



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**BIOENGENHARIA NA RECUPERAÇÃO DAS MARGENS DO
ARROIO FORQUETINHA/RS**

Nara Paula Schmeier

Lajeado, 29 de novembro de 2012.

Nara Paula Schmeier

**BIOENGENHARIA NA RECUPERAÇÃO DAS MARGENS DO
ARROIO FORQUETINHA/RS**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, na linha de formação específica em Engenharia Ambiental, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Ms. Rafael Rodrigo Eckhardt

Lajeado, 29 de novembro de 2012.

Nara Paula Schmeier

**BIOENGENHARIA NA RECUPERAÇÃO DAS MARGENS DO
ARROIO FORQUETINHA/RS**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Ambiental, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Ambiental, na área de Meio Ambiente:

Prof. Ms. Rafael Rodrigo Eckhardt – Orientador
UNIVATES

Prof. Ms. Everaldo Rigelo Ferreira
UNIVATES

Prof. Ms. Emerson Luís Musskopf
Secretaria do Meio Ambiente de Estrela

Lajeado, 29 de novembro de 2012.

Dedico este trabalho à minha mãe Nair, meu exemplo de força e humildade, por todo o amor e dedicação para comigo, por ter sido a peça fundamental para que eu tenha me tornado a pessoa que hoje sou.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Dario Schmeier e Nair Gisch Schmeier, pelos ensinamentos e exemplo que são na minha vida;

Aos meus tios, Ademar e Haide Schaeffer, pelo carinho e ajuda que sempre proporcionaram e por me tratarem como filha;

Ao Gastão Pilger e a Leila Sibebe Pilger Glufke, que foram os responsáveis pelo meu ingresso na graduação, meu eterno agradecimento;

Ao meu namorado Éder Cristiano Feil, pelo amor, companheirismo, compreensão, paciência e amizade dispensada ao longo desses anos;

Aos amigos que fiz durante o curso, pela amizade construída e por todos os momentos que passamos meu especial agradecimento. Sem vocês essa trajetória não teria sido tão prazerosa;

A todos os professores da graduação, pela dedicação e ensinamentos disponibilizados nas aulas, cada um de forma especial contribuiu para a conclusão deste trabalho e conseqüentemente para minha formação profissional e pessoal;

Ao meu orientador Prof. Ms. Rafael Rodrigo Eckhardt, pelo incentivo e confiança, pelas contribuições para a realização deste trabalho, pela paciência em ouvir e esclarecer minhas dúvidas;

Aos Profs. Ms. Emerson Luís Musskopf e Everaldo Rigelo Ferreira, pela disponibilidade, esclarecimentos e sugestões proporcionadas.

Por fim, aos meus amigos e familiares, pelo carinho e pela compreensão nos momentos em que a dedicação aos estudos foi exclusiva, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para que esse trabalho fosse realizado.

RESUMO

As matas ciliares exercem importante papel na proteção dos cursos de água, principalmente no que diz respeito à proteção de taludes, além de, em muitos casos, se constituírem nos únicos remanescentes florestais das propriedades rurais sendo, portanto, importantes para a conservação da fauna e flora. A dinâmica natural de um curso de água e as ações antropogênicas alteram a estabilidade dos taludes, podendo impactar as margens e os próprios cursos de água. A recuperação desses ambientes exige a adoção de medidas, como por exemplo, as técnicas de bioengenharia de solos, que consistem no uso de elementos biologicamente ativos associados a elementos inertes em obras de estabilização de solos e taludes. O estudo objetivou analisar as margens degradadas do Arroio Forquetinha, por meio da interpretação de imagens de satélite de alta resolução e atividades in loco, com vistas a indicar o uso de técnicas de bioengenharia de solos para estabilizar os taludes degradados e melhorar a qualidade ambiental de um desses locais. Os resultados evidenciaram que 20,88% (9,19 km) das margens ciliares estão degradados, totalizando 123 locais comprometidos, refletindo em um recurso hídrico com significativo grau de degradação das margens. Em 21 locais são necessárias intervenções de curtíssimo prazo, 59 de curto prazo, 27 de médio prazo e 16 de longo prazo. Na ponte da localidade de Bauereck, que apresenta as margens comprometidas pelas últimas inundações, foi indicado como proposta de bioengenharia a implantação de um defletor, enrocamento de pedra, esteira viva, plantio de inhame e banquetas invertidas, buscando consolidar o talude à ação dos processos erosivos, além de favorecer a sua revegetação e a elevação da qualidade ambiental nesse local.

Palavras – chave: Dinâmica fluvial. Processos erosivos. Mata ciliar. Qualidade ambiental. Bioengenharia de solos.

ABSTRACT

Riparian forests play an important role in the protection of watercourses, especially with regard to protection of slopes, and in many cases, they constitute the only remaining forests of rural properties is therefore important for the conservation of wildlife and flora. The natural dynamics of a watercourse and anthropogenic activities affect the stability of slopes and may impact margins and own waterways. The recovery of these environments requires the adoption of measures, such as the soil bioengineering techniques, which consist of the use of biologically active elements associated with inert elements in soil stabilization works and embankments. The study aimed to analyze the margins of degraded to Arroio Forquetinha, through interpretation of satellite imagery and high-resolution in situ activities, in order to indicate the use of soil bioengineering techniques to stabilize the slopes degraded and improve the environmental quality of one of these locations. The results showed that 20.88% (9.19 km) of riparian margins are degraded, totaling 123 compromised sites, reflecting on a water resource with a significant degree of degradation of margins. On 21 local interventions are needed short-term, 59 short-term, 27 medium term and 16 long-term. On the bridge of the town of Bauereck presenting the margins compromised by recent floods, was nominated as the proposed deployment of a bioengineering deflector, riprap stone, wake alive, planting yams and banquettes reversed, seeking to consolidate the slope to action processes erosion, and promote their revegetation and raising environmental quality there.

Key - words: River dynamics. Erosion. Riparian vegetation. Environmental quality. Soil bioengineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Padrões geométricos de drenagem	23
Figura 2: Determinação do fator de forma de duas bacias hidrográficas	25
Figura 3: Tipos de canais	26
Figura 4: Diagrama esquemático dos índices de sinuosidade.	27
Figura 5: Mudança das características de um curso de água	29
Figura 6: Distribuição das velocidades e turbulências máximas	32
Figura 7: Distribuição da velocidade em pontos característicos de um canal meândrico.....	33
Figura 8: Esquematização de escorregamento Translacional e Rotacional	35
Figura 9: Esquematização de escorregamento em cunha	35
Figura 10: Esquematização do processo de solapamento (A) e riscos associados com as infraestruturas (B)	36
Figura 11: Largura das áreas de preservação permanente no entorno dos cursos de água	39
Figura 12: Efeitos da presença de uma árvore na estabilidade de um talude.	40
Figura 13: Regressão florestal em decorrência da morte ou retirada de espécies arbóreas.	42
Figura 14: Deslizamentos naturais e induzidos pelo homem	44
Figura 15: Persistência e resiliência de uma paisagem	45
Figura 16: Determinação do método apropriado em função da inclinação da margem	51
Figura 17: Divisão da margem de curso de água em zonas	54
Figura 18: Matriz de avaliação do custo/força	54
Figura 19: Estacas	60
Figura 20: Feixes / caniçadas vivas	60
Figura 21: Banquetas	60
Figura 22: Empacotamento de ramos	60
Figura 23: Geogrelhas vegetadas	60
Figura 24: Parede Krainer	60
Figura 25: Enrocamento vivo.....	61
Figura 26: Esteira viva.....	61

Figura 27: Revestimento com árvores.....	61
Figura 28: Defletores.....	61
Figura 29: Plantação de lenhosas.....	61
Figura 30: Revestimento de pedregulhos e troncos com raízes.....	61
Figura 31: Nível mínimo de energia.....	62
Figura 32: Balança de estabilidade das obras de bioengenharia.....	64
Figura 33: Custos comparativos médios e manutenção de obras de bioengenharia.....	65
Figura 34: Base Cartográfica digital do município de Forquethina.....	69
Figura 35: Fluxograma metodológico da proposta de estudo.....	73
Figura 36: Localização do município de Forquethina.....	74
Figura 37: Uso e cobertura do solo na APP de 50 metros do Arroio Forquethina.....	78
Figura 38: Uso e cobertura do solo na APP de 50 metros do Arroio Forquethina.....	78
Figura 39: Uso e cobertura do solo na faixa de recuperação ambiental.....	79
Figura 40: Uso e cobertura do solo na faixa de recuperação ambiental.....	79
Figura 41: Local que requer recuperação/intervenção em Curtíssimo prazo.....	81
Figura 42: Local que requer recuperação/intervenção em Curto prazo.....	81
Figura 43: Local que requer recuperação/intervenção em Médio prazo.....	82
Figura 44: Local que requer recuperação/intervenção em Longo.....	82
Figura 45: Recuperação de Curtíssimo (A) e Curto (B) prazo.....	83
Figura 46: Recuperação: Curtíssimo prazo.....	83
Figura 47: Recuperação: Curto prazo.....	83
Figura 48: Recuperação: Curto prazo.....	83
Figura 49: Recuperação: Médio prazo.....	83
Figura 50: Recuperação: Médio prazo.....	83
Figura 51: Recuperação: Longo prazo.....	84
Figura 52: Recuperação: Longo prazo.....	84
Figura 53: Localização do local de proposição das intervenções biotécnicas.....	85
Figura 54: Perfil longitudinal do leito menor.....	86
Figura 55: Perfil longitudinal do leito maior excepcional (seção de inundação).....	87
Figura 56: Local de proposição das intervenções biotécnicas.....	88
Figura 57: Perfil da margem.....	89
Figura 58: Perfil da porção a montante (A) e jusante (B) do local de proposição das tipologias biotécnicas.....	90
Figura 59: Esquematização do defletor (A) e seu posicionamento em relação à margem (B).....	91
Figura 60: Esquematização do posicionamento das banquetas invertidas.....	94
Figura 61: Esquematização do perfil a montante (A) e jusante (B) com as tipologias propostas.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeitos da vegetação na estabilidade de encostas.....	41
Tabela 2 - Tipologias biotécnicas.....	56
Tabela 3: Critérios de categorização dos locais degradados	71
Tabela 4: Informações da sub-bacia hidrográfica do Arroio Forquetinha.....	76
Tabela 5: Índices fisiográficos da sub-bacia hidrográfica do Arroio Forquetinha	77
Tabela 6: Quantificação dos usos na faixa APP de 50 metros	77
Tabela 7: Quantificação dos usos na faixa de 5 metros de recuperação ambiental ..	78
Tabela 8: Categorização dos locais com margem degradada.....	80
Tabela 9: Estimativa de custos para construção do defletor.....	96
Tabela 10: Estimativa de custos para recuperação da porção a montante	97
Tabela 11: Estimativa de custos para recuperação da porção a jusante	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Área

APP – Área de Proteção Permanente

b – Maior dimensão do bloco

DLT – Dimensão Limite de Transporte

GPS – Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)

I – Inclinação do terreno

Ic – Índice de circularidade

Ic – Índice de conformação

Is – Índice de sinuosidade

K – Coeficiente de rugosidade

Kc – Coeficiente de compacidade

Kf – Fator de forma

Kg – Índice de Gravelius

L – Comprimento do eixo da bacia

P – Perímetro

R – Raio hidráulico

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SMMASBE – Secretaria Municipal do Meio Ambiente e Saneamento Básico de Estrela

UTM – Universal Transversa de Mercator

V – Velocidade média

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1).....	23
Equação (2).....	24
Equação (3)	24
Equação (4)	25
Equação (5)	63
Equação (6)	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivos específicos	19
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3.1 Sistemas fluviais.....	21
3.1.1 Fisiografia fluvial.....	22
3.1.1.1 Rede de drenagem.....	22
3.1.1.2 Canal	26
3.1.1.3 Leito.....	28
3.1.2 Processos erosivos fluviais.....	30
3.1.2.1 Movimentos de massa fluviais.....	33
3.2 Matas Ciliares.....	37
3.2.1 Efeitos da mata ciliar sobre taludes fluviais	39
3.3 Qualidade ambiental dos taludes fluviais	43
3.3.1 Bioengenharia de solos	46
3.3.1.1 Manejo de cursos de água	49
3.3.1.2 Tipologias de intervenção.....	53
3.3.1.3 Dimensionamento das obras de biengenharia	62
3.3.1.4 Limitações da Bioengenharia	64
4 METODOLOGIA	67
4.1 Materiais	67
4.2 Procedimentos metodológicos.....	67
4.2.1 Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Arroio Forquetinha.....	68
4.2.2 Delimitação do Arroio Forquetinha, da mata ciliar e da APP	69
4.2.3 Identificação das margens degradadas.....	70
4.2.4 Levantamento topográfico do local alvo de proposição das tipologias biotécnicas.....	72
4.2.5 Proposição das tipologias de intervenção e estimativa do custo da obra.....	72

5 RESULTADOS	74
5.1 Descrição da área de estudo	74
5.2 Análise fisiográfica da bacia hidrográfica do Arroio Forquetinha.....	76
5.3 Delimitação da mata ciliar e dos locais com margem degradada	77
5.4 Proposição de implantação de tipologias biotécnicas.....	84
5.4.1 Escolha do local	84
5.4.2 Levantamento topográfico do local alvo de proposição das tipologias biotécnicas	86
5.4.3 Descrição do local	88
5.4.4 Proposição das técnicas de bioengenharia de solos.....	90
5.4.4.1 Defletor.....	91
5.4.4.2 Enrocamento de pedras	92
5.4.4.3 Esteira viva.....	92
5.4.4.4 Inhame	93
5.4.4.5 Banquetas invertidas	94
5.4.4.6 Custo das tipologias propostas	96
6 CONCLUSÕES	100
6.1 Sugestões de trabalhos futuros	102
REFERÊNCIAS.....	104
ANEXO – Breve descrição das espécies vegetais sugeridas na recuperação da margem	110

1 INTRODUÇÃO

A morfogênese refere-se à origem e ao desenvolvimento das formas de relevo, as quais são resultantes da atuação dos processos endógenos e exógenos. Os processos endógenos tem origem no interior da terra e manifestam-se por meio de movimentos sísmicos, do vulcanismo, do magmatismo intrusivo e do tectonismo, já os processos exógenos são movimentos externos que atuam na superfície da Terra destruindo elevações, construindo formas e preenchendo depressões. Os agentes dos processos exógenos são a água e o gelo (ação mecânica e química), o vento, a ação da gravidade, as alterações de temperatura, os organismos (fauna e flora) e o homem (FLORENZANO, 2008).

O homem depende da existência do meio em que vive e, portanto, é preciso considerar que toda alteração sobre o meio resulta em uma modificação na configuração espacial da paisagem – haverá resposta do meio para cada alteração sofrida – sendo o equilíbrio desta afetado. O rearranjo dos componentes modificados resultará em uma situação diferente da anterior. A Qualidade Ambiental depende da harmonia existente entre o homem e o meio (SANTOS, 2007), ou seja, do equilíbrio entre elementos da paisagem através de um ordenamento do espaço, conciliando principalmente os benefícios da vegetação com os diversos tipos de usos do solo através de um planejamento (LIMA; ZAKIA, 2000).

Ao se pensar em planejar a utilização ou intervenção de recursos naturais, é necessário antes o conhecimento da qualidade ambiental do espaço para que ela possa auxiliar na tomada de decisão. Uma das tecnologias que possibilitam avaliar o nível de qualidade é denominada de geotecnologia, uma tecnologia que permite o emprego de diversas ferramentas para caracterizar, avaliar e propor a solução para

problemas decorrentes da intensificação das relações humanas e meio físico geológico (BITAR; IYOMASA; CABRAL JR, 2000). Essa tecnologia possibilita identificar e delimitar os locais com qualidade ambiental comprometida (por exemplo, sem mata ciliar e/ou com a margem do arroio desestabilizada), para que então se possa intervir com técnica(s) de bioengenharia adequada(s).

As correntes fluviais, que representam possivelmente um dos mais importantes agentes, desempenham papel de grande relevância não só na escultura do modelado da superfície terrestre, como também no condicionamento ambiental da vida do Homem. Na antiguidade, os rios constituíram um meio de penetração natural do homem em direção ao interior dos continentes, sendo que as civilizações antigas floresceram as margens de grandes rios, como por exemplo, no Tigres e Nilo (SUGUIO; BIGARELLA, 1979). Até hoje, muitos rios prestam-se à navegação, pesca, recreação, entre outros, contudo, seu papel mais importante reside no abastecimento de água, irrigação e na produção de energia elétrica.

Chaves (2009) destaca que entre os fatores que interferem sobre o volume e qualidade da água disponível no Brasil, merece destaque a destruição da vegetação existente nas margens e entorno das nascentes e dos cursos de água (mata ciliar), promovida por razões diversos, que é de fundamental importância para a preservação ambiental, para a manutenção das fontes de água, da biodiversidade e, em especial, para a estabilização dos taludes fluviais. Esses, quando desestabilizados, segundo Guidicini e Nieble (1983), Fernandes e Amaral (2000) e Tomonaga, Santoro e Amaral (2009), podem provocar diferentes tipos de movimentos de massa, classificados em escorregamentos (translacionais, rotacionais e em cunha) e, segundo Carvalho e Galvão (2006), em solapamentos.

As matas ciliares possuem extrema importância na preservação das margens, pois evitam a erosão dos solos adjacentes, impedindo a sedimentação e assoreamento do leito do rio (BARRELLA et al, 2000). Para Martins (2007), funcionam como filtros, retendo defensivos agrícolas, poluentes e sedimentos que seriam transportados para os cursos de água, afetando diretamente a quantidade e a qualidade da água e, conseqüentemente, a fauna aquática e a população humana.

As matas ciliares são importantes, também, como corredores ecológicos, ligando fragmentos florestais e, portanto, facilitando o deslocamento da fauna e o fluxo gênico entre as populações de espécies animais e vegetais. Em regiões com

topografia acidentada favorecem a proteção do solo contra os processos erosivos intensos, uma vez que atuam na estabilização de taludes através da grande malha de raízes (MARTINS, 2007). As raízes, além de dificultar o cisalhamento do solo, formam uma rede de canais que permitem a interação da vazão com a margem, ou seja, a água fluvial consegue percolar através do solo marginal, reduzindo a taxa de erosão e permitindo, conseqüentemente, a estabilização da margem (GOMES, 2005).

Historicamente, ao se buscar técnicas para evitar, atenuar ou combater os efeitos indesejados da remoção de mata ciliar, surgem modelos que vão desde a construção de obras de engenharia, até as fugazes campanhas de educação ambiental, que apresentam a simples revegetação (o reflorestamento) das margens como solução. As primeiras certamente solucionam os problemas, porém, além de onerosas, produzem drásticas modificações na paisagem, por vezes são desnecessárias e nem sempre respondem da melhor maneira aos anseios ecológicos, econômicos e estéticos. Por outro lado, as numerosas campanhas de educação ambiental e a distribuição de mudas à comunidade, sem que se leve em consideração aspectos técnicos que garantam a estabilização das margens, quase nunca são capazes de produzir os efeitos práticos esperados (DURLO; SUTILI, 2005). Nesse contexto, como alternativa ao exposto, é possível optar por um campo especial da ciência conhecido como bioengenharia, engenharia natural ou ainda, mais propriamente, bioengenharia de solos.

A bioengenharia de solos consiste no uso de elementos biologicamente ativos junto com elementos inertes em obras de estabilização de solos e taludes. Como elementos vivos pode-se citar a vegetação, e os elementos inertes podem ser representadas por concretos, madeiras, ligas metálicas, polímeros naturais e sintéticos. Essa técnica de estabilização utiliza raízes e os caules como elementos estruturais e mecânicos para a contenção e proteção de solos, em diferentes arranjos geométricos. Atua, assim, no fortalecimento do solo, na melhoria das condições da margem e na retenção das movimentações de terra (PINTO, 2009) e favorecendo o desenvolvimento da cobertura vegetal (GOMES, 2005).

No município de Forquethinha, área do presente estudo, os terrenos planos e de boa fertilidade natural, por favorecerem a mecanização e um alto rendimento da produção, fizeram com que os ambientes ciliares que se encontravam às margens

do Arroio Forquetinha, sofressem forte interferência antrópica para a expansão das atividades agrícolas. Ao decorrer de vários anos, as matas ciliares foram suprimidas a fim de expandir a área agricultável, no entanto, hoje, muitas das parcelas de terra até então agricultáveis, já sofrem as consequências da remoção de mata ciliar.

Atualmente, a erosão dos solos e das margens do arroio não são apenas um problema ambiental, mas também econômico, haja vista que os produtores rurais estão perdendo parcelas de suas terras em decorrência da atividade erosiva nas margens, além destas ainda serem lixiviadas durante os períodos de cheia, tornando-se necessário repor os nutrientes perdidos, o que costuma ser feito por meio do uso de fertilizantes.

Diante do exposto, o presente trabalho possui como objetivo geral analisar a presença de mata ciliar e os processos erosivos nas margens do Arroio Forquetinha, procurando identificar os trechos que poderiam ser recuperados por meio de técnicas de bioengenharia, bem como propor a intervenção biotécnica mais adequada para um dos pontos identificados, uma vez que a pressão antrópica sobre essas áreas é constante, interferindo de maneira negativa sobre persistência e resiliência, tornando-se necessária a aplicação de mecanismos de recuperação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo analisar a presença de mata ciliar e os processos erosivos nas margens do Arroio Forquetinha, no município de Forquetinha, procurando identificar os trechos degradados e que poderiam ser recuperados por meio de técnicas de bioengenharia, bem como propor a intervenção biotécnica mais adequada para um dos pontos identificados, além da estimativa do custo de implementação da obra.

2.2 Objetivos específicos

O alcance do objetivo geral apresentado baseia-se no desdobramento de alguns objetivos específicos, conforme disposto a seguir:

- ✓ Determinar as características fisiográficas da bacia hidrográfica do Arroio Forquetinha;
- ✓ Delimitar o leito do curso de água do Arroio Forquetinha;
- ✓ Delimitar a mata ciliar existente no entorno do Arroio Forquetinha;
- ✓ Delimitar as Áreas de Preservação Permanente (APPs) do arroio e as faixas de recuperação ambiental das referidas áreas com usos antrópicos consolidados;

- ✓ Identificar e demarcar locais com margem degradada (desprovidos parcial ou totalmente de mata ciliar e/ou com a margem desestabilizada) na faixa de recuperação ambiental e da APP.
- ✓ Quantificar os locais em que as margens se encontram comprometidas e caracterizá-las quantitativamente;
- ✓ Propor as tipologias de bioengenharia mais adequadas para as características do leito, vazão e velocidade do escoamento fluvial, na recuperação de um dos pontos identificados como degradados na margem do Arroio Forquetinha;
- ✓ Estimar os custos de implementação das tipologias de bioengenharia propostas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A água é um dos agentes modeladores exógenos do relevo mais importantes na construção e composição da paisagem terrestre. Está ligada aos processos de erosão e sua influência sobre a estabilidade de encostas e taludes fluviais é decisiva. Do escoamento superficial nos cursos de água resultam processos fluviais que participam da constante esculturação das formas de relevo e correlacionam-se, de forma dinâmica, com aspectos ecológicos, econômicos e sociais (DURLO; SUTILI, 2005).

3.1 Sistemas fluviais

Um sistema, segundo Christofolletti (1980), é o conjunto dos elementos e das relações entre si e entre seus atributos. Neste sentido, um rio e sua bacia de drenagem são considerados como um sistema geomórfico, onde o sistema fluvial funciona como uma base de interação de processos e formas responsáveis pela configuração da paisagem, mantida pelo equilíbrio dinâmico de entrada, transferência e saída de energia e matéria.

O sistema fluvial abarca e/ou resulta de uma interação de fatores que condicionam o desenvolvimento dos processos e das formas dentro dos canais. A respeito dessa interação de fatores, Christofolletti (1980) destaca que os fatores hidrológicos, cujos mais importantes são a quantidade e a distribuição das precipitações, a estrutura geológica, as condições topográficas e a cobertura vegetal, influenciam a formação do material intemperizado na bacia hidrográfica e o carregamento desses materiais até os rios. O fluxo e o transporte de sedimentos são respostas aos processos e ao estado de equilíbrio atuante no sistema fluvial.

Como se pode perceber, existe uma relação cíclica e interdependente entre os elementos e processos que compõem um sistema fluvial, onde o fluxo se constitui no agente principal. A dinâmica dos fluxos no canal fluvial está condicionada por duas forças: gravitacional e fricção. A primeira impele a água para jusante, para as regiões mais baixas da bacia, que por sua vez, se relaciona com o perfil longitudinal do segmento. A segunda age colocando resistência a esse escoamento (FLORENZANO, 2008).

Essas características dos fluxos são evidenciadas a partir da forma do canal e das feições morfológicas nele presentes. Nesse sentido, a alteração no fluxo se reflete nas características dos processos e formas dos canais, pois, segundo Suguio e Bigarella (1979), o ajuste do rio às diversas variáveis hidrológicas reflete-se na morfologia, isto é, em seu perfil longitudinal e transversal, que, segundo Durlo e Sutili (2005) correlacionam-se, seguramente, com suas demais características fisiográficas e hidráulicas e, conseqüentemente, relaciona-se com os processos fluviais. A fisiografia fluvial, segundo Cunha (2007), pode ser entendida sob os pontos de vista de rede de drenagem, canal e leito.

3.1.1 Fisiografia fluvial

Os dados fisiográficos são aqueles que podem ser extraídos de mapas, fotografias aéreas ou imagens de satélites. Basicamente são áreas, comprimentos, declividades e padrões, que expressam as características fluviais. O reconhecimento de alguns desses aspectos é importante para a compreensão dos processos fluviais e para a adoção adequada de técnicas de correção e estabilização (SUTILI, 2004).

3.1.1.1 Rede de drenagem

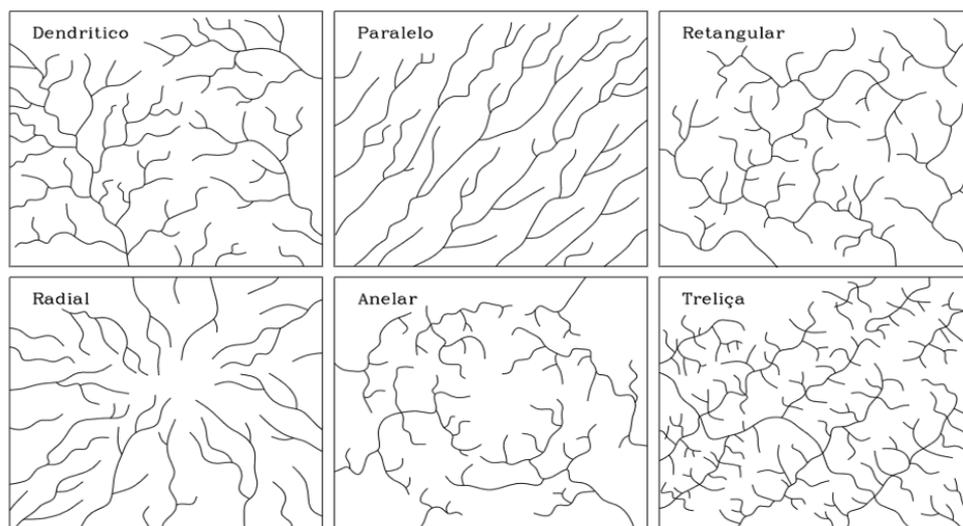
Ao conjunto de canais que se interligam, escoando em uma determinada direção, dá-se o nome de rede drenagem fluvial. A área drenada por essa rede é denominada de bacia hidrográfica ou bacia de drenagem (DURLO; SUTILI, 2005).

A rede de drenagem, segundo Cunha (2007), pode exibir diferentes padrões de drenagem, possibilitando a realização de classificações que levem em conta a forma de escoamento, a gênese e a geometria dos canais. De acordo com o

escoamento, as bacias de drenagem são classificadas como exorréicas, quando a drenagem se dirige para o mar, e em endorréicas, quando a drenagem se dirige para uma depressão interna do continente.

A classificação dos padrões de drenagem, com base na geometria dos seus canais, apresenta os seguintes tipos fundamentais: dendrítico, paralelo, retangular, radial, anelar, treliça e irregular (FIGURA 1).

Figura 1: Padrões geométricos de drenagem



Fonte: Durlo e Sutilli (2005)

Além do padrão de drenagem, para a comparação entre bacias distintas, é importante conhecer a densidade da drenagem (DURLO; SUTILI, 2005). Sousa (1977) apud Durlo e Sutilli (2005) afirma que a densidade é determinada pela relação entre o somatório do comprimento dos cursos de água e a área da bacia hidrográfica (Equação 1), logo, considera alto o valor da densidade quando superior a 4,1 Km/Km²; médio, quando varia entre 2,1 a 4,0 Km/Km²; e baixo, quando é inferior a 2,0 Km/Km².

$$DD = \frac{L}{A} \quad (1)$$

Sendo DD = densidade de drenagem (Km/Km²), L = comprimento total de todos os canais (Km) e A = área da bacia hidrográfica (Km²). É um índice importante, pois reflete a influência da geologia, topografia, do solo e da vegetação da bacia hidrográfica, e está relacionado com o tempo gasto para a saída do escoamento superficial da bacia.

