

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**CONNECTIVIDADE DOS AMBIENTES FLUVIAIS: IMPLICAÇÕES  
PARA AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO SISTEMA DE  
DRENAGEM DA BACIA DO RIO MACAÉ (RJ)**

**RAPHAEL NUNES DE SOUZA LIMA**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mônica dos Santos Marçal**

**RIO DE JANEIRO  
MARÇO DE 2010**

LIMA, Raphael Nunes de Souza

Conectividade dos ambientes fluviais: Implicações para avaliação da sensibilidade do sistema de drenagem da bacia do rio Macaé (RJ). Raphael Nunes de Souza Lima – Rio de Janeiro: UFRJ / IGEO / PPGG, 2010.

X 110 p.113, 29,7cm (Mestrado em Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG), Instituto de Geociências (IGEO/UFRJ), 2010).

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro / PPGG, 2010.

1. Geomorfologia fluvial 2. Conectividade de ambientes fluviais 3. Estilos fluviais  
4. Bacia do rio Macaé

I. UFRJ/IGEO/PPGG

II. Título (série)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**CONECTIVIDADE DOS AMBIENTES FLUVIAIS: IMPLICAÇÕES  
PARA AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO SISTEMA DE  
DRENAGEM DA BACIA DO RIO MACAÉ (RJ)**

**RAPHAEL NUNES DE SOUZA LIMA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGG/UFRJ) como requisito obrigatório para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.).

APROVADO POR:

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mônica dos Santos Marçal (Dpt<sup>o</sup> Geografia/UFRJ) – Orientadora**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Telma Mendes da Silva (Dpt<sup>o</sup> Geografia/UFRJ)**

---

**Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Raúl Sánches Vicens (Dpt<sup>o</sup> Geografia/UFF)**

---

**Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Antônio José Teixeira Guerra (Dpt<sup>o</sup> Geografia/UFRJ)**

*“A ciência avança através de respostas provisórias, em direção a uma série cada vez mais sutil de perguntas”.*

*Louis Pasteur*

## AGRADECIMENTOS

Teria sido impossível chegar até aqui sem a ajuda de incontáveis amigos e familiares, que com pequenos e grandes gestos, estiveram comigo durante a elaboração deste trabalho. Agradeço a todas as pessoas que me ajudaram quando as forças se exauriam, me mostrando que o caminho não era tão difícil quanto parecia.

Agradeço aos meus pais Marcos e Sandra, cujos ensinamentos me permitiram trilhar bons caminhos, que me conduziram até aqui. Ao meu irmão Thiago, minha avó Sylvia, minha eterna gratidão pelo amor e companheirismo que me acalmaram e encorajaram a seguir em frente. A todos os amigos e familiares, que somam uma interminável lista de pessoas queridas, agradeço.

À minha namorada Renata, por compreender a ausência forçada durante a fase de conclusão deste trabalho e por sempre ter torcido com entusiasmo pelo meu sucesso.

Agradeço especialmente à minha orientadora Mônica dos Santos Marçal, que sempre me conduziu de forma singular no caminho do amadurecimento científico e profissional com sabedoria, paciência e humildade. Sou grato a você, por ter me ensinado a persistir e a nunca perder o foco do objetivo final. Sempre serei grato pelo carinho e pelos sacrifícios despendidos, mas principalmente, por sempre ter acreditado em mim.

Agradeço aos professores Gary Brierley e Kirstie Fryirs, por terem me recebido com extrema cortesia e apreço durante encontro de Geomorfólogos na Austrália. Suas ideias e sugestões foram grandes inspiradoras para esta pesquisa.

Aos amigos do Lagesolos, Fred e Renato, agradeço a ajuda no momento mais crítico do trabalho. Pessoas como vocês a gente nunca esquece. Muito obrigado.

Agradeço aos grandes amigos André e Guilherme, que estiveram comigo desde a iniciação científica, compartilhando longas horas de trabalho.

Agradeço ao Carlos Milton e Cláudia Felix, por compartilharem experiências vivenciadas ao longo de seus cursos de mestrado. Muito obrigado pela compreensão e pelos bons conselhos.

Aos novos e bons amigos da Ecologus, muito obrigado por trazerem ao ambiente de trabalho uma atmosfera calma e alegre.

Agradeço à Claudia Barros e Edson Cruz, por terem confiado no meu trabalho e aberto as portas para novos horizontes de pesquisa, colocando-me em contato com profissionais de diversos campos do conhecimento.

Por fim, agradeço especialmente à FAPERJ pela bolsa de estudo de Mestrado, assim como ao CNPQ, pelo financiamento de projetos conduzidos pelo laboratório LAGESOLOS/UFRJ, cujos recursos de pesquisa foram fundamentais para compra de equipamentos, realização de trabalhos de campo, sem os quais os dados aqui utilizados não poderiam ser produzidos.

**CONECTIVIDADE DOS AMBIENTES FLUVIAIS: IMPLICAÇÕES  
PARA AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO SISTEMA DE  
DRENAGEM DA BACIA DO RIO MACAÉ (RJ)**

RAPHAEL NUNES DE SOUZA LIMA

**Orientadora: D.Sc. Mônica dos Santos Marçal**

**RESUMO**

O conceito de conectividade, definido como a transferência de matéria e energia entre diferentes compartimentos e setores de um ambiente, vem sendo desenvolvido também pela geomorfologia, estimulando o surgimento de instrumentos teórico-metodológicos que permitem o estudo integrado da paisagem. Frente aos desafios de avaliar as respostas de sistemas de drenagem às interferências antrópicas, a presente pesquisa teve como objetivo, analisar a conectividade dos ambientes fluviais ao longo do rio Macaé (RJ), e suas implicações na sensibilidade dos subsistemas desta bacia, localizada na região Norte do Estado do Rio de Janeiro. Para a caracterização dos diferentes ambientes fluviais foram realizados mapeamentos temáticos e técnicas de análise da dinâmica dos rios. Os resultados alcançados demonstraram sinais de fragilidade na bacia, dada à ocorrência de processos erosivos no alto curso, servindo como importante indicador de desajustes internos do sistema. Tais evidências de mudanças no padrão de produção de sedimentos demonstraram a capacidade de resiliência da bacia do rio Macaé, que nos últimos anos apresentou do ponto de vista geomorfológico, capacidade de absorver esses impactos, não tendo sido observados ajustes geomorfológicos nos canais. Ressalta-se, no entanto, que tal resiliência não é infinita e cumulativamente, a degradação do meio físico pode comprometer a funcionalidade geomorfológica e ecológica da bacia, bem como a qualidade de vida da população.

**CONECTIVIDADE DOS AMBIENTES FLUVIAIS: IMPLICAÇÕES  
PARA AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO SISTEMA DE  
DRENAGEM DA BACIA DO RIO MACAÉ (RJ)**

**RAPHAEL NUNES DE SOUZA LIMA**

**Supervisor: D.Sc. Mônica dos Santos Marçal**

**ABSTRACT**

The connectivity concept, framed in terms of the availability and delivery of sediment into the channel network and through a catchment, has been developed by Geomorphologists, as theoretical and methodological tools for assessing the landscape in an integrated manner. Facing the challenges of evaluating responses of the drainage system to anthropogenic interference, this study aims to analyze connectivity of river environments along the Macaé catchment (RJ), and assess the sensitivity of this sub-basin, located in northern Rio de Janeiro State. The differentiation of river types was held from thematic mapping and techniques of river dynamics assessing. The results showed that the main sensitivity signs in the basin were observed by the highland erosion, serving as an important indicator of internal disagreements in the catchment. Even with these changes, the resilience of the river system has shown that, geomorphologically, the channels have been able to absorb these impacts and drive the propagation of disturbance responses through a catchment. However, that this resilience is not unbounded, and increasing physical environment degradation can compromise the geomorphological and ecological function of rivers, as well as people's lives.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO .....	5
2.1	Objetivos Específicos.....	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1	A Abordagem Sistêmica na Geomorfologia Fluvial.....	6
3.1.1	Geomorfologia Fluvial e o Princípio de Energia Segundo a Teoria Geral dos Sistemas.....	7
3.1.2	O Sistema Fluvial .....	9
3.2	As Escalas de Análise e a Subjetividade.....	10
3.3	O Conceito de Conectividade .....	12
3.3.1	Os Tipos de Conectividade.....	13
3.3.2	Continuum Fluvial.....	16
3.3.3	Implicações dos Estudos de Conectividade na Avaliação da Sensibilidade do Sistema.....	17
3.4	Classificação Geomorfológica de Rios.....	18
3.4.1	Utilização da Metodologia dos Estilos Fluviais (River Styles ®).....	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1	Etapa 1: Caracterização Regional do Sistema Fluvial .....	24
4.2	Etapa 2: Análise da Dinâmica Fluvial.....	28
4.3	Etapa 3: Mapeamento de Tipologias de Canais Fluviais Através da Metodologia River Styles®.....	32
4.4	Etapa 4: Conectividade e Avaliação da Sensibilidade do Sistema.....	33
5	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FLUVIAL.....	35
5.1	Escala da Bacia .....	35
5.1.1	Contexto Climático.....	35
5.1.2	Contexto Geológico.....	39
5.1.3	Compartimentação Geomorfológica da Bacia.....	41
5.1.4	Hipsometria e Declividade .....	44
5.1.5	Parâmetros Morfométricos .....	48
5.1.6	Perfil Longitudinal.....	50
5.1.7	Contexto Pedológico.....	52
5.1.8	Uso e Cobertura da Terra.....	54

5.2	Escala do Canal.....	56
5.2.1	Mapeamento da Forma em Planta do Canal.....	57
5.2.2	Monitoramento das Seções Transversais.....	70
5.3	Mapeamento de Tipologias de Canais Fluviais Através da Metodologia River Styles®.....	82
6	CONNECTIVIDADE E AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO SISTEMA.....	96
7	CONCLUSÕES.....	105
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Mapa de localização da bacia do rio Macaé e seus principais afluentes. Fonte: Lagesolos 2010.....	4
Figura 3-1: Balança de sedimento e fluxo em rios. Fonte: Adaptado de CHORLEY <i>et al.</i> (1984) p.290.....	8
Figura 3-2: Visão idealizada de uma bacia hidrográfica das nascentes até a foz, ilustrando as zonas geo-hidráulicas. Fonte: adaptado de Palmer,1976 <i>apud</i> Kondolf & Piegay, 2003) .....	10
Figura 3-3: Sistema hidrográfico Adaptado de Roux 1993 <i>apud</i> Peigay & Schumm (2003).....	12
Figura 3-4: Padrões de Conectividade lateral, vertical e longitudinal (Sear & Newson, 1993) .....	14
Figura 3-5: Conectividade de Subsistemas (canal principal-tributário) em uma bacia hidrográfica. Adaptado de Fryirs <i>et al.</i> , 2006.....	15
Figura 3-6: Variáveis espaciais e escalas utilizadas para 21 esquemas de classificação geomorfológica de canais (adaptado de kondolf <i>et al.</i> 2003).....	19
Figura 3-7: Aplicação de um esquema de classificação para rios (Kondolf, 1995). .....	20
Figura 4-1: Localização das estações pluviométricas e seções transversais no rio Macaé. Fonte: LAGESOLOS/UFRJ. ....	28
Figura 4-2: Seção transversal ao canal do rio Macaé (Fonte: lagesolos/2007) e técnica de monitoramento do canal fluvial. ....	30
Figura 4-3: Esquematização do Arcabouço metodológico dos estilos fluviais. ....	33
Figura 4-4: Fluxograma da metodologia utilizada. ....	34
Figura 5-1: Mapas dos totais pluviométricos acumulados de verão e inverno de 2007 na bacia do rio Macaé (Hingel & Nascimento, 2009) .....	37
Figura 5-2: Totais Pluviométricos Mensais de 2003 a 2009 (ESTAÇÃO FAZENDA SÃO JOÃO – ANA - Agência Nacional de Águas).....	38
Figura 5-3: Mapa geológico da bacia do rio Macaé (Fonte: Adaptado de Costa <i>et al.</i> 1982 - DRM) .....	40
Figura 5-4: Unidades Geomorfológicas na bacia do rio Macaé (Foto: Lagesolos 2007).....	42
Figura 5-5: Mapa de Compartimentação Geomorfológica da bacia do rio Macaé (Silva, 2002) .....	43

Figura 5-6: Mapa hipsométrico da bacia do rio Macaé. (Fonte: Lima, 2010).....	46
Figura 5-7: Mapa de declividade da bacia do rio Macaé. (Fonte: Lima, 2010) .....	47
Figura 5-8: Mapa de hierarquia de canais da bacia do rio Macaé. Drenagem extraída a partir de imagem SRTM. (Fonte: Lima, 2010) .....	49
Figura 5-9: Perfil longitudinal do canal do rio Macaé .....	50
Figura 5-10: Perfil longitudinal do principais rios do Estado do Rio de Janeiro. (Fonte: Planágua Semads, 2001) .....	51
Figura 5-11: Mapa de suscetibilidade à erosão. (Adaptado de EMBRAPA, 1983) .....	53
Figura 5-12: (A) Área de cultivo de bananeira (B) pastagem em planície e encosta Fonte: Lagesolos 2009.....	54
Figura 5-13: Mapa de uso e cobertura da terra da bacia do rio Macaé no ano de 2005. Fonte: Moté (2008).....	55
Figura 5-14: Sequência de soleiras e depressões no alto curso do rio Macaé. Fonte: Google Earth™.....	58
Figura 5-15: Processos erosivos na encosta conectado ao sistema de drenagem A) 03/06/2003 B) 09/10/2004 C) 22/05/2006. Fonte: Google Earth™.....	59
Figura 5-16: Ilhas fluviais no canal do rio Macaé. Fonte: Google Earth™ .....	60
Figura 5-17: Dinâmica morfológicas de ilhas fluviais após a confluência com o rio Sana. A) 03/05/2003; B) 09/10/2004; C) 22/07/2006. Fonte: Google Earth™.....	61
Figura 5-18: Barras laterais no canal do rio Macaé. Fonte: Google Earth™. ....	62
Figura 5-19: Feições deposicionais do tipo barras centrais e barras laterais. Fonte:Google Earth™.....	62
Figura 5-20: Dinâmica morfológica de barras centrais e barras laterais. A) 3/05/2003; B) 09/10/2004; C) 22/07/2006. Fonte: Google Earth™.....	63
Figura 5-21: Processo erosivo nas margens côncavas e deposição nas margens convexas, com a formação de cordões marginais. Fonte: Google Earth™. ....	64
Figura 5-22: Dinâmica morfológica de feições deposicionais antes e após a confluência com o rio D'Antas. A) 14/08/2003; B) ; C) 01/05/2007. Fonte: Google Earth™.....	65
Figura 5-23: Ajuste lateral do rio São Pedro através da erosão e desbarrancamento das margens côncavas. A) 14/08/2003; B) 01/05/2007. Fonte: Google Earth™.....	66
Figura 5-24: Trecho retificado do canal do rio Macaé. Fonte: Relatório Técnico EMUHSA 2007 .....	67

Figura 5-25: Barras submersas no trecho retificado do rio Macaé. A) 14/08/2003; B) 03/03/2007. Fonte: Google Earth™.....	68
Figura 5-26: Retração de ilha fluvial no trecho retificado do rio Macaé. A) 10/04/2003; B) 01/08/2005; C) 08/03/2007. Fonte: Google Earth™.....	69
Figura 5-27: Variação da vazão do rio Macaé nas estações de monitoramento.....	71
Figura 5-28: Cheia do rio Macaé em 1998. (A) rio Macaé na travessia da ponte ferroviária. (B) Vista para montante. Travessia da linha Férrea ao centro. Fonte: FGV 2004.....	72
Figura 5-29– Seção transversal 4 (outubro de 2007 e Julho de 2008) .....	73
Figura 5-30: Foto da área da seção 4 (Fonte: Acervo Lagesolos) .....	74
Figura 5-31:. Seção transversal 5 (out/07, mar/08, jul/08, out/08, mar/09, out/09) .....	75
Figura 5-32: Composição Granulométrica da Seção 5.....	75
Figura 5-33: Foto da área da seção 5. (A) Outubro de 2007 (B) Março de 2009 (Fonte: Acervo Lagesolos) .....	76
Figura 5-34:. Seção transversal 6 (out/07, jul/08, out/08, out/09).....	76
Figura 5-35:. Composição granulométrica da seção 6 .....	77
Figura 5-36: Foto da área da seção 6 (A) Vista da ponte no Portal do Sana para jusante (B) Vista da ponte no Portal do Sana para montante(Fonte: Acervo Lagesolos) .....	77
Figura 5-37: Seção transversal 7 (out/07, jul/08, out/08, mar/09, out/09) .....	78
Figura 5-38: Composição granulométrica da seção 7. ....	78
Figura 5-39: Foto seção 8 (Fonte: Acervo Lagesolos) .....	79
Figura 5-40: Seção transversal 8 (out/07, mar/08, jul/08, out/08, mar/09, out/09) .....	80
Figura 5-41: Seção transversal 3 (out/07, mar/08, jul/08, out/08, mar/09, out/09) .....	81
Figura 5-42: Composição granulométrica da seção .....	81
Figura 5-43: Foto da área da seção 3 (Fonte: Acervo Lagesolos) .....	82
Figura 5-44: Classificação de canais segundo Kellerhals, Church e Bray, 1976. (1) reto; (2) sinuoso; (3) irregular; (4) meandros irregulares; (5) meandros regulares; (6) meandros tortuosos. ....	82
Figura 5-45: Classificação de canal com base no seu padrão e carga de sedimento. Representação de forma esquemática da relação entre os tipos de canal em termos de carga em suspensão e de sustentabilidade. Atentar para a relação entre tipo de carga a energia do canal. Fonte: Adaptado de Schumm, (1981).....	83

Figura 5-46: Canal retificado (A) Variação do nível d'água entre outubro de 2007 (B) e março de 2008 (C) – Fonte: Acervo Lagesolos .....	85
Figura 5-47: Erosão na margem côncava do rio Macaé .....	86
Figura 5-48: Dinâmica de barra arenosa no rio Macaé nos anos de (A) Agosto de 200, (B) Dezembro de 2007 e (C) Abril de 2008 (Fonte: Acervo Lagesolos). .....	87
Figura 5-49: Blocos acumulados servindo de embasamento para formação de ilhas (Fonte: Acervo Lagesolos) .....	88
Figura 5-50: Vale confinado simétrico. Trecho onde o rio possui maior poder erosivo e de transporte (Fonte: Acervo Lagesolos).....	89
Figura 5-51: Rio Macaé com alta energia. (A) soleira (riffle), (B) depressão (pool) (Fonte: Acervo Lagesolos) .....	90
Figura 5-52: Energia moderada durante fluxo de base (Fonte: Acervo Lagesolos).....	91
Figura 5-53: Estilos Fluviais e sua recorrência nas diferentes zonas geo-hidráulicas.....	93
Figura 5-54: Estilos Fluviais e sua recorrência nas diferentes altimetrias. ....	94
Figura 5-55: Rede hierárquica dos atributos de diferenciação dos Estilos Fluviais identificados.....	95
Figura 6-1: (A) Encosta com erosão laminar evoluindo para voçorocas. (B) Movimento de massa em talude de estrada. Materiais erodidos nas vertentes caem diretamente nos canais fluviais. (C) Leque fluvial formado no encontro do rio D'Antas com o rio Macaé. Neste ponto, o rio Macaé cria um pequeno efeito de remanso no rio D'Antas, fazendo com que os sedimentos sejam transferidos mais lentamente. (D) Encontro do rio Macaé com o rio Bonito. A depressão formada no encontro dos rios retém sedimentos grosseiros no fundo. (E) Meandros abandonados e paleocanais na planície do rio Macaé. As marcas deixadas indicam antigas zonas de deposição na porção mais próxima ao estuário. (F) Pluma de sedimentos na foz do rio Macaé demonstra o potencial dos sedimentos em percorrerem toda a rede de drenagem até a saída na cidade de Macaé. ....	100
Figura 6-2: Mapa dos tipos de conectividade do rio Macaé e seus principais afluentes. O tamanho das setas procuram indicar o tipo da conectividade, bem como dar noção da sua intensidade e magnitude.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Localização dos pontos de monitoramento. ....	29
Tabela 5-1: Descrição dos padrões básicos encontrados na bacia (Deffontaines & Chorowics, 1991). ....	48
Tabela 5-2: Vazão calculada nas estações de monitoramento por meio de flutuadores (m <sup>3</sup> /s).....	72
Tabela 6-1: Sensibilidade dos principais tipos de ambientes identificados na bacia do rio Macaé.....	104

# 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do séc. XX e início do séc. XXI o aumento da demanda por recursos naturais tanto para o consumo como para o desenvolvimento de atividades produtivas, induziram, em muitas partes do planeta, o desencadeamento de processos de degradação do meio físico, trazendo para o cenário geopolítico mundial, uma série de debates de cunho socioambiental.

Na literatura científica, tem-se observado um número crescente de pesquisas voltadas ao entendimento das condições naturais dos ambientes físicos e seus ajustes frente às perturbações causadas pelo homem. Diversos estudos no campo da geomorfologia passaram a focar suas análises em ambientes com avançado estágio de degradação, desafiando cientistas e gestores a solucionar as questões: Como reconhecer o estágio de degradação de um sistema fluvial? Como, onde e quando recuperar, reabilitar ou preservar um ambiente? Seria possível ou desejável recuperar as condições naturais existentes no passado, ou os esforços devem ser direcionados à reabilitação do sistema que permitam um equilíbrio dinâmico de longo prazo? (Fryirs *et al.*, 2009; Brookes & Shields, 1996; Brunnsden, 2000; Santos, 2004; Usher, 2001; Vanacker *et al.*, 2005).

Reconhece-se que apesar dessas respostas estarem em muitos casos longe de serem definitivas ou satisfatórias, atualmente, a ciência geomorfológica dispõe de bases conceituais e metodológicas que permitem avaliações da paisagem de forma holística, ajudando na compreensão da fragilidade dos ambientes, identificação de potenciais de degradação e elaboração de técnicas manejo que consideram a diversidade e o dinamismo dos sistemas físicos (Gardiner 1991; Lemons & Victor, 2008).

Neste contexto, o conceito de conectividade, definido como a transferência de matéria e energia entre dois compartimentos e setores de um sistema (Chorley & Kennedy, 1971), vem sendo desenvolvido também pela geomorfologia, estimulando o surgimento de instrumentos teórico-metodológicos que permitem avaliar a paisagem de forma integrada.

Em que pese à velocidade das transformações e dos ajustes geomorfológicos de bacia para bacia, o padrão e nível de (des)conectividade dos diferentes compartimentos da paisagem podem servir como ferramenta de avaliação da sensibilidade do sistema

(Fryirs *et al.*, 2007; Ward, 1989). Essas interações refletem a dinâmica dos processos geomorfológicos em ambientes distintos dentro da bacia de drenagem, podendo-se classificar níveis de conectividade da paisagem e tipos de sensibilidade associados (Brierley *et al.*, 2006; Brierley & Fryirs, 2008; Lane & Richards, 1997; Brunsten & Thomes, 1979; Thomas 2000).

Frente aos desafios de avaliar as respostas do sistema de drenagem às interferências antrópicas, a presente pesquisa tem como objetivo, analisar conectividade dos ambientes fluviais ao longo do rio Macaé (Figura 1-1), e avaliar a sensibilidade dos subsistemas desta bacia, localizada na região Norte do Estado do Rio de Janeiro.

Ao longo do processo de uso e ocupação, a bacia sofreu com diversos impactos diretos (modificações diretas no canal, como retificações e represamentos) e indiretos (atividades humanas realizadas fora da área dos canais, mas que modificam o comportamento do rio), resultantes de décadas de uma gestão ambiental ineficiente e insustentável, que transformou significativamente a qualidade funcional de seus ambientes (Marçal & Luz, 2003). A perda de cobertura vegetal vem acelerando os processos erosivos nas encostas, liberando grandes quantidades de sedimento na rede de drenagem. Este processo vem causando efeitos negativos na morfologia dos rios e na estabilidade dos canais (mudança na dinâmica de erosão e deposição), sendo absorvidos e propagados pelo sistema sob a lógica de seus diferentes níveis de conectividade.

A partir da década de 1970, com a implantação da atividade de extração de petróleo na bacia de Campos, a bacia hidrográfica do rio Macaé passou a ter grande importância para o Estado. Atualmente, as águas do rio Macaé abastecem as sedes dos municípios de Rio das Ostras e Macaé, além de suprir o setor elétrico e os processos de produção de petróleo na bacia de Campos.

Segundo FGV (2004), nos próximos 20 anos, a tendência de aumento da captação atual é da ordem de quatro vezes. No entanto, estudos de disponibilidade hídrica realizados na bacia por FGV (*op. cit.*), destacam que a bacia tem dado sinais de fragilidade, através da ocorrência de estiagens rigorosas e do assoreamento da calha do rio no baixo curso da bacia, que, por conseguinte têm afetado diretamente as áreas de captações existentes influenciando negativamente na sua capacidade de suprimento de água à população e ao setor Elétrico.

