

Laudo Técnico Especializado

Avaliação dos Impactos e perspectivas de recuperação dos Tecnossolos do rejeito da barragem de Fundão - Mariana (MG): Síntese dos diagnósticos e modelos de recuperação edafo-ambiental.

Laudo elaborado à partir de demanda da Fundação Renova para revisão de resultados alcançados no monitoramento de Tecnossolos.

Responsável Técnico:

Prof. Carlos Ernesto Schaefer, Eng. MSC, PhD. Bolsista 1 A CNPQ;

Coordenador Estudos de Tecnossolos de rejeito de mineração (Projetos CAPES. FAPEMIG)

Outubro de 2019



Resumo técnico

Pouco mais de três anos de acompanhamento contínuo e monitoramento de propriedades físicas, químicas, estruturais e biológicas dos Tecno solos de rejeito da barragem de Fundão, em diferentes estudos realizados ou em realização, já permitem concluir que o contexto de recuperação ambiental *in situ* do passivo de 20 milhões de m³ rejeitos depositados pelo acidente da Barragem de Fundão, no trecho ribeirinho entre Bento Rodrigues e Candonga, revela-se bastante favorável e positivo. Tal realidade promissora mostra-se evidente pela consistente recuperação de propriedades e funções ecossistêmicas chave dos tecno solos, com plena possibilidade de retorno das atividades agrossilvopastoris em curto e médio prazos. Os dados que evidenciam o alcance da recuperação são advindos de diferentes estudos acadêmicos e técnicos, ora em curso. O monitoramento de alterações bióticas e abióticas nos tecno solos advindos da deposição do rejeito da barragem de Fundão, Mariana (MG), mostraram que os sinais físico-químicos não mostram elementos de toxicidade problemática, enquanto os teores de carbono orgânico, CTC, fósforo e a fertilidade geral e microbiota revelam um quadro de crescente melhoria, em relação ao cenário pré-desastre. O potencial de recuperação da área afetada pela deposição (terraços e planícies fluviais) é bom. Os tecno solos do rejeito, que possuíam limitações iniciais de ordem física bem mais acentuadas do que as químicas, mostram excelente recuperação produtiva com a prática de recobrimento de topsoil (até 50 cm de solo estruturado) e manejo adequado, com calagem e adubação seguindo recomendações agrônômicas. Resultados satisfatórios foram alcançados similarmente com seu manejo *in situ*, sem necessidade de cobertura de topsoil, mas com manejo de calagem e adubação mais intensivos. Em qualquer caso, adições de fontes de matéria orgânica parcialmente humificada (esterco de curral, cama de frango, palhada) aceleram muito o processo de recuperação, favorecendo a microbiota. Dada a ausência de problemas químicos maiores e baixo risco à saúde humana, recomenda-se a continuidade do processo de recuperação priorizando o uso criterioso de topsoil, calagem e adubação moderadas, e adubação orgânica parcimoniosa, sem qualquer necessidade de remoção do rejeito depositado, salvo em casos muito especiais, onde se detectam problemas físicos ou paisagísticos incontornáveis. Há necessidade urgente de estudos setorializados no eixo afetado para seleção de áreas de solos adequados ao desaterro para obtenção de topsoil estruturado para recobrimento, com qualidade física recomendável. Os teores de Ferro total elevados não se traduzem em qualquer problema significativo, já que o Ferro se encontra quase todo precipitado como oxi-hidróxidos de Fe³⁺, altamente estável, e sem processos redutores que podem gerar elevação dos teores de Fe²⁺ solúvel. Os experimentos conduzidos em campo devem ser continuados no curto e médio prazo, a fim de aferir-se a natureza dos tecno solos formados após o condicionamento, bem como para testar formas inovadoras de mitigação e recuperação das áreas impactadas, com alternativas seguras e econômicas de recuperação. Em síntese, o conjunto das propriedades físicas monitoradas já permitem apontar uma recuperação progressiva, segura e consistente do potencial agrícola dos tecno solos, com adoção de algumas



medidas corretivas, nas tres alternativas de manejo adotadas (recobrimento de topsoil, rejeito *in situ*, revolvimento e inversão).

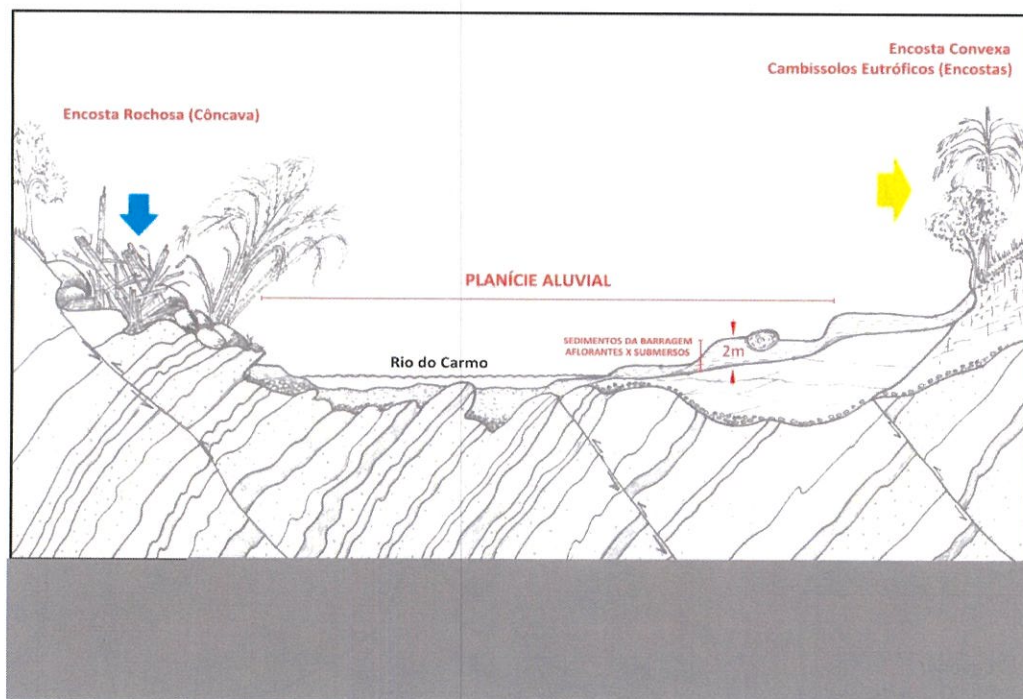


Figura 1. Transecto Esquemático da planície fluvial do Rio do Carmo afetada pela deposição de rejeito do rompimento da barragem. Atualmente, todos os níveis de terraços e planíceis afetados se encontram revegetados em graus variáveis. O leito do Rio se encontra praticamente inalterado, com forte carga sedimentar depositada.

1. Panorama geral da área de estudo

A área dos estudos de monitoramento é situada na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), e possui aproximadamente 40 km de eixo, abrangendo o Rio Gualaxo do Norte a partir da Cidade de Barra Longa, assim como o Rio do Carmo e posteriormente o trecho inicial do Rio Doce, (Figura 1), na cidade de Rio Doce. Este segmento configura o trecho mais afetado pela lama, uma vez que, grande parte do rejeito foi contido pela estrutura física da barragem Risoleta Neves (Candonga) também situada na cidade de Rio Doce.

Handwritten signature or mark.

A BHRD, possui uma área total de 83.400 km², dos quais 86% encontra-se em território mineiro e 14% no Espírito Santo (ANA, 2010). O bioma Mata Atlântica compreende 98% da área total da bacia e apresenta altos índices de biodiversidade e de endemismo, entretanto, em situação crítica de alteração de seus ecossistemas naturais (IBAMA, 2015).

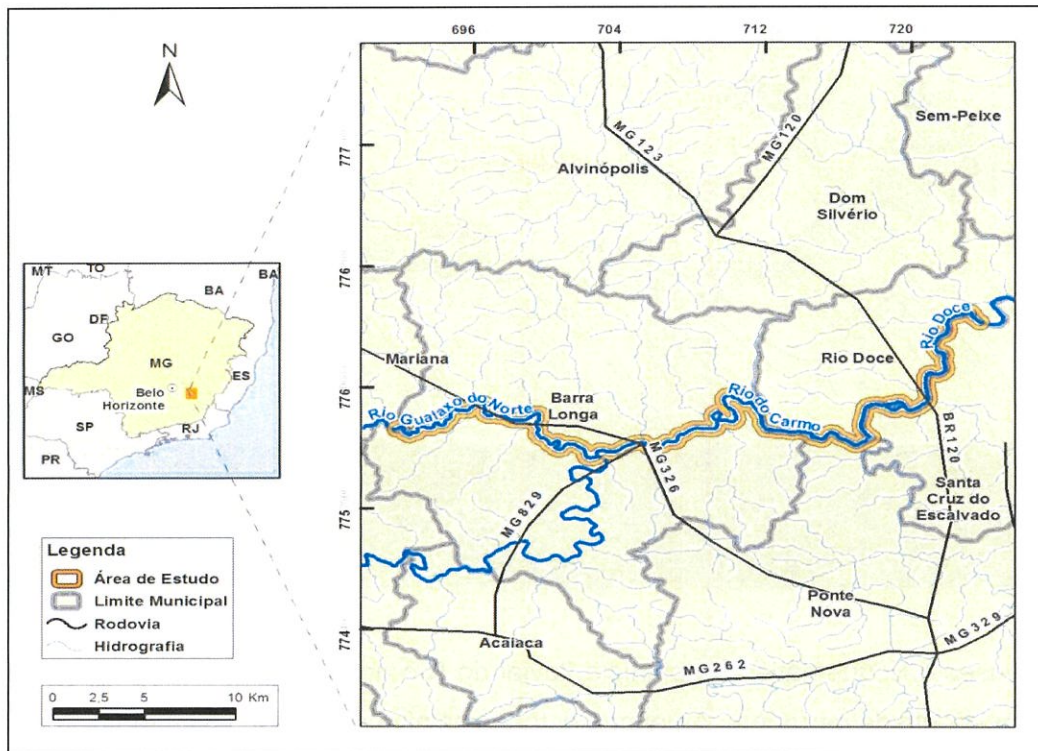


Figura 2: Localização da área de estudo

A vegetação remanescente é floresta semidecidual (de Mata Atlântica) e se encontra distribuída principalmente em alguns topos de morro e ao longo do curso dos rios, em matas ciliares. A Geologia é basicamente formada por depósitos aluvionares Quaternários sobre uma litologia heterogênea: nas partes mais baixas ocorre o Complexo Mantiqueira, composto principalmente por ortognaisses extremo leste do Rio Gualaxo do Norte, passando pelo Complexo Acaiaca (gnaisse granulítico), e pela formação Dom Silvério, composta predominantemente por quartzitos, xistos e paragnaisses no setor do Rio do Carmo; na porção mais ao cone, o Complexo Piedade têm predominância de paragnaisses (CPRM, 2003). Os solos predominantes na região são Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos Flúvicos (RADAMBRASIL, 1983).

Segundo a classificação de Köppen o clima da região é dividido em três tipos: Cwb- clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos, Cwa- clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes, e, Aw - clima quente com chuvas de verão (PEEL et al., 2007).

1.1. Amostragem

Para a análise da recuperação da fertilidade e incorporação de nutrientes e MO nos Tecossolos,

lg

foram utilizadas amostras de referência coletadas no dia 10 de novembro de 2015, cinco dias após o desastre, quando foram realizadas análises químicas, físicas e mineralógicas de 22 pontos ao longo da área de estudo nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. Destas, em 16 pontos foram coletadas amostras de rejeito e em 6 pontos, amostras do solo do entorno. Estes resultados foram utilizadas como tempo 0, ou seja, como referência inicial imediata pos-desastre, para o processo de recuperação dos tecnossolos nas áreas afetadas.

A segunda rodada de amostras foi realizada em agosto de 2018. Dos 16 pontos de coleta de rejeito da primeira coleta, apenas 6 estavam aptos a uma segunda coleta devido a diversas ações de recobrimento e condicionamento do material pela empresa responsável pela recuperação da área, ou por motivos de obra nas mesmas localidades dos pontos do tempo 0. Desta forma foram realizadas coletas semelhantes nas profundidades de 0-15, 15-45 e 45-60 centímetros. Nesta etapa também foi observado a profundidade/presença de raízes e atividade biológica nos perfis.

1.2. Análises físicas

Densidade do solo e densidade de partícula

A densidade do solo foi realizada através do método do anel volumétrico de acordo com EMBRAPA, (2010):

$$D_s = M_{\text{solo}} / V_T \quad (1)$$

A densidade de partículas foi determinada, medindo-se o volume ocupado por 20 g de material fino seco em estufa, usando-se álcool etílico absoluto como líquido penetrante e balão aferido de 50 ml (EMBRAPA 2010).

$$D_p = M_s/V_s = M_s/V_B - V_G \quad (2)$$

Em que V_s é o volume das partículas de solo (cm^3)

Análise granulométrica

Foi utilizada solução de NaOH a 0,05 mol/L (Barreto, 1986) como agente dispersante de partículas. Para cálculo da estimativa de sedimentação do silte será reavaliada a Lei de Stokes (1851) levando em consideração a natureza do material em análise.