Outro dado importante a considerar a respeito da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica é sua susceptibilidade à ocorrência de cheias, que pode ser observado a partir de determinados coeficientes, como Coeficiente de compacidade (K_c) ou Índice de Gravelius (K_g), que relaciona a forma da bacia hidrográfica com um círculo, o Fator de forma (K_f) ou Índice de conformação (I_c), que relaciona a forma da bacia hidrográfica com um retângulo e avalia o grau de alongamento da bacia e o Índice de circularidade (I_c) (LIMA, 2008). A partir dos valores que esses coeficientes atingirem é possível avaliar se a propensão da bacia analisada é maior ou menor à eventos de cheias.

O Coeficiente de compacidade é a relação entre o perímetro e a área da bacia (Equação 2). Quanto mais próximo o valor de 1, mais compacta é a bacia, e maior a tendência em produzir escoamentos rápidos, o que, conseqüentemente, faz com que ela seja mais suscetível a enchentes acentuadas. Este coeficiente é um número adimensional que varia com a forma da bacia, independentemente do seu tamanho; quanto mais irregular for à bacia, tanto maior será o coeficiente de compacidade (LIMA, 2008).

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

Onde K_c = Coeficiente de compacidade, P = Perímetro da bacia (Km) e A = Área da bacia (Km²).

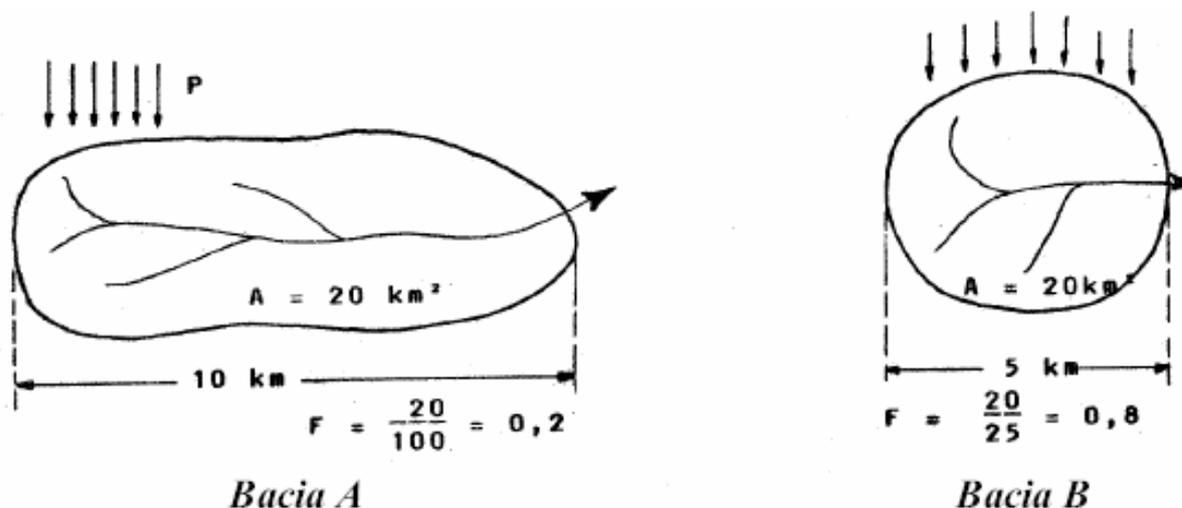
Com relação ao Fator de forma (K_f) é importante ressaltar que a forma é uma das características físicas mais difíceis de ser expressas em termos quantitativos. A forma da bacia, bem como a forma do sistema de drenagem, pode ser influenciada por algumas outras características da bacia, principalmente pela geologia. A forma pode, também, atuar sobre alguns dos processos hidrológicos, ou sobre o comportamento hidrológico da bacia (LIMA, 2008). O fator de forma relaciona a área da bacia e comprimento axial do seu curso de água (Equação 3)

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (3)$$

Sendo K_f = Fator de forma, A = Área da bacia (Km) e L = comprimento do eixo da bacia (Km).

Esse índice indica que numa bacia com Kf baixo, ou seja, com comprimento do eixo maior, haverá menor propensão a enchentes que noutra com mesma área, mas Kf maior. Isto se deve a fato de, numa bacia estreita e longa (Kf baixo), haver menor possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda a sua extensão, conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 2: Determinação do fator de forma de duas bacias hidrográficas



Fonte: Lima (2008)

Outro índice de forma é o Índice de circularidade (Ic), proposto por Miller em 1953, citado por Christofolletti (1980), que avalia a circularidade de uma bacia hidrográfica. Nessa avaliação, quanto mais próximo de 1 for o Ic, mais próxima da forma circular será a bacia hidrográfica. Esse índice leva em consideração a área da bacia (A), em Km² e o seu perímetro (P) em Km (Equação 4).

$$Ic = 12,57 \frac{A}{P^2} \quad (4)$$

Também relacionado à rede de drenagem, tem-se a determinação da hierarquia fluvial, um critério de ordenação dos cursos de água proposto por Horton (1945) e modificado por Strahler (1952) apud Cunha (2007): os canais de 1^a ordem são os que não possuem tributários, estendendo-se desde a nascente até a confluência; os de 2^a ordem resultam da confluência de dois canais de 1^a ordem; os canais de 3^a ordem são formados pela confluência de dois canais de 2^a ordem; os de 4^a ordem surgem da confluência de dois canais de 3^a ordem, recebendo afluentes das ordens anteriores; e assim sucessivamente.

O desenvolvimento de um sistema de drenagem e o estudo das ramificações são relevantes para indicar a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica. Todas essas características de um rio propiciam quantidades variadas de volume para cada área. Ao associar estas características naturais com as interferências humanas, as duas juntas refletem significativamente nessa variação (qualidade e quantidade) da água de um rio. Em geral essas interferências influenciam negativamente na evolução de eventos como os naturais (processos erosivos) e hidrológicos (enchentes e inundações) (REIS, 2011).

3.1.1.2 Canal

A fisionomia que o rio exhibe ao longo do seu perfil longitudinal é descrita como retilínea, meândrica e anastomosada (FIGURA 3), constituindo o chamado padrão de canais (CUNHA, 2007).

Figura 3: Tipos de canais



Fonte: Sutili (2004)

Os padrões retilíneos, segundo Christofolletti (1980), são aqueles em que o rio percorre um trajeto sem se desviar significativamente de sua trajetória normal em direção à foz. Os canais verdadeiramente retos são muito raros na natureza, existindo principalmente quando o rio está controlado por linhas tectônicas, além de da existência de um embasamento rochoso homogêneo (rochas de igual resistência), pois do contrário se desviaria em sua trajetória.

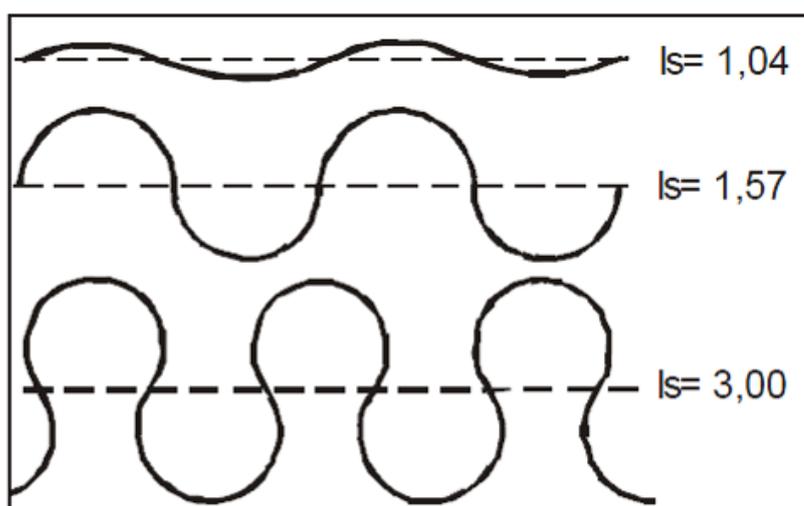
Os padrões meândricos são aqueles em que os rios descrevem curvas sinuosas, largas, harmoniosas e semelhantes entre si, através de um trabalho contínuo de escavação na margem côncava (ponto de maior velocidade da corrente) e de deposição na margem convexa (ponto de menor velocidade) (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Os padrões anastomosados, segundo Cunha (2007), caracterizam-se por apresentar grande volume de carga de fundo que, conjugado com as flutuações de descarga, ocasionam sucessivas ramificações, ou múltiplos canais que se subdividem e se reencontram, separados por ilhas assimétricas e barras arenosas.

Os padrões de canais refletem um estado de quase equilíbrio entre vários fatores inter-relacionados. Alguns desses fatores, como carga sedimentar e diâmetro dos sedimentos, atuam de maneira independente dentro do canal, pois são controlados por elementos externos como litologia e estrutura do substrato, relevo e clima. O declive do canal, por sua vez, é um fator dependente, comumente ajustado aos processos atuantes dentro do canal. Outros fatores básicos dependentes incluem a largura e profundidade do canal, velocidade de fluxo, e rugosidade do leito (SUGUIO; BIGARELLA, 1979).

Segundo Christofolletti (1980), o parâmetro principal na determinação dos limites entre as três classes é o índice de sinuosidade (I_s), dado pelo coeficiente entre o comprimento do canal em determinado trecho e o comprimento do vale no mesmo trecho medido. Canais com índice igual ou superior a 1,5 são considerados meandrantes; inferiores são considerados sinuosos ou retilíneos (FIGURA 4).

Figura 4: Diagrama esquemático dos índices de sinuosidade.



Fonte: Dury (1969) apud Christofolletti (1980)

Para Christofolletti (1980), esses padrões decorrem do ajuste do canal à sua seção transversal. Da mesma maneira que o tipo de leito, o padrão que o canal assume também fica na dependência das características de cada trecho do curso de água, podendo um mesmo rio demonstrar, em pontos distintos, os três tipos de canal

ou mesmo certa combinação deles. Para Schumm (1972) apud Sutilli (2004), essa característica é determinada principalmente pelo tipo de carga detrítica, que corresponde à granulometria e à quantidade do material transportado pelo curso de água em um determinado trecho. Característica que pode ser bastante variável tanto no espaço como no tempo, para um mesmo curso de água.

3.1.1.3 Leito

Segundo Cunha (2007), o leito fluvial corresponde ao espaço ocupado pelo escoamento das águas, sendo que esse espaço varia com a frequência das descargas e de um setor a outro em um mesmo curso de água, em decorrência das características particulares do trecho, principalmente da topografia (inclinação do leito). A classificação do leito, com relação ao perfil transversal, segundo Christofolletti (1980) e Tricart (1966) apud Cunha (2007), pode assumir nomenclaturas como leito de vazante, o leito menor, leito maior e maior excepcional.

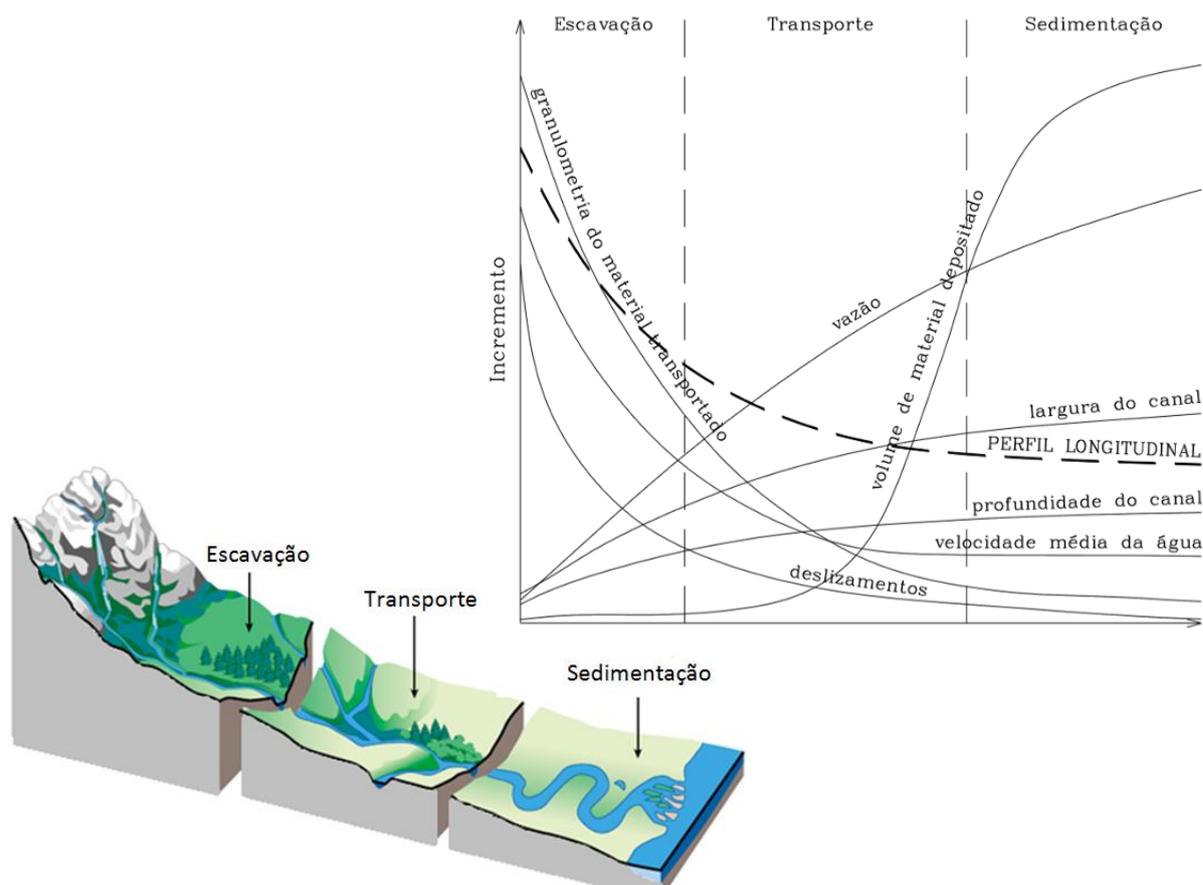
Leito de vazante e leito menor correspondem à parte ocupada pelas águas, cuja frequência impede o surgimento de vegetação, sendo que as águas do leito de vazante divagam dentro do leito menor seguindo o talvegue, linha de máxima profundidade ao longo do canal e que é mais bem identificada na seção transversal do canal. O leito maior é de ocupação sazonal, ocupado pelas águas do rio e pelo menos uma vez ao ano, durante as cheias, e o maior excepcional, somente durante as grandes cheias, que seguem intervalos irregulares, que podem se entender a algumas dezenas de anos (CUNHA, 2007).

Quanto ao perfil longitudinal de um curso de água, Christofolletti (1980) afirma que este mostra a variação da sua declividade ou gradiente ao longo de seu desenvolvimento. Consiste na representação visual (gráfica) da relação entre a altimetria e o comprimento de determinado curso de água, para diversos pontos entre a nascente e a foz. Lima (2008) acrescenta que a declividade é um dos fatores principais que regulam o tempo de duração do escoamento superficial e de concentração da precipitação nos leitos dos cursos de água, logo, trata-se de uma informação fisiográfica, especialmente importante, para a compreensão e controle dos processos fluviais.

A configuração longitudinal de um rio e a velocidade de suas águas depende de diversos fatores, tais como o regime pluvial da área de drenagem, a constituição litológica do substrato e da topografia, que intervêm na declividade do canal. Conforme a região percorrida, um rio pode possuir um gradiente heterogêneo durante seu percurso, isto é, a velocidade e, por consequência, outras características, podem variar com a maior ou menor inclinação do leito (LEINZ; AMARAL, 1978 citado por DURLO; SUTILI, 2005).

Em geral, o perfil longitudinal típico é côncavo (considerado em equilíbrio, ou seja, os processos de erosão, transporte e deposição estão em equilíbrio entre si), com declividades altas em direção à nascente e baixas em direção à jusante (FLORENZANO, 2008). FISRWG (1998) fez uma série de correlações lógicas do comportamento de um curso de água quando observado ao longo do desenvolvimento do seu perfil longitudinal (FIGURA 5).

Figura 5: Mudança das características de um curso de água



Fonte: Adaptado de FISRWG (1998)

Na correlação apresentada na Figura 5, percebe-se que enquanto a profundidade e a largura do canal aumentam, elevando a vazão, a velocidade média da água e a ocorrência de deslizamentos diminuem. O decréscimo na granulometria do material transportado está relacionado ao alcance das velocidades limites (críticas) de transporte correspondente à granulometria e à densidade de cada material, à medida que a velocidade da água diminui. Assim, é possível que a jusante, normalmente, se desenvolva uma área de sedimentação caracterizada pela formação de regiões meândricas, deltas ou cones de dejeção, nos quais o volume de material depositado aumenta consideravelmente (FISRWG, 1998).

A forma do perfil longitudinal de um curso de água correlaciona-se, seguramente, com suas demais características fisiográficas e hidráulicas e, conseqüentemente, relaciona-se com os processos fluviais (DURLO; SUTILI, 2005).

3.1.2 Processos erosivos fluviais

Erosão é a remoção das camadas superficiais do solo e rochas, que pode ser causada, principalmente, pela ação do vento, água (pluvial, fluvial, subterrânea, correntes marinhas, ondas) e pela atividade antrópica (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2011). A ação do homem é vista como importante agente modificador da dinâmica natural do relevo e, por conseguinte, da estabilidade das encostas. É considerado o causador da erosão acelerada, que Cunha (2007) trata como sendo a erosão causada pela ação humana que, em geral, ocasiona um desequilíbrio no meio natural.

A erosão fluvial é um dos fatores desencadeadores do movimento de massa em ambientes fluviais. Apresenta fase de ocorrência, durante a subida das águas, onde remove as paredes das margens, retirando vegetação, solo e material clástico pela força da água, ocasionando a instabilidade dos barrancos e, em seguida, o material removido, passa a depositar-se no sopé do barranco, dentro do canal e, ao longo das margens, onde se inicia o ciclo de erosão, transporte e deposição pelo fluxo do rio (LIMA, 1998).

A erosão marginal em canais fluviais está intimamente associada com as mudanças no curso dos rios e com o desenvolvimento das planícies de inundação,

portanto, a compreensão dos seus processos é fundamental para se entender o desenvolvimento das feições dos rios (CHRISTOFOLETTI, 1980; CUNHA, 2007).

A evolução do processo de erosão marginal é rápida se comparada com muitos outros processos naturais geomorfológicos, isso porque a água exerce grande força de atrito nos canais dos rios, continuamente. A erosão acelerada das margens ocorre em velocidade muito grande, principalmente em grandes rios, que têm grandes fluxos. A complexidade dos fatores ambientais (hidrológicos, sedimentológicos, geomorfológicos, climáticos, biológicos e pedológicos) e antropológicos que intervêm e participam dessa dinâmica, em muitos casos dificultam o estabelecimento das causas específicas e das tendências de evolução dos processos erosivos e das feições dos rios. Dificultam precisar até que ponto o desencadeamento de erosões marginais aceleradas e mudanças acentuadas na morfologia do canal são uma resposta do meio às intervenções humanas ou se são um fenômeno natural na evolução do sistema fluvial (FONTES, 2002).

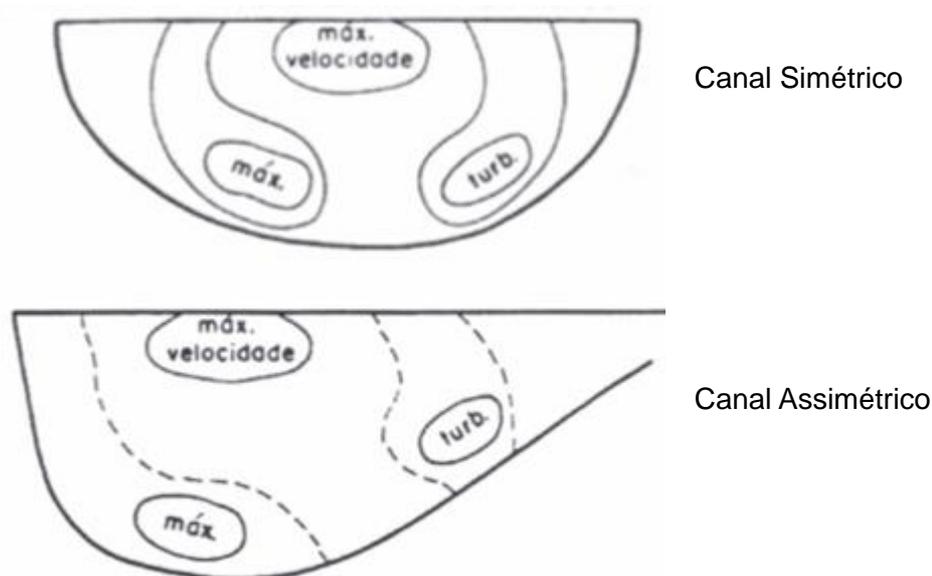
Os principais fatores que condicionam os processos de erosão, transporte e sedimentação nos rios são: as velocidades de corrente; as características físicas dos sedimentos, especificamente o seu tamanho, densidade e forma; a existência de acidentes ou obstáculos no leito; e as variações da vazão do rio, que por sua vez, estão diretamente relacionados com as variações climáticas (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Segundo Christofolletti (1980), a velocidade da corrente é o fator principal de um curso de água para erodir, transportar e depositar. Uma elevada velocidade geralmente resulta em erosão e transporte, ao passo que uma baixa provoca deposição. Para arrancar partículas do leito ou margem é necessária uma velocidade superior a que se requer para transportar, que por sua vez é maior do que a velocidade de sedimentação. A velocidade de uma corrente de água em um rio depende essencialmente do declive, forma ou irregularidades no canal. Quanto maior for a declive do canal, maior será a velocidade, logo, visto que as partes mais baixas do continente vão ficando cada vez mais planas devido à sedimentação, verifica-se de um modo geral, uma diminuição na velocidade de montante para jusante.

Segundo Leighley (1934 apud CHRISTOFOLETTI, 1980), em canais simétricos, a velocidade máxima da água está abaixo da superfície e centralizada. A

partir do centro, em direção às laterais estão as velocidades moderadas, porém de alta turbulência. Nas partes próximas às paredes e ao fundo, o fluxo apresenta baixas velocidades e turbulência, sendo estas maiores nas proximidades do fundo. Em canais assimétricos, a zona de velocidade máxima desloca-se do centro para o lado de águas mais profundas, enquanto que os setores de máxima turbulência apresentam comportamento diferente, elevando-se o do lado mais raso e rebaixando-se o do lado mais profundo, o que explica o deslocamento lateral que se verifica na distribuição das velocidades em canais meandrantes (FIGURA 6).

Figura 6: Distribuição das velocidades e turbulências máximas

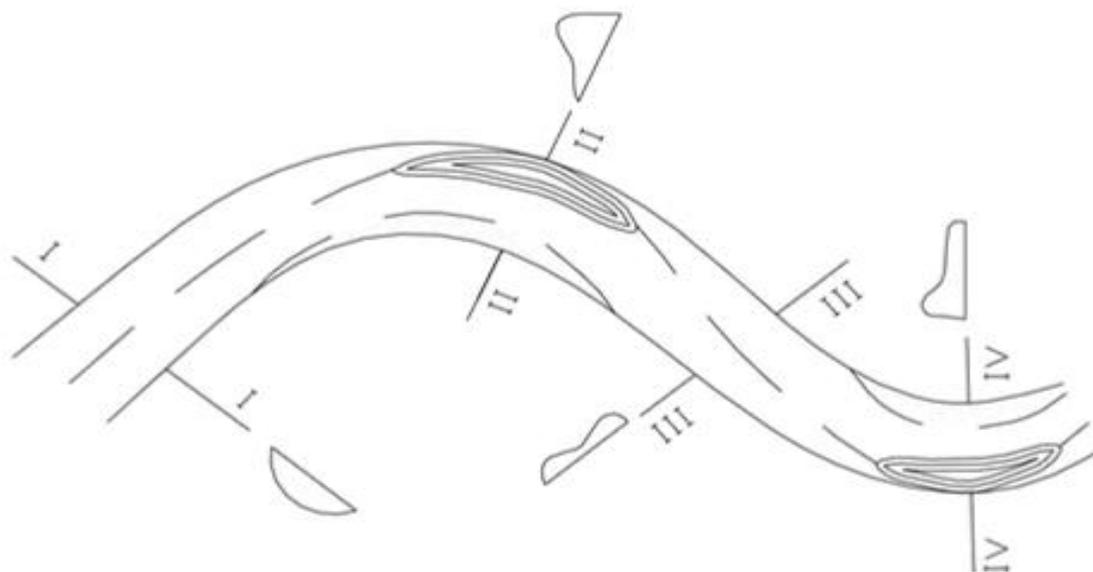


Fonte: Leighley (1934) apud Christofolletti (1980)

As variações de vazão alteram os processos de erosão, transporte e sedimentação, grandes ou frequentes variações causam um forte desequilíbrio e, geralmente, aumentam a capacidade de erosão. A erosão fluvial, também chamada de erosão marginal, ocorre em toda a face do canal, visto que é o arraste de partículas pelo fluxo do rio. Esse tipo de erosão aumenta à medida que aumenta a quantidade de água e sua velocidade no canal fluvial. Nas margens côncavas a velocidade é maior (CUNHA, 2007).

A dinâmica de atuação das forças pode ser observada na Figura 7, onde nos perfis transversais I e III, situados em trechos retilíneos, a velocidade da água tem uma distribuição uniforme e relativamente menor próximo às margens. Ao contrário dos perfis II e IV, que mostram grande velocidade da água próximo ao raio externo das respectivas curvas (DURLO; SUTILI, 2005).

Figura 7: Distribuição da velocidade em pontos característicos de um canal meândrico



Fonte: Weisnmeister apud Durlo e Sutilli (2005)

O fluxo de água do canal provoca erosão que atua de três formas: corrosiva, corrosiva e pelo impacto hidráulico. A corrosão é o efeito abrasivo que o transporte de partículas sobre rochas ou sobre outras partículas provoca, é o desgaste pelo atrito mecânico, e que tende a reduzir a rugosidade do leito. A corrosão resulta do processo químico de dissolução de material solúvel no decorrer da percolação da água ainda no solo e o impacto hidráulico da força da água no canal do rio, originada pelo movimento turbilhonar do rio (CHRISTOFOLETTI, 1980; CUNHA, 2007). Conforme já mencionado, a erosão fluvial é um dos fatores desencadeadores dos movimentos de massa em ambientes fluviais, que serão abordados a seguir.

3.1.2.1 Movimentos de massa fluviais

Os processos da dinâmica fluvial responsáveis pela erosão e degradação das margens geralmente estão associados à elevação dos níveis da água (FERREIRA; BOTH, 2005), que podem ser fatores determinantes para que alguns dos processos erosivos anteriormente citados aconteçam, bem como desencadearem determinados movimentos de massa nos ambientes fluviais. Os movimentos de massa podem ser de diversos tipos, pois envolvem uma variedade de materiais e processos, além da variedade de ambientes em que podem ocorrer (FERNANDES; AMARAL, 2000, GUIDICINI; NIEBLE, 1983, TOMONAGA; SANTORO; AMARAL, 2009). De acordo com Selby (1993) citado por Florenzano (2008), as classificações seguem de acordo com critérios

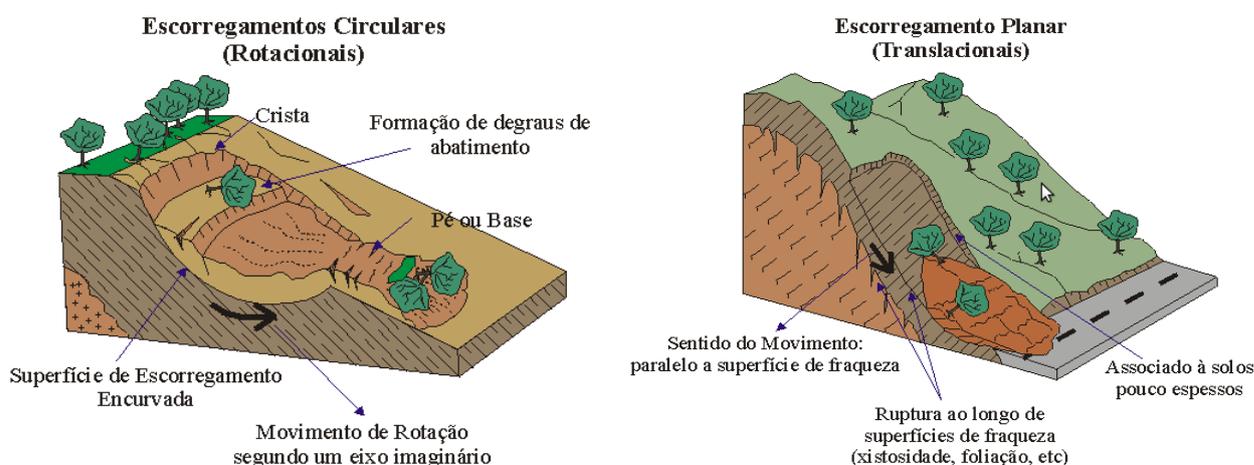
como: o tipo de material mobilizado, a velocidade e o mecanismo do movimento, o modo de deformação, a geometria da massa movimentada e o conteúdo de água.

