fauna dispersora. Diversos estudos demonstram que estas estruturas funcionam como local de pouso para aves e morcegos que se deslocam entre remanescentes ou fragmentos florestais, possibilitando que estes animais depositem sementes nas proximidades dos poleiros através de suas fezes e material regurgitado. Em outras palavras, os poleiros têm a função de incrementar a chuva de sementes e acelerar o processo sucessional (Reis et al. 2003, 2006; Santos e Pillar, 2007; Tres et al., 2007; Martins, 2009).

O número e a disposição dos poleiros serão definidos conforme projeto e dependem do tamanho da área a ser restaurada e da distância da área aos fragmentos florestais. Para que os poleiros surtam os efeitos desejados, é necessário que o solo em sua base esteja em condições de permitir a germinação e estabelecimento das plântulas. Ou seja, é

interessante que não esteja compactado/adensado, coberto por vegetação densa ou erodido.

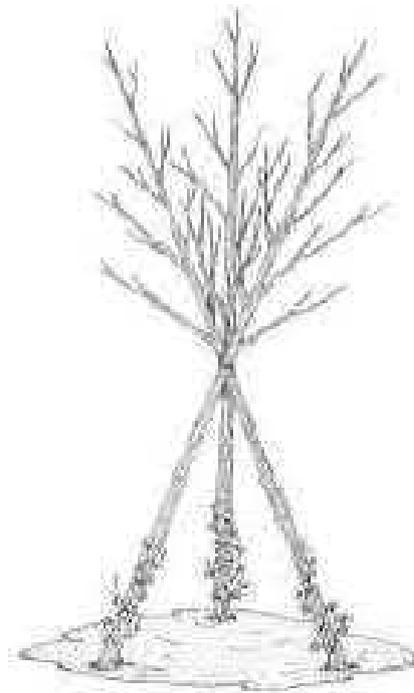


Figura 6.32. Esquema da estrutura do poleiro artificial do tipo “seco”, construído com colmos de bambu. Fonte: Bechara (2006).

Árvores mortas e fenecentes que remanesceram nas bordas de alguns fragmentos florestais atingidos pelos rejeitos constituem importantes poleiros naturais e serão sempre que possível, mediante análise prévia de seu risco de queda, mantidas como abrigo a fauna dispersora.

6.3.4.3 Enriquecimento com outras formas de vida vegetal

O enriquecimento da diversidade vegetal deve ocorrer naturalmente ao longo do tempo, através da dispersão de propágulos oriundos dos fragmentos florestais adjacentes, que são bastante comuns na bacia do ribeirão Ferro-Carvão. Entretanto, neste projeto, é recomendado adicionalmente um enriquecimento artificial para acelerar a sucessão vegetal nas áreas em restauração, através da coleta propágulos em fragmentos florestais ocorrentes na região, visando:

- Introdução de espécies arbóreas pioneiras para refazer a diversidade no banco de sementes do solo;
- Introdução de espécies arbóreas mais exigentes, não utilizadas no plantio;
- Introdução de espécies de outras formas de vida originais da floresta estacional semidecídua, principalmente herbáceas, arbustivas e epífitas.

Os detalhes específicos de cada uma destas técnicas serão apresentados nos projetos específicos de cada área ao longo do processo de recuperação da bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

Vários programas de monitoramento estão em fase de construção e vêm sendo discutidos com os diversos *stakeholders* envolvidos no processo no âmbito das revisões do Capítulo 3 do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Paraopeba. Nestes programas serão definidos os indicadores a serem acompanhados e as respectivas metas a serem perseguidas as quais permitirão avaliar a eficiência e eficácia das ações implementadas.