As proporções de areia grossa (AG), areia fina (AF), argila (Arg) e silte (S) (Xi), em kg/kg, serão calculadas a partir das fórmulas:

$$X_{AG} = M_{AG} / M_{TFSA} \quad (3)$$

$$X_{AF} = M_{AF} / M_{TFSA} \quad (4)$$

$$X_{(S+Arg)} = [M_{(S+Arg+D)} - M_D] V_T / V_C \cdot 1 / M_{TFSA} \cdot F \quad (5)$$

$$X_{Arg} = [M_{(Arg+D)} - M_D] V_T / V_C \cdot 1 / M_{TFSA} \cdot F \quad (6)$$

$$X_S = X_{(S+Arg)} - X_{Arg} \quad (7)$$

1.3. Análises químicas:

A análise de pH em água foi realizada de acordo com a EMBRAPA, (2011) empregando a relação 1:2,5 solo: líquido utilizando eletrodo combinado imerso em suspensão. Será determinado também o pH em KCl 1 mol/l para posterior determinação de Δ pH.

Os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} serão extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹, sendo quantificados por espectrofotometria de absorção atômica, e o Al^{3+} por titulação com solução NaOH 0,025 mol L⁻¹; K^+ e Na^+ trocável será extraído com solução de HCl 0,05 mol L⁻¹ e quantificado por fotometria de chama. Para determinação do P, Fe, Mn, Zn, Cu e Pb será utilizado o extrator Mehlich-1 e determinado por absorção atômica e o P por colorimetria. Será também avaliada a acidez potencial (H + Al) extraída com acetato de cálcio a pH 7, quantificada por titulometria. O carbono orgânico foi quantificado pelo método de Walkley-Black, segundo Defelipo & Ribeiro (1981).

A partir das análises prévias será calculado a soma de bases (S), capacidade de troca catiônica – CTC (t efetiva e T pH 7,0); saturação por bases (V%); alumínio (m%); e a capacidade de troca catiônica corrigida pela argila (CTCr) calculada pela expressão:

$$T(\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}) \times 1000 / \text{conteúdo de argila (g kg}^{-1}) \quad (9)$$

1.4. Mineralogia

A mineralogia qualitativa das frações argila, silte e areia dos materiais será avaliada por difratometria de raios-X. Para a confecção da lâmina orientada usada na difração será utilizada a técnica do esfregaço (Theisen & Harward 1962). O difratograma, será obtido utilizando radiação monocromática de Cu-K α , obtida pelo uso de filtro de níquel. A análise mineralógica será realizada apenas para um grupo de amostras a ser definido posteriormente.

2. RESULTADOS OBTIDOS E AVALIAÇÃO TÉCNICA INTEGRADA

2.1. Trabalhos de pesquisa realizados pela UFV

Análise dos pontos de coleta

No campo realizado logo após o rompimento, no dia 10 de novembro de 2015, foi observado um intenso selamento superficial, agravado pelo ravinamento do material argiloso, deixando um

substrato residual rico em areia fina e silte altamente compactado (hard-setting). Quase três anos após o desastre, observa-se revegetação espontânea e introduzida em alguns pontos de coleta. As figuras a seguir retrata o ponto um dia após o desastre. É possível visualizar o alcance da lama pelos terraços bem como a cor turva das águas fluviais. As imagens recentes representam a mesma área, agora com presença de vegetação, retratando também e os respectivos perfis de coleta.

Foram selecionados alguns pontos do estudo para exemplificar o processo de recuperação ambiental, sendo descritas características de cada ponto quanto à presença de raízes, atividades de térmitas, vegetação encontrada ao entorno e uso atual da área.

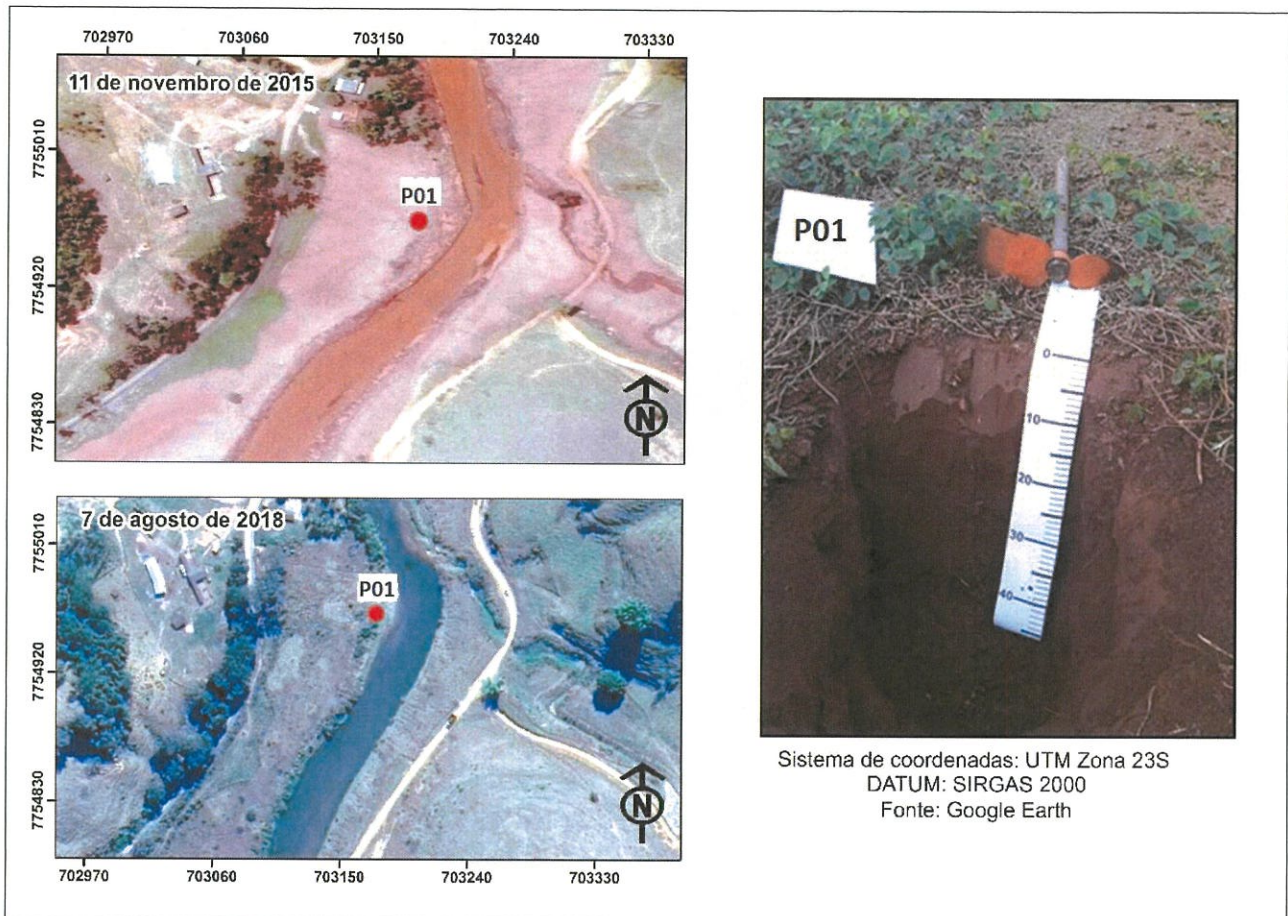


Figura 3. Ponto de coleta nº01

Ponto de coleta à jusante do rio Gualaxo do Norte. Apresentou fraca atividade de térmitas. Até 10 centímetros apresentaram poucas raízes, presença de raízes médias, finas e raras ao longo do perfil. Apresentou raízes médias até 10 cm e raízes, raras e finas até 40 cm. Presença de vegetação arbustiva, leguminosas e gramíneas espaçadas em touceiras. Local de uso de pasto, pastagem. Sem adição de Topsoil. Uso: pastagem, presença de esterco. Estrutura maciça. Atividade biológica fraca, fraca atividade de térmitas.

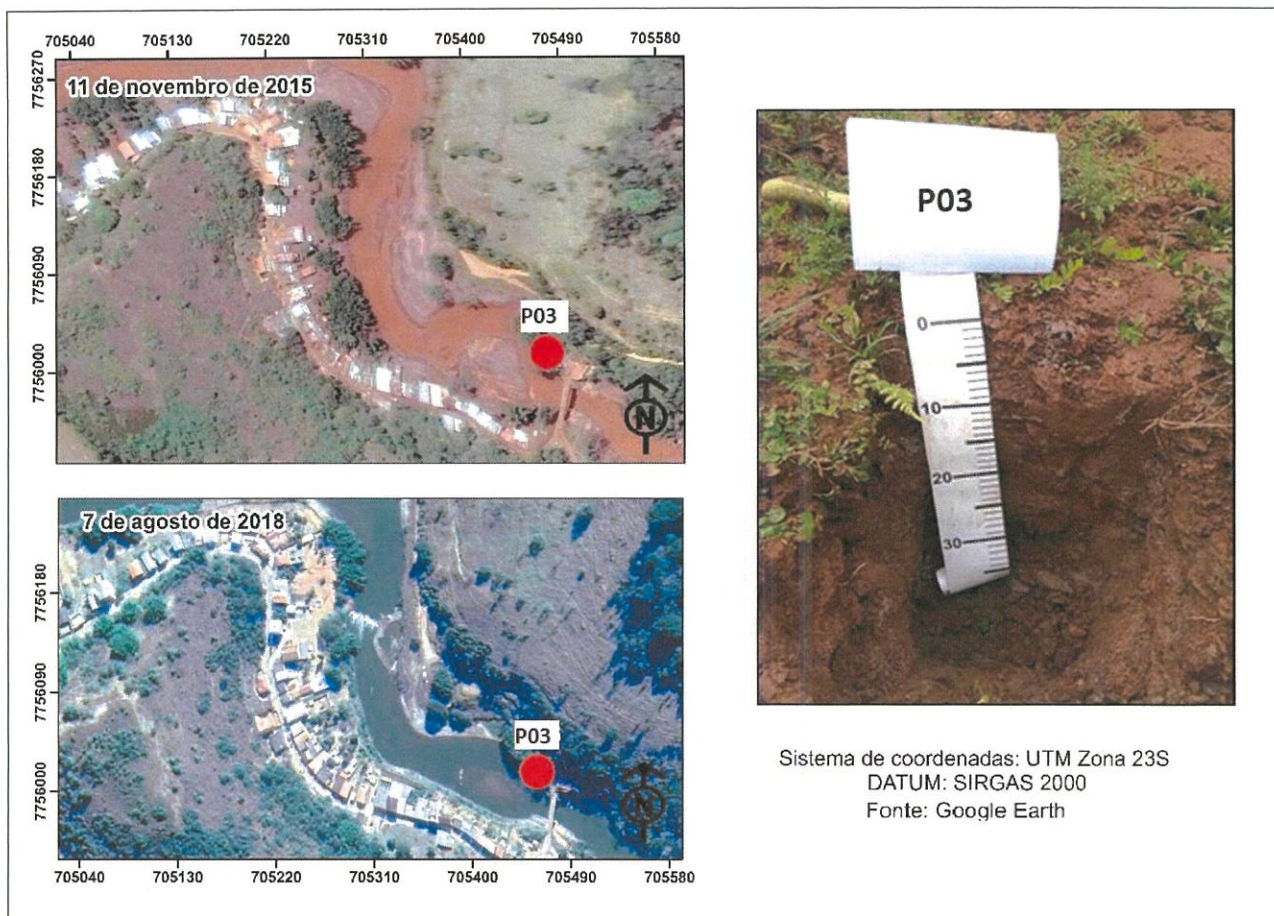


Figura 4. Ponto de coleta nº03

Ponto a montante do rio do Carmo. Área de leito menor, sujeito a encharcamento sazonal. Localiza-se a uns 20 metros do leito atual, uns 200 metros da ponte. Presença de lama misturada com material arenoso aparentemente da própria lama e não do Neossolo Flúvico. Vegetação espaça, aparentemente espontânea. Raízes raras e finas até 20 cm, depois de 20 cm sem presença de raízes. Sem atividade biológica. Rejeito com muita areia tudo misturado.