Os movimentos de massa são processos naturais e/ou induzidos, principalmente por atividades humanas, que fazem parte da evolução da paisagem. Correspondem à remoção de material (solo, rocha e ou vegetação) ao longo de uma encosta ou barranco, acionado pela água e deslocado pela ação da gravidade (MAGALHAES et al. 2011). Dentre as classificações brasileiras, destacam-se as de Freire (1965) citadas por Guidicini e Nieble (1983), Fernandes e Amaral (2000) e Tomonaga, Santoro e Amaral (2009), que classificam os movimentos de massa em escorregamentos (translacionais, rotacionais e em cunha), e, segundo Carvalho e Galvão (2006), em solapamentos.

A velocidade do movimento depende da inclinação da superfície de escorregamento, da causa inicial de movimentação e da natureza do terreno. Variam de quase zero a alguns metros por segundo. Os movimentos mais bruscos ocorrem em terrenos relativamente homogêneos, que combinam coesão com atrito interno elevado. Nestes terrenos a superfície de escorregamento é mais inclinada (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

Levando em consideração a geometria e a natureza dos materiais instabilizados, os escorregamentos podem ser subdivididos em: escorregamentos translacionais ou planares, escorregamentos rotacionais ou circulares e escorregamentos em cunha. Varnes (1978) apud Durlo e Sutilli (2005), afirma que os translacionais ocorrem, normalmente sobre superfícies de deslizamento preexistentes enquanto que, nos rotacionais, não é possível fazer uma distinção clara entre a massa que deslizou e a que ficou estável (FIGURA 8).

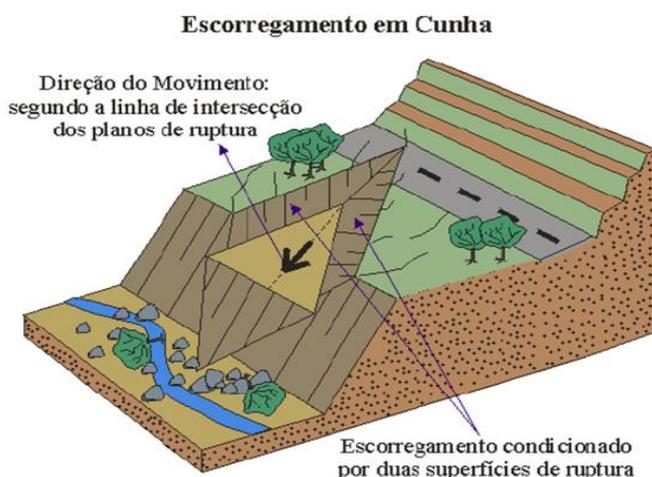
Figura 8: Esquematisação de escorregamento Translacional e Rotacional



Fonte: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09b.html>

Os escorregamentos em cunha (FIGURA 9), segundo Tomonaga, Santoro e Amaral (2009) possuem ocorrência mais restrita às regiões que apresentam um relevo fortemente controlado por estruturas geológicas, ocorrendo principalmente em taludes de corte ou em encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento, natural ou antrópico.

Figura 9: Esquematisação de escorregamento em cunha



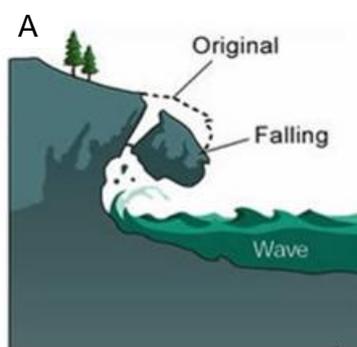
Fonte: Tomonaga, Santoro e Amaral (2009)

Ferreira e Both (2005), acrescentam que os escorregamentos em cursos de água sofrem forte influência da “poro pressão”. Explicam que com a elevação do nível do rio, os poros do solo existente nas margens podem ser preenchidos com água, que conseqüentemente, após o rebaixamento do nível e pressão da água existente nos poros, associada à diminuição do atrito entre partículas do solo, faz com que as margens sofram um colapso, deslocando-se para dentro do rio.

Em se tratando de solapamentos, também chamados de desbarrancamentos, Carvalho e Galvão (2006) afirmam que são processos que podem afetar áreas adjacentes aos cursos de água (rios e córregos), visto que estão associados à erosão das margens ou do talude de um canal fluvial, comumente acarretando a desestabilização da margem. Lima (1998) descreve que com a elevação do nível do rio, pode ocorrer a perda da sustentação da margem (talude) em decorrência da ação erosiva da água, e esta vir a cair (FIGURA 10 – A). Ferreira e Both (2005) afirmam que esse solapamento pode ser total ou parcial na margem, podendo deixar uma feição na forma de degraus.

Carvalho e Galvão (2006) também observam que quando a ocupação se instala nas faixas muito próximas às margens dos arroios e córregos e, em muitos casos, até no próprio leito dos cursos de água surgem áreas de risco, ou seja, quando acontecem chuvas mais intensas, as moradias são ameaçadas pela possibilidade de ocorrência de solapamentos das margens das drenagens ou pela própria ação direta da água sobre as edificações (FIGURA 10 - B).

Figura 10: Esquematização do processo de solapamento (A) e riscos associados com as infraestruturas (B)



Fonte: Adaptado de www.ga.gov.au/hazards/landslide/landslide-basics/bauses.html



Fonte: Carvalho e Galvão (2006)

Na natureza, ao longo dos anos, a fixação de uma vegetação nas margens dos rios vem sendo de fundamental importância para a estabilização das margens e a existência dos leitos, além de proporcionar inúmeros outros benefícios ao local que se encontram: as Matas Ciliares.

3.2 Matas Ciliares

Segundo Oliveira Filho (1994), as matas ciliares são formações vegetais do tipo florestal, que se encontram associadas aos corpos de água, ao longo dos quais podem estender-se por dezenas de metros a partir das margens e apresentar marcantes variações na composição florística e na estrutura comunitária, dependendo das interações que se estabelecem entre o ecossistema aquático e sua vizinhança.

Segundo Alvarenga (2004), as florestas ciliares são responsáveis pela manutenção da qualidade de água, regularização do regime hídrico e estabilidade dos solos, possuindo importantes funções ambientais. Gomes (2005) acrescenta que recebem o nome de ciliar por exercerem a função de proteção física e química do rio funcionando como um filtro, semelhante aos cílios dos olhos.

Para Martins (2007), as matas ciliares também funcionam como filtros, retendo defensivos agrícolas, poluentes e sedimentos que seriam transportados para os cursos de água, afetando diretamente a quantidade e a qualidade da água e, conseqüentemente, a fauna aquática e a população humana. São importantes, também, como corredores ecológicos, ligando fragmentos florestais e, portanto, facilitando o deslocamento da fauna e o fluxo gênico entre as populações de espécies animais e vegetais.

Vegetação ciliar, ripária ou ripícola é aquela que margeia os corpos de água, como rios, riachos e lagoas, tendo comumente porte arbóreo ou arbustivo em ambientes não perturbados (CECONI, 2010). Para Carpanezzi (2000) apud Ceconi (2010), a vegetação ciliar influencia de vários modos os corpos de água, e sua remoção causa prejuízos para o homem e para a natureza. Com objetivo de evitar a ocupação em áreas frágeis, obrigar a conservação de um mínimo da flora nativa para garantir um mínimo de equilíbrio ecossistêmico e estimular a plantação e o uso racional das florestas, foi criado em 1965, a lei nº 4771, conhecida como o Código Florestal (BRASIL, 1965).

Nessa lei, as matas ciliares, segundo o art. 2º, estão inseridas nas APPs, assim como as florestas e demais formas de vegetação existentes ao redor dos rios, lagos, nascentes, lagoas e reservatórios, pois possuem a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a

biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 1965).

A referida lei, que teve sua redação alterada pela Lei Federal nº 7.803, de 18 de julho de 1989 (BRASIL, 1989) e pela Leis Federais nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (BRASIL, 2012a) e nº 12.727, de 17 de outubro de 2012 (BRASIL, 2012b), define que deve ser respeitada uma largura mínima da faixa marginal, entre 30 a 500 m, dependendo da largura dos cursos de água (FIGURA 11), e determinando a manutenção ou recuperação da vegetação original. Focada na recuperação ambiental de áreas com usos consolidados, Brasil (2012b) no Artigo 61-A, define que nas APPs é autorizada, exclusivamente, a continuidade das atividades agrossilvopastoris, de ecoturismo e de turismo rural em áreas rurais consolidadas até 22 de julho de 2008, sendo que:

§ 1º Para os imóveis rurais com área de até 1 (um) módulo fiscal¹ que possuam áreas consolidadas em Áreas de Preservação Permanente ao longo de cursos d'água naturais, será obrigatória a recomposição das respectivas faixas marginais em 5 (cinco) metros, contados da borda da calha do leito regular, independentemente da largura do curso d'água.

§ 2º Para os imóveis rurais com área superior a 1 (um) módulo fiscal e de até 2 (dois) módulos fiscais que possuam áreas consolidadas em Áreas de Preservação Permanente ao longo de cursos d'água naturais, será obrigatória a recomposição das respectivas faixas marginais em 8 (oito) metros, contados da borda da calha do leito regular, independente da largura do curso d'água.

§ 3º Para os imóveis rurais com área superior a 2 (dois) módulos fiscais e de até 4 (quatro) módulos fiscais que possuam áreas consolidadas em Áreas de Preservação Permanente ao longo de cursos d'água naturais, será obrigatória a recomposição das respectivas faixas marginais em 15 (quinze) metros, contados da borda da calha do leito regular, independentemente da largura do curso d'água.

§ 4º Para os imóveis rurais com área superior a 4 (quatro) módulos fiscais que possuam áreas consolidadas em Áreas de Preservação Permanente ao longo de cursos d'água naturais, será obrigatória a recomposição das respectivas faixas marginais:

I – VETADO; e

II - nos demais casos, em extensão correspondente à metade da largura do curso d'água, observado o mínimo de 30 (trinta) e o máximo de 100 (cem) metros, contados da borda da calha do leito regular (BRASIL, 2012).

Além de ainda determinar que se somadas todas as APPs do imóvel, está não poderá ultrapassar 10% (dez por cento) da área total, para imóveis rurais com área de até 2 (dois) módulos fiscais e 20% (vinte por cento) da área total do imóvel, para

¹ No município de Forquethinha, 1 (um) módulo fiscal corresponde a 18 hectares (ha) (FISCONET, 2012)

imóveis rurais com área superior a 2 (dois) e de até 4 (quatro) módulos fiscais (BRASIL, 2012b).

Figura 11: Largura das áreas de preservação permanente no entorno dos cursos de água



Fonte: Sema (2007)

Em regiões com topografia acidentada, as matas ciliares exercem a proteção do solo contra os processos erosivos, uma vez que atuam na estabilização de taludes através da grande malha de raízes que dá estabilidade aos barrancos (MARTINS, 2007), que além de dificultar o cisalhamento do solo, forma uma rede de canais que permite a interação da vazão com a margem, ou seja, a água fluvial consegue percolar através do solo marginal, reduzindo a taxa de erosão e permitindo, conseqüentemente, a estabilização da margem (GOMES, 2005).

3.2.1 Efeitos da mata ciliar sobre taludes fluviais

A vegetação ciliar possui características técnicas que podem ser utilizadas para controlar alguns processos fluviais, principalmente estabilizando taludes (SUTILI, 2004). De modo geral, citam-se os seguintes efeitos sobre taludes fluviais: interceptação de água da chuva, aumento da evapotranspiração, adição de peso, ancoragem do talude, produzem efeito de alavanca sobre o mesmo e recobrem o solo pelo acúmulo de serapilheira na superfície (FIGURA 12) (DURLO; SUTILI, 2005).

Figura 12: Efeitos da presença de uma árvore na estabilidade de um talude.



Fonte: Sutilli (2004)

Na maioria das vezes, a vegetação ciliar tem influência benéfica na estabilidade de encostas. Porém, ocasionalmente, pode afetar a estabilidade de maneira adversa ou apresentar outros impactos indesejáveis. Como exemplo, Durlo e Sutilli (2005), mencionam o efeito do sistema radical da vegetação, que providencia um reforço mecânico, acrescentando substancialmente a resistência das massas terrosas ao cisalhamento. No entanto, a vegetação origina uma sobrecarga vertical no talude, e a ação do vento sobre a copa de árvores altas transmite fortes tensões a este, enfraquecendo-a ou mesmo alavancando-a.

Nesse sentido, Sutilli (2004) apresenta uma adaptação, da concepção de diversos autores, dos efeitos hidrológicos e mecânicos da vegetação sobre a estabilidade de encostas e taludes (TABELA 1).

Tabela 1 - Efeitos da vegetação na estabilidade de encostas.

Efeitos Hidrológicos		Efeitos Mecânicos	
Copas:			
- retêm (evaporam) parte do volume de água, reduzindo a precipitação efetiva;	B	- aumentam a força normal, pelo peso da copa e do tronco;	A/B
- reduzem a força de impacto das gotas da chuva e, conseqüentemente, da erosão;	B	- defendem o solo da ação direta dos raios solares e do vento;	A/B
- aumentam o tamanho das gotas, o que resulta em maior impacto localizado;	A	- captam as forças dinâmicas do vento e a transmitem ao talude pelo tronco e sistema radicular.	A
- reduzem a infiltração efetiva no talude, devido à evapotranspiração.	A/B		
Serapilheira:			
- aumenta a velocidade e a capacidade do armazenamento de água;	A/B	- absorve, parte, do impacto mecânico que resulta do gotejamento e do trânsito de máquinas e animais;	B
- torna irregular e reduz a velocidade do escoamento superficial da água.	B	- protege o solo de outras forças erosivas, como vento, temperatura, etc.	B
Raízes:			
- melhoram a infiltração superficial da água no solo;	A/B	- auxiliam na criação dos agregados do solo por ação física e biológica;	B
- com o aumento da porosidade do solo, melhoram a sua permeabilidade;	A/B	- aumentam, substancialmente, a resistência do solo ao cisalhamento;	B
- retiram parte da água infiltrada que será transformada ou evapotranspirada;	B	- ancoram as linhas de fratura;	B
- criam pressões neutras nos poros aumentando a coesão do solo.	A/B	- redistribuem as tensões formadas nos pontos críticos;	B
		- restringem os movimentos e ajudam a suportar o peso do talude.	B

A-adverso B-benéfico. Fonte: Sutilli (2004)

Diversas estratégias e procedimentos podem ser adotados para maximizar os efeitos benéficos da vegetação e minimizar seu ônus. Essa estratégia inclui a seleção de espécies apropriadas para as condições específicas do local e os objetivos de estabilização, monitoramento da vegetação, de forma a mitigar quaisquer características indesejáveis, nesse caso, estão inclusos procedimentos como podas, desbastes, capinas e adubação (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2011).

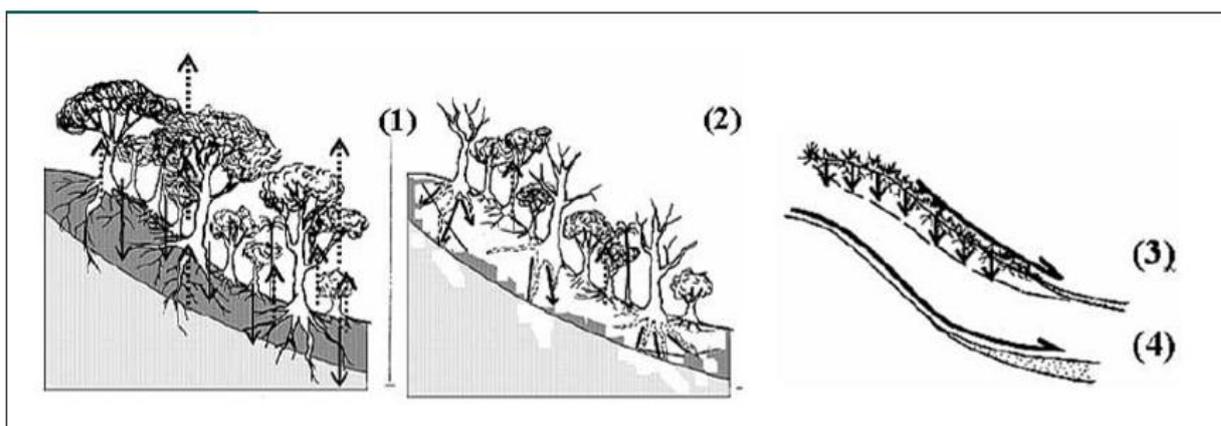
Durlo e Sutilli (2005) também aconselham a poda ou desbaste da vegetação nos taludes, afirmando que pode gerar efeito de renovação e estímulo ao enraizamento. Por vezes, a retirada singular de árvores maduras (de grande porte)

não só é possível como, por vezes, necessária à manutenção da estabilidade da encosta, favorecendo novas brotações ou para que as mesmas sejam natural ou artificialmente substituídas.

Se por um lado o desenvolvimento da vegetação ciliar em encostas reforça o solo e melhora a estabilidade do talude. De forma recíproca, a sua remoção pode enfraquecer o solo e desestabilizar as encostas (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2011). Um dos primeiros estudos sobre essa questão foi conduzido por Bishop e Stevens (1964), em áreas desmatadas do sudeste do Alasca. Os pesquisadores notaram um aumento significativo na frequência e tamanho da área afetada pelos deslizamentos, após um desmatamento. Eles concluíram que a destruição e a gradual deterioração dos sistemas radiculares interconectados eram a causa principal do aumento de deslizamentos.

Corrêa (2004) afirma que a morte ou retirada das espécies vegetais arbóreas implica no apodrecimento das raízes de ancoragem destes indivíduos e, conseqüentemente, também dos solos em sua volta, permanecendo apenas os dutos (ou drenos) que favorecem a recarga de água da chuva em profundidade (FIGURA 13).

Figura 13: Regressão florestal em decorrência da morte ou retirada de espécies arbóreas.



Interações biota-solo-água: 1 - Floresta conservada; 2 - Floresta degradada; 3 - Gramíneas e 4 - Solo exposto. As setas em linha cheia indicam a direção dos fluxos d'água; as setas pontilhadas indicam as perdas por evapotranspiração.

Fonte: Santos (2007)

O surgimento de dutos implica, por um lado, na perda de resistência dos solos, anteriormente adicionada pelas raízes e, por outro, na alteração das funções reguladoras da evapotranspiração que controlavam a perda gradual de água do

solo. Em outras palavras, a infiltração das águas de chuvas e a saturação dos solos tendem a manter as mesmas taxas e, neste contexto, tanto as áreas de florestas degradadas, como as áreas sob gramíneas tendem a se tornar mais susceptíveis aos deslizamentos. As áreas com solos expostos, onde a capacidade de infiltração decresce acentuadamente, tornam-se produtoras de escoamento e erosão superficial, que na ausência de medidas corretivas imediatas tendem a expandir e se aprofundar com descarga pluvial concentrada durante as chuvas subsequentes (SANTOS, 2007).

O desflorestamento de zonas ripárias aumenta a violência do impacto de eventos de chuva. Após a precipitação, a água alcança o curso do rio com grande velocidade, pois não existem as regiões de armazenamento proporcionadas pela vegetação ripária. A água precipitada, que geralmente alcançava o curso do rio por escoamento subsuperficial, escoamento subterrâneo e escoamento superficial, agora chega predominantemente por escoamento superficial. Com o transbordo da calha do rio em áreas desflorestadas e, portanto, desprotegidas, irá ocorrer erosão laminar e perda de solo fértil, que será depositado no leito do curso de água, reduzindo sua profundidade e aumentando a probabilidade de enchentes (CHECCHIA, 2003).

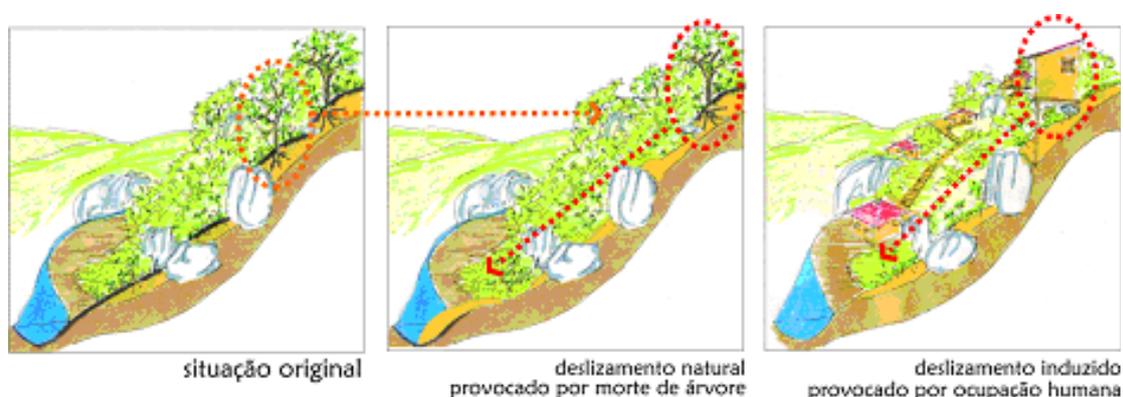
Percebe-se, diante do exposto, que a vegetação ciliar afeta a estabilidade dos taludes dos cursos de água e das encostas de diversas maneiras. Na maior parte das vezes, tem uma influência benéfica, entretanto, sua ausência ou porte podem afetar a estabilidade de maneira adversa ou apresentar outros impactos indesejáveis, que afetam a vulnerabilidade de um ambiente e, conseqüentemente, sua qualidade ambiental. Nesse sentido, a bioengenharia de solos e os métodos biotécnicos podem ser vistos como estratégias e procedimentos para minimizar o ônus da vegetação ou sua ausência, enquanto maximiza seus benefícios (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2011).

3.3 Qualidade ambiental dos taludes fluviais

Os processos erosivos e os movimentos de massa são fenômenos naturais que já ocorrem há milhões de anos, mas que se intensificaram nos últimos anos em decorrência da interferência resultante das formas de ocupar o espaço pelo ser

humano. Em um curto período de tempo, foi capaz transformar e extinguir paisagens por meio de suas ações. O homem gera impactos ambientais, ou seja, consequências indesejadas ou que comprometem o equilíbrio e o estado existente de um ambiente, em virtude do tipo, da intensidade e da velocidade de promover mudanças por meio de suas atividades. Muitas vezes, basta olhar as condições em que se encontra um território, os tipos, a estrutura e a forma de manejo das atividades humanas, que facilmente conduzimos a interpretação dos impactos existentes (SANTOS, 2007) (FIGURA 14).

Figura 14: Deslizamentos naturais e induzidos pelo homem



Fonte: Santos (2007)

A partir do momento que se provoca uma perturbação em um ambiente, a resposta do meio pode ser bastante diferente em função das características locais naturais e humanas. Ou seja, cada fração de território tem uma condição intrínseca que, em interação com o tipo e magnitude do evento induzido, resulta numa grandeza de efeitos adversos. Essa condição é conceituada de vulnerabilidade. Se for possível observar e medir as relações entre características de um meio, eventos induzidos e efeitos adversos estar-se-á, na verdade, medindo a vulnerabilidade ambiental de uma área (SANTOS, 2007).

Segundo Santos (2007), para entender vulnerabilidade deve-se considerar duas outras questões: a persistência e a resiliência de uma paisagem, onde:

- Persistência é um atributo do quanto um sistema, quando perturbado, se afasta do seu equilíbrio ou estabilidade sem mudar essencialmente seu estado;
- Resiliência é a capacidade de um sistema retornar a seu estado de equilíbrio, após sofrer um distúrbio (FIGURA 15).

Figura 15: Persistência e resiliência de uma paisagem



Fonte: Santos (2007)

Em um território de baixa persistência e baixa resiliência provavelmente a vulnerabilidade é alta e, neste caso, quase sempre se provoca danos irreparáveis, resultantes de um ou mais eventos adversos sobre um espaço vulnerável que podem ser de origem natural ou provocada pelo homem (SANTOS, 2007).

Associado a vulnerabilidade, tem-se a qualidade ambiental, que pode ser considerada como um equilíbrio entre os elementos da paisagem através de um ordenamento do espaço, conciliando principalmente os benefícios da vegetação com os diversos tipos de usos do solo através de um planejamento (LIMA; ZAKIA, 2000). Quando alterada, pode provocar alterações por toda cadeia a qual pertence, ou seja, o estado de um elemento é condicionante e determinante do estado de outro elemento, e, assim, sucessivamente (SANTOS, 2007). Logo, conclui-se que mais facilmente a qualidade ambiental pode ser comprometida em função de alterações de ordem natural e antropogênica.

Para Santos (2007), não existe dúvida de que o ser humano precisa ser responsabilizado pela qualidade ambiental de um ambiente, devendo garantir um conjunto de condições que, de forma interativa, assegurem a necessidades e a sobrevivência dos seres vivos, bem como possa proporcionar níveis de persistência e resiliência elevados para os ambientes em que se insere ou já está inserido.

Historicamente, ao se buscar técnicas passíveis de contribuir na melhora da qualidade ambiental de um local, surgem modelos que vão desde a construção de pesadas obras de engenharia, até as fugazes campanhas de educação ambiental, que apresentam a simples revegetação (o reflorestamento) das margens como solução. As primeiras solucionam os problemas, porém, além de onerosas, produzem drásticas modificações na paisagem, por vezes são desnecessárias e

nem sempre respondem da melhor maneira aos anseios ecológicos, econômicos e estéticos. Por outro lado, as numerosas campanhas de educação ambiental e distribuição de mudas à comunidade, sem que se leve em consideração aspectos técnicos que garantam a estabilização das margens, quase nunca são capazes de produzir os efeitos práticos esperados (DURLO; SUTILI, 2005).

3.3.1 Bioengenharia de solos

Atualmente, as tradicionais técnicas de engenharia, além de causarem a perda dos benefícios ecológicos de um ambiente fluvial, também costumam transferir os problemas decorrentes dos processos erosivos para outras áreas do fluxo. Os métodos tradicionais costumam focar sua solução especificamente nas áreas que apresentam o problema, sem levar em conta quais as consequências que poderão advir da intervenção realizada. A função de equilíbrio, normalmente, é interrompida quando os métodos tradicionais são usados para forçar condições artificiais em uma rede de drenagem e separar a forma física do fluxo e do processo fluvial (LI; EDDLEMAN, 2002).

Nesse contexto, como alternativa ao exposto, é possível optar por um campo conhecido como bioengenharia, que consiste no uso de elementos biologicamente ativos, combinados a elementos inertes em obras de estabilização e/ou de recomposição de encostas, áreas degradadas e margens de sangas, arroios, córregos e rios. Como elementos ativos, pode citar-se a vegetação, e como elementos inertes, os concretos, madeiras, ligas metálicas, polímeros naturais e sintéticos. Essa técnica de estabilização utiliza as raízes e os caules como elementos estruturais e mecânicos para a contenção e proteção de solos, em diferentes arranjos geométricos (PINTO, 2009, DURLO; SUTILI, 2005).

As referidas tecnologias, hoje conhecidas como bioengenharia de solos, podem ser atribuídas a povos antigos da Ásia e da Europa. Historiadores chineses, por exemplo, registraram utilização de técnicas de bioengenharia para a reparação de diques, desde o ano de 28 a. C. Relatos de antigos visitantes acidentais à China evidenciam que eram utilizados grandes cestos de tecidos com salgueiro, cânhamo ou bambu, preenchidos com pedras, para estabilizar margens de rios e barragens. Na Europa, os camponeses celtas criaram técnicas para tecer galhos de salgueiro para criar cercas e paredes (LEWIS, 2000).

Por volta do século XVI, as técnicas de bioengenharia desenvolvidas estavam sendo utilizadas e sistematizadas por toda Europa, enquanto que, durante o mesmo período na Áustria, bioengenheiros estavam desenvolvendo técnicas de construção de barreiras vivas contra sedimentação, plantando linhas de estacas de plantas em cursos de água para aprisionamento de sedimentos e reforma de canais. Nos Estados Unidos, o uso da bioengenharia data os anos de 1920, nos quais foram realizadas estabilizações de erosões em margens de rios e taludes (SUTILI, 2004).

O maior incentivo para o desenvolvimento de novas técnicas de bioengenharia de solos na Europa aconteceu durante o desenvolvimento político na década de 1930. Restrições financeiras de pré-guerra, que aconteceram durante anos na Alemanha e na Áustria, favoreceram o uso de técnicas de custo moderado, de materiais locais e métodos construtivos tradicionais para projetos públicos (LEWIS, 2000).

Posteriormente, após a Segunda Guerra Mundial, com o aumento do emprego de equipamentos para movimentação de terra e com o surgimento de técnicas estruturais para estabilização de erosões, as práticas de bioengenharia praticamente desapareceram (SUTILI, 2004). Alguns bioengenheiros alemães e austríacos continuaram a estudar, desenvolver e avaliar novas técnicas, bem como publicá-las durante as décadas de 1950 e 1960, fato que é considerado importante no lançamento de uma abordagem mais estrutural e incentivando o desenvolvimento do campo profissional da Bioengenharia (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2011).

As principais publicações decorrentes desse período foram feitas por Arthur von Kruedener, em 1951, com o livro *Ingenieurbiologie* (Engenharia de Biologia), cuja tradução inadequada do título alemão, deu origem ao termo Inglês, *bioengineering* (bioengenharia), utilizado atualmente. Posteriormente, surgiu Hugo Schiechtl, em 1980, que juntamente com diversos outros bioengenheiros (Lorenz, Hassenteufel, Hoffman e Courtorier) publicaram o livro *Bioengineering for Land Reclamation and Conservation* (Bioengenharia para recuperação e conservação da terra). Hugo Schiechtl também publicou, em 1997, o livro *Ground Bioengineering Techniques for Slope Protection and Erosion Control* (Técnicas de Bioengenharia de solos para proteção de taludes e controle da erosão) (LEWIS, 2000).