Somando-se a isso, ao longo das últimas duas décadas, o município de Macaé vem vivenciando um processo de expansão urbana acelerada no qual o crescimento populacional, não foi acompanhado de infraestrutura e de equipamentos urbanos, sendo

possível observar problemas ambientais gerados pela falta de saneamento básico, de coleta de lixo e de esgoto (Marçal & Luz, 2003).

Verifica-se, portanto, que as causas da degradação da calha do rio Macaé e de redução de sua vazão distribuem-se por toda a bacia com diferentes intensidades e fontes (Cotrim, 2004). Desse modo, compreender as formas de uso e ocupação do solo, e os efeitos destas sobre os diferentes compartimentos que compõem o sistema fluvial, é de fundamental importância para identificar os mecanismos que revertam essa situação, com vista à proteção do rio.

Os projetos conduzidos na região pelo laboratório LAGESOLOS/UFRJ (Marçal *et al.*, 2002; Marçal & Luz, 2003; Assumpção, 2009; Lima *et al.* 2009; Marçal, *et al.*, 2009), tem obtido resultados importantes para a compreensão do sistema de drenagem da bacia do rio Macaé, buscando ainda, formar bases coerentes para explicar a sua dinâmica atual. O ritmo acelerado das transformações socioambientais ocorridas desde a década de 1960, transformou a região em um cenário dinâmico e campo fértil para o desenvolvimento de estudos que avaliem as variações temporais e espaciais, bem como a multiplicidade de processos gerados a partir das atividades que a sociedade exerce na paisagem.



Figura 1-1: Mapa de localização da bacia do rio Macaé e seus principais afluentes. Fonte: Lagesolos, 2010.

## **2 OBJETIVO.**

O objetivo da pesquisa é identificar e analisar a conectividade dos ambientes fluviais e avaliar sua sensibilidade frente à alterações sofridas na bacia do rio Macaé. Parâmetros geomorfológicos e hidrossedimentológicos serão abordados para compreender a dinâmica dos ambientes fluviais, além da interação do rio Macaé com seus principais afluentes.

### **2.1 Objetivos Específicos**

1) Identificar e caracterizar os principais processos geomorfológicos e hidrossedimentológicos no sistema fluvial, a partir de análise temporal.

2) Apresentar e analisar a classificação dos rios com base na dinâmica temporal e espacial dos processos geomorfológicos e hidrossedimentológicos identificados.

3) Avaliar a interação dos diferentes ambientes fluviais na bacia do rio Macaé, levando em consideração as formas de conectividade dos diferentes ambientes fluviais e os ajustes operados pelo rio.

4) Discutir e avaliar a sensibilidade do sistema fluvial com base na conectividade dos ambientes.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 A Abordagem Sistêmica na Geomorfologia Fluvial**

O conceito de Geosistema, definido pelo geógrafo soviético Sotchava, em 1960, corresponde a uma abstração, que serviu para a elaboração de um novo modelo teórico de estudo da paisagem. Para o referido autor, a natureza passa a ser compreendida não apenas pelos seus componentes, mas através das conexões entre eles, não devendo restringir-se a morfologia da paisagem e as suas subdivisões, mas de preferência estudar sua dinâmica, sua estrutura funcional e suas conexões.

Durante o século XIX, havia um elevado grau de confiança nos métodos científicos e tecnológicos, permitindo que se acreditasse, durante um bom tempo, que a “natureza” poderia ser controlada de acordo com os desígnios do homem (Newson & Clark, 2008). Em contraponto a esse pensamento, o século que se seguiu, representou um grande marco na epistemologia da paisagem com o desenvolvimento da Teoria Geral dos Sistemas.

Para Christofolletti (1979), a teoria geral dos sistemas passou a considerar uma gama de processos e formas tão específicos, que conduziram os estudos de Geomorfologia fluvial, em particular, a um nível muito elevado de complexidade. Nesse contexto, o conceito de sistema se fortaleceu, enquanto modelo teórico, permitindo a organização e desenvolvimento de panoramas integrados dos processos geomorfológicos, que por sua vez, possibilitaram articulações entre conhecimento científico e o planejamento dos recursos hídricos.

O conceito de sistema tornou-se, nas três últimas décadas, um arcabouço amplamente utilizado nas ciências ambientais ao propor o entendimento da paisagem a partir da interação dos processos físicos, químicos e bióticos. Nessa perspectiva, a abordagem sistêmica teve e tem grande influência no desenvolvimento dos estudos de geomorfologia fluvial, uma vez que permitiu abordagens integradas da geomorfologia com disciplinas afins, como a hidrologia e a ecologia (Christofolletti, 1990; Piégay & Schumm, 2003).

### **3.1.1 Geomorfologia Fluvial e o Princípio de Energia Segundo a Teoria Geral dos Sistemas**

Particularmente, o segundo princípio da termodinâmica, tem apresentado grande importância na elaboração desse modelo de observação da paisagem. De acordo com esse princípio, quando uma parte de um sistema interage com outra parte, a energia tende a dividir-se por igual, até que o sistema alcance um equilíbrio térmico. No Geossistema, a energia que entra tem diversas origens. De todas elas, as mais transcendentais para o seu funcionamento são a energia solar e a gravitacional.

Para que uma determinada quantidade de energia saia do sistema haverá uma nova entrada, entendendo-se assim como um sistema em ótimas condições de estabilidade. Com isso, desenvolve-se o conceito de sistema aberto dinâmico, o qual apresenta um nível de organização dos elementos bióticos e abióticos, que permite entradas e saídas de matéria e energia constantes. Este dinamismo mantém diferentes formas de entradas e saídas de matérias e de energia em um Geossistema, que afetam diretamente determinados elementos e relações. Desse modo se desencadeia um conjunto de relações diretas e indiretas de trocas e modificações (Christofolletti, 1999; Cunha, 1996; Chorley, 1984).

Em um sistema fluvial, a energia do fluxo é condicionada pela quantidade de água e pela declividade do curso hídrico. Se ocorrer excesso na descarga fluvial em cursos com elevada declividade, o equilíbrio do sistema é alterado para um estado de degradação ou erosão (Figura 3-1). No entanto, se a quantidade e tamanho dos sedimentos excederem a capacidade de transporte do canal, o ambiente passa para um estágio de sedimentação. O equilíbrio no balanço hidrossedimentológico é definido quando a entrada e a saída de sedimentos no sistema atingem um estado ótimo onde ocorre fluxo constante, sem que ocorra acúmulo ou déficit (Chorley & Kennedy, 1971).

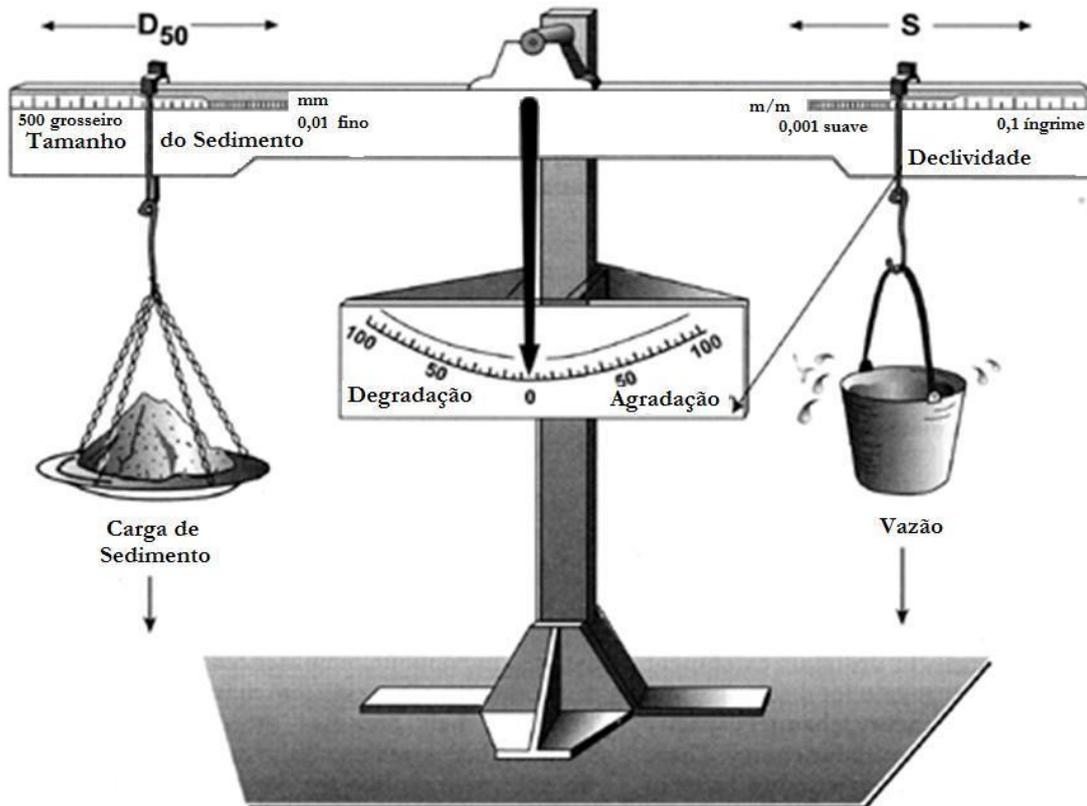


Figura 3-1: Balança de sedimento e fluxo em rios. Fonte: Adaptado de CHORLEY *et al.* (1984) p.290.

A alteração de um elemento pode provocar ajustes em outros para que o sistema atinja um novo estado de equilíbrio. Em vista disto, as **relações diretas** consistem na influência unilateral de um elemento sobre o outro. Exemplo, o aumento do volume de água nos canais, aumenta o poder erosivo do rio. Já as **relações indiretas** podem ser definidas como as ações de um elemento sobre outro que implicam por sua vez uma atuação de retorno sobre o primeiro ou terceiros. Exemplo: A retirada de cobertura vegetal aumenta o escoamento superficial, que, por sua vez, acelera a chegada da água no canal, aumentando o pico de vazão durante as chuvas, o que permite maior poder erosivo do canal (Chorley *et al.*, 1984).

Este modelo possibilita uma melhor compreensão do balanço de energia no sistema fluvial e de seus ajustes naturais, refletindo as interligações dos processos físicos controladores e sua variabilidade temporal e espacial.

### 3.1.2 O Sistema Fluvial

Na presente pesquisa, os Sistemas Fluviais são abordados como ambientes que integram e conectam compartimentos distintos da paisagem através da propagação de energia e materiais, que interagindo espacialmente, determinam fluxos de sedimentos, água e nutrientes (Sotchava, 1977).

Nesta abordagem, a ideia de sistema fluvial engloba não somente os fluxos nos canais, mas também toda a rede de drenagem, incluindo as áreas de deposição (planícies, deltas e leques aluviais) e áreas formadoras de escoamento superficial e sedimentos.

Os sistemas fluviais são compostos por uma rede complexa de elementos que se relacionam ajustando-se às entradas (inputs) e saídas (outputs) de energia do sistema. Dentre esses elementos, destacam-se como os dois principais componentes físicos dos sistemas fluviais (a morfologia dos rios, planícies, encostas, etc.) e o efeito cumulativo da interação água/sedimentos (Chorley & Kennedy, 1971).

Em qualquer tipo de sistema observado, o número elevado de elementos, apresenta variáveis também elevadas, o que traz a necessidade de eleger dentre elas, as mais relevantes para o tipo de análise que se pretende realizar. Esta seleção é na realidade uma peça chave para definir bem o funcionamento do sistema. Desse modo, as variáveis analisadas devem ser escolhidas em função da informação que elas proporcionam, das observações realizadas diretamente sobre a realidade, das opiniões dos que as reconheceram e da interpretação intuitiva dos mesmos (Rosgen, 1994; Sear & Arnel, 2006).

Quando os fatores controladores da condição de equilíbrio sofrem mudanças, o sistema fluvial também passa por transformações correlatas, de maneira que todas as variáveis interligadas sofrerão transformações, tendendo a ajustes à nova condição de equilíbrio. Alguns sistemas, rapidamente se ajustam às mudanças, enquanto outros são mais resistentes. A forma com que as transformações operam (por exemplo, ajuste erosivo e deposicional) varia de um sistema para outro (Kondolf *et al.*, 2003).

Neste contexto, diversos autores comentam que os sistemas fluviais nunca são estáticos. Mudanças ocorrem progressivamente através de diferentes escalas de tempo, que vão desde pequenas variações sazonais, à profundas transformações de escala geológica. Por outro lado, as atividades humanas passaram a exercer um papel importante na evolução do sistema fluvial, afetando níveis de base, cobertura vegetal,

bem como a entrada de energia no sistema através de alterações do balanço hidrossedimentológico, em escalas de tempo que aparenta ser bem curta quando comparada com a escala em que o clima e os eventos tectônicos costuma operar (Brierley & Fryirs, 2005; Leopold *et al.*, 1964; Schumm, 1977).

Para simplificar a complexa gama de redes hidrográficas que compreendem os sistemas fluviais, sua dimensão longitudinal é tradicionalmente subdividida por Palmer (1976), em três zonas geo-hidráulicas (Figura 3-2).

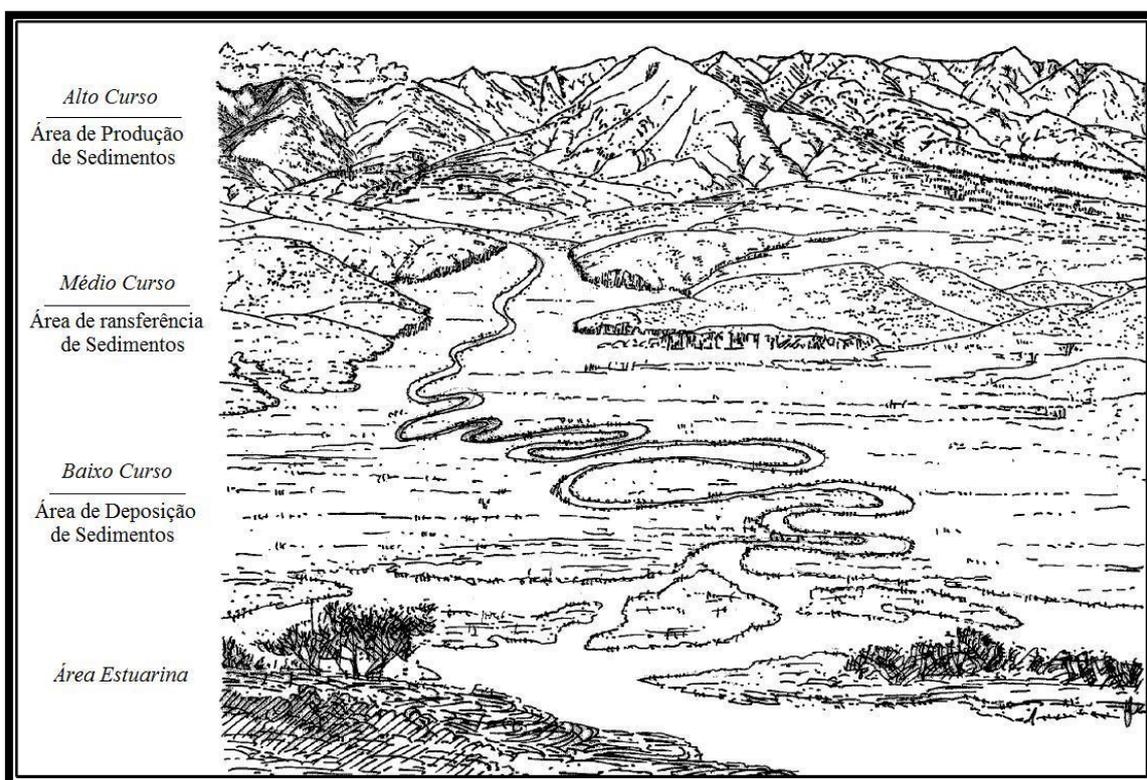


Figura 3-2: Visão idealizada de uma bacia hidrográfica das nascentes até a foz, ilustrando as zonas geo-hidráulicas. Fonte: Adaptado de Palmer, 1976 *apud* Kondolf & Piegay, 2003)

### 3.2 As Escalas de Análise e a Subjetividade

Desde que Davis (1909), conceituou a evolução temporal e espacial do canal e da rede de drenagem, através do “ciclo erosivo”, geógrafos, geólogos, e geomorfólogos passaram a usar a forma dos rios para analisar ambientes. A visão de Davis sobre os ambientes era simplista, mas quando combinada com as medições detalhadas dos

processos e formas estudadas por Gilbert (1914), complementavam-se, permitindo que diversos trabalhos futuros, utilizassem a combinação das duas abordagens para compreender a dinâmica da paisagem. Os trabalhos de Davis representavam escalas amplas, com avaliações qualitativas, ao passo que Gilbert, representava a utilização de métodos quantitativos os quais permitiam estudar casos específicos, avançando para escalas de análise mais locais.

Neste contexto, os sistemas fluviais e seus componentes podem ser considerados em diferentes escalas espaciais, podendo ter maior ou menor detalhe, dependendo do objetivo do observador. Piégay & Shumm (2003) ressaltam a assimetria das relações entre os elementos reguladores do sistema fluvial, na qual os fenômenos de grande escala influenciam os de menor escala, enquanto o inverso raramente ocorre.

Os autores apontam ainda, que diversos componentes do sistema fluvial podem ser investigados em escalas distintas, mas nenhum componente deve ser totalmente ignorado, pois a hidrologia, a hidráulica, a geologia e a geomorfologia interagem em todas as escalas. Desse modo, a visão total do sistema fluvial não deve ser totalmente ignorada, mesmo quando somente uma pequena parte dele está sendo analisada.

A integração das informações levantadas sobre elementos de diferentes níveis escalonares pode ser feita de maneira quantitativa ou qualitativa, dependendo em primeiro lugar do objetivo da análise e em segundo pela natureza dos dados avaliados. Desse modo, um método não descarta a possibilidade de utilização de outro, uma vez que a abordagem sistêmica é flexível, e permite que estudos de natureza qualitativa, lancem mão de técnicas quantitativas. Essas abordagens se complementam, de modo que as observações de campo podem revelar a complexidade dos sistemas sem elucidar claramente a respectiva importância dos fatores controladores que atuam em outro nível escalonar. Esses, por sua vez, são mais precisamente compreendidos através de experimentos e simulações (Simon & Castro, 2003).

Apesar das análises qualitativas poderem utilizar-se do conceito de sistema para propor hipóteses, tais abordagens holísticas são melhores utilizadas em conjunto com abordagens quantitativas reducionistas. Desse modo, enquanto a primeira proporciona o entendimento do funcionamento do rio em uma escala temporal e espacial ampla, a segunda pode testar hipóteses e simular processos.

### 3.3 O Conceito de Conectividade

O conceito de conectividade é baseado na abordagem de Sistema Hidrológico, definido por Piégay & Shumm (2003), como um sistema de três dimensões dependente das transferências longitudinais (montante/jusante), laterais (canal/margens) e vertical (água superficial/subsuperficial) de energia e matéria (Figura 3-3). Esse modelo conceitual considera que os atributos geomorfológicos de um elemento do sistema resultam de múltiplos ajustes representando um efeito “dominó” (sequencial) sobre outros atributos. Neste contexto, Chorley & Kennedy (1971) definem conectividade como a transferência de matéria e energia entre dois compartimentos da paisagem ou dentro do contexto de um sistema como um todo.

Em uma bacia hidrográfica, a conectividade dos seus compartimentos varia de acordo com sua origem e com a capacidade de transporte de diferentes tamanhos de fragmentos, podendo ser classificado pela rota dos sedimentos entre a origem e a saída do sistema, em diferentes seções do canal (Hooke, 2003).

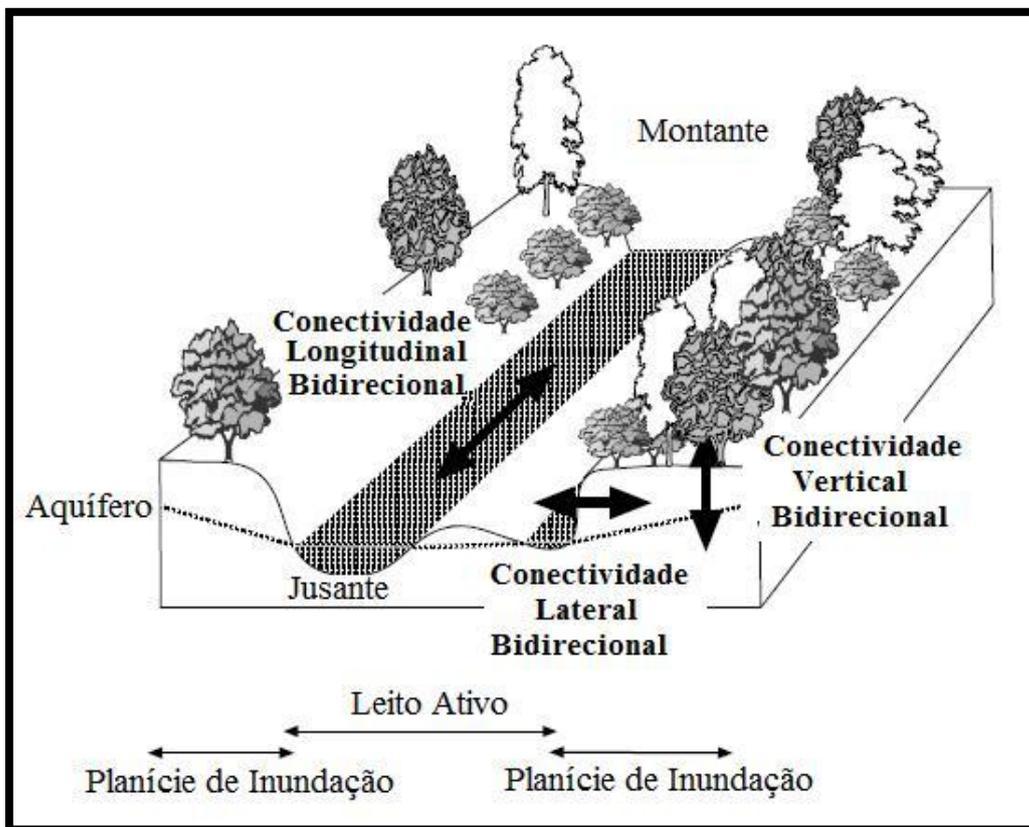


Figura 3-3: Sistema hidrográfico. Adaptado de Roux 1993 apud Peigay & Schumm (2003).

Nesse contexto, os componentes do sistema se articulam de modo que muitos fluxos podem ser bidirecionais, isto é, podem apresentar dois sentidos entre as interações de matéria e energia.

A *dimensão longitudinal* é estabelecida nas relações montante/jusante que ocorrem ao longo do canal.

Na *dimensão lateral ou transversal* a articulação bidirecional entre o canal principal e as margens é condicionada pelas características geológicas, que influenciam a declividade e largura do vale, que por sua vez influenciam o comportamento do canal.

Já a *dimensão vertical* corresponde às trocas químicas, biológicas e hidrológicas que ocorrem entre os ambientes superficiais e subsuperficiais.

### **3.3.1 Os Tipos de Conectividade**

Hooke (2003) define a conectividade dos fluxos de sedimentos como o processo físico de deslocamento de partículas pelo sistema. Neste contexto, conectividade de sedimentos significa que uma partícula tem potencial para se mover por todo um sistema fluvial bem conectado.

É importante considerar, no entanto, que esse fenômeno ocorre em diferentes escalas dentro dos sistemas fluviais de modo que os trabalhos desenvolvidos na temática da conectividade dos fluxos de sedimentos não necessariamente trabalham com os mesmos tipos de interações, implicando assim em análises com diferentes escopos. Brierley & Fryirs (2009), apontam as variações dos padrões da conectividade longitudinal, lateral e vertical no contexto do alto, médio e baixo curso dos rios, determinando diferentes zonas geo-hidráulicas e tipos de transferência e deposição de sedimentos (Figura 3-4).

