

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

RECUPERAÇÃO DE ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE
AFETADA POR VOÇOROCAS NA FAZENDA CEDRO DO LÍBANO
EM SÃO CARLOS (SP)

MARIANA CRESPO HAUSCHILD

Jaboticabal – SP

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

RECUPERAÇÃO DE ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE
AFETADA POR VOÇOROCAS NA FAZENDA CEDRO DO LÍBANO
EM SÃO CARLOS (SP)

MARIANA CRESPO HAUSCHILD

Orientador: Dr. Marcílio Vieira Martins Filho

Trabalho apresentado à Faculdade
de Ciências Agrárias e Veterinárias
- UNESP, Câmpus de Jaboticabal,
para graduação em ENGENHARIA
AGRONÔMICA.

Jaboticabal – SP

2024

H376r Hauschild, Mariana Crespo
Recuperação de Área de Preservação Permanente afetada
por voçorocas na Fazenda Cedro do Líbano em São Carlos
(SP) / Mariana Crespo Hauschild. -- Jaboticabal, 2024
78 f. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia
Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Marcílio Vieira Martins Filho

1. Erosão. 2. Recuperação de áreas degradadas. 3. Solos
degradação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus Jaboticabal



MARIANA CRESPO HAUSCHILD

TÍTULO DO TRABALHO ACADÊMICO:

RECUPERAÇÃO DE ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE AFETADA POR VOÇOROCAS NA FAZENDA CEDRO DO LÍBANO EM SÃO CARLOS (SP)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho
Coorientador (se houver):

Área de Concentração: Ciência do Solo / Conservação do Solo e da Água

Data da defesa: 08 / 07 / 2024

(X) Aprovado
() Reprovado

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO
Data: 09/07/2024 11:27:23-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dr^a. Deise Cristina Santos Nogueira
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal/CSME

Documento assinado digitalmente
DEISE CRISTINA SANTOS NOGUEIRA
Data: 09/07/2024 16:47:51-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Eng^o. Agr^o. Fernando Pavanelo Ramos
Grupo São Martinho S.A.

Documento assinado digitalmente
FERNANDO PAVANELO RAMOS
Data: 09/07/2024 15:14:54-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em:

10/07/24

Aprovado Ad Referendum do
Conselho do Departamento

Prof. Dr. José Eduardo Corá
Chefe do Departamento

**Dedico esse trabalho à
família e amigos que
me apoiaram em todo
processo.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador e à Universidade que fizeram esse trabalho se tornar possível.

Agradeço também a amigos e familiares que apoiaram e torceram durante todo o trajeto.

RESUMO

Vários são os impactos a que os ecossistemas naturais estão sujeitos, principalmente quando há o desenvolvimento de processos erosivos extremos, como as voçorocas, em área de preservação permanente (APP). No presente caso de estudo, descreveu-se o processo de formação de duas voçorocas numa APP em São Carlos – SP. Com a análise e o entendimento do processo de formação, um plano de recuperação foi elaborado. Além de alterações nos taludes e valas das voçorocas com operações mecânicas de retaludamento e formação de patamares, o estabelecimento de escadas hidráulicas, revegetação com *Crotalaria ochroleuca*, *Crotalaria spectabilis*, *Crambe abyssinica*, *Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan*, *Helianthus annuus*, *Raphanus sativus*, *Fagopyrum esculentum* and *Paspalum notatum* permitiram num período de 06 meses promover a revegetação, estabilizar e recuperar o processo erosivo.

Palavras-chave: Erosão, Recuperação áreas degradadas, Solos degradação.

SUMMARY

There are many impacts on natural ecosystems, especially when extreme erosion processes such as gullies develop in a permanent preservation area (APP). This case study describes the formation of two gullies in a permanent preservation area in São Carlos - SP. After analyzing and understanding the formation process, a recovery plan was drawn up. In addition to alterations to the slopes and ditches of the gullies, with mechanical operations such as grading and the formation of plateaus, the establishment of hydraulic ladders, revegetation with *Crotalaria ochroleuca*, *Crotalaria spectabilis*, *Crambe abyssinica*, *Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan*, *Helianthus annuus*, *Raphanus sativus*, *Fagopyrum esculentum* and *Paspalum notatum* made it possible to promote revegetation, stabilize and recover the erosion process over a period of 6 months.

Keywords: Erosion, Recovering degraded areas, Soil degradation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Voçorocas	5
2.1.1. Formação e impactos	7
2.1.2. Prevenção	8
2.1.3. Métodos de recuperação de voçoroca	8
2.1.4. Implantação e estratégia para controle da erosão	9
2.1.5. Passos para a recuperação	10
2.1.6. Revegetação	10
3. DETERMINAÇÃO DE OBJETIVOS	12
4. DIAGNÓSTICO	15
4.1. Análise da área com processo erosivo	15
4.2. Caracterização das voçorocas na APP.....	16
5. ESTUDOS, PROPOSIÇÕES E PROGRAMAÇÕES	31
5.1. Procedimentos metodológicos para elaboração do programa	31
5.1.1. Elementos caracterizadores da região	31
5.1.2. Locais potenciais e/ou suscetíveis à processos erosivos	33
5.1.3. Medidas preventivas e/ou corretivas no controle e estabilização de erosões	34
5.1.4. Elenco de condicionantes relacionadas com as obras	34
5.2. Definições dos serviços a executar	37
5.3. Atividades para implantação do programa	38
5.3.1. Atividades e/ou ações	38
5.3.1.1. Atividades voltadas para execução de drenagem	39
5.3.1.2. Atividades voltadas para a proteção superficial dos taludes .	39
5.3.1.3. Atividades com caráter preventivo e corretivo destinadas a assegurar a estabilização de encostas e maciços	39
5.4. Relação de quantitativos dos principais serviços a executar e particularidades vinculados com o programa	40
5.5. Articulação institucional	41
5.6. Monitoramento	41
5.7. Cronograma	42
6. AVALIAÇÕES (Considerações finais)	43
6.1. Controle do escoamento superficial nas cabeceiras das voçorocas ...	43
6.2. Retaludamento e construção de terraços para patamares	47
6.3. Drenagem de águas subsuperficiais	51
6.4. Revegetação da área	53
6.5. Estruturas hidráulicas	56
6.5.1. Avaliação dos dispositivos de dissipação em escadas hidráulicas	59
7. LITERATURA CITADA	66

1. INTRODUÇÃO

Com o surgimento do Código Florestal Brasileiro, Lei nº 4.771 em 1965, foram criadas as Áreas de Preservação Permanente (APP), objetivando disciplinar e limitar as interferências antrópicas sobre o meio ambiente (Ribeiro et al., 2005). Nessas áreas não se pode fazer a retirada da cobertura vegetal original, permitindo, assim, que ela possa exercer, em plenitude, suas funções ambientais (Soares et al., 2002). Entretanto a APP vem sofrendo uma degradação ao longo dos anos devido ao seu uso impróprio, principalmente com a prática da agropecuária. Henriques (2003) estimou que apenas 7% da Floresta Atlântica permaneceu desde a época do descobrimento do Brasil. Isso prova a importância de preservar áreas nativas, visto sua diminuição constante com passar do tempo.

A recuperação de áreas degradadas é possível, porém trata-se de um processo lento e difícil (Alves et al., 2007). Segundo um estudo de Skorupa (2003) pela Embrapa, existem diversos benefícios em recuperar as APP. Um dos benefícios físicos é que a presença de vegetação em níveis acentuados de relevo promove uma maior estabilidade do solo pelo emaranhado de raízes das plantas, evitando sua perda por erosão e protegendo as partes mais baixas do terreno. A vegetação nativa também garante a estabilização das margens dos rios evitando que o seu solo seja levado diretamente para o leito dos cursos. Em outros casos, ela também pode atuar como quebra-ventos em produções agrícolas. Já os benefícios ecológicos são a preservação da flora e da fauna, controle de pragas do solo, maior fixação de carbono, entre outros. Portanto, preservar e recuperar as APP traz diversas vantagens para o meio ambiente e para a conservação do solo.

Juntamente com a degradação das Áreas de Preservação Permanente e, conseqüentemente, da cobertura vegetal, os rios recebem a água da chuva de maneira mais sobrecarregada e as gotas da chuva incidem diretamente sobre a superfície do terreno (Guerra et al., 1999). Portanto há um aceleração dos processos erosivos e, nesse caso, tem-se uma erosão hídrica acentuada. A erosão por um fluxo concentrado contribui significativamente para a erosão total em uma encosta (Di Stefano et al., 2013), além de causar desequilíbrios ambientais, empobrecimento do solo e ter conseqüências na conservação do solo e da água.

A erosão hídrica do solo envolve as etapas de desagregação, transporte e deposição de sedimentos, sendo esses direcionados para cotas menores (Oliveira et al., 2012). Ela é responsável por 56% das degradações do solo no mundo, segundo um estudo de Oldeman et al. (1990). Os processos mais conhecidos da erosão hídrica são a erosão entressulcos e em sulcos e as voçorocas. A erosão entressulcos é decorrente da atuação de processos como o impacto das gotas de chuva e o transporte por um fino fluxo superficial (Foster, 1982). Nos entressulcos o impacto pode desagregar grandes quantidades de partículas decorrentes da energia cinética das gotas (Cassol e Lima, 2003).

A erosão entressulcos pode evoluir para a uma erosão em sulcos. Esta, por sua vez, se caracteriza pelo escoamento concentrado na superfície do solo, onde a água flui em canais efêmeros, os quais podem ter tido início com a desagregação das partículas associados a processos erosivos anteriores, topografia do terreno, rugosidade do solo e marcas de tráfegos de equipamentos de cultivo (Martins Filho, 1999). Nesse processo, a lâmina de

escoamento desenvolve maior tensão de cisalhamento devido ao aumento da sua espessura, elevando, portanto, a capacidade do escoamento em desagregar o solo (Cantalice et al., 2005). A água pode percorrer longas distâncias e em lugares onde as chuvas são fortes a erosão pode se tornar severa.

Em casos ainda mais atenuados de erosão, pode haver o surgimento de voçorocas, que caracterizadas por um canal de drenagem de paredes abruptas, com fluxos efêmeros ou pequenos, designada por uma erosão intensa e uma cabeceira bastante íngreme e escarpada (Bigarella e Mazuchowski, 1985). Elas podem chegar a vários metros de comprimento e de profundidade, devido ao fluxo de água que é possibilitado em seu interior, causando uma grande movimentação de partículas (Cardoso et al., 2010) e com a possibilidade de alcançar o lençol freático. Podem ser classificadas no formato V, que são voçorocas mais juvenis e com solos de menor erodibilidade, ou em U, que ocorre em solo mais erodíveis e com paredes esculpidas pelo fluxo superficial da água. Sua formação está relacionada, na maioria das vezes, a ações antrópicas, principalmente quando há a retirada da vegetação.

Existem práticas para diminuir a frequência dessas erosões, uma delas é manter a cobertura vegetal do solo, dessa forma haverá menor impacto das gotas de chuvas e um aumento da rugosidade, que diminui a velocidade de escoamento da água, aumenta a infiltração do solo, e conseqüentemente, diminui o arraste de sedimentos. Outra alternativa são os cultivos em curva de nível, que é uma prática simples que pode evitar a degradação dos solos pela erosão (Chaves, 1982), já que permitem a diminuição da energia cinética da chuva, o aumento da infiltração e o armazenamento de água no solo.

No caso das voçorocas, Guglieri-Caporal et al. (2011) afirmou que os voçorocamentos podem ser controlados por meio de práticas mecânicas e de revegetação. A recuperação dessas áreas é de médio a longo prazo e envolve vários processos, como isolamento da área, análise química do solo, estruturas de retenção, aplicação de insumos para reflorestamento etc. Entretanto é de grande importância recuperar voçorocas pois elas geram impactos socioambientais como assoreamento de rios e córregos, perda de áreas agrícolas e habitats naturais, residências em risco e redução do nível do lenço freático (Bacellar, 2000).

Este trabalho teve como objetivo a correção e o reflorestamento de voçorocas numa Área de Preservação Permanente (APP) localizada em Água Vermelha (SP) distrito de São Carlos – SP.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Voçorocas

As voçorocas são decorrentes do resultado do escoamento turbulento e direcionado das águas de enxurradas após chuvas torrenciais e tempestades (Fleury, 1983). Elas ocorrem com maior frequência em solos de clima tropical, onde predominam solos arenosos, arenoso-argiloso, arenoso siltoso e siltosos (Fleury, 1983), devido à menor coesão entre os grãos. Com o passar das décadas as voçorocas se tornaram uma questão importante mundialmente.

Apesar de as voçorocas serem um processo natural, o aceleração no número de ocorrências desse processo está conectado com a interferência humana desde o início do século XVIII, o que modificou e intensificou as taxas naturais de remoção do solo (Sampaio et al, 2016).

Muitas vezes o voçorocamento está diretamente relacionado com o uso e manuseio inadequado das terras (Castillo e Gómez, 2016). A ocorrência de voçorocas está relacionada com o desmatamento, o uso incorreto do solo para agricultura, a pecuária e obras de engenharia civil (Cabral et al, 2002).

As voçorocas quanto aos tamanhos podem ser classificadas como (Gómez Calero, 2021):

- 1) Pequenas: área menor que 3 ha, profundidade menor que 1 m e velocidade do escoamento superficial menor que $1,5 \text{ m s}^{-1}$;
- 2) Médias: área maior que 3 ha e profundidade entre 1 m e 2 m;
- 3) Profundas: área maior que 3 ha e profundidade maior que 2 m.

Um estudo feito por Fleury et al. (1983) constatou alguns dos principais tipos de voçorocas:

1) Voçorocas ativas: em progressão de tamanho, com afundamento e/ou alargamento da valeta;

2) Voçorocas mortas: cessaram ou reduziram ao mínimo as causas de sua origem, ou desenvolvimento, por meio do bloqueio da água, por exemplo;

3) Voçoroca seca: erosão não atinge o lençol freático;

4) Voçoroca úmida: erosão atinge o lençol freático.

Dentre outros fatores para a formação das voçorocas, tem-se:

1) Pouca ou nenhuma cobertura vegetal causada por desmatamento, pisoteio intenso de animais, cultivos repetitivos ou períodos de seca;

2) Escoamento concentrado em terreno íngreme;

3) Solos instáveis em linhas de drenagem;

4) Chuvas intensas;

5) Aumento do escoamento superficial causado por baixos níveis de cobertura vegetal e/ou má infiltração do solo;

6) Formato de captação desfavorável;

7) Solos mais arenosos.

O relevo influencia, uma vez que quanto mais íngreme, maior a convergência natural das águas superficiais e subsuperficiais, favorecendo os movimentos de massa e o desenvolvimento de voçorocas (Gomes et al., 2021). A retirada de material vegetal também contribui com o aceleração da erosão, já que a presença de cobertura ajuda no controle e diminuição da velocidade da água da chuva, deixa o solo protegido diminuindo a erosão por gotas, pode auxiliar numa maior infiltração da água, que conseqüentemente também diminui a quantidade de água escoada e de sedimentos levados com ela.

2.1.1 Formação e impactos

A erosão hídrica ocorre em 3 etapas: desagregação, transporte e deposição. A presença de água faz com que os agregados reduzam suas forças coesivas e depois são desintegrados em partículas menores. Conforme a chuva se intensifica, o número dessas partículas menores aumenta e o transporte se inicia a partir do momento em que a intensidade da precipitação excede a taxa de infiltração (Filizola et al., 2011). Ao longo da declividade, a enxurrada ganha volume e velocidade, aumentando sua capacidade de gerar atrito, desagregação e o escoamento superficial.

As voçorocas podem ser formadas por erosão superficial, erosão subsuperficial e movimentos de massa (Bacellar, 2006). Ela é resultado de chuvas volumosas e de altas concentrações de água de escoamento superficial em regime de turbulência. Conforme essa água da chuva aumenta, ela vai se direcionando para qualquer parte fendida ou deprimida do terreno, provocando o arraste e o arranque de partículas do solo (Fleury, 1983). Essas partículas em suspensão aumentam a força erosiva destas águas e provocam rasgos no terreno, podendo atingir grandes profundidades ou até mesmo alcançar o lençol freático.

Outro fator hidrológico importante é a taxa de infiltração do solo (Teixeira et al., 2012), já que quanto mais baixa a infiltração, maior o escoamento superficial e consequentemente maior o deslocamento de sedimentos (lixiviação de massa).

A formação de voçorocas colabora para a eliminação de terras férteis, assoreamento de rios, deterioração de pastagens e culturas agrícolas, dificuldade de acesso a áreas (Teixeira et al., 2012).

2.1.2 Prevenção

A prevenção ainda é a melhor maneira de se livrar do problema, pois uma vez instalada essa forma de erosão, torna-se quase sempre inviável sua eliminação, restando como alternativa a sua estabilização para evitar a intensidade do problema (Goulart et al., 2006).