Publicações subsequentes tornaram as tecnologias de bioengenharia mais conhecidas no exterior, principalmente nos Estados Unidos e Europa (em especial

na Alemanha, Suíça e Austria), onde as técnicas têm sido utilizadas e reconhecidas cada vez mais como excelentes alternativas no combate à erosão (LEWIS, 2000). No entanto, ainda há resistência em muitos países, inclusive no Brasil, justamente pelo fato de ser pouco conhecida e divulgada (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2011), além dos poucos conhecimentos sobre as características das plantas potencialmente utilizáveis, o que possibilitaria a implantação segura desse tipo de obra (DURLO; SUTILI, 2005).

No Rio Grande do Sul, em Santa Maria, diversos estudos e experimentos vêm sendo conduzidos, ao longo de vários anos, por Durlo e Sutili (2005) na área da bioengenharia e tidos como referência nessa área. No Vale do Taquari, destaca-se a iniciativa do município de Estrela, que utilizou técnicas de bioengenharia no controle de processos erosivos fluviais, nas margens do Rio Taquari/RS. As obras nesse município são coordenadas e supervisionadas pelo Biólogo Émerson Musskopf.

A bioengenharia de solos atua no fortalecimento do solo, na melhoria das condições da margem de drenagem e na retenção das movimentações de terra (PINTO, 2009; DURLO; SUTILI, 2005) e favorecem o desenvolvimento da cobertura vegetal (GOMES, 2005). De acordo com Venti et al. (2003), essas intervenções apresentam uma variedade de funções relacionadas em diversos âmbitos, como:

- **Técnico - Funcionais:** Resolução de problemas técnicos, como a consolidação de margens fluviais ou a estabilização de uma vertente em risco de desmoronamento, redução da erosão fluvial, proteção do terreno contra a erosão, sistematização hidrogeológica e aumento da retenção das precipitações, bem como para o melhoramento da drenagem.
- **Naturalísticas - Ecológicas:** Permitem a recriação das condições ecológicas de base, dando início aos processos que tendem para ecossistemas evoluídos com um máximo de biodiversidade e heterogeneidade. Além disso, contribuem para o melhoramento das características físico-químicas do terreno e dos cursos de água, permitindo a recuperação de áreas degradadas e o desenvolvimento de associações vegetais autóctones. Com a criação de macro e micro ambientes naturais, é possível obter um aumento da biodiversidade local e territorial.

- **Estético - Paisagístico:** Enriquecimento da paisagem por meio da criação de novos elementos, estruturas, formas e cores de vegetação, bem como integração de estruturas na paisagem.

- **Socioeconômica:** Relativa ao benefício social induzido, à gestão econômica dos recursos naturais e à economia obtida em comparação às técnicas tradicionais em termos de custos de construção e de manutenção de algumas obras.

A técnica também é conhecida como bioengenharia de solos (PINTO, 2009), engenharia biotécnica (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2011, DURLO; SUTILI, 2005), engenharia biofísica (FREITAS, 2006), além de inúmeras outras nomenclaturas. Segundo Durlo e Sutili (2005), quando se restringe aos cursos de água, a bioengenharia pode ser denominada de manejo biotécnico de cursos de água, cuja ideia é aproveitar as vantagens dos dois tipos de material (inerte e vivo), para se conseguir a estabilização e ou recuperação das áreas tratadas, sem se descuidar dos aspectos ecológicos e econômicos envolvidos.

3.3.1.1 Manejo de cursos de água

Lewis (2000) afirma que ao se conhecer o clima e a vegetação de uma área, é possível prever a natureza dos solos. No entanto, existem muitas exceções resultantes da diferença de materiais de origem, drenagem, declividade e o tempo que o solo foi exposto a essas condições ambientais. A autora afirma que se deve considerar a história natural e evolutiva, bem como, cultural e social da paisagem circundante. A consciência desses fatores, e como eles moldam a paisagem atual e futura, é fundamental para o sucesso do projeto.

Em casos em que se busca a estabilidade de um talude fluvial, pode-se optar por reduzir a velocidade da água e, conseqüentemente, o seu potencial erosivo e ou aumentar as forças de resistência do talude. Neste caso, as biotécnicas podem proporcionar tanto um quanto outro, ou ainda ambos os efeitos (SUTILI, 2004).

No tratamento de cursos de água com o uso de biotécnicas, devem-se seguir os princípios da manutenção da morfologia típica do curso e a dinâmica das águas. Logo, é necessário evitar a retificação, a eliminação de poços, a uniformização da velocidade e da largura do curso de água. Ao mesmo tempo, deve-se buscar a

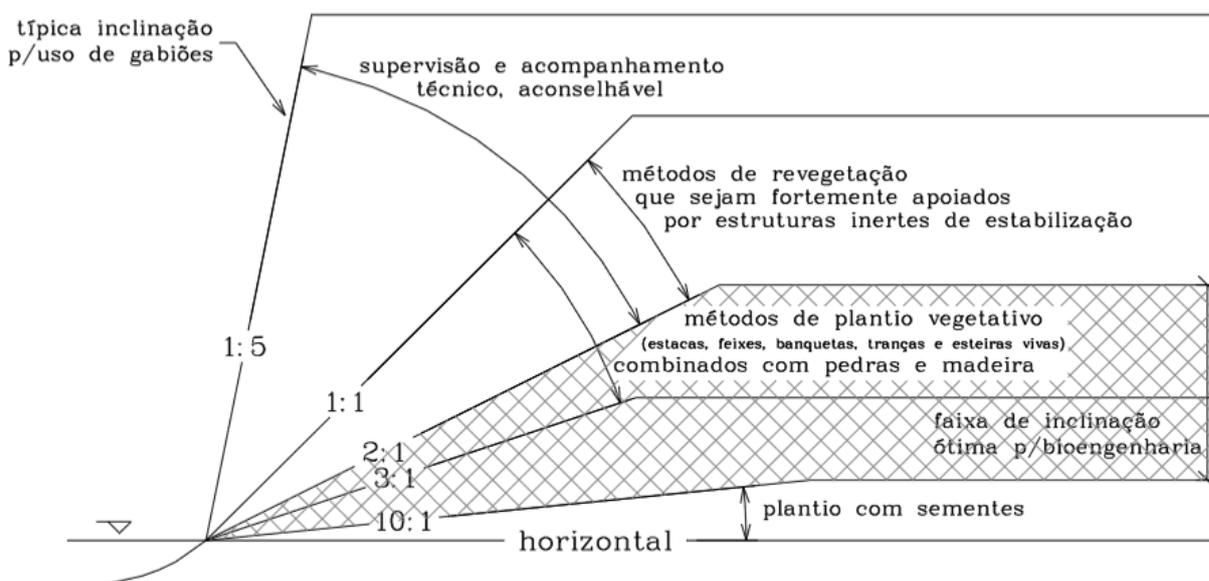
implantação, o desenvolvimento e o tratamento com vegetação ecologicamente adequada para o lugar, levando-se em conta a multifuncionalidade do curso de água e, ao fazer exploração agrícola ou florestal das áreas ribeirinhas, ter em vista a proteção dos rios (SCHIECHTL; STERN, 1997).

Além da solução técnica do problema, devem ser considerados os critérios ecológicos, econômicos e estéticos. Procura-se, desta forma, manter a morfologia do canal natural, com meandros e perfis transversais assimétricos, e sugere-se a preservação ou a criação de *habitats* naturais para a flora e a fauna. Muitas vezes, os efeitos da corrosão e dos deslizamentos em um talude fluvial evoluem a tal ponto que o desenvolvimento de vegetação torna-se difícil ou mesmo impossível (SUTILI, 2004).

Segundo Fisrwg (1998), quando o declive apresentado pelo talude da margem de um curso de água não proporcionar a estabilidade necessária, o primeiro passo é redesenhá-lo, buscando um gradiente adequado. Nos gradientes superiores a aproximadamente 1:1 (45°), o restabelecimento da vegetação torna-se muito difícil, necessitando-se do uso de métodos mais tradicionais, com um maior investimento em estruturas inertes ou o uso de geotêxteis.

Fisrwg (1998) aconselha o uso de diferentes técnicas (métodos) de estabilização, com base na inclinação do talude (FIGURA 16). À medida que as encostas ou taludes fluviais se tornam mais abruptos e ou mais estáveis, tanto mais é necessária a utilização de formas e arranjos especiais para a revegetação, como também o emprego e combinação das estruturas inertes e estruturas ativas. Ressalta que declives cortados em terraços pequenos, com próximas de 3:1 podem ser mais adequados, proporcionando melhor acúmulo de umidade e melhorando o desenvolvimento das plantas.

Figura 16: Determinação do método apropriado em função da inclinação da margem



Fonte: Sutili (2004), adaptado de Fisrweg (1998).

Nas margens de um curso de água, Durlo e Sutili (2005) ressaltam que a corrosão acontece pela retirada do apoio do talude da margem devido à força da correnteza, ao turbilhonamento e a ação das ondas junto à faixa que acompanha o nível normal da água. Esta região deve, então, receber atenção especial, principalmente com o apoio de materiais inertes na sua base, que auxiliam o futuro estabelecimento da vegetação.

Durlo e Sutili (2005), ainda destacam que se precisa ter em mente que as obras de bioengenharia não alcançam total efetividade logo após a implantação e que primeiro é necessário aguardar a pega e o desenvolvimento radicial e aéreo das plantas. Afirmam que durante a fase de pega e desenvolvimento, podem ser necessárias intervenções de reposição vegetal e ou tratamentos culturais e que somente após a fase de implantação, cuja duração depende de diversos fatores, é que as obras começam a desempenhar integralmente sua ação corretiva e duradoura sobre o problema que se pretende solucionar.

A atuação da água sobre as margens, embora possa ser prevista com certa probabilidade, só é detectada e levada em consideração, quando os problemas dela decorrentes são bem visíveis e começam a causar preocupação. Ao observar uma erosão recente, deve-se pensar em tomar tão logo uma medida corretiva, especialmente se determinados bens materiais estiveram ameaçados. Diversas vezes, no entanto, a adoção de medidas estabilizadoras de duração mais longa

torna-se impossível, por diversos motivos, como falta de tempo, a limitação de recursos ou por se estar em um período de cheias, que dificultam ou impedem o acesso e o trabalho nos locais problemáticos (DURLO; SUTILI, 2005).

Durlo e Sutili (2005) afirmam que nos casos em que a tomada de medidas duradouras for apenas à falta de recursos ou de tempo, a solução parcial dos problemas pode ser a adoção de uma solução temporária que representa, simultaneamente, uma medida preventiva e preparatória para ações mais incisivas posteriormente.

Os métodos disponíveis para o manejo de cursos de água são separados em dois grupos distintos: **manejo passivo e manejo ativo de cursos de água**. No manejo passivo, não há interferência direta na fisiografia fluvial, enquanto que, no manejo ativo, são feitas diversas modificações físicas no canal (produzindo retificação, suavização das curvas, eliminação de empecilhos ao livre fluir da água) e no leito (modificando características de seu perfil longitudinal e transversal, como a inclinação, a profundidade, a largura e características dos taludes). Enquadram-se, no manejo passivo de cursos de água, as ações preventivas feitas geralmente para a bacia hidrográfica como um todo, visando interferir indiretamente no comportamento hídrico. Essas ações consistem, basicamente, na alocação das diferentes atividades econômicas em harmonia com as características ecológicas (edáficas, hidrológicas e topográficas) dos diferentes locais (DURLO; SUTILI, 2005).

Dentre as medidas tomadas pelo manejo passivo estão o isolamento de faixa marginal (prevista no Código Florestal Brasileiro, referido anteriormente) e a proteção da regeneração natural. A proteção da regeneração natural consiste, sobretudo, no compromisso de não efetuar roçadas, queimas, capinas e de não usar herbicidas e similares na faixa de isolamento marginal. Exceção a este preceito deveria ser conferida às ações que venham a contribuir para o estabelecimento e desenvolvimento de espécies de características biotécnicas mais desejáveis (DURLO; SUTILI, 2005).

Afirmam ainda que no manejo ativo de cursos de água, as ações direcionam-se a áreas relativamente pequenas, que apresentam problemas mais intensos. Este grupo engloba as atividades de limpeza dos leitos, além de medidas biotécnicas que utilizam obras longitudinais e transversais isoladas ou combinadas, além do recapeamento vegetal das margens valendo-se de diferentes métodos de plantio.

3.3.1.2 Tipologias de intervenção

Segundo Fisrwg (1998), a bioengenharia preconiza diversas formas de revegetação e modelos de construção. O efeito proporcionado e os resultados conseguidos ficam na dependência tanto do tipo de material e modelo de construção, bem como das espécies vegetais e forma de revegetação que se combinam à estrutura. Os efeitos, em comparação a outros métodos, são ganhos para ecologia, economia e para os aspectos paisagísticos que, na da dependência dos objetivos e tipologia da construção, pode-se dar mais ênfase a um ou outro dos aspectos. O objetivo é evitar construções grandes e pesadas, procurando-se modificar o mínimo as condições naturais preexistentes (DURLO; SUTILI, 2005).

Durlo e Sutili (2005) dividem as obras de bioengenharia em dois grupos, segundo a sua posição em relação ao eixo do curso de água e sua função: as longitudinais e as transversais. As obras longitudinais não alteram a declividade do leito e sua função é mais especificamente reconstruir e ou proteger e estabilizar as margens. As transversais têm como principal efeito a redução da velocidade da água através do desenvolvimento de um perfil de compensação que modifica a inclinação original do leito e, conseqüentemente, força o depósito de sedimentos, consolida o leito e estabiliza as margens.

À divisão dos autores acima citados, acrescenta-se a de Allen e Leech (1997) e Hoag e Fripp (2002) que dividiram as margens dos cursos de água em quatro zonas, considerando os diferentes níveis de elevação, frequência e duração da permanência das águas, sendo elas denominadas de *Toe zone*, *Splash zone*, *Bank zone* e *Terrace zone* (FIGURA 17), para então indicar as intervenções adequadas para cada zona.

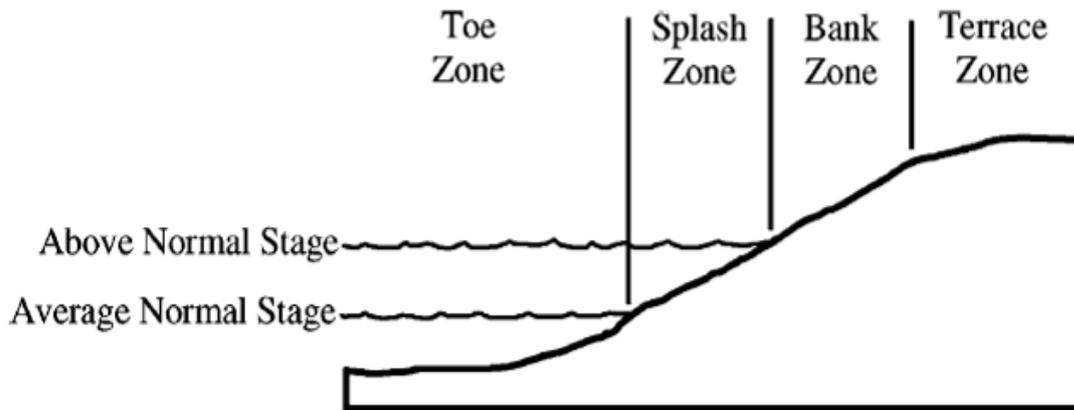
Toe zone: A parte da margem situada entre o fundo e a fase média normal atingida pela água.

Splash zone: A parte da margem situada entre níveis de fase média normal e alta das águas.

Bank zone: A parte da margem situada acima do nível alto de alcance das águas, mas que também pode ser alcançados quando da ocorrência de casos mais extremos de cheias.

Terrace zone: A parte da margem que se situa fora do alcance habitual dos níveis de água. Essa zona é menos significativa para a proteção da margem, em virtude da baixa frequência de inundação, mas que pode ser facilmente erodida quando for inundada e não possuir vegetação presente.

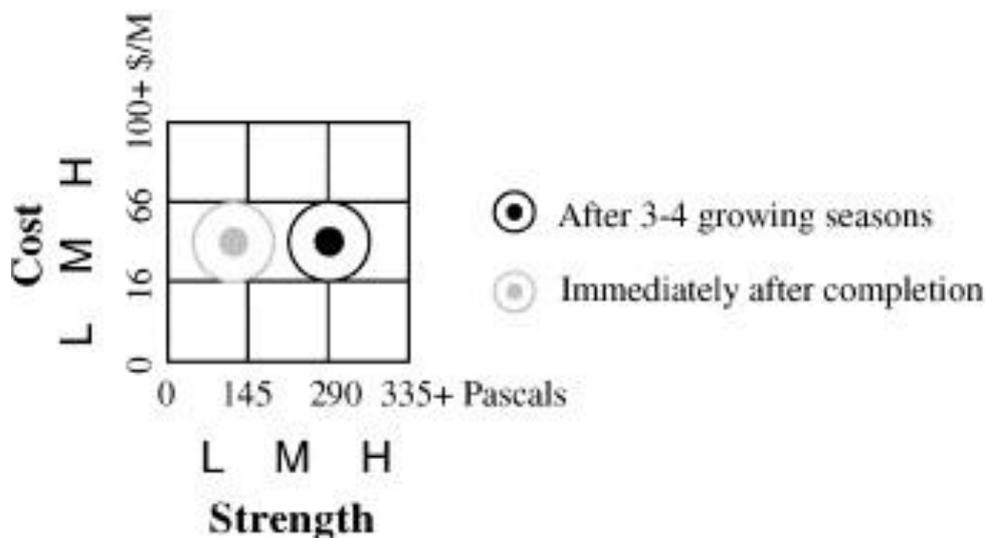
Figura 17: Divisão da margem de curso de água em zonas



Fonte: Li e Eddleman (2002)

À divisão das zonas, Li e Eddleman (2002), contribuíram com o desenvolvimento de uma matriz que avalia o custo e a força das obras de bioengenharia. Desenvolveram uma matriz em que os eixos X e Y são divididos em três níveis: baixo (L), médio (M) e alto (H), sendo que o eixo X indica força e o eixo Y indica os custos estimados da obra (FIGURA 18).

Figura 18: Matriz de avaliação do custo/força

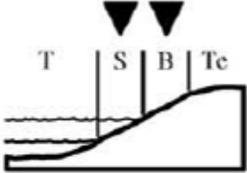
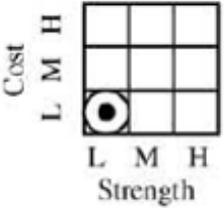
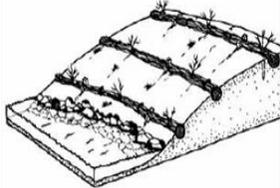
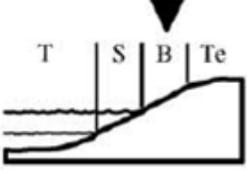
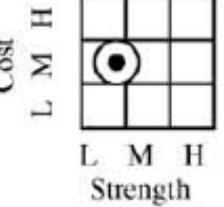
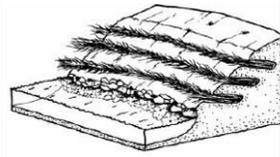
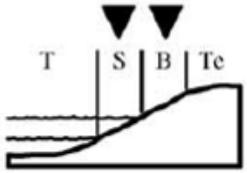
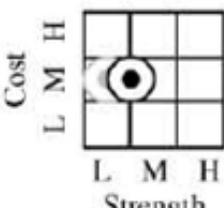


Fonte: Li e Eddleman (2002)

Na matriz, apresentada pela Figura 18, também pode ser observado um círculo concêntrico, cuja localização indica os valores de custo/força, sendo que o círculo pequeno está localizado, aproximadamente, no valor médio e o círculo grande, no valor que cobre a maior parte dos valores informados nas literaturas. Para métodos que apresentam resistência fraca na fase inicial, após a conclusão, é mostrado um círculo cinzento concêntrico que indica a resistência durante essa fase. Na possibilidade da força do método biotécnico aumentar com o tempo, ainda é apresentado um círculo concentrico escuro. As unidades para o "custo" e "força" foram dólares americanos por metro pascal (newtons por metro quadrado), respectivamente, com os valores relativos mostrados na Figura 18 (LI; EDDLEMAN, 2002).

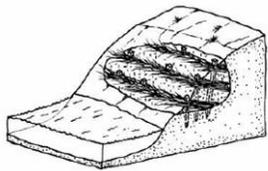
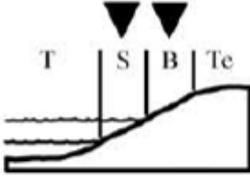
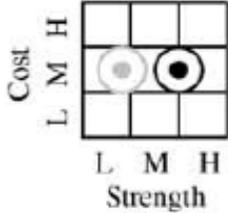
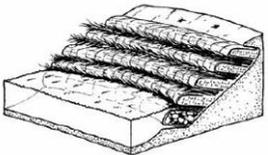
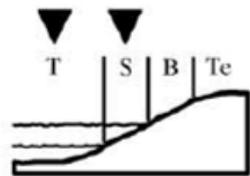
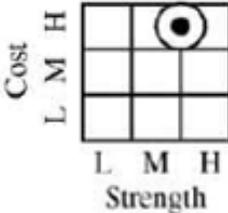
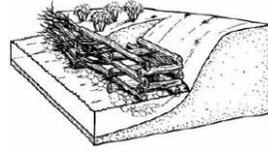
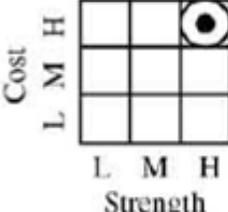
As tipologias de intervenção comumente utilizadas pela bioengenharia, com base nas contribuições de Li e Eddleman (2002); Durlo e Sutili (2005); Allen e Leech (1997), Gray e Sotir (1996) e Hoag e Fripp (2002), são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipologias biotécnicas

Nome	Ilustração	Breve descrição	Zona de aplicação	Característica principal (função)	Matriz Custo/resistência
Estacas		Corresponde a utilização de troços de troncos ou ramos com mais de 3 anos, com casca fina, sem ramagem lateral, com comprimentos entre 40 e 100 cm, cravadas no talude.		Estabilizar taludes e margens fluviais de baixo declive, como também podem ser utilizadas como elementos de fixação de outras tipologias de bioengenharia.	
Feixes / caniçadas vivas		Ramos longos, amarrados, formando feixes. São usados parcialmente enterrados e fixados com estacas e pedras, dispostos ao longo da margem.		Além do efeito esperado pelo desenvolvimento da vegetação, também produzem imediata proteção física. Oferecem excelente proteção contra a erosão superficial. É a forma ideal para ser usada entre os vãos das estruturas de madeira.	
Banquetas		Ramos intercalados entre camadas do solo. Os feixes são colocados em um modelo entrelaçado ou sobreposto, de forma que as extremidades se projetem além da face da margem.		Utilizados para estabilizar a margem a deslizamentos superficiais, além de fornecer proteção contra a erosão. Os ramos que se projetam além da face da margem, retardam a velocidade do fluxo e filtram os sedimentos para fora do escoamento superficial.	

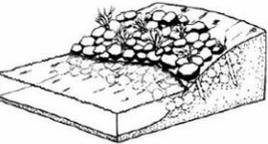
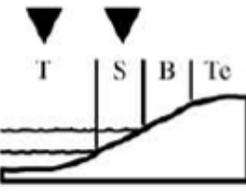
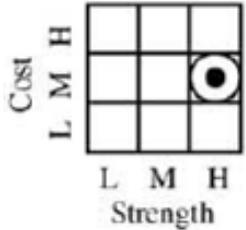
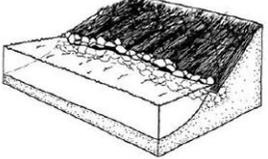
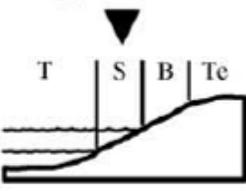
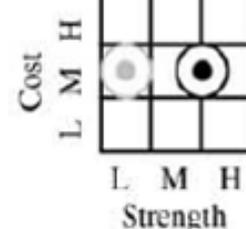
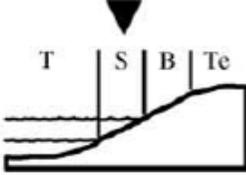
Continua.

Tabela 2: Tipologias biotécnicas

Nome	Ilustração	Breve descrição	Zona de aplicação	Característica principal (função)	Matriz Custo/resistência
Empacotamento de ramos		O empacotamento dos ramos consiste em se alternarem camadas de estacas de ramos vivos e solo compactado para reparar cicatrizes e depressões nas margens.		Utilizados no reparo e preenchimento de movimentos de massa menores (depressões de até 1,20 m de profundidade e 1,50 m de largura). Reforça a margem e protege contra o escoamento superficial e processos erosivos.	
Geogrelhas vegetadas		É semelhante à técnica de empacotamento de ramos, no entanto é mais apropriada para o reparo e preenchimento de depressões alongadas. O empacotamento pode ser natural ou com materiais sintéticos (geotêxteis).		Utilizados no reparo e preenchimento de movimentos de massa maiores (até 0,60 m de profundidade, 4,50 m de comprimento e 0,60 m de largura). Reforça a margem e protege contra o escoamento superficial e processos erosivos.	
Parede vegetada de madeira (Parede Krainer)		Combinação de madeira e blocos de pedras, porém sempre complementadas por material vegetativo (estacas ou feixes vivos).		Tem por finalidade organizar e fixar os materiais sobre as margens, de maneira a conseguir o máximo de estabilidade e proteção física. O material vegetativo serve para acelerar e garantir a estabilidade, bem como melhorar o aspecto estético da margem.	

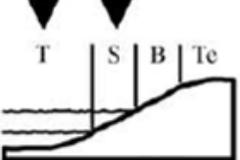
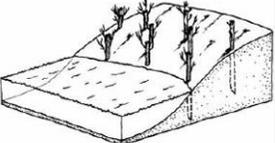
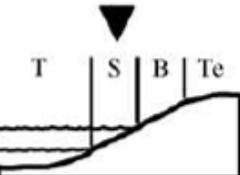
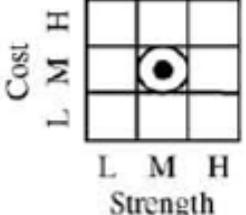
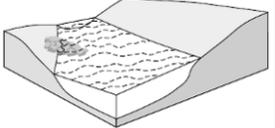
Continuação.

Tabela 2: Tipologias biotécnicas

Nome	Ilustração	Breve descrição	Zona de aplicação	Característica principal (função)	Matriz Custo/resistência
Enrocamento vivo		Consiste na colocação de pedras de grandes dimensões nas margens, sendo que nos interstícios entre as pedras, são colocadas estacas vivas.		É eficaz em reduzir a erosão nas margens, além de melhorar a estética de enrocamento existente pelo desenvolvimento das estacas.	
Esteira viva		Ramos no seu máximo comprimento, dispostos acompanhando a inclinação da margem e com suas bases dentro da água, fixados a pedras ou troncos por ramos de bambu ou arame, e cobertos por uma camada de solo.		Restringe-se a taludes fluviais e requer grande quantidade de material vegetativo. Muito eficiente em margens nas quais a força da água é de impacto frontal.	
Revestimento com árvores		Uma fileira de árvores interconectadas e colocadas ao longo da margem do curso de água.		Vantajoso em fluxos onde o leito é instável. Atua principalmente nos raios externos das curvas dissipando a capacidade erosiva do fluxo e estimulando a deposição de sedimentos nesse ponto.	Não avaliada

Continuação.

Tabela 2: Tipologias biotécnicas

Nome	Ilustração	Breve descrição	Zona de aplicação	Característica principal (função)	Matriz Custo/resistência
Revestimento de pedregulhos e troncos com raízes		Pedras e troncos com raiz, colocados no interior e às margens de cursos de água.		Propiciam estruturas ecológicas que melhoram o <i>habitat</i> de peixes, reforçam a margem e protegem contra processos erosivos, além de possibilitarem a deposição de sedimentos nos locais em que estão instalados.	Não avaliada
Plantação de lenhosas		Técnica semelhante do revestimento com árvores, porém nesse as árvores são plantadas na margem, ao modo que formam filas adjacentes ao fluxo, formando uma barreira permeável.		Atuam na redução da velocidade do fluxo da água e favorecem o deposição de sedimentos nas margens.	
Defletores, râmprolas ou espigões transversais.		Estruturas que se projetam a partir da margem, mas que não chegam a atravessar toda a seção transversal do curso de água.		São responsáveis por conduzir a água para o centro da torrente e provocar depósito de materiais transportados, em locais desejados.	Não avaliada

Conclusão.

As Figuras 19 – 30, apresentadas na sequência, ilustram as tipologias biotécnicas aplicadas em situações reais.