7 CRONOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO, IMPLANTAÇÃO E RESTAURAÇÃO SUSTENTÁVEL

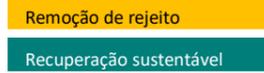
7.1 Plano Plurianual de Remoção de Rejeitos e Recuperação Ambiental

No cronograma da Tabela 7.1, apresenta-se o planejamento plurianual da remoção dos rejeitos nas áreas e o avanço da recuperação sustentável das mesmas, considerando também o descomissionamento das estruturas de contenção. Um detalhamento deste planejamento, com informações de volumes de rejeitos manejados e a visualização no mapa da recuperação sustentável nas áreas, ao longo do ribeirão Ferro-Carvão, pode ser visto no Anexo 2 – *Plano de Manejo vs Recuperação vs Descomissionamento das Estruturas de Contenção*.

Tabela 7.1. Cronograma plurianual de remoção de rejeitos, recuperação sustentável e descomissionamento das áreas.

Cronograma Gerencial

Legenda - tasks



Legenda - risco assoreamento



Manejo e Recuperação Sustentável

Área A

- Barragem I (Remoção do rejeito) - Área A
- Risco de carreamento rejeito no canal recuperado
- Recuperação área da B1
- Descomissionamento e Recuperação - Bermas de Segurança - B1

Área B

Remansos I e II

- Manejo - Apoio às Buscas (até 5ª Estratégia)
- Manejo - Remansos I e II (6ª Estratégia)
- Risco de carreamento rejeito no canal recuperado
- Recuperação Ambiental Remanso I
- Recuperação Ambiental Remanso II

Montante BH0

- Desassoreamento - BH0
- Área B - Entre BH0 e B1
- Risco de carreamento rejeito no canal recuperado
- Recuperação entre BH-00 e TCF
- Descomissionamento BH-00 e recuperação reservatório
- Recuperação entre TCF e B1