Algumas estratégias para prevenção de voçorocas podem ser:

- 1) Manter vegetação nas linhas de drenagem e eliminar pastoreio nessas áreas;
- 2) Inserir vegetação em linhas de drenagem que não estejam cobertas;
- 3) Uso de pastagens perenes com raízes profundas, árvores ou ambos para manter níveis vigorosos de vegetação;
- 4) Estabilização imediata de erosão em falhas ou sulcos;
- 5) Manter alto nível de matéria orgânica no solo;
- 6) Escoamento em trilhos seja uniformemente distribuído em piquetes para dissipar energia da água;
- 7) Evitar cultivo excessivo.

2.1.3 Métodos de recuperação de voçorocas

Sobre recuperação de voçorocas, segundo Resende et al. (2006), deve-se seguir os seguintes passos: atividades necessárias antes da implantação das estratégias de controle de erosão - Isolamento do pastoreio de animais; construção de aceiros para preservar vegetação natural; controle de formigas-cortadeiras para as mudas que serão plantadas posteriormente; análise química e textural do solo, para isso deve ser feita a divisão de glebas

homogêneas. Dessa forma, o produtor consegue saber as condições atuais do terreno.

2.1.4 Implantação de estratégias físicas para controle da erosão

Recomenda-se a construção de terraços e bacias de retenção para o ordenamento e armazenamento da enxurrada formada na parte superior da voçoroca, e barreiras para reter sedimentos dentro das voçorocas, e algumas no entorno desta, com paliçadas de bambu e pneus usados (Resende et al., 2006).

Terraço em nível: possui as extremidades bloqueadas e têm a função de acumular e infiltrar a água, recomendados para áreas com boa permeabilidade e declividade de até 12%.

Terraços em desnível: possuem pequeno gradiente ao longo de seu comprimento e conduzem a água para as laterais, sendo mais adequados, para áreas com menor permeabilidade e/ou declividades superiores a 12%. Em encostas ou morros com grande risco de enxurrada, este é o mais recomendado. Dessa forma, evita que eles se rompam.

Terraço misto: projetados em pequeno desnível e com capacidade de acumulação de água que, ao ser excedida, escoam pelas laterais.

Bacia de retenção: usada com terraços em desnível ou misto no final destes para conter e armazenamento da água da enxurrada de modo que ela tenha tempo para se infiltrar no solo.

Canais escoadouros vegetados: água da enxurrada escoam pelas laterais (sem bacias) sem causar danos.

Paliçadas: diminuem a velocidade do escoamento superficial e ancoram os sedimentos, reduzindo a erosão.

2.1.5 Passos da recuperação

Dentre eles, tem-se:

1) Determinação da declividade da área: necessário para a construção dos terraços, juntamente com a textura do solo, para calcular o espaçamento que os terraços ficarão distanciados uns dos outros;

2) Cálculo do espaçamento entre terraços: são calculados o espaçamento vertical (EV) e o espaçamento horizontal (EH);

3) Demarcação e locação dos terraços: de acordo com Pires e Souza (2003), para locar os terraços deve-se fazer, inicialmente, a demarcação dos pontos ao longo do declive e, posteriormente, pontos transversais perpendiculares à declividade por onde eles serão construídos;

4) Determinação do escoamento superficial (Q): o Q varia em função da declividade, tipo de solo (textura), cobertura vegetal e intensidade das chuvas. Sua determinação é importante para o dimensionamento da seção transversal dos terraços e o volume das bacias de retenção.

2.1.6 Revegetação

Uso de leguminosas: associação com microrganismos que transforma o nitrogênio do ar em compostos nitrogenados assimiláveis pelos vegetais, associação com fungos que pela presença das hifas aumentam a área de contato e o volume de solo explorado pelas raízes das plantas e redução nos

custos com replantio, adubação e tratos culturais das plantas, tornando uma alternativa bastante viável técnica e economicamente.

3. DETERMINAÇÃO DE OBJETIVOS

A presente proposta tem por objetivos elencar as ações operacionais preventivas e corretivas destinadas a promover o controle dos processos erosivos na área e entorno de voçorocas em Água Vermelha (SP), e evitar problemas de instabilização de encostas e maciços, enfocando, principalmente a faixa de domínio da voçoroca, as áreas de taludes de cortes e aterros, áreas construídas e caminhos, dentre outras, que pela inexistência de um manejo adequado do solo, ou do subdimensionamento da drenagem, podem acarretar riscos à integridade das estruturas das edificações a serem. Promover ações operacionais para recomposição do equilíbrio em áreas porventura desestabilizadas e com processos erosivos desencadeados, como também evitar a instalação desses processos, contribuindo para a redução da perda de solo e do assoreamento da rede de drenagem pré-existente no local. Tais ações correspondem a um elenco de medidas e dispositivos adequados (durante a fase de implantação das obras de estabilização dos taludes e sistemas de drenagem), associados a um conjunto de condicionantes a serem observados no processo construtivo, que visam reduzir as situações específicas de risco de ocorrência de processos erosivos laminares, lineares e de processos ativos pré-existentes, que possam comprometer as estruturas das futuras edificações a serem introduzidas.

Dentre os elementos preventivos a serem considerados, destacam-se como mais importantes os correspondentes a:

- 1) Adoção, para os taludes de cortes e aterros e nas caixas de drenagem, da conformação geométrica compatível com as características geotécnicas dos materiais e com a topografia das áreas limítrofes;

2) Definição de estruturas e dispositivos físicos de drenagem a serem incorporados à infraestrutura do trecho (descidas d'água, valetas, dissipadores de energia, etc.), para controlar o fluxo das águas pluviais superficiais e profundas (principalmente do lençol freático);

3) Recuperação da cobertura vegetal para a proteção das superfícies expostas à ação das águas pluviais, a regularização e redução do escoamento superficial e o aumento do tempo de absorção da água pelo subsolo, contribuindo no controle dos processos erosivos e de instabilização e evitando o carreamento de sedimento às linhas de drenagem;

4) Definição de estruturas físicas apropriadas a serem implantadas em locais e/ou situações específicas, ditadas pela interferência do traçado já definido com locais de ecodinâmica suscetível à alteração nos processos do meio físico, causada pelas intervenções necessárias à execução das obras ou por outros agentes.

Cumprindo observar que as finalidades dos elementos supracitados, particularmente o segundo e o terceiro, mutuamente se integram, em termos práticos, para o alcance dos objetivos da presente proposta, uma vez previstos:

1) O emprego de dispositivos de drenagem provisórios ou definitivos revestidos, em geral, de concreto, resistindo devidamente a volumes/vazões de escoamentos potencialmente erosivos canalizando as águas superficiais, desde os pontos de captação até os talvegues naturais, constituem-se em elementos preventivos no sentido de proteger as áreas objeto de recuperação ambiental dos fluxos mais concentrados (leito e entorno da voçoroca), levando à proteção do meio ambiente ao longo de toda área;

2) O revestimento vegetal (ação a ser destacada nos relatórios de visitas

técnicas e levantamento da situação local e prevista para recuperação de áreas degradadas), a ser executado sobre o solo devidamente reconformado, oferecerá a proteção e controle de caráter extensivo contra os processos erosivos (para os baixos volumes específicos e velocidades de escoamento das águas), favorecendo o encaminhamento das águas até os locais de captação dos dispositivos de drenagem a serem definidos em Programa específico de Engenharia (a ser elaborado e executado por empresa especializada na prestação de tal serviço).

4. DIAGNÓSTICO

4.1. Análise da área com processo erosivo

Por serem formas que exibem grande complexidade devido ao estabelecimento dos processos atuantes, é difícil a definição de parâmetros rígidos de diferenciação entre as feições lineares (sulcos, ravinas e voçorocas).

Considerando o enfoque deste diagnóstico, os procedimentos metodológicos estão embasados no levantamento bibliográfico e análise interpretativa dos conceitos, vistoria local em 04/01/2023, análise de dados (clima e solos existentes) e imagens da área de interesse. A partir dessa etapa, foi elaborado um texto expositivo com o intuito de agrupar as principais concepções sobre a erosão dos solos pelo processo de voçorocamento no local.

A área do presente caso de estudo está localizada na zona rural de São Carlos–SP, distrito de Água Vermelha, a qual é uma área de preservação permanente (APP), na sua montante há área cultivada com cana-de-açúcar em altitudes variando de 500 a 950 m do nível médio do mar.

O clima da região é do tipo Cwa (subtropical com inverno seco e verão quente/úmido), precipitação pluvial e temperatura média anual de 1.500 mm e 23 °C, respectivamente. A litologia local é representada principalmente pelas formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia (Grupo São Bento) e Cobertura da Serra de Santana e Similares (Grupo Taubaté) (Bistrichi et al., 1981).

4.2. Caracterização das voçorocas na APP

Há duas voçorocas identificadas que atingem uma APP, como apresentado na Figura 1. Segundo critérios compilados e apresentados por Pereira e Rodrigues (2022), a voçoroca 1 pode ser classificada com forma bulbiforme e a voçoroca 2 como linear.

Em relação ao formato da seção transversal a voçoroca 1 apresenta a forma de U (Pereira e Rodrigues, 2022), a qual é encontrada em regiões com solos e subsolos facilmente erodíveis; com paredes verticais; com ampliações laterais por erosão superficial e água subterrânea caracterizada pelo visível afloramento lençol freático (Figuras 1, 2 e 3). Quanto ao tipo da voçoroca, ela pode ser considerada conectada segundo critérios de Oliveira et al. (1989), pois ocorre na parte inferior da encosta. A voçoroca 1 também cumpre os requisitos do SÃO PAULO (1989) para ser efetivamente considerada uma voçoroca, na qual ocorre o *piping* (Figura 2). Cumpre ressaltar que é possível vislumbrar que a voçoroca 1 está sujeita a receber fluxos superficiais da estrada e da área cultivada com cana-de-açúcar a montante.



Figura 1. Imagem aérea das voçorocas 1 e 2 em área de APP.

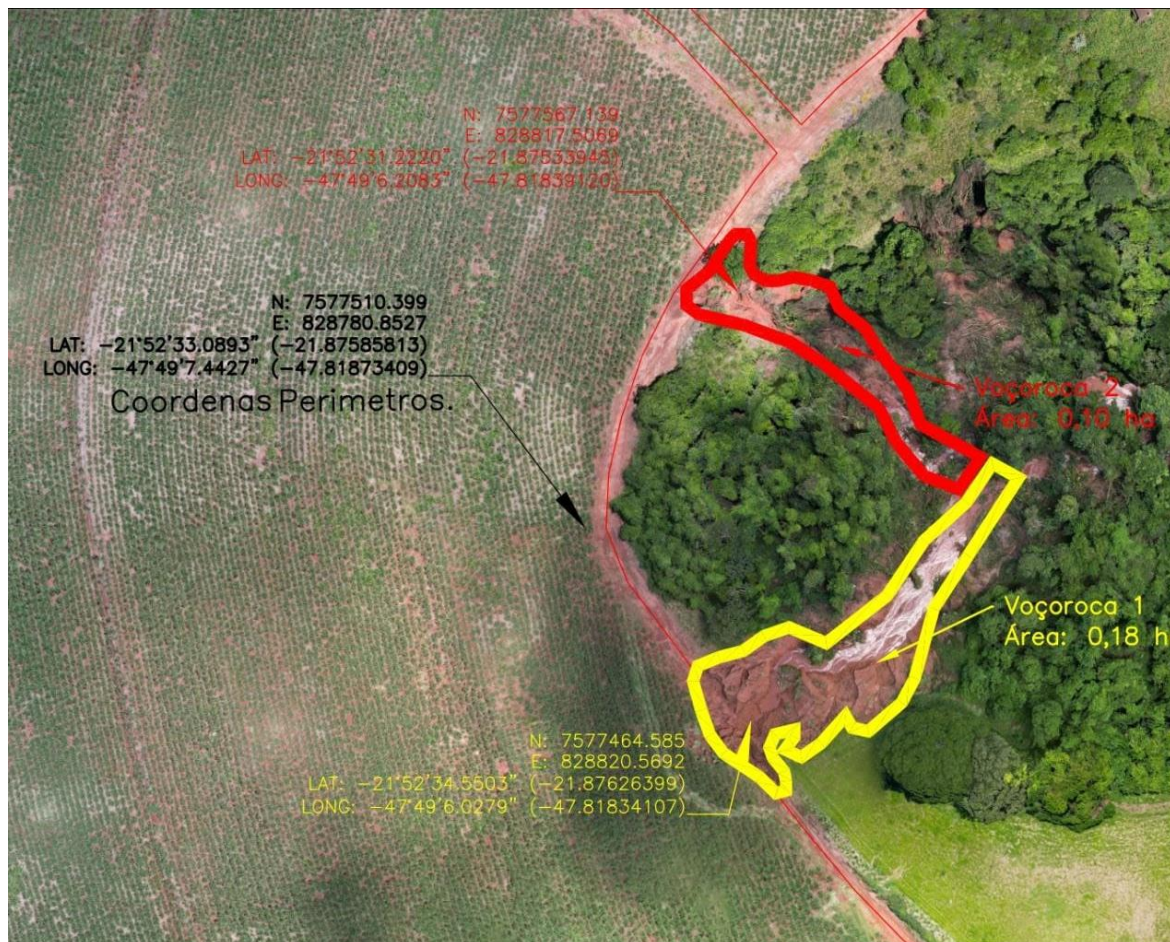


Figura 2. Coordenadas geográficas das voçorocas 1 e 2 em área de APP.

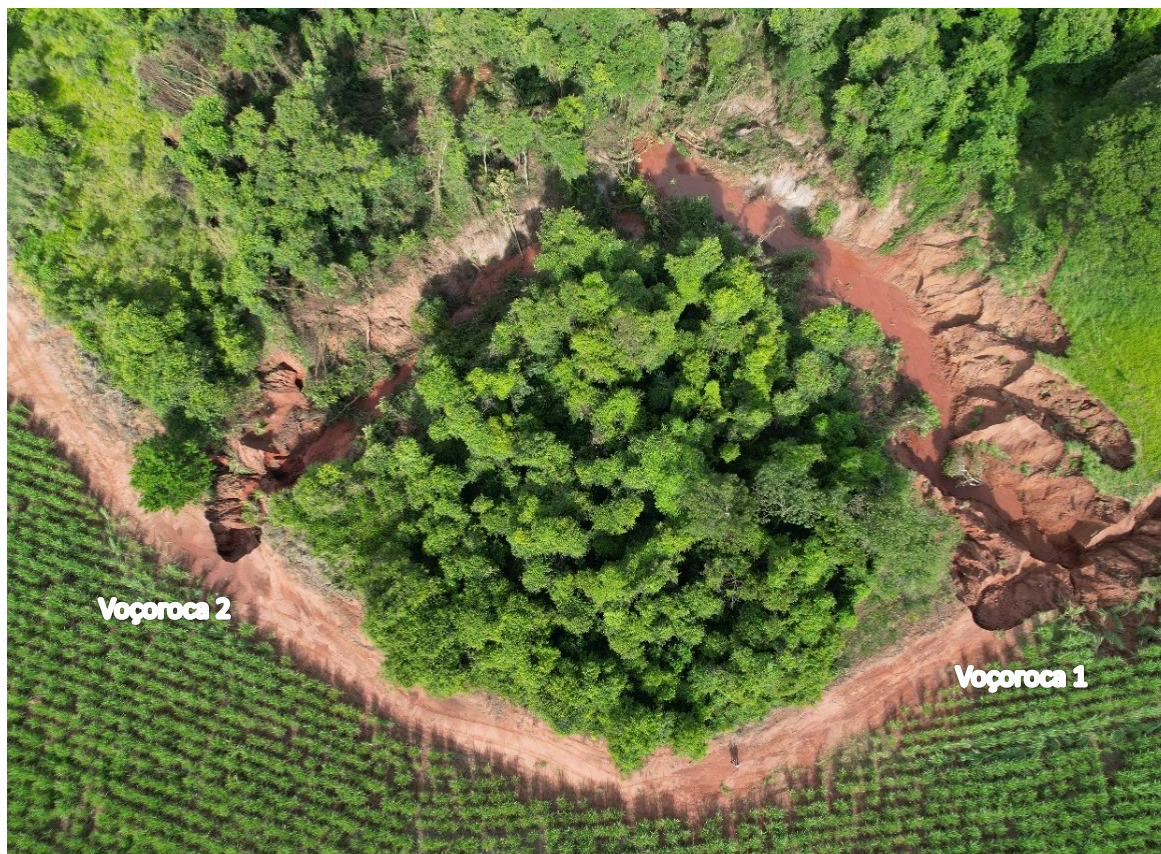


Figura 3. Vista aérea proximal das voçorocas 1 e 2.

Já a voçoroca 2 tem um formato em V, o qual é comum no início do processo erosivo (Pereira e Rodrigues, 2022). Ela apresenta, na sua posição inferior, no seu ponto de conexão com a voçoroca 1, pequeno fluxo de água. O formato em V faz alusão a solos nos quais o escoamento superficial concentrado opera predominantemente sob a ação da água em subsuperfície (Pereira e Rodrigues, 2022).