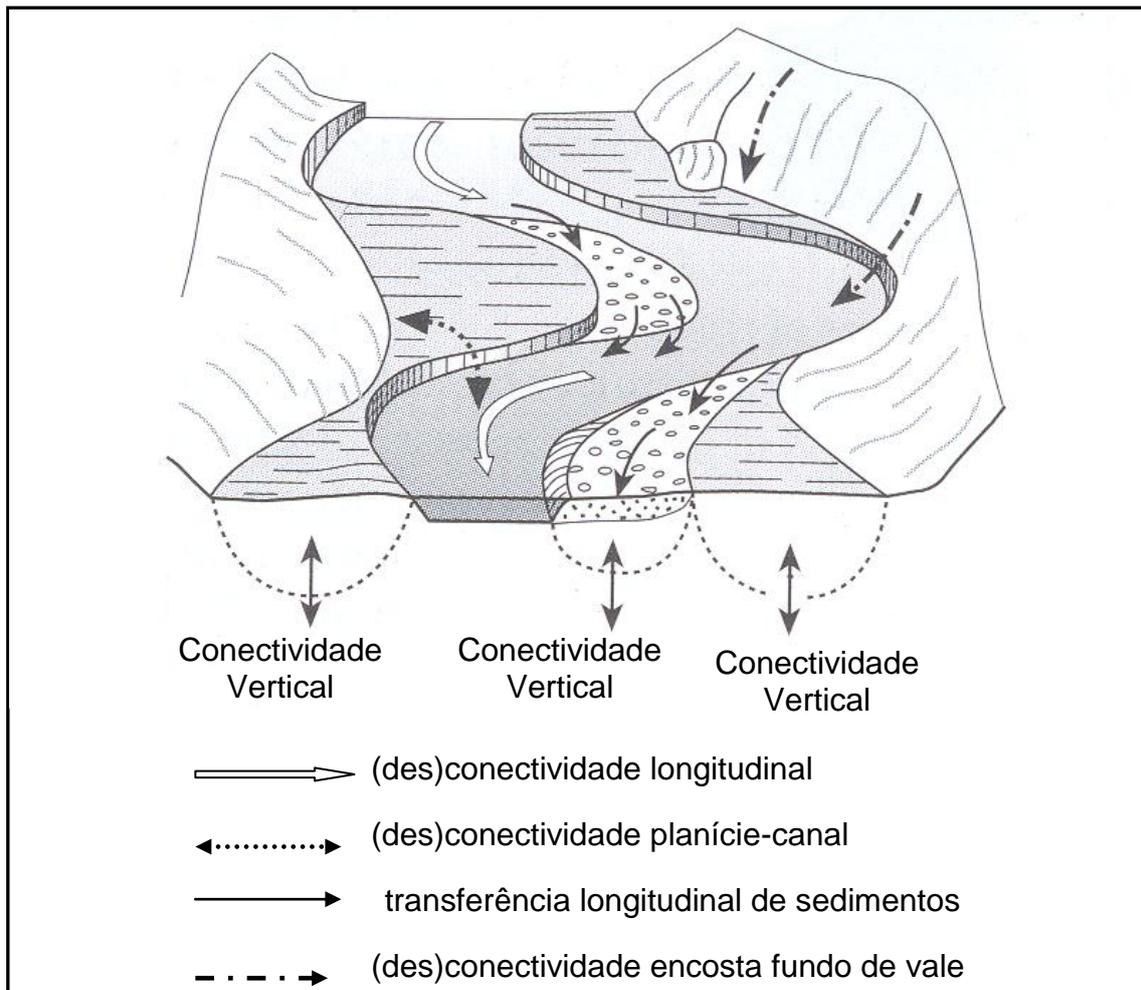


Figura 3-4: Padrões de Conectividade lateral, vertical e longitudinal (Sear & Newson, 1993)

Como propõe Harvey (2002), “as noções de (des)conectividade, dos processos em uma bacia hidrográfica, em escalas temporais apropriadas, podem ser utilizadas como ferramentas para interpretar a dinâmica do transporte sedimentar, a sensibilidade da paisagem e os potenciais para a reabilitação de canais”. Desse modo, de acordo com a variação da capacidade e das características de transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica, Hooke (2003), propõe quatro classes de conectividade dos sistemas.

**Sistemas conectados:** sistemas nos quais os sedimentos se movem facilmente e continuamente dentro do sistema, transportados por eventos normais de cheias. Os sedimentos podem ficar armazenados durante um tempo, mas são rapidamente removidos.

**Sistemas potencialmente conectados:** sistemas com condições hidrológicas de remover materiais de um trecho para outro, porém não existem volumes significativos

de sedimentos a serem transportados. Geralmente vales com poucos processos erosivos e leitos rochosos.

**Sistemas parcialmente (ou periodicamente) conectados:** são sistemas em que há um pequeno transporte de sedimentos grosseiros entre um trecho e outro, exceto em eventos extremos. Todos os canais tendem a mostrar uma conectividade parcial desde que as frações da carga de fundo sejam transportadas apenas por eventos de grandes magnitudes. Diferencia-se do primeiro porque há evidências de que os sedimentos grosseiros são transportados ocasionalmente.

**Sistemas desconectados:** sistemas nos quais barreiras impedindo o movimento do fluxo foram construídas (barragens para hidrelétricas, por exemplo) ou sistemas em que planície e outras feições geomorfológicas impedem a transferência de materiais.

Desse modo, é importante reconhecer que analisar a conectividade significa encontrar padrões de resposta do sistema frente aos constantes processos de entrada e saída de energia (Figura 3-5) (Brierley & Fryirs, 2005).

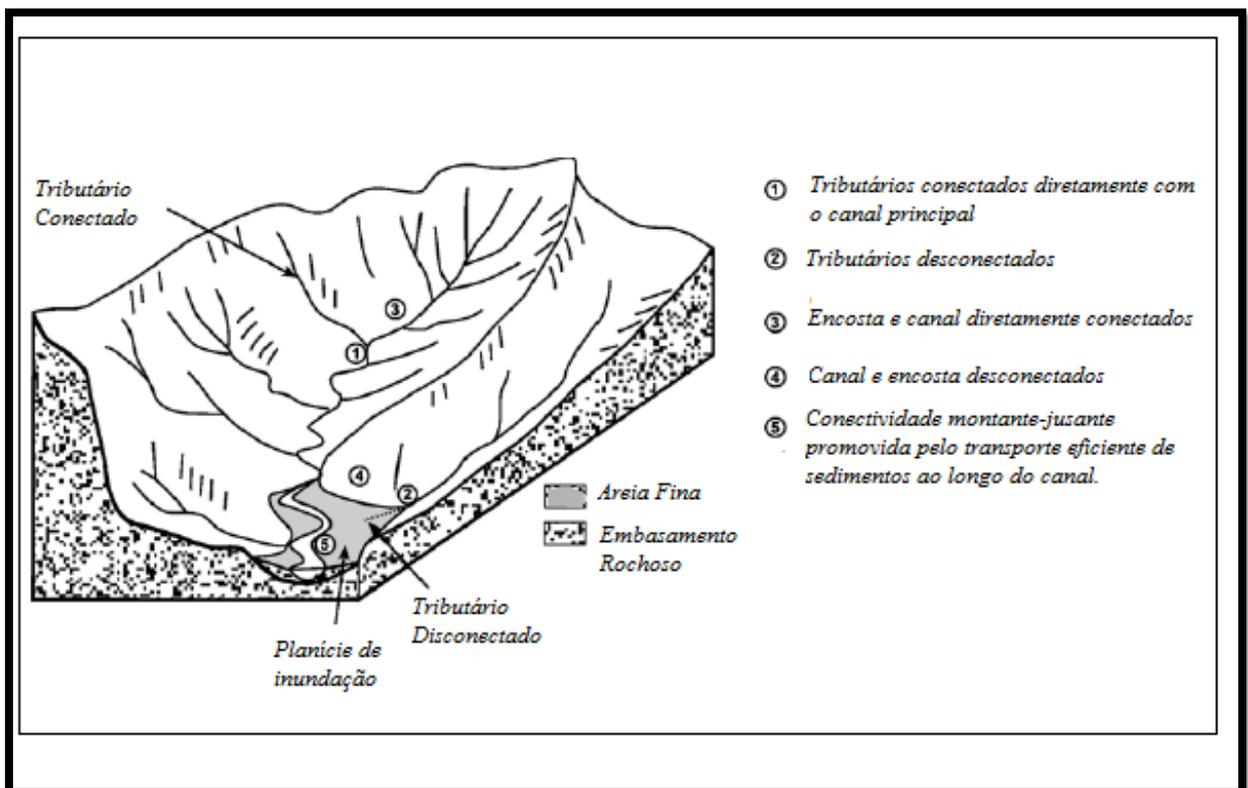


Figura 3-5: Conectividade de subsistemas (canal principal-tributário), em uma bacia hidrográfica. Adaptado de Fryirs *et al.*, 2006.

### 3.3.2 Continuum Fluvial

O conceito de rede de drenagem como sistema aberto, em equilíbrio dinâmico (“quase equilibrium”) foi primeiramente proposto por Leopold & Maddock (1953), com o intuito de descrever padrões de ajustes nos rios em relação à sua largura, profundidade, velocidade e carga de sedimentos.

O conceito de continuum fluvial preconiza a articulação entre os processos e formas dos diferentes trechos da rede de canais fluviais, levando-se em conta que um trecho pode exercer influência na dinâmica de outro, que, por conseguinte, estabelece trocas com um terceiro segmento. As transformações morfológicas e de comportamento dos canais, apesar de manifestarem-se em escala pontual, têm desdobramentos variados ao longo da rede de drenagem, pelo seu caráter cumulativo e sinérgico, em função do(s) grau(s) de (des)conectividade existente(s).

Vannote et al. (1980), propôs-se avaliar a conectividade dos sistemas fluviais, considerando as mudanças gradativas e interdependentes nos canais operadas das cabeceiras de drenagem até a foz. De acordo com a teoria do continuum fluvial, ao longo de todo o seu percurso, os rios apresentam um gradiente contínuo de condições físicas, que propiciam uma série de respostas e ajustes montante/jusante, refletindo diretamente na distribuição da biota aquática, consistentes com os padrões de carga, transporte, utilização e estocagem de sedimentos e matéria orgânica ao longo do rio. Em outras palavras, o referido autor estabelece por hipótese, que as características funcionais e estruturais das comunidades aquáticas, por exemplo, estão adaptadas a este continuum das variáveis físicas, de maneira que as comunidades também formam um continuum.

A análise da combinação dos tipos de rios que se desenvolvem ao longo do perfil longitudinal permite inferências sobre as similaridades dos fatores controladores da drenagem e ajudam a explicar o caráter e comportamento em diferentes subsistemas, e sua interdependência.

Schumm & Kahn (1972), ao realizarem estudos em laboratório verificaram relações existentes entre a configuração do canal e as condições de energia, carga sedimentar e declividade, levando à conclusão de que o regime que os rios operam é determinado por um continuum das formas de canal.

### 3.3.3 Implicações dos Estudos de Conectividade na Avaliação da Sensibilidade do Sistema

A velocidade das transformações e dos ajustes geomorfológicos variam de bacia para bacia, refletindo o padrão e nível de (des)conectividade dos compartimentos da paisagem (Ward, 1989). Análises do caráter e comportamento dos compartimentos da paisagem, da maneira com que eles interagem, e da conectividade entre eles, proporcionam bases conceituais para interpretar a dinâmica dos processos geomorfológicos em qualquer sistema fluvial (Caine & Swanson, 1989; Lane & Richards, 1997; Harvey, 2002; Michaelides & Wainright, 2002; Hooke, 2003).

Segundo Fryirs *et al* (2007), a conectividade do sistema tem implicações para a avaliação da sua sensibilidade de maneira que a eficiência no aporte e distribuição de sedimentos em ambientes fluviais conectados permite que mudanças geomorfológicas desencadeadas em um local da bacia induzam respostas e ajustes em outros setores. Segundo Brunsten & Thornes (1979), a sensibilidade corresponde à “soma da *suscetibilidade e da vulnerabilidade* de qualquer sistema fluvial”.

Nesta pesquisa, a *vulnerabilidade* refere-se ao potencial de um rio em sofrer mudanças do seu estado que alterem a sua configuração natural, passando a se comportar como outro tipo de rio (Summerfield, 2005). Em contrapartida, a *suscetibilidade* refere-se à capacidade de se ajustar dentro de um sistema dentro de suas características de evolução natural (Brunsten, 2000). Desse modo, a sensibilidade abrange a ideia de que uma dada mudança em um sistema, ou determinadas forças aplicadas ao sistema produzem uma resposta sensível, reconhecível e persistente (Usher, 2001).

O caráter dinâmico dos ambientes fluviais aponta para um tipo de evolução do sistema linear e sucessivo, de modo que ele se encontra em constante transformação. Este processo se produz através de ciclos e em escalas temporais variadas. Todavia, os efeitos não se reproduzem com as mesmas características anteriores ao se sucederem (Brierley & Fryirs, 2005). Desse modo, os autores propõem as seguintes classes para avaliar os tipos de resposta dos ambientes fluviais às perturbações:

***Ausência de resposta à perturbação:*** ocorre quando o ambiente absorve os impactos gerados, não apresentando nenhum tipo de alteração no seu comportamento padrão. Nesse caso, o ambiente é considerado resistente e relativamente estável.

*Efeitos breves:* ocorre quando o sistema apresenta capacidade de voltar rapidamente à sua condição natural após um evento de distúrbio.

*Efeitos instantâneos:* transformações imediatas no canal podem ocorrer durante eventos extremos ou durante eventos moderados em canais com sensibilidade alta.

*Efeitos atrasados:* ocorre geralmente em locais que não foram diretamente afetados pelo distúrbio, sendo seus efeitos sentidos posteriormente pela conectividade com a área diretamente afetada.

### **3.4 Classificação Geomorfológica de Rios**

A classificação geomorfológica dos rios integra uma importante etapa dos procedimentos metodológicos desta pesquisa (ver item 4.3), por constituir uma ferramenta que facilita a interpretação dos arranjos espaciais e dos processos geomorfológicos dentro da bacia.

Entendida como o ordenamento de objetos em grupos de características comuns, a classificação permite registrar a diferenciação de atributos, o que confere aos cientistas, uma maneira eficiente de distinguir objetos similares e representativos em um universo aparentemente caótico e confuso.

Em virtude da ampla variação de tamanho, forma e dinamismo dos rios, as tentativas de elaborar esquemas de classificação resultaram em uma gama de estudos que servem à propósitos que vão desde interpretação de tipologias para se entender a evolução da paisagem, à métodos que buscam contribuir para projetos de recuperação (Figura 3-6).

Para se evitar que os esquemas de classificação de rios tornem-se simplistas ou demasiadamente complexos, os procedimentos escolhidos para a realização da classificação de sistemas fluviais a partir da morfologia dos canais, devem ser compatíveis com a escala e o objetivo do estudo, para que não se cometa o erro de estudar fenômenos irrelevantes ou mesmo simplificar em demasia fenômenos de grande importância.

Desse modo, antes de se escolher qual esquema de classificação será aplicado, é preciso saber quais variáveis serão e não serão utilizadas como parâmetros para a classificação. De modo geral, os procedimentos de aquisição de dados geomorfológicos incluem atributos como padrão de canal e sinuosidade, dimensão dos canais, tamanho

dos sedimentos, gradiente do canal, área drenada, relevo, características do vale, pluviosidade anual, e litologia (Rosgen, 1994).

	Variáveis										Escala Espaciais (Km²)					
	Unidades Geológicas e Geomorfológicas	Ambiente de Vale	Padrão de Canais, Sinuosidade	Morfologia do Canal	Gradiente	Energia do Fluxo	Tamanho do Fluxo	Carga de Sedimentos	Unidades Sedimentos de Fundo	Ajustes Morfológicos	10 <sup>1</sup> e mais	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
Leopold e Wolman (1957)			●									●	●	●		
Rust (1978)			●										●	●	●	
Lotspeich (1980)	●											●	●	●	●	
Cloots e Maire (1980)	●	●	●	●									●	●	●	
Ferguson (1981)			●			●								●	●	
Maire e Wilms (1984)		●	●	●	●		●			●				●	●	
Brussock <i>et al.</i> (1985)	●												●			
Frissel <i>et al.</i> (1986)	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Hugues <i>et al.</i> (1993)	●												●			
Cupp (1989)		●	●											●	●	●
Agence de l'Eau Rhin-Meuse <i>et al.</i> (1991)	●			●	●									●	●	●
Otto (1991)		●	●	●			●							●	●	●
Hanson e Croke (1992)		●	●	●	●	●	●		●					●	●	
Carbonnois e Zumstein (1994)	●	●		●										●	●	
Downs (1994,1995)	●			●						●				●	●	●
Rosgen (1994, 1996)		●	●	●	●		●							●	●	●
Petit (1995)			●			●				●				●	●	
Hanson e Knighton (1996)	●	●	●	●	●	●	●		●					●	●	
Bethemont <i>et al.</i> (1996)	●	●	●	●	●			●		●	●	●	●	●	●	●
Bernot <i>et al.</i> (1996)	●			●	●	●	●							●	●	
AQUASCOP (1997)	●	●	●	●	●	●	●							●	●	

●: Variáveis parcialmente consideradas

Figura 3-6: Variáveis espaciais e escalas utilizadas para 21 esquemas de classificação geomorfológica de canais (adaptado de kondolf *et. al.*, 2003)

Para alcançar os objetivos da classificação, Kondolf (1995), propõe as seguintes etapas, genéricas a todos os esquemas de classificação de rios (Figura 3-7).

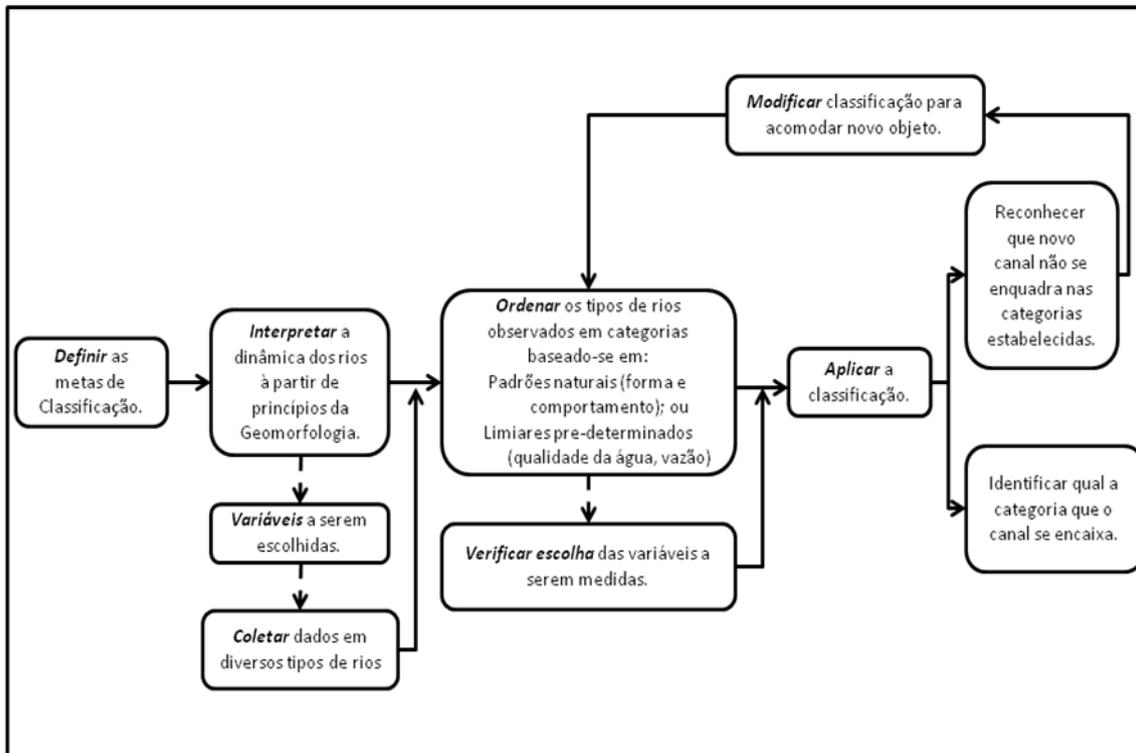


Figura 3-7: Aplicação de um esquema de classificação para rios (Kondolf, 1995).

Segundo Kondolf *et al.* (2003), o motivo fundamental para a adoção de sistemas de classificação é a organização do trabalho e o aperfeiçoamento da comunicação, especialmente quando são abordadas questões interdisciplinares. Para isso, os sistemas de classificação devem ser objetivos, de modo que observadores de diferentes disciplinas e em diferentes regiões possam ter as mesmas decisões durante a classificação.

### 3.4.1 Utilização da Metodologia dos Estilos Fluviais (River Styles ®)

A delimitação de tipologias fluviais ao longo do curso de um mesmo rio tem se tornado uma metodologia amplamente utilizada por planejadores por permitir compreender as interdependências que ocorrem entre as diferentes seções do rio desde o alto ao baixo curso. Neste contexto, os esquemas de classificação têm sido utilizados na busca por compreender o potencial de cada rio, como por exemplo, canais instáveis, canais propensos à migração lateral ou canais sensíveis às mudanças de uso do solo.

Dentre as diferentes abordagens oferecidas pelos esquemas de classificação existentes na literatura científica, a presente pesquisa utiliza-se do arcabouço metodológico desenvolvido por Brierley & Fryirs (2003), intitulado River Styles (Estilos Fluviais), que representa uma ferramenta de pesquisa desenvolvida por geomorfólogos australianos em parceria com a Agência Australiana de Conservação da Água (ACWC), sendo marca registrada pela New South Wales Department of Land and Water Conservation e da Macquire University.

De acordo com Brierley & Fryirs (2000), estilos fluviais (River Styles®) representam um método de classificação de segmentos do rio que apresentam um conjunto comum de características geomorfológicas e hidrodinâmicas, que servem de base para se caracterizar sistematicamente o caráter (estrutura geomorfológica do rio, incluindo forma em planta e geometria, do canal) e comportamento (referente às características hidráulicas do canal, como o calibre dos materiais transportados e depositados, sua relação com a planície e a susceptibilidade a mudanças geomorfológicas) dos rios. Dessa forma, um só rio pode apresentar diferentes estilos fluviais; o que implica que cada trecho pode interagir de maneira particular com a paisagem em seu entorno.

Esses estudos foram realizados em bacias do sudeste da Austrália, a fim de nortear práticas de gestão e estabelecer áreas prioritárias para a preservação e reabilitação de rios, baseadas na condição geomorfológica dos diferentes setores mapeados.

A utilização deste sistema de classificação permite identificar as relações entre processos e formas ao longo dos rios sob a perspectiva de que estes ocupam um lugar dentro do contexto da paisagem e da bacia, reconhecendo que um rio faz parte de um sistema físico com uma história evolutiva. A classificação dos rios baseada na diversidade natural das formas e processos de maneira contínua ao longo do rio, permite avaliar as interações entre ambientes distintos e reconhecer padrões de conectividade entre os trechos, demonstrando como distúrbios em uma parte do sistema podem impactar em outra parte. Neste contexto, a metodologia permite avaliar mudanças recentes no rio no contexto de evolução da paisagem, construindo o entendimento das respostas dos rios às perturbações antrópicas e dos ajustes esperados de cada estilo fluvial.

Esta metodologia não possui um sistema rígido de classificação, uma vez que o objetivo principal é a diferenciação dos ambientes a partir da organização dos atributos

levantados e reconhecidos para cada um. Ressalta-se que as nomenclaturas escolhidas para cada trecho do rio não é pré-estabelecida, mas deve ser dada para que represente o trecho mapeado da forma mais elucidativa possível, buscando resumir suas principais características.

De acordo com esta metodologia, a distinção dos ambientes fluviais e sua distribuição espacial dentro de uma bacia são realizadas com base na interpretação dos processos fluviais, utilizando-se de duas principais escalas de análise: a escala da bacia (regional) e a escala do canal (detalhe). A escala da bacia tem como principal objetivo organizar informações sobre a estruturação da rede de drenagem, considerando os principais fatores de controle, sendo eles: o perfil longitudinal do canal, parâmetros morfométricos, (padrão de drenagem, densidade, hierarquia e forma da bacia), análise do regime hidrológico e caracterização ambiental regional (geologia, geomorfologia, solos, topografia, clima e uso do solo). Essas informações são comumente coletadas em literatura acadêmica, como teses, livros e artigos; e agências governamentais. O tratamento dessas informações pode ser realizado em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), a fim de prover uma base de mapas onde seja possível localizar os rios e as sub-bacias em conjunto com os diferentes temas analisados. Essa abordagem permite gerar um modelo da bacia, cujas peculiaridades são verificadas através de abordagens mais detalhadas.

A análise na escala do canal permite acompanhar fenômenos que ocorrem em níveis de detalhe, que são fundamentais para a distinção de ambientes fluviais e estabelecer os limites onde eles operam. Esta etapa correlaciona “parâmetros chave” elegidos pelo arcabouço metodológico para diferenciar os diferentes tipos de rios, onde se destacam a característica do vale, as feições morfológicas no canal, sua forma em planta e o material do leito. Segundo Brierley & Fryirs (2005), de acordo com o tipo de ambiente, um parâmetro pode ser mais ou menos importante para a distinção de determinados estilos fluviais. A exemplo de canais em amplas planícies aluviais, a forma em planta corresponde ao primeiro elemento para diferenciação dos tipos de rio ao passo que a característica do vale e o material do leito correspondem aos principais aspectos para diferenciar ambientes confinados, controlados pelo embasamento geológico.

Os referidos autores destacam que mudanças na morfologia, largura e declividade do vale, influenciam diretamente a forma e comportamento dos rios, uma vez que limitam a capacidade de ajuste lateral do canal, e condicionam a sua hidráulica,

de maneira a potencializar a sua energia, ou a permitir sua dissipação através de meandros.