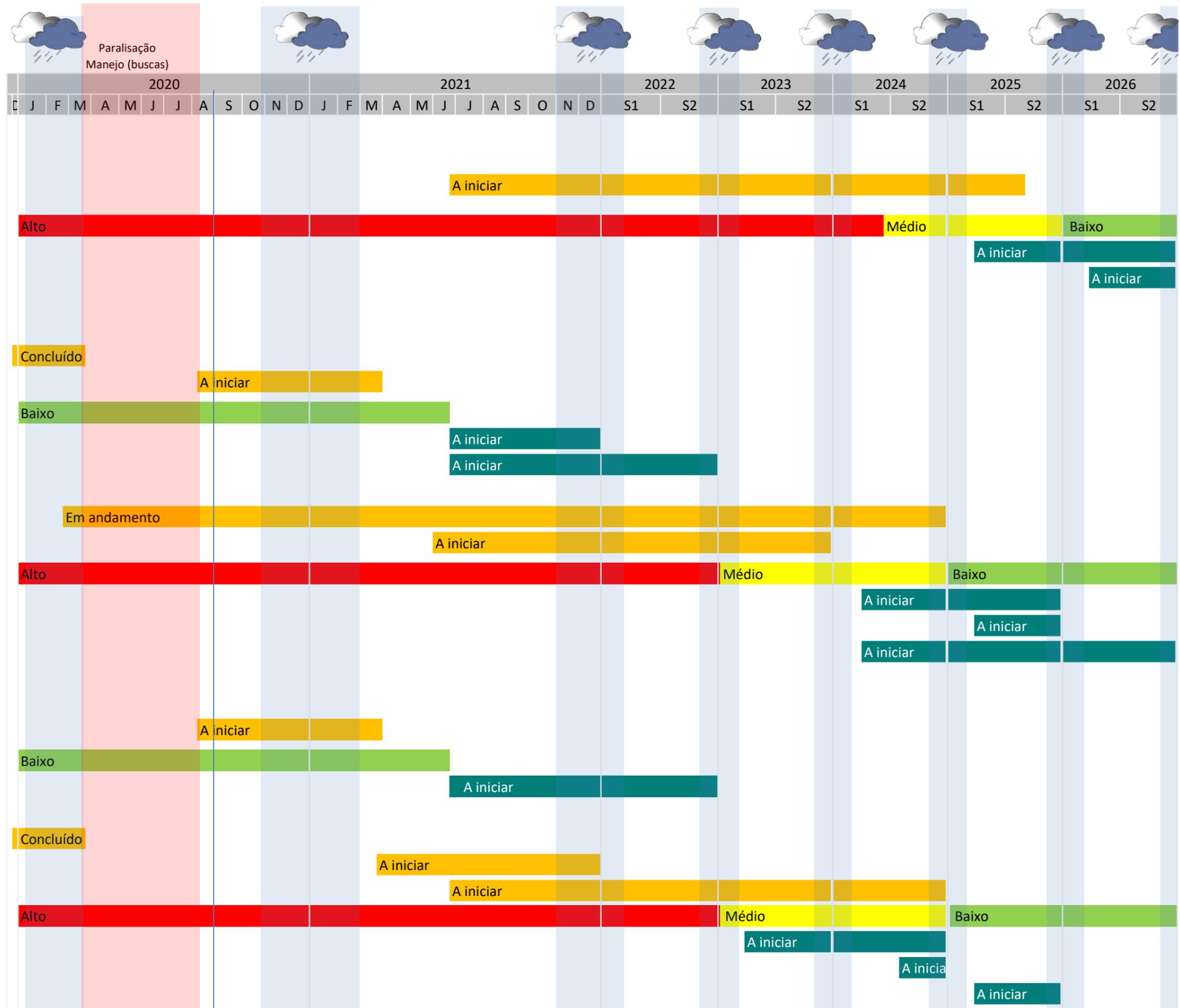
Área C

Remansos III

- Manejo Área C - Remanso III (6ª Estratégia)
- Risco de carreamento rejeito no canal recuperado
- Recuperação Ambiental Remanso III

Montante BH-01 até Dique 2

- Manejo Área C - Montante BH1 (Parcial)
- Manejo Área C - Entre BH1 e Dique 2
- Desassoreamento - BH1
- Risco de carreamento rejeito no canal recuperado
- Recuperação entre BH-01 e Dique 2
- Desomissionamento BH-01
- Recuperação ambiental reservatório BH-01