As condições climáticas na região de São Carlos, no final do mês de dezembro de 2022, também contribuíram com a formação e desenvolvimento das duas voçorocas em apreço. Na região de São Carlos, o Centro Nacional de Monitoramento de Alerta de Desastres Naturais (Cemaden) registrou no dia 28/12/2022 uma precipitação de 227 mm, enquanto a Defesa Civil do município registrou 241,2 mm.

Considerando-se as curvas de intensidade, duração e frequência (idf) para as precipitações pluviométricas em São Carlos e no distrito de Água Vermelha, obtidas com o Software Plúvio 2.1, temos:

$$i = 7680,487 T^{0,191} / (t + 44,042)^{1,077} \text{ (São Carlos)} \quad (1)$$

$$i = 2057,937 T^{0,139} / (t + 22,993)^{0,831} \text{ (Água Vermelha)} \quad (2)$$

em que, i = intensidade da chuva (mm h⁻¹); T período de retorno (anos); t = duração da chuva (min).

Calculando-se com as Equações 1 e 2, para um período de retorno de 10 anos, as alturas máximas previstas para chuva com duração de 24 horas em São Carlos e no distrito de Água Vermelha seriam de 110 mm e 159 mm, respectivamente (Tabela 1). Estas são as chuvas recomendadas para projetos de terraceamento agrícola nestes locais, as denominadas chuvas de projeto. Na área a montante da APP em apreço, há área cultivada com cana-de-açúcar com a presença de terraços (Figura 4). Diante do apresentado, quando a chuva local supera a chuva de projeto, é esperado ocorrer danos relativos a processos erosivos no local, pois a probabilidade de recorrência de um dado evento de precipitação foi igualada ou superada. As obras de engenharia, como os terraços agrícolas, são dimensionadas para a ocorrência de evento específico, normalmente com período de retorno (T) de 10 anos.

Deste modo, as chuvas do dia 28/12/2022 de 227 mm (Cemaden) e 241,2 mm (Defesa Civil) superaram as chuvas normalmente previstas para os projetos de terraceamento em São Carlos e no distrito de Água Vermelha. Elas em média foram 2,1 e 1,5 vezes maiores que as chuvas de projeto para São Carlos e Água Vermelha, respectivamente. Mesmo não tendo em vistoria de campo em 04/01/2023 sido constatada a ocorrência de rompimentos de

terraços nas áreas a montante da APP (Figura 4), o volume de enxurrada gerado na estrada e nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, a montante da APP (Figura 4), foi elevado e contribuiu associado a outros fatores de erosão para o desenvolvimento das voçorocas 1 e 2. Há uma tendência do fluxo de enxurrada se concentrar na área da APP (Figura 4), o que, associado às condições climáticas, solos, relevo, uso e manejo das áreas do entorno da APP, contribuiu para a formação das voçorocas 1 e 2.

Tabela 1. Aplicação das idf de São Carlos e distrito de Água Vermelha para período de retorno de 10 anos.

Local	T	K	a	b	c	t	i	P
	anos					min	mm h ⁻¹	mm
São Carlos	10	7680,487	0,191	44,042	1,077	1440	4,57869	110
Água Vermelha	10	2057,937	0,139	22,993	0,831	1440	6,6392	159

T = período de retorno (anos); K, a, b, c = constantes ajustadas para os locais; t = duração da chuva (min); i = intensidade da chuva (mm h⁻¹); P = altura precipitada (mm).

Na Figura 5 é possível observar que os solos predominantes na área de estudo são Latossolos.

Na região de São Carlos, os Latossolos ocorrem principalmente nas partes mais altas do relevo (815–835 m) e os Neossolos nas posições mais baixas (685–725 m); e os Argissolos nas intermediárias (Sousa Júnior e Demattê, 2008). As partes mais altas estão ocupadas com cana-de-açúcar, as quais contam com práticas de conservação do solo como o uso de terraços e cobertura pela cultura e palha na superfície do solo.

Nas posições da APP em análise, as altitudes enquadram-se nas áreas de Neossolos (Arenito) e nas posições do seu entorno ocorrem Latossolos (basalto). Como demonstrado no levantamento (Figura 5) há predomínio de Latossolos de textura média. Nas faixas limítrofes de declividade, pode ocorrer sobreposição de dois ou mais solos (Sousa e Demattê, 2008). Tal fato pode ocorrer na área da APP e haver a presença Neossolos, os quais não aparecem no levantamento apresentado na Figura 5. Isto pode ocorrer, pois os levantamentos de solos são na maioria antigos e pouco detalhados, geralmente nos níveis exploratório e de reconhecimento (Sousa Júnior e Demattê, 2008).

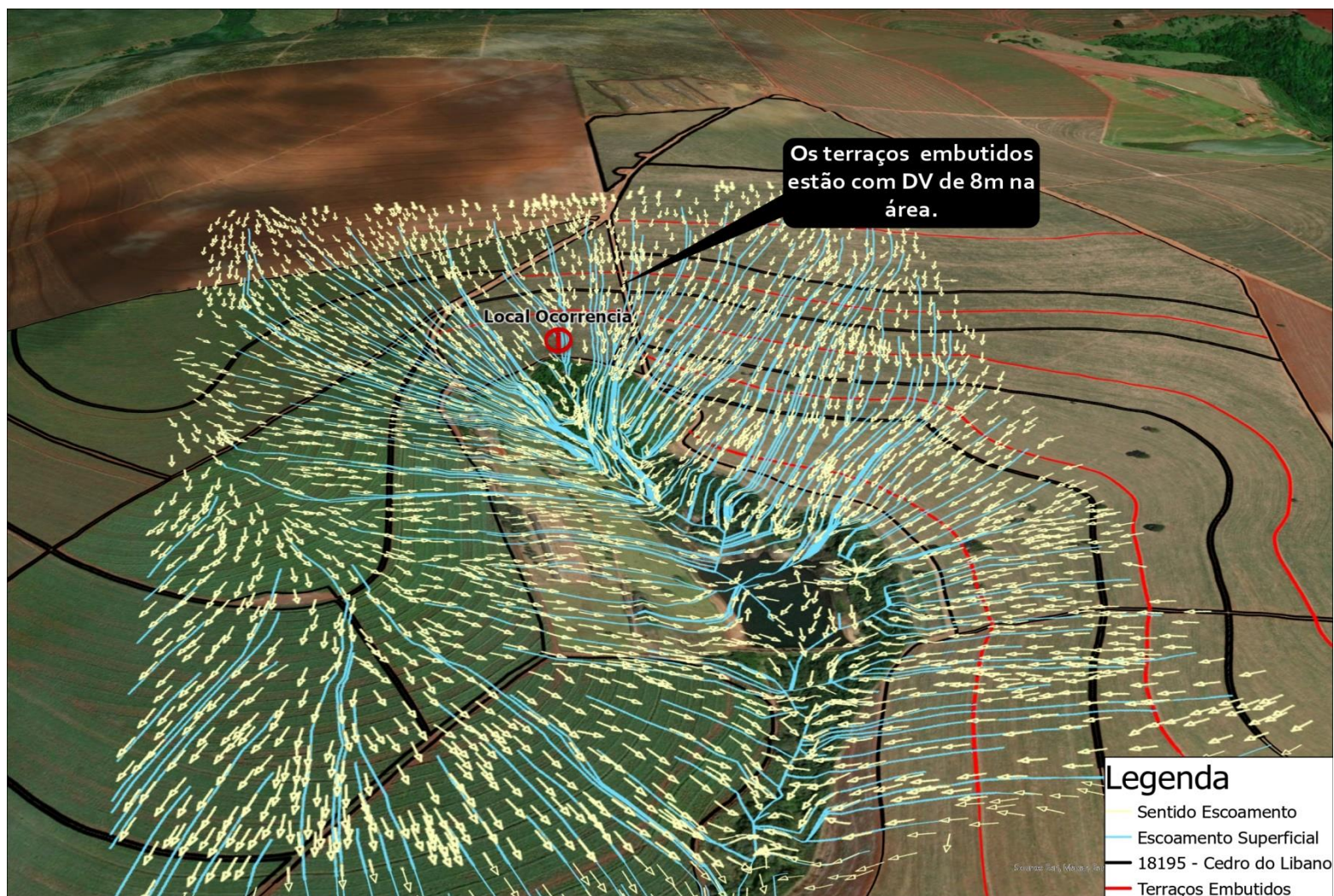


Figura 4. Sentido do escoamento superficial em função do relevo na área de estudo.

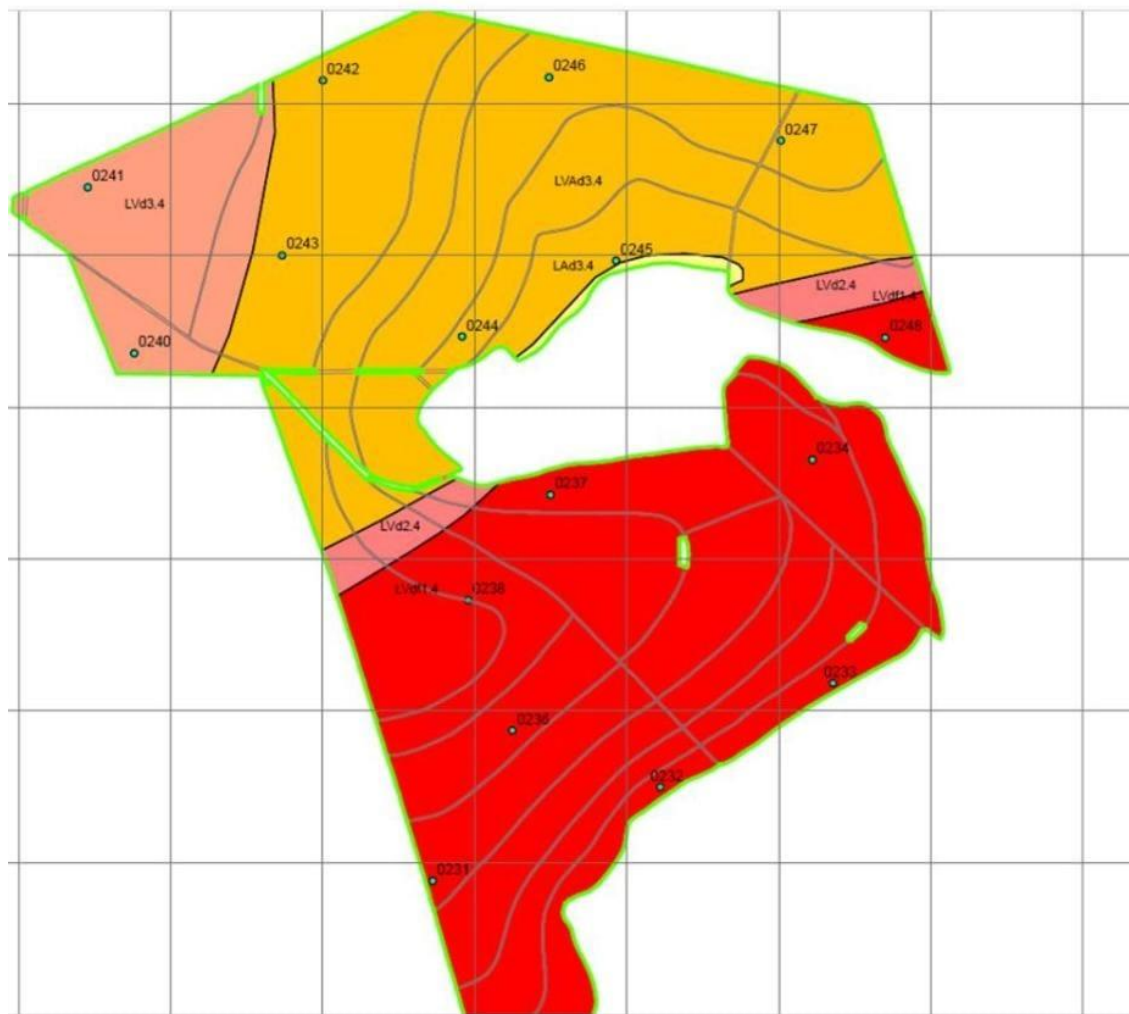


Figura 5. Distribuição de solos na área de estudo.

Os Neossolos são altamente susceptíveis à erosão devido à textura arenosa. Na área em questão, a APP está em posições mais baixas da topografia e numa depressão, uma ravina que estava estabilizada pela presença da vegetação de pequeno, médio e grande porte (Figura 3). Com o fluxo concentrado das enxurradas pelo grande volume atípico de chuva precipitado na região (São Carlos e Água Vermelha), esta ravina aprofundou-se, e atingiu o lençol freático e surgiu a voçoroca, seu aprofundamento diminuiu, e o lençol tornou-se seu nível de base (ficou aflorado, Voçoroca 1). Já a voçoroca 2, também devido ao solo de textura arenosa e altamente susceptível à erosão, com a ação de fluxos concentrados de enxurrada, devido às fortes chuvas em condições de saturação do solo em termos de umidade, evoluiu e se desenvolveu.

A dinâmica da erosão mudou devido à intervenção das exportações de matéria sólida pela saída do lençol na base das paredes das voçorocas (*piping*). Estas exportações desestabilizam as paredes que caem em grandes blocos provocados por escorregamentos rotacionais, favorecidos pelos altos gradientes hidráulicos nos taludes, pois o solo estava saturado devido ao grande volume precipitado. A voçoroca alarga-se e seu recuo, por erosão remontante, progride até que seu novo ponto de equilíbrio seja encontrado.

É necessário lembrar que a erosão interna ou *piping* se trata da formação de canais em forma de tubos que podem evoluir para grandes cavidades no subsolo. Esse fenômeno pode ser associado a antigos formigueiros, cujos vazios favorecem a infiltração da água e a erosão interna, ou ainda a fluxos de percolação com gradientes hidráulicos elevados, o que parece ser o caso na APP em apreço (fluxos de percolação), os quais atingiram área de Neossolos e Latossolos de textura média

que são bem permeáveis, mas com estruturação fraca (solos muito erodíveis em condições extremamente saturadas).

As Figuras 6 e 7 reforçam os danos ambientais decorrentes da presença de voçorocas na APP e a necessidade de controle dos processos erosivos envolvidos, os quais avançam também em direção às áreas de cultivo e de pastejo no entorno da APP. Na Figura 8, pode-se observar, na imagem do Google Earth, que a APP em julho/2021 não apresentava nenhuma feição erosiva aparente na forma de sulcos, ravinas ou voçorocas. Os pontos P1 e P2 (Figura 8) estão distantes entre si em 122 m nas cotas de 733 m e 725 m, nesta ordem, as quais correspondem na região com locais de ocorrência Neossolos, ou seja, posições mais baixas (685–725 m), segundo Sousa e Demattê (2008).

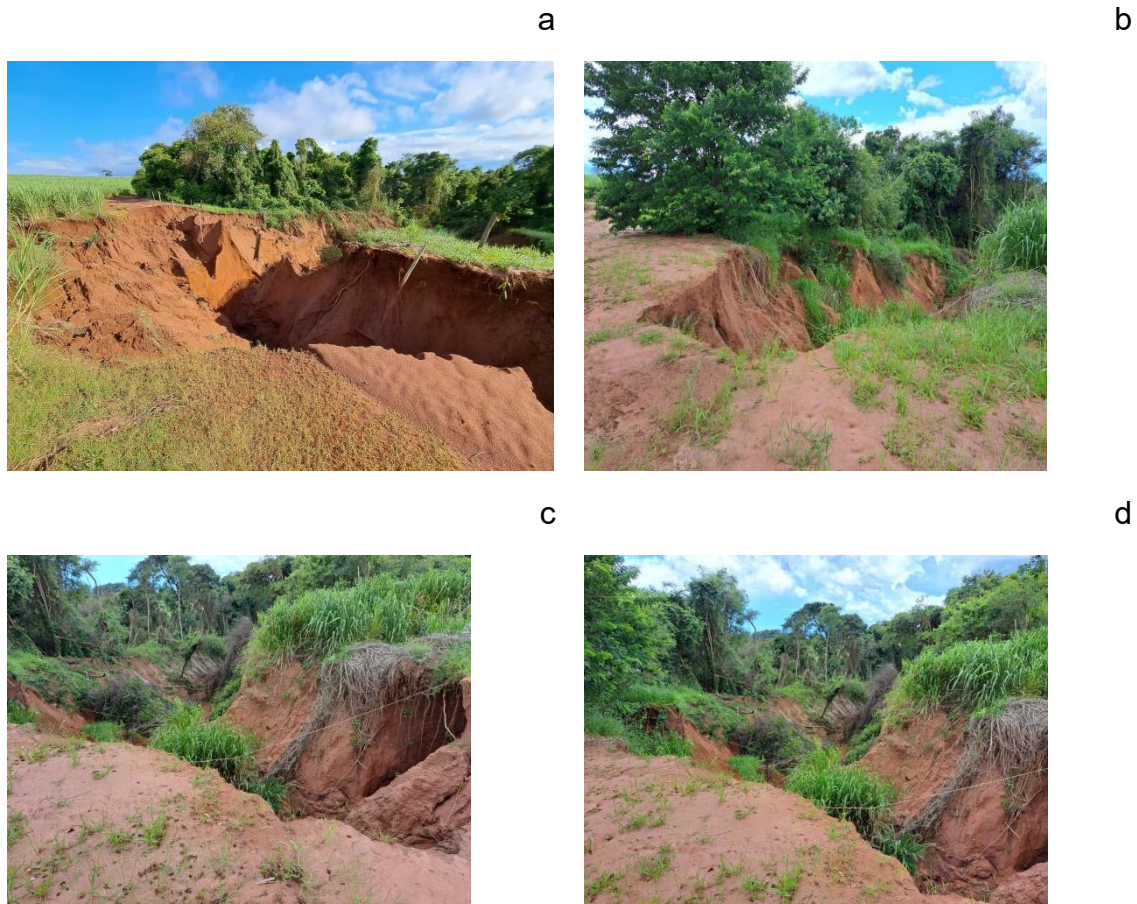


Figura 6. Imagens da voçoroca 1 na APP da área de estudo.