São propostas, assim, a distinção de três categorias de vales: Confinado, Parcialmente-Confinado e Não Confinado, nas quais as planícies são inexistentes, descontínuas ou contínuas, respectivamente. Por sua vez, os diferentes tipos de vale traduzem a compartimentação geomorfológica na qual estão inseridos. Os vales confinados, por exemplo, ocorrem em ambientes de escarpas, enquanto vales parcialmente confinados costumam ocorrer em ambientes de transição (entre morros e colinas) e os não confinados em baixadas (planícies aluviais e marinhas).

Todos esses aspectos são abordados de maneira hierárquica, onde fenômenos de escala local estão subordinados aos de escala regional. A abordagem dos Estilos Fluviais orienta a otimização do uso de informações geográficas, ajudando a diferenciar os aspectos que podem ser relevantes dos que representam informações adicionais supérfluas.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

A fim de integrar as informações necessárias para avaliar a dinâmica hidrossedimentológica atual do rio Macaé e seus possíveis ajustes frente às transformações do uso do solo, a presente metodologia baseou-se na análise multiescalar dos processos fluviais no rio Macaé, tendo como principais parâmetros analisados, a granulometria dos sedimentos de fundo; a forma em planta do canal; sua seção transversal; e outros parâmetros referentes à rede de drenagem, como geologia, geomorfologia, declividade e densidade de canais.

Para se interpretar os dados levantados de maneira coerente com os objetivos desejados e para compatibilizar a linguagem e a apresentação das informações obtidas de forma organizada, à pesquisa utiliza-se do arcabouço metodológico dos Estilos Fluviais (River Styles, Brierley & Fryirs, 2003), buscando por meio da integração e espacialização da informação, compreender a conectividade entre os diferentes tipos de rios identificados.

### **4.1 Etapa 1: Caracterização Regional do Sistema Fluvial**

A primeira etapa da pesquisa baseou-se na obtenção de parâmetros morfométricos (hipsometria, declividade etc.) e dados ambientais (Geologia, Geomorfologia, Uso e cobertura da terra, clima e pedologia) da bacia do rio Macaé e suas sub-bacias visando auxiliar no entendimento da dinâmica da drenagem em escala regional.

Para a caracterização dos aspectos ambientais, foram utilizados dados secundários oriundos de bancos de dados públicos como CPRM, DRM e INEA.

Para os parâmetros morfométricos, as principais fontes de informação continuam a ser as cartas topográficas, que somadas a novas tecnologias como o uso do SIG (Sistema de Informação Geográfica) e de dados disponibilizados por radares espaciais (MDT - Modelo Digital do Terreno) e interpretação de imagens de satélite, possibilitam um levantamento mais rápido e detalhado da área de estudo.

Várias informações topográficas e morfométricas podem ser derivadas dos MDTs, a exemplo da hipsometria, declividade, delimitação da bacia do rio Macaé e sub-

bacias, Área da bacia (A), Densidade de drenagem (Dd), Padrão de drenagem (Pd), Ordem dos cursos d'água, Declividades da Bacia e Elevação Média da Bacia.

Para esta etapa, foi utilizado o programa ArcGIS 9.1 e as extensões Spatial Analyst e 3D Analyst, que permitiram que fosse realizado o georreferenciamento, edição, dentre outros comandos. Os dados secundários utilizados para este levantamento foram as imagens SRTM disponibilizados pela EMBRAPA (disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/index.htm>); e Cartas topográficas do IBGE em escala 1:50.000.

A partir do tratamento dessas informações, foram gerados os seguintes temas:

a) Topografia

**Hipsometria** - O mapa de hipsometria foi gerado utilizando-se a estrutura de grade triangular, mais conhecida como TIN “Triangular Irregular Network”, que é uma estrutura do tipo vetorial, com topologia do tipo nó-arco possibilitando representar uma superfície por meio de um conjunto de faces triangulares interligadas. Para cada um dos três vértices da face do triângulo são armazenadas as coordenadas de localização (x, y) e o atributo z correspondente. Praticamente todos os SIGs modernos possuem funções para tratar o MDT e gerar a grade triangular com base na triangulação de Delaunay<sup>4</sup>. O mapa hipsométrico permite uma boa avaliação do comportamento do relevo, como os limites e a ocorrência das principais estruturas geomorfológicas encontradas no interior da bacia.

**Declividade** - A declividade pode ser conceituada como a inclinação do terreno em relação a um plano horizontal e esta pode ser expressa em percentual ou em graus. Ela é calculada pela variação da altitude entre dois pontos do terreno em relação à distância que os separa. Para a geração do mapa de relevo tomou-se como base o modelo numérico do terreno (MNT) como imagem de entrada, em seguida a mesma foi dividida em classes de declividades.

Esse processo de classificação em percentuais de inclinação é obtido através da função do ArcGIS “reclassify”, sendo uma das funções mais utilizadas em SIG, pois permite que diferentes usuários, utilizando-se de um mesmo banco de dados, produzam informações espacializadas de acordo com interesses específicos.

**Perfil Longitudinal** - A partir da criação do MDT, utilizou-se a ferramenta Topograph Profile do ArcGis 9.3, para elaboração do perfil longitudinal do rio Macaé. O perfil longitudinal de um rio está intimamente ligado ao relevo, pois corresponde à

diferença de altitude entre a nascente e a foz ou confluência com outro rio. Ao analisar o perfil longitudinal, é possível constatar controles primários do gradiente do canal, sobre os processos de produção transporte e deposição.

Com o uso destas novas ferramentas foi possível realizar o levantamento desses dados em curto período de tempo e com precisão compatível com a escala do trabalho.

#### b) Parâmetros Morfométricos

**Hierarquia de Canais** – A hierarquia fluvial consiste no processo de se estabelecer a classificação de determinado curso de água (ou da área drenada a qual pertence), no conjunto total da bacia hidrográfica. A importância da utilização desta hierarquia é tornar mais objetiva a análise morfométrica das bacias. O sistema de hierarquização adotado nesta metodologia é a de Strahler (1957), em que os menores canais sem tributários são considerados como de primeira ordem, estendendo-se desde a nascente até a primeira confluência; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem e só recebem afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e de primeira ordens; os canais de quarta ordem surgem da confluência de dois canais de terceira ordem, podendo receber tributários das ordens inferiores e assim sucessivamente.

Para a hierarquização dos corpos hídricos foi utilizada a ferramenta *Hidrology* do programa ArcGis 9.1, sendo realizado o método automático de extração e hierarquização de drenagem à partir do MDT. Essa técnica gera um produto com precisão de 1:150.000, isto é, inferior ao mapeamento 1:50.000 do IBGE. No entanto, o resultado alcançado é compatível com a análise que se pretende realizar.

**Área da Bacia e Densidade de Drenagem** - A medição da área da bacia foi realizada com o uso da ferramenta Spatial Analyst do programa ArcGis 9.1, que calcula uma área plana tendo como limites os divisores de águas. Já a densidade de drenagem foi calculada automaticamente pelo programa ArcGis 9.1, considerando o número total de canais de determinada bacia, dividida pela área da bacia (Christofolletti, 1969).

A área da bacia e a densidade da drenagem são fundamentais para definir a potencialidade hídrica de uma determinada bacia hidrográfica, podendo ser identificado dentre outros elementos, a porosidade do terreno, bem como subsidiar outros cálculos morfométricos. (Christofolletti, *op cit.*).

**Padrão de Drenagem** - Este índice corresponde ao formato ou o aspecto que apresenta o traçado dos rios em uma bacia hidrográfica. Este padrão ou desenho está intimamente relacionado às características geológicas e geotectônicas da área, sendo, portanto, importante elemento diagnóstico e interpretativo. A resistência relativa das rochas determina o padrão de drenagem e arranjo das encostas e vales, mas os processos geomorfológicos frequentemente alteram a configuração da rocha mãe abaixo da superfície. Os padrões de drenagem foram identificados na bacia do rio Macaé a partir da classificação proposta por Bigarella *et al.*, (1979).

c) Mapeamentos Temáticos

**Geologia:** Foram adotadas para este trabalho as unidades lito-estratigráficas definidas por Costa *et al.*, (1982), através Projeto Carta Geológica do Rio de Janeiro do DRM-RJ, uma vez que as mesmas estão diferenciadas com detalhe compatível aos objetivos apresentados, (1:50.000). Estas unidades foram complementadas com dados resultantes da integração e generalização da Geologia do Estado do Rio de Janeiro, escala 1:500.000, no Projeto Rio de Janeiro da CPRM.

**Geomorfologia** – Utilizou-se como base o mapeamento Geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro em escala 1:50.000, elaborado por Silva (2002), verificando-se a presença de cinco unidades de relevo apresentadas no item 5.1.3.

**Clima** – A caracterização climática foi feita com base nos estudos de CAL (2006), para a região Norte do Estado do Rio de Janeiro, e Hingel *et al.*, (2009), onde foi realizado um levantamento histórico da série de chuvas na bacia do rio Macaé, tendo como base as estações pluviométricas da ANA (Agência Nacional de Águas).

**Pedologia** – Com base nos levantamentos já existentes, como o Levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado do Rio de Janeiro (Carvalho Filho, *et al.*, 2001) e Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro (Dantas, *et al.*, 2000) foi elaborado o mapa, apresentando a suscetibilidade à erosão dos solos na bacia.

**Uso e cobertura da terra** - Foi utilizado o mapeamento realizado por Villas Boas (2010), escala aproximada 1: 100.000.

## 4.2 Etapa 2: Análise da Dinâmica Fluvial

Esta etapa do trabalho compreende o mapeamento de detalhe da forma em planta do canal e monitoramento da calha do rio Macaé através de seções transversais na região de confluência com 4 de seus principais afluentes, sendo eles: rio Bonito, rio Sana, rio Ouriço, Rio D'Antas e rio São Pedro. Os procedimentos realizados nessa etapa permitirão caracterizar os processos fluviais de erosão e sedimentação em escala de detalhe, fornecendo informações sobre as transformações recentes ocorridas no canal.

a) Monitoramento de seções transversais no rio Macaé.

A análise dos parâmetros hidrossedimentológicos foi realizada através do monitoramento de dados de **vazão, forma da calha fluvial e granulometria dos sedimentos de fundo do canal do rio Macaé**, em seis locais estabelecidos de acordo com a geomorfologia da bacia e com a posição dos principais afluentes (Figura 4-1).

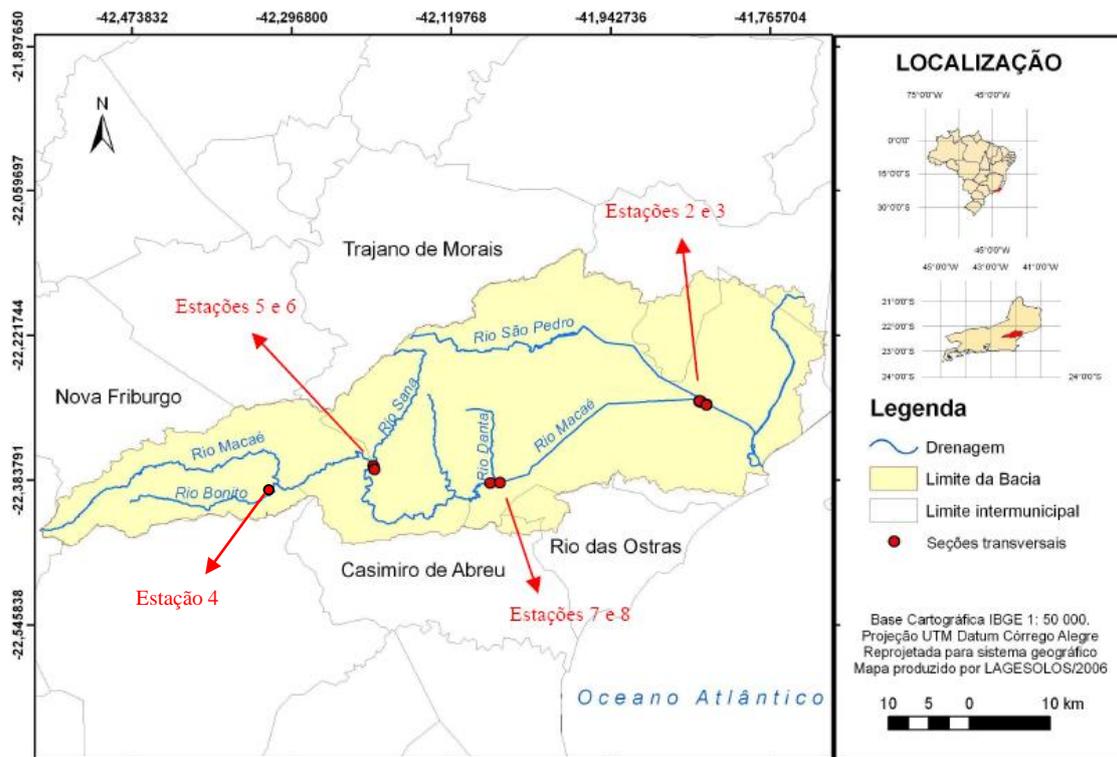


Figura 4-1: Localização das estações pluviométricas e seções transversais no rio Macaé.  
Fonte: LAGESOLOS/UFRJ.

O monitoramento destas estações vem sendo realizado pela equipe de pesquisadores do Laboratório de Geomorfologia Ambiental e Degradação dos Solos (LAGESOLOS - UFRJ) desde outubro de 2007, totalizando dois anos de levantamento de dados, com intervalos de 3 a 5 meses entre cada medição, em função dos períodos secos e úmidos na região. Serão utilizados os dados de Outubro de 2007 e Outubro de 2009; Março de 2008 e Março de 2009, a fim de comparar dois períodos secos e dois períodos chuvosos, com dois anos de diferença entre si.

Como mostrado na Figura 4-1, as estações de monitoramento foram estabelecidas à montante e à jusante de três confluências de canais com o rio Macaé, sendo estas as desembocaduras do rio São Pedro (principal afluente), do rio D'Antas e do rio Sana. Estas estações são nomeadas por números, com a seguinte configuração: as estações 2 e 3 estão situadas respectivamente à montante e à jusante da desembocadura do rio São Pedro; as estações 5 e 6 estão situadas respectivamente à montante e à jusante da desembocadura do rio Sana; e as estações 7 e 8 estão situadas respectivamente à montante e à jusante da desembocadura do rio D'Antas. A Tabela 4-1 mostra as características das estações de monitoramento.

Tabela 4-1: Localização dos Pontos de Monitoramento.

Estação	Localização	Largura da seção (m)	Situação dos dados
2	à montante do Rio São Pedro	39	parcial
3	à jusante do Rio São Pedro	53	completa
4	à jusante do rio Bonito	52	parcial
5	à montante do Rio Sana	38,6	parcial
6	à jusante do Rio Sana	53,2	parcial
7	à montante do Rio D'Antas	33,3	parcial
8	à jusante do Rio D'Antas, logo antes da retificação	47,3	parcial

As estações foram instaladas seguindo recomendações de Oliveira & Mello (2007). Foram colocados tubos de aço galvanizado fincados nas margens do rio, nivelados com nível de bolha e cimentados. A partir das extremidades dos tubos de aço foram tencionados cabos de aço, de onde foram tomadas as medidas até a lâmina d'água e até o solo (nas margens), em intervalos de 50 cm (Figura 4-2)

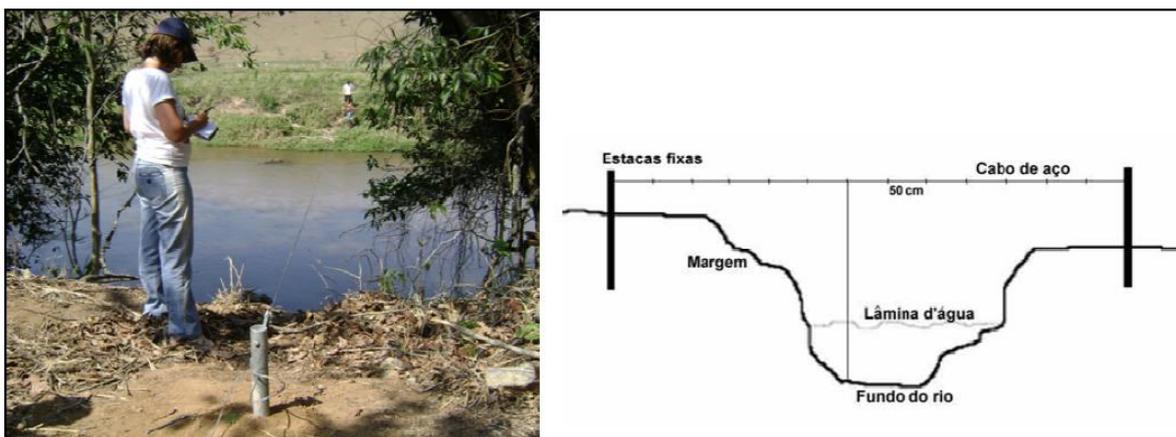


Figura 4-2: Seção transversal ao canal do rio Macaé (Fonte: Lagesolos/2007), e técnica de monitoramento do canal fluvial.

As medidas da profundidade do canal foram tomadas com trena comum ou com canos de PVC graduados, dependendo da profundidade e da força da correnteza. Quando a profundidade e a correnteza não permitiam a estabilidade do operador de campo para realizar as medições, por questões de confiabilidade dos dados e principalmente de segurança, as medições foram realizadas a bordo de um bote.

Os dados obtidos foram tratados em laboratório, por meio do software Excel 2003, para elaboração de gráficos que nos permitiram visualizar e analisar as áreas onde ocorrem erosão e deposição de sedimentos, e avaliar a situação atual do canal do rio Macaé, inferindo tendências na evolução das formas do mesmo e de seus afluentes. (Suguio e Bigarella, 1990; Brookes, 1996).

As medições da velocidade do fluxo do rio Macaé nas áreas de monitoramento foram realizadas com a utilização de flutuadores. A partir desta técnica a vazão é calculada multiplicando-se a velocidade do fluxo obtida pela área molhada do perfil transversal.

A coleta de sedimentos para análise granulométrica é feita no talvegue do canal, pois é a parte mais dinâmica e representativa do comportamento do canal (Summerfield, 1991). A análise das amostras foi realizada no laboratório de Geografia Física/ Departamento de Geografia UFRJ utilizando-se do método Wentworth (1922), que consiste em uma escala logarítmica de classificação granulométrica dos fragmentos de sedimentos clásticos (ou detríticos), dos mais finos para os mais grossos, à saber:

- a argila (< 4  $\mu\text{m}$ ) -
- o silte (> 4  $\mu\text{m}$  < 64  $\mu\text{m}$ ) -
- a areia (>64  $\mu\text{m}$  <2mm) -
- o grânulo (>2mm - <4mm) -
- o seixo (>4mm - <64mm) -
- o bloco ou calhau (>64mm - <256mm) -
- e o matacão (>256mm).

#### b) Mapeamento da Forma em Planta do Canal.

A perspectiva em planta do canal é definida como a tomada aérea do rio, formando um ângulo de 90° entre o observador e o canal. Essa técnica de observação geralmente utiliza fotografias aéreas ou imagens de satélite em escala que permita o mapeamento das feições fluviais. Segundo Schum (1985), a forma em planta do canal é resultado da combinação do tipo de carga dendrítica e pela descarga fluvial.

O objetivo do mapeamento foi identificar as feições geomorfológicas que ocorrem ao longo do curso do rio Macaé, sendo mapeadas e interpretadas segundo caracterização proposta por Kellerhals *et al.* (1976) e Brierley & Fryirs (2005).

Para o mapeamento da forma em planta, foram utilizadas imagens obtidas através do programa Google Earth<sup>TM</sup>, em escala aproximada 1:10.000. Essas imagens correspondem ao satélite QuickBird, e são obtidas de forma gratuita pelo programa mencionado. Apesar das imagens não permitirem métodos quantitativos, em função da impossibilidade de georreferenciar as imagens com precisão cartográfica compatível com a escala de análise, optou-se pela utilização dessas imagens em função da excelente resolução, do custo nulo na obtenção das imagens, e principalmente por proporcionar imagens de 6 períodos diferentes, sendo eles: 03/06/2003; 14/08/2003; 09/10/2004; 01/08/2005; 22/07/2006 e 08/03/2007.

A série de imagens em diferentes períodos proporcionou uma análise temporal da dinâmica fluvial, permitindo avaliar o deslocamento dos sedimentos em função do tempo e do regime hidrológico. O processamento das imagens foi realizado através do software ArcGis 9.3.1, onde foram mapeadas a área molhada, as feições no canal e as feições na planície, sendo apresentados e discutidos através de croquis esquemáticos e tabela de atributos.

### **4.3 Etapa 3: Mapeamento de Tipologias de Canais Fluviais Através da Metodologia River Styles®**

Como discutido no Item 3.4, a classificação dos rios corresponde, a uma ferramenta de organização dos dados referentes a feições dos canais, em grupos, com base nas suas similaridades e relações. Os sistemas de classificação dos Estilos Fluviais foram escolhidos pelo seu conjunto de propostas de aquisição, interpretação, e de organização dos dados para que sejam identificados diferentes setores que podem ser comparados e interpretados a partir de sua forma e comportamento, para fins de melhor compreensão das interações entre os subsistemas.

Segundo Brierley & Fryirs (2005), existem no planeta tantos tipos de canais quanto a sua escala de análise o permitir diferenciá-los. Desse modo, é preciso ser específico no objetivo da classificação, para que não se perca na descrição de elementos e atributos que não são relevantes. Por se tratar de uma escala de detalhe, a metodologia dos Estilos Fluviais não propõe uma rede fechada de nomenclaturas, mas sim uma estrutura para organizar os dados levantados e conduzir a interpretação através das diferentes escalas

A classificação foi realizada a partir dos parâmetros levantados no item 5.2 em uma escala de detalhe, contextualizando-os nos diferentes compartimentos do relevo mapeados no item 5.1. A metodologia propõe uma rede hierárquica para avaliação de “parâmetros chave”, referentes aos principais controles da forma e comportamento do rio, sendo eles: característica do vale; forma em planta do canal; unidades geomorfológicas; seção transversal; e granulometria (Figura 4-3).

A apresentação desses dados foi realizada através do mapeamento dos limites de cada estilo fluvial identificado ao longo do rio Macaé e através da elaboração uma tabela de atributos apresentando os parâmetros inventariados para cada Estilo Fluvial identificado. Foram realizados 2 trabalhos de campo com a finalidade de apoiar o mapeamento das imagens de satélite; realizar registros fotográficos dos estilos identificados e contribuir na definição de limites ou transição de um estilo para outro.

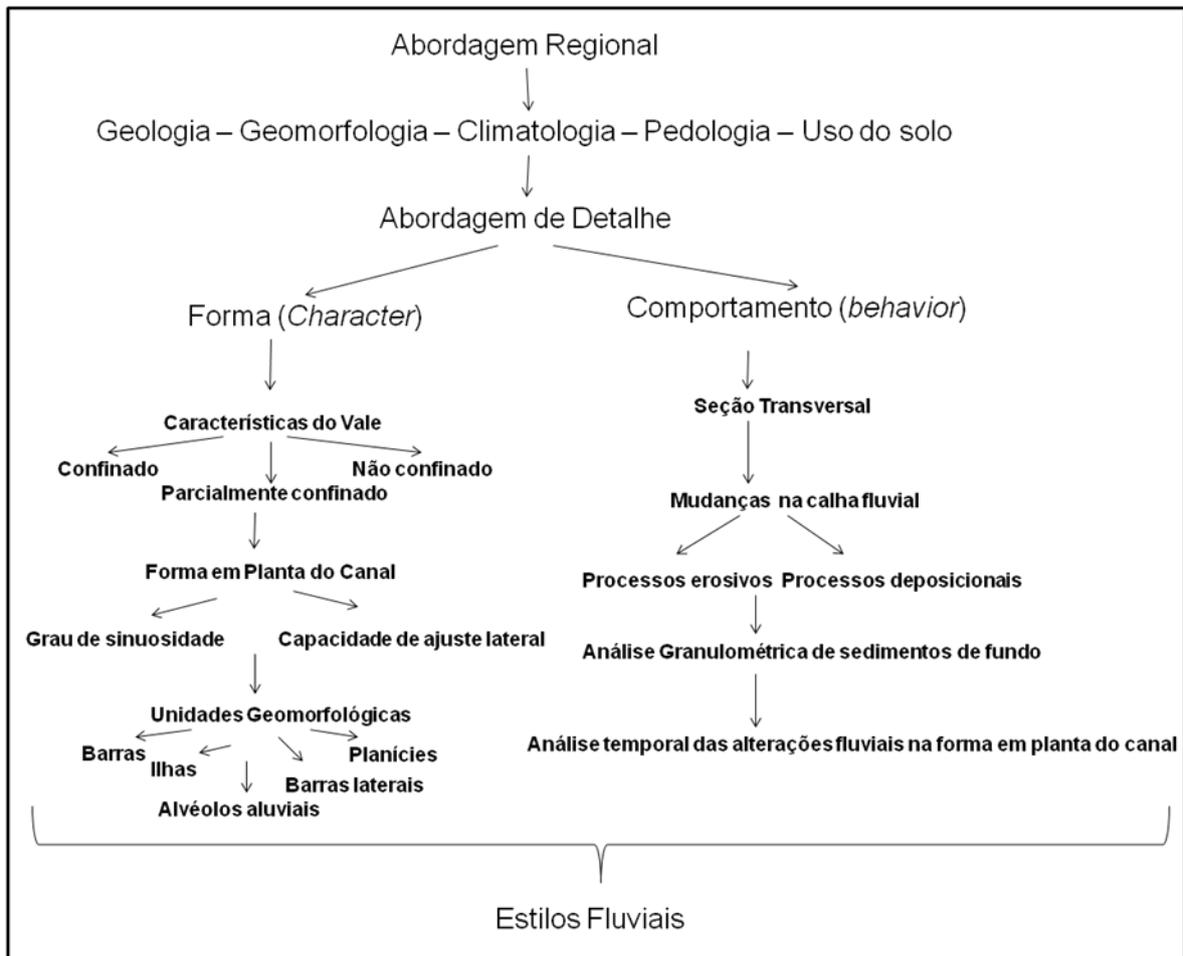


Figura 4-3: Esquematização do Arcabouço metodológico dos estilos fluviais.