Figura 19: Estacas



Fonte: [www.terraerosion.com/Cottonwood Creek CommunityProject.htm](http://www.terraerosion.com/CottonwoodCreekCommunityProject.htm)

Figura 20: Feixes / caniçadas vivas



Fonte: www.terraerosion.com/projects/work/riparian-restoration/project3-baldface/restoration-project3.htm

Figura 21: Banquetas



Fonte: www.dot.ca.gov/hq/LandArch/ec/plants/brush_layering.htm

Figura 22: Empacotamento de ramos



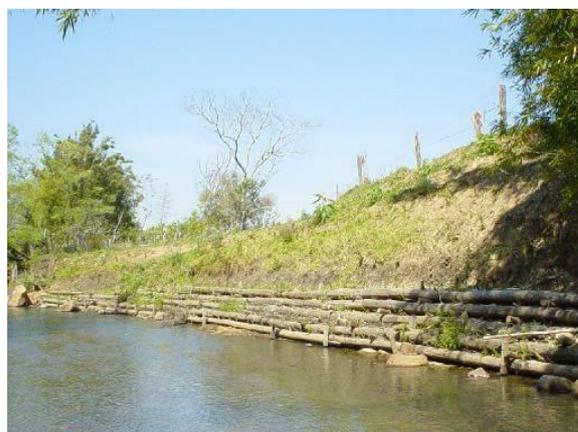
Fonte: www.dot.ca.gov/hq/LandArch/ec/plants/brush_layering.htm

Figura 23: Geogrelhas vegetadas



Fonte: www.sotir.com/publications/use_riprap.html

Figura 24: Parede Krainer



Fonte: Sutilli (2004)

Figura 25: Enrocamento vivo



Fonte: http://www.sotir.com/publications/use_riprap.html

Figura 26: Esteira viva



Fonte: SMMASBE (2010)

Figura 27: Revestimento com árvores



Fonte: <http://www.chestchatrcd.org/id6.html>

Figura 28: Defletores



Fonte: SMMASBE (2010)

Figura 29: Plantação de lenhosas



Fonte: [web.extension.illinois.edu/cca/? Streambank/slide/48](http://web.extension.illinois.edu/cca/?Streambank/slide/48)

Figura 30: Revestimento de pedregulhos e troncos com raízes



Fonte: Fisrwg (1998)

Comumente, as técnicas de bioengenharia descritas e apresentadas são empregadas para solucionar problemas nos ambientes fluviais, notadamente decorrentes do processo erosivo natural dos cursos de água e/ou resultantes de ações antrópicas, envolvendo tanto as perdas econômicas quanto situações de riscos. No entanto, essas técnicas podem ser estudadas, adaptadas e aplicadas para conter processos erosivos de outros locais que não margens de recursos hídricos (SOLERA, 2010).

3.3.1.3 Dimensionamento das obras de bioengenharia

De acordo com Venti et al. (2003), quando se efetuarem obras onde se apliquem as técnicas de bioengenharia, é necessário respeitar um critério muito importante: usar a mínima tecnologia necessária para a resolução dos problemas (Lei do Mínimo) (FIGURA 31). Este é um aspecto importante, que se deve ter em conta nas fases de programação das planificações, de projetar e de execução das intervenções e das obras relativas à tutela do solo e à prevenção dos riscos hidrogeológicos, para além da mitigação dos impactos derivados da realização de obras e infraestruturas. Deste modo, não se deverão efetuar obras superdimensionadas, ou de qualquer modo, obras de complexidade excessiva em respeito ao problema a resolver, nem tão pouco obras subdimensionadas.

Figura 31: Nível mínimo de energia



Fonte: Adaptado de Venti et al. (2003)

Para a maioria das obras de bioengenharia utilizadas no manejo de cursos de água, não é exigido (legalmente), bem como também nem foram desenvolvidos métodos matemáticos exatos para o seu dimensionamento. Uma grande variedade de pequenas obras é executada com base em experiências práticas, sem que para elas seja necessária a demonstração matemática de sua estabilidade, fato que é fortemente evidenciado à medida que aumenta a quantidade de materiais vivos nas obras de correção ou prevenção dos problemas (DURLO; SUTILI, 2005).

Apesar da dispensa do dimensionamento estático para a maioria das obras de bioengenharia (DURLO; SUTILI, 2005), e de bacias hidrográficas menores raramente possuírem dados observados de vazão e velocidade, é possível fazer uso de fórmulas para calcular essas variáveis. Uma dessas fórmulas é a de Strikber, que possibilita calcular a velocidade média da água, levando em consideração a maior cheia já registrada em determinado local (BARRO, 2011; BAPTISTA, 2010).

$$V = KR^{2/3}I^{1/5} \quad (5)$$

Onde V: Velocidade média (m/s); K: Coeficiente de rugosidade; R: Raio hidráulico (m) (que advém da relação entre a área da seção transversal (m²) com o seu perímetro molhado) e I: inclinação do terreno.

Conforme visto, a Equação 5 possibilita calcular a velocidade média do escoamento, variável que é de extrema importância para calcular a dimensão limite de transporte (DLT) das pedras/blocos (BARRO, 2011) a serem utilizadas nas tipologias biotécnicas como enrocamento vivo e defletores, râmprolas ou espigões transversais. Para o dimensionamento da DLT é utilizada a Equação 6, apresentação por Barro (2011), adaptada de Durlo e Sutili (2005).

$$b = \frac{V^2}{14} \quad (6)$$

Em que b corresponde a maior dimensão do bloco (m), V a Velocidade média (m/s) e 14 uma constante, decorrente da adoção de valores constantes para peso específico da água (1000kg/m³) dos sedimentos (2400 kg/m³), para o coeficiente de atrito (0,76) e para material anguloso (1,46). Barro, 2011 explica que com o uso da Equação 6 chega-se ao valor da DLT, que, numa situação semelhante a maior cheia já registrada, mostra que o rio, no trecho analisado, tem a capacidade de movimentar qualquer bloco cuja maior dimensão seja inferior ao valor de b.

Apesar dos métodos apresentados serem de grande relevância para algumas tipologias, segundo Durlo e Sutili (2005), prevalece à ausência de metodologias comprovadas para as demais, fazendo com que a compreensão da influência dos diversos fatores envolvidos na dinâmica do processo, torne-se uma ferramenta indispensável para a construção de obras de bioengenharia. Os autores ainda trazem, de forma esquemática (FIGURA 32), um conjunto de fatores que determinam a estabilidade de uma obra de bioengenharia.

Figura 32: Balança de estabilidade das obras de bioengenharia



Fonte: Durlo e Sutili (2005)

Ressaltam que é possível perceber que se qualquer um dos fatores relacionados na Figura 19 sofrer alteração fará com que a balança movimente mais para o lado da estabilização ou da deformação, e que será função da bioengenharia fazer com que o ponteiro da balança esteja sempre indicando estabilidade. Além disso, também afirmam que diversos fatores no grupo das forças de resistência podem ser utilizados convenientemente para aumentar a estabilidade dessas construções. Por fim, afirmam que a ciência da bioengenharia consiste em arranjar os diferentes fatores, ao modo que as forças favoráveis à estabilidade prevaleçam sobre as demais, que agem em sentido da deformação.

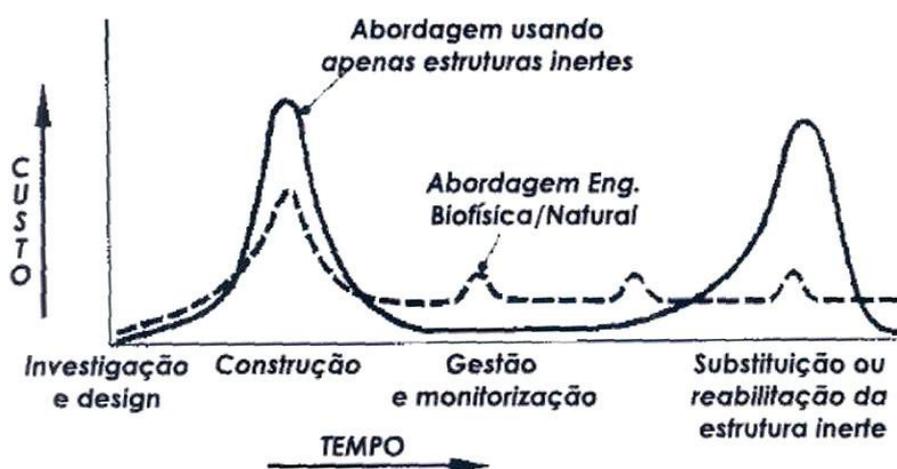
3.3.1.4 Limitações da Bioengenharia

A bioengenharia apenas pode substituir em parte a engenharia clássica, e nas condições físicas, técnicas e ambientais adequadas. Um dos fatores que se coloca

muitas vezes como um aspecto limitante tem a ver com a falta de formação da mão de obra sendo, portanto, necessário a sua promoção. Outro aspecto importante prende-se com o fato das obras de bioengenharia estarem dependentes de um fator muito determinante como a estacionalidade. Ou seja, os trabalhos devem ser realizados nas estações em que o material vegetal está no estado vegetativo adequado e também quando as características climáticas locais são favoráveis ao enraizamento da vegetação. Este aspecto deve-se ter em conta na fase de programação de trabalhos. Depois de efetuados os trabalhos torna-se necessário a existência de um controle, verificação e manutenção constantes das obras (VENTI et al., 2003).

A manutenção é uma das exigências mais importantes das intervenções de biengenharia. Apesar de poder ser menos custosa e exigir prazos de realização com espaçamentos bastante diferentes das técnicas tradicionais (FIGURA 33), implicam numa cuidadosa manutenção, quer para garantir a plena instalação da vegetação projetada, como para garantir a longo prazo a sua eficácia técnica dentro dos referidos objetivos (FERNANDES; FREITAS, 2011).

Figura 33: Custos comparativos médios e manutenção de obras de bioengenharia



Fonte: Fernandes e Freitas (2011)

Ao nível da manutenção, Fernandes e Freitas (2011) aconselham diferentes tipos e objetos:

- ✓ Manutenção de curto ou de longo prazo;
- ✓ Manutenção das plantas e sistemas vivos ou manutenção, reparação e substituição de sistemas inertes complementares;

- ✓ Manutenção de estabelecimento - garantia do estabelecimento das espécies definidas no projeto com as densidades e as características estabelecidas;
- ✓ Manutenção de desenvolvimento - condução da vegetação no sentido do desenvolvimento das formações e comunidades-alvo;
- ✓ Manutenção de acompanhamento - gestão da vegetação e das formações vegetais de modo a garantir a manutenção das suas funções de estabilização e proteção (por ex. elasticidade e comportamento hidráulico).

Segundo Fernandes e Freitas (2011), a manutenção é sempre orientada de acordo com o objetivo construtivo e condicionada pelo preenchimento das funções definidas (geotécnicas, hidráulicas, ecológicas etc.). Observam ainda que sempre se devem evitar intervenções generalizadas e concentradas (por exemplo, desbastes) que, se realizados dessa forma, implicarão em impactos muito violentes nos *habitats* faunísticos com consequências negativas para a funcionalidade ecológica local e da própria obra de bioengenharia.

Diante do contexto apresentado, reitera-se que objetivo desta monografia é analisar a presença de mata ciliar e os processos erosivos nas margens do Arroio Forquetinha, no município de Forquetinha – RS, procurando identificar os trechos que poderiam ser recuperados por meio de técnicas de bioengenharia, bem como propor a intervenção biotécnica mais adequada um dos locais identificados, além da estimativa dos custos de implementação.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais

- Base cartográfica digital, formada por uma imagem do satélite *Ikonos*, composição colorida *pan-sharpened* RGB, datada de 23/11/2002.
- *Software* AutoCAD, Spring e Google Earth
- GPS *Garmin MAP 76 Csx*
- Máquina fotográfica digital
- Estação total PENTAX, modelo V227N

4.2 Procedimentos metodológicos

O diagnóstico das características físicas de determinada área é uma ferramenta importante para fornecer subsídios à sua gestão, bem como promover intervenções a fim de preservá-la ou recuperá-la. Uma das tecnologias que possibilita a caracterização física de uma região são as geotecnologias, que podem ser definidas como um conjunto de ferramentas que possibilitam a coleta, análise, armazenamento, processamento, visualização e disponibilização da informação com referência espacial, ou seja, a informação tem a sua localização geográfica associada como fator de integração e análise (CRUZ, 2009). Dentre as ferramentas geotecnológicas destacam-se os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o Sensoriamento Remoto por satélite e o Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Os SIGs constituem-se em um conjunto harmônico composto por uma base de dados, um ou mais *softwares* que permitem a manipulação de informações

espaciais e uma interface gráfica para acesso do usuário. Com esse tipo de tecnologia é possível, por exemplo, produzir um Modelo Numérico do Terreno a partir de cartas topográficas da bacia hidrográfica. O Modelo Numérico do Terreno tem inúmeras aplicações no manejo de bacias hidrográficas que vão desde a determinação de seus limites geográficos até a avaliação de áreas suscetíveis a processos erosivos (CRUZ, 2009).

Sensoriamento remoto pode ser entendido como a utilização de sensores para a aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem que haja contato direto entre eles. Os sensores a bordo dos satélites são equipamentos capazes de coletar radiação eletromagnética proveniente do alvo, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-lo em forma adequada à extração de informações. Esta tecnologia vem sendo aplicada em diversas áreas do conhecimento, devido à possibilidade de se obter uma grande quantidade de informações a respeito de uma área ou ecossistema, em tempos diversos, apresentando baixo custo (comparando aos métodos tradicionais de amostragens de dados em campo), assim como uma boa qualidade, permitindo a visualização integrada do ambiente, entre outras vantagens (NOVO, 1992).

A coleta de dados no campo ganhou muito em precisão e capacidade de interpretação com o desenvolvimento e a disseminação dos aparelhos GPS. Com o uso desta geotecnologia tornou-se muito mais simples a visualização e manipulação dos dados de campo em um SIG, bem como a realização de análises espaciais e a detecção de padrões similares, que se constituem em recursos poderosos para o entendimento dos fenômenos naturais (CRUZ, 2009).

4.2.1 Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Arroio Forquetinha

Para a caracterização fisiográfica da bacia levou-se em consideração toda área que contribui ao escoamento do Arroio Forquetinha, desde as cotas altimétricas mais elevadas, onde se situam as nascentes dos cursos de água contribuintes, a fim de avaliar a propensão a ocorrência de eventos de cheia no Arroio Forquetinha.

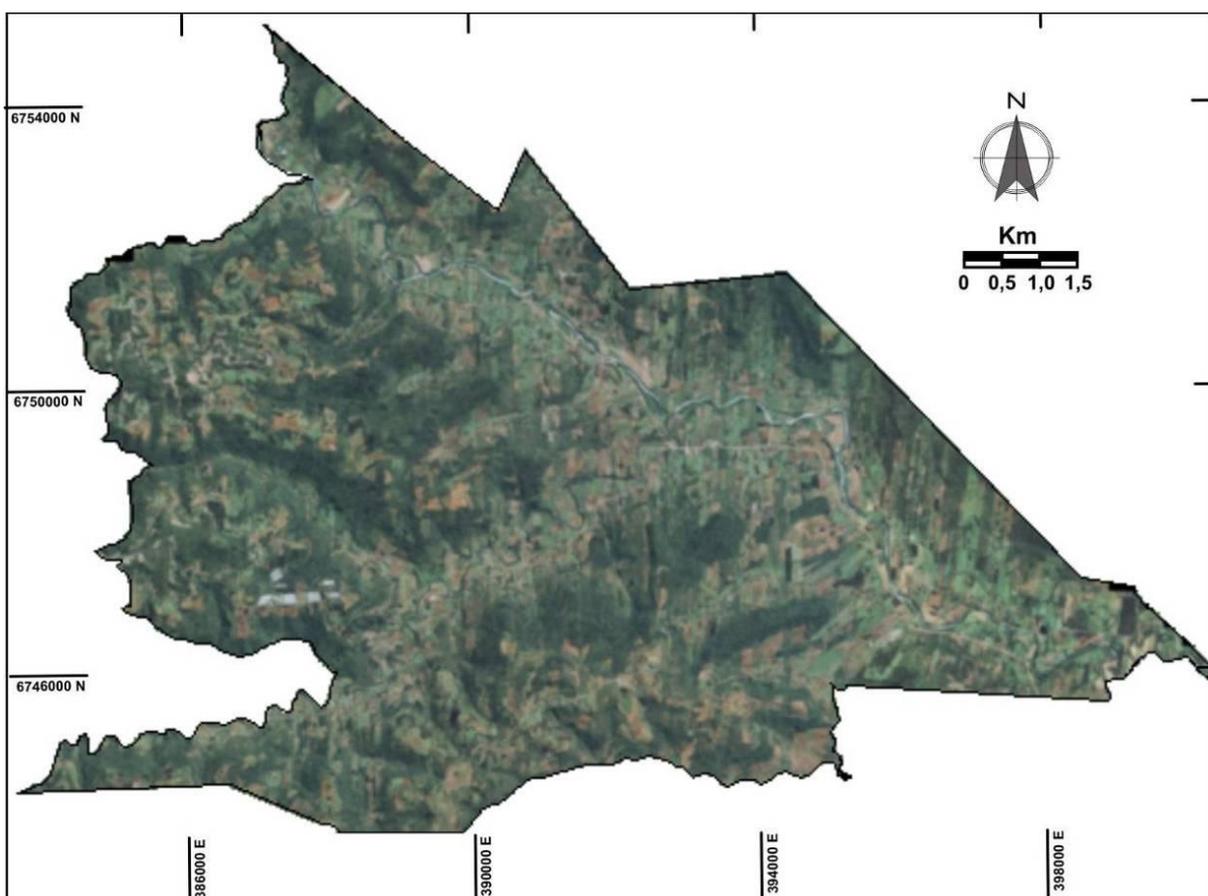
Para esta caracterização utilizou-se a base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul, na escala 1:50.000 (HASENACK; WEBER, 2010), contendo a malha rodoviária, as curvas de nível e a hidrografia. Da referida base digital

delimitou-se, por meio do uso do *Software* AutoCAD, a bacia hidrográfica do Arroio Forquetinha e extraiu-se, com auxílio do *software* Spring, informações a respeito da área de abrangência, perímetro, comprimento dos cursos de água, do eixo da bacia e do vale e declividade da mesma.

4.2.2 Delimitação do Arroio Forquetinha, da mata ciliar e da APP

O município de Forquetinha disponibilizou uma base cartográfica digital georreferenciada (FIGURA 34) disponível no *software* AutoCAD, contendo uma imagem de alta resolução espacial do satélite *Ikonos*, composição colorida RGB, com 1 metro de resolução espacial, além da divisa administrativa municipal e da malha rodoviária do município.

Figura 34: Base Cartográfica digital do município de Forquetinha



Fonte: Autores

A base cartográfica digital foi utilizada para delimitar, por intermédio de digitalização em tela, o leito do Arroio Forquetinha e a mata ciliar do referido arroio. Para a delimitação da APP do arroio, levou-se em consideração o Código Florestal

(BRASIL,1965; BRASIL, 2012), em que é exigido respeitar uma faixa de 50 metros para cursos de água que apresentem largura da ordem de 30 metros, que é o caso do Arroio Forquetinha. Além da delimitação da faixa de 50 metros, baseado no novo Código Florestal (BRASIL, 2012b), também se delimitou a faixa mínima de recuperação ambiental requerida para áreas que possuíam usos consolidados, visto que as propriedades rurais não excedem a equivalência de 1 (um) módulo fiscal. Essas delimitações foram realizadas nas duas margens do arroio, após a delimitação do curso de água, pelo comando *offset* do *Software AutoCAD*, permitindo determinar a APP do arroio e a faixa mínima de 5 metros que deverá ser recuperada nos casos de usos consolidados.

4.2.3 Identificação das margens degradadas

Para alcançar uma melhor qualidade ambiental, a tomada de decisão sobre proposições corretas do uso e cobertura da terra deve considerar se os referidos usos estão contribuindo ou induzindo a ocorrência de uma transformação indesejada. Quando o objetivo é evitar ou minimizar a ocorrência de um impacto negativo, como a erosão, é necessário, em primeiro lugar, perceber os principais padrões, mecanismos e fatores condicionantes que a paisagem apresenta, para depois tomar decisões sobre o seu controle (SANTOS, 2007). Sobre a base cartográfica digital, também foram identificados e demarcados os locais que apresentavam margem degradada, com ausência parcial ou total de vegetação, além de categorizá-los de acordo com a necessidade de recuperação: Curtíssimo, Curto, Médio ou Longo prazo de acordo com os critérios apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Critérios de categorização dos locais degradados

Prazo	Critério
Curtíssimo Até 2 anos	<ul style="list-style-type: none"> - Compromete ou pode vir a comprometer estradas, pontes, vias de acesso e imóveis (residências, galpões). - Localiza-se em zona de processo erosivo mais intenso (margem externa, de erosão/remoção de sedimentos).
Curto Até 5 anos	<ul style="list-style-type: none"> - Compromete ou pode vir a comprometer vias de acesso (estradas, pontes) e imóveis (residências, galpões). - Localiza-se em zona de processo erosivo pouco intenso (margem interna, de deposição/acumulo de sedimentos). <hr/> <ul style="list-style-type: none"> - Compromete áreas de cultivo das propriedades. - Localiza-se em zona de processo erosivo intenso (margem externa, de erosão/remoção de sedimentos).
Médio Até 10 anos	<ul style="list-style-type: none"> - Compromete áreas de cultivo das propriedades. - Localiza-se em zona de processo erosivo menos intenso (margem interna, de deposição/acumulo de sedimentos). - Apresenta extensão inferior a 100 metros.
Longo Acima de 10 anos	<ul style="list-style-type: none"> - Compromete áreas de cultivo das propriedades. - Localiza-se em zona de processo erosivo menos intenso (margem interna, de deposição/acumulo de sedimentos). - Apresenta extensão superior a 100 metros.

Fonte: Autor

A partir da delimitação da vegetação ciliar na imagem de satélite e o cruzamento da referida delimitação com a faixa de 5 metros de recuperação e de 50 metros de APP, foram realizadas atividades *in loco* em alguns pontos para aferir as condições observadas na imagem. Nesta etapa, buscou-se validar se as condições observadas na imagem condiziam com as condições reais do local e se os critérios adotados na categorização das margens comprometidas foram satisfatórios.

As técnicas utilizadas nos levantamentos de campo incluíram: observações diretas, anotações em caderneta, uso do receptor GPS de navegação, levantamento com estação total e máquina fotográfica digital para registro das condições dos locais visitados.

4.2.4 Levantamento topográfico do local alvo de proposição das tipologias biotécnicas

No local alvo de proposição das tipologias biotécnicas, foi realizado levantamento topográfico bem como observadas as características e condições do leito e da margem. Para a realização desse levantamento levou-se em consideração um evento extremo de precipitação pluviométrico, ocorrido nos dias 3 e 4 de janeiro de 2010, em que foi registrado um acumulado de chuva superior a 200 milímetros (CIH, 2012), em um período de aproximadamente 24 horas. Esse evento extremo de precipitação foi considerado catastrófico para a região da Bacia Hidrográfica do Rio Forqueta e do Arroio Forquetinha, de modo que levou alguns municípios a decretarem estado de emergência em decorrência dos estragos que foram causados. Dos municípios atingidos, menciona-se o de Marques de Souza como um dos mais devastados. Em Forquetinha, o referido evento resultou em elevada alteração das margens do arroio, além de danificar estradas e algumas pontes.

Desta forma, a fim de estimar a capacidade erosiva do fluxo de água num dos maiores eventos de cheia já registrados e dimensionar algumas das tipologias a serem propostas à recuperação da margem, foi realizado o levantamento topográfico, com estação total PENTAX, do leito maior excepcional (zona inundada durante a cheia de 2010), do leito normal e da margem alvo das tipologias biotécnicas.

4.2.5 Proposição das tipologias de intervenção e estimativa do custo da obra

As geotecnologias possibilitam mostrar que para cada arranjo espacial de uso e cobertura da terra sobre um determinado tipo de terreno, com certo grau de vulnerabilidade ambiental e com atividades de manejo próprio da região, pode-se identificar um conjunto específico de problemas ambientais. Esses problemas podem interferir nos níveis da qualidade ambiental de determinado ambiente e auxiliar na tomada de decisão quanto às tipologias de intervenção (SANTOS, 2007).

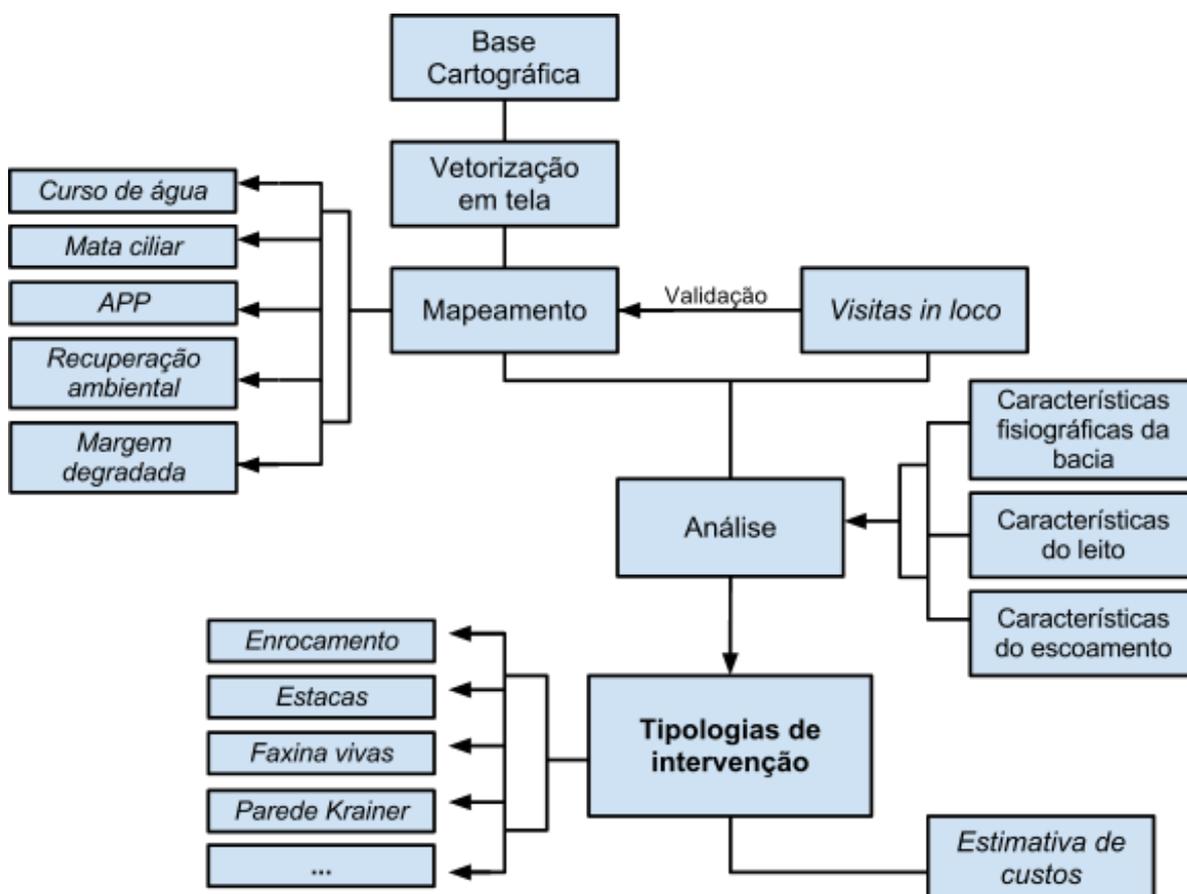
Com base nas características observadas na imagem, no enquadramento da necessidade de intervenção/recuperação, visitas *in loco* aos locais degradados, levantamento topográfico e das características do local e a importância que

determinado local representa para a comunidade, propôs-se intervenção no mesmo, utilizando as técnicas de bioengenharia, além de também apresentar o levantamento dos custos que estariam envolvidos na implementação do que fora proposto.

A proposição das tipologias passíveis de serem empregadas na estabilização dos processos erosivos da margem do Arroio Forquetinha foi baseada em pesquisa bibliográfica de livros, artigos nacionais e internacionais, dissertações de mestrado e teses de doutorado disponíveis, sempre levando em conta aspectos como **funcionalidade, aspecto e eficiência**.

A Figura 35 apresenta o fluxograma geral do desenvolvimento metodológico adotado no estudo.