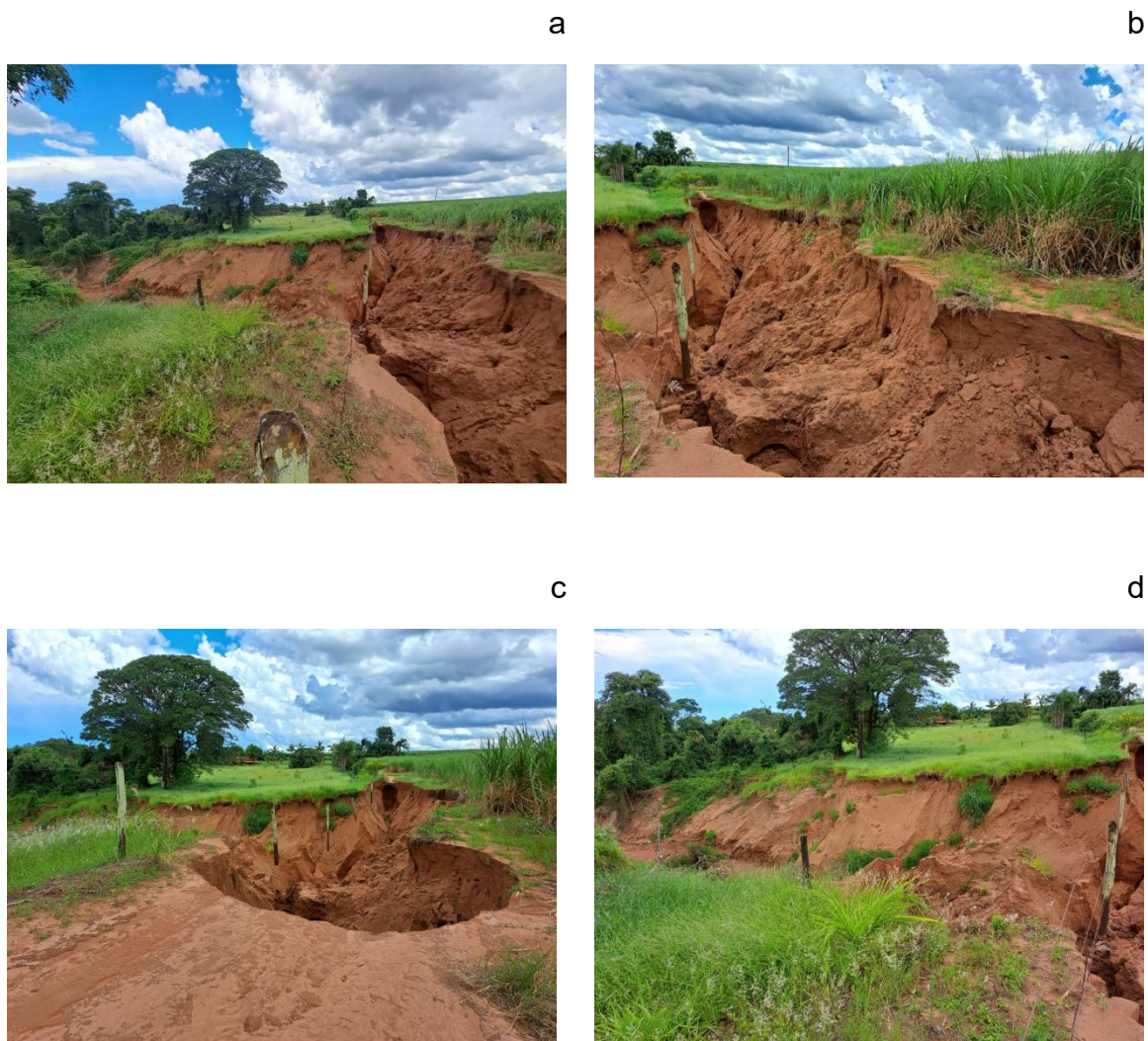


Figura 7. Imagens da voçoroca 2 na APP.

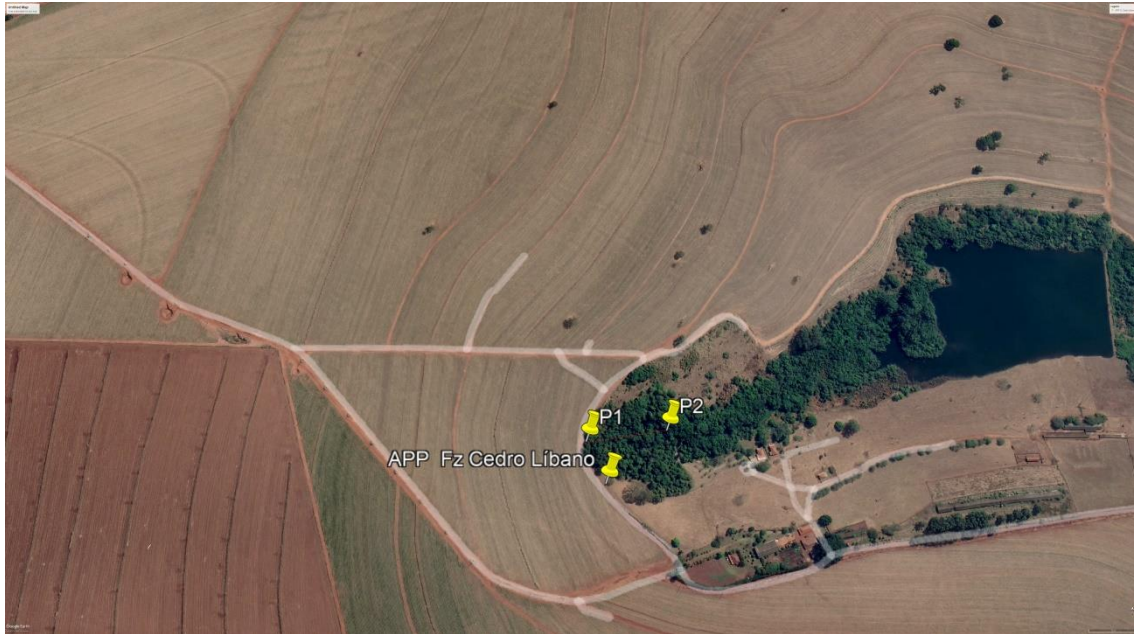


Figura 8. Imagem da APP em julho/2021. P1 = cota 733 m e P2 = cota 725 m.

Os problemas causados pelo processo de voçorocamento em determinadas áreas, como APPs e outras, podem ocasionar grandes prejuízos tanto no âmbito ambiental, social e econômico. Quando esse tipo de processo erosivo atinge áreas rurais e a área de preservação permanente (APP), muitas são as alternativas para intervenção na paisagem local, com o intuito de prevenção, contenção do avanço do processo erosivo e até mesmo na recuperação e/ou recomposição da área afetada. É conhecido que os atributos do solo interferem no surgimento e desenvolvimento das voçorocas, assim terrenos com características mais acidentadas, ou que sofreram algum tipo de atividade antrópica e até mesmo o clima da região podem interferir no surgimento e na evolução das voçorocas. Este é de fato o caso da área da APP em Água Vermelha. Em todo o território brasileiro, tem havido ocorrência de muitos processos de erosão de várias proporções, tamanhos, profundidade, dimensões e magnitudes, devido à ação de fatores naturais e por meios antrópicos, causando muitos prejuízos para o meio ambiente e a população.

No período do dia 28/12/2022 a 04/01/2023, os eventos de chuvas na região de São Carlos foram extremos, em especial em 28/12/2022, quando a chuva acumulada foi de 227 mm. Este valor de chuva acumulada corresponde a aproximadamente 87% da média estimada para todo o mês de dezembro na região de São Carlos. Isto contribuiu fortemente para o rápido desenvolvimento das voçorocas junto à APP em Água Vermelha. Em 04/03/2024, após vistoria na área de estudo, APP em Água Vermelha, constatou-se por observações de imagens no Google Earth a inexistência das voçorocas antes de 28/12/2022.

Deste modo justifica-se a necessidade de intervenção na área para recuperação e recomposição da APP, bem como do seu entorno (área agrícola e de pastejo), o que será objeto de um plano específico a ser elaborado, apresentado e registrado com as estratégias inerentes às feições erosivas caracterizadas e identificadas no local, descritas no presente trabalho, no sentido de reparar e recuperar o dano ambiental local, uma vez obtida a autorização de intervenção em APP pela CETESB.

5. ESTUDOS, PROPOSIÇÕES E PROGRAMAÇÕES

5.1 Procedimentos metodológicos para elaboração do programa

A linha metodológica a ser adotada na elaboração do programa de controle das voçorocas deve ter por base especificações consagradas pelo DNIT (2004, 2006, 2010, 2018, 2022) e VALEC (2024); que ordinariamente, e de uma forma geral, contemplam ou envolvem uma série de procedimentos específicos, abordados no item 5, o qual é todo referenciado nas publicações citadas.

5.1.1 Elementos caracterizadores da região

Os principais elementos caracterizadores regionais referem-se ao clima, relevo, solos e vegetação, os quais por suas particularidades podem se constituir nas causas geradoras mais frequentes de ocorrências de processos erosivos. Deste modo, são pertinentes as seguintes considerações:

1) A precipitação pluviométrica - Importante indicador do quadro climático, atua no sentido de favorecer maior ou menor da erosão, dependendo da sua distribuição mais ou menos regular, no tempo e no espaço, e sua intensidade. Chuvas torrenciais ou pancadas de chuvas intensas constituem a forma mais erosiva quanto ao impacto da água no solo. Durante estes eventos, a aceleração da erosão é máxima, agravando processos ativos de ravinamento e voçorocamento de maneira extremamente rápida, criando, muitas vezes, situações emergenciais;

2) Relevo – As características do relevo refletem-se na intensificação de processos erosivos. Erosões mais severas podem ser esperadas em relevos acidentados, como morros, do que em relevos suaves, como colinas amplas, pois declividades mais acentuadas favorecem a concentração e maiores velocidades de escoamento das águas superficiais, aumentando sua capacidade erosiva.

Associativamente, os serviços de terraplenagem nesses terrenos, com retirada ou acúmulo de materiais, modificando as condições topográficas, a geometria e o estado de tensões originais, seja pelo alívio de cargas ou carregamento, podem dar origem a processos do meio físico ao desestruturar solos e expor seus horizontes mais sensíveis, levando à erosão laminar mais intensa, sulcos, ravinas e, inclusive, voçorocas. Em terrenos inclinados, a modificação da geometria e da resistência mecânica do solo e da rocha potencializam a formação de processos de escorregamento ou quedas de blocos;

3) Solo – A natureza dos solos constitui um dos principais fatores indicativos da suscetibilidade dos terrenos à erosão. Quando resultantes de processos pretéritos de erosão, transporte, deposição e sedimentação em encostas, formam os talus ou colúvios, constituídos por composição e granulometria bastante heterogênea e a presença de materiais originários de matrizes argilosas e arenosas. Esses terrenos são altamente instáveis quando processadas alterações em sua geometria (cortes e aterros) e em seu sistema de infiltração e percolação de água. Quanto mais arenosa a textura do solo, menor o grau de coesão de suas partículas e maior o potencial de instalação e desenvolvimento de processos erosivos, comparativamente aos solos argilosos. Esses processos apresentam-se fundamentalmente associados a deficiências do sistema de drenagem e da proteção vegetal;

4) Vegetação – A cobertura vegetal exerce importante papel na estabilidade do solo, enquanto amortece o impacto da chuva, regulariza e reduz o escoamento superficial, a remoção e o transporte de partículas de solo e favorece a absorção da água pelo subsolo. As culturas agrícolas e pastagens oferecem relativa proteção superficial ao solo, embora, em áreas declivosas, essa proteção seja mais efetiva quando há sistemas radiculares profundos. O manejo inadequado do solo e também

as deficiências na drenagem de áreas agrícolas são causas frequentes da instalação de processos erosivos.

5.1.2 Locais potenciais e/ou suscetíveis a processos erosivos

Nesse tópico foram definidas as áreas de abrangência dos processos erosivos passíveis de ocorrência, as quais em parte foram levantadas nas visitas técnicas observando-se:

- 1) Os talwegues a montante do terreno ou com influência na área do corte;
- 2) Os blocos de rocha superficiais e suas condições de estabilidade (nessas circunstâncias os blocos devem ser removidos durante as operações de terraplenagem ou obras de contenção);
- 3) A existência de taludes em processo de instabilização, onde o movimento de massas possa alterar as contribuições dos talwegues para os taludes considerados;
- 4) A existência de sulcos de erosão em qualquer estágio de desenvolvimento;
- 5) O tipo de recobrimento vegetal e o mapeamento detalhado das diferentes espécies ocorrentes;
- 6) O mapeamento das áreas de ocorrência de afloramentos rochosos com os seus respectivos estágios de alteração, a tipologia da rocha e outras particularidades notáveis como fraturas, friabilidade etc;
- 7) As áreas mais elevadas com conformação de contrafortes definidores das bacias de captação de precipitações pluviométricas;
- 8) O zoneamento das ocorrências de horizontes de solos diferenciados como colúvios e, solos residuais;
- 9) O levantamento topográfico e geológico-geotécnico do talude,

identificando sua altura ou localização estratégica, onde os efeitos da erosão comprometam a integridade local. Os estudos deverão considerar os perfis topográficos obtidos ao longo de planos ortogonais ao talude até as linhas de cumeadas, mapeando os vários tipos de solos (residual, coluvial, sedimentar, depósito de tálus) e as anomalias geológicas como intrusões, diques, derrames basálticos, dobras, falhas, fraturamento, grau de alteração etc.

5.1.3 Medidas preventivas e/ou corretivas no controle e estabilização de erosões

Estas medidas têm por objetivo evitar a instalação de processos do meio físico ou reintegrar as áreas tratadas à paisagem original, com a atenuação ou eliminação de áreas propensas a processos erosivos e/ou de instabilização e se materializam através das soluções a serem definidas no Projeto de Engenharia Civil a ser executado por empresa especializada.

5.1.4 Elenco de condicionantes relacionadas com as obras

O estabelecimento de um elenco de condicionantes, dispendo sobre atividades direta ou indiretamente relacionadas com as obras, deve ser instituído por especificações complementares, a serem rigorosamente observadas durante a execução das obras, para atender à preservação ambiental em seus múltiplos aspectos. Disto, cabe destacar o seguinte:

- 1) Atender orientações relativas às instalações/construções das unidades de apoio;
- 2) A área de implantação dos canteiros de obras não poderá ser susceptível à instalação de processos erosivos;

3) A instalação do canteiro de obras deverá contemplar a implantação de um sistema de drenagem específico para cada local, de contenção de erosão específico e de estabilização, dentre outros;

4) As áreas selecionadas para a abertura de trilhas, caminhos de serviço e entradas de acesso não devem ser susceptíveis a processos erosivos;

5) As áreas de instalação de jazidas e caixas de empréstimo não podem ser susceptíveis a cheias e inundações, bem como as áreas de instalação de jazidas de materiais argilosos não devem apresentar lençol freático aflorante;

6) As áreas destinadas à implantação de usinas e britagem, à abertura de trilhas, caminhos de serviço e estradas de acesso, para instalação de jazidas e caixas de empréstimo e áreas terraplenadas e de bota-fora não podem estar sujeitas às instabilidades físicas passíveis de ocorrência em cotas superiores, como, por exemplo, escorregamentos de materiais instáveis;

7) Adotar os seguintes procedimentos quanto às atividades de cunho operacional. Respeitar a legislação de uso e ocupação do solo vigente no Estado e no município de São Carlos–SP;

8) Planejar previamente os serviços de terraplenagem. Os serviços de terraplenagem deverão ser objeto de planejamento prévio, para se evitar e/ou minimizar a exposição desnecessária dos solos à ação, principalmente, das águas superficiais;

9) Condicionar a abertura de novas frentes de obras à ocorrência de condições climáticas satisfatórias. O engenheiro responsável pela obra deverá ter acesso aos dados meteorológicos da região, evitando, sempre que possível, a abertura de novas frentes quando houver previsão de chuvas intensas num curto período. Deverá ser limitada ao máximo a abertura de novas frentes, sem que as já

abertas (terraplenagem do corpo estradal) tenham os elementos de proteção estabelecidos (drenagem, cobertura de proteção, bacias de sedimentação, etc.);

10) Adotar providências e implantar dispositivos que impeçam o carreamento de sedimentos para os corpos d'água. Estas providências/dispositivos, a serem implantados nos casos de desmatamentos e limpeza de terrenos próximos a corpos d'água, envolvem, por exemplo, o enleiramento do material removido, a construção de valetas para condução das águas superficiais, valetas paralelas ao corpo d'água, etc;

11) Executar medidas que objetivem evitar a evolução de erosões e ruturas remontantes, no caso de aterro em encostas. Estas medidas deverão incluir: a) Implantação de um sistema de drenagem para captação de surgências d'água, se necessário, antes de lançar qualquer material (colchão drenante); b) Conformação do pé de aterro em forma de dique, com material razoavelmente compactado e, quando próximo a cursos d'água, proteger o dique com enrocamento; c) Compactação do aterro, conforme definido no Projeto, em camadas, além da proteção e drenagem superficial;

12) Evitar o aparecimento e aceleração de processos erosivos, através de medidas preventivas. Tais medidas preventivas consistem, por exemplo, na revegetação de taludes expostos e com alta declividade, terraceamento, drenagem, amenização da declividade de taludes, manejo e compactação do solo etc;

13) Adotar sistema de drenagem específico temporário, nas áreas com operação de atividades de terraplenagem. Recomenda-se, para este fim, a construção de bacia de sedimentação (ou caixa de siltagem) – a qual se constitui em uma pequena e temporária estrutura de contenção formada por escavação e/ou dique, que intercepta e retém sedimentos carregados pelas águas superficiais,

evitando o assoreamento de cursos d'água, banhados, etc. Tais bacias deverão ser construídas, caso necessárias, próximas ao pé dos taludes dos aterros ou nas proximidades das saídas das descargas dos drenos das águas superficiais, de fontes de sedimentos de aterros, cortes e bota-foras, não devendo ser construídas no leito de cursos d'água.