Q

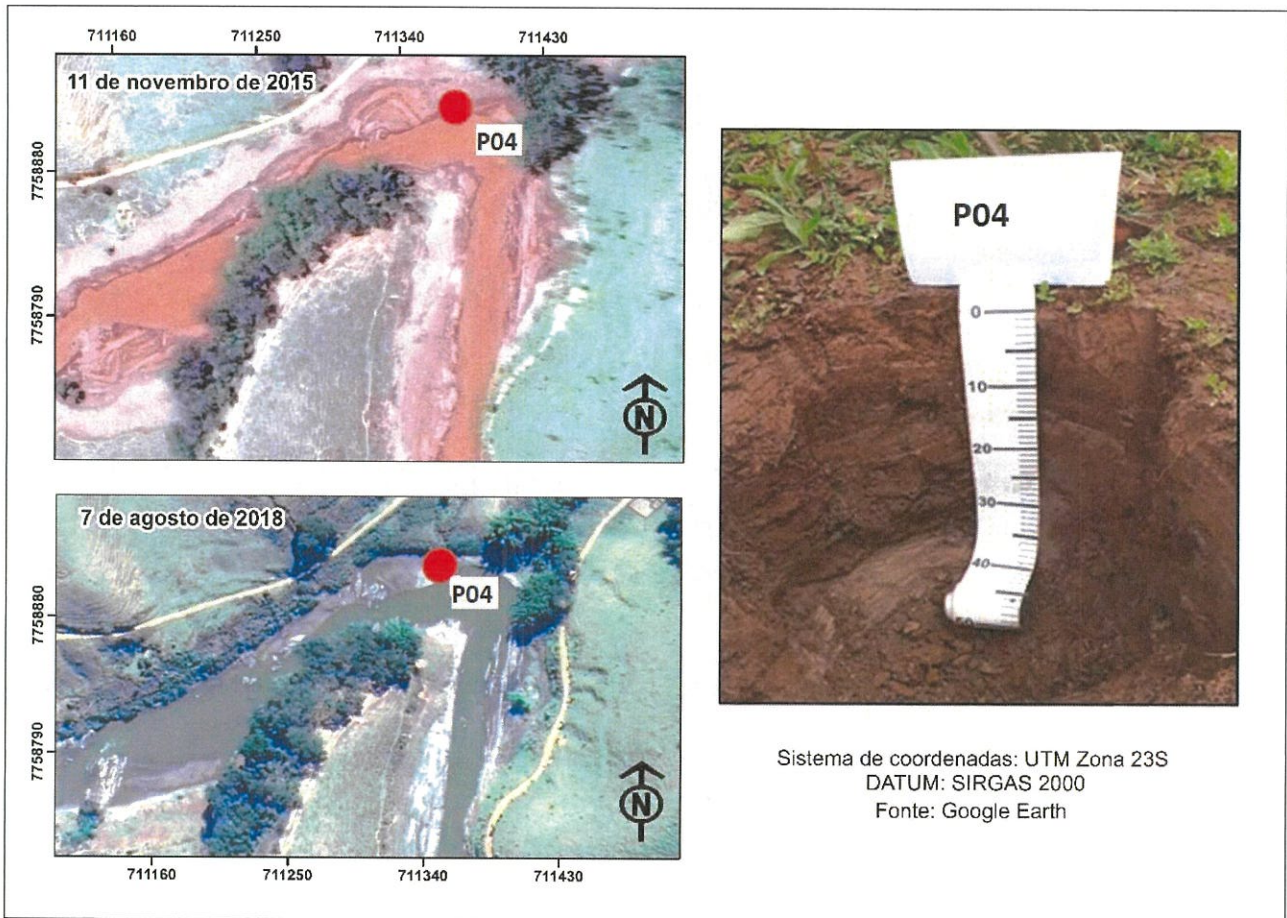


Figura 5 : ponto de coleta 04

Área de meandro do rio do Carmo. Foi observado vegetação natural, regeneração arbustiva espontânea do tipo herbácea, raízes raras e finas até 10 cm. Aparentemente não houve adição de insumos químicos no local, não houve intervenção de recuperação, o material foi coletado diretamente sobre os rejeitos. Neossolo Flúvico.

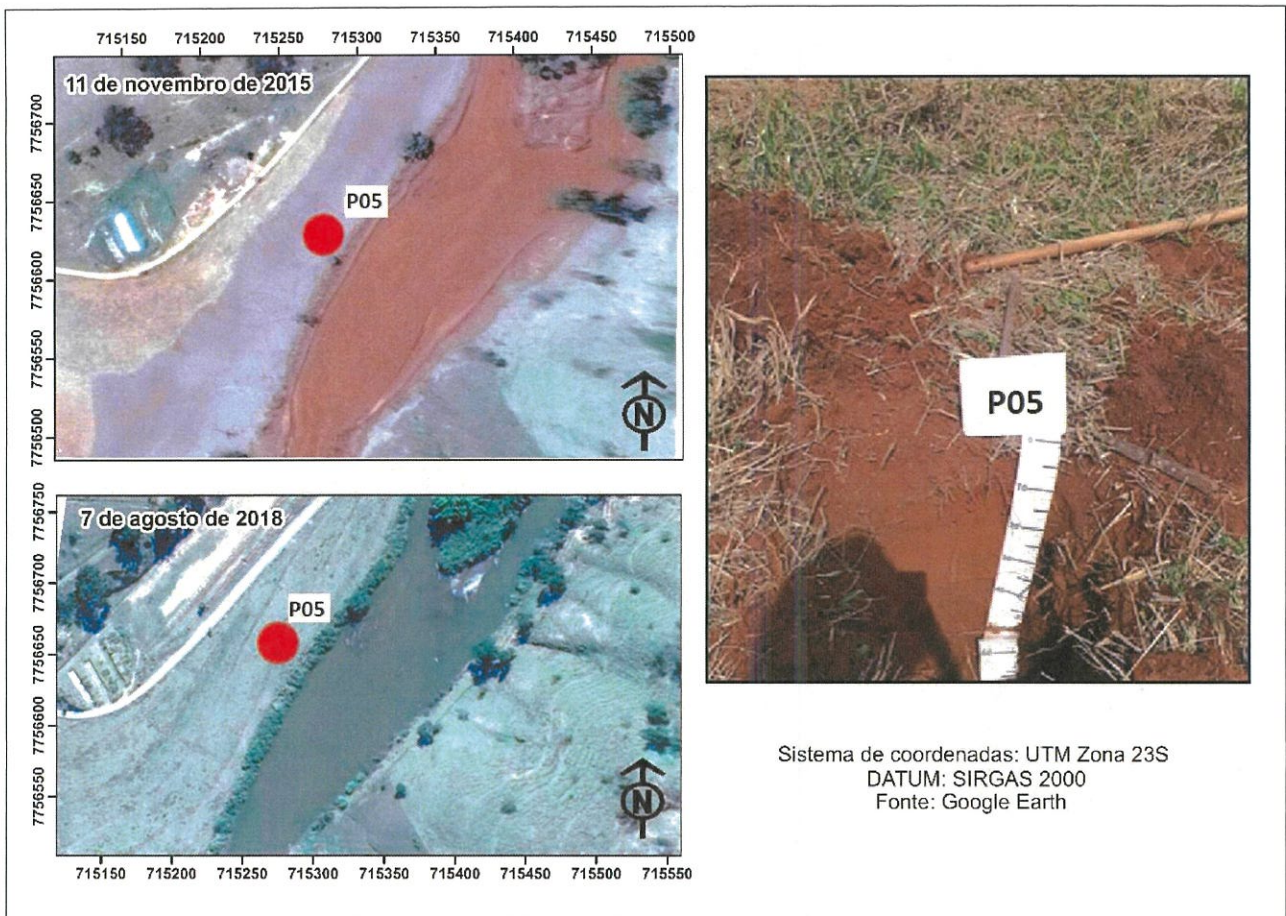


Figura 6. Ponto de coleta nº05

Área a 25 metros do leito menor. Uso destinado à pastagem (Fazenda Porto Alegre). Presença de braquiária irrigada desenvolvida com algumas invasoras. Foi misturado solo com rejeito (Topsoil com rejeito), adicionaram 35 cm de Topsoil. Presença de muitas raízes, M profundas, Raízes saindo do topsoil e penetrando no rejeito a 38 cm. Raízes finas abundantes até 38 cm penetram no rejeito e tornam se raras finas no rejeito. Rejeito de 38 a 50 cm. Baixa atividade biológica. Obs: O topsoil solo de cima está um pouco misturado com a lama.

9

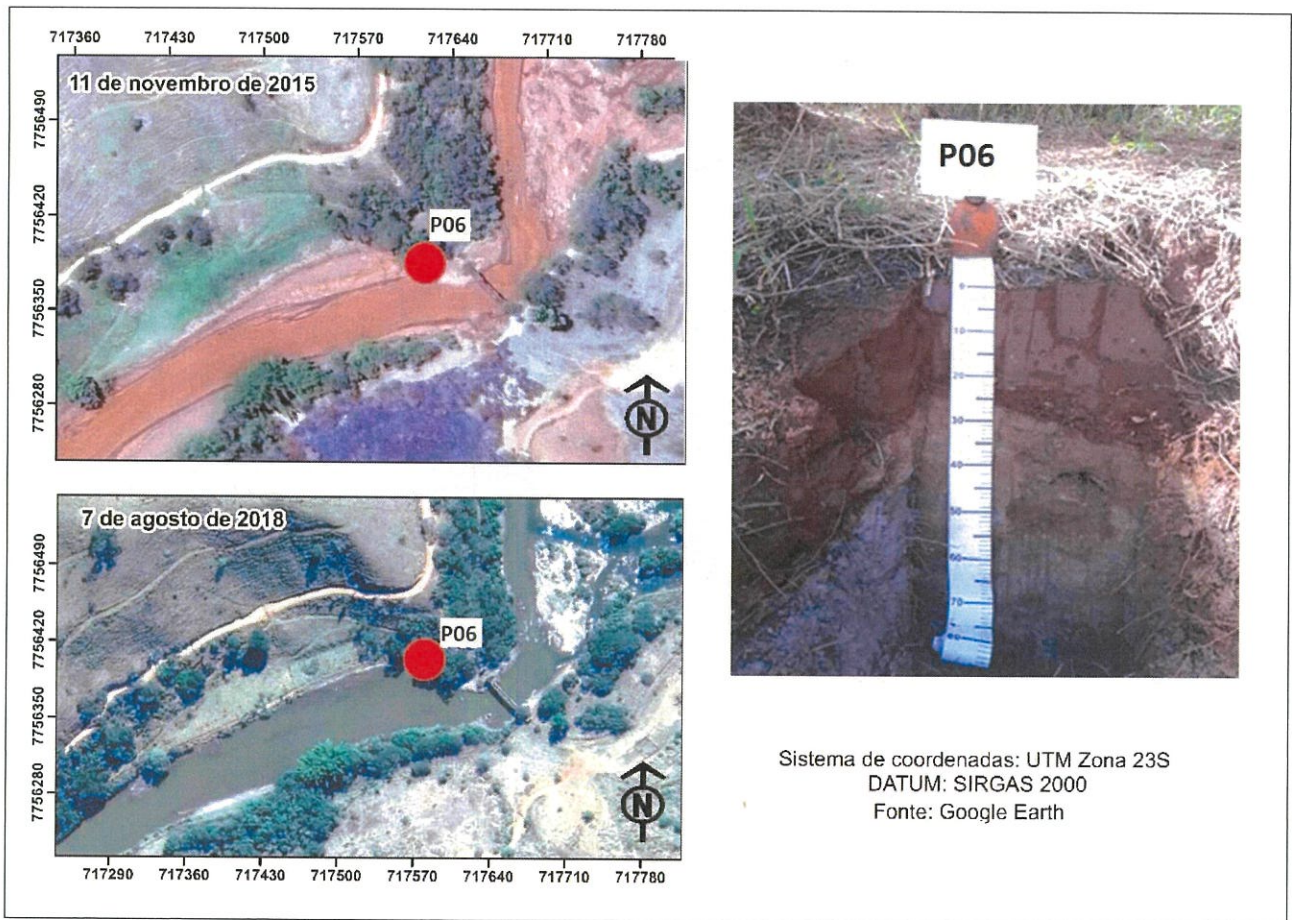


Figura 7. Ponto de coleta nº06

Presença de vegetação espontânea, em sua maioria braquiária. Rejeito com 25 cm de espessura seguidos de Neossolo Flúvico decapitado na camada C, com muitas raízes finas. No rejeito não tem raízes, de 25 a 65 cm presença abundante de raízes finas.

Be

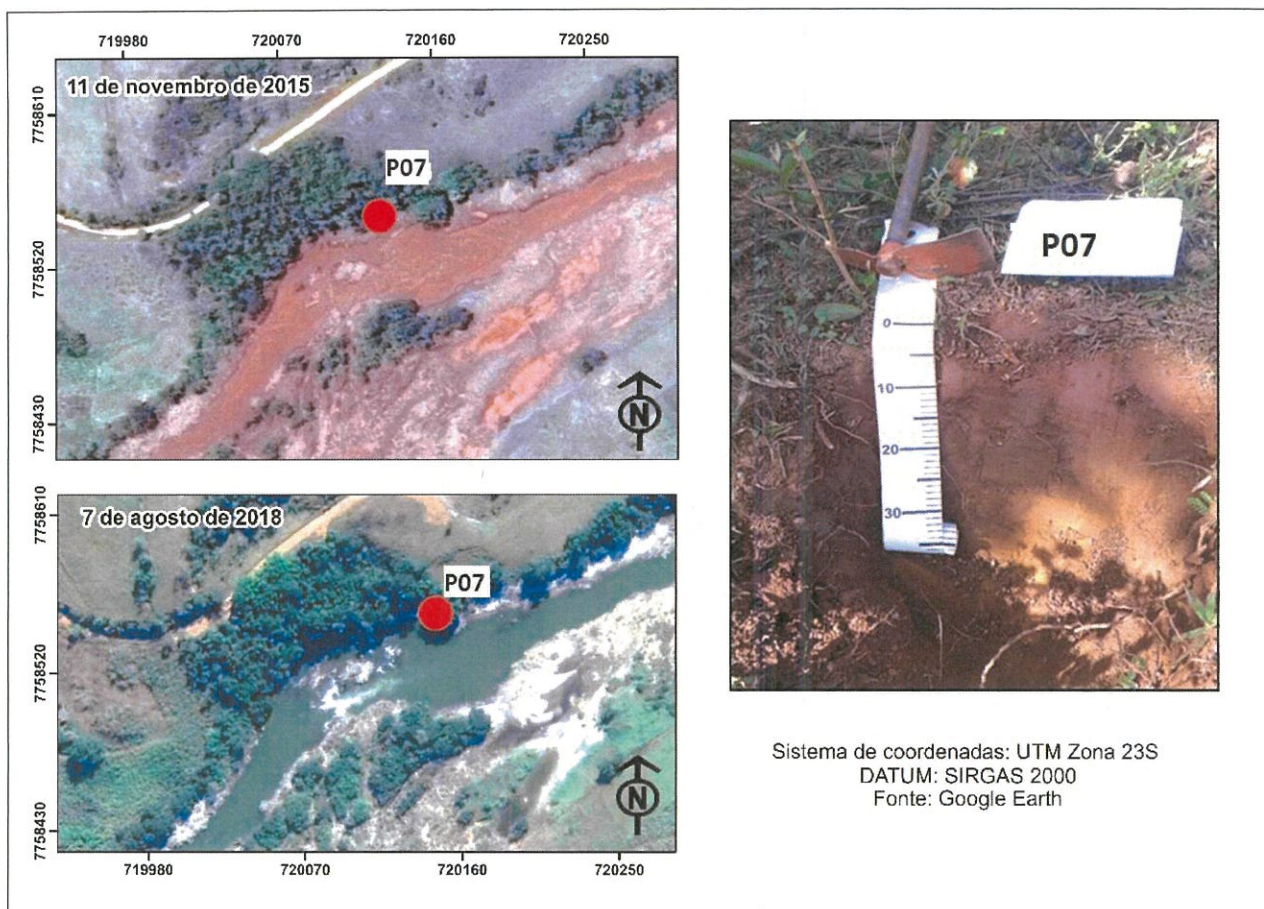


Figura 8. Ponto de coleta nº07

Ponto a jusante do rio Doce. Nas profundidade 0-5 cm encontra-se apenas lama, 5-15 cm lama, 15-35 cm do horizonte C (parte inferior do Neossolo Flúvico), raízes raras de 0-15 cm, 5-15 cm raízes raras, 15- 35 cm raízes finas e comuns. Presença de vegetação invasora. Sem atividade biológica.