Figura 35: Fluxograma metodológico da proposta de estudo



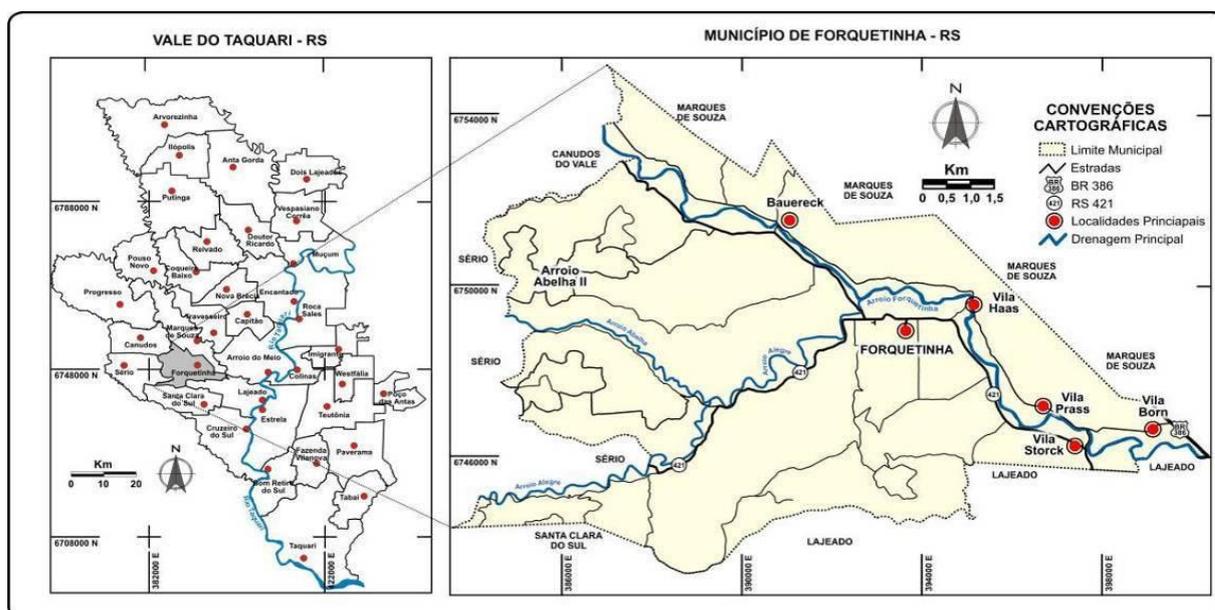
Fonte: Autor

5 RESULTADOS

5.1 Descrição da área de estudo

O município de Forquethinha está localizado na porção Centro-Oeste da região geopolítica do Vale do Taquari. Faz divisa com o município de Marques de Souza ao Norte e Nordeste, Canudos do Vale e Sério a Oeste, Santa Clara a Sul e Lajeado a Sudeste e Leste (FIGURA 36). A sede do município localiza-se nas coordenadas geográficas UTM SAD69, Fuso 22J, 6748935 N e 393610 E. Foi criado em 16 de abril de 1996, pela lei nº 10756, emancipado do município de Lajeado. Apresenta área de 93,57 km² e segundo a Contagem da População realizada pelo IBGE (2010) apresenta 2.479 habitantes.

Figura 36: Localização do município de Forquethinha



Fonte: Adaptado de Eckhardt (2009)

Em termos hidrográficos, pertence à bacia hidrográfica do Rio Forqueta, que constitui em umas das principais sub-bacias hidrográficas do Rio Taquari. O principal curso hídrico e que dá nome ao município é o Arroio Forquetinha. Esse arroio apresenta aproximadamente 22 km de extensão no município, e segundo a classificação de Strahler, consiste em um curso hídrico de 5ª ordem. Outros dois arroios que se destacam no município de Forquetinha são o Arroio Alegre e o Arroio Abelha, respectivamente classificados como arroios de 4ª e 3ª ordem.

O padrão de drenagem é considerado irregular, no entanto assemelhando-se consideravelmente ao padrão de drenagem dendrítico, que é também conhecido como arborescente pela sua semelhança com os galhos de uma árvore. Com relação ao seu canal, baseando-se nos critérios de Christofolletti (1980), pode-se atrelá-lo aos perfis longitudinais meandrantés, pelas curvas sinuosas, largas, harmoniosas e semelhantes entre si, resultantes do trabalho contínuo de escavação da margem côncava e de deposição na margem convexa; ao perfil retilíneo, por apresentar alguns trechos retilíneos contínuos, de baixa profundidade e sinuosidade e ainda ao perfil anastomosado, identificado em pontos em que a deposição da carga de fundo propicia o desenvolvimento de barras que obstruem a corrente e ramificam-na, processo decorrente das margens que atualmente são facilmente erodidas.

No que diz respeito às altitudes, Forquetinha apresenta como local mais baixo o nível altimétrico de 40 metros e 500 metros como a altitude mais alta. As altitudes de 40 a 100 metros, que formam o Vale do Arroio Forquetinha, formam a classe de altitude que concentra grande percentual das áreas agrícolas do município, que apresenta terrenos planos e com boa fertilidade natural, aspecto que favorece a mecanização e um alto rendimento da produção.

Os solos que ocorrem adjacentes ao Arroio Forquetinha são de forma predominante, segundo Streck et al. (2002), do tipo Chernossolos Háplicos Órticos, que apresentam perfis mais profundos derivados de material alúvio-coluvionar proveniente do basalto das áreas adjacentes. Desenvolvem-se quase sempre de rochas básicas, ricas em cálcio e magnésio, ou de rochas sedimentares, que apresentam lentes ou intercalações de calcário, o que favorece sua ótima fertilidade natural. Com alto potencial do solo para o desenvolvimento da atividade agrícola, possuem destaque as culturas do milho, fumo, cana-de-açúcar, soja e mandioca,

que faz com que o município tenha sua economia centrada na atividade agropecuária e na criação de animais de corte, com destaque para a criação de suínos e frangos.

Os terrenos planos e de boa fertilidade natural, por favorecerem a mecanização e um alto rendimento da produção, fizeram com que os ambientes ciliares do Arroio Forquetinha sofressem forte interferência antrópica. Ao longo de muitos anos, as matas ciliares foram suprimidas a fim de expandir a área agricultável nesse município, resultando em erosão, impactos ambientais e em perda de qualidade ambiental em termos gerais.

Atualmente, a erosão dos solos e das margens do arroio não é apenas um problema ambiental, mas também econômico, haja vista que os produtores rurais estão perdendo parcelas de suas terras em decorrência da atividade erosiva nas margens, além destas ainda serem lixiviadas durante os períodos de cheia, tornando-se necessário repor os nutrientes perdidos, o que costuma ser feito por meio do uso de fertilizantes.

5.2 Análise fisiográfica da bacia hidrográfica do Arroio Forquetinha

Em relação à análise fisiográfica da bacia do Arroio Forquetinha, avaliada até o local de proposição das tipologias biotécnicas, obteve-se os dados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Informações da sub-bacia hidrográfica do Arroio Forquetinha

Informação da bacia	Extensão
Área (km ²)	306,40
Perímetro (km)	101,59
Comprimento do eixo (km)	39,05
Comprimento do vale (km)	35,36
Comprimento de todos os canais (km)	366,10

Fonte: Autor

A partir dos dados da tabela acima, foi possível determinar índices da bacia relacionados à sua suscetibilidade à ocorrência de cheias (TABELA 5).

Tabela 5: Índices fisiográficos da sub-bacia hidrográfica do Arroio Forquetinha

Índice	Resultado
Densidade de drenagem (DD) (km/km ²)	1,19
Coeficiente de compacidade (Kc)	1,62
Fator de forma (Kf)	0,13
Índice de circularidade (Ic)	0,37
Índice de sinuosidade (Is)	1,35
Declividade (%)	0,77

Fonte: Autor

Analisando as Tabelas 4 e 5 é perceptível que, de forma geral, a bacia a qual pertence o Arroio Forquetinha apresenta forma alongada, sendo pouco sujeita a inundações. A declividade, que pode ser considerada alta, corrobora com um canal considerado sinuoso ou retilíneo, com velocidade do fluxo elevada e a rápida resposta da bacia quando ocorrem precipitações mais intensas na área. O baixo valor da DD pode ser associado aos solos permeáveis e ao regime pluviométrico médio da região, caracterizado por chuvas de baixa intensidade.

5.3 Delimitação da mata ciliar e dos locais com margem degradada

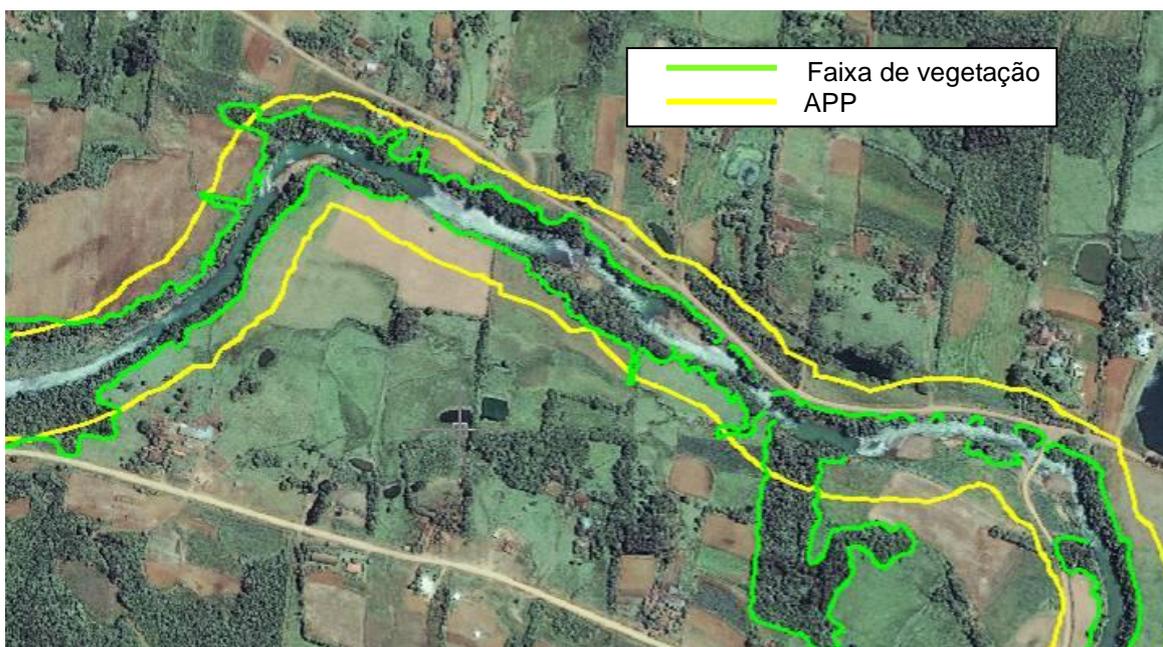
A partir da delimitação do Arroio Forquetinha e da vegetação ciliar existente em ambas as margens foi possível avaliar o percentual de vegetação existente na APP de 50 metros e na faixa de recuperação ambiental de 5 metros, que são apresentadas a seguir. A Tabela 6 e as Figuras 37 e 38 apresentam a condição de adequação e de conflito do uso e cobertura do solo na faixa de 50 metros da APP do Arroio Forquetinha. Por sua vez, a Tabela 7 e as Figuras 39 e 40 apresentam a mesma condição na faixa de 5 metros de recuperação ambiental.

Tabela 6: Quantificação dos usos na faixa APP de 50 metros

Dispositivo Legal	Área (ha)	Vegetação (ha)	Vegetação (%)	Uso agropecuário (ha)	Uso agropecuário (%)
APP 50 metros	221,92	85,62	38,58	136,3	61,42

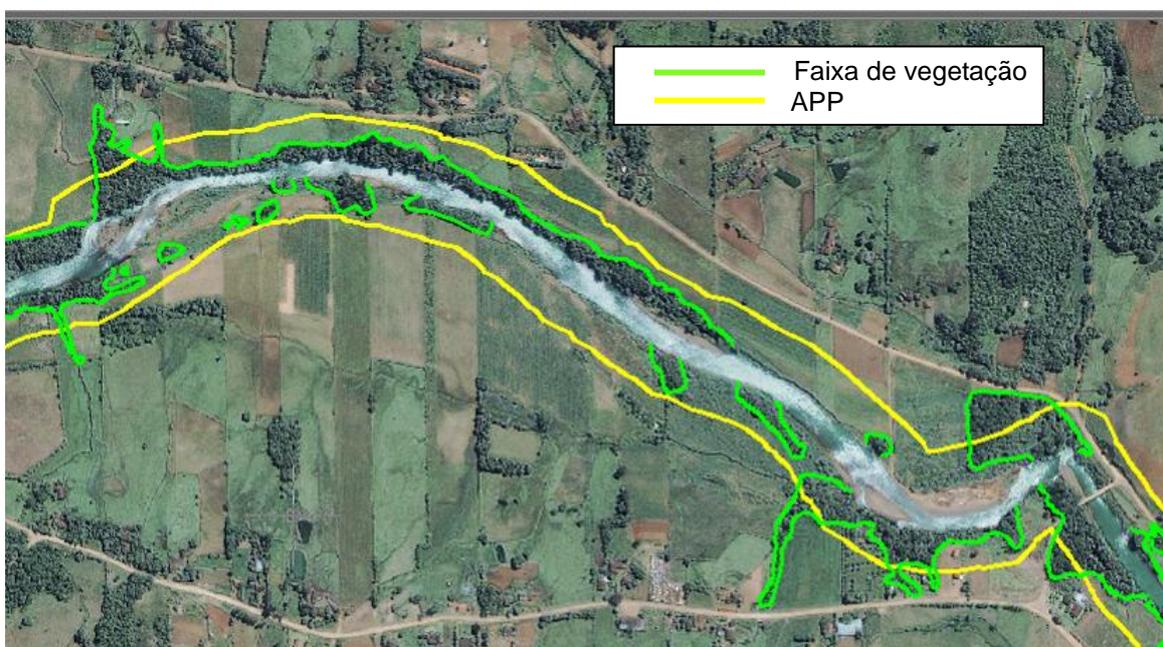
Fonte: Autor

Figura 37: Uso e cobertura do solo na APP de 50 metros do Arroio Forquetinha



Fonte: Autor

Figura 38: Uso e cobertura do solo na APP de 50 metros do Arroio Forquetinha



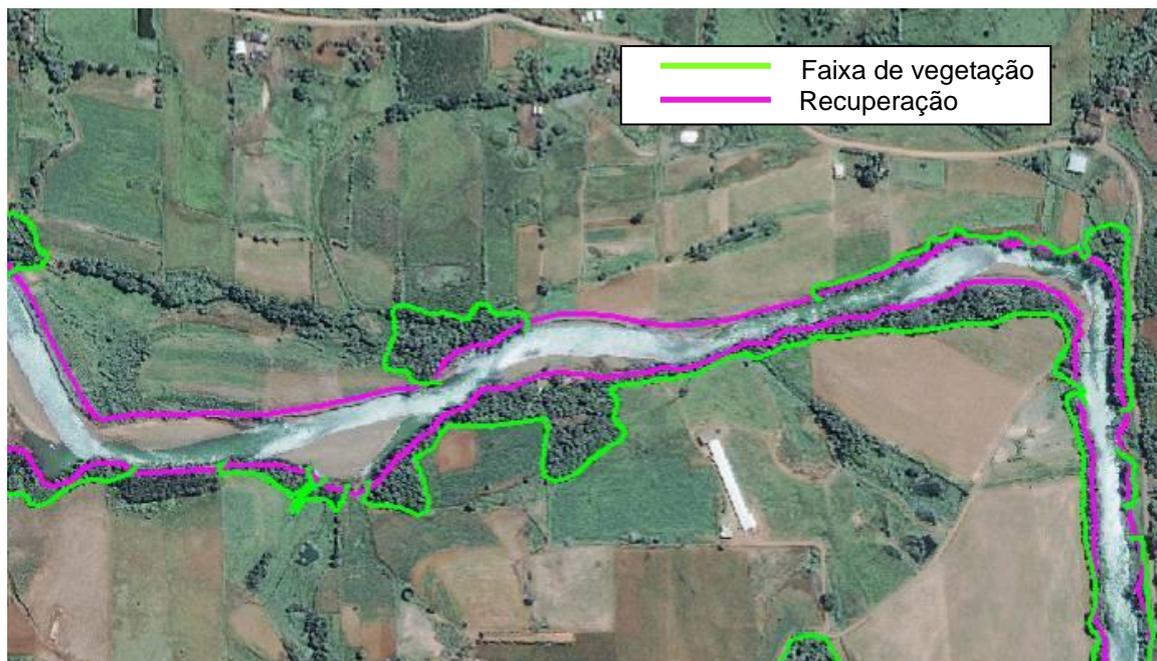
Fonte: Autor

Tabela 7: Quantificação dos usos na faixa de 5 metros de recuperação ambiental

Dispositivo Legal	Área (ha)	Vegetação (ha)	Vegetação (%)	Uso agropecuário (ha)	Uso agropecuário (%)
APP 5 metros	22,32	17,38	77,87	4,94	22,13

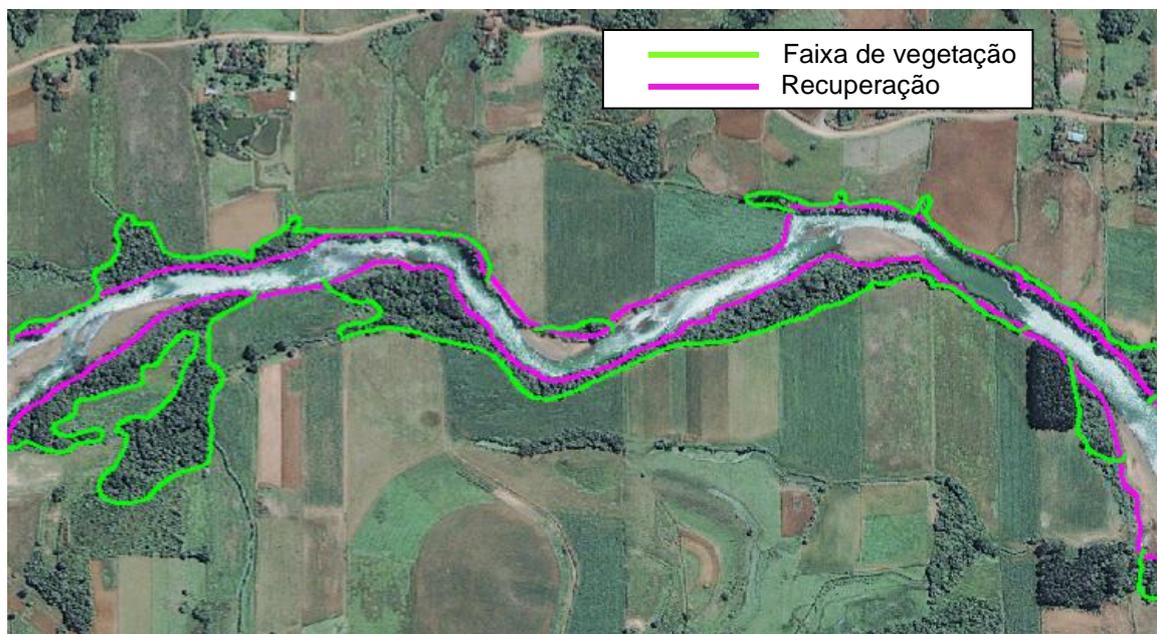
Fonte: Autor

Figura 39: Uso e cobertura do solo na faixa de recuperação ambiental



Fonte: Autor

Figura 40: Uso e cobertura do solo na faixa de recuperação ambiental



Fonte: Autor

Ao analisar as Tabelas 6 e 7, constata-se que o percentual de vegetação e de uso agropecuário presente nas faixas avaliadas são bastante distintos. Na APP, o percentual de vegetação e de uso agropecuário, representam 38,58% e 61,42% respectivamente, enquanto que na faixa de recuperação de 5 m representam 77,87% e 22,13%, respectivamente.

Nota-se que a largura da APP, que para o curso hídrico avaliado é de 50 metros, não é respeitada conforme determina a lei, no entanto, é perceptível que existe certa preocupação no que diz respeito à conservação do ambiente ciliar quando avaliamos a vegetação existente na faixa de 5 metros, faixa está a ser recuperada pelas áreas com usos já consolidados até 2008, conforme o novo Código Florestal (BRASIL, 2012b).

Os locais que não apresentaram vegetação ciliar na faixa de 5 metros foram considerados locais degradados, os quais foram quantificados, caracterizados e categorizados conforme a necessidade de intervenção e/ou recuperação (Tabela 8).

Tabela 8: Categorização dos locais com margem degradada.

Prazo	Locais identificados	Extensão total (metros)
Curtíssimo (até 2 anos)	21	1.197,5
Curto (até 5 anos)	59	4.429,3
Médio (até 10 anos)	27	1.078,8
Longo (acima de 10 anos)	16	2.480,4
Total	123	9.186,0

Fonte: Autor

Conforme pode ser observado na Tabela 8, de 123 locais degradados, 21 requerem uma intervenção com vistas a sua recuperação em Curtíssimo prazo, 59 em Curto prazo, 27 em Médio prazo e 16 em Longo prazo, totalizando uma extensão 9.186 metros de margem degradada que requer algum tipo de intervenção e/ou recuperação. Dada à extensão do Arroio Forquetinha, que é de 21,97 Km, o que representa aproximadamente 44 km de margens, percebe-se que dessa totalidade, mais de 20% apresentam problemas de degradação decorrentes da dinâmica natural do curso de água e/ou das às ações antropogênicas.

As Figuras 41 a 44 apresentam locais degradados de acordo com a categoria de recuperação em que se enquadraram.

Figura 41: Local que requer recuperação/intervenção em Curtíssimo prazo



Fonte: Autor

Figura 42: Local que requer recuperação/intervenção em Curto prazo



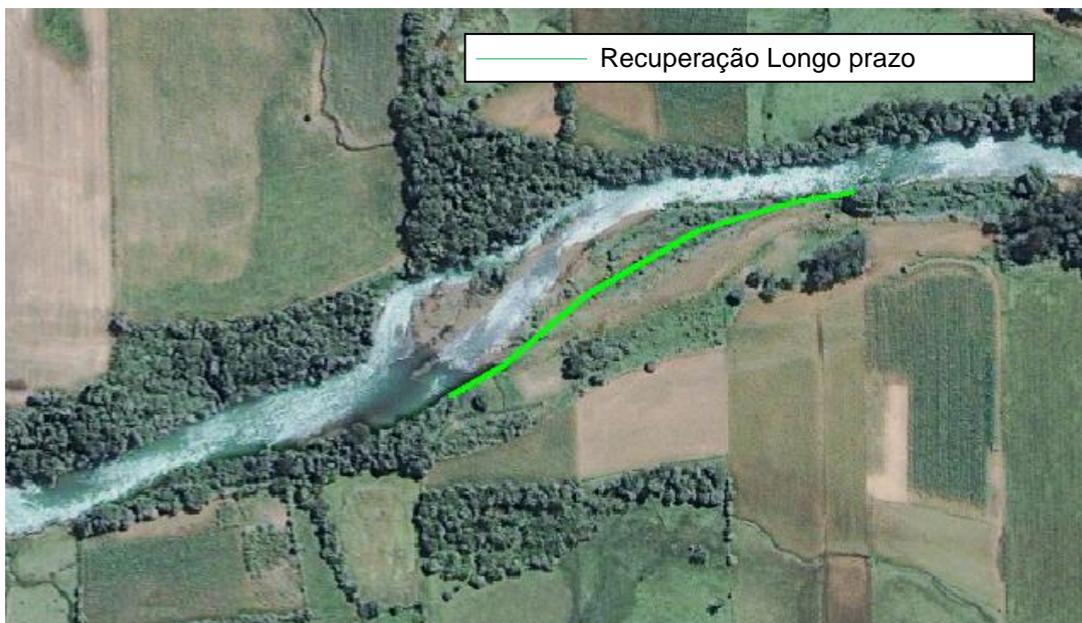
Fonte: Autor

Figura 43: Local que requer recuperação/intervenção em Médio prazo



Fonte: Autor

Figura 44: Local que requer recuperação/intervenção em Longo prazo



Fonte: Autor

As Figuras 45 a 52 apresentam a situação atual de alguns dos locais categorizados, com base nas atividades de campo, sendo que também é indicada a categorização da necessidade de intervenção, com base nos critérios apresentados na Tabela 3, do Capítulo 4.2.2.

Figura 45: Recuperação de Curtíssimo (A) e Curto (B) prazo



Fonte: Autor

Figura 47: Recuperação: Curto prazo



Fonte: Autor

Figura 49: Recuperação: Médio prazo



Fonte: Autor

Figura 46: Recuperação: Curtíssimo prazo



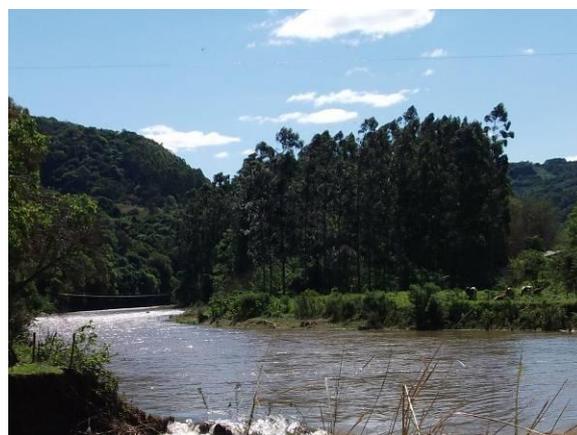
Fonte: Autor

Figura 48: Recuperação: Curto prazo



Fonte: Autor

Figura 50: Recuperação: Médio prazo



Fonte: Autor

Figura 51: Recuperação: Longo prazo



Fonte: Autor

Figura 52: Recuperação: Longo prazo



Fonte: Autor

Analisando as imagens e as visitas *in loco*, foi possível avaliar que em todos os locais nos quais se identificou processo de degradação mais ou menos intenso, não era perceptível uma vegetação adequada ou significativa sob a margem, apenas o desenvolvimento de gramíneas em alguns pontos, além de também observar-se que o cultivo de determinadas áreas se estendia até o limite da barranca do curso de água.

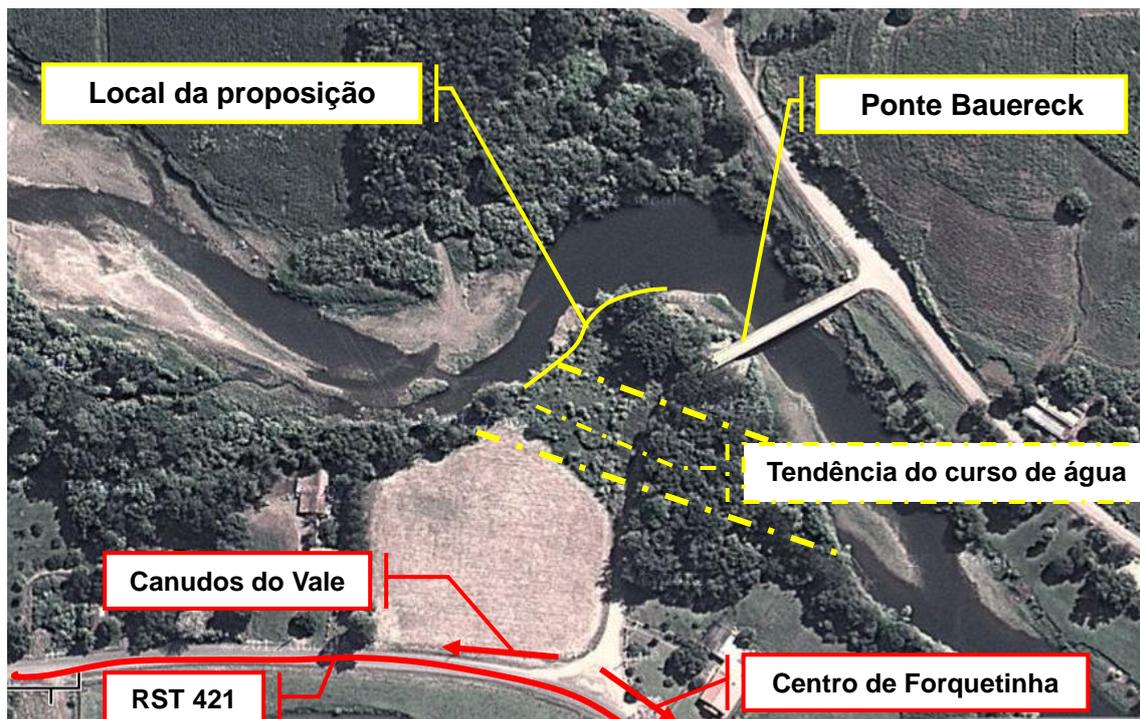
5.4 Proposição de implantação de tipologias biotécnicas

5.4.1 Escolha do local

O local escolhido para a proposição da implantação das técnicas de bioengenharia de solos está localizado próximo à ponte Bauereck, da localidade de mesmo nome, nas coordenadas geográficas UTM SAD69, Fuso 22J, 6751358 N e 390640 E (FIGURA 53). A margem direita desse local, responsável por sustentar a cabeceira da ponte, está enquadrada na categoria que requer intervenção em curtíssimo e curto prazo, pois se situa na porção à jusante da margem onde ocorre processo erosivo intenso e na porção a montante, na margem com processo erosivo menos intenso. Ambas as porções podem comprometer a via de acesso (estrada e ponte) e danificar as residências próximas do local.

A intervenção proposta neste local vai contra a hidrodinâmica do curso de água, cuja tendência é abandonar o canal meandrante pelo qual segue na atualidade e seguir de forma mais retilínea o seu curso (FIGURA 53). Contudo, dada à importância justificada a seguir, mantém-se a proposta de recuperação no local.