5.2 Definição dos serviços a executar

Assim, com base na adoção do referido instrumental técnico e, observados os procedimentos descritos no item 5.1. serão definidos, em termos de modalidades, localizações, especificações e quantitativos, os vários serviços e elementos a executar com vistas ao controle da voçoroca e de instabilização de maciços e encostas, serviços que serão executados pelas empreiteiras das obras.

Os serviços, conforme reportados em 5.1.3, compreendem os ordinários de revestimento e proteção vegetal e de execução de dispositivos de drenagem e obras de arte correntes, bem como serviços específicos, em especial, para atender a problemas de instabilidade. Tais serviços serão, portanto, aqueles pertinentes e integrantes do Projeto de Engenharia, cuja elaboração e proposição serão atribuições da empresa contratada para a execução da obra.

É de se observar, outrossim, que soluções constantes no Projeto de Engenharia serão objeto de análise e revisão a partir do início das obras, oportunidade em que, no caso específico dos serviços de controle de processos erosivos e de instabilização de maciços e encostas, ante a verificação de insuficiências – inclusive decorrentes de acidentes eventualmente ocorridos posteriormente à elaboração dos Estudos e Projetos, poderá evidenciar-se a conveniência da adoção de alterações e complementações às soluções previstas no

Projeto de Engenharia.

5.3. Atividades/ações para implantação do programa

5.3.1 Atividades e/ou ações

As atividades concernentes à implantação do programa agregam a execução de medidas de caráter preventivo e corretivo e deverão observar durante a execução das obras, o disposto nas Especificações Complementares e Particulares a serem instituídas no Projeto de Engenharia e nos condicionamentos estabelecidos neste programa. Tais atividades, em função de suas naturezas e finalidades, são:

1) Atividades de caráter preventivo e corretivo destinadas a evitar o aparecimento e a evolução, durante o período de execução das obras, de processos erosivos. Essas ações destinam-se a produzir efeitos temporários, durante o próprio período de execução das obras, envolvendo a execução de dispositivos provisórios, bem como a observância, no que concerne à execução das obras, de um elenco de condicionantes, conforme exposto no item 5.1.4.;

2) Atividades de caráter preventivo e corretivo, destinadas a proteger a estrada e suas faixas lindeiras, ao longo de toda a sua vida útil, das ações erosivas das águas. Essas atividades, que envolvem um conjunto de medidas relativas à execução das soluções propostas para a prevenção de problemas decorrentes da instalação de processos erosivos, compreendendo a execução de dispositivos de drenagem, bem como à proteção da camada superficial do solo, por meio da execução de revestimento vegetal conforme estabelecido no Projeto de Engenharia abordas na sequência.

5.3.1.1 Atividades voltadas para execução da drenagem

No caso do projeto de drenagem superficial, são definidos dispositivos, para proteger a infraestrutura das construções (CCI) e viária (Avenida), assegurando a adequada drenagem das águas pluviais em todas as suas formas de ocorrência.

5.3.1.2 Atividades voltadas para a proteção superficial dos taludes

Tal proteção superficial, no Projeto de Engenharia é, em geral, tratada no tópico de Obras Complementares, sendo que por questões técnicas, econômicas e estéticas é ordinariamente adotado como o revestimento vegetal dos taludes de cortes e de aterros, com a utilização de enleivamento, hidrossemeadura e o plantio de arbustos.

Observação: Cabe esclarecer que a proteção vegetal dos canteiros de obras, dos caminhos de serviços e das demais unidades instaladas fora da faixa de domínio da voçoroca será contemplada no Programa de Recuperação de Áreas Degradadas (Projeto de paisagismo e recomposição florestal).

5.3.1.3 Atividades de caráter preventivo e corretivo destinadas a assegurar a estabilização de encostas e maciços

As medidas de caráter preventivo e corretivo, relativas à estabilização de encostas e maciços instáveis, estarão definidas no Projeto de Engenharia e envolverão, conforme o caso, os conjuntos de atividades descritos a seguir.

Dentro desta linha deverão ser contempladas, com maior frequência no Projeto de Engenharia – Tópicos de terraplanagem, de obras complementares e/ou de obras de contenção, e as seguintes soluções quando pertinentes: remoção dos solos moles; construção de bermas; construção de aterros Reforçados; Construção

de aterros estaqueados; construção de muro de peso; construção de muro gabião; construção de muro de terra armada.

Além do exposto, deverá haver a reintrodução de cobertura vegetal, envolvendo os estratos herbáceos e arbustivo-arbóreo; remoção de todo material escorregado e, quando possível, de rochas e matacões com potencial de escorregamento; retaludamento e conformação da superfície escorregada; construção de banquetas nos taludes; implantação de sistema de drenagem nas banquetas dos taludes.

5.4. Relação de quantitativos dos principais serviços a executar e particularidades vinculados com o programa

Os serviços a executar em atendimento a Proposta de Controle de Processo Erosivo em São Carlos – SP, distrito de Água Vermelha, serão apresentados no Projeto de Engenharia em termos quantitativos em itens como os descritos a seguir:

1) Quantidades dos serviços referentes a proteção vegetal e arborização em taludes de corte e aterro; 2) Quantidades dos Principais Dispositivos de Drenagem Superficial - Valeta (m); Sarjeta (m); Meio-fio (m); Descida D'água (m); Entrada/Saída D'água (m); Dissipadores de Energia (m); Bacia de Sedimentação ou Barreira de Siltagem (m); 3) Quantidades dos Dispositivos de Drenagem Profunda - Drenos Profundos em Cortes em Solo (m); Drenos Profundos em Cortes em Rocha (m); Bocas e Saídas de Drenos (und.); 4) Quantidades dos Dispositivos de Drenagem dos Talvegues (Obras de Arte Correntes) - Bueiros Simples Tubulares de Concreto (m); Bueiros Duplos/ Triplos; Tubulares de Concreto (m); Bueiros Simples Celulares de Concreto (m); 5) Quantidades referentes a execução de aterros sobre solos moles e soluções adotadas (predominantes) / Extensão (m), Volume de

aterro (m³) - Construção de Bermas; Construção de Aterros Reforçados; Construção de Aterros Estaqueados; 6) Quantidades Referentes a Execução de Obras de Contenção e, Soluções Adotadas (predominantes) / Extensão (m), Área (m²) - Muro de terra armada e muro gabião.

5.5. Articulação institucional

A implantação do Programa será conduzida sob a responsabilidade de um grupo gestor, para tanto, contará com a execução de obras de Engenharia por empreiteiras de obras, empresas de consultoria, com experiência na recuperação de áreas voçorocadas e nas atividades de supervisão de obras e de supervisão ambiental.

O acompanhamento físico da execução das obras deverá ser efetivado por parte dos Órgãos Locais (Estaduais e Prefeitura Municipal), assessorados em cada caso por consultorias que, no que se refere à supervisão, são, ordinariamente, as próprias firmas que elaboraram o Projeto de Engenharia. O monitoramento do Programa será desenvolvido por parte de empresa Consultora contratada para a Gestão Ambiental da implantação do empreendimento.

Todos os requisitos de licenciamento ambiental para a execução da obra junto a órgãos estaduais e municipais competentes ficarão a cargo das Empreiteiras contratadas/Contratante.

5.6. Monitoramento

O monitoramento será desenvolvido por empresa de consultoria encarregada da Gestão Ambiental, atividade esta que se constitui em objeto de um programa específico.

As atividades pertinentes ao Monitoramento tem por finalidade: 1) Verificação da adequada execução dos elementos/dispositivos constantes, como soluções, no Projeto de Engenharia e que atendem a vários Programas Ambientais; 2) Verificação da conformidade ambiental, no que respeita à observância dos condicionamentos instituídos e que interferem com os procedimentos relacionados com a programação de obras e os processos construtivos; 3) Em termos específicos, para atender a tais finalidades deverão ser, basicamente cumpridas com a análise de toda a documentação técnica do Empreendimento, em especial dos aspectos de interface do Projeto de Engenharia com o Programa de Proteção contra Processos Erosivos.

5.7. CRONOGRAMA

O Cronograma de Execução deverá guardar correspondência com o Cronograma de Execução das Obras de Restauração e Estabilização da Voçoroca, consoante a aprovação do Projeto de Engenharia. Os trabalhos de Controle de Processos Erosivos deverão ser iniciados e executados em todas as suas etapas. Com a execução de todos os serviços de cada frente de obra de implantação e estabilização da voçoroca, em que, conforme o Projeto de Engenharia, estará prevista a execução de dispositivos destinados ao controle da referida erosão.

O Monitoramento deverá se estender por quatro (04) anos após o término das obras, oportunidade em que deverá ser avaliada a necessidade de sua continuidade.

6. AVALIAÇÕES (Considerações Finais)

Como o projeto de estabilização das voçorocas está previsto para ser finalizado em quatro anos (2023 a 2026). Nesta seção serão avaliadas as principais estruturas iniciais executadas no primeiro ano do projeto (2023-2024), mais precisamente nos últimos seis meses.

6.1. Controle do escoamento superficial nas cabeceiras das voçorocas

Na área em estudo foram construídos terraços embutidos, sendo um em contorno próximo às voçorocas e o outro em contorno individual nas cabeceiras das voçorocas. O objetivo foi impedir a entrada de escoamento superficial nas cabeceiras das voçorocas e permitir a execução de outras obras mecânicas: 1) retaludamento dos taludes; 2) construção de patamares nas cavas das voçorocas com operações de corte e aterro.

O terraço embutido é construído de modo que o canal tenha uma forma triangular e o talude que o separa do camalhão fique praticamente na vertical. Ele apresenta boa estabilidade, pequena área utilizada, o qual é mais utilizado em solos muito arenosos e em declives acentuados. Ele é representado detalhadamente como mostra a Figura 9.



Figura 9. Terraço embutido e suas dimensões: S = área de armazenamento ($\text{m}^3 \text{m}^{-1}$); h = profundidade do canal (m); b = base do canal (m).

O primeiro terraço embutido em nível foi construído entre as cotas 585 e 590 (Tabela 2) e se estendeu por toda a área de contribuição para as cabeceiras das voçorocas.

Tabela 2. Dimensões projetadas para canal de terraço embutido em nível.

Período de retorno e chuvas				Dados da área				Dim prévias do canal			Dimensões Projetadas		
T	P	P	d%	A	EV	EH	Venx	h	b	Vcanal	Vproj	h	b
anos	mm	m	%	m ² m ⁻¹	m	m	m ³	m	m	m ³	m ³	m	m
10	159.3408	0.159	8.7	57.471	5	57.471	4.6	0.9	12	5.4	5.72	0.9	13
25	180.9842	0.181	8.7	57.471	5	57.471	5.2	0.9	12	5.4	6.50	0.9	14
50	199.2892	0.199	8.7	57.471	5	57.471	5.7	0.9	12	5.4	7.16	0.9	16
75	210.8436	0.211	8.7	57.471	5	57.471	6.1	0.9	12	5.4	7.57	0.9	17

Dim = dimensões; T = período de retorno (anos); P = precipitação ; d% = declividade média da área; A = área de contribuição por metro linear de canal; EV = espaçamento vertical entre terraços; EH = espaçamento horizontal entre terraços; Venx= volume de enxurrada na área de contribuição; h= altura do canal do terraço; b= base do canal do terraço; Vcanal = volume do canal do terraço; Vproj = 1,25 × Venx, que é o volume de enxurrada projetado com as dimensões finais h e b para construção do canal do terraço.

Já bem próximo às cabeceiras (áreas de carreador e margens das voçorocas), foi confeccionado outro em nível como indicado na Figura 10 (sem as pontas abertas). As dimensões dos canais são apresentadas na Tabela 3.



Figura 10. Terraço embutido complementar no entorno às voçorocas (linha azul).

Tabela 3. Dimensões projetadas para canal de terraço embutido em nível e complementares.

Período de retorno e chuvas				Dados da área				Dim prévias do canal				Dimensões Projetadas	
T	P	P	d%	A	EV	EH	Venx	h	b	Vcanal	Vproj	h	b
anos	mm	m	%	m ² m ⁻¹	m	m	m ³	m	m	m ³	m ³	m	m
10	159.3408	0.159	8.7	5.7471	.5	5.7471	0.5	0.9	12	5.4	0.57	0.9	1
25	180.9842	0.181	8.7	5.7471	.5	5.7471	0.5	0.9	12	5.4	0.65	0.9	1
50	199.2892	0.199	8.7	5.7471	.5	5.7471	0.6	0.9	12	5.4	0.72	0.9	2
75	210.8436	0.211	8.7	5.7471	.5	5.7471	0.6	0.9	12	5.4	0.76	0.9	2

Dim = dimensões; T = período de retorno (anos); P = precipitação ; d% = declividade média da área; A = área de contribuição por metro linear de canal; EV = espaçamento vertical entre terraços; EH = espaçamento horizontal entre terraços; Venx= volume de enxurrada na área de contribuição; h= altura do canal do terraço; b= base do canal do terraço; Vcanal = volume do canal do terraço; Vproj = 1,25 × Venx, que é o volume de enxurrada projetado com as dimensões finais h e b para construção do canal do terraço.



Figura 11. Vista de terraço construído no entorno das voçorocas. Foto: Martins Filho (2024).

O terraço 1 é definitivo e ficou estabelecido no entorno das voçorocas e APP (Figura 11). É possível observar área em reflorestamento como previsto em Projeto Ambiental registrado junto à CETESB para aumentar a área de APP.

Utilizou-se o software Pluvio 2.1 (Figura 12) com a localização do município Água Vermelha para a determinação da IDF (Equação 3), a qual leva em consideração a intensidade, duração e frequência da precipitação. Essa relação é muito importante para dimensionamento de diversas estruturas de drenagem pluvial ou de aproveitamento dos recursos hídricos.

$$i = \frac{kT^a}{(t+b)^c} \quad (3)$$

em que, i é a intensidade da chuva (mm/h), T é o período de retorno (anos), t é a duração da chuva (min), k , a , b e c são parâmetros locais.

No caso de Água Vermelha, os valores são: $K = 2057,937$; $a = 0,139$, $b = 22,993$ e $c = 0,831$ (Figura 12). Isto permitiu estabelecer P (mm) para os períodos de retorno de 10, 25, 50 e 75 anos. Os terraços foram construídos para um período de retorno de 75 anos.