#### 4.4 Etapa 4: Conectividade e Avaliação da Sensibilidade do Sistema

A avaliação da conectividade e da sensibilidade do sistema se deu através da ponderação dos dados levantados nas etapas anteriores da pesquisa, sendo realizada uma caracterização da conectividade entre os compartimentos individualizados na bacia, com base na proposta de Hooke (2003) e Fryirs (2007).

A Etapa 4 corresponde à síntese dos resultados, sendo representados os principais níveis de conectividade entre os ambientes fluviais a partir de esquemas, possibilitando identificar segmentos com maior ou menor sensibilidade às transformações do uso e ocupação da terra.

A Figura 4-4 apresenta um esquema das etapas da metodologia utilizada para este estudo incluindo-se os trabalhos de gabinete, campo.

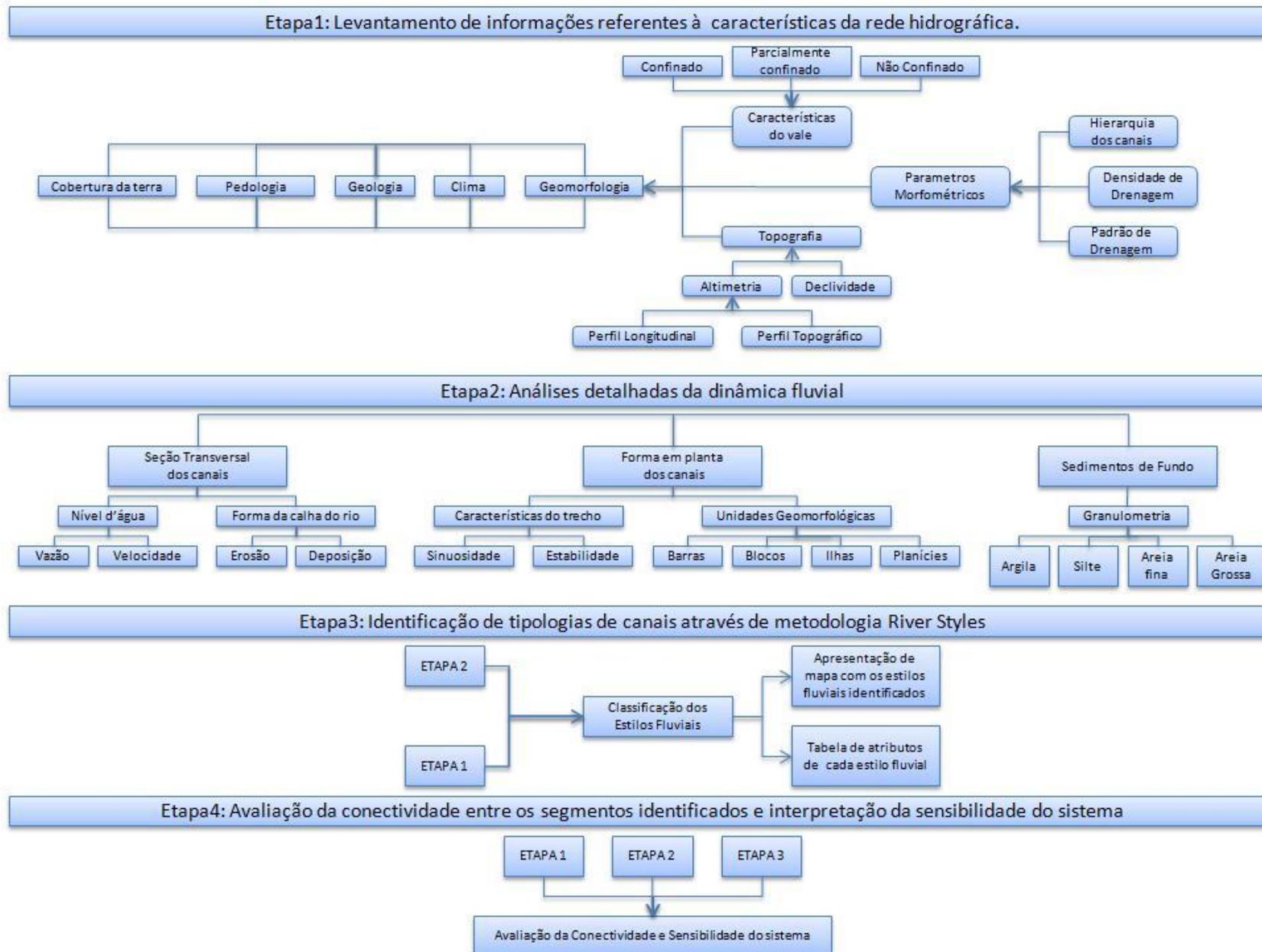


Figura 4-4: Fluxograma da metodologia utilizada.

## 5 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FLUVIAL

### 5.1 Escala da Bacia

O controle primário sobre as formas e processos fluviais é conduzido pelo substrato no qual o sistema de drenagem opera, de modo que o embasamento geológico reflète de forma ampla na estrutura da drenagem e na sua história evolutiva. Investigar os aspectos geológicos, geomorfológicos e pedológicos, permite entender a configuração dos vales, o padrão de drenagem, a forma do perfil longitudinal, a propensão à formação, transferência e deposição de sedimentos, a conectividade dos compartimentos da paisagem e o potencial energético que o fluxo pode desenvolver. (Brierley & Fryirs, 2005).

Neste item, são apresentados os principais aspectos da configuração espacial do relevo, tendo-se como bases **mapeamentos temáticos** (geologia, geomorfologia, pedologia e clima), **topografia** (altimetria, a declividade e o perfil longitudinal do rio Macaé), e **parâmetros morfométricos** (hierarquia dos canais, área da bacia, densidade de drenagem e padrão de drenagem). Estes atributos são utilizados ainda na avaliação integrada da conectividade da paisagem, no item 6.

#### 5.1.1 Contexto Climático

A Região Sudeste do Brasil, onde está situada a bacia do rio Macaé, recebe influência tanto de sistemas tropicais como de sistemas provenientes de latitudes médias, apresentando uma estação menos chuvosa no inverno e uma mais chuvosa no verão (CAL, 2006).

A diversidade climatológica fluminense é decorrente, portanto, da combinação de uma série de fatores físicos e atmosféricos locais. As escarpas de blocos falhados separam superfícies altas e montanhosas, que mergulham para o interior, de outras planas a suavemente onduladas, que se espraiam ao longo da costa do Estado do Rio de Janeiro, constituindo as baixadas litorâneas. A associação relevo-altitude-maritimidade é responsável pelo aumento da turbulência do ar, podendo induzir a formações

convectivas com consequentes chuvas orográficas nas cotas mais elevadas das regiões serranas (CAL, *op cit.* 2006).

De acordo com a classificação de Köppen, a baixada campista é caracterizada pelo clima Tropical Úmido (Ao), com chuvas intensas no verão ou outono, temperaturas elevadas e inverno seco. Abrange parte do litoral e a região norte/noroeste do Rio de Janeiro, litoral capixaba, oeste paulista e parte de Minas Gerais. Já a região Serrana é classificada como Clima Tropical de Altitude (Aw), onde os meses mais chuvosos ocorrem durante a primavera e o verão (setembro a março), e os de estiagem, com o outono e inverno (abril a setembro). Nesse tipo de clima, a precipitação média é maior, pois o relevo condiciona a ocorrência de chuvas convectivas, apresentando médias de 1.500 e 2.000 mm/ano.

Tendo como base o levantamento do comportamento pluviométrico na área da bacia do Rio Macaé realizado por HINGEL *et al*, pôde-se verificar que eventos extremos de chuva ocorreram nos anos de 2007 e 2009 (Figura 5-1 e Figura 5-2), verificando-se nesses meses mudanças pluviométricas mais perceptíveis na geometria do canal e em sua forma em planta. Já no ano de 2003, foram registrados os menores totais pluviométricos, assim, refletindo em redução da largura do canal do Rio Macaé e consequente aumento de feições deposicionais.

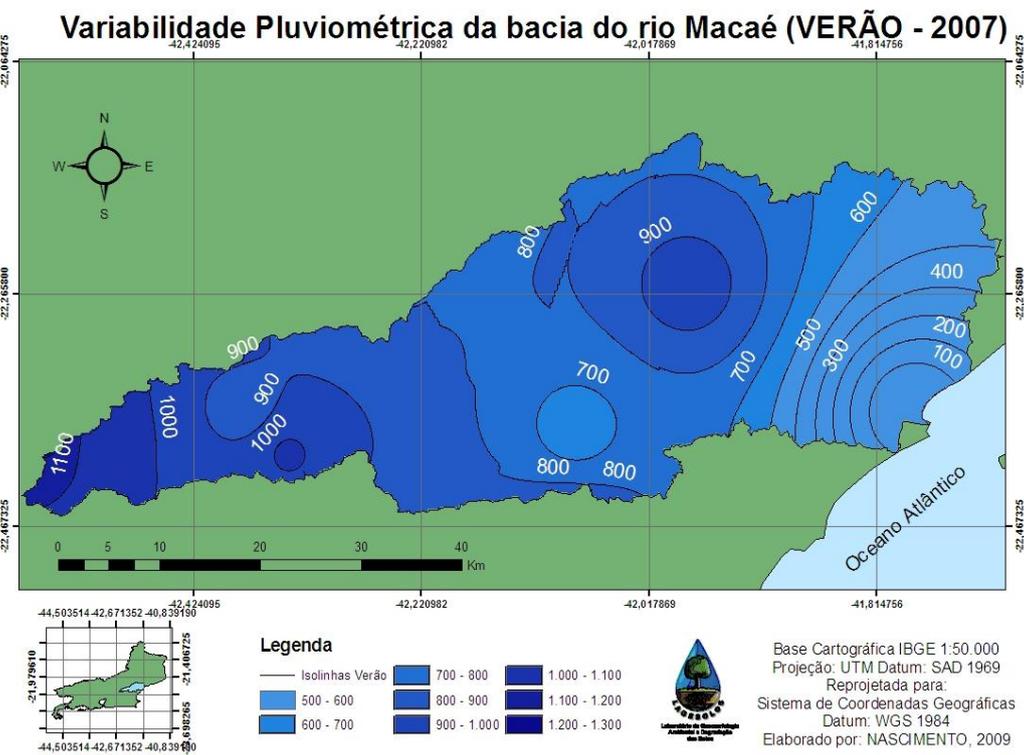
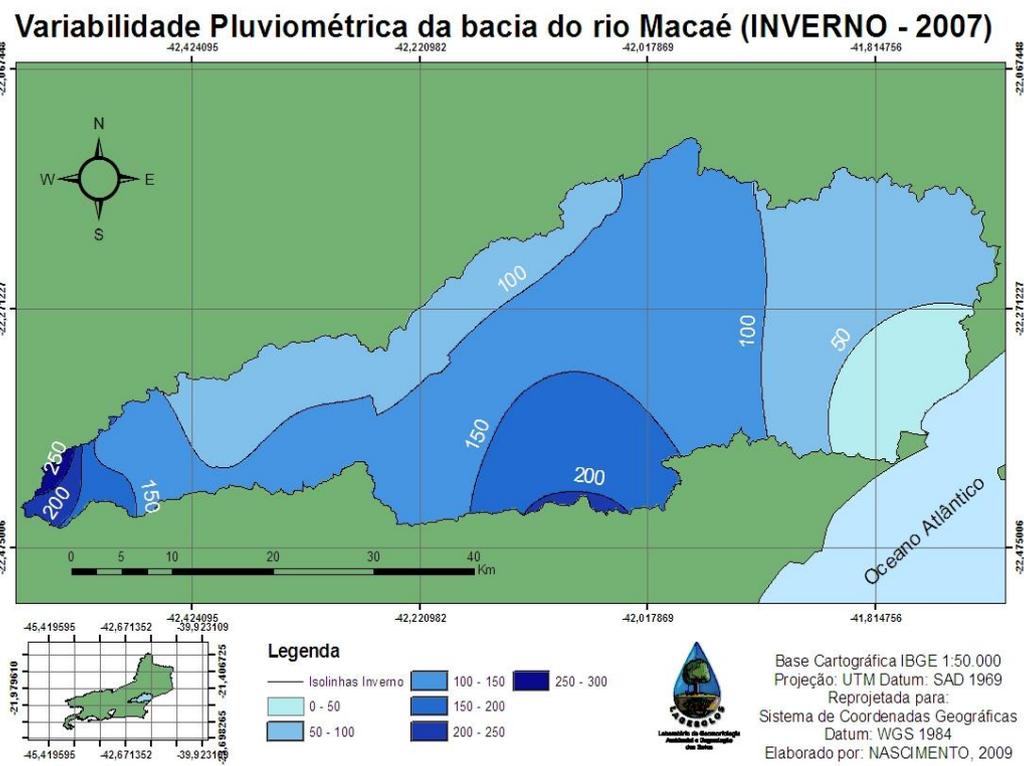


Figura 5-1: Mapas dos totais pluviométricos acumulados de verão e inverno de 2007, na bacia do rio Macaé (Hingel & Nascimento, 2009)

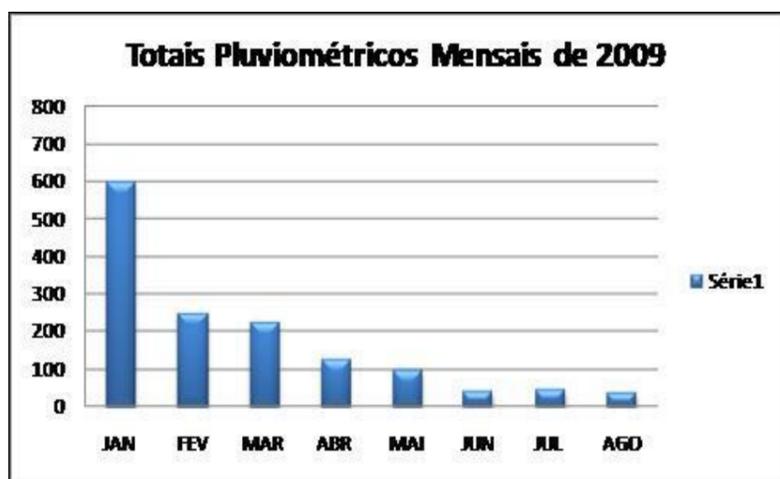
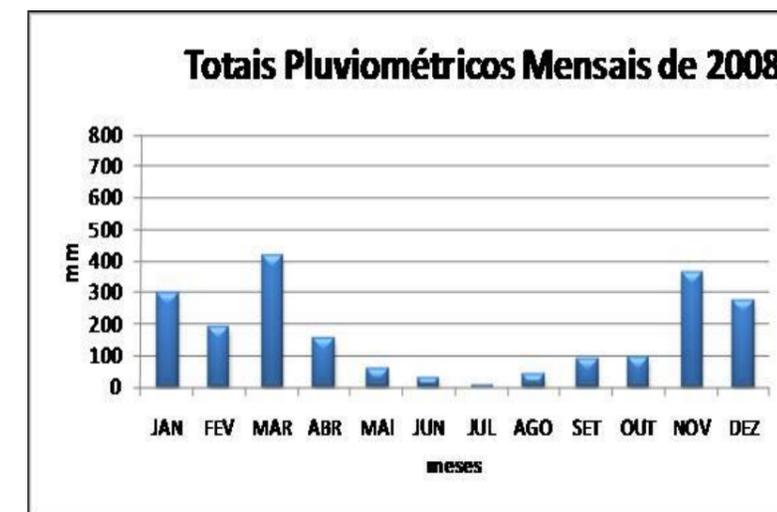
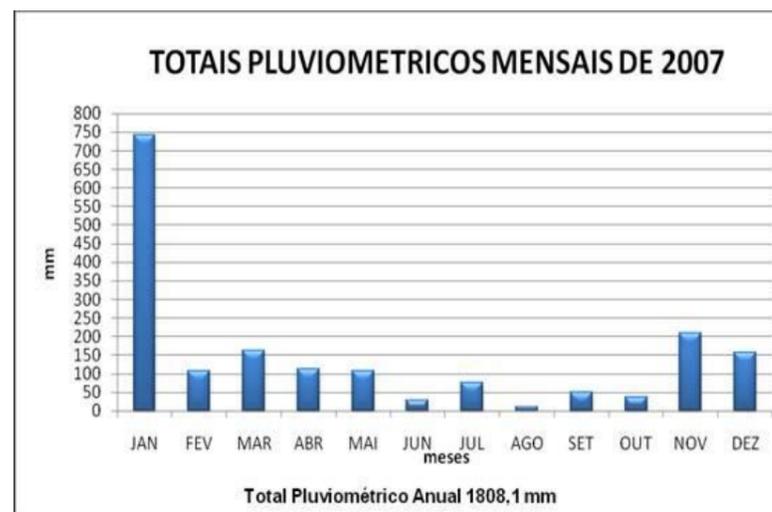
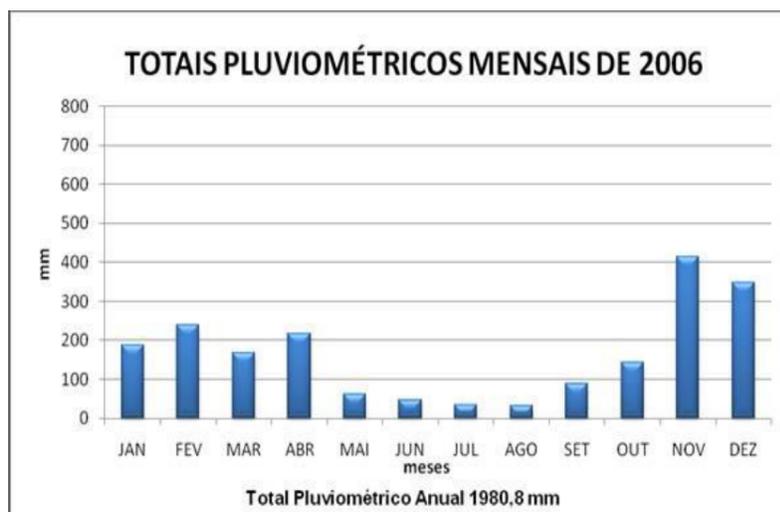
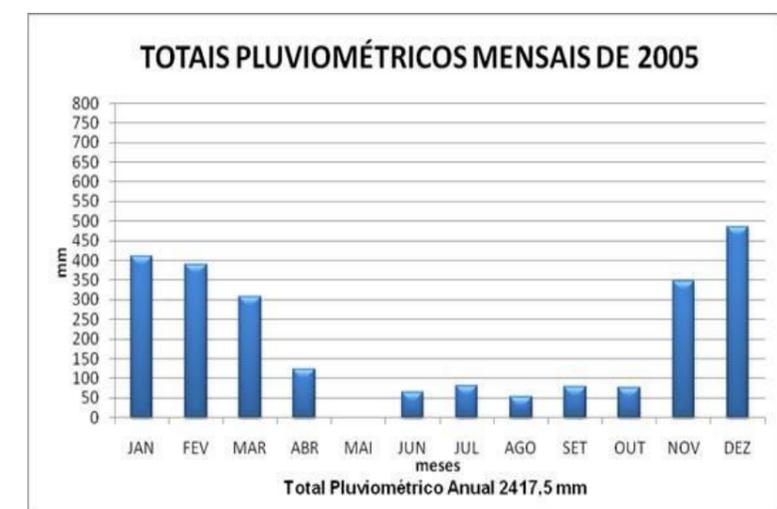
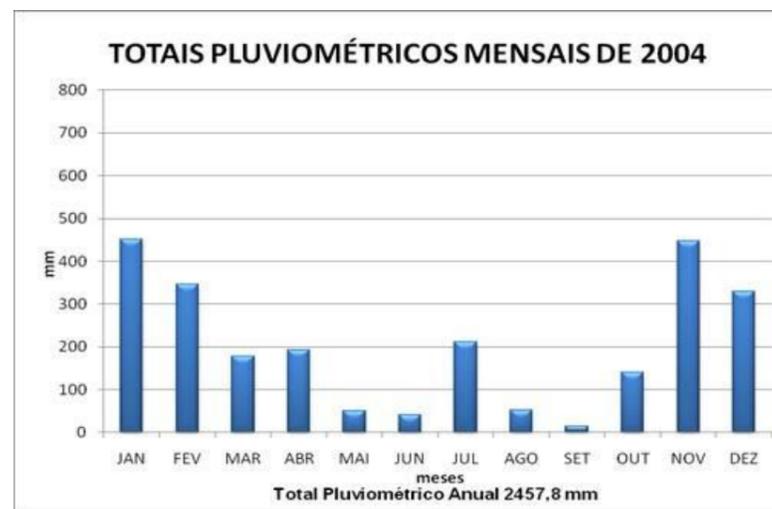
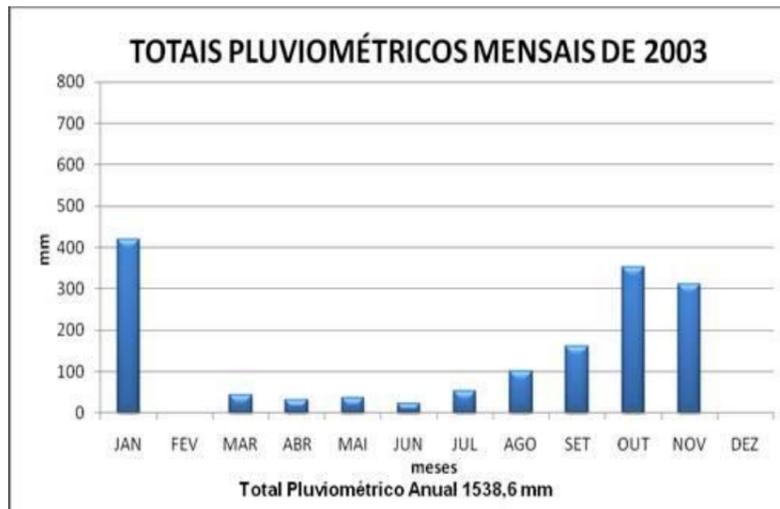


Figura 5-2: Totais Pluviométricos Mensais de 2003 a 2009 (ESTAÇÃO FAZENDA SÃO JOÃO /ANA-Agência Nacional de Águas)

### 5.1.2 Contexto Geológico

A região enquadra-se nos grandes lineamentos e fraturamentos do Estado do Rio de Janeiro, com predomínio da direção E-NE, no qual se encaixa a drenagem principal do rio Macaé (Costa *et al.*, 1982). A grande quantidade de fraturas, e a dureza das rochas, exercem um forte controle estrutural no desenvolvimento da drenagem, principalmente nas áreas centrais da bacia onde são verificados vales mais estreitos, formados pelo entalhamento do rio, ao longo de seus panos de falhas (Figura 5-3).

Segundo Hassui, (1990), a geologia da área de estudo está relacionada ao contexto ambiental da região Sudeste brasileira, marcada pela evolução da Serra do Mar, cuja formação envolveu movimentos tectônicos associados ao processo de rotura do Atlântico Sul e a outros movimentos mais modernos relacionados à rotação da Placa Sul-Americana para oeste.

De acordo com Almeida (1967), após um longo período de estabilidade tectônica no Paleozóico e início do Mesozóico, as rochas no período Jurássico sofreram uma tectônica extensional associada à reativação Wealdeniana. Essa tectônica prolongou-se pelo Terciário, gerando uma série de falhamentos normais, que produziram os maciços costeiros e as escarpas serranas, como as serras do Mar e da Mantiqueira (Asmus & Ferrari, 1978).

Na região da bacia do rio Macaé ocorrem rochas Pré-Cambrianas ígneas e metamórficas, representadas pela Unidade São Fidélis, pelo Complexo Região dos Lagos, pela Suíte Desengano e pelo Granito Sana. A dureza dessas rochas e a grande quantidade de fraturas apresentadas tiveram um importante papel para o desenvolvimento da rede de drenagem na bacia, que reflete hoje o forte controle estrutural à que esteve submetida.