Figura 53: Localização do local de proposição das intervenções biotécnicas



Fonte: Adaptado de Google Earth

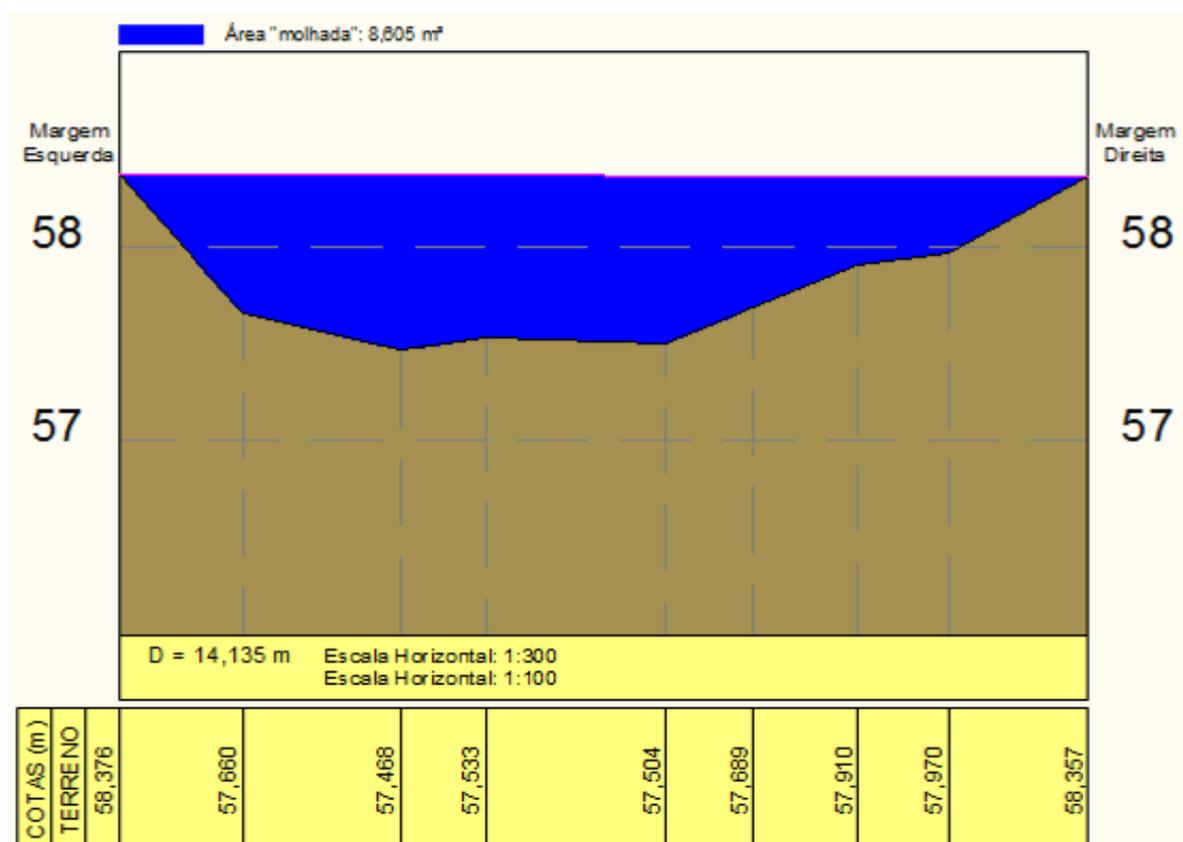
O referido local é de extrema importância para a comunidade local por se tratar de uma das principais vias que interliga as comunidades situadas em ambas às margens do Arroio Forquethinha, bem como também é amplamente utilizada para os deslocamentos até o centro da cidade. Outro fator que também faz com que o acesso seja utilizado com frequência é a pavimentação da estrada que está situada na margem direita do arroio, possibilitando melhor deslocamento e escoamento de produções que provem das localidades situadas na margem esquerda do arroio e até de municípios vizinhos como Canudos do Vale e Marques de Souza.

Outro fator que justifica a escolha do local foi um evento de chuva intensa, ocorrido nos dias 3 e 4 de janeiro de 2010, quando foi registrado um acumulado de chuvas com índice superior a 200 mm (CIH, 2012). Esse evento ocasionou, dentre diversos outros problemas, a queda do barranco responsável por sustentação da cabeceira da ponte de Bauereck, impossibilitando a travessia até a margem oposta. A solução adotada na época, e que se mostra eficaz até o momento, foi aterrar parte da margem e construir um aumento em concreto para reestabelecer o acesso do local. No entanto, o restante da margem que antecede esse aterro vem, desde então, sofrendo intensamente com os processos erosivos, comprometendo cada vez mais, a cada nova cheia que ocorre, esse local importante ao município em questão.

5.4.2 Levantamento topográfico do local alvo de proposição das tipologias biotécnicas

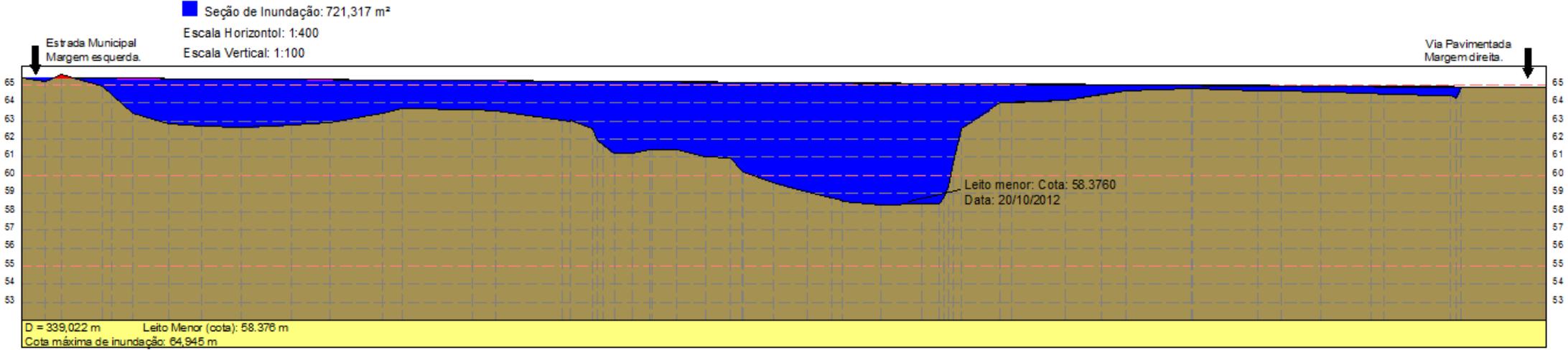
No que corresponde ao levantamento topográfico, são apresentados os perfis das Figuras 54 e 55, que possibilitaram a determinação da área da seção de inundação e do perímetro molhado no evento de chuva intensa de 2010, correspondente a 321,32 m² e 339,02 metros, respectivamente.

Figura 54: Perfil longitudinal do leito menor



Fonte: Autor

Figura 55: Perfil longitudinal do leito maior excepcional (seção de inundação)



5.4.3 Descrição do local

Conforme pode ser observado na Figura 56, a margem do local se encontra, quase que em toda sua extensão, desprovida de vegetação, exceto por algumas gramíneas no topo e árvores de porte inadequado para margens de cursos de água, neste caso, espécimes de araucária (*Araucaria angustifolia*). O solo existente na margem é considerado argilo-arenoso, cuja composição é de aproximadamente 30 – 40% de argila e 60 – 70% de areia (que torna o solo mais friável e menos compacto) e com alguns níveis de cascalho, composição típica de depósitos aluviais. Devido a essa composição diferenciada do solo, argilo-arenoso e cascalhos, é perceptível que também ocorre um processo erosivo diferenciado ao longo da margem, em que o solo, por sua característica friável, é mais facilmente erodido que os níveis de cascalho, que estão na base no talude.

Figura 56: Local de proposição das intervenções biotécnicas

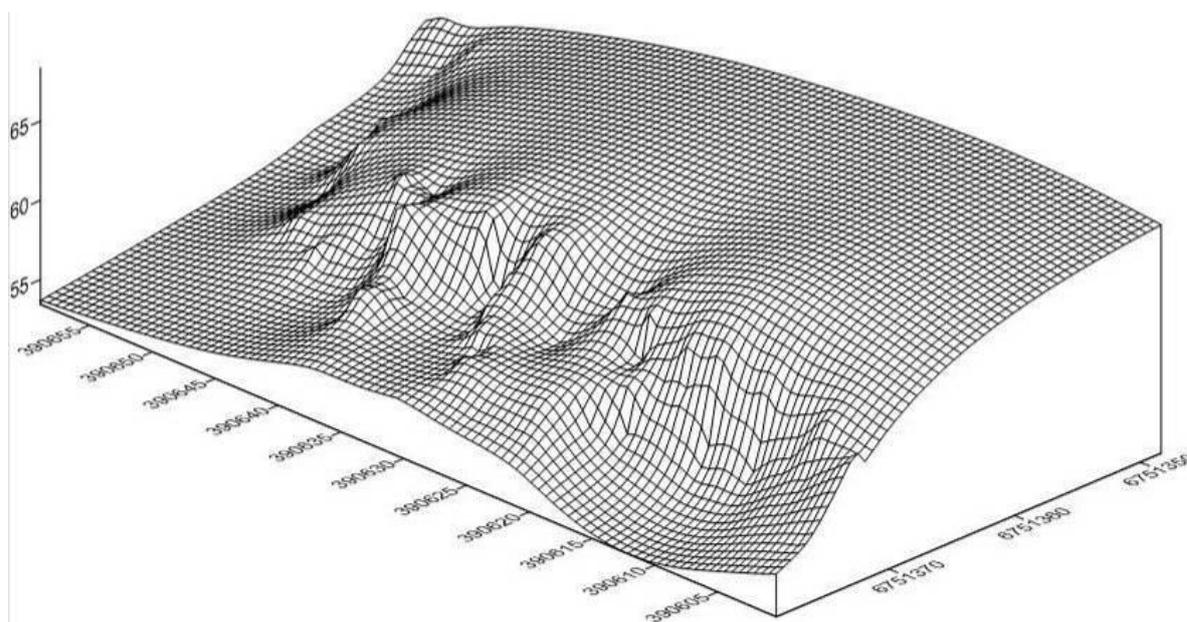


Fonte: Autor

A margem direita sofre contínuo processo erosivo, desmoronamento e transporte de material, causado pelo solapamento da base do talude decorrente da força com que a água se choca contra a margem, além do processo se intensificar com as enchentes, muito comuns na região nos meses de junho a setembro, que encharcam a margem aumentando seu peso e facilitando o desconfinamento.

A seção transversal do arroio no local é caracterizada por uma largura média de 24 m, com profundidade média de 1,2 metros, inclinação do leito do canal de 77 cm/km (0,077%) e fundo do canal constituído por rocha e coberto, em alguns pontos, por cascalhos e pequena quantidade de lama. Em relação ao perfil do talude (FIGURA 57), o mesmo apresenta pequena variação em sua extensão que é de aproximadamente 50 metros.

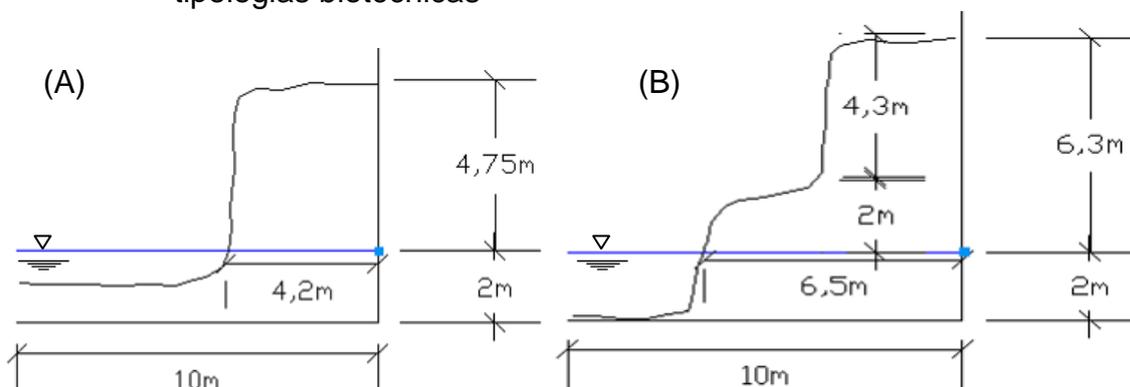
Figura 57: Perfil da margem



Fonte: Autor

A porção a montante do local de proposição das técnicas apresenta um altura de 4,75 metros acima do nível de referência da água, posicionado em um ângulo de aproximadamente 90° , sendo que o fundo do leito se estabiliza a uma distância de 1,5 metros da margem, com profundidade em torno de 1 metro (FIGURA 58-A). A porção a jusante do local apresenta altura de 6,3 metros acima do nível de referência da água, posicionado em um ângulo de aproximadamente 90° na base e no topo do talude e 15° no desnível que ocorre entre ambos (FIGURA 58-B). O fundo do leito se estabiliza a uma distância de 2 metros da margem, com profundidade em torno de 2 metros, sendo perceptível uma área adjacente mais inclinada nesse ponto.

Figura 58: Perfil da porção a montante (A) e jusante (B) do local de proposição das tipologias biotécnicas



Fonte: Autor

5.4.4 Proposição das técnicas de bioengenharia de solos

Para a proposição das técnicas de bioengenharia de solos foi necessário conhecer a capacidade erosiva do Arroio Forquetinha naquele local; para isso, levou-se em consideração o alcance de uma das maiores cheias já registradas, ocorrida em janeiro de 2010. Ela foi utilizada como base para conhecer a velocidade média da água ($V = KR^{2/3}I^{1/5}$), que possibilitaria o cálculo da Dimensão Limite de Transporte (DLT) ($b = \frac{V^2}{14}$) dos blocos a serem utilizados nas obras.

Para o cálculo da velocidade média considerou-se a inclinação de 77 cm/km ($\text{tg de } \alpha = 0,77/1000 = 0,0077$), área da seção 721,317 m², perímetro molhado de 345,6 metros e 25 como valor de K, correspondente a rios e arroios medianamente rugosos. Aplicados os referidos valores nas Equações 5 e 6, referidas acima, obteve-se, respectivamente, velocidade média de **3,58 m/s** e DLT de **0,92 metros**. A DLT representa, numa situação semelhante a maior cheia já registrada no local, que o Arroio Forquetinha tem a capacidade de movimentar qualquer bloco com dimensão inferior a 0,92 metros.

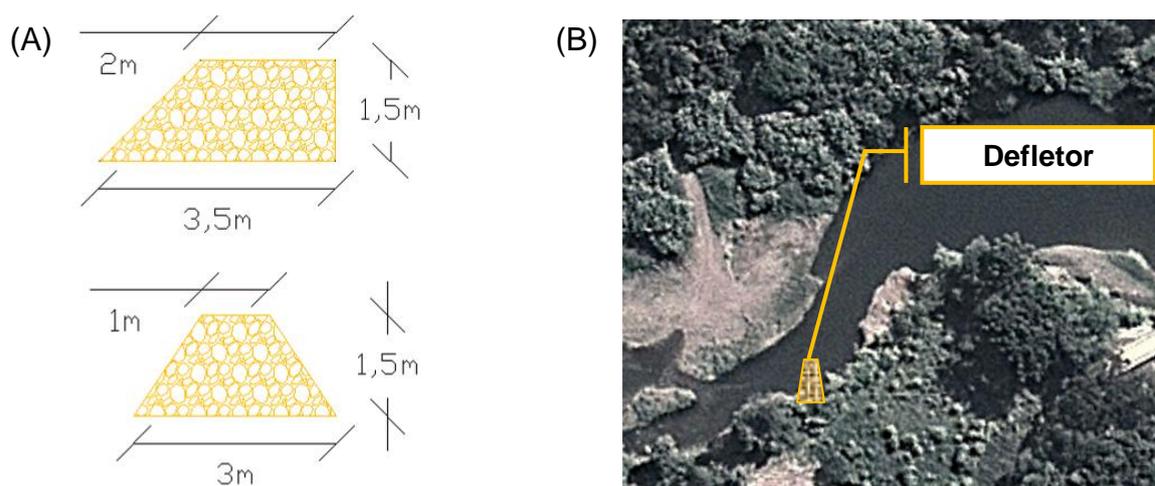
Conhecidas a velocidade do escoamento, DLT, condições e características da margem, propõem-se à recuperação da mesma por meio do uso de um **defletor** na porção montante do local, **enrocamento de pedras** na base de toda extensão do talude, seguido de **esteira viva** até uma altura de 3 metros e na extensão restante até a linha do topo, **inhame**. Além disso, sob o topo, propõem-se o uso de **banquetas**, no entanto, dispostas de forma invertida. O detalhamento das técnicas propostas é apresentado a seguir.

5.4.4.1 Defletor

A utilização de um defletor na porção montante da margem visa desviar a força do fluxo de água para o centro do canal e provocar o depósito dos materiais transportados à jusante da estrutura. Desta forma, sugere-se que a mesma apresente 2 metros de comprimento e 1 metro de largura junto ao nível normal da água, com profundidade de 1 metro e altura de 0,5 metros e, em relação à margem direita e em direção à foz, apresente inclinação de 45°. A largura e comprimento da base dessa estrutura devem apresentar aproximadamente 3 metros e 3,5 metros, respectivamente (FIGURA 59).

Os blocos a serem utilizados nessa estrutura podem ser de basalto e devem respeitar a DLT anteriormente calculada (mínimo de 0,92 metros de face maior) em aproximadamente 80% dos blocos utilizados e o restante com dimensões menores e variadas. Segundo Barro (2011), considerando o fato de que os blocos não estão isolados, mas sim interligados de forma irregular, acabam tendo uma resistência maior pela sinergia de forças de resistência ao carreamento provocado pela força das águas, permitindo uma maior segurança quanto à resistência da obra como um todo.

Figura 59: Esquematização do defletor (A) e seu posicionamento em relação à margem (B)



Fonte: Autor

Dadas as condições do fundo do leito, que é rochoso, e da configuração proposta ao defletor, sugere-se que as pedras sejam dispostas e organizadas cuidadosamente para evitar que escorreguem sobre o fundo e que se consiga a configuração e o efeito desejados.

Ressalta-se que, de modo geral, os defletores propiciam proteção à margem em uma extensão aproximada de 3 a 4 vezes o seu comprimento, podendo esta também ser à distância a ser respeitada quando da utilização de mais de um defletor (DURLO; SUTILI, 2005). Para os casos em que se pretende utilizar mais de um defletor, é sugerido, como medida de segurança à resistência, que a distância entre o primeiro e segundo defletor seja menor que a dos defletores seguintes. Nesse sentido, a proteção que o defletor proposto poderá proporcionar à margem ficará entre 10,5 e 14 metros.

5.4.4.2 Enrocamento de pedras

A utilização de enrocamento de pedras tem como objetivo garantir a resistência da base da estrutura do talude aos processos erosivos, dissipar a força da água sobre a margem, além de proteger a base dos feixes a serem utilizados para a implantação da esteira viva, uma vez que o movimento das águas pode prejudicar a fixação dos feixes. Neste caso, também se sugere que seja respeitado o mínimo de 0,92 metros de face maior em cerca de 80% dos blocos a serem utilizados, principalmente nos que serão dispostos abaixo da linha da água, enquanto que os demais podem apresentar dimensões menores, de modo possam ser utilizados para manter os ramos da esteira viva dentro da água e fixados ao solo.

Recomenda-se que os blocos, também de basalto, sejam dispostos cuidadosamente (dadas a condições do fundo do leito) a partir do defletor, tendo uma altura mínima semelhante ao nível de referência da água (a altura nesse caso irá variar entre 1 e 2 metros, devido à diferença de profundidade entre as porções montante e jusante), com uma largura mínima de 1,5 metros a partir do talude (FIGURA 61) e comprimento de aproximadamente 46 metros.

5.4.4.3 Esteira viva

A proposição do uso de esteira viva na recuperação da margem do Arroio Forquetinha se justifica, segundo Durlo e Sutili (2005), pelo fato de ser um excelente tratamento vegetativo, especialmente no raio externo das curvas dos cursos de água, onde o impacto da água é frontal. A justaposição de hastes nas margens proporciona uma proteção de caráter físico, que é reforçado posteriormente pelo

enraizamento da vegetação. É considerada uma das mais promissoras para esse tipo de situação.

No caso em questão, para colocação da esteira viva, será necessário o retaludamento da margem, que atualmente apresenta inclinação próxima à 90°, para uma inclinação de 60°, até a altura de 3 metros (FIGURA 61). Ressalta-se que a inclinação indicada para disposição dessa tipologia biotécnica é próxima de 40°, no entanto, no município de Estrela, a referida técnica foi implementada em 2010, num talude cuja inclinação ficou em 60°, demonstrando eficácia satisfatória até hoje.

Como espécies vegetais a serem utilizadas na confecção da esteira viva, sugere-se o uso de plantas facilmente encontradas às margens do Arroio Forquetinha, sendo elas sarandi-branco (*Phyllanthus sellowianus*), sarandi-vermelho (*Sebastiania schottiana*), salseiro (*Salix humboldtiana*) e caliandra (*Calliandra brevipes*).

As plantas citadas acima devem ser dispostas paralelamente ao retaludamento da margem, com a base dos feixes dentro da água, protegida e presa pelos blocos do enrocamento de pedras. O restante da extensão dos feixes deve ser fixada ao solo com tirantes de arame galvanizado nº 16 (1,65 mm), transpassados (primeiramente no sentido longitudinal e posteriormente no sentido transversal, formando um “X” sobre os ramos) e fixados a estacas de 3 x 5 x 80 cm, com espaçamento de 1 metro. Posterior à fixação, deve-se cobrir os feixes com uma fina camada de solo, a fim de facilitar e estimular o enraizamento dos feixes.

5.4.4.4 Inhame

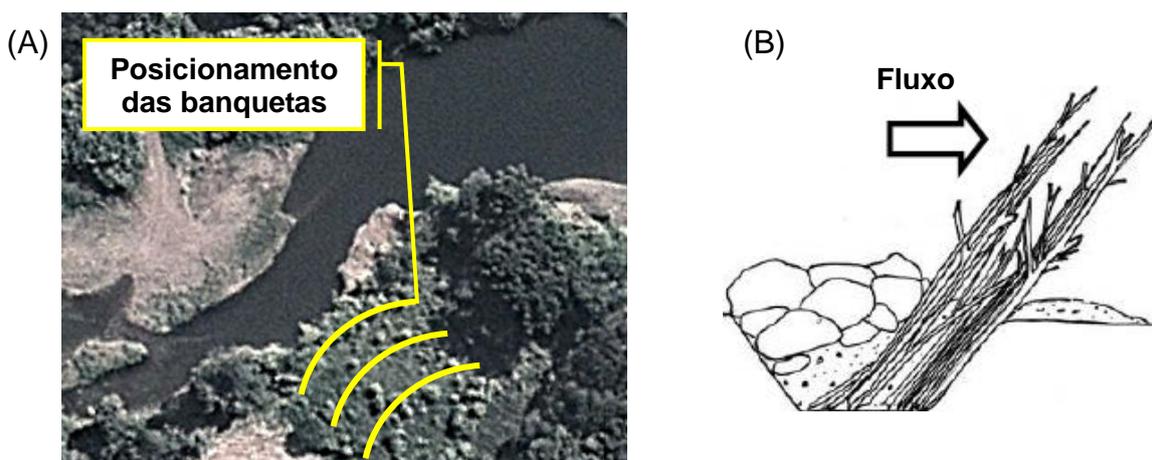
Ao passo de dar continuidade à revegetação e proteção da margem, sugere-se o plantio de inhame (*Alocasia macrorrhiza*) até a linha do topo, sendo que essa porção do talude também deverá passar por retaludamento, no entanto, para uma inclinação de 45° (FIGURA 61). Os rizonas de inhame a serem utilizados devem ser de qualidade, pesando entre 100 e 150 gramas, enterrados a 10 cm de profundidade e distanciados entre si em 30 cm. Dada à propriedade do inhame, que é de sustentação do solo, sugere-se que também sejam introduzidas estacas das espécies vegetais propostas à esteira viva, a fim de proporcionar a revegetação deste ponto também.

5.4.4.5 Banquetas invertidas

No topo da margem, com o intuito de recuperar a área das condições que ela se encontra hoje e devido às movimentações, em decorrência da implantação das outras tipologias propostas, e protegê-la da ação erosiva das águas que podem vir a atingi-la novamente, propõe-se o uso de banquetas dispostas de forma invertida (FIGURA 61). Sugere-se também que os espécimes de araucária sejam removidos da margem, apesar de sua imunidade ao corte, por se tratar de uma espécie que alcança dimensões elevadas, tanto de altura quanto de diâmetro do tronco, gerando sobrecarga e favorecendo o efeito alavanca sobre a margem.

O traçado das linhas das banquetas, em planta baixa, deve formar arcos, devendo a porção convexa ser posicionada para choque frontal com fluxo da água em período de enchente (FIGURA 60-A), a fim de desviar o fluxo da água. Além do posicionamento, sugere-se que as mudas sejam plantadas em perfil oblíquo, com inclinação de 40° no mesmo sentido da corrente, de modo que durante às inundações as plantas se prostrem com facilidade, formando um manto sobre o solo, amenizando o efeito erosivo do evento (FIGURA 60-B). As mudas devem ser fixadas ao solo com estacas (3 x 5 x 80 cm), distanciadas 1 metro umas das outras e presas a arame galvanizado nº 16 (1,65 mm).

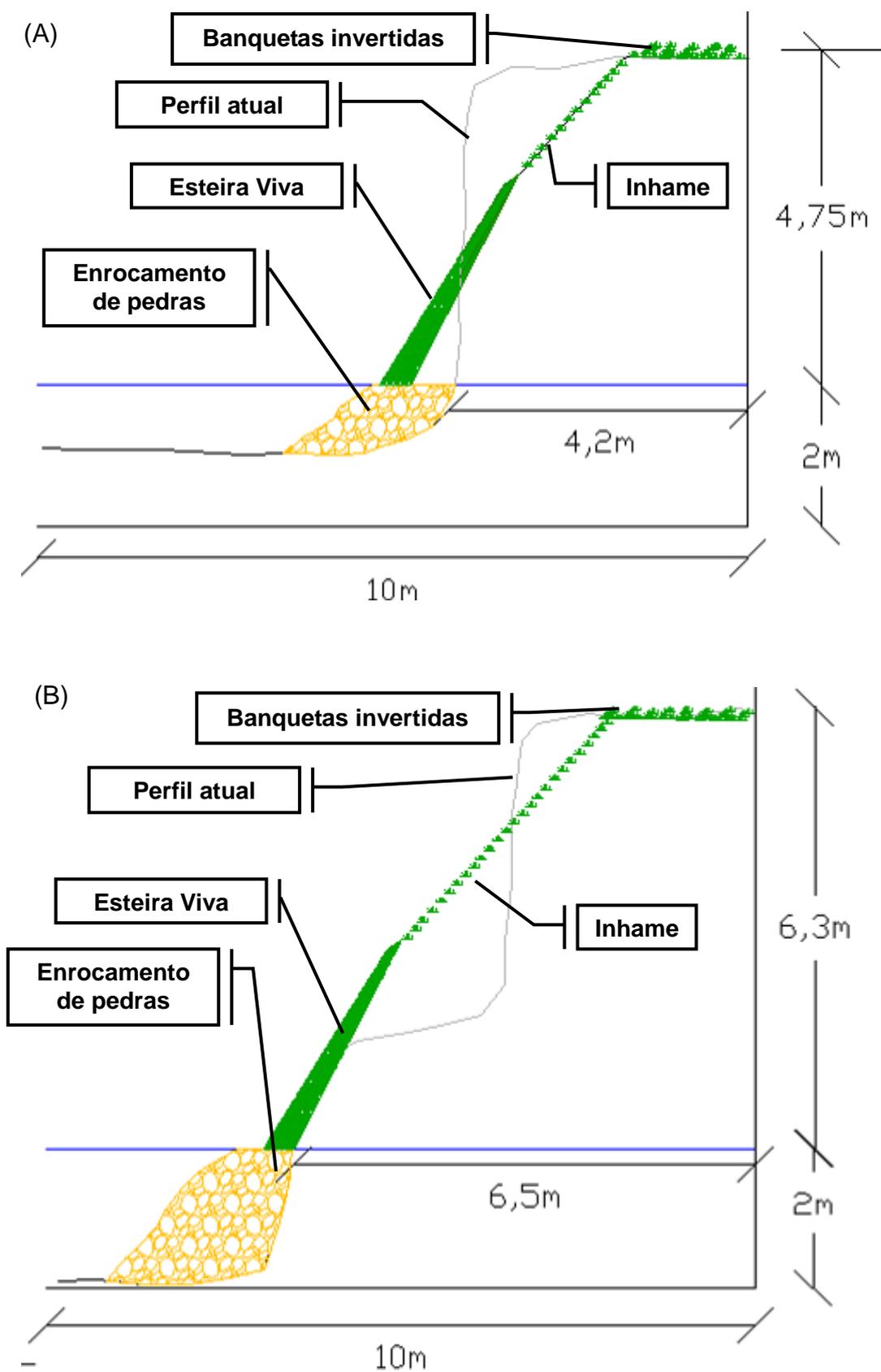
Figura 60: Esquemática do posicionamento das banquetas invertidas



Fonte: Autor

A Figura 61 ilustra o efeito esperado à recuperação da margem pelas tipologias propostas.

Figura 61: Esquemática do perfil a montante (A) e jusante (B) com as tipologias propostas



5.4.4.6 Custo das tipologias propostas

Na sequência é apresentada a estimativa dos custos que envolvem a execução das tipologias de bioengenharia de solos propostas à recuperação da margem do Arroio Forquetinha, na altura da ponte de Bauereck (TABELAS 9 – 11). Apesar das tipologias serem as mesmas ao longo de toda a extensão da margem, exceto pelo defletor que é proposto apenas na porção a montante (TABELA 9), ocorre relativa diferença de altura e profundidade entre a porção jusante e montante, o que acarretará diferença entre ambas nos custos de recuperação. Devido a isso, será apresentada a estimativa dos custos² para recuperação de 10 metros na porção jusante e 10 metros na porção montante, para que se possa fazer a média entre ambas e apresentar o valor por metro linear de obra.