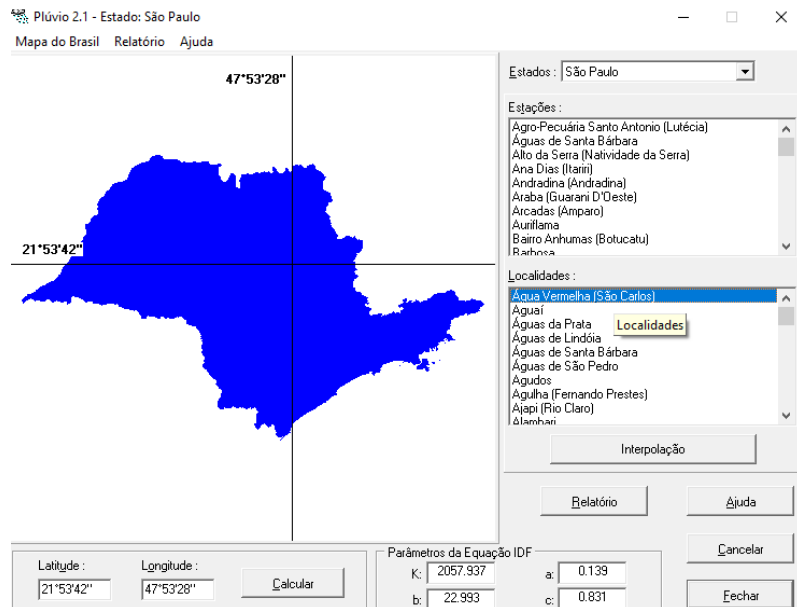


Figura 12. Tela do programa Plúvio 2.1 com os parâmetros da equação IDF para Água Vermelha (São Carlos – SP).

Os terraços construídos foram eficientes no controle do escoamento superficial e impediram parcialmente o progresso das voçorocas no período de chuvas. A evolução da voçoroca 1 foi maior devido ao fenômeno de erosão *piping*, devido à ação do lençol freático aflorado (Figuras 1 e 2).

6.2. Retaludamento e construção de terraços patamares

O retaludamento é uma obra de movimentação de terra, visando à diminuição da inclinação das encostas da voçoroca, de modo a aumentar a estabilidade dos taludes e evitar o avanço da erosão (Figura 13). Nesse sentido, com apoio de uma escavadeira hidráulica e trabalho manual, as encostas tiveram suas cristas

quebradas e retaludadas em uma declividade estável em um ângulo de $25,32^\circ$ (Figura 14), que é próxima da declividade de estabilização da encosta das voçorocas 1 e 2 com ângulo de talude natural igual a $26,6^\circ$ (Schwab et al., 1981)., em função das características dos solos locais.



Figura 13. Retaludamento e construção de terraços patamares. Fotos: Martins Filho (2024).

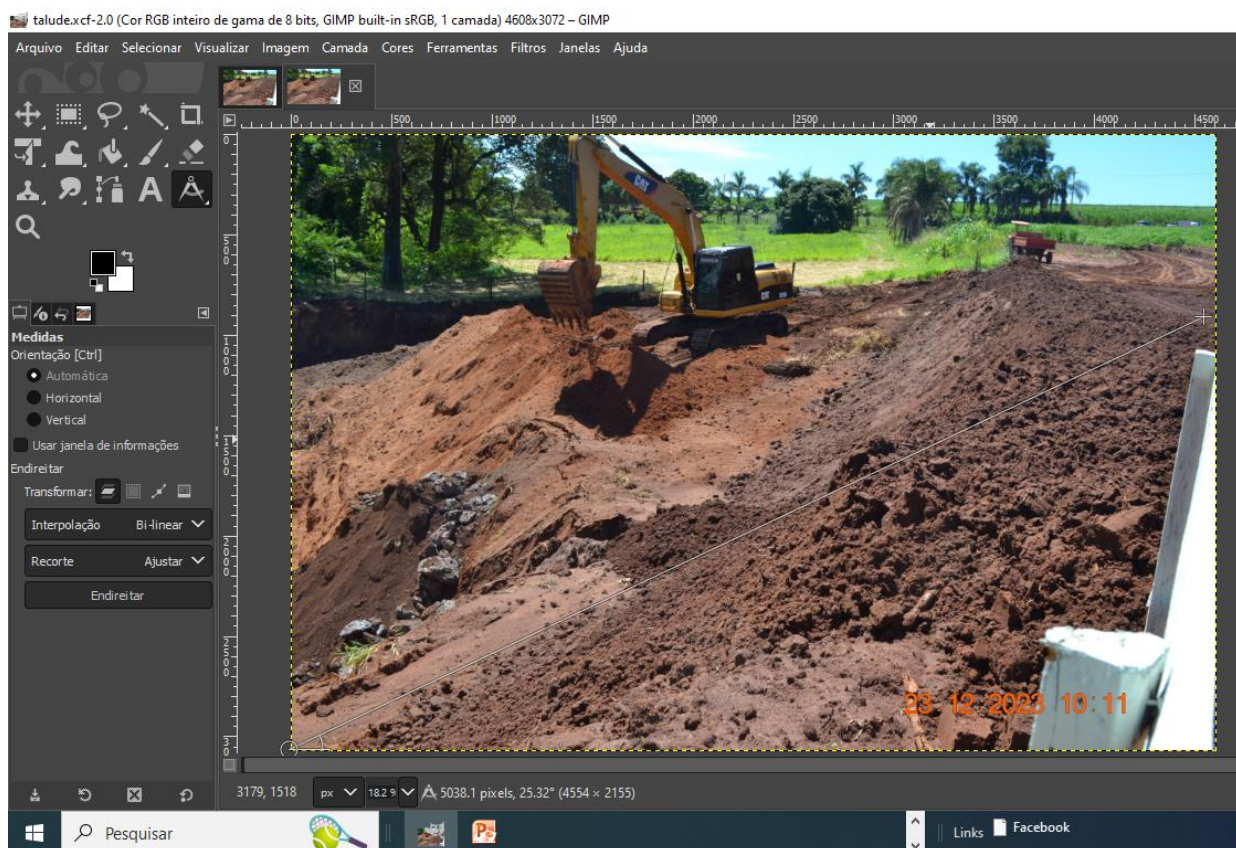


Figura 14. Imagem do ângulo de retaludamento voçoraca 1.

Devido à movimentação de máquinas e pessoas na área das obras de retaludamento e construção de terraços, tipos patamares, medidas de segurança foram adotadas: 1) definição de caminhos para pedestres e máquinas, locais de convivência e estacionamento de veículos (Figura 15).

Para a realização da obra foi necessário à obtenção de um Licenciamento Ambiental / CETESB: Serviço de intervenção em área de preservação permanente (APP), com data da emissão 13/03/2023 e data de validade 13/03/2026 (Figura 15e).



Figura 15. Imagens da área de segurança com sinalização e placas indicativas: a) corredores de acesso as obras e demais áreas; b) corredor de acesso as obras na voçoroca 2; c) área de convivência; d) entrada principal com placa de identificação; d) Estacionamento de veículos; e) Placa de Licenciamento Ambiental / CETESB. Fotos: Martins Filho (2024).

6.3. Drenagem das águas subsuperficiais

Na voçoroca 1 foi necessária a confecção de dreno enterrado, visando drenar as águas subsuperficiais para impedir o arraste do solo por erosão do tipo *piping*. Quando uma voçoroca atinge o lençol freático, os mecanismos de erosão se intensificam, em função do surgimento de um gradiente piezométrico que ao emergir no pé do talude apresenta força suficiente para deslocar partículas sólidas, o que pode originar o processo de erosão tubular regressiva: o entubamento ou *piping* (São Paulo, 1989). Há ainda, segundo São Paulo (1989), a liquefação do material arenoso pela lenta percolação da água junto à parede da voçoroca, ocorrendo uma diminuição da coesão do solo e consequente solapamento do talude.

O dreno com material sintético geotextil (Figura 16) foi construído pelo revestimento de uma vala com manta geotextil de preenchimento com material filtrante de enchimento e um segmento de tubo perfurado (Figura 17). Após o envolvimento total do material filtrante com a manta geotextil Bidim procedeu-se ao fechamento da vala com material impermeável (argila ou plástico) que funciona como selo (São Paulo, 1989).

a

b

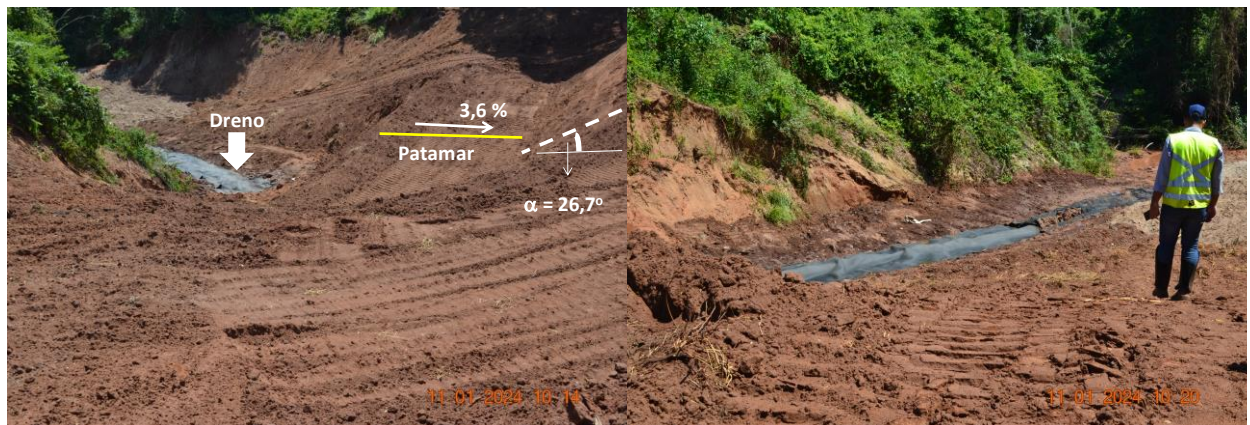


Figura 16. Vista da voçoroca 1 retalhada e com patamar: a) dreno e terraço tipo patamar; 2) dreno com material sintético geotêxtil. Fotos: Martins Filho (2024).

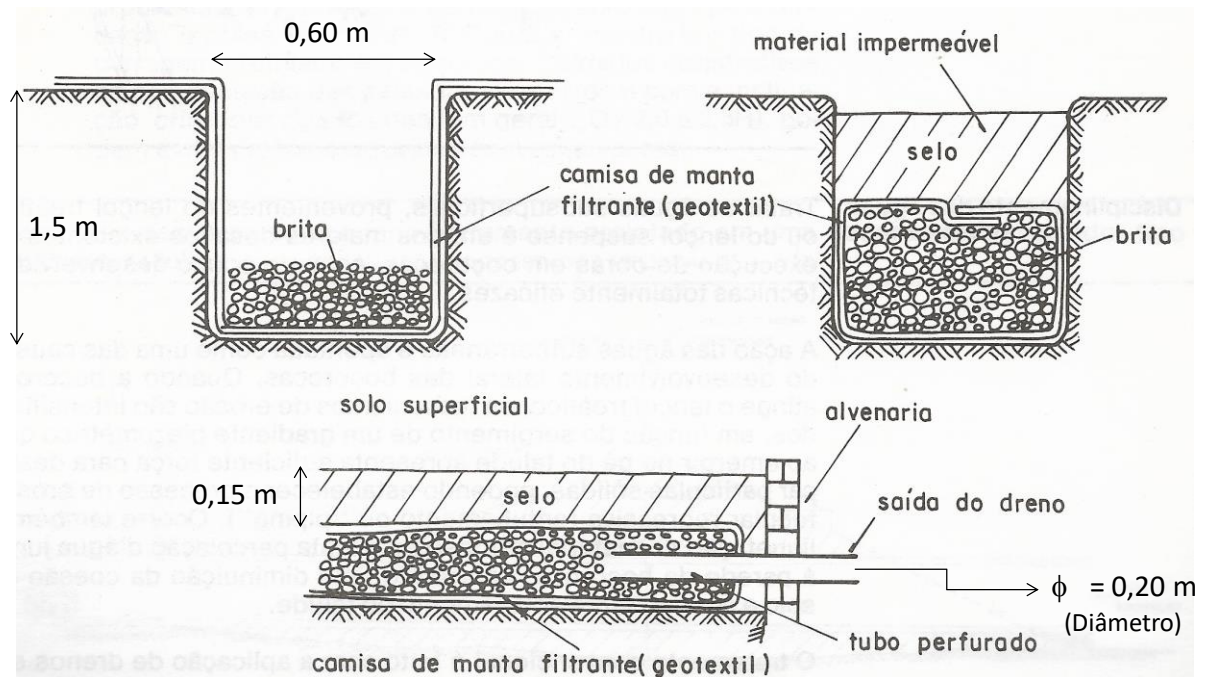


Figura 17. Dreno com material sintético geotêxtil (Adaptado: SÃO PAULO, 1989).

6.4. Revegetação da área

No patamar da área de contribuição na cabeceira da voçoroca¹ retalhada (Figura 18) foram aplicadas placas de grama-batatais (*Paspalum notatum*). O mesmo processo ocorreu na voçoroca 2. Nota-se nas Figuras 18c e 18d as boas revegetações dos patamares principais das voçorocas 1 e 2.

Nos demais taludes e patamares (terraços tipos patamares), aplicou-se um *mix* de sementes de crotalarias (*Crotalaria ochroleuca*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria juncea*), guandu forrageiro (*Cajanus cajan*), girassol (*Helianthus annuus*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), couve-marinha (*Crambe abyssinica*), trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum*). Esta operação foi realizada com a semeadura manual, visando à aplicação em taludes de corte, patamares e/ou áreas de reflorestamento, de modo a racionalizar o processo da recuperação e favorecer sua efetividade, com impacto positivo nos custos envolvidos, como relatado por Solera et al (2022).

É possível observar nas Figura 19 que a utilização do *mix*, comumente utilizado em áreas de produção de cana-de-açúcar, em solos de baixa fertilidade e com propriedades físicas degradadas, foi bem sucedida na área das voçorocas 1 e 2 num período de aproximadamente 06 meses (11/01/2024 a 26/06/2024).

Há um projeto em andamento para aumento da área de APP, a qual foi comprometida pelas voçorocas, o que resultou nesta proposta de possíveis passos na recuperação das erosões em voçorocas. É prevista e está em execução um aumento da área reflorestada acima das cabeceiras das voçorocas (Figura 20). A recomposição vegetal das áreas degradadas será executada com o enriquecimento florístico por meio da introdução de essências nativas, através do incentivo à regeneração natural, enriquecimento com mudas nas áreas de preservação

permanente. O enriquecimento florístico contemplará espécies arbóreas, arbustivas e frutíferas.



Figura 18. Processo de revegetação de taludes e patamares nas voçorocas 1 e 2: a e b) em 11/01/2024 e c e d) em 26/06/2024. Fotos: Martins Filho (2024).

a



b



Figura 19. Revegetação com mix de plantas: a) interior e taludes laterais da voçoroca 1; b) terraço patamar da voçoroca 2. Fotos: Martins Filho (2024).

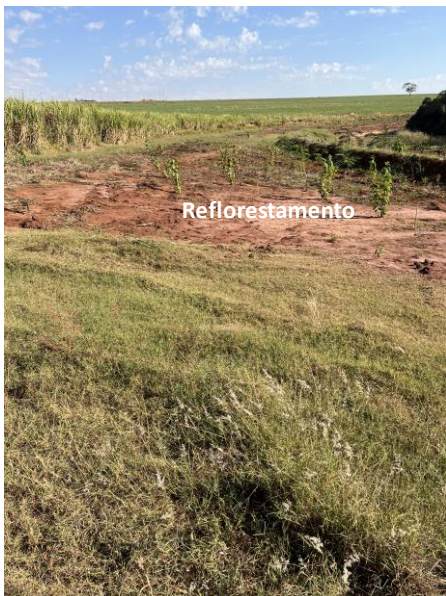


Figura 20. Reflorestamento acima das cabeceiras das voçorocas: a) voçoroca 1; b) voçoroca 2. Fotos: Martins Filho (2024).

6.5. Estruturas hidráulicas

As principais estruturas hidráulicas confeccionadas na área foram escadas hidráulicas para a dissipação de escoamento superficial no topo das voçorocas 1 e 2. No caso da voçoroca 1, a escada hidráulica de dissipação (escada hidráulica 1) foi construída paralelamente ao lençol freático do seu lado direito no sentido do seu fluxo (montante para jusante).

No caso da voçoroca 2, a escada hidráulica de dissipação (escada hidráulica 2) foi construída no interior da vala da voçoroca após as operações de retaludamento e confecção de patamares (Figura 21).

O desnível entre montante e jusante nas voçorocas 1 e 2 tem potencial para gerar erosão. Em função desta condição, foram construídas escadas dissipadoras de energia, ou seja, estruturas receptoras de escoamento superficial de forma que o desnível topográfico entre montante e jusante seja significativamente reduzido e a água tenha sua velocidade substancialmente diminuída. Com isso, o intuito foi reduzir fortemente o potencial da água em gerar erosão no solo da APP.