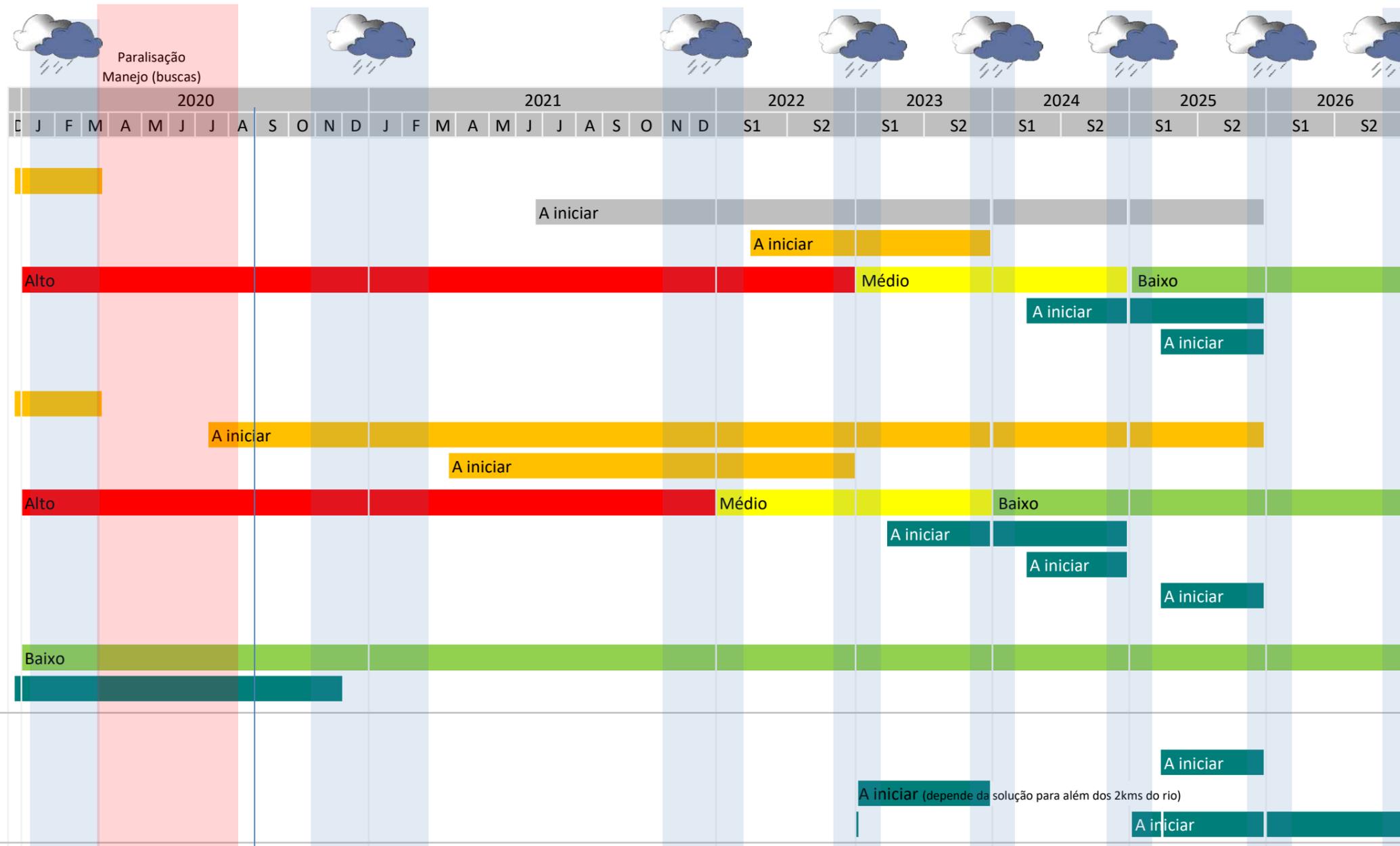
Cronograma Gerencial

Legenda - tasks

- Remoção de rejeito
- Recuperação sustentável

Legenda - risco assoreamento

- Alto
- Médio
- Baixo



7.2 Cronograma dos *Workshops*

Na Tabela 2 apresenta-se um cronograma para a realização dos *workshops* para a tomada de decisão para a definição da solução de recuperação sustentável a ser implementada em cada compartimento da bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

Ainda neste mês de setembro um teste para validação da metodologia de análise multicritério (MCA) será realizada para o compartimento do Remanso I, visando a calibração da metodologia.

Tabela 7.2. Cronograma da realização dos *workshops*.

| Ano | Mês – Atividade |
|------|--|
| 2020 | Set/20 – Teste de calibração da MCA – Recuperação Remanso I |
| | Out/20 - WS Definição do conceito da recuperação geomorfológica e dos pesos para os critérios (Remansos I, II e III) |
| | Nov/20 – WS Definição da recuperação área B (Remanso I e II) e área C (Remanso III) |
| 2021 | Jun/21 – WS Definição do conceito da recuperação geomorfológica e pesos para os critérios (áreas C – jusante Dique 2, áreas D e E) |
| | Out/21 – WS Definição da recuperação áreas C – jusante Dique 2, Áreas D e E |
| 2022 | Jun/22 – WS Definição do conceito da recuperação geomorfológica e dos pesos para os critérios áreas A, B (exceto remansos) e área C (montante Dique 2) |
| | Out/22 – WS Definição da recuperação áreas A, B (exceto remansos) e área C (montante Dique 2) |

7.3 Governança de processo

Conforme descrito na metodologia de aplicação da MCA para a tomada de decisão em relação as soluções de recuperação sustentável da bacia do ribeirão Ferro-Carvão foi proposta a realização de *workshops* envolvendo diferentes *stakeholders*, de acordo com o cronograma supracitado.

Considerando que os *workshops* envolverão a participação do SISEMA e suas instituições, a Vale e demais partes interessadas, pretende-se que as decisões tomadas, em conjunto e registradas em atas, possam ser implementadas após a realização de cada *workshop*, sendo essa a instância decisória para a definição do conceito da recuperação sustentável aplicada a cada compartimento. A partir desta decisão serão contratados e desenvolvidos os projetos executivos.