Nas partes baixas da bacia ocorrem ambientes de deposição formadas por sedimentos do período Quaternário que recobrem amplas áreas de baixada do rio Macaé, evidenciando um longo período de entulhamento e alargamento desses vales (Silva & Cunha, 2001).

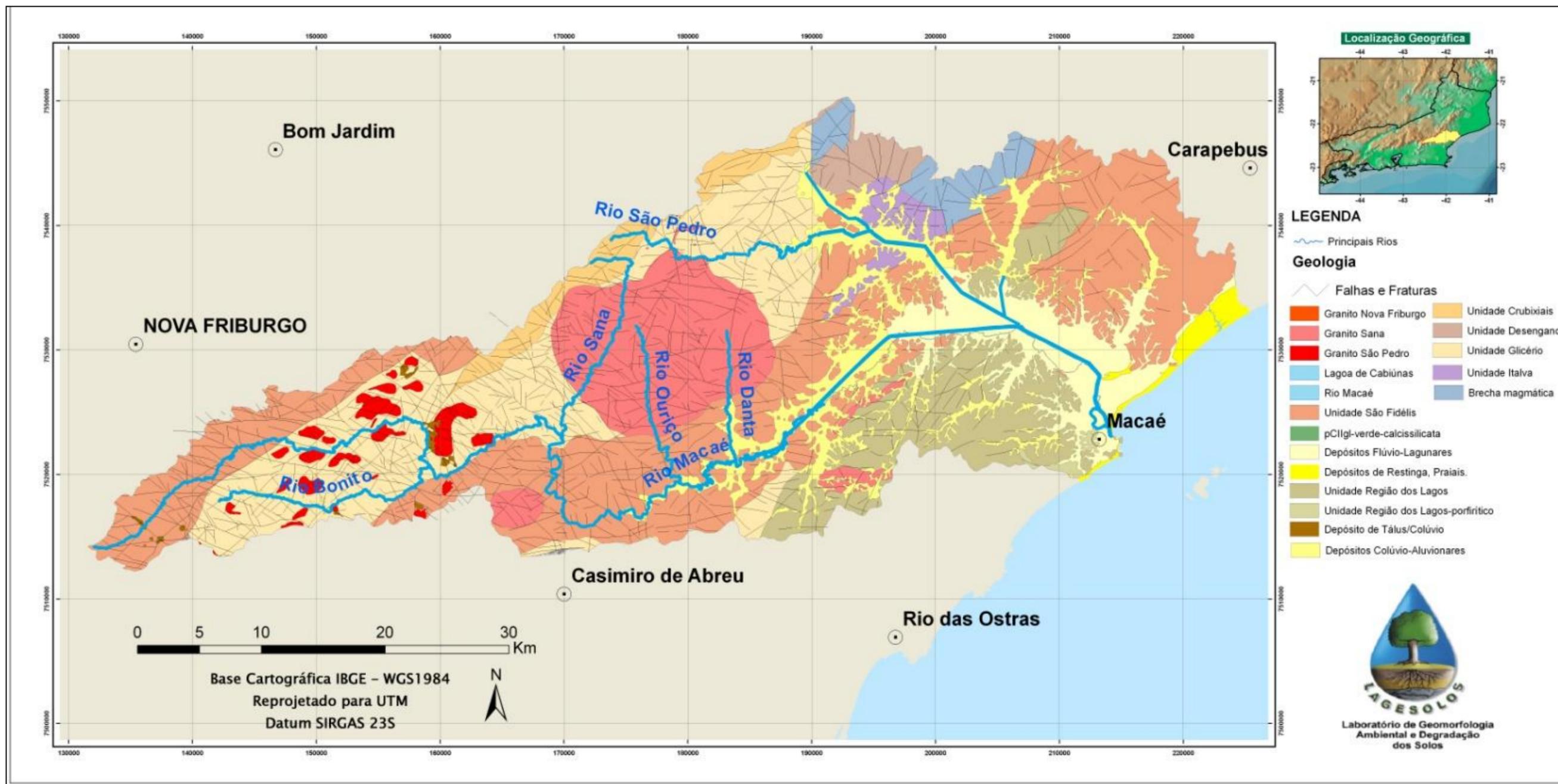


Figura 5-3: Mapa geológico da bacia do rio Macaé (Fonte: Adaptado de Costa *et al.*, 1982 - DRM)

### 5.1.3 Compartimentação Geomorfológica da Bacia

A geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro foi compartimentada por Dantas (2000), em duas unidades morfoestruturais: o Cinturão Orogênico do Atlântico e as Bacias Sedimentares Cenozóicas. Estas unidades destacam-se por relevos com grandes variações altimétricas, pelo paralelismo de serras e de vales, e por intrusões ígneas. A morfologia destas áreas guarda características geológicas da sua formação, apesar das longas fases erosivas a qual estiveram expostas (Dantas, 2000 *in*: Assumpção, 2009).

De acordo com Silva (2002), que elaborou a compartimentação geomorfológica do Estado do Rio de Janeiro, a bacia do rio Macaé é constituída por **relevo montanhoso** nas áreas de nascente, **serras escarpadas** na parte média da bacia, e amplas **planícies fluviais** na porção leste da bacia (Figura 5-4 e Figura 5-5). A configuração espacial destes compartimentos apresentados permite a ocorrência de diferentes feições fluviais que se somam ao longo do curso do rio, e de maneira contínua, determinam os padrões de comportamento, em cada setor.

**Planícies Aluviais e Fluvio-Lagunares** - Correspondem a superfícies sub-horizontais, com gradientes extremamente suaves e convergentes em direção aos canais-tronco. São terrenos inundáveis nos baixos cursos fluviais. Essa unidade representa as planícies e terraços fluviais constituídos por sedimentos quaternários arenosos.

**Colinas** (suave colinoso) - Essa unidade corresponde a um relevo de colinas muito pouco dissecadas, com vertentes convexas e topos arredondados ou alongados, com expressiva sedimentação de colúvios e alúvios. Há nessa unidade, a ocorrência subordinada de morrotes alinhados. A densidade de drenagem é baixa a média com padrão de drenagem variável, de dendrítico a treliça ou retangular. Predomínio de amplitudes topográficas inferiores a 50m e gradientes muito suaves.

**Morros** (zona típica do domínio de "mar de morros") - São relevos de colinas pouco dissecadas, com vertentes convexo-côncavas e topos arredondados ou alongados, com sedimentação de colúvios e alúvios. Há a ocorrência subordinada de morrotes alinhados e morros baixos. A densidade de drenagem é média com padrão de drenagem variável, de dendrítico a treliça ou retangular, com predomínio de amplitudes topográficas inferiores a 100m e gradientes suaves.

**Escarpas Serranas** - Relevo montanhoso, extremamente acidentado, transicional entre dois sistemas de relevo. Vertentes predominantemente retilíneas a côncavas, escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados.

Densidade de drenagem muito alta com padrão de drenagem variável, de paralelo a dendrítico, ou treliça a retangular. Predomínio de amplitudes topográficas superiores a 400m e gradientes muito elevados, com ocorrência de colúvios e depósitos de tálus, solos rasos e afloramentos de rocha.

**Domínio Montanhoso** - No mapeamento apresentado por Silva (2002), para o estado do Rio de Janeiro, a mesma denomina as feições com altimetria entre 200m e 400m como escarpas reafeiçoadas. O relevo compreende morros convexo-côncavos dissecados e topos arredondados ou aguçados, com sedimentação de colúvios, alúvios e, subordinadamente, depósitos de tálus. Ocorrência de compartimentos colinosos em seções alveolares nos vales principais. Densidade de drenagem média a alta com padrão de drenagem variável, de dendrítico a treliça ou retangular. Predomínio de amplitudes topográficas entre 200 e 400m e gradientes médios, com presença de formas residuais proeminentes e gradientes elevados (Figura 5-4).

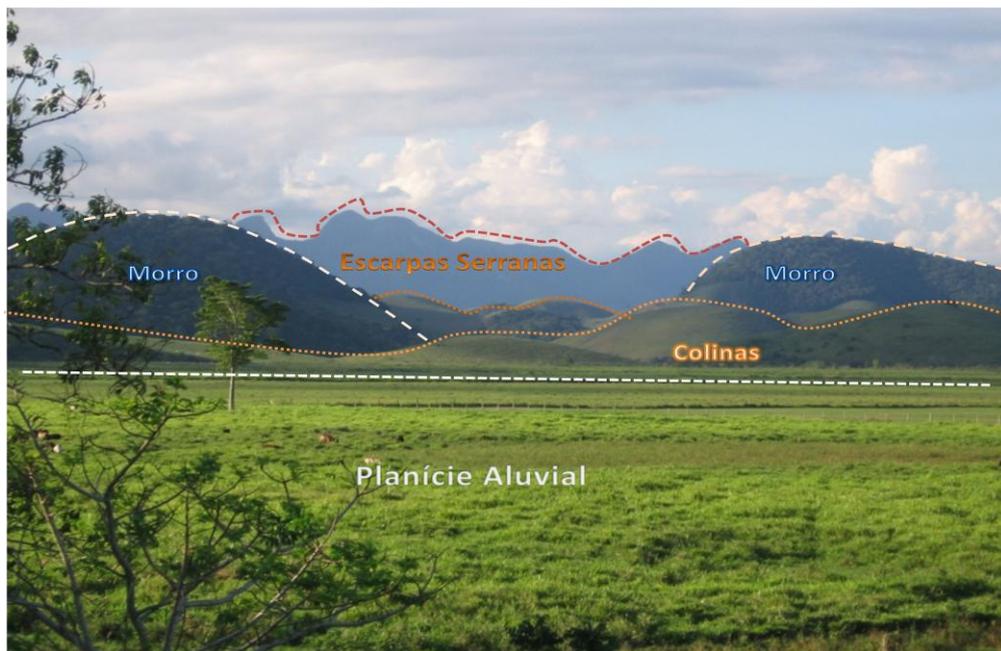


Figura 5-4: Unidades Geomorfológicas na bacia do rio Macaé (Foto: Lagesolos 2007)

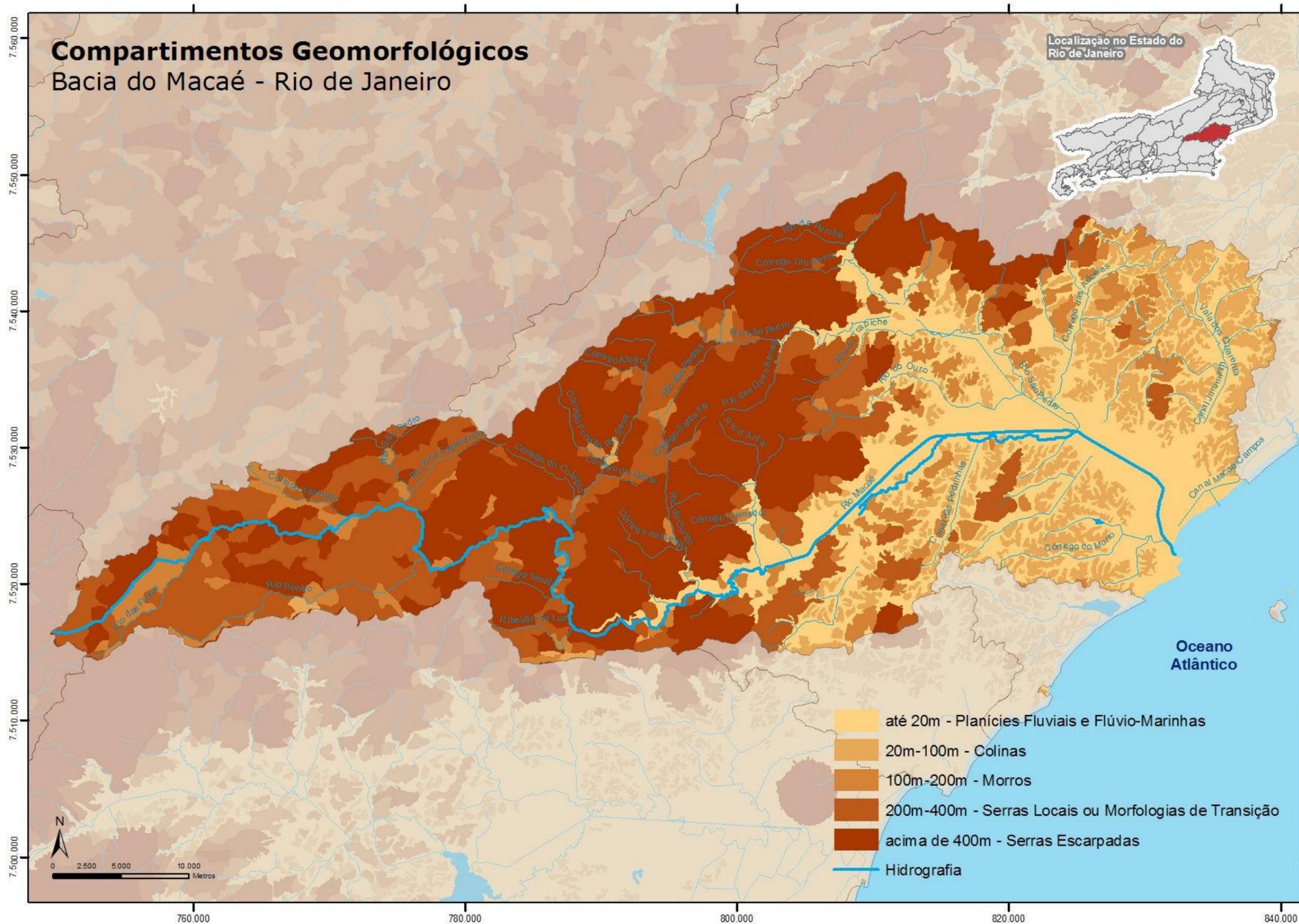


Figura 5-5: Mapa de Compartimentação Geomorfológica da bacia do rio Macaé (Silva, 2002)

#### 5.1.4 Hipsometria e Declividade

De modo geral, a partir dos mapas hipsométrico e de declividade (Figura 5-6 e Figura 5-7), pôde-se observar que as regiões mais elevadas da bacia não coincidem com as áreas mais íngremes.

O mapa hipsométrico (Figura 5-6), permitiu distinguir três ambientes, sendo o primeiro localizado na porção oeste da bacia, onde concentram-se as cotas mais elevadas, caracterizadas pela coloração vermelha à alaranjada (860 à 1820m), o segundo localizado na porção central da bacia, onde há predominância da coloração amarela (350 à 860m), e o terceiro localizado na porção leste, onde ocorre predomínio da coloração verde (1 à 350m).

Estes três níveis altimétricos são condicionados pela estrutura geológica da região, que englobam respectivamente a serra do mar, suas escarpas e a superfície de aplainamento que se desenvolve em direção ao litoral. Em associação com o mapeamento geomorfológico, a área vermelha representa o domínio montanhoso, cujas declividades são relativamente mais suaves, mas não o suficiente para este compartimento ser considerado um planalto. Essa verificação permite explicar a ocorrência de canais com baixa energia nesse setor.

No mapa de declividade, (Figura 5-7), as áreas representadas pela coloração vermelha representam as porções da bacia com maiores taxas de declividade. Em geral, essa região compreende a unidade escarpas serranas, onde o relevo é montanhoso, extremamente acidentado, com escarpas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados. A densidade de drenagem é muito alta com padrão de drenagem variável, de paralelo a dendrítico, ou treliça a retangular, o que associado a um número elevado de canais de primeira ordem, indica a importante função erosiva que esse setor da bacia possui. As encostas apresentam vertentes predominantemente retilíneas à côncavas com vegetação e mata ciliar em bom estado de preservação. Há o predomínio de amplitudes topográficas superiores a 500m e gradientes muito elevados, com ocorrência de colúvios, depósitos de tálus, solos rasos e afloramentos de rocha. O canal encontra-se muito confinado e lateralmente estável, ou seja, sem deslocamento horizontal dentro do vale, com presença elevada de blocos e matacões com diâmetros que podem chegar até 1,5m.

Ainda no alto curso, o canal apresenta variações no comportamento e na sua forma, ao sair do domínio de *escarpas serranas* e entrar no contexto das *escarpas reafeiçoadas*. Nessa região, predominam amplitudes topográficas entre 200 e 400m e gradientes médios, entretanto, nessa unidade, há a ocorrência de formas residuais proeminentes com gradientes elevados.

O Baixo curso representa uma parte significativa do canal na bacia. Os perfis longitudinal e transversal mostram neste segmento, uma extensa e contínua planície fluvial, compreendendo uma grande zona de acumulação referente ao compartimento geomorfológico planície fluvio-lagunar.

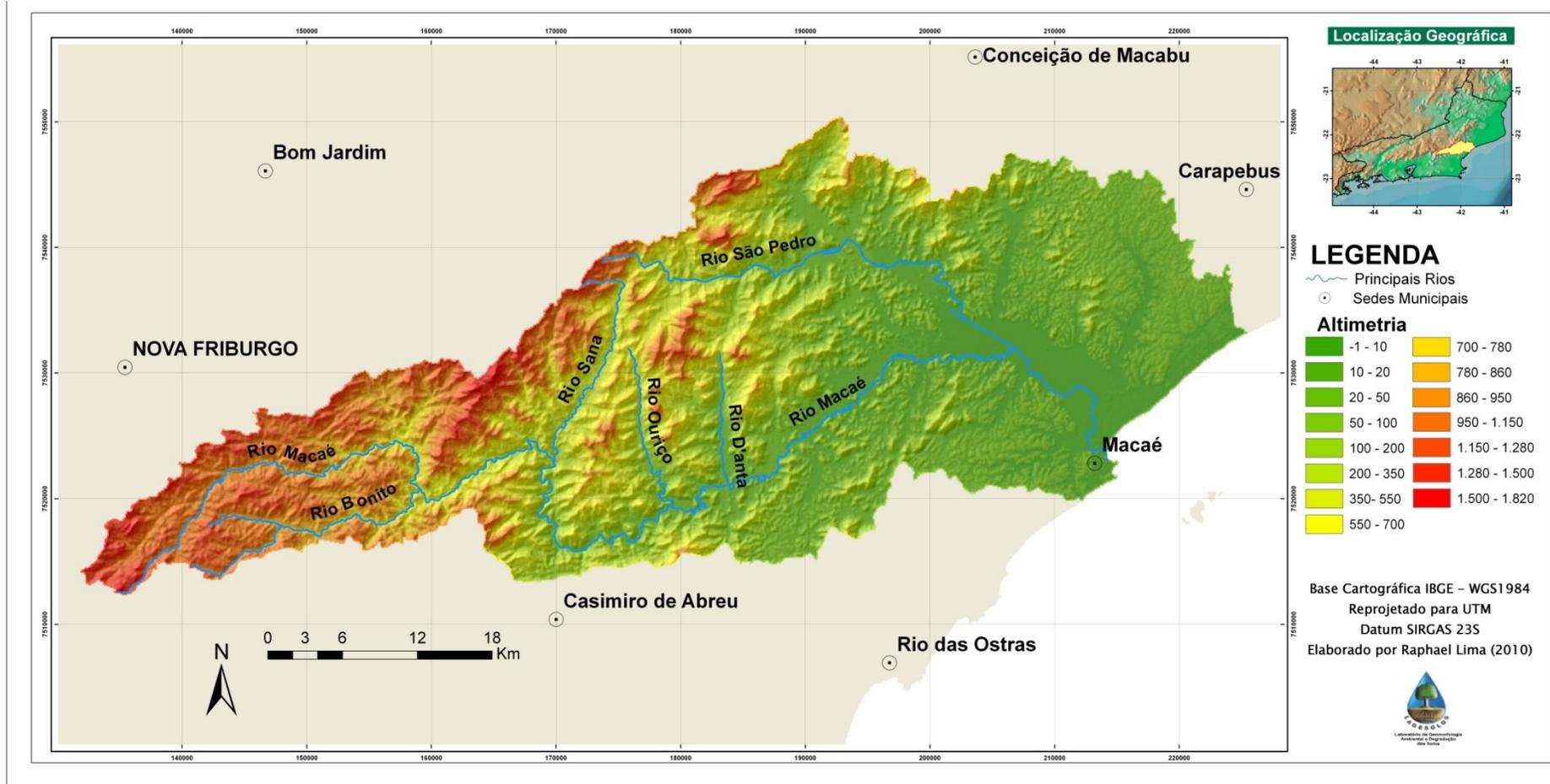


Figura 5-6: Mapa hipsométrico da bacia do rio Macaé. (Fonte: Lima, 2010)

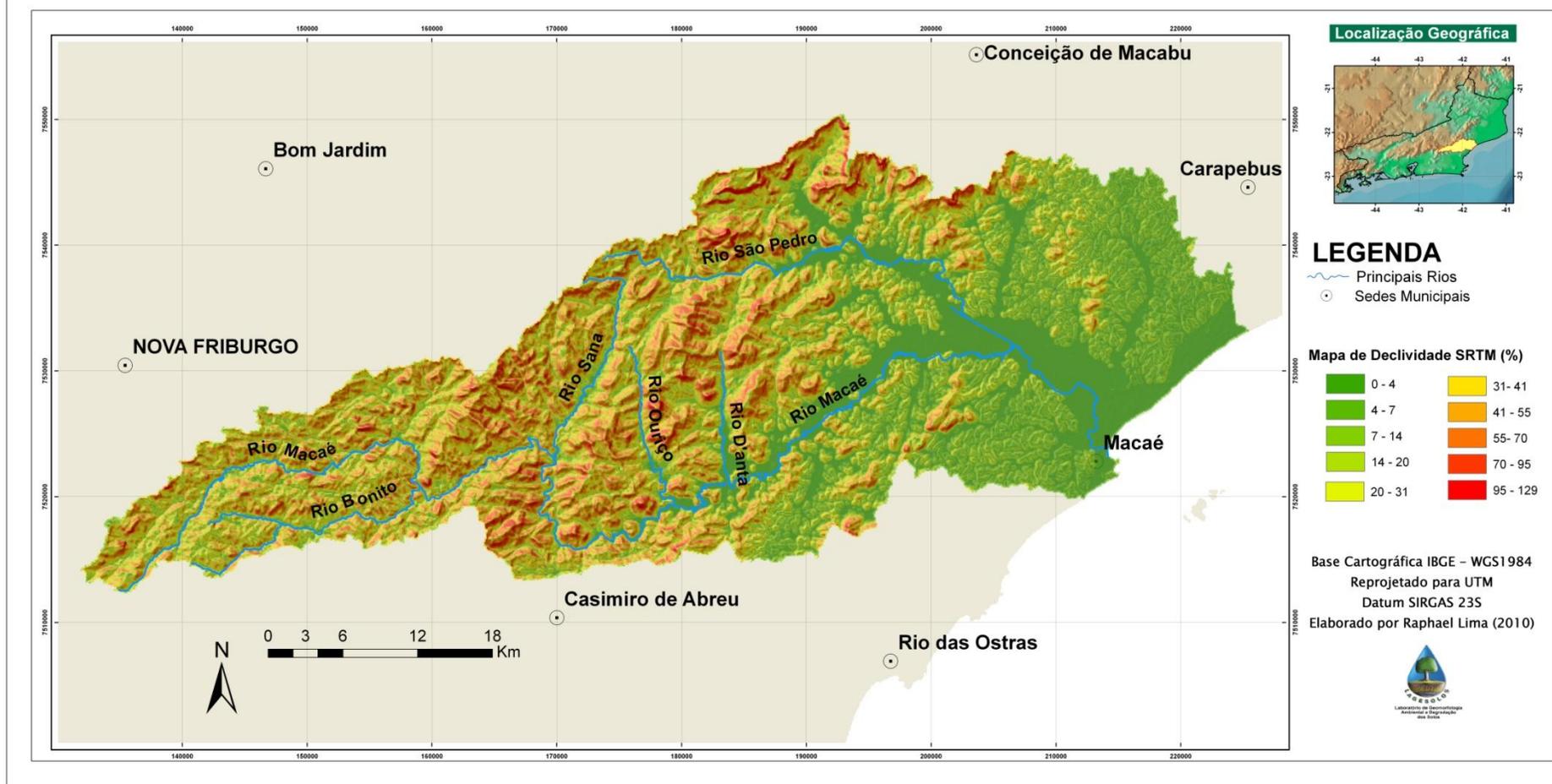


Figura 5-7: Mapa de declividade da bacia do rio Macaé. (Fonte: Lima, 2010)

## 5.1.5 Parâmetros Morfométricos

### Padrão de Drenagem

A identificação dos tipos de padrões de drenagem também representa um passo importante na etapa de caracterização da drenagem, posto que mudanças bruscas ou simples variações de um tipo de padrão para outro, em uma determinada bacia ou conjunto de bacias, são evidências fortes de um controle geológico, seja estrutural, seja litológico (Bezerra, 2000). Entende-se como padrão de drenagem o arranjo apresentado pelos diversos canais para compor a bacia de drenagem.