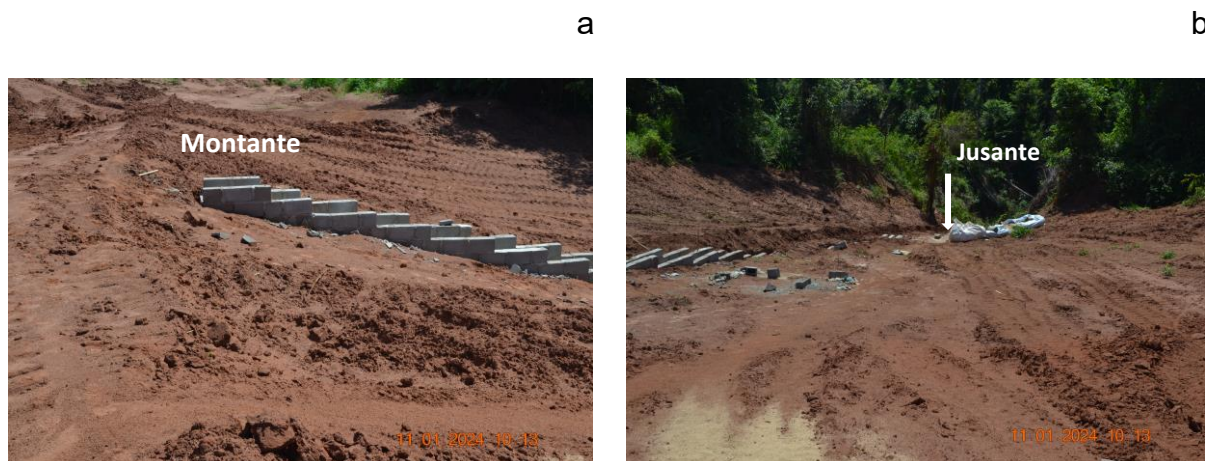


Figura 21. Escada hidráulica de dissipação na voçoroca 2: a) montante; b) jusante. Fotos: Martins Filho (2024).

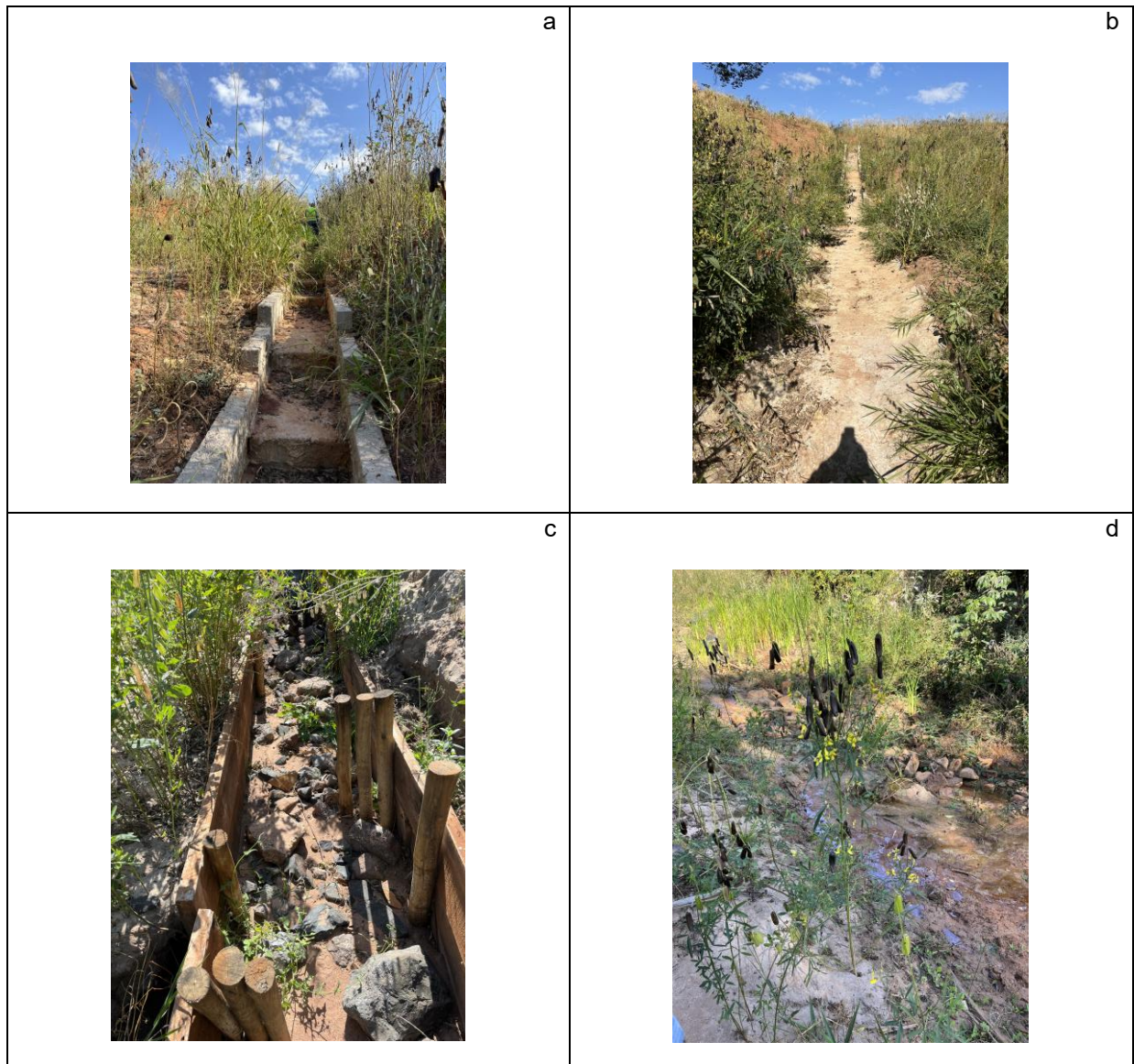


Figura 22. Estruturas hidráulicas voçoroca 1: a) escada 1; b) trecho de canal de escoamento concretado; c) trecho final de canal com estruturas dissipadoras; d) fundo da voçoroca 1. Fotos: Martins Filho (2024).

As estruturas hidráulicas (Figuras 22a, 22b e 22c) e a boa revegetação dos taludes e patamares da voçoroca 1 permitem admitir que elas estão colaborando de modo efetivo no processo de estabilização das voçorocas na APP.

Na Figura 22d é possível observar o fundo da voçoroca 1, na saída do dreno com geotextil, o qual se encontra em fase de revegetação com espécies do mix aplicado na área e por taboas (*Typha subulata*) na zona mais úmida. Também é possível observar o estágio de revegetação da voçoroca 2 (Figura 23). Estas

observações comprovam que as obras e estruturas implementadas na área (Figuras 22 e 24) estão colaborando para a estabilização das voçorocas 1 e 2.



Figura 23. Revegetação na voçoroca 2 em 26/06/2024. Foto: Martins Filho, 2024.

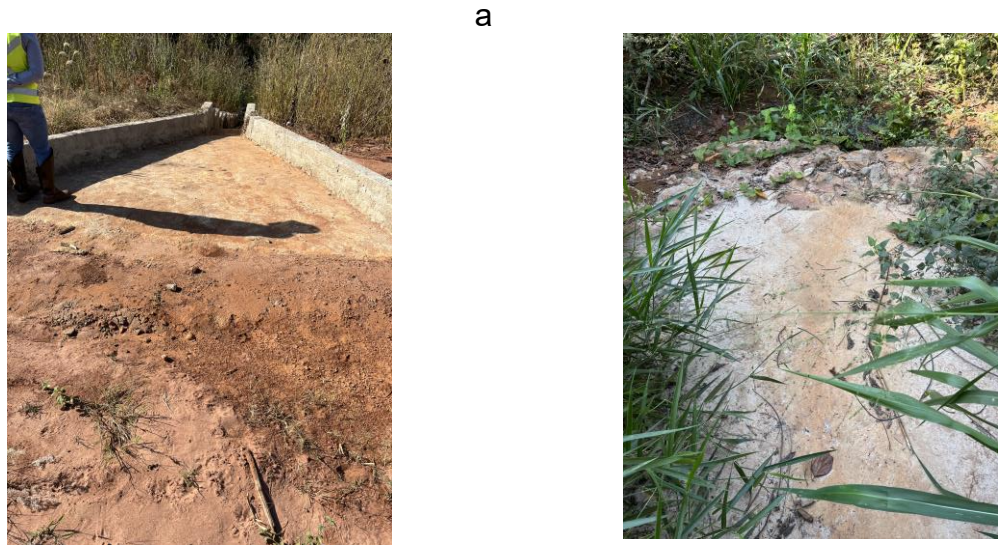


Figura 24. Voçoroca 2: a) canal de entrada de escoamento na escada 2; b) enrocamento no final da escada 2. Fotos: Martins Filho (2024).

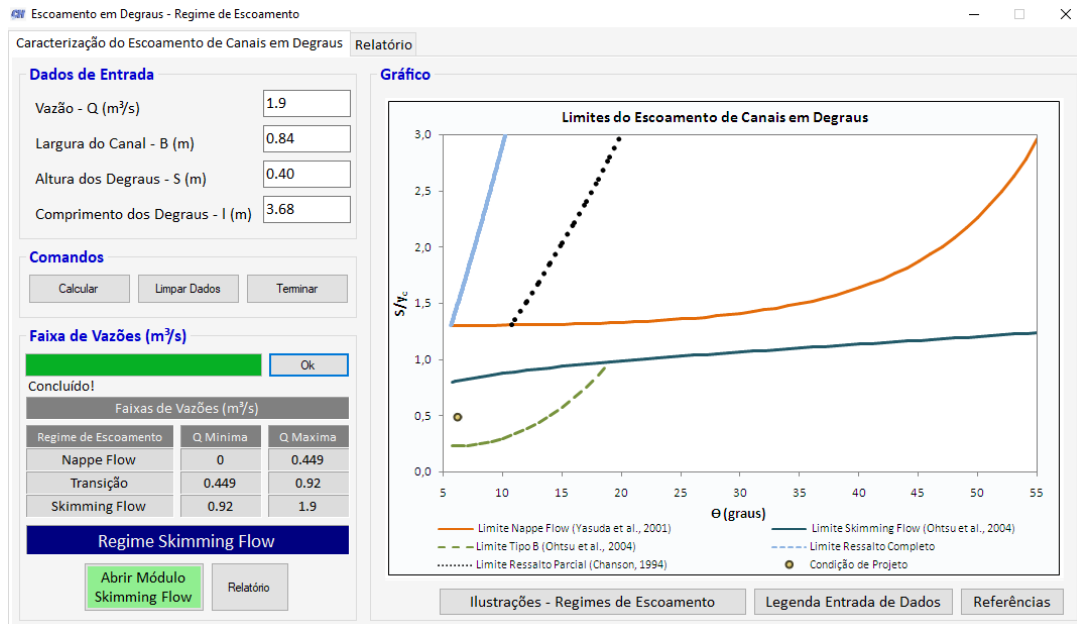
6.5.1 Avaliação dos dispositivos de dissipação em escadas hidráulicas

Esta etapa de avaliação dos dispositivos de dissipação em escadas hidráulicas foi realizada com a utilização do Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos - SisCCoH (UFMG, 2019).

Os escoamentos nas escadas hidráulicas 1 e 2 foram classificados como *Skimming flow* (Figura 25). Em descidas d'água em degraus, se desenvolvem dois tipos de escoamento, a depender da vazão de projeto, da geometria do canal e dos degraus, o *Skimming flow* e o *Nappe flow* (Brito et al. 2023).

No regime de escoamento *Nappe flow*, em que há ressaltos sucessivos, o fluxo de cada degrau atinge o degrau abaixo como um jato descendente, com a dissipação de energia ocorrendo pela quebra do jato no ar, com ou sem formação de ressalto hidráulico parcial no degrau (Figura 26a).

a



b

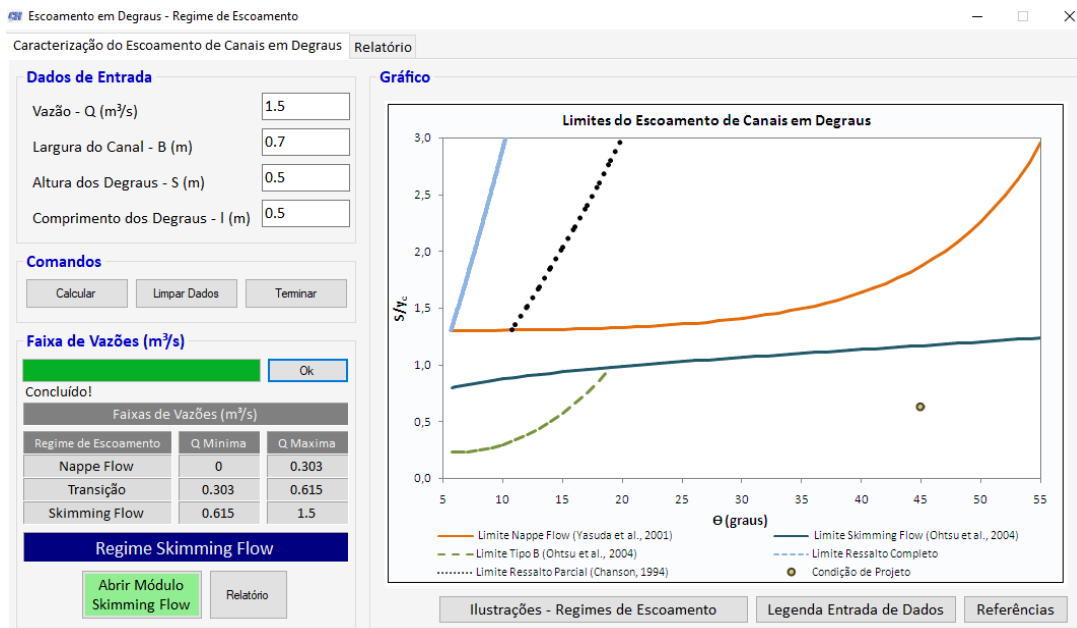


Figura 25. Escoamento em degraus em regime *Skimming flow* nas escadas hidráulicas: a) voçoroca 1; b) voçoroca 2.

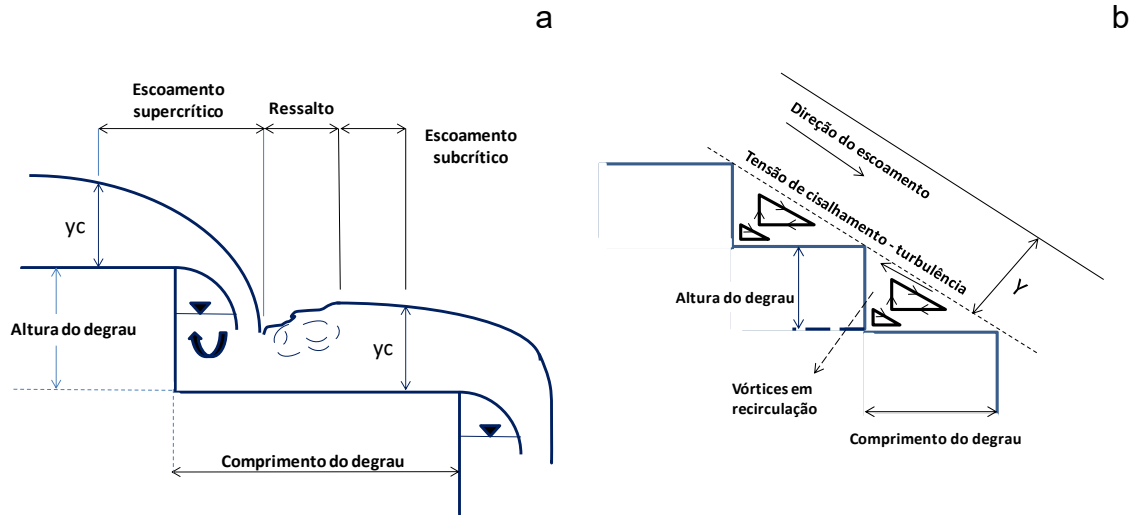


Figura 26. Regimes de escoamento: a) *Nappe flow* e b) *Skimming flow*.

No regime de escoamento *Skimming flow*, caracterizado por turbilhonamento deslizante (Figura 26a), a água desliza sobre os degraus e sua energia é amortecida pelo turbilhão recirculante preso entre os degraus (Brito et al, 2023). A dissipação de energia aumenta com a transferência de momento para o fluido recirculante no turbilhão (Rajaratnam, 1990).

É possível observar que no *Nappe flow* existe um vazio no degrau, enquanto no regime *Skimming flow* há um vórtice no lugar (Tomaz, 2011).

Na tabela 3 são apresentados os resultados da aplicação do Sistema para Cálculos de Componentes hidráulicos (SisCCoH) nas estruturas hidráulicas das voçorocas 1 e 2. Isto permitiu uma avaliação das escadas hidráulicas em termos de eficiência de dissipação de energia do escoamento.

Os resultados da Tabela 4 não foram analisados em sua totalidade neste estudo. As análises abordam apenas as energias (máxima, residual e dissipada), a velocidade final do escoamento e o risco de cavitação.

Tabela 4. Resultados do Sistema para Cálculos de Componentes hidráulicos (SisCCoH) nas estruturas hidráulicas das voçorocas 1 e 2.