Análises químicas e físicas

A tabela 1 apresenta os resultados das análises químicas e físicas nos dois períodos de coleta sendo que T1 refere-se ao tempo 0 e T2 as condições dos Tecnosolos em agosto 2018. Foi calculado também a média e desvio padrão dos resultados analíticos. A tabela 2 apresenta os resultados das análises químicas e físicas dos Tecnosolos no tempo 2 em diferentes profundidades. A tabela 4 apresenta os resultados das análises químicas e físicas dos solos encontrados na área de acordo com Schaefer, et.al (2016).

Ge

Tabela 1: Síntese das análises química e física dos Tecnosolos no tempo 1 (Novembro 2015) e camadas superficiais (Projeto UFV-CAPES- Tecnosolo (lama))

Análises	Tecnosolo (lama)																							
	P35		P44		P45		P22		P16		P13		P05		Média		D.PAD							
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2						
pH	6,32	7,08	7,36	7,18	5,75	6,58	5,87	6,03	5,23	6,19	5,76	6,97	5,44	6,23	5,76	6,58	0,65	0,43						
P	1,7	18,5	7,5	7,3	1,4	8,2	10,2	4,7	10	6,1	9,1	7,4	10,1	7,1	9,1	7,3	3,70	4,24						
K	37	132	22	227	50	87	10	53	7	100	10	62	9	144	10	100	15,94	55,46						
Ca ²⁺	1,82	3,15	1,51	1,04	1,25	3,44	1,21	1,86	1,25	2,02	1,14	1,23	1,11	2,07	1,25	2,02	0,23	0,83						
Mg ²⁺	0,42	0,79	0,04	0,27	1	1,44	0,03	0,71	0,03	0,69	0,04	0,19	0,03	1,13	0,04	0,71	0,34	0,40						
H+Al	1,2	0,3	0,3	0,3	2	1,5	0,03	1,3	0,02	1,2	0,03	0,1	0,03	1,5	0,3	1,2	0,64	0,58						
CTC (T)	3,59	4,58	2,17	2,19	4,62	6,6	1,66	4,01	1,66	4,17	1,63	1,68	1,6	5,07	1,66	4,17	1,14	1,55						
t	2,39	4,28	1,87	1,89	2,62	5,1	1,36	2,71	1,46	2,97	1,33	1,58	1,3	3,57	1,46	2,97	0,51	1,16						
V	66,6	93,4	86,2	86,3	56,7	77,3	81,9	67,6	88	71,2	81,6	94	81,2	70,4	81,6	77,3	1,55	10,70						
MO	1,28	1,48	1,54	0,4	1,15	2,55	0,13	1,34	0,13	1,01	0,13	0,27	0,13	2,02	0,13	1,34	10,70	10,36						
P-rem	30,9	47,7	30,8	42,1	34,6	15,2	30	32,2	32,6	19,2	36,2	37,7	31	39,3	31	37,7	0,62	0,76						
Fe	43,7	24	132,4	79,2	73,3	1215,3	214,2	668,2	248,1	32,4	319,5	67,1	249,8	70,9	214,2	70,9	2,17	11,24						
Cu	1,31	0,11	1,17	1,12	0,99	6,51	1,52	2,81	1,48	4,46	1,67	0,7	1,67	0,97	1,48	1,12	94,98	435,1						
Mn	24,9	99,4	228,9	56,3	125,1	315,8	97,8	67,7	87,1	48	82	55	295,6	68,7	97,8	67,7	0,23	2,22						
Zn	0,96	4,08	0,66	0,95	1,62	4,54	0,61	2,18	0,58	3,79	0,98	0,75	0,63	2,66	0,66	2,66	0,35	1,39						
Cr	0,28	1,22	0,53	0,72	0,37	1,3	1,34	1,07	1,42	0,99	1,63	0,9	1,37	0,85	1,4	0,99	0,54	0,19						
Ni	1,04	0,83	1,11	0,62	1,16	2,05	1,25	0,91	1,22	0,7	1,57	0,77	1,1	1,19	1,16	0,83	0,16	0,46						
Cd	0,3	0,31	0,18	0,21	0,33	0,39	0,26	0,25	0,27	0,23	0,27	0,29	0,28	0,31	0,27	0,29	0,04	0,05						
Pb	3,01	0,88	3,37	0,41	3,66	0,79	0,78	0,12	0,64	0,42	0	0,5	0,91	1,48	0,91	0,5	1,43	0,41						
Area Grossa	0,16	0,038	0,02	0,055	0,26	0,017	0,07	0,01	0,05	0,252	0,38	0,058	0,05	0,104	0,07	0,05	0,131	0,07						
Area Fina	0,40	0,361	0,31	0,418	0,16	0,128	0,39	0,624	0,43	0,143	0,24	0,353	0,37	0,375	0,375	0,357	0,09	0,15						
Silte	0,18	0,47	0,53	0,391	0,14	0,527	0,43	0,19	0,42	0,128	0,30	0,452	0,46	0,33	0,42	0,391	0,14	0,13						
Argila	0,25	0,13	0,13	0,135	0,42	0,282	0,11	0,177	0,09	0,477	0,07	0,137	0,10	0,191	0,11	0,177	0,12	0,11						
Dens.Part																								

FAPEMIG).

Tabela 2: Síntesedadas análises química e física dos Tecnosolos em diferentes profundidades-tempo 2 (agosto 2018)

Prof.	pH	P	K	Ca2+	Mg2+	H +Al	t	T	V	MO	P-Rem	mg/dm										Kg/kg		
												Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	
P35	0 - 5	7,08	18,5	132	3,15	0,79	0,3	4,28	4,58	93,4	1,5	47,7	0,11	99,4	24	4,1	1,22	0,83	0,3	0,88	0,26	0,471	0,123	0,15
	5 - 15	6,78	7,3	56	0,63	0,22	0,3	0,99	1,29	76,7	0,1	39,4	0,72	62	123	0,6	0,92	0,74	0,3	0,57	0,05	0,609	0,026	0,312
	15 - 40	6,91	6,8	27	0,97	0,04	0,1	1,08	1,18	91,5	0,1	37,5	0,4	58	85,2	0,5	0,85	0,65	0,3	0,73	0,06	0,418	0,391	0,135
P44	0 - 5	7,18	7,3	227	1,04	0,27	0,3	1,89	2,19	86,3	0,4	42,1	1,12	56,3	79,2	1	0,72	0,62	0,2	0,41	0,05	0,424	0,403	0,128
	5 - 15	6,79	7,7	98	1,03	0,09	0,3	1,37	1,67	82	0,1	41,4	1,09	54,3	114	0,7	1,01	0,58	0,2	0,44	0,06	0,356	0,443	0,141
	15 - 40	7,06	7,2	57	1,31	0,05	0,1	1,51	1,61	93,8	0,1	38,9	0,76	54	109	0,6	0,82	0,52	0,2	0,44	0,01	0,624	0,19	0,177
P45	0 - 5	6,58	8,2	87	3,44	1,44	1,5	5,1	6,6	77,3	2,6	15,2	6,51	316	1215	4,5	1,3	2,05	0,4	0,79	0,01	0,625	0,277	0,091
	5 - 15	6,2	6,3	62	2,55	0,82	2,4	3,53	5,93	59,5	2,7	12,2	8,26	1152	1574	6,2	1,52	3,14	0,4	1,32	0,01	0,589	0,316	0,089
	15 - 40	6,15	6,1	48	1,33	0,52	1,6	1,97	3,57	55,2	1,3	29,2	4,82	460	1063	3,6	1,1	1,51	0,2	0,51	0,25	0,143	0,128	0,477
P22	0 - 5	6,03	4,7	53	1,86	0,71	1,3	2,71	4,01	67,6	1,3	32,2	2,81	67,7	668	2,2	1,07	0,91	0,3	0,12	0,25	0,129	0,075	0,541
	5 - 15	6,57	5	36	1,31	0,44	0,7	1,84	2,54	72,4	0,3	37,1	2,04	90	574	2,1	1,09	1,04	0,3	0,04	0,26	0,128	0,075	0,538
	15 - 40	6,48	7,7	32	0,88	0,43	0,7	1,39	2,09	66,5	0,4	39,8	2,74	453	667	2,6	0,99	1,52	0,3	0,29	0,21	0,224	0,191	0,376
P16	0 - 5	6,19	6,1	100	2,02	0,69	1,2	2,97	4,17	71,2	1	19,2	4,46	48	32,4	3,8	0,99	0,7	0,2	0,42	0,06	0,353	0,452	0,137
	5 - 15	5,9	5,1	39	2,09	0,36	1,3	2,55	3,85	66,2	0,4	10,4	4,73	35,6	31,5	3,1	1	0,83	0,2	0,66	0,06	0,376	0,444	0,122
	15 - 35	5,74	3	11	1,98	0,19	1,2	2,2	3,4	64,7	0,7	11,3	4,44	53,6	37,2	2,7	0,96	0,95	0,3	0,84	0,05	0,387	0,447	0,115
P13	0 - 5	5,7	1,7	16	2,32	0,25	1,8	2,61	4,41	59,2	1,1	18,6	5,51	61,5	42,9	4,4	0,77	1,09	0,3	0,93	0,04	0,361	0,47	0,13
	5 - 15	6,97	7,4	62	1,23	0,19	0,1	1,58	1,68	94	0,3	37,7	0,7	55	67,1	0,8	0,9	0,77	0,3	0,5	0,04	0,368	0,527	0,07
	15 - 25	7,07	7,5	22	1,08	0,02	0	1,16	1,16	100	0,1	37	0,78	52,9	120	0,7	1,13	0,77	0,3	0,93	0,04	0,377	0,458	0,123
P05	0 - 5	7,16	6,3	27	1,13	0,02	0	1,22	1,22	100	0,1	35,7	0,72	59,7	112	0,6	1,23	0,73	0,2	0,71	0,02	0,128	0,572	0,282
	5 - 15	5,7	2,4	26	1,04	0,27	1	1,38	2,38	58	0,4	44,3	1,32	51,3	108	1,1	0,54	0,87	0,2	0,29	0,02	0,121	0,506	0,35
	15 - 40	6,23	7,1	144	2,07	1,13	1,5	3,57	5,07	70,4	2	39,3	0,97	68,7	70,9	2,7	0,85	1,19	0,3	1,48	0,08	0,445	0,317	0,163
P05	5 - 15	5,97	3,8	80	2,08	1	1,9	3,29	5,19	63,4	2	37,5	1,68	60,7	112	2,4	0,97	1,42	0,3	1,15	0,1	0,375	0,33	0,191
	15 - 35	5,55	1	81	1,26	0,9	2,2	2,37	4,57	51,9	1,8	31,7	2,49	37,7	149	0,8	1,15	1,17	0,3	1,28	0,23	0,411	0,109	0,253

Tabela 3: análise química e física dos solos do entorno, não afetados pelo rejeito

Análises		Neossolo Flúvico		Cambissolo	
		Média	D.P	Média	D.P
pH	H ₂ O	5,65	0,19	5,77	0,15
P		11,05	24,5	5,38	3,97
K	mg/dm ³	15,87	12,32	46,67	62,81
Ca ²⁺	cmol _c /dm ³	1,61	0,99	1,76	1,44
Mg ²⁺		0,57	0,43	0,48	0,37
Al ³⁺		0,07	0,15	0,14	0,22
H+Al		1,53	1,07	3,28	1,23
CTC (T)		3,78	1,54	5,67	2,3
MO	dag/kg	0,85	0,69	1,42	1,03
P-rem	mg/L	29,57	11,2	24	9,4
Fe		610,3	528,28	604,72	556,04
Pb	mg/dm	0,73	1,38	1,57	1,45
Areia Grossa	Kg/kg	0,24	0,21	0,26	0,08
Areia Fina		0,36	0,21	0,2	0,08
Silte		0,16	0,1	0,14	0,07
Argila		0,23	0,19	0,39	0,11

Fonte: Schaefer, et al (2016)

Análise temporal de atributos químicos e físicos

É observado uma pequena elevação na média de pH de T0 para T1 5,76 para 6,58 respectivamente. Os valores de pH tendem a ser elevados devido ao Ponto de Carga Zero (PCZ) dos óxidos de Ferro que predominam neste tipo de material e não devido a presença de bases, como é mais comumente associados, sendo assim para os solos do entorno a média de pH é ligeiramente menor (5,65). Os elevados teores totais de ferro não se traduzem em qualquer problema de toxidez, pois são formas de oxi-hidróxidos estáveis.