Em função desse arranjo e do desenho apresentado pela disposição dos canais, na bacia do rio Macaé, foram identificados quatro padrões de drenagem, sendo eles: dendrítico, treliça, paralelo e retangular (Tabela 5-1)

Na Figura 5-8, observa-se que na parte leste da bacia, predomina o padrão dendrítico, o que corresponde a sedimentos com resistência uniforme, sobre rochas cristalinas, confirmando, assim a formação geológica da região associada à abertura do Atlântico. Na parte central e oeste da bacia, verifica-se uma drenagem sobre forte controle estrutural, acompanhando linha de falhas estruturais e planos, e fraqueza da rocha, estando relacionadas a um relevo escarpado.

Tabela 5-1: Descrição dos padrões de drenagem básicos encontrados na bacia (Deffontaines & Chorowics, 1991).

TIPOS PRINCIPAIS DE PADRÕES DE DRENAGEM		
TIPO	Características	Condições do Terreno
Dendrítico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ramos irregulares em todas as direções (1)</li> <li>- ramos semelhantes a uma árvore</li> <li>- junção do canal principal com os tributários em ângulos variados (1)</li> <li>- os canais são inseqüentes em origem (1)</li> <li>- nenhum canal é consequente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- o declive é o fator controlador (1)</li> <li>- as rochas oferecem resistência uniforme em superfícies horizontais (planos, platôs, rochas cristalinas maciças (1)</li> <li>- rochas que sofreram intenso metamorfismo (1)</li> <li>- a drenagem dendrítica implica em carência ou ausência de controle estrutural significativa (1)</li> </ul>
Treliça	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tributário secundário paralelo ao canal principal ou outro canal para o qual o tributário primário conflui (1)</li> <li>- tributário secundário alongado e em ângulo reto em relação ao tributário primário (1)</li> <li>- situa-se entre o padrão dendrítico e o retangular</li> <li>- a drenagem treliça compreende canais subseqüentes conectados por reseqüentes ou obseqüentes. (1)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- a drenagem como um todo é consequente em origem; pode localmente assumir o padrão treliça como um resultado de glaciação</li> <li>- o padrão treliça é característico de estratos dobrados ou basculados, e em planície costeira dissecada (1)</li> <li>- rochas sedimentares, vulcânicas ou metassedimentares de baixo grau inclinadas ou dobradas (2).</li> <li>- áreas de fraturas paralelas (2)</li> </ul>
Paralelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- canais aproximadamente paralelos uns aos outros (1)</li> <li>- planícies de lagos, planícies costeiras, bacias glaciais basculadas e com declive forte.</li> <li>- lados de vales jovens, em lagos ou mares fechados, em escarpas de falha.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- declive regional pronunciado (longo) e inclinação moderada a forte (1)</li> <li>- controle do declive por feições topográficas paralelas, controladas por estruturas dobradas, falhadas ou estruturas monoclinais. (1; 2)</li> </ul>
Retangular	<ul style="list-style-type: none"> <li>- curvas em ângulo reto tanto no canal principal quanto nos tributários; é mais irregular que o padrão treliça.-</li> <li>- confluências em ângulo reto. (1)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- controle estrutural dominante (1)</li> <li>- juntas e falhas das rochas em ângulo reto (1)</li> <li>- os canais seguem linhas de fraqueza (1)</li> <li>- rochas metamórficas e sedimentares dobradas</li> </ul>

A associação desses padrões com a geomorfologia é discutida no item 5.1.3, onde são avaliados em conjunto com os compartimentos geomorfológicos.

## Hierarquia de Drenagem

A hierarquização da rede de drenagem da bacia do rio Macaé, realizada através da classificação automática a partir de imagens SRTM, não permitiu grande detalhamento da rede de drenagem, no entanto, foi possível observar a configuração da drenagem, condicionada pela estrutura do relevo. A partir da metodologia de Strahler (1952), classificou-se a bacia como sendo de sétima ordem, a partir da confluência do rio Macaé com o rio São Pedro, pela margem esquerda.

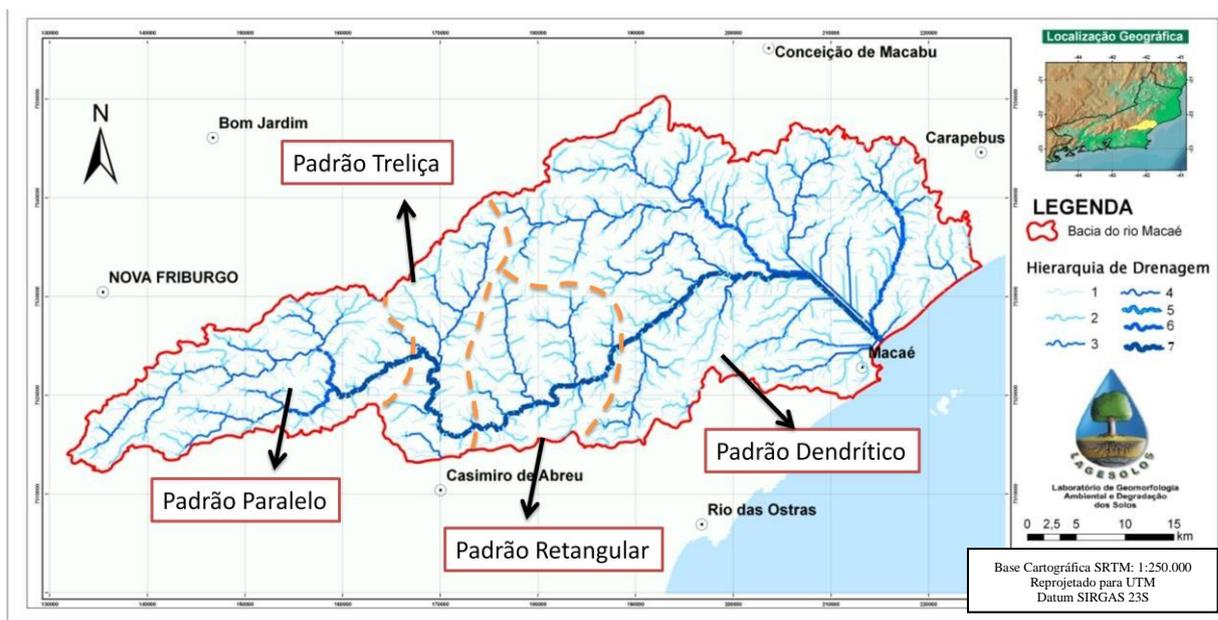


Figura 5-8: Mapa de hierarquia de canais da bacia do rio Macaé. Drenagem extraída a partir de imagem SRTM. (Fonte: Lima, 2010)

## Densidade de Drenagem

As densidades de drenagem apresentam uma homogeneidade de valores ao longo da bacia, apresentando, no entanto, maior concentração de canais de primeira ordem e nascentes, nas partes altas da bacia. A grande quantidade de canais de primeira ordem pode estar diretamente relacionada, entre outros fatores, com propriedade do solo, geologia, à área da bacia e principalmente, com a declividade do terreno, que diminui a taxa de infiltração e aumenta o escoamento superficial em várias sub-bacias do alto curso.

### 5.1.6 Perfil Longitudinal

Os rios possuem diferentes balanços erosivos e deposicionais ao longo de seu perfil longitudinal (Figura 5-9). A análise das inter-relações dos fatores controladores e da conectividade ao longo do perfil longitudinal são comumente usados com a finalidade de interpretar o estágio evolutivo do canal e verificar a influência da geologia e geomorfologia, na quebra de declives (Jain *et al.*, 2008).

O período de estabilidade tectônica que se prolongou até os dias atuais, permitiu o desenvolvimento da drenagem e o equilíbrio na taxa de produção de sedimentos na bacia. Esse tipo de ambiente, comumente, possui baixa capacidade de produção e transporte de sedimentos, resultando em ambientes com baixa conectividade, no entanto, sua associação com o regime climático tropical, permitiu ao rio Macaé energia suficiente para retrabalhar os materiais e estabelecer um equilíbrio dinâmico entre a produção e liberação de sedimentos no sistema.

O canal do rio Macaé apresenta declividades acentuadas na pequena extensão do seu formador, tendo uma tendência de suavização gradativa até o km 12. No trecho que se segue até o km 53, o perfil torna-se convexo, apresentando acréscimo gradativo da declividade com sequências de rupturas. A terceira seção do canal apresenta uma fase de transição até o km 74, onde apresenta gradientes mais suaves, porém com relativa convexidade. Do km 74 até a foz do rio Macaé, ocorre um desnível de aproximadamente 20m, com um gradiente suave, que permite a dissipação de energia e o desenvolvimento de uma extensa planície de inundação.

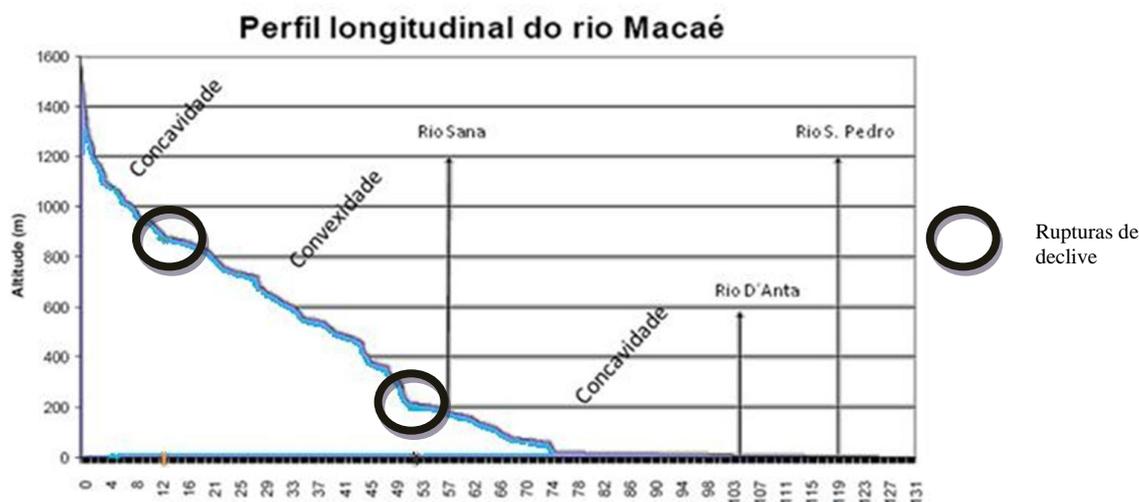


Figura 5-9: Perfil longitudinal do canal do rio Macaé

Os trechos marcados com um círculo apresentam tendências de erosão à montante (*headcut*), em função da ruptura de declive brusca. Nesses pontos, pode-se observar o entalhamento vertical do canal em seu vale, verificando-se ainda aumento significativo da energia do rio.

Nas escarpas da Vertente Atlântica da Serra do Mar, onde ocorrem os maiores declives, nascem os rios que drenam para as Baías da Ilha Grande, de Sepetiba e Guanabara, bem como aqueles, na região leste do Estado, que deságuam diretamente no Oceano Atlântico, a exemplo dos Rios São João e Macaé. O relevo acidentado, as fortes declividades e a elevada pluviosidade, são fatores determinantes para o regime torrencial dos rios, que apresentam respostas quase imediatas à incidência das chuvas. Quando comparado com os principais rios, totalmente compreendidos no Estado do Rio de Janeiro (Figura 5-10), observa-se que o rio Macaé é o mais extenso, apresentando ainda, um perfil longitudinal com concavidade voltada para baixo, o que evidencia um aumento gradativo da declividade na sua porção central (120 – 80 km), passando novamente a ter uma redução da sua declividade a partir do km 80.

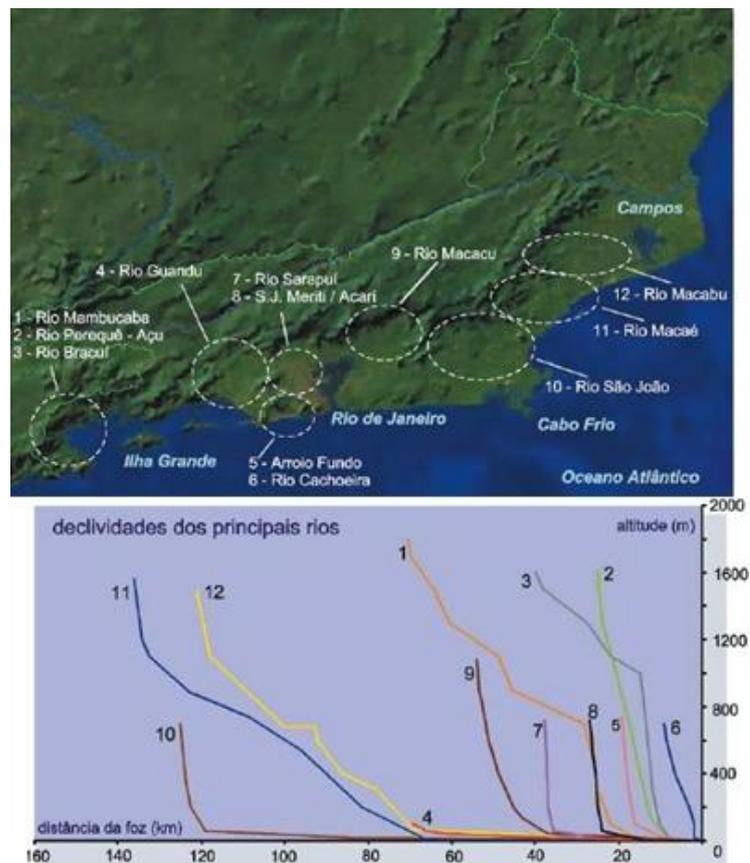


Figura 5-10: Perfil longitudinal dos principais rios do Estado do Rio de Janeiro. (Fonte: Planáguas Semads, 2001)

### 5.1.7 Contexto Pedológico

O principal objetivo do levantamento pedológico da bacia do rio Macaé foi avaliar os ambientes com maior propensão à produção natural de sedimentos. Neste subitem, apresentar-se-á uma descrição sumária das classes de solos identificadas na área de domínio da bacia do rio Macaé, evidenciando a sua suscetibilidade à erosão.

As características do terreno envolvem uma grande diversidade de solos, a um total de 23 unidades de mapeamento, tendo como dominantes os Argissolos, Cambissolos, Latossolos, Gleissolos, Organossolos, Espodossolos e os Neossolos Flúvicos e Litólicos.

Segundo Guerra (1998), os processos erosivos nas encostas são condicionados por quatro fatores controladores, sendo eles a erosividade das chuvas, as propriedades do solo, a cobertura vegetal e as características das encostas. Apesar da classificação utilizada inferir maior importância ao tipo de solo, as regiões com maiores índices de suscetibilidade coincidiram, ainda, com terrenos cujas encostas apresentaram declividade média-alta à alta e índices pluviométricos elevados, sendo estes, atributos favoráveis à ocorrência de processos erosivos. Em função da declividade, comprimento de rampa, espessura do solo e estrutura geológica marcada por falhamentos, identifica-se a área representada pela cor roxa na Figura 5-11, como a de maior ocorrência de movimentos de massa, enquanto nas áreas vermelhas e amarelas predominam erosão por escoamento superficial (*runnoff*), principalmente onde a cobertura vegetal original foi substituída por pastagens e cultivos (Lima<sup>1</sup> 2008).

O mapeamento permitiu identificar, portanto, que a bacia do rio Macaé apresenta uma grande área potencialmente contribuinte de sedimentos, uma vez que o relevo e as chuvas são favoráveis aos processos erosivos. Visualmente, a bacia possui grande área produtora de sedimentos, uma vez que quase metade de seu território apresenta solos com suscetibilidade alta à extremamente alta, considerando ainda que muitas dessas encostas estejam conectadas à rede de drenagem.

Neste contexto, destaca-se o papel da cobertura vegetal na manutenção do balanço sedimentar na bacia, uma vez que a presença da cobertura vegetal original em grande parte dessa região contribuiu para a redução dos fatores erosivos, concorrendo para a proteção dos solos e regulando a produção de sedimentos.

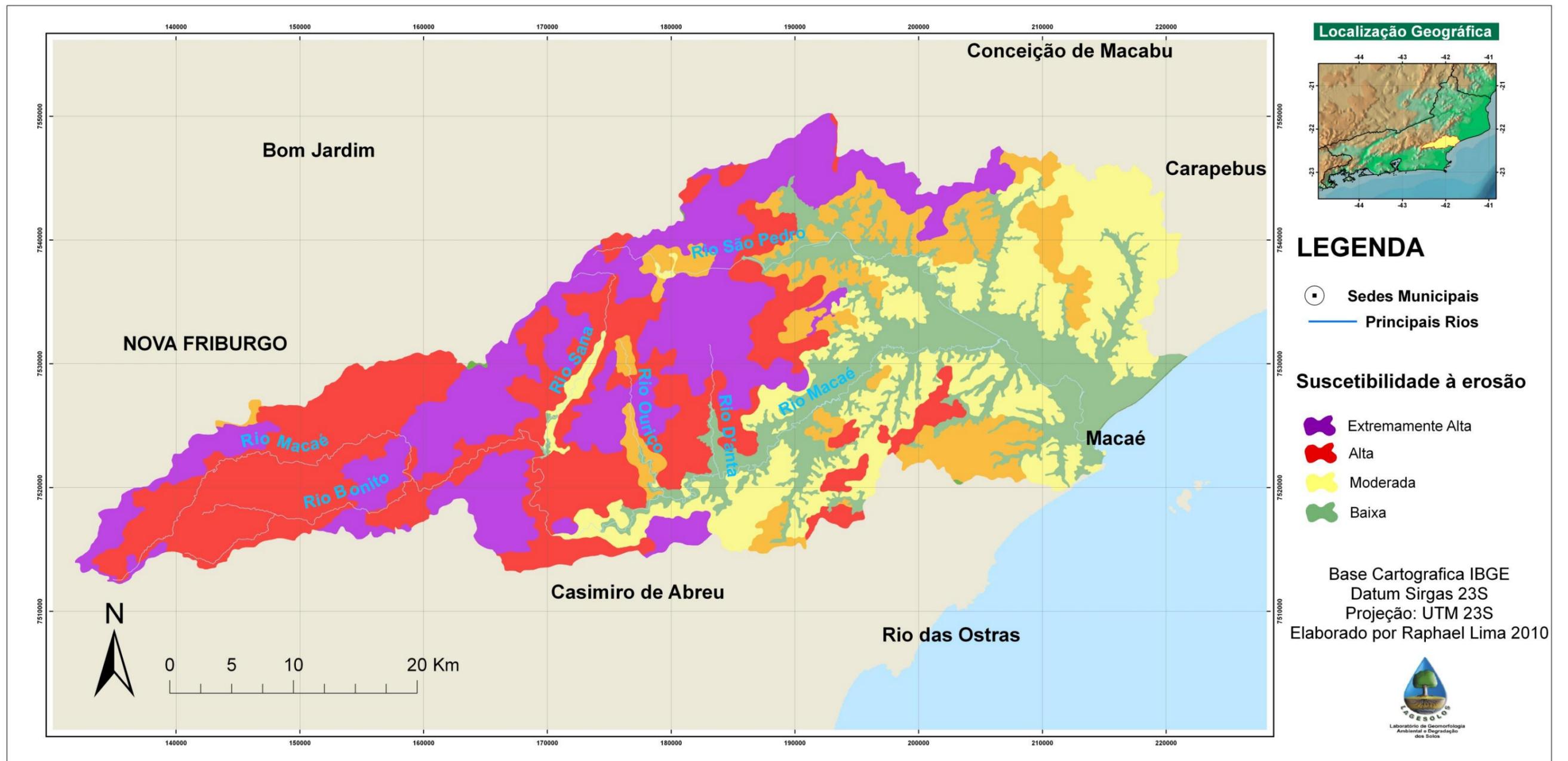


Figura 5-11: Mapa de suscetibilidade à erosão. (Adaptado de EMBRAPA, 1983)

### 5.1.8 Uso e Cobertura da Terra

A Região Norte Fluminense caracteriza-se, historicamente, pela economia açucareira. No entanto, a partir da década de 70, o álcool e o petróleo, pela importância assumida na economia nacional, vêm transformá-la na área mais disputada do País, para exploração e produção de combustível e uma das principais regiões do Estado do Rio de Janeiro, destacando-se os municípios de Campos de Goytacazes e Macaé (Marçal & Luz, 2003).

Nesse contexto, o Município de Macaé vem apresentando um novo ciclo de crescimento econômico que desponta com os investimentos das companhias privadas de petróleo que estão desembarcando na Bacia de Campos. Assim, o Município de Macaé, que tinha sua economia sustentada principalmente por atividades agroindustriais, tornou-se um importante centro regional, graças às atividades associadas à extração de petróleo e gás natural da Bacia de Campos. Atualmente, é a principal base da PETROBRÁS na região, o que lhe garante enorme potencial para o desenvolvimento de novas atividades ligadas à prestação de serviço e às atividades comerciais (Peçanha & Neto 2004).

Segundo Mote (2008), tanto em Macaé, quanto em Nova Friburgo, houve forte oscilação da área total dos estabelecimentos agropecuários no período que separa os dois últimos censos (1996/2006).

Em função do histórico de ocupação da bacia desde o período colonial e da recente dinamização da economia regional a partir da década de 1970, a bacia do rio Macaé sofreu um grande aumento de áreas de cultivo e pastagens principalmente nas partes baixas da bacia (Figura 5-12 e Figura 5-13).

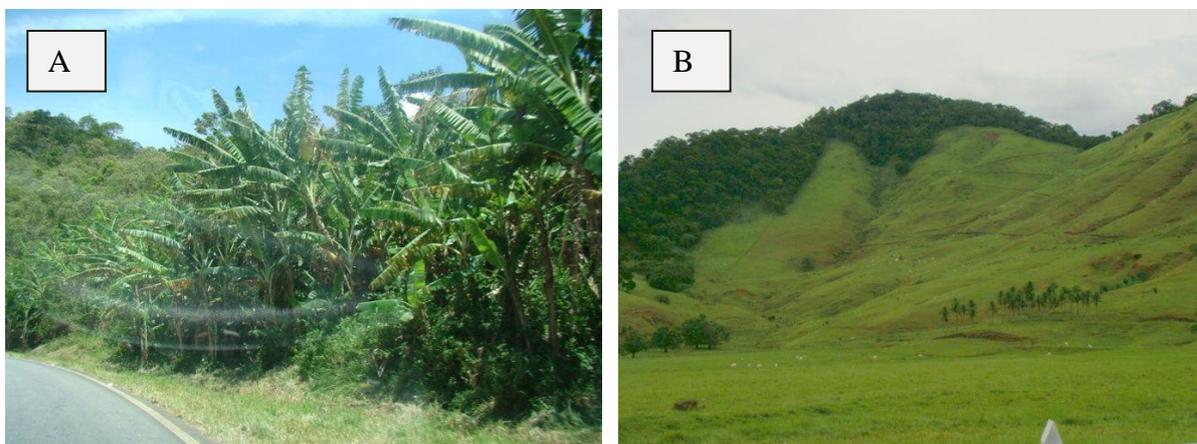


Figura 5-12: (A) Área de cultivo de bananeira (B) pastagem em planície e encosta  
Fonte: Lagesolos 2009.