Escada hidráulica 1		Escada hidráulica 2	
SisCCoH - Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos		SisCCoH - Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos	
Escoamento em Degraus - Regime Skimming Flow		Escoamento em Degraus - Regime Skimming Flow	
Dados de Entrada		Dados de Entrada	
Vazão (m³/s)	1.9	Vazão (m³/s)	1.5
Largura do Canal (m)	0.84	Largura do Canal (m)	0.7
Altura do Degrau (m)	0.5	Altura do Degrau (m)	0.5
Comprimento do Patamar do Degrau (m)	3.68	Comprimento do Patamar do Degrau (m)	0.5
Desnível do Trecho (m)	16.6	Desnível do Trecho (m)	11.6
Resultados		Resultados	
Escoamento aproximadamente uniforme - Tipo B		Escoamento não uniforme - Tipo A	
Ângulo com a Horizontal (graus)	7.737	Ângulo com a Horizontal (graus)	45
Vazão (m³/s.m)	2.262	Vazão (m³/s.m)	2.143
Profundidade Crítica (m)	0.805	Profundidade Crítica (m)	0.776
Concentração Média de Ar	0.296	Concentração Média de Ar	0.519
Coeficiente de Atrito	0.131		
Dados para dimensionamento		Dados para dimensionamento	
Profundidade Aerada do Escoamento (m)	0.566	Profundidade Aerada do Escoamento (m)	0.516
Velocidade do Escoamento Aerado (m/s)	3.994	Velocidade do Escoamento Aerado (m/s)	4.156
Profundidade Final do Escoamento (m)	0.398	Profundidade Final do Escoamento (m)	0.248
Velocidade Final do Escoamento (m/s)	5.677	Velocidade Final do Escoamento (m/s)	8.648
Energia Residual (m)	2.041	Energia Residual (m)	3.987
Altura de Referência da Parede (m)	0.793	Altura de Referência da Parede (m)	0.722
Cálculo do Ponto de Início do Escoamento Aerado		Cálculo do Ponto de Início do Escoamento Aerado	
Altura da rugosidade do degrau - k (m)	0.495	Altura da rugosidade do degrau - k (m)	0.354
Posição do Início da Aeração - LA (m)	14.098	Posição do Início da Aeração - LA (m)	8.773
Profundidade do Início da Aeração - Ya (m)	0.603	Profundidade do Início da Aeração - Ya (m)	0.322
Risco de Cativação		Risco de Cavitação	
Velocidade no Início da Aeração - Va (m/s)	3.75	Velocidade no Início da Aeração - Va (m/s)	6.65
Velocidade Crítica de Cavitação no Início da Aeração - Vcra (m/s)	17.771	Velocidade Crítica de Cavitação no Início da Aeração - Vcra (m/s)	17.771

A energia máxima do escoamento ($H_{\max}$) foi calculada para estabelecer, em relação à energia residual (H_r , Tabela 4), qual o valor da energia dissipada (H_{diss}).

$$H_{\max} = H_d + 1,5 \times Y_c \quad (2)$$

em que, H_d = desnível da queda, m; Y_c = profundidade crítica, m.

$$H_{\text{diss}} = H_{\max} - H_r \quad (3)$$

Do exposto, têm-se os resultados na Tabela 5, na qual há o registro da eficiência de dissipação de energia prevista nas escadas hidráulicas 1 e 2, em função dos dados de entrada (Tabela 4) no SisCCoH (UFMG, 2019).

Tabela 5. Resultados das energias e eficiência de dissipação nas escadas hidráulicas.

Componente	H _{max}	H _r	H _{diss}	EF
	m	m	m	%
Escada hidráulica 1	17.808	2.041	15.767	89
Escada hidráulica 2	12.764	3.987	8.777	69

em que, H_{max} = energia máxima; H_r = energia residual; H_{diss} = energia dissipada; EF = (H_{diss}/H_{max}) × 100, eficiência de dissipação.

Portanto, pelos resultados de EF é possível analisar que as escadas hidráulicas 1 e 2 têm efeito de dissipação do escoamento em degraus de 89% e 69%, respectivamente. Isto tem contribuído para a estabilização local avaliada num período de 06 meses (11/01/2024 a 26/06/2024).

Uma preocupação com relação às escadas hidráulicas 1 e 2 refere-se aos valores das velocidades finais do escoamento de 5,677 m s⁻¹ e 8,648 m s⁻¹, respectivamente (Tabela 4). Estes valores são superiores a velocidade máxima para escoamento em canais revestimento com concreto que é de 4,5 m s⁻¹. Logo, as estruturas hidráulicas poderão ser comprometidas devido à ação do escoamento.

A ação da água em movimento pode gerar um mecanismo de degradação, desgaste por erosão, que arrasta partículas sólidas em suspensão, como areia, cascalho, pedras e outros objetos, os quais colidem com a superfície do concreto, provocando o seu desgaste.

Neste sentido, é necessário planejar e executar outras estruturas complementares de dissipação do escoamento superficial.

A análise do risco de cavitação apontou para as duas escadas hidráulicas o não risco de cavitação (Figura 28). Ela ocorre em locais de água corrente e é uma

degradação da superfície do concreto, a qual é causada pela formação de bolhas com reduzida pressão de vapor que estouram em contato com pressão mais elevada quando a velocidade ou direção do escoamento sofre uma mudança abrupta, como num rebaixo brusco, causando erosões. A velocidade de aeração (v_a) é inferior à velocidade crítica de cavitação (v_{cra}) no início da aeração (Figura 28): escada hidráulica 1 ($v_a = 3,75 \text{ m s}^{-1}$ e $v_{cra} = 17,771 \text{ m s}^{-1}$); escada hidráulica 2 ($v_a = 6,65 \text{ m s}^{-1}$ e $v_{cra} = 17,771 \text{ m s}^{-1}$).

Conclui-se que o processo de recuperação das voçorocas da APP em Água Vermelha, distrito de São Carlos–SP, está em evolução positiva no período avaliado de aproximadamente seis meses (11/01/2024 a 26/06/2024).

Foram propostos métodos de mitigação da área de APP degradada como: terraceamento agrícola; retaludamento das voçorocas; revegetação de taludes e patamares com a aplicação de um mix de sementes de crotalarias, guandu forrageiro, girassol, nabo forrageiro, couve-marinha, trigo mourisco e grama batatais; plantio de mudas e cercamento do local.

Notou-se no período de avaliação que a reintrodução de espécies vegetais ajudará no processo de restaurar a biodiversidade e a qualidade ambiental a longo prazo. Portanto, esta proposta de recuperação da área degradada deve ser conduzida nas bases propostas, com os devidos cuidados necessários, seguida de uma manutenção do monitoramento da área e a reposição das mudas que não vingarem. No contexto da avaliação em seis meses, é possível afirmar que o processo de recuperação das voçorocas irá beneficiar o local e minimizar os impactos ambientais.

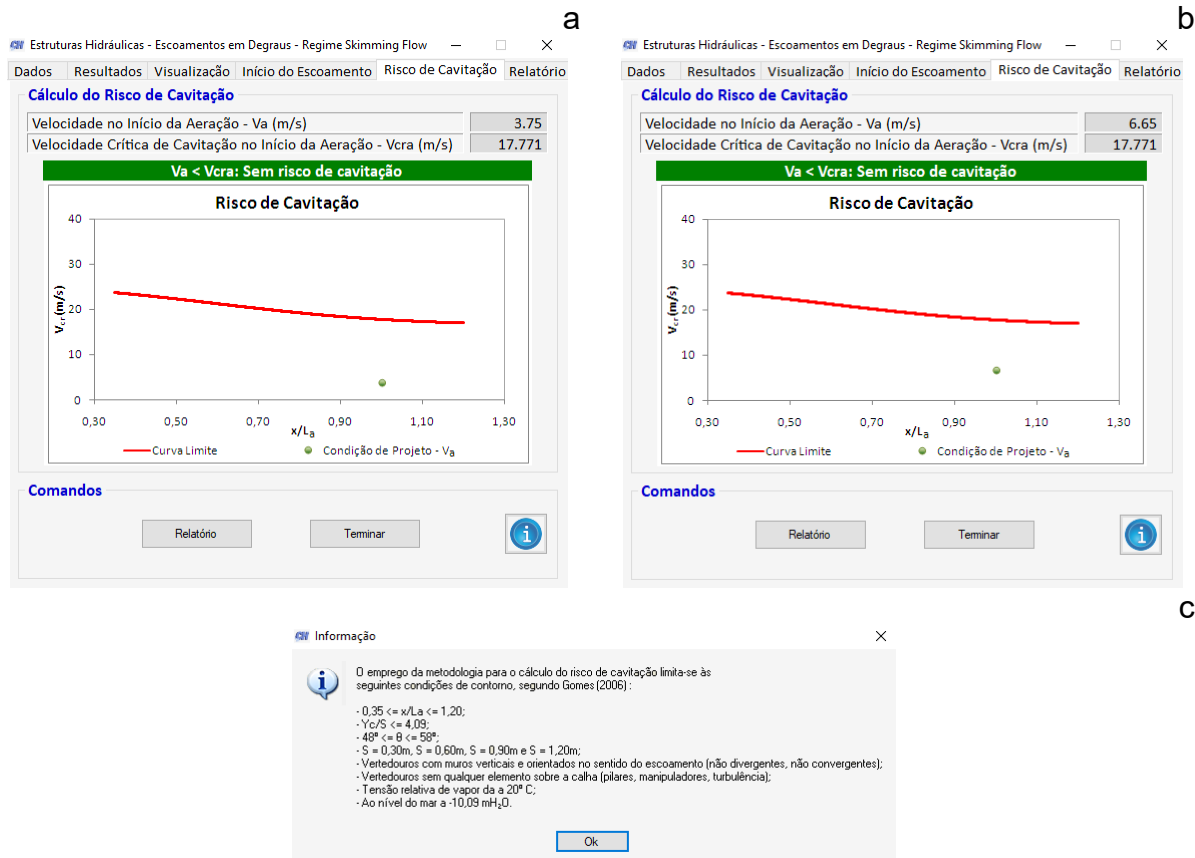


Figura 28. Risco de cavitação: a) voçoroca 1; b) voçoroca 2; c) informe cavitação.

7. LITERATURA CITADA

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 617–625, 2007.

BACELLAR, L. A. P. Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do rio Maracujá Ouro Preto, MG. 2000. 226 f. [Tese]. Rio de Janeiro : Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2000.

BACELLAR, L.; DE, A. **Processos de formação de voçorocas e medidas preventivas e corretivas**. Ouro Preto: UFOP, 2006.

BISTRICHI, C. A. et al. Brito et al. Análise das metodologias de dimensionamento e eficiência hidráulica de descidas d'água em degraus. **Revista ENINFRA**, v. 1, 1981.

CANTALICE, J. R. B. et al. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 597–607, 2005.

CARDOSO, R. S. B.; PIRES, L. V. **Voçorocas: processos de formação, prevenção e medidas corretivas**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/301552655_Vocorocasprocessos_de_formacao_prevencao_e_medidas_corretivas>. Acesso em: 09 jun. 2024.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.1, p.117-124, 2003.

CASTILLO C; GÓMES, J. A. A century of gully erosion research: urgency, complexity and study approaches. **Earth Sci Rev**, v. 160, p. 300–319, 2016.

CHAVES, R. S. Controle da erosão pelo plantio em curva de nível. FCAP, 1982. Disponível em: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/bitstream/123456789/471/1/INFORME%20EXTENS%c3%83O%20N%c2%ba%2001.pdf>.

Acesso em: 21 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Norma DNIT 021/2004-ES - Drenagem - Entradas e descidas d'água - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Publicação IPR 724: Manual de Drenagem de Rodovias. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Publicação IPR 742: Manual de implantação básica de rodovia. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Publicação IPR 736: Álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem. 5 ed. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Publicação IPR 736: Álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem – Emenda 1: Sarjetas, Valetas e Meiosfios. Brasília, DF: IPR, 2022.

DI STEFANO, C. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, south Italy. **Catena, Amsterdam**, v. 101, p. 226–234, 2013.

FILIZOLA, H. **Controle dos processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) em áreas de solos arenosos**. 2011. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/915009/1/Circular22.pdf>. Acesso: 9 jun. 2024.

FLEURY, J. Voçorocas: origem e métodos de contenção. **Boletim Goiano de Geografia**, n. 1, p. 2001–2214, 1983.

FOSTER, G. R. et al. **Hydrologic modeling of small watersheds**. Saint Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1982.

GOMES, M.A.F., FILIZOLA, H. F, BOULET, R. **Formação de voçorocas - Portal Embrapa**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meio-ambiente/manejo/reabilitacao-de-areas/formacao-de-vocorocas> 2021. Acesso em: 9 jun. 2024.

GÓMEZ CALERO, J. A. et al. **Best management practices for optimized use of soil and water in agriculture**. CSIC - Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/13964>. Acesso em: 21 jan. 2024.

GOULART, R. M. et al. Caracterização de sítios e comportamento de espécies florestais em processo de estabilização de voçorocas. **Cerne**, v.12, n. 1, p. 68-79, 2006.

GUERRA, A. J. T. et al. **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 340p.

GUGLIERI-CAPORAL, A. et al. Revegetação espontânea de voçoroca na região de Cerrado, Mato Grosso do Sul, Brasil. **Hoehnea**, v. 38, n. 2, p. 289–306, 2011.

HENRIQUES, R. P. B. O futuro ameaçado do cerrado brasileiro. **Ciência Hoje**, v.33, n.195, p.34-39, 2003.

MARTINS FILHO, M. V. Modelagem do processo de erosão entressulcos em latossolos de Jaboticabal SP 140 f. Tese. (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

OLDEMAN, L. R. et al. World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note. International Soil Reference and Information Centre, 1990.

OLIVEIRA, F. P. DE et al. Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 16, n. 4, p. 337–346, 2012.

PEREIRA, J. S.; RODRIGUES, S. C. **18. EROSÃO POR VOÇOROCAS: ESTADO DA ARTE.** Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/livro/Cap18_Pereira%20&%20Rodrigues_503-529%20v2.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2024.

RAJARATNAM, N. Skimming flow in stepped spillways. **Journal of hydraulic engineering**, v. 116, n. 4, p. 587–591, 1990.

RESENDE, A. S. de.; MACEDO, M. O.; CAMPELLO, E. F. C.; FRANCO, A. A. **Recuperação de áreas degradadas através da reengenharia ecológica.** In: GARAY, I.; BECKER, B. K (Orgs). Dimensões humanas da biodiversidade: o desafio de novas relações sociedade-natureza no século XXI. Petrópolis: Editora Vozes, 2006. p. 315-340.

RIBEIRO, C. A. A. S. et al. O desafio da delimitação de áreas de preservação permanente. **Revista Árvore**, v. 29, n.2, p. 203-212, 2005.

SAMPAIO, L. D. F. et al. Gully erosion, land uses, water and soil dynamics: a case study of Nazareno (Minas Gerais, Brazil). **Dyna**, v. 83, n. 199, p. 198, 2016.

SÃO PAULO, SECRETARIA DE ENERGIA E SANEAMENTO. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Controle de erosão: bases conceituais e técnicas ; diretrizes para o planejamento urbano e regional, orientações para o controle do boçorocas urbanas.** São Paulo: DAEE/IPT, 1989. 92 p.

SCHWAB, G.O.; FREVERT, R.K.; EDMISTER, T.W. & BARNES, K.K. Soil and water conservation engineering. 3.ed. New York, John Wiley & Sons, 1981. 683p.

SKORUPA, L. A. (2003). **Áreas de preservação permanente e desenvolvimento sustentável.** Jaguariúna – SP: Embrapa Meio Ambiente. Disponível em:

<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Skorupa_areasIDGFiPs3p4lp.pdf>. Acesso em: 13.jun.2014.

SOARES, V. P. et al. Avaliação das áreas de uso indevido da terra em uma microbacia no município de Viçosa - MG, através de fotografias aéreas e sistemas de informação geográfica. **Revista Árvore**, v.26, n.2, p.243-251, 2002.

SOLERA, M. L. et al. Seleção de espécies vegetais para pelotização de sementes com aplicabilidade na recuperação de áreas degradadas pela mineração. **REVISTA IPT TECNOLOGIA E INOVAÇÃO**, v. 6, n. 19, 2022.

SOUSA JUNIOR, J.G.; DEMATTÊ, J.A.M. Modelo digital de elevação na caracterização de solos desenvolvidos de basalto e material arenítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.1, p.449-456, 2008.

TEIXEIRA, N.; CAMPOS; DE CARVALHO GUIMARÃES, C. Métodos de contenção e estabilização de processos erosivos avançados e voçorocas no Brasil. **Saberes Interdisciplinares**, p. 73–92, 2012.

TOMAZ, P. **Escada hidráulica em obra de pequeno porte**. Guarulhos, SP: Plínio Tomaz Engenharia, 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG. Sistema para Cálculo de Componentes Hidráulicos - SISCCOH. Baptista, M. B.; Coelho M. M. L. P.; Alexandre, G. R.; Barcelos, J. M. (desenvolvedores). Belo Horizonte, MG: Pimenta d'Ávila & UFMG; 2019.

VALEC. Subprograma recuperação de áreas degradadas. 2024. Disponível em<<https://portal.valec.gov.br/download/extsul/subprogramarecuperacaoareasdegradadas.pdf>>. Acesso em: jun. 2024.