A acidez potencial (H + Al) aumentou de T0 para T1 (0,3 para 1,2 respectivamente) os solos naturais do entorno apresentam média de 1,53 e 3,28 para os Neossolos Flúvicos e Cambissolos respectivamente. De acordo com Ribeiro et. al (1999), a acidez potencial para os Tecossolos passou de muito baixa ($\leq 1,0$) para baixo (1,01 – 2,50) enquanto para o solos do entorno é considerada de média (2,51 – 5,0). Estes valores são diretamente relacionados aos teores de MO no solos.

Houve um aumento das bases de T1 em relação a T0, o que era de se esperar, devido a fertilização e calagem eventuais da área pelas empresas responsáveis pela recuperação. Estes valores são mais expressivos para K, que aumentou para todos os pontos, tendo uma média aumentada em 10 vezes (de 10 para 100) com valores bem inferiores para os solos do entorno, segundo Schaefer e. al. 2016 (15,87 e 46,67 para Neossolos Flúvicos e Cambissolos respectivamente). Quanto à classificação da fertilidade dos Tecossolos para fins agrônômicos, de acordo com Ribeiro et. al (1999) os níveis médios de K foram considerados muito bons (> 120).

Granulometria

Em relação aos resultados de granulometria dos solos, obtidos ao longo das campanhas amostrais (1ª, 4ª e 5ª), não foram observadas diferenças estatisticamente significativas na distribuição granulométrica dos Tecnosolos monitorados.

Porosidade

A porosidade Total dos Tecnosolos mostra valores semelhantes a solos agricultados normais, obtida a partir de determinações de Densidade do Solo (Ds) e Densidade de Partícula (Dp), exemplificado abaixo (Golder, 2019) (**Tabela 4**).

Tabela 4: Valores de Porosidade Total calculada para amostras de Tecnosolos (Dados extraídos de Golder, 2019).

Amostra	Profundidade de coleta	Ds	Dp	P total calc.
Tecnossolo 10 PF 02	0-3	1.82	2.98	0.39
Tecnossolo 10, PF 02	3-100	1.98	3.05	0.35
Tecnossolo 08, Pf01	0-10	1.78	3.03	0.41
Tecnossolo 08 Pf01	10-35	1.89	3.13	0.40
Tecnossolo 05 Pf02	0-40	1.75	2.94	0.40
Tecnossolo 05 Pf02	40-90	1.94	2.93	0.34

*Ds: Densidade do Solo; Dp: Densidade de partícula. P total calc.: Porosidade total calculada a partir da equação: $Pt = 1 - (Ds/Dp)$

Considerando que resultados de porosidade total dos solos fornece informações inconclusivas sobre seu sistema poroso, foram realizadas outras observações micromorfológicas, para ampliar as investigações dos parâmetros físicos dos Tecnosolos

Micromorfologia

Foram realizados estudos micromorfológicos a partir da coleta de lâminas com amostras dos Tecnosolos de perfis selecionados com o intuito de obter, em microescala, informações sobre a existência de processos de perda de argila nos perfis por erosão diferencial (elutriação). Além disso, as observações micromorfológicas tiveram o intuito de buscar evidências sobre o estabelecimento de processos pedogenéticos no perfil (Tabela 5).

As lâminas de micromorfologia demonstraram que a porosidade nas amostras obtidas dos perfis estudados foi incipiente ou mesmo nula, com estruturação massiva e/ou densificada, e raros vazios não conectados.

Observações micromorfológicas identificaram formação de uma delgada camada "lag"

residual de areia na superfície, gerada pela combinação de elutriação (perda seletiva de argila mais fina por erosão) e empacotamento de grãos de areia fina remanescentes. Trata-se de processo pedogenético essencial, com padrão clássico de distribuição relativa do tipo Mônico – ou seja, distribuição onde as partículas em geral pertencem a um só grupo de tamanho e tipo de material – contendo grãos minerais e fragmentos rochosos (Kuhn et al., 2019) e feições semelhantes às descritas por Kuhn (2003) para bioturbação (turbacão do solo pela atuação da fauna do solo), e transporte lateral (Pawluk e Bal, 1985).

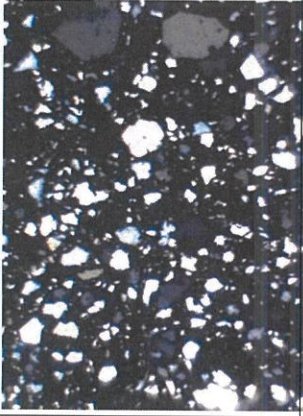
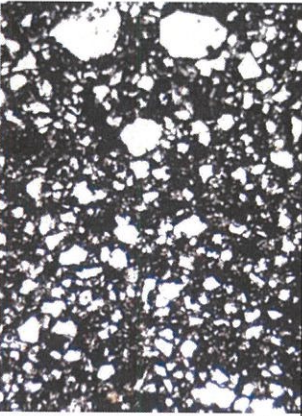
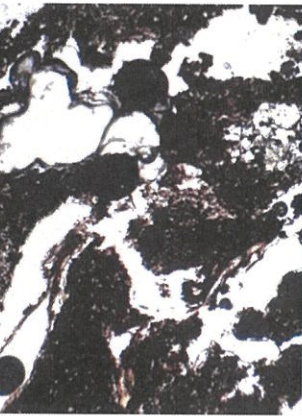
Preenchimentos de areia são também comuns, sugerindo forte redistribuição pela bioturbação. Não se evidenciou qualquer processo de pedoplasmação (gênese de argila) e estruturação mais avançada, conforme Stoops e Schaefer (2018) e Stoops et al (2018), indicando pedogênese ainda incipiente, pelo pouco tempo decorrido desde a revegetação da área.

A perda de argila referida não foi constatada em macroescala a partir dos estudos de granulometria. Entretanto, em microescala, os Tecnosolos 05, 08, 10 e 11 mostraram sinais variáveis de elutriação (perda seletiva) e formação de Lag residual arenoso. Este fenômeno foi máximo no Tecnosolo 10, tendo se manifestado de forma intermediária em 8, e menos desenvolvido nos demais (5, 11) (Tabela 5).

Um avanço pedogenético ainda incipiente, porém notável pelo pouco tempo decorrido, se faz evidente em todos os Tecnosolos monitorados, embora haja grandes variações entre os sítios, decorrentes de formas variadas de tratamento do rejeito, e manejos subsequentes (adubação, calagem, uso de esterco, plantio). Um bom enraizamento de gramíneas se faz notar até 20 cm, com estruturação pedobiológica marcante até essa profundidade. Em alguns casos há aprofundamento bem maior.

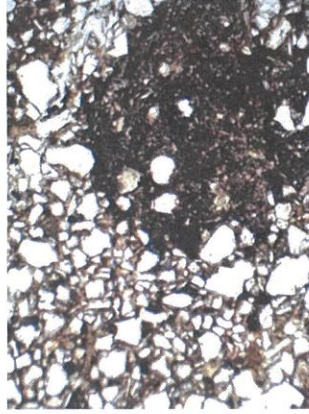
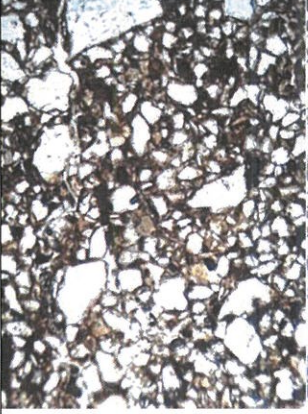

Tabela 5: Feições micromorfológicas indicadoras de formação de estrutura pedogenética nos Tecnosolos

Amostras de lâminas de solos /profundidade	% de grãos areia fina e silte na matriz	Estrutura e porosidade	Feições associadas	Arenização superficial	Cobertura vegetal	Image m
Tecnossolo 05 Pf02 0-40 cm	50% AF + 40% Silte	Estrutura massiva, fraco desenvolvimento de pedalidade; poros fissurais e vazios não conectados	Abundantes microconcreções, litoreliíquias de filitos e canga	Fraca arenização	Pastagem	
Tecnossolo 05 Pf02 40-90 cm	40% AF + 40% Silte	Estrutura massiva, densificada, sem desenvolvimento de pedalidade; porosidade praticamente nula e raros vazios não conectados	Microconcreções comuns, litoreliíquias de filitos	Arenização ausente	Pastagem	
Tecnossolo 08 Pf01 0-10 cm	40% AF + 40% Silte	Estrutura blocos subangulares, incompleta, moderado desenvolvimento de pedalidade; poros de empacotamento parcialmente conectados;	Muitos microfragmentos de concreções e litoreliíquias de filitos	Fraca a moderada arenização	Regeneração por Mix de sementes (gramíneas e leguminosas forrageiras)	

Amostras de lâminas de solos /profundidade	% de grãos areia fina e silte na matriz	Estrutura e porosidade	Feições associadas	Arenização superficial	Cobertura vegetal	Image m
Tecnossolo 10 Pf 0-10 cm	70% AF, Coalescida	Material sem estrutura, grãos simples; misturado à M.O. residual e nodulos e litoreliquias	Litoreliquias de filito ferruginizado	Forte arenização por elutriação	Regeneração por Mix de sementes (gramíneas e leguminosas forrageiras)	
Tecnossolo 10 Pf 01 20-30 cm	40% AF e 40% Silte	Estrutura massiva e densificada sem desenvolvimento de pedacidade; porosidade negligível e raros vazios não conectados	Microconcreções e litoreliquias de filitos	Arenização ausente	Regeneração por Mix de sementes (gramíneas e leguminosas forrageiras)	
Tecnossolo 10 Pf 01 55-65 cm	Parte 45% areia, 40% silte	Contato de estrutura massiva, sem porosidade, com restos vegetais indecompostos, de tamanho grande, fibrico, lenhoso	Microconcreções quebradas, fragmentos filito	Arenização ausente, mistura de materiais	Regeneração por Mix de sementes (gramíneas e leguminosas forrageiras)	

Ca

9

Amostras de lâminas de solos /profundidade	% de grãos areia fina e silte na matriz	Estrutura e porosidade	Feições associadas	Arenização superficial	Cobertura vegetal	Image m
Tecnossolo 05 Pf01 0-18 cm	40% AF + 40% Silte	Estrutura moderada em blocos subangulares, parte densificada, com desenvolvimento de pedalidade; porosidade conectada, em macro e mesoporos	Muitos nódulos ferruginizados, Microconcreções comuns, litorelíquias de filitos, plasma ferruginoso intergranular	Arenização fraca, com elutriação incompleta	Pastagem	
Tecnossolo 05 Pf01 50 cm	60-70% Areia G+ F	Estrutura massiva de sedimento antigo (Horizonte C), densificada, sem desenvolvimento de pedalidade; porosidade praticamente nula e raros vazios não conectados	Concreções difusas comuns, litorelíquias de filitos e ferruginização de grãos (coating); flocos de mica comuns, dispersos na matriz	Ausente; Perfil truncado de paleossolo erodido pela passage de lama	Pastagem	
Tecnossolo 11 Pf02 0-15 cm	40% AF + 40% Silte	Estrutura massiva e fissural, densificada (hard-setting), fraco desenvolvimento de pedalidade; porosidade incipiente e raros vazios não conectados	Fragmentos orgânicos, concreções, fragmentos de filitos; grãos de quartzo arestados e subarredondados	Arenização muito fraca	Floresta	