A governança do processo deve considerar o fluxo para o gerenciamento de mudanças. Caso seja identificada a necessidade de mudança conceitual do projeto de recuperação sustentável já validado pelas partes interessadas, seja esta na fase de detalhamento ou de implantação, uma nova avaliação multicritério poderá ser realizada e novamente validada pelas partes interessadas. Adequações de projeto durante estas fases que não alterem o conceito aprovado deverão ser registradas e informadas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- _____. NBR 10005: Lixiviação de Resíduos – Procedimento Rio de Janeiro-RJ, 2004.
- _____. NBR 10006: Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro-RJ, 2004.
- _____. NBR 15469: Ecotoxicologia – Coleta, preservação e preparo de amostras Rio de Janeiro-RJ, 2015.
- ANDRÉN H. (1994). *Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review*. *Oikos*, 71:355-366.
- AQEM - ASSESSMENT SYSTEM FOR THE ECOLOGICAL QUALITY OF STREAMS AND RIVERS THROUGHOUT EUROPE USING BENTHIC MACROINVERTEBRATE. *Manual for the Application of the AQEM System: a comprehensive method to assess european streams using benthic macroinvertebrates, developed for the purpose of the water framework directive*, version 1.0, february 2002. Version 1.0. www.aqem.de
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro-RJ, 2004.
- AWADE, M.; METZGER, J.P. (2008). *Using gap-crossing capacity to evaluate functional connectivity of two Atlantic rainforest birds and their response to fragmentation*. *Austral Ecology* 33:863-871.
- BAPTISTA, M. B.; PÁDUA, V. L. Restauração de sistemas fluviais. Barueri, SP: Manole, 582p. 2016a.
- BAPTISTA, M., MOURA, P. M., EVANGELISTA, J. A., MUZZI, M. R. S.; GOMES, L. N. L. Técnicas para intervenções em cursos d'água. In: M. B. Baptista & V. L. Pádua (Eds), Restauração de sistemas fluviais (pp 259-303). Barueri, SP: Manole. 2016b.
- BARBOUR, M.T.; GERRITSEN, J.; SYNDER, B.D.; STRIBLING, J.B. *Habitat assessment and physicochemical parameters*. In: *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish*. 1999. EPA 841-B-99-002. US. Washington, D.C. chapter 5. 34p. Disponível em: <http://www.epa.gov/owow/monitoring/techmon.html>.
- BARDOS, P.; LAZAR A.; WILLENBROCK, N.. *A Review of Published Sustainability Indicator Sets: How applicable are they to contaminated land remediation indicator-set development?*. CL:AIRE's SuRF Sustainable Remediation Forum UK, 9 de maio de 2009.
- BECHARA, F.C. 2006. Unidades demonstrativas de restauração ecológica através de técnicas nucleadoras: Floresta Estacional Semidecidual, Cerrado e Restinga. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Recursos Florestais, ESALQ-USP, Piracicaba.
- BOSCOLO, D., C. CANDIA-GALLARDO, M. AWADE, and J. P. Metzger. (2008). *Importance of Interhabitat Gaps and Stepping-Stones for Lesser Woodcreepers (Xiphorhynchus fuscus) in the Atlantic Forest, Brazil*. *Biotropica* 40:273-276.

BRANCALION, P.H.S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R.R. Uma visão ecossistêmica do processo de restauração ecológica. In: Rodrigues, R.R.; Brancalion, P.H.S.; Isernhagen, I. (Org.). Pacto para a restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal. 1ed.São Paulo: Instituto BioAtlântica, 2009, v. 1, p. 78-85.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA 430 – Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, 2005.

BRASIL. Lei Federal n.º 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 25 maio 2012. URL http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm

CAMARGO, J.L.P.; FERRAZ, I.D.K. & IMAKAWA, A.M. 2002. *Rehabilitation of Degraded Areas of Central Amazonia Using Direct Sowing of Forest Tree Seeds*.