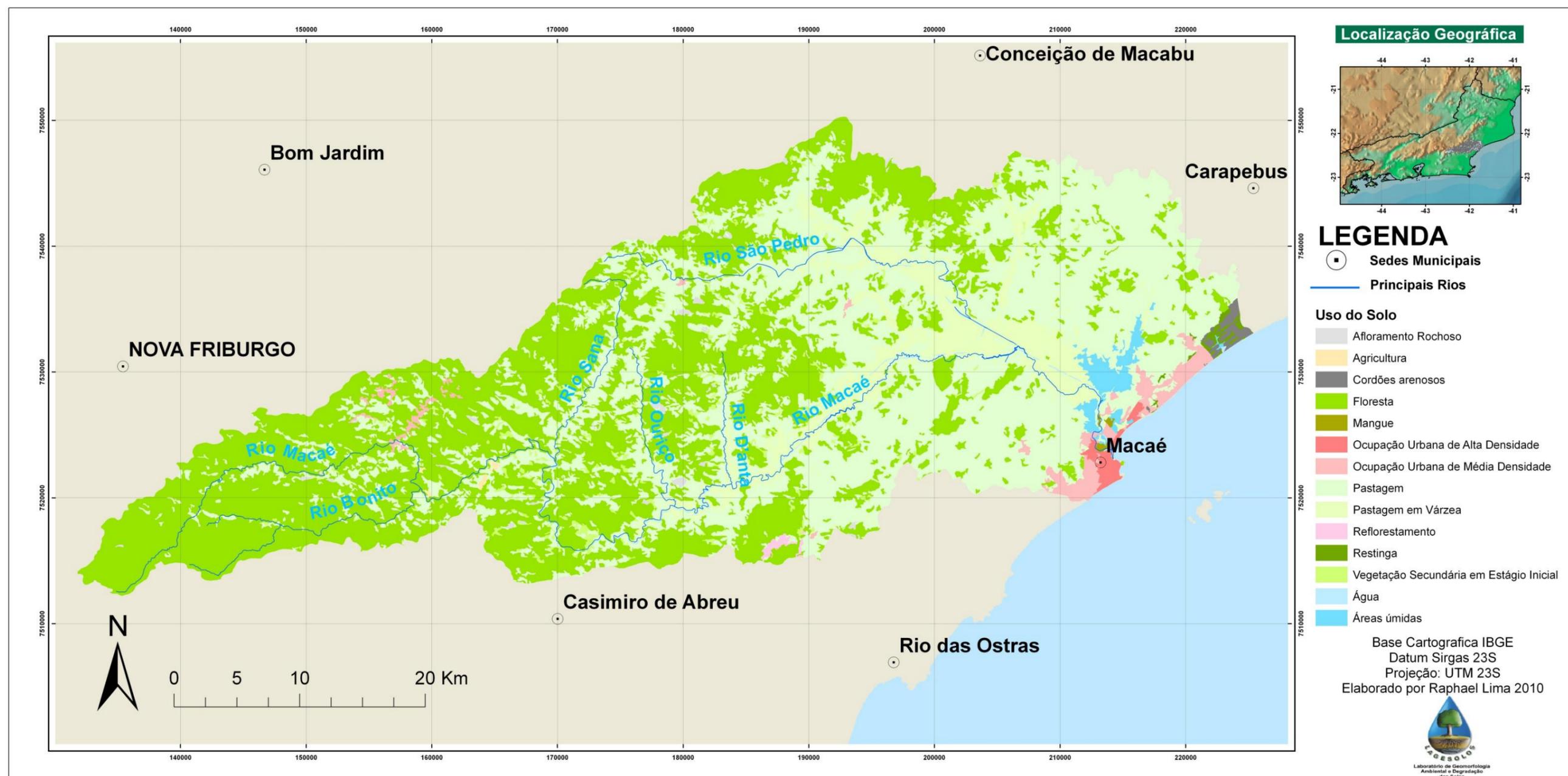


Figura 5-13: Mapa de uso e cobertura da terra da bacia do rio Macaé no ano de 2005. Fonte: Villas Boas (2010).

Dentro das características regionais observadas nesta etapa, foi possível identificar aspectos relevantes para interpretar os principais controles regionais sobre o comportamento e forma do rio, refletindo a história evolutiva e os fatores condicionantes em diferentes regimes fluviais.

Analisando a interação dos parâmetros físicos, pode-se inferir que a densa rede hidrográfica que se estabeleceu na região resulta da conformação do relevo e seu substrato rochoso com o clima tropical úmido, gerando uma gama de ambientes complexos e diversificados. Essa heterogeneidade permite que se estabeleçam ao longo da bacia, diferentes tipos de canais, com padrões de escoamento e descarga de sedimentos específicos.

A escala da bacia permitiu a identificar, portanto, controles primários que influenciam diretamente os processos avaliados em escala de detalhe no item a seguir.

## 5.2 Escala do Canal

Nesta etapa da pesquisa, a caracterização do comportamento e da forma do canal de maneira detalhada, é realizada a partir de três parâmetros chave, sendo eles: **forma em planta do canal, forma transversal do canal e composição dos sedimentos de fundo.**

Os dados gerados a partir do monitoramento dos perfis transversais e interpretação das imagens de satélite permitiram acompanhar variações no leito do canal, bem como ajustes da carga sedimentar decorrentes das mudanças sazonais da velocidade do fluxo. Diversos autores apontam que essas variáveis dos sistemas fluviais estão interligadas e qualquer mudança em uma delas acarreta alterações nas outras (Leopold *et al.*, 1964; Schumm, 1977; Brookes, 1988; Christofolletti, 1990; Summerfield, 1991).

Não obstante, a análise de diferentes pontos da bacia, em diferentes períodos permitirá avaliar a interação de um compartimento com outro, sendo possível assim, verificar a interação e a conectividade entre os diferentes compartimentos do rio Macaé, bem como a forma com que a energia e os sedimentos se propagam ao longo da bacia.

### 5.2.1 Mapeamento da Forma em Planta do Canal.

As feições identificadas retratam a natureza dos processos atuantes ao longo dos trechos mapeados, permitindo a interpretação dos elementos preponderantes para o estabelecimento de padrões do fluxo, e dinâmica erosiva/deposicional. Em outras palavras, a forma e o comportamento do rio são atributos dialéticos, intimamente relacionados, de maneira que a forma do rio se configura em função de um determinado comportamento e vice-versa.

Através da interpretação das imagens mapeadas, observou-se processos diferenciados na forma de deposição e transporte do rio Macaé representado pela variação de feições identificadas em diferentes ambientes. Em cada ambiente foi possível acompanhar, ainda, os ajustes das feições fluviais ao longo de 3 anos, resultantes da variabilidade e sazonalidade do regime hidrológico.

Ao longo do rio Macaé identificou-se sete tipos de feições geomorfológicas, descritas na Tabela 5-1, desenvolvidas tanto na margem do rio quanto dentro do leito, sendo elas: soleiras (*riffle*), depressões (*pool*), barras transversas, ilhas fluviais, barras de expansão, barras centrais, barras laterais, cordões marginais convexos e retificação.

Apesar de algumas feições ocorrerem em mais de um tipo de ambiente, a maneira com que elas se configuram ao longo do canal permite identificar diferentes padrões de comportamento entre os segmentos analisados, e assim inferir sobre os principais processos atuantes em cada trecho.

#### **Soleiras (*riffle*) e Depressões (*pool*)**

Ocorrem em trechos do canal com vales confinados e escarpados, apresentando sinuosidade moderada, controlada pelo embasamento das vertentes. Estas duas feições se intercalam ao longo do rio, estando associadas às áreas de acumulação de sedimentos grosseiros que elevam a rugosidade e a turbulência do fluxo, induzindo localmente o aumento da declividade. As áreas depressões que se sucedem, possui uma rugosidade baixa, profundidade relativamente maior o que permite a desaceleração do fluxo e relaxamento com relação à turbulência (Figura 5-14).



Figura 5-14: Sequência de soleiras e depressões no alto curso do rio Macaé. Fonte: Google Earth™

Observou-se através da análise temporal das imagens que essas feições são altamente estáveis, sofrendo alterações imperceptíveis na escala temporal e espacial utilizada. Ressalta-se que esses ambientes possuem elevado poder de transporte de sedimentos, sendo aumentado em função da declividade do perfil longitudinal e do confinamento das vertentes do vale.

Na sequência de imagens (Figura 5-15), é possível observar a mobilização de um grande volume de sedimentos oriundos de um movimento de massa ocorrido na vertente adjacente ao rio Macaé.

Na Figura 5-15, verifica-se o primeiro estágio da cicatriz erosiva potencializada pela ausência de cobertura vegetal e pelo corte da estrada que beira o rio apresentando-se em estágio inicial de recuperação, com presença de vegetação. Nenhum sinal de assoreamento foi verificado nesse trecho do rio, indicando competência para transportar grande parte dos sedimentos produzidos. Após pouco mais de um ano, essa feição continuou a se estabilizar, e em 2006, um movimento de massa ainda maior ocorreu, lançando novamente para dentro do rio um grande volume de sedimentos.

Na Figura 5-15, nota-se uma pequena barra arenosa remanescente na margem oposta à cicatriz, indicando que a feição não teve tempo de ser retrabalhada em função da grande carga produzida, podendo-se inferir que mesmo o rio tendo grande energia, sua resiliência não é ilimitada.

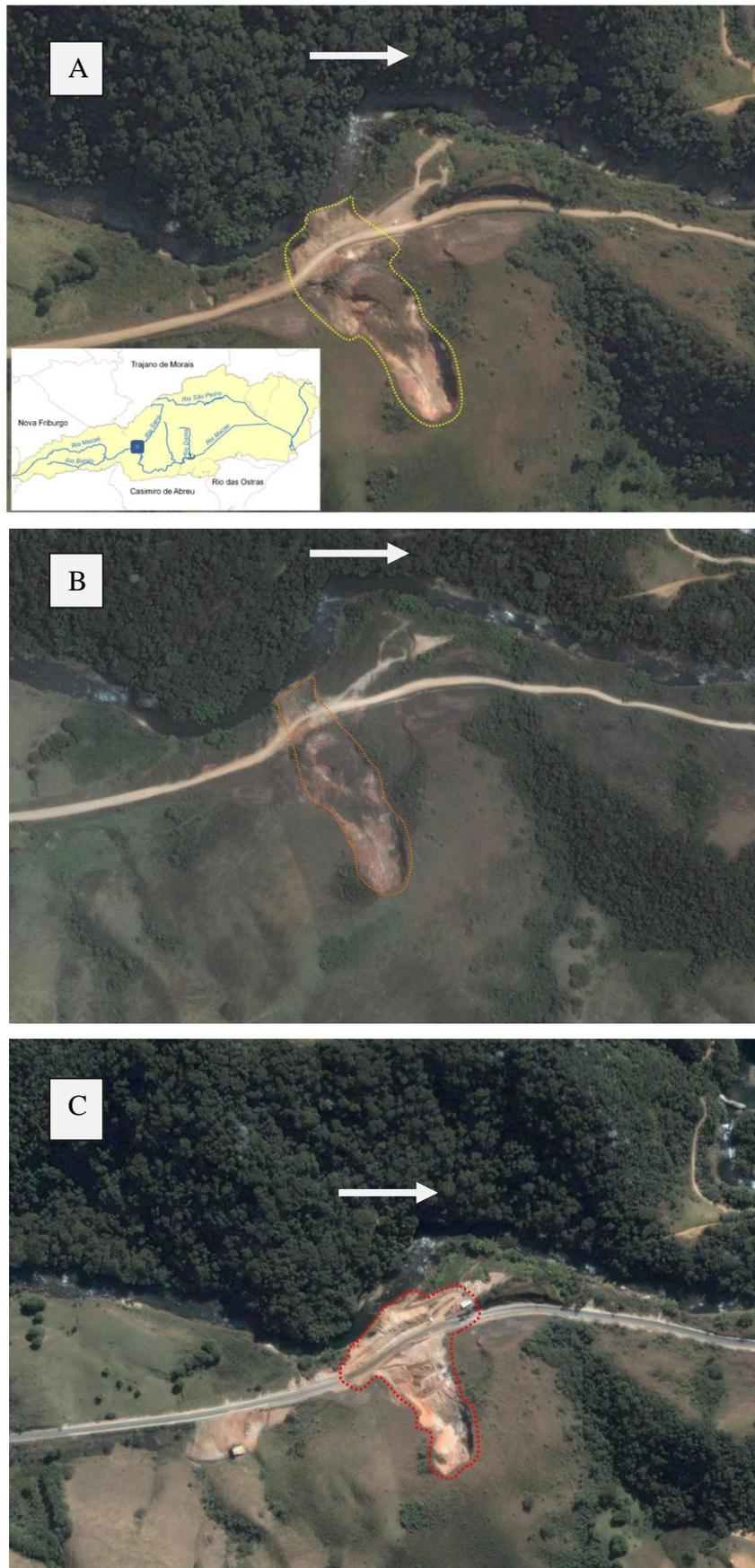


Figura 5-15: Processos erosivos na encosta conectado ao sistema de drenagem – A) 03/06/2003 B) 09/10/2004 C) 22/05/2006. Fonte: Google Earth™.

## Ilhas e Barras

Ocorrem em ambientes parcialmente confinados, com elevada sinuosidade em função da forma e orientação do vale. As curvaturas formadas funcionam como amortecimento do fluxo, sendo um dos elementos que concorrem para o desenvolvimento dessas feições.

As ilhas mapeadas representam barras localizadas no meio do canal, compostas por carga mista de blocos, seixos, areia grossa e areia fina estabilizadas pela vegetação. Sua forma é alongada na direção do fluxo, traduzindo uma feição estável com alta capacidade de reter os sedimentos (Figura 5-16).



Figura 5-16: Ilhas fluviais no canal do rio Macaé. Fonte: Google Earth™

Desse modo, as ilhas formadas nesses ambientes retratam um processo histórico de sedimentação onde blocos aglomerados durante um período de elevada competência serviram de substrato para sedimentação posterior. São ambientes com altíssima energia durante eventos de cheias normais, o que ocasiona a submersão das ilhas, afetando a vegetação sobre ela, causando nesses períodos erosão das ilhas e conseqüente retração, como pode ser observado na seqüência temporal representada pela Figura 5-17.

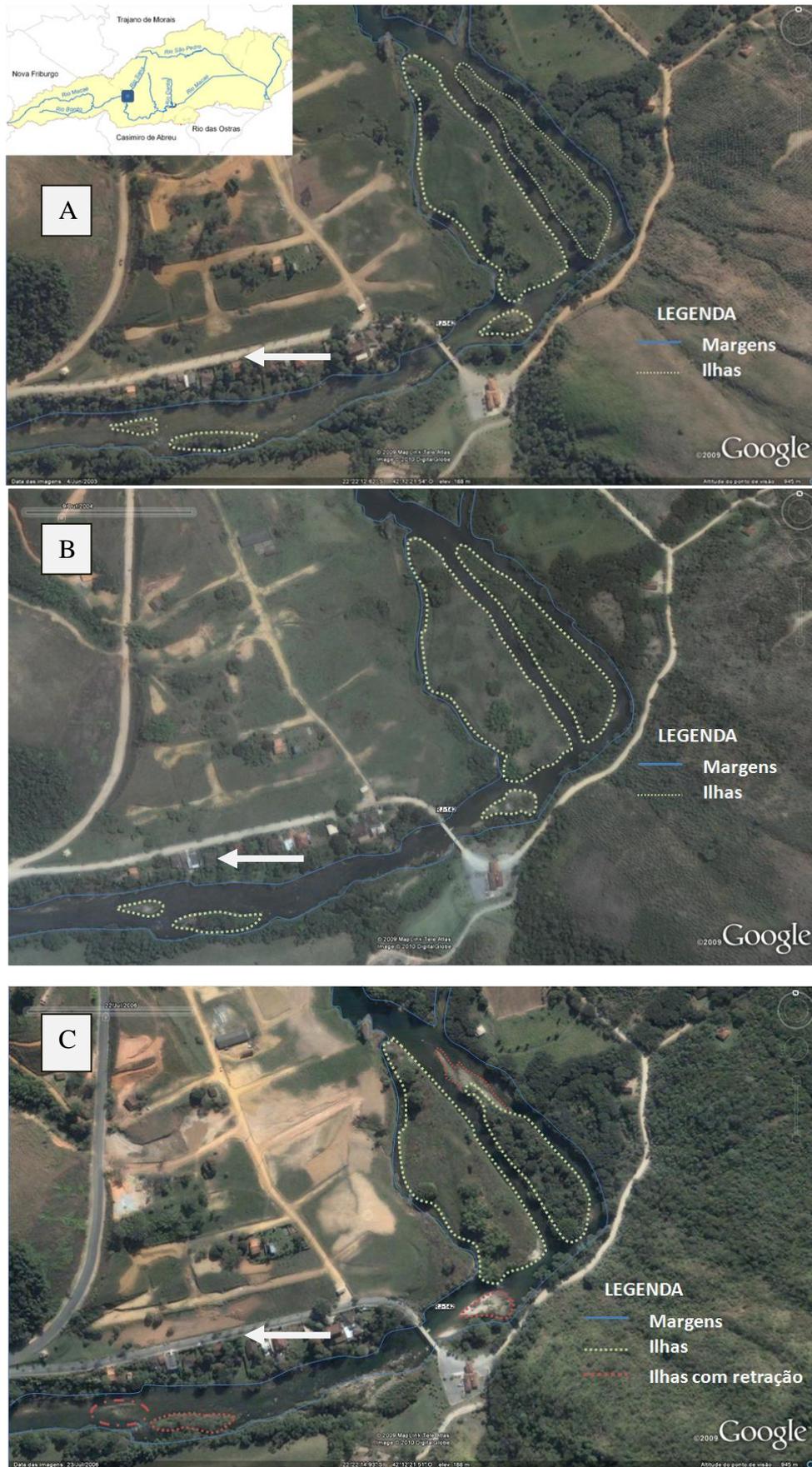


Figura 5-17: Dinâmica morfológicas de ilhas fluviais após a confluência com o rio Sana. A) 03/05/2003; B) 09/10/2004; c) 22/07/2006. Fonte: Google Earth™.

## Barras Laterais e Centrais

As barras laterais ocorrem em canais com baixa sinuosidade e carga arenosa. Essas feições se desenvolvem em lados alternados do canal, apresentando geralmente forma alongada. Essas feições são formadas em decorrência do percurso sinuoso do fluxo que comumente ocorre em canais com baixa declividade e segmentos retilíneos. As barras migram para jusante à medida que ocorrem as sucessões de entrada de energia (Figura 5-18).



Figura 5-18: Barras laterais no canal do rio Macaé. Fonte: Google Earth™.

Já as barras centrais (longitudinais), correspondem à depósitos de centro de canal, alongados, compostos por areias finas e grossas, sendo que as mais grosseiras estabilizam-se no início da barra. Diferenciam-se das ilhas pela ausência de vegetação e alta instabilidade desses depósitos (Figura 5-19).



Figura 5-19: Feições deposicionais do tipo barras centrais e barras laterais. Fonte: Google Earth™.

Esse ambiente se desenvolve logo após a abertura do vale do rio Macaé, marcando o início do seu baixo curso e da dissipação da energia que chega dos vales confinados à montante. Na Figura 5-20, observa-se o retrabalhamento dessas feições e a sua migração para jusante, em três períodos diferentes (03/06/2003; 09/10/2004; 22/07/2006), demonstrando competência do canal em retrabalhá-los em eventos de cheia regular.

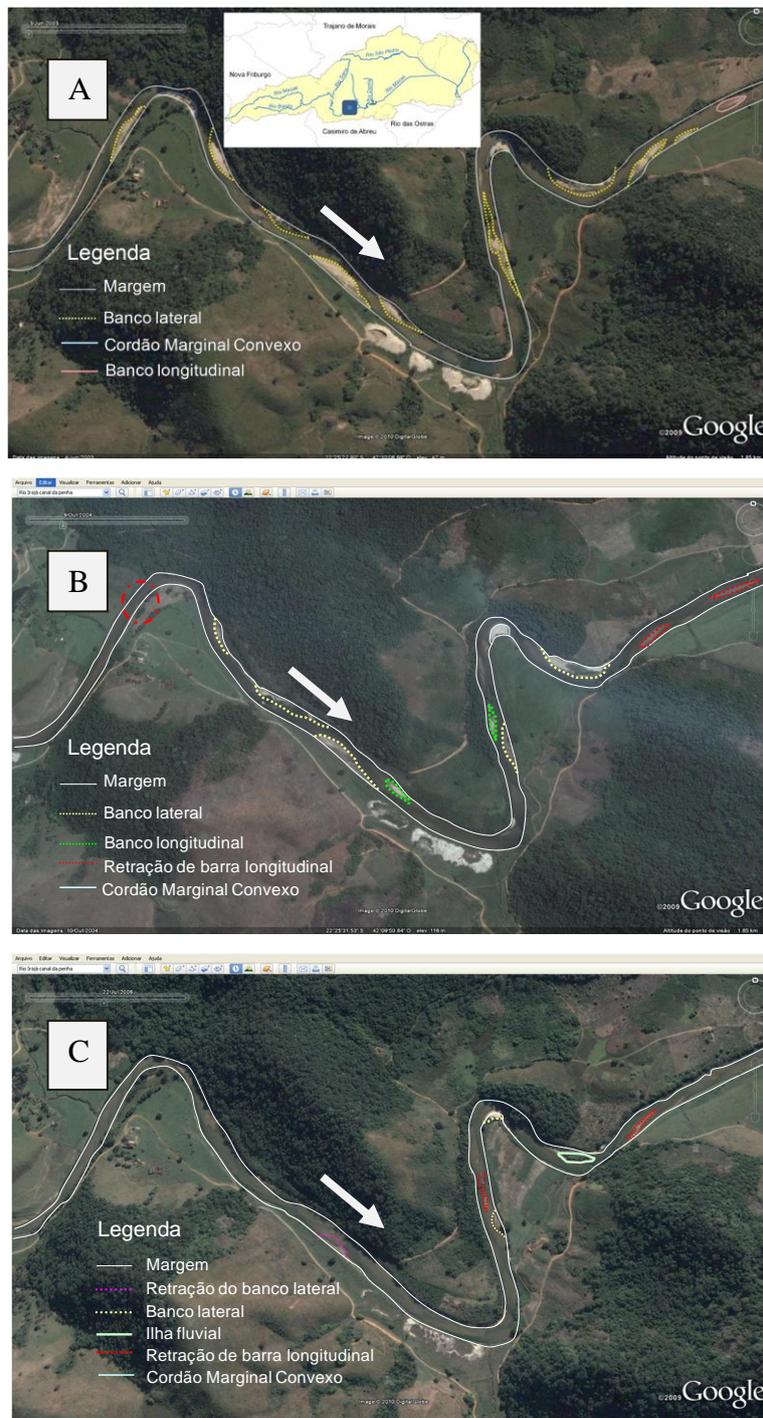


Figura 5-20: Dinâmica morfológica de barras centrais e barras laterais. A) 3/05/2003; B) 09/10/2004; C) 22/07/2006. Fonte: Google Earth™.

### **Cordões Marginais Convexos e Depósitos Laminares Arenosos**

São porções arenosas em forma de arco localizadas na margem convexa dos rios, geralmente sem presença de vegetação. Resultam da alteração lateral na forma do canal, com deposição na margem convexa e erosão na margem côncava. A carga de fundo (areia e cascalho) é movida por tração em direção à margem convexa por fluxo helicoidal (Figura 5-21).

Verificou-se ainda nesse trecho, a ocorrência de barras laminares arenosas, que correspondem às feições com sedimentos relativamente homogêneos submersos, que ocupam grande parte do leito do rio. São formados quando a capacidade do canal é excedida ou quando a competência diminui e ocorre acumulação dos sedimentos que não chegam a emergir. Geralmente, reflete a capacidade limite de transporte devido ao grande fornecimento de sedimentos para o canal, sendo frequentemente removidas durante o fluxo de cheias.

Essas feições são formadas em ambientes com vales aberto e substrato arenoso, que é o caso das planícies fluvio-lagunares desenvolvidas no baixo curso do rio. O canal ajusta-se lateralmente através da erosão das margens, permitindo a formação de meandros irregulares e curtos.

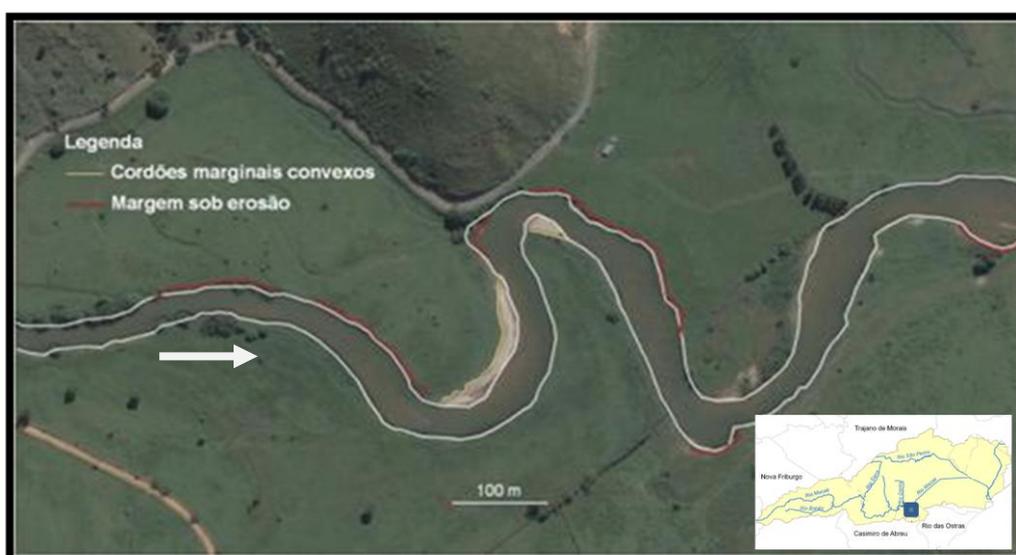


Figura 5-21: Processo erosivo nas margens côncavas e deposição nas margens convexas, com a formação de cordões marginais. Fonte: Google Earth™.

Como pode ser observado na Figura 5-22, os depósitos arenosos sofrem retração, expandem e migram para jusante, refletindo o caráter sazonal do regime hidrológico operado pelo rio Macaé. A figura permite avaliar, ainda, a dinâmica do rio em regime de energia baixa, moderada e elevada, referentes aos períodos de 14/08/2003, 31/03/2007 e 01/05/2007, respectivamente. Durante o período com maior energia, houve alargamento da calha fluvial decorrente da intensa erosão das margens, que ao longo de praticamente todo o baixo curso não possuem cobertura ciliar.