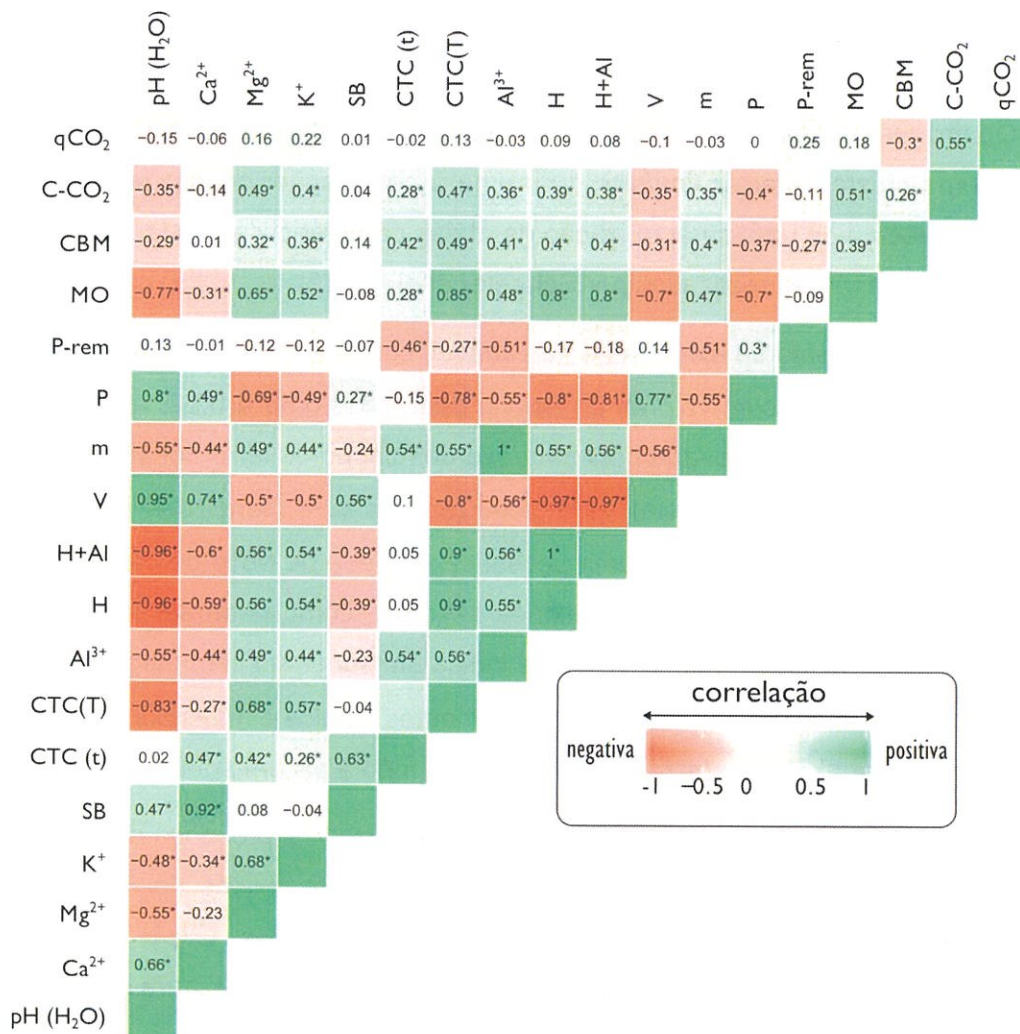
Embora o tempo decorrido desde a deposição do rejeito / formação do Tecno solo seja muito recente (44 meses), já existem evidências de processos de formação de solos, conforme apresentado na Tabela 5.

Análises químicas

Observou-se, de modo geral, estabilidade nos parâmetros de fertilidade ao longo das campanhas de monitoramento dos Tecno solos. A fertilidade é considerada baixa, com teores baixos de macronutrientes essenciais para as plantas, e acidez generalizada nos Tecno solos e solos de referência, indistintamente. São também muito reduzidos os teores de matéria orgânica em quase todas as amostras.

Pontualmente, os teores de Na trocável são ligeiramente elevados, mas muito distantes de qualquer condição de salinidade (o ISNa foi superior a 6%, com caráter solódico), e em apenas dois pontos a saturação foi > 15% (caráter sódico). Tais teores não seriam contudo, prejudiciais a maioria das culturas, especialmente no caso de pastagens (braquiária ou mix de gramíneas e leguminosas).

Os dados levantados pelo trabalho de Kasuya (2019) foram submetidos a testes de correlação de Spearman considerando o conjunto de parâmetros avaliados, conforme Figura 9. Destaca-se o papel da matéria orgânica na acidificação dos Tecno solos, com entrada de íons H^+ ou Al^{3+} , associados aos grupos funcionais de compostos orgânicos.



Ca

Figura 9: Correlação de Spearman entre as variáveis avaliadas. Valores no interior de cada célula representam valores da correlação para cada par de variável. Valores seguidos por asterisco indicam diferença estatística (p -valor < 0.05).

2.3. Trabalhos de monitoramento desenvolvidos pela AGROFLOR

Os dados levantados referem-se também ao eixo afetado diretamente pela deposição do rejeito, entre a Ponte do Gama e Barra Longa (figura 10).

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Ao longo do trecho impactado pela deposição, foram coletados materiais de rejeito na época do evento, abrangendo sedimentos e tecnossolos, além de solos não afetados, sendo procedidas análises de rotina química e física, visando caracterizar preliminarmente a condição natural das áreas no momento. Tais análises são importantes exclusivamente para mensuração de parâmetros da dinâmica de evolução dos solos, e para dar subsídio à prescrição de corretivos e adubação, bem como práticas de manejo.

Majoritariamente, a lama depositada como tecnossolo, é quimicamente pobre, sendo que limitações físicas tendem a ser bem maiores que as químicas, no âmbito de recuperação ambiental. Os valores de densidade do solo ao longo de todo o trecho ribeirinho monitorado, determinados logo após o evento, mostraram faixa muito variável de 0,94 a 2,38 g/cm³. Os valores extremos são muito altos e a situação aparentemente se agravou com a passagem do verão chuvoso e quente, pelo natural assentamento. Quatro meses após o rompimento, houve assentamento e selamento do solo (*hard-setting*) formando uma crosta de areia fina/silte duríssima à penetração, onde o rejeito permaneceu exposto. A seguir, apresenta-se uma caracterização geral das características do tecnossolo conforme levantamento de dados e análises realizados por Schaefer et al. (2015).

A densidade do solo apresenta-se extremamente variável, com média de 1,41 g/cm³ em superfície e 1,54 g/cm³ na lama enterrada, com valores de desvio padrão de 0,53 a 0,52, respectivamente. A densidade de partícula é bem mais elevada pela natureza do minério de ferro constituinte que possui alta massa específica 2,75 g/cm³ (superfície); 2,80 g/cm³ (enterrada) e menor desvio padrão - 0,29 e 0,23 g/cm³, respectivamente. O material de lama possui capacidade de troca de cátions (CTC) muito baixa, sendo praticamente destituído de carga elétrica negativa, como pode ser avaliado pelo Δ pH positivo (diferença entre pH KCl e pH em H₂O), o que indica um substrato com carga líquida positiva, típico de materiais oxídicos muito intemperizados e semelhantes à solos e materiais de canga ferrífera do Quadrilátero (Schaefer et al., 2015) (média pH KCl = 6,25, média pH em água = 5,69).

Os valores de pH tendem a ser relativamente elevados, não devido à presença de bases (Ca, Mg), que é baixa, mas sim à aproximação do Ponto de Carga Zero dos óxidos de Ferro (próximo da neutralidade), que predominam nesses substratos muito intemperizados. O pH elevado pode ser atribuído, ainda, ao uso de hidróxido de sódio na chamada gelatinização na mistura com amido, com o material suspenso atingindo pH 10,5. Já os solos enterrados (Neossolos Flúvicos e/ou Cambissolos)

8

mostram valores de pH em água bem maiores que pH KCl, e portanto, CTC e carga líquida negativa. A CTC média da lama é muito baixa (2,96) e os solos do entorno possuem valores maiores, com destaque para os Cambissolos das encostas.

Alumínio trocável é praticamente nulo em todos os solos e o teor de matéria orgânica (MO) encontrado foi baixo e pouco variável, tendo em vista que os solos adjacentes foram “truncados” pela erosão antes da deposição da lama, perdendo todo o horizonte A mais rico em matéria orgânica. Contudo, como o rejeito da mineração é normalmente mais rico em manganês, os valores devem ser afetados pela oxidação do dicromato pelo manganês reduzido presente, e os teores de MO seriam, assim, bem menores.

Por outro lado, estudos prévios indicaram baixos teores de Mn nas barragens de rejeitos de Germano e Santarém, com a lama do rejeito sendo constituída, basicamente, de Goethita (63%), Hematita (24%), Quartzo (11%) e Caulinita (7%), o que corrobora a baixíssima CTC e condição eletropositiva. A determinação de C neste material deve ser realizada em analisador elementar, por infravermelho (Schaefer et al., 2015).

A lama possui teor de P extraível por Melich I mais alto (média 9,34 mg/dm³) que os Cambissolos/ Argissolos do entorno (5,38 mg/dm³) e menores que os Neossolos Flúvicos/Gleissolos (11,05 mg/dm³). São teores relativamente altos e podem tanto refletir a intensa mistura do material com os solos superficiais arrastados pela erosão na passagem da onda de lama, quanto alguma presença leve de arsênio, pois o rejeito é normalmente pobre em P. Neste caso, o método colorimétrico não deve ser aplicado, e teores totais devem ser investigados por espectrometria de emissão óptica (ICP ou MS). Os teores de Na são maiores na lama e devem refletir efeitos do tratamento do minério, mas sem alcançar qualquer valor anômalo.

Observou-se logo após o rompimento um intenso e generalizado selamento superficial, agravado pela erosão preferencial do material fino, mais dispersável, deixando um substrato residual rico em areia fina e silte, altamente compactado (*Hard-setting*), o qual constitui um entrave à recuperação natural sem alguma intervenção. Segundo Schaefer et al (2017), passados aproximadamente cinco meses após o desastre, a lama compactada permanecia fisicamente inóspita, e praticamente sem vegetação natural, exigindo medidas para sua recuperação.

Após diversas medidas de recuperação, no entanto, passados quase três anos, observações de campo realizadas recentemente e, conforme monitoramentos realizados na área, evidenciam um cenário de recuperação bem distinto daquele logo após o evento. As ações de recuperação que vêm sendo implementadas revelam-se bastante eficazes nas áreas impactadas. Neste sentido, e visando a caracterização do estado atual das áreas alvo, foram realizadas diversas coletas de solo visando caracterizar um segundo cenário, após quase três anos. Tais coletas foram realizadas em áreas alvo para plantio de culturas; ao todo, foram realizadas amostras compostas ao longo de toda área impactada em 72 propriedades, conforme identificado na Figura 4.

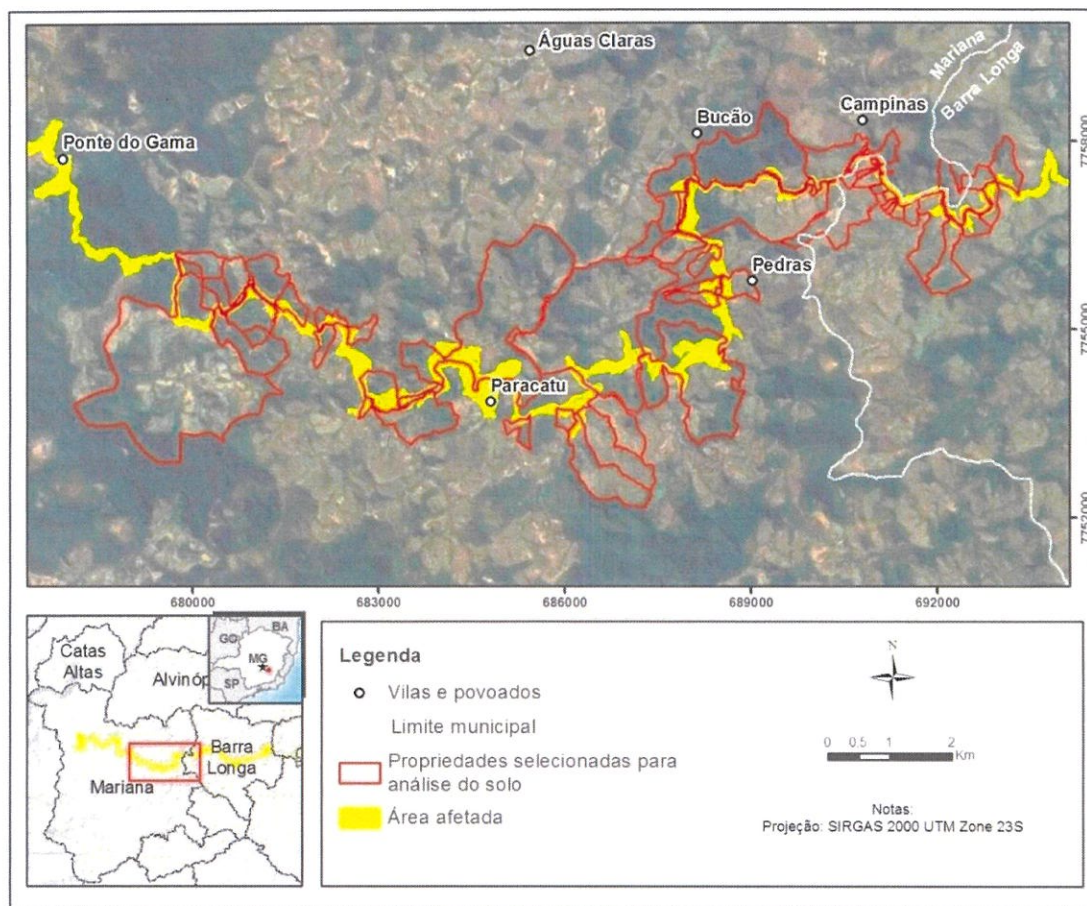


Figura 10. : Localização das propriedades alvo das análises de solo.

Por meio das análises realizadas, além de uma caracterização geral da área alvo de estudo foi possível comparar ainda o desenvolvimento de um mesmo tipo de cultura em locais distintos, sendo possível avaliar as principais características do solo atrelada à vegetação aparente.

Em termos agronômicos (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999), a análise descritiva dos solos coletados nas áreas de tecnossolos indica grande variabilidade espacial de atributos. A exceção dos valores de pH, as demais características químicas tiveram variação superior a 20%, e variação máxima de 311,66% para saturação por alumínio (m) (Tabela 6). Os tecnossolos mostram valores médio de baixa acidez com pH (H₂O) médio de 5,97. Nesse sentido, em termos médios, são observados baixos valores de acidez trocável (Al³⁺), que é dependente de pH (Acidez ativa) (7).