CARMO, P. F. B. Modelos e Técnicas de tomada de decisão em análise multicritério – Aplicações em Avaliação de Imóveis. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias – XIX COBREAP, Foz do Iguaçu, Brasil, 21-25 agosto 2017.

CASTRO, P.T.A.; LANA, C.E.; FERREIRA, H.L.M.; LEITE, M.G.P.L.; SOBREIRA, F.G.; BACELLAR, L.A.P. A avaliação do estado de preservação do Alto Rio das Velhas, MG, com Base em Características Físicas do Ambiente Fluvial. Ouro Preto, DEGEO - UFOP / FAPEMIG. 2005. 239p. Relatório técnico final.

CASTRO, P.T.A.; FERREIRA, H.L.M.; MELO, M.C; LANA, C.E.; SILVA, A.C. Caracterização de zonas funcionais e da qualidade ecomorfológica do *habitat* de segmentos e trechos fluviais da bacia do rio Jequitaiá, MG. 2007 In: *XI Congresso Brasileiro de Limnologia, Macaé*.

Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008. Publicada no Diário do Executivo “Minas Gerais”, 05/2008.

DURY, G. H. 1973. *Magnitude-frequency analysis and channel morphology*. In *Fluvial Geomorphology*, ed. M. Morisaua, pp. 91-121. Allen & Unwin.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER, G.; NORONHA, S. M. Apoio à decisão. Florianópolis: Insular, 2001. 296p.

EPA – *United States Environmental Protection Agency. Test Method: Liquid-Solid Partitioning as a Function of Extract pH Using a Parallel Batch Extraction Procedure. Technical Resource Document, EPA/1313-SW-846.*

EPA – *United States Environmental Protection Agency. Test Method: Liquid-Solid Partitioning as a Function of Liquid-to-Solid Ratio in Solid Materials Using a Parallel Batch Procedure. Technical Resource Document, EPA/1316-SW-846.*

FAHRIG L, (2003). *Effects of habitat fragmentation on biodiversity. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematic*, 34:487-515.

FERRAZ, S.F.B.; VETTORAZZI, C. A. Identificação de áreas para a recomposição florestal com base em princípio de Ecologia de Paisagem. *Revista Árvore*, v. 27, n. 4, p. 575-583, 2003.

FERREIRA, H.L.M.; CASTRO, P.T.A. Abordagem metodológica para avaliação da estrutura física de *habitats* fluviais em climas tropicais. 2003. In: *IX Congresso Brasileiro de Limnologia*, Juiz de Fora. v. cd.

FERREIRA, H.L.M.; CASTRO, P.T.A. Avaliação ecomorfológica de segmentos e trechos fluviais – aplicação da abordagem rápida no alto curso da bacia do rio das Velhas/MG, Brasil. 2005 a. In: *Anais do XII Congresso Latinoamericano de Geologia. Área técnica: Geologia Ambiental*. Quito, Equador. 5p. v. cd.

FERREIRA, H.L.M.; CASTRO, P.T.A. *Ecomorphological analysis of fluvial habitats of the upstream part of rio das Velhas/MG, Brazil. 2005 b. In: Proceeding International Symposium on Land Degradation and Desertification. Session: S2 – Rivers, Fluvial Systems and Land Degradation*. Uberlândia/MG, Brazil. 8p. v. cd.

FERREIRA, H.L.M.; CASTRO, P.T.A.; MELO M.C. Caracterização ecomorfológica do *habitat* de segmentos e trechos fluviais da bacia hidrográfica do rio Muriaé, MG. 2007. In: *XI Congresso Brasileiro de Limnologia*, Macaé.

FERREIRA, H.L.M.; MELO M.C; FREITAS, M.A.F.P.; MEYER, S.T.; CAMPOS, M.C.S.; FELIPE, G.A.; Ambientes aquáticos em Minas Gerais: Qualidade Ecológica. Belo Horizonte, MG. Centro de Inovação e Tecnologia SENAI, 156p. ilustr.2017. Disponível em: <https://goo.gl/P6hVkt>.