Ressalta-se que os valores apresentados na estimativa a seguir foram obtidos com empresas do município de Forquetinha ou próximas a ele, no intuito de evitar que custos com transporte e deslocamento elevassem a estimativa em questão.

Tabela 9: Estimativa de custos para construção do defletor

Descrição do material / serviço	Quantidade	Preço (R\$)	Total (R\$)
Pedras dispostas no local (m ³)	8,5	70,00	595,00
Escavadeira hidráulica (Poclain) (hora)	1	115,00	115,00
TOTAL			710,00

Fonte: Autor

De acordo com a estimativa acima, para construção do defletor proposto seriam necessários R\$ 710,00 ou R\$ 83,53 por m³ de pedras dispostas. Se levarmos em consideração a proteção que o defletor poderá proporcionar à margem (entre 10,5 e 14 metros), teremos um custo entre R\$ 67,62 e R\$ 50,71 por metro de margem protegida. A seguir (TABELA 10) são apresentadas as estimativas de custo das porções montante e jusante, para que se obtenha o custo por metro linear de obra no tratamento da margem em questão.

² Na estimativa de custos não está incluída a avaliação dos valores envolvidos com o processo de Licenciamento Ambiental e de Projeto e Execução.

Tabela 10: Estimativa de custos para recuperação da porção a montante

Descrição do material / serviço	Quantidade	Preço (R\$)	Total (R\$)
<i>Enrocamento de pedras</i>			
Pedras para 10 metros de proteção (m ³)	15	70,00	1050,00
Escavadeira hidráulica (Poclain) (hora)	2	115,00	230,00
Total			1.280,00
<i>Esteira viva</i>			
Pedras para ancorar material vegetal (m ³)	1	70,00	70,00
Escavadeira hidráulica (Poclain) (hora)	2	115,00	230,00
Espécies vegetais (ramo)	70	10,00	700,00
Mão de obra para fixação da esteira (2 dias X 5 pessoas)	10	35,00	350,00
Arame galvanizado nº 16 (1,65 mm)	4	7,40	29,6
Estacas de madeira (unidade)	30	1,00	30,00
Total			1.409,60
<i>Inhame</i>			
Escavadeira hidráulica (Poclain) (hora)	2	115,00	230,00
Mão de obra (1 dia X 5 pessoas)	5	35,00	175,00
Rizomas de inhame (kg)	30	2,30	69,00
Total			474,00
<i>Banquetas invertidas</i>			
Escavadeira hidráulica (Poclain) (hora)	2	115,00	230,00
Mão de obra para fixação do material vegetal (1 dia X 5 pessoas)	5	35,00	175,00
Arame galvanizado nº 16 (1,65 mm)	1	7,40	7,40
Estacas de madeira (unidade)	30	1,00	30,00
Espécies vegetais (muda)	70	3,00	210,00
Total			652,40
TOTAL GERAL			3.816,00

Fonte: Autor

Tabela 11: Estimativa de custos para recuperação da porção a jusante

Descrição do material / serviço	Quantidade	Preço (R\$)	Total (R\$)
<i>Enrocamento de pedras</i>			
Pedras para 10 metros de proteção (m ³)	30	70,00	2.100,00
Escavadeira hidráulica (Poclain) (hora)	4	115,00	460,00
Total			2.560,00
<i>Esteira viva</i>			
Pedras para ancorar material vegetal (m ³)	1	70,00	70,00
Escavadeira hidráulica (Poclain) (hora)	4	115,00	460,00
Espécies vegetais (ramo)	70	10,00	700,00
Mão de obra para fixação da esteira (2 dias X 5 pessoas)	10	35,00	350,00
Arame galvanizado nº 16 (1,65 mm)	4	7,40	29,60
Estacas de madeira (unidade)	30	1,00	30,00
Total			1.639,60
<i>Inhame</i>			
Escavadeira hidráulica (Poclain) (hora)	4	115,00	460,00
Mão de obra (2 dias X 5 pessoas)	10	35,00	350,00
Rizomas de inhame (kg)	60	2,30	138,00
Total			948,00
<i>Banquetas invertidas</i>			
Escavadeira hidráulica (Poclain) (hora)	2	115,00	230,00
Mão de obra para fixação do material vegetal (1 dias X 5 pessoas)	5	35,00	175,00
Arame galvanizado nº 16 (1,65 mm)	1	7,40	7,40
Estacas de madeira (unidade)	30	1,00	30,00
Espécies vegetais (muda)	70	3,00	210,00
Total			652,40
TOTAL GERAL			5.800,00

Fonte: Autor

Analisando as Tabelas 9 e 10, obtêm-se a estimativa de custo de R\$ 3.816,00 para recuperar de 10 metros da porção montante e R\$ 5.800,00 para a porção jusante, implicando num custo médio por metro de margem recuperada com enrocamento de pedras de R\$ 192,00, com esteira viva de 152,46, plantio de inhame de 71,10 e uso das banquetas invertidas de R\$ 65,24, totalizando um gasto de R\$ 480,80 por metro linear que tenham sido aplicadas as tipologias citadas.

A partir dos valores acima apresentados e considerando também o custo do defletor, o valor estimado a ser gasto para recuperar essa margem do Arroio Forquetinha seria de R\$ 22.826,80.

6 CONCLUSÕES

Os Sistemas de Informações Geográficas e as imagens de satélite mostraram-se satisfatórias como complemento ao desenvolvimento deste estudo, sendo possível, por meio deles a manipulação, o cruzamento e a quantificação de dados necessários para atingir alguns dos objetivos propostos. A partir deles foi possível avaliar a condição de adequação do uso e cobertura do solo das margens do Arroio Forquetinha, bem como a condição de degradação que ocorre nessas margens.

Em se tratando da identificação dos locais com a margem degradada, é perceptível que o Arroio Forquetinha consiste em um recurso hídrico com significativo grau de degradação, cujo quadro se intensifica principalmente nos locais desprovidos de qualquer cobertura vegetal. Tal percepção é confirmada quando comparados os percentuais de uso agropecuário na faixa de 5 metros e de locais considerados degradados, evidenciando a importância da existência de mata ciliar nesse ambiente para proporcionar proteção e estabilidade às margens, principalmente dos períodos de cheias.

O quadro levantado faz refletir a respeito do novo Código Florestal, que possibilitou a redução das áreas a serem recuperadas nas propriedades com usos consolidados até 2008. Essa mudança poderá estimular ou obrigar os proprietários rurais a recuperar até a largura de 5 metros dessas áreas. Possibilitando que estejam de acordo com o determinado pela lei, além do fato de que recuperar essa faixa representa um impacto menor ao que consideram como perda de área/espço da qual retiram seu sustento.

Em relação à suscetibilidade de ocorrência de cheias no Arroio Forquetinha, apesar da constatação de se tratar de uma bacia pouco sujeita a inundações, alguns eventos extremos de cheias ocorridos recentemente e às condições de degradação observados nas margens, dado a condições naturais ou antropogênicas, intensificam a necessidade de recuperação dessas áreas. Este estudo buscou alicerçar a recuperação dessas áreas nas tipologias de bioengenharia de solos encontradas na etapa da pesquisa exploratória, possibilitando assim o embasamento da proposta de intervenção real.

Devido à impossibilidade de implementação das tipologias propostas e a avaliação dos resultados que poderão proporcionar ao local degradado escolhido, acredita-se que as mesmas proporcionariam o alcance dos objetivos para o qual foram implantadas, ou seja, proteção e recuperação da qualidade ambiental da margem do Arroio Forquetinha.

O efeito que poder-se-á esperar após a realização de uma obra deste tipo é, de imediato, a estabilidade assegurada pelo material inerte e pelo efeito protetor da esteira viva. Posteriormente, a tarefa de assegurar a estabilidade é desenrolada pelo enraizamento da esteira viva e das demais partes vegetais propostas. As plantas irão ser extremamente eficazes, pois permitirão um duplo efeito funcional, o aumento da resistência mecânica da obra, através do seu aparelho radical e um gradual efeito estético-ecológico, graças à função biológica que expõem.

Por meio das suas funções biotécnicas, as plantas irão satisfazer os requisitos requeridos, aumentando, por exemplo, a capacidade de resistência ao arranque ou ao corte por parte das raízes, a capacidade de resistir a elevadas solicitações mecânicas, e a capacidade de consolidar o terreno permeabilizando-o com as raízes. Desta forma, é de esperar no talude alvo da intervenção, um aumento não só da resistência à erosão, como também um maior controle dos movimentos de massa superficiais, decorrente do desenvolvimento da vegetação ao longo do tempo.

Defende-se aqui que a bioengenharia de solos é uma área de conhecimento importante na recuperação e melhora da qualidade ambiental dos ambientes fluviais degradados, não apenas por ser uma técnica simples que agrega material vegetal e inerte, mas porque também pode ser executada, quando devidamente informado, pelo próprio proprietário rural principalmente naquelas situações em que o processo erosivo começa apresentar os primeiros sinais.

Percebe-se, contudo, a necessidade de realização de mais pesquisas na área, principalmente para os cursos hídricos locais, pois a utilização da vegetação para estabilidade de taludes é um assunto multidisciplinar e ainda pouco estudado. Ao longo do desenvolvimento deste estudo, contatou-se a necessidade da dedicação de diversas áreas além da engenharia ambiental, tais como engenharia civil, botânica, meteorologia, geologia, agronomia, hidrogeologia, administração para que se conseguisse um conhecimento satisfatório sobre materiais, métodos relacionados à problemática, e custos envolvidos.

Em se tratando da análise de custos, avalia-se que o custo elevado das obras convencionais de engenharia, possivelmente, seja um dos principais motivos pelo qual se opta por obras de bioengenharia de solos. Conforme estimado, o valor requerido pelas técnicas de bioengenharia não é elevado e ainda pode ser reduzido se ações de recuperação forem tomadas logo que observados os problemas. Além disso, muitos dos materiais necessários podem estar disponíveis próximo ao local, principalmente o material vegetal e a mão de obra a ser empregada, no caso de obras particulares, pode vir da própria família, vizinhos e amigos, ou dos funcionários já contratados, no caso de obras públicas ou privadas.

Corroborando também ao baixo valor das obras, o fato das técnicas de bioengenharia serem biologicamente e esteticamente mais adequadas que as técnicas de engenharia tradicional visto que colaboram com o enriquecimento da paisagem por meio da criação de novos elementos, estruturas, formas e cores de vegetação, além de propiciarem a integração das estruturas com a paisagem.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

No decorrer do desenvolvimento desse estudo foi observada a carência de dados que proporcionariam um resultado mais preciso, bem como também se observou a possibilidade de ampliar ou estender o estudo apresentado. As percepções e sugestões são listadas a seguir:

- ✓ reavaliar a cobertura vegetal e os locais com margem degradada utilizando base cartográfica atualizada;
- ✓ monitorar as cheias do Arroio Forquetinha para que seja possível montar e manter um banco de dados com o histórico das cheias;

- ✓ avaliar a porção de solo que foi removida da margem nos últimos anos em decorrência dos processos erosivos atuantes;
- ✓ realizar o levantamento das espécies vegetais que se encontram sobre a margem e remover as inadequadas ao ambiente ciliar;
- ✓ comparar os custos de uma recuperação feita por meio da engenharia tradicional à bioengenharia de solos;
- ✓ avaliar se a faixa de recuperação prevista pelo novo Código Florestal é adequada/suficiente à manutenção e existência do ambiente ciliar do Arroio Forquetinha.

REFERÊNCIAS

ALLEN, Hollis H.; LEECH, James R. **Bioengineering for Streambank Erosion Control, Report 1: Guidelines**. US Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station. Technical Report, 1997. p. 105.

ALVARENGA, Auwdréia. P. **Avaliação inicial da recuperação de mata ciliar em nascentes**. 2004. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

ARAUJO, Gustavo Henrique de Sousa; ALMEIDA, Josimar Ribeiro de; GUERRA, Antônio José Teixeira. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

BAPTISTA, Márcio Benedito; LARA Pinto Coelho, Márcia Maria. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3 ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 480p.

BARRO, Esmael. **Estudo de caso: Estabilização biotécnica no Rio Taquari em Estrela - RS**. 2011. 46 f. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

BARRELLA, Walter; PETRERE, Miguel; SMITH, Welber Senteio; MONTAG, Luciano Fogaça de Assis. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO, H.F.L. (eds.) **Matas ciliares: conversação e recuperação**. São Paulo: EdUSP, 2000. p.187-205.

BISHOP, Daniel; STEVENS, Mervin. **Landslides on logged areas in southeast Alaska**. USDA Forest Research Service Paper NOR-1, 1964. p. 21.

BITAR, Omar Yazbek; IYOMASA, Wilson Shoji; CABRAL JR., Marsis. **Geotecnologia: tendências e desafios**. São Paulo Perspec. [online]. 2000, vol.14, n.3, p. 78-90. ISSN 0102-8839. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=s010288392000000300013&script=sci_arttext>. Acesso em 11 abr. 2012.

BRASIL. Lei Federal nº. 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências.** Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm>. Acesso em: 01 jun. 2012a.

BRASIL. Lei Federal nº. 12.727, de 17 de outubro de 2012. **Altera a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2º do art. 4º da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12727.htm>. Acesso em: 09 nov. 2012b.

BRASIL. Lei Federal nº. 7.803, de 18 de julho de 1989. **Altera a redação da Lei nº. 4.771, de 15 de setembro de 1965, e revoga as Leis nºs 6.535, de 15 de junho de 1978, e 7.511, de 7 de julho de 1986.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7803.htm>. Acesso em: 18 abr. 2012.

BRASIL. Lei Federal nº. 4.771, de 15 de setembro de 1965. **Institui o novo Código Florestal.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L4771.htm>. Acesso em: 18 abr. 2012.

CARVALHO, Celso Santos; GALVÃO, Thiago (orgs). **Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais.** Ministério das Cidades: Cities Alliance, 2006. 111 p.

CECONI, Denise Ester. **Diagnóstico e recuperação da mata ciliar da Sanga Lagoão do Ouro na microbacia hidrográfica do Vacacaí-Mirim, Santa Maria – RS.** 2010. 132 f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, 2010.

CHAVES, Adilar. **Importância da mata ciliar (Legislação) na proteção dos recursos hídricos, alternativas para sua viabilização em pequenas propriedades rurais.** Passo Fundo, RS : [s. n.], 2009. 19 f.

CHECCHIA, Tatiane. Influência da zona ripária sobre os recursos hídricos: aspectos quantitativos e qualitativos. In: **I Seminário de Hidrologia Florestal: Zonas Ripárias**, 2003, Alfredo Wagner. p. 87-101.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1980. 188 p.

CIH - Centro de Informações Hidrometeorológicas. **Dados sobre Enchentes no Vale do Taquari** (informações não publicadas). Lajeado: UNIVATES, 2012.

CORRÊA, Ricardo Santos. **Efeitos dos incêndios florestais na zona de enraizamento em encostas íngremes: vertente norte, Maciço da Tijuca/RJ.** 2004. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

CRUZ, Marcus. Geotecnologias e o manejo de bacias hidrográficas. **Embrapa**, Brasília, 29 dez. 2009. Disponível em <<http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2009/geotecnologias-e-o-manejo-de-bacias-hidrograficas>>. Acesso em: 19 abr. 2012.

CUNHA, Sandra B. Geomorfologia Fluvial. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (orgs.) **Geomorfologia uma Atualização de Bases e Conceitos.** 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 211-252.

DURLO, Miguel. Antão; SUTILI, Fabrício Jaques. **Bioengenharia: Manejo biotécnico de cursos de água.** Porto Alegre: EST Edições. 2005. 189p.

ECKHARDT, Rafael R. **Mapeamento Temático do município de Forquethinha/RS.** Forquethinha: 2009. 78p.

FERNANDES, João P.; FREITAS, Aldo R. M. **Introdução à Engenharia Natural.** Portugal: EPAL, 2011. 108 f.

FERNANDES, Nelson F; AMARAL, Cláudio P. do. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, Antonio T. & CUNHA, Sandra B. da. **Geomorfologia e meio ambiente.** 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000. p.123-194.

FERREIRA, Everaldo; BOTH, Graziela. Aspectos hidrológicos na degradação das zonas ripárias no Rio Taquari/RS. In: STROHSCHOEN, Andréia A. G.; REMPEL, Claudete. **Reflorestamento e Recuperação Ambiental: Ambiente e Tecnologia: o desenvolvimento sustentável.** Lajeado: Univates, 2005. p. 27-35.

Federal Interagency Stream Restoration Working Group - FISRWG. **Stream Corridor Restoration: Principles, Processes and Practices.** The Federal Interagency Stream Restoration Working Group, ISBN-0-934213-59-3, 1998.

FLORENZANO, Teresa Galloti, (org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 318p.

FONTES, Luiz C. S. **Erosão Marginal no Baixo Curso do Rio São Francisco.** Um Estudo de Caso de Impactos Geomorfológicos à Jusante de Grandes Barragens. 2002. 249 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Núcleo de Pós-Graduação e Estudos do Semi-Árido Programa Regional de Pós-Graduação, Universidade Federal de Sergipe. UFS, Aracaju/SE, 2002.

FREITAS, Aldo Renato Mendes. **Proposta de requalificação biofísica e paisagística de um talude num percurso do Parque Nacional Do Vesúvio com técnicas de Engenharia Biofísica.** 2006. 95 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Biofísica, Universidade de Évora, Itália, 2006.

GARCEZ, Lucas Nogueira; ALVAREZ, Guillermo Acosta. **Hidrologia**. 2 ed. rev. e atual. São Paulo: Edgar Blucher, 1988.291 p.

GOMES, Luviana G. Nery. **A bioengenharia como ferramenta para restauração ambiental das margens do rio São Francisco**. 2005. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), São Cristóvão, 2005.

GRAY, Donald H.; SOTIR, Robin D. **Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A practical guide for erosion control**. John Wiley & Sons Inc., Nova Iorque, EUA, 1996.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos Manoel. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 194 p.

HASENACK, H.; WEBER, E. (orgs.). Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS-IB-Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM (Série Geoprocessamento, 3).

HOAG, Chris; FRIPP, Jon. **Streambank Soil Bioengineering Field Guide for Low Precipitation Areas**. USDA-NRCS Plant Material Center, Aberdeen, 2002.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Contagem da População de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=43&dados=1>>. Acesso em: 20 abr. 2012.

LEWIS, Lisa. **Soil Bioengineering an Alternative for Roadside Management: a practical guide**. San Dimas, California: United States Department of Agriculture, 2000. 47 p.

LI, Ming-Han; EDDLEMAN, Karen E. **Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: a biotechnical streambank stabilization design approach**. Landscape and Urban Plann 60, Issue 4, 2002. p. 225–242. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01692046/60>> Acesso em: 02. maio. 2012.

LIMA, Walter de Paula; ZAKIA, Maria José Brito. Hidrologia de Matas Ciliares. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO, H.F.L. (eds.) **Matas ciliares: conversação e recuperação**. São Paulo: EdUSP, 2000. p.187-205.

LIMA, Maria do Socorro Bezerra de. **Movimentos de Massa nos barrancos do Rio Acre e implicações socioeconômicas na área urbana de Rio Branco – Acre**. 1998. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

LIMA, Walter de Paula. **Hidrologia Florestal aplicada ao manejo de Bacias Hidrográficas**. Apostila da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Departamento de Ciências Florestais, Piracicaba, São Paulo. Disponível em: www.ipef.br/hidrologia/hidrologia.pdf. Acesso em 28. set. 2012

MAGALHÃES, Regiane Campos; OLIVEIRA, Ercivan Gomes de; ALBUQUERQUE, Adoréa Rebello da Cunha; AQUINO, Raimundo Nonato de Abreu. **Análise Geográfica Sobre Erosão de margens e movimentos de massa na comunidade do Divino E. Santo – AM (Brasil)**. *Revista Geográfica de América Central*. Vol 2, Nº 47E, 2011. Disponível em < <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2586>>. Acesso em 22. abr. 2012

MARTINS, Sebastião V. **Recuperação de matas ciliares**. 2. ed. Revista e ampliada. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2007. 255p.

NOVO, Evlyn M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Editora Edgard Bücher Ltda, 1992. 308 p.

OLIVEIRA FILHO, Ary Teixeira de. Estudos ecológicos da vegetação como subsídios para programas de revegetação com espécies nativas: uma proposta metodológica. In: **Cerne**. Lavras, v.1, n.1, p.64-72, 1994. Disponível em: <www.dcf.ufla.br/cerne/publicacao.php?volume=1&numero=1>. Acesso em: 27 mar. 2012.

PINTO, Gabriela Martins. **Bioengenharia de solos na estabilização de taludes: comparação com uma solução tradicional**. 2009. 78f. Monografia (Graduação) - Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) - Porto Alegre, 2009.

PINTO, Nelson L. de Sousa; HOLTZ, Antonio Carlos de Tatit; MARTINS, José Augusto; GOMIDE, Francisco Luiz Sibut Gomide. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgar Blucher, 1976. 278p.

FISCONET. **Prefixos e módulos fiscais dos municípios**. Disponível em: <http://www.fisconet.com.br/icms/in45/apendices/ap-05.htm>. Acesso em: 06 jun. 2012

REIS, Patrícia Elizamma. **O escoamento superficial como condicionante de inundação em Belo Horizonte, MG: estudo de caso da sub-bacia córrego do Leitão, bacia do ribeirão Arrudas**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2011.

SANTOS, Rozely Ferreira dos (org). **Vulnerabilidade Ambiental: Desastres naturais ou fenômenos induzidos?**. Brasília: MMA, 2007. 196 f.

SCHIECHTL, Hugo M.; STERN, Ronald. **Water Bioengineering Techniques for Watercourse, Bank and Shoreline Protection**. Blackwell Scientific Publication, Oxford, 1997.

SOLERA, Maria L. **Avaliação de técnicas da bioengenharia de solos para proteção de taludes: estudo de caso para aplicação nas encostas do reservatório da barragem da UHE Engº Sérgio Motta, Rio Paraná, SP/MS**. 2010. 71 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo/SP. 2010.

STRECK, Edegar V.; KÄMP, Nestor; DALMOLIN, Ricardo S. D.; KLAMT, Egon; NASCIMENTO, Paulo C.; SCHNEIDER, Paulo. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Emater/RS - ASCAR, 2008. 222 p.

SUGUIO, Kenitiro; BIGARELLA, João J. **Ambientes Fluviais**. 2. ed. Florianópolis: A.D.E.A – Universidade Federal do Paraná, 1979. 183 p.

SUTILI, Fabrício J. **Manejo biotécnico do arroio Guarda-Mor: princípios, processos e práticas**. 2004. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

TOMONAGA, Lídia Keiko; SANTOTO, Jair; AMARAL, Rosângela do (orgs.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

VENTI, Donatella; BAZZURRO, Federico; PALMERI, Fabio; UFFREDUZZI, Tonino; VENANZONI, Roberto; GIBELLI, Gioia. **Manuale Tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni**. Servizio Assetto Del Territorio – Ufficio Urbanistica, Terni, Itália, 2003.

ANEXO – Breve descrição das espécies vegetais sugeridas na recuperação da margem

Calliandra brevipes



Calliandra brevipes comumente conhecida por caliandra, angiquinho, quebra-foice, esponjinha, topete-de-cardeal, entre outros nomes. É um arbusto muito ramificado, da Família Fabaceae nativo da Mata Atlântica no sul e sudeste, de ramos finos que pode atingir de 1 a 2 metros de altura, adaptada a reofilia, suportando submersão temporária e desenvolvendo-se bem a pleno sol.

As folhas são alternas, compostas bipinadas unijugas, com folíolos pequenos (7 x 1 mm) glabros. As flores são pequenas, com estames longos (6 cm) de cor rosa e branca ou branca. A aparência da inflorescência é de um “pompom”. Floresce da primavera ao fim do verão e pode ser propagada por sementes e estacas.

Alocasia macrorrhiza



Inhame é uma planta herbácea caracterizada pelo seu rizoma tuberoso, de onde nascem em roseta, na extremidade de longos pecíolos, que variam entre 1 e 1,5 metros, grandes folhas peltadas que podem atingir 70 cm de comprimento por

60 cm de largura. O limbo é cordiforme ou ligeiramente sagitado, de cor verde mais ou menos carregado. A planta prospera bem nas condições edafoclimáticas das regiões tropicais e subtropicais, desenvolvendo-se satisfatoriamente nos ecossistemas brasileiros.

Apresenta ciclo de cultivo bastante influenciado pela disponibilidade de água, luz e temperatura, grande produtividade, pouco exigente em mão de obra e insumos e de fácil conservação.

Phyllanthus sellowianus



Pertencente à família Euphorbiaceae, a espécie é conhecida vulgarmente pelos nomes de sarandi e sarandi-branco. Trata-se de arbusto que vive à margem de rios e arroios, invadindo as águas e estendendo-se, por vezes, por muitos quilômetros.

É um arbusto com 2 a 3 metros de altura, glabro, de ramos compridos e muito divididos, com folhas reduzidas e escamas perto dos ápices. Os ramos são delgados, sinuosos, alguns comprimidos e angulados. As folhas, estreito-elípticas, mucronuladas, delgadas e com nervuras laterais evidentes, planas de face inferior pálida, alcançam 3 a 4 cm de comprimento. As flores, dióicas, são bastante numerosas e dispostas em fascículos nas axilas da folhas. Os frutos são cápsulas deprimido-globosas, de 2,5 mm de diâmetro, e as sementes, quase lisas, medem pouco mais de 1 mm.

A planta de caule e ramos rijos, flexíveis, resiste a correntezas das águas durante as enchentes sendo, por isso, indicada para fixar os terrenos contra as fortes correntezas das águas, motivo pelo qual pertence ao grupo das reófitas.

Espécie heliófita e seletiva higrófito, até xerófito, adaptada às variações extremas de umidade e estio. Muito frequente, característica e exclusiva das margens rochosas ou lodosas dos rios e ilhas, em praticamente todo o Sul do Brasil, afixando-se firmemente ao substrato, uma vez que se desenvolve preferencialmente nos locais de corredeiras e cachoeiras dos rios

Salix humboldtiana



Vulgarmente conhecida como salgueiro ou salso, trata-se de uma árvore de porte médio (20 metros), com tronco reto, inclinado ou tortuoso, de até 90 cm de diâmetro, e copa ampla, de ramificação ascendente. A casca, espessa e com profundas fissuras, é dura e castanho-acinzentada. As folhas, simples, linearlanceoladas ou falcadas, alcançam até 15 cm de comprimento por 1,5 cm de largura. Caducas, glabras e com pecíolo curto (4 a 6 mm), apresentam ápice acuminado, base aguda e margem serrada, com nervura central proeminente. As flores, unissexuais e aperiantadas, reúnem-se em amentilhos pendentes na extremidade dos ramos novos. As sementes, muito pequenas, apresentam um tufo de pêlos sedosos esbranquiçados, responsáveis pela dispersão anemocórica.

Trata-se de espécie útil no controle da erosão, indicada especialmente para reflorestamentos em margens de rios, barragens e açudes. Possui fácil reprodução por estaquia e sementes de curta viabilidade em armazenamento. Floresce durante a primavera (setembro e outubro), amadurecendo seus frutos no final da primavera até o início do verão. Apresenta rápido e vigoroso crescimento que, sobretudo em solos muito úmidos e de elevada profundidade, contribui para a drenagem das várzeas brejosas.

Possui extraordinária facilidade e eficiência de multiplicação vegetativa. A madeira, leve ($0,49 \text{ g/cm}^3$), clara e sem distinção entre cerne e alborno, apresenta baixa durabilidade natural, restringindo sua utilização para caixotaria e obras internas. Também presta-se para a fabricação de celulose e papel, bem como possui flores nectaríferas.

Sebastiania schottiana



Sebastiania schottiana é conhecida no Rio Grande do Sul por amarelho, sarandi, sarandi-vermelho ou sarandi-de-espinho. É considerada um arbusto totalmente glabro, de 3 a 3,5 metros de altura, com ramos longos, pouco ramificados, espinescentes e muito flexíveis.

Folhas, simples, alternas, de pecíolo curto (2 a 4 mm), membranáceas e lanceoladas, variam de 1 a 5 cm de comprimento por 4 a 15 mm de largura, apresentando ápice obtuso ou brevemente agudo-mucronado, margem inteira, com uma ou duas glândulas engrossadas inferiormente e base cuneado-estreita. Discolores e esbranquiçadas na face inferior possuem de 7 a 10 nervuras secundárias evidentes, em cada lado da principal. As flores, pequenas e amareladas, são produzidas em espigas terminais, sobre raminhos muito curtos (1 a 2 cm). O fruto é uma cápsula globosa, de aproximadamente 5 mm de diâmetro.

A espécie é seletiva higrófila até xerófila, (adaptada às variações extremas de umidade ou seca) e altamente adaptada à reofilia, dispondo de denso sistema radicial e de caules rijos, embora flexíveis, capazes de suportar a força das águas nas enchentes. Como espécie reófila, assume grande importância ecológica, auxiliando na fixação de barrancos e na perenização dos cursos de água. A madeira carece de utilização devido ao pequeno diâmetro dos caules.