Em relação à fertilidade dos solos, a baixa soma de bases e os baixos teores de Ca e Mg indicam a baixa fertilidade dos solos. Entretanto, em média apresentam saturação por bases (V) acima de 50% e CTC efetiva média de 1,31 cmolc dm⁻³. Quando observados os valores de matéria orgânica, mesmo os valores mais elevados são classificados apenas como medianos segundo Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999). Em relação à presença de micronutrientes, ferro e manganês têm valores medianos altos, sendo bem superiores aos limites inferiores da classe (Alto para Fe > 45 mg dm⁻³, e Mn > 12 mg dm⁻³), sem revelar valores potencialmente tóxicos.

lg

Tabela 6: Resultados médios da análise dos solos coletado nas áreas atingidas pelos rejeitos de lama.

Estatística*	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	CTC (t)	CTC(T)	V	m	M	P-rem	Zn	F	Mn	Cu	B
	H ₂ O	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	+	+	+	cmolc dm ⁻³	cmolc dm ⁻³	(t)	(T)	%	%	mg L ⁻¹	mg dm ⁻³	%	%	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³
Min	5,00	1,10	10,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,40	0,40	0,50	22,00	0,00	0,00	23,90	0,15	50,80	45,00	0,30	0,00
Máx	7,70	15,20	70,00	1,44	0,65	0,40	3,10	1,94	4,59	4,36	100,00	21,00	1,88	45,00	3,10	479,00	248,50	4,00	0,90
Méd	6,25	5,00	22,23	0,78	0,15	0,04	0,90	0,99	1,31	1,74	57,57	1,70	0,82	31,85	1,18	176,01	115,24	1,09	0,18
Desv. P.	0,72	2,83	11,38	0,24	0,14	0,09	0,75	0,35	0,81	0,91	18,52	5,29	0,45	4,30	0,66	73,71	46,51	0,74	0,22
C.V.	11,54	56,54	51,18	30,39	94,81	209,17	83,82	35,80	61,79	52,48	32,17	311,66	55,15	13,50	56,16	41,88	40,36	67,51	121,56
N	39	39	39	39	39	39	39	39	39	30	3	3	3	26	35	35	35	35	35

* Min: valor mínimo observado; Máx: valor máximo observado; Méd: média aritmética; Desv. P.: desvio padrão da amostra; C.V. coeficiente de variação; N: número de amostras.

Tabela 7: Interpretação dos resultados das análises dos solos coletados nas áreas atingidas pela lama de rejeito de minério de ferro.

Atributo	Mínimo	Máximo	Média
P	Baixo	Muito Alto	Alto
H	Muito Baixo	Alto	Muito Baixo
P	Baixo	Baixo	Baixo
K	Muito Baixo	Médio	Baixo
C	Baixo	Médio	Baixo
a ² +	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo
M	Baixo	Médio	Muito Baixo
g ² +	Baixo	Médio	Muito Baixo
Al ³⁺	Muito Baixo	Baixo	Muito Baixo
H + Al	Baixo	Médio	Muito Baixo
S	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo
B	Baixo	Médio	Baixo
CTC (t)	Muito Baixo	Médio	Baixo
CTC(T)	Baixo	Médio	Baixo
V	Baixo	Muito Bom	Médio
M	Muito Baixo	Baixo	Muito Baixo
M	Muito Baixo	Baixo	Muito Baixo
O	Baixo	Baixo	Baixo
Zn	Muito Baixo	Alto	Médio
Fe	Baixo	Alto	Alto
Mn	Alto	Alto	Alto
n	Muito Baixo	Alto	Alto
Cu	Baixo	Bom	Baixo
B	Muito Baixo	Baixo	Baixo

As amostras de Tecno solos das áreas atingidas pela lama de rejeito aparentemente se distribuem em três grupos distintos pela PCA. O primeiro grupo é composto apenas por 2 parcelas tendo maior associação com maior acidez potencial e trocável, bem como maiores teores de CTC efetiva (t) do solo. Também associado a estes atributos, mas com menor intensidade, observa-se um grupo que também está associado a maiores teores de bases (Ca e Mg). Em oposição a estes dois grupos, as amostras com maior associação ao pH mais básico e maior saturação por bases (V) (Figura 5-A). O posterior agrupamento dessas amostras por distância euclidiana apresenta a formação de apenas dois grupos, onde os grupos positivamente relacionados à acidez e as bases formam apenas um grupo (Figura 5-B). Valores mais elevados de Ca, Mg, K e CTC total revelam as áreas onde a correção de acidez e adubação deixaram efeitos residuais positivos na fertilidade.

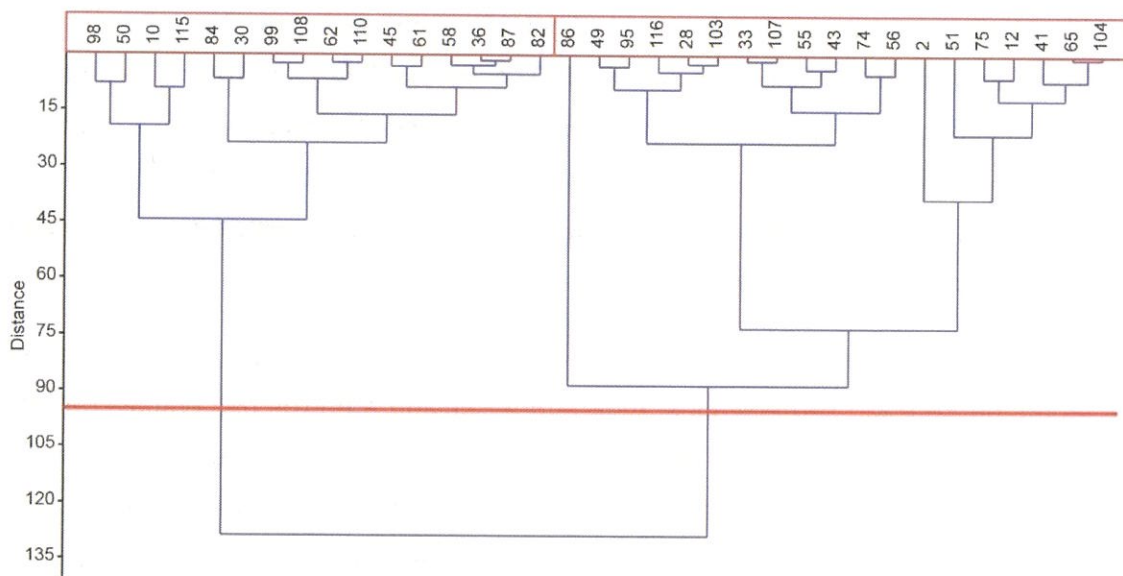
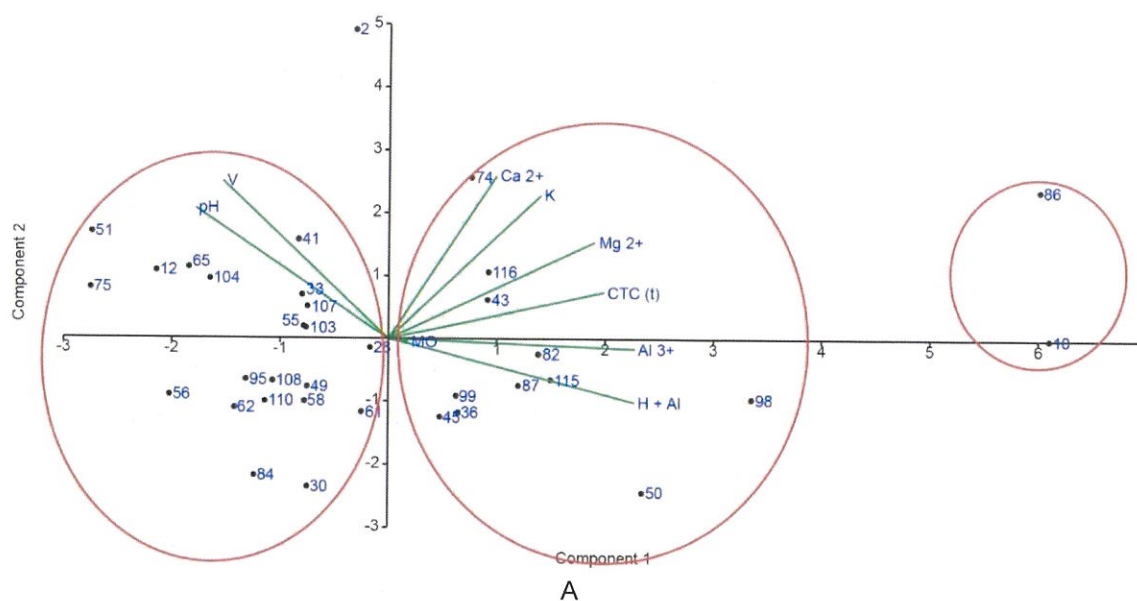


Figura 11: Distribuição das áreas amostradas em função das características químicas do solo.

Em relação ao teor de micronutrientes, a formação de grupos demonstra um possível gradiente nos teores de metais nas amostras (da esquerda para a direita) (Figura 6). Há um grupo formado por amostras com baixos teores de Fe, Mn, Cu e Zn, e dois outros grupos, sendo um mais associado a Cu, e outro aos demais elementos.

Estes resultados corroboram com a descrição e as características do rejeito inicialmente descritas por Schaefer et al. (2015). Apesar da maior saturação por bases nas áreas onde o pH é mais elevado, não há maiores teores de cátions acompanhando o pH. Segundo estes autores, a característica oxidica do rejeito torna estes solos mais eletropositivos, e conseqüentemente com poucos sítios de carga negativa (baixa CTC), e conseqüentemente menores quantidades de cátions absorvidos. Valores elevados de pH para rejeito de mineração na região de Mariana também foram observados por Silva et al. (2006), e ambos os trabalhos referidos destacam a utilização de hidróxido de sódio no processo de tratamento do minério como outro fator na elevação do pH em conjunto com a mineralogia do material.

Em contrapartida, nas áreas em que há maior CTC, boa parte é representada por Al^{3+} , que apesar de mostrar valores baixos, ocupam a maior parte dos sítios de carga. Neste sentido, os baixos valores de CTC implicam em sérios problemas de nutrição vegetal, uma vez que o rejeito tem baixa capacidade de retenção de bases e elevada capacidade de retenção de P, podendo funcionar como um sumidouro deste último, característica presente em muitos solos com elevados teores de óxidos.

Os resultados observados dos solos coletados podem indicar duas situações levando em consideração que são áreas ainda sem intervenção. Na primeira as áreas dispõem de uma maior camada de Tecnosolo sobre o solo original, representado pelo grupo de amostras associados positivamente aos valores de pH e a V (Figura 5) e ao maior teor dos micronutrientes (Figura 6), representando amostras coletadas apenas de Tecnosolo. O segundo grupo de amostras pode indicar áreas onde há uma menor camada do Tecnosolo e as coletas representam a mistura de Tecnosolo com o solo original da área, ou ainda que próprio Tecnosolo depositado nas áreas é resultante do arraste de resíduo e solos de toda a área atingida, uma vez que estas amostras estão associadas a características de solos mais ácidos e saturado por Al.

Em comparação ao estudo realizado por Silva et al. (2006) e como já caracterizado anteriormente, os teores de Fe e Mn são elevados. Este fato associado a baixos percentuais de matéria orgânica, principalmente a fração, que tem elevada capacidade de complexar metais. Entretanto, estes valores estão abaixo dos Valores de Referência de Qualidade para os solos e risco a saúde humana, presentes na Resolução CONAMA nº 420/2009 e na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02/ 2010, e não mostram riscos de fitotoxicidade para plantas.

Com base na divisão dos solos amostrados e dois grupos distintos, as técnicas utilizadas para a recuperação dos tecnossolos podem ser direcionadas, favorecendo sua maior efetividade. Entretanto, essas devem englobar tanto as características químicas quanto as físicas do solo, funcionando em sinergia para a melhoria deste. De maneira geral, a boa homogeneidade físico-

química mostra que as práticas de manejo podem ser bem calibradas para os Tecno solos de rejeito ou de recobrimento sem maiores limitações.

6.1 CARACTERÍSTICAS DOS PLANTIOS E TECNO SOLOS

Por meio de programa de visitas em algumas propriedades alvo dos plantios, foi possível identificar distintas alternativas empregadas, as quais refletem diretamente nas características nas culturas existentes. Essas estão diretamente ligadas ao tipo de manejo realizado nas áreas que antecedeu os plantios em questão e à deficiência de nutrientes do solo. Apresenta-se na 8 as principais características identificadas nas áreas correlacionas às alternativas adotadas.