FISRWG. *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*. Federal Interagency Stream Working Group. Parte 653 do *National Engineering Handbook, USDA-Natural Resources Conservation Service*, 1998.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; MORAES, J. F. L. O uso da análise multicritério para a definição de áreas prioritárias a restauração de Área de Preservação Permanente (APP), no noroeste paulista. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

FRISSEL, C.A.; LISS, W.J.; WARREN, C.E.; HURLEY, M.D. *A hierarchical framework for stream classification: viewing streams in a watershed context*. *Environmental Management*, v. 10, n. 2, p. 199-214, 1986.

GANDOLFI, S.; BELLOTTO, A.; RODRIGUES, R.R. Inserção do conceito de grupos funcionais na restauração, baseada no conhecimento da biologia das espécies. In: Rodrigues, R.R.; Brancalion, P.H.S.; Isernhagen, I.. (Org.). *Pacto para a restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal*. 1ed. São Paulo: Instituto BioAtlântica, 2009, v. 1, p. 62-77.

HEY, R. D. 1975. *Design discharge for natural channels*. In *Science, Technology and Environmental Management*, ed. R. D. Hey and T. D. Davies, pp. 73-88. Saxxon House, Farnborough.

KARR, J. R.; CHU, E. W. *Restoring Life in Running Waters Better Biological Monitoring*. 1999. Island Press. Washington, D.C. 206 pp.

LAMMEL, D.R.; BRANCALION, P.H.S.; DIAS, C.T.S.; CARDOSO, E.J.B.N. *Rhizobia and other legume nodule bacteria richness in Brazilian Araucaria angustifolia forest*. Scientia Agricola, v.64, n.4, p.400-408, 2007.

LANA, C. E.; FERREIRA, H. L. M.; CASTRO, P. T. A.; MELO, M. C.; SILVA, A. C. Identificação de zonas funcionais e avaliação ecomorfológica rápida de segmentos e trechos fluviais da bacia do rio Jequitai/MG. 2005. In: *X Congresso Brasileiro de Limnologia*, Ilhéus. v. cd.

LEOPOLD, L. B., 1994. *A view of the river*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts

LÓPEZ, C.M.; FERREIRA, H.L.M.; CASTRO, P.T.A; CAMARGO, A.F.M. Caracterização ecomorfológica de segmentos da vereda Curral da Égua, serra do Dilúvio, região de Três Marias, MG. 2007. In: *XI Congresso Brasileiro de Limnologia*, Macaé.

MARTINS, S.V. *Soil seed bank as indicator of forest regeneration potential in canopy gaps of a semideciduous forest in Southeastern Brazil*. In: FOURNIER, M.V. (Ed.) *Forest regeneration: ecology, management and economics*. New York: Nova Science Publishers, p.113-128, 2009.

MELO M.C; CASTRO, P.T.A.; FREITAS, M.A.F.P.; CORDEIRO, P.F.; FERREIRA, H.L.M. Tipificação de ambientes lóticos em macro e meso escalas em Minas Gerais, Brasil. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais – GESTA, v. 4, n. 1, p. 80-94, 2016.

MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. *Structural evolution of planted riparian forests in the Medium Paranapanema Valley, SP, Brazil*. Scientia Florestalis, n.73, p.101-111, 2007.

MOURA, A. C. M. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise de Multicritérios. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - INPE., Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007.

NEPSTAD, D.; UHL, C.; SERRÃO, E.A.S. *Surmounting barriers to forest regeneration in abandoned, highly degraded pastures: a case study from Paragominas, Pará, Brazil*. Pp.215–229, In A. Anderson, editor. *Alternatives to deforestation: steps toward sustainable use of the Amazon Rain Forest*. Columbia University Press, New York, 1990.

REIS, A.; BECHARA, F.C.; TRES, D.R.; TRENTIN, B.E. Nucleação: concepção biocêntrica para a restauração ecológica. Ciência Florestal, 24(2):509-519, 2014.