Tabela 8: Análise integrada e síntese dos principais modelos aplicados na área

Alternativas empregadas	Resultados alcançados (2 anos de observações)	
	Físicos	Químicos
Tecno solo do rejeito <i>in situ</i> sem condicionamento físico¹	<ul style="list-style-type: none"> Formação de camada arenosa ("lag") com compactação moderada. Cobertura total do solo exposto de rejeito após 12 meses Redução do <i>hard-setting</i> com 24 meses Perda de argila dispersa após 12 meses Boa estruturação do solo pelas raízes, até 20 cm 	<ul style="list-style-type: none"> Bons resultados com calagem e adubação nas pastagens e capineiras Resultados variáveis com cana, milho e frutíferas
Tecno solo do rejeito com recobrimento de solo das encostas²	<ul style="list-style-type: none"> Sem formação de camada arenosa (lag) Redução acentuada da erosão hídrica Compactação moderada e variável Boa estruturação dos solos pelas raízes até 40 cm Hard setting moderado, pelo uso de horizonte C estéril; onde houve uso de horizonte A e B, não se observou hard-setting 	<ul style="list-style-type: none"> Bons resultados com alguma adubação e calagem Resultados variáveis com cultivos anuais e cana (uso de solo inadequado) Boa recuperação nos solos com adição de esterco
Tecno solo com mistura e inversão do rejeito com solo subjacente³	<ul style="list-style-type: none"> Heterogeneidade do Topsoil pela desigual inversão de camadas Pouca formação de camada arenosa ("lag") e pouco hard setting Compactação baixa e variável Boa estruturação dos solos pelas raízes até 40 cm 	<ul style="list-style-type: none"> Bons resultados com calagem e adubação Bom resultado com cultivos anuais Ativa resposta com adição de doses moderadas de esterco de curral

Cada alternativa empregada apresenta peculiaridades que fomentam diferentes níveis de recuperação edáfica do tecno solo. Assim, apresenta-se na Tabela 6 o prognóstico alcançado

¹ Plantio em tecno solo sem realização de manejo na área e aplicação insumos para correções das características químicas.

² Recobrimento do material tecnogênico com uma camada de solo fértil oriunda do entorno.

³ Remoção do horizonte A do solo pretérito, por meio de trincheiras e inversão do tecno solo de rejeito de modo que a camada de solo que anteriormente estava inferior ao tecno solo, fique disposta superficialmente.

por meio de cada técnica, sendo aqueles destacados em verde, os que possuem melhores atribuições quando comparado entre os demais.

Tabela 9: Prognóstico considerando a recuperação edáfica

ALTERNATIVA A Tecnossolo do rejeito <i>in situ</i> sem condicionamento físico	ALTERNATIVA B Tecnossolo do rejeito com recobrimento de solo das encostas	ALTERNATIVA C Tecnossolo com mistura e inversão do rejeito com solo subjacente
Fechamento total das falhas de solos expostos em até 36 meses	Fechamento total das falhas de solos expostos já completada	Fechamento total das falhas de solos expostos já completada
Enraizamento efetivo até 60-70 cm pelas gramíneas (destaque Braquiária e Mombaça)	Enraizamento efetivo até 80- 90 cm pelas gramíneas (destaque Braquiária e Mombaça)	Enraizamento efetivo até 100 cm pelas gramíneas (destaque Braquiária, Cana e Mombaça)
Recuperação dos valores de matéria orgânica após 3 anos	Recuperação dos valores de matéria orgânica após 4 anos	Recuperação dos valores de matéria orgânica com dois anos
Necessidade de aportes substanciais de esterco	Necessidade de aportes substanciais de esterco, onde houve uso de solo inadequado	Necessidade de aportes moderados de esterco
Calagem e adubação por mais 5 anos, no mínimo; parcelamento recomendado	Calagem e adubação por mais 5 anos; parcelamento recomendado	Calagem e adubação por mais 3 anos, no mínimo; parcelamento recomendado

Dentre as alternativas empregadas, percebe-se que em todas é possível alcançar bons resultados considerando os atributos químicos do solo haja vista a introdução da calagem e adubação. No entanto, considerando os atributos físicos, tem-se que para a alternativa A houve formações de camadas arenosas com compactação moderada, com redução do *hard-setting* em 24 meses e perda de argila dispersa após 12 meses. Já para a Alternativa C, constatou-se que a camada de *topsoil* fica heterogênea, devido à desigual inversão das camadas. A Alternativa B por sua vez, apresenta-se sem formação de camada arenosa e redução acentuada da erosão hídrica, entretanto, a compactação do solo é considerada como moderada e variável.

Diante das técnicas de manejo adotadas, constata-se que o plantio de culturas pode ser plenamente satisfatório desde que realizado corretamente o manejo do solo. Destaca-se como diferencial nas propriedades analisadas a incorporação de composto orgânico por parte dos produtores. A simples correção do solo, independente do recobrimento do tecnossolo, com a fertilização orgânica e mineral já permite alcançar plantios satisfatórios. O equilíbrio do pH, conforme o tipo de cultura a ser adotado, será a base para que todos os nutrientes sejam disponibilizados para a absorção da planta.

Apresenta-se a seguir (9), algumas características identificadas nas áreas alvo deste estudo.

Tabela 9: Algumas das características identificadas nas áreas alvo de plantio.



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e recobrimento de solo inadequado (horizonte C com saprolito) anterior ao plantio de cana-de-açúcar. Constatou-se uma biomassa satisfatória, no entanto a porcentagem de cobertura encontra-se variável e descontínua.



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e recobrimento de solo inadequado (horizonte C com saprolito) anterior ao plantio de milho, onde constatou-se deficiência de potássio.

As folhas apresentam queimaduras, secamento ou bronzeamento da ponta e nas margens das folhas inferiores, além de manchas marrons no interior do colmo.



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e recobrimento de solo inadequado (horizonte C com saprolito) anterior ao plantio de milho, onde constatou-se deficiência de potássio.

As espigas apresentam grãos desalinhados com ausência destes nas extremidades.



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e recobrimento de solo inadequado (horizonte C com saprolito) anterior ao plantio de milho, onde constatou-se a deficiência de fósforo.

As folhas apresentam coloração púrpura (arroxamento) nas margens, colmos frágeis e delgados.



Propriedade A, plantio de cana-de-açúcar como solo inadequado de recobrimento; constatou-se eutrofização nas linhas de plantio onde houve adubação. Após a decomposição das algas será liberado ao solo nitrogênio.



Propriedade A. Planta remanescente do primeiro plantio de leguminosas (mix) na área. As raízes pivotantes cresceram de modo superficial, sem aprofundamento, devido ao selamento do solo, mas se encontram bem modeladas (detalhe dos nódulos de bactéria fixadora de N).

6



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e adição de solo inadequado anterior ao plantio de milho. Constata-se o efeito de arenização em camada de até 10 cm, evidenciando deficiência da cobertura vegetal e solo exposto à erosão seletiva.



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e adição de solo inadequado anterior ao plantio de milho.

Devido ao efeito de arenização, a argila se dispersa do tecnossolo dando origem à formação de blocos.



Propriedade A plantio de Brachiaria em área com adição de solo inadequado. Constatou-se deficiência de nitrogênio. As folhas encontram-se com coloração amarelada e faixas de biomassa reduzida.

Ph



Propriedade B. Plantio de Mombaça com adição de solo inadequado, com forte incremento orgânico, adubação e calagem. Constatou-se biomassa bem satisfatória, aparentemente sem deficiência de nutrientes e boa cobertura do solo, sem *hard-setting*.



Propriedade B. Plantio de Mombaça com solo de recobrimento inadequado, incremento orgânico, adubação e calagem. Constatou-se matéria orgânica humificada, alcançando cerca de 40 cm de profundidade do tecnossolo.



Propriedade C. Plantio de cana-de-açúcar diretamente no tecnossolo do rejeito, sem manejo. Constatou-se deficiência nas folhas, no entanto essa pode ser atribuída à colheita tardia; realizou-se calagem e adubação. A cobertura é satisfatória.

05



Propriedade C. Plantio de cana-de-açúcar diretamente sobre o tecnossolo de rejeito. Constatou-se acamamento de sílica baixo. Solos com horizonte A com cerca de 5 cm e início de formação de estrutura granular.

Presença de migração de argila abaixo do horizonte A.



Propriedade D. Plantio de cana-de-açúcar em área de tecnossolo de rejeito com incorporação de solo, calcário e composto orgânico. Plantio recente, realizado há três meses. Constatou-se que o tecnossolo se encontra extremamente compactado, o que reflete diretamente no desenvolvimento radicular.



Propriedade E. Plantio de cana-de-açúcar em área com inversão e incorporação de solo na parte inferior. Constata-se grande diferencial neste plantio devido à não compactação do solo, o que difere fortemente do plantio realizado na propriedade D.


Tabela 10: Principais características das culturas passíveis de utilização na área .

Cultura	Principais características
Cana-de-açúcar	<p>Cultivo ideal: solos com profundidade maior que um metro. Desenvolve-se de acordo com as características física do solo, principalmente com a capacidade de retenção de água. Necessita de solo com boa capacidade de infiltração. Solos arenosos são menos indicados.</p> <p>É bastante tolerante à acidez e alcalinidade. Seu cultivo desenvolve-se em solos com pH entre 6 e 8,4.</p> <p>O sistema de raízes desenvolve-se em maior profundidade.</p>
Capineira	<p>A forrageira mais indicada para a formação de uma capineira é o capim-elefante, por produzir um bom aporte de biomassa, boa adaptação a diferentes ecossistemas, boa aceitação e palatabilidade dos animais. É exigente em relação aos nutrientes; e não tolera baixo pH e alumínio no solo. Seu cultivo desenvolve-se em solos com pH entre 6 e 8,4.</p> <p>O plantio deve ser realizado em áreas com topografia que facilitem a colheita e com boa drenagem do solo.</p>
Milho	<p>Espécie anual, estival, cespitosa, ereta, com baixo afillamento, monóico-monoclina. Para atingir o seu máximo potencial produtivo, a cultura necessita de temperaturas altas, em torno de 24 e 30°C, radiação solar elevada e adequada disponibilidade hídrica do solo.</p> <p>O cultivo possui maior desempenho em solos bem estruturados com alta capacidade utilizável para a água e disponibilidade de nutrientes. O solo deve ter textura mediana, o pH deve estar entre 6 a 7,2.</p>
Mombaça	<p>Espécie de ciclo anual e cespitosa. Recomenda-se o plantio em solos férteis, ou corrigidos areno-argilosos, bem drenados. Apresenta baixa tolerância a solos encharcados.</p>
Tifton	<p>Cultura perene estolonífera com grande massa folhear, rizomas grossos, que são os caules subterrâneos que mantêm as reservas</p>
	<p>de carboidratos e nutrientes que proporcionam uma maior resistência a secas, geadas, fogos e pastejo intensivos.</p> <p>O solo deve estar bem corrigido com o PH entre 5,5 e 6,5 e devidamente adubado. Vestígios de outras pragas ou gramíneas (Brachiaria, por exemplo), devem ser eliminadas.</p>
Brachiaria	<p>As gramíneas do gênero Brachiaria, amplamente utilizadas nas fases de cria, recria e engorda dos animais, adaptam-se à diversas condições de solo e clima. Sendo bem tolerantes a solos ácidos e inférteis, porém, possui grande potencial de resposta a melhorias do nível de fertilidade do solo. Tolerante pisoteio e pastejo intenso e continuado. É moderadamente tolerante a solos encharcados. O pH ideal aproxima-se de 6,5.</p>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGROFLOR, Agrofior Engenharia e Meio Ambiente. Plano de trabalho em áreas impactadas pelo rejeito. Relatório. 2019. Documento interno. 56 p.
- ANJOS, N.; DELLA LUCIA. T.M.C.; MAYHÉ-NUNES, A.J. Guia prático sobre formigas cortadeiras em reflorestamentos. **Ponte Nova: Graff Cor**, 1998. 97p.
- GOLDER, 2019. MEMORANDO TÉCNICO das características físicas, químicas e microbiológicas dos Tecnossolos: RT-002_189-515-2087-B
- IUSS WORKING GROUP WRB. World reference base for soil resources 2006. **World Soil Resources Report**, n. 103. FAO, Rome. 2006.
- MULLINS, C.E. Hardsetting Soils. In: SUMNER, M.E., ed. **Handbook of Soil Science**. Madison, CRC Press, p.65- 87. 1999.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5 aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - UFV, 359 p. 1999.
- RODRIGUES, R.R.; GANDOLFI, S. Conceitos, tendências e ações para a recuperação de florestas ciliares. In: **Matas Ciliares: Conservação e Recuperação**. São Paulo: Edusp, 2000.
- SBCS, SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10ª ed. Porto Alegre, 2004. 400p.
- SCHAEFER CEGR, CANDIDO HG, CORREA GR, PEREIRA A, NUNES JA, SOUZA OFF, MARINS A, FERNANDES FILHO E, KER JC. Solos desenvolvidos sobre Canga Ferruginosa no Brasil: uma revisão crítica e papel ecológico de termiteiros. In: **Geossistemas Ferruginosos do Brasil (org. F.F Carmo & L. Y. Kamino pp. p 77-102**. 2015.
- SCHAEFER CEGR, SANTOS EE, SOUZA CM, NETO JD, FILHO EIF, DELPUPO C. Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecnossolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG. **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, v.24, n 1/2, p. 105-135 , 2015
- SILVA, G. P., FONTES, M. P., COSTA, L. M., & BARROS, N. F. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da mina de Alegria, Mariana – MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 1, p.45-52, 2006.
- SILVA, L.S.; RHEINHEIMER, D.S; KAMINSKI, J.; SCHLINDWEIN, J.; GATIBONI, L.C. **Acidez e o uso do calcário na agricultura**. Santa Maria (Departamento de Solos) – Universidade Federal de Santa Maria, 4p, 2002.
- TACEY, W. H & GLOSSOP, B. L. Assessment of topsoil handling techniques for rehabilitations of sites mined for bauxite within the Jarrah forest of western Australia. **Journal of Applied Ecology**, p. 195-201, 1980

Assinatura



Prof. Carlos Ernesto Schaefer

DPS/UFV