FRANCO, R.A.M.; HERNANDEZ, F.B.T.; LEITE DE MORAES, J.F. O uso da análise multicritério para a definição de áreas prioritárias a restauração de Área de Preservação Permanente (APP), no noroeste paulista. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

RICHARDS, K. S. 1982. *Rivers: form and process in alluvial channels*. Methuen, London.

SIQUEIRA, J.O.; CARNEIRO, M.A.C.; CURI, N.; ROSADO, S.C.S.; DAVIDE, A.C. *Mycorrhizal colonization and mycotrophic growth of native woody species as related to sucessiona lgroups in Southeastern Brazil*. *Forest Ecology and Management*, v.107, p.241-252,1998.

-
- SPRENT, J.I. *Nodulation in legumes*. Kew: Royal Botanic Gardens, 2001. 146p.
- TAMBOSI, L.R.; MARTENSEN, A.C.; RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P. (2014). *A Framework to Optimize Biodiversity Restoration Efforts Based on Habitat Amount and Landscape Connectivity*. *Restoration Ecology*, 22:169-177.
- TAMBOSI, L.R.; RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P. (2013). Identificação de áreas para o aumento da conectividade dos remanescentes e unidades de conservação da Mata Atlântica. Pages 33-84 in A. A. C. F. B. Guedes, editor. *Mapeamentos para a conservação e recuperação da biodiversidade na Mata Atlântica: em busca de uma estratégia espacial integradora para orientar ações aplicadas*. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Brasília, DF.
- URBAN, D.; KEITT, T. (2001). *Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective*. *Ecology*, 82:1205-1218.
- VETTORAZZI, C. A. Avaliação multicritério, em ambiente SIG, na definição de área prioritárias a restauração florestal visando à conservação dos recursos hídricos, 2006. 151 f. Tese (Livre Docência em Topografia) - Escola Superior de "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2006.
- VINCKE, P. (1992). *Multicriteria decision-aid*. Chichester: John Wiley & Sons.
- WILLIAMS, G. W. 1978. *Bank full discharge of rivers*. *Water Resources Research* 14: 1141-1154.
- WOLMAN, M. G. and L. B. LEOPOLD. 1957. *River flood plains: some observation on their formation*. USGS Professional Paper 282C.

9 EQUIPE TÉCNICA ENVOLVIDA

| | |
|---|--|
| Aidene Godinho | Engº. Química M.Sc. (Engenheiro Especialista – Vale) |
| Alloua Saadi | Geomorfólogo D.Sc. (Amplo) |
| Anselmo Marinho | Engº. Civil (Gerente de Engenharia – Vale) |
| Carolina Fidélis | Engº. Civil (Engenheira Máster – Vale) |
| Daniella Cardoso Buzzi | Química e Dra. em Ciências (Concremat) |
| Diego Aniceto dos S. Oliveira | Engenheiro Agrônomo M.Sc. (Engenheiro Máster – Vale) |
| Eugênio Tameirão Neto | Biólogo (Especialista – Vale) |
| Fabiano Alcísio e Silva | Biólogo MSc Geologia Ambiental e DSc Ecologia (Arcadis) |
| Jackson Campos | Geógrafo M.Sc. (Amplo) |
| Leilane de Freitas Mol | Engº. de Minas (Arcadis) |
| Luiz Carlos Cardoso Vale | Engº. Florestal (Gerente de Meio Biótico - Vale) |
| Luiz Fernando da Silva Rego | Engº. de Prod. Mecânica (Gerente de Planejamento – Vale) |
| Márcio Resende | Engº. Civil (Gerente – Potamos) |
| Mário Cicareli | Engº. Civil (Potamos) |
| Rafael Rezende | Engenheiro Agrônomo (Amplo) |
| Rodney Ribeiro | Engº. Civil (Coordenador – Potamos) |
| Rodrigo de Almeida Leite Barbosa | Engº. Civil (Diretor - Potamos) |
| Samir Rolim | Engenheiro Agrônomo M.Sc. (Amplo) |
| Vanessa Cardoso Buzzi | Engº. Civil (Gerente de Licenciamento – Vale) |
| Vitor Pimenta | Geólogo (Gerente de Meio Físico – Vale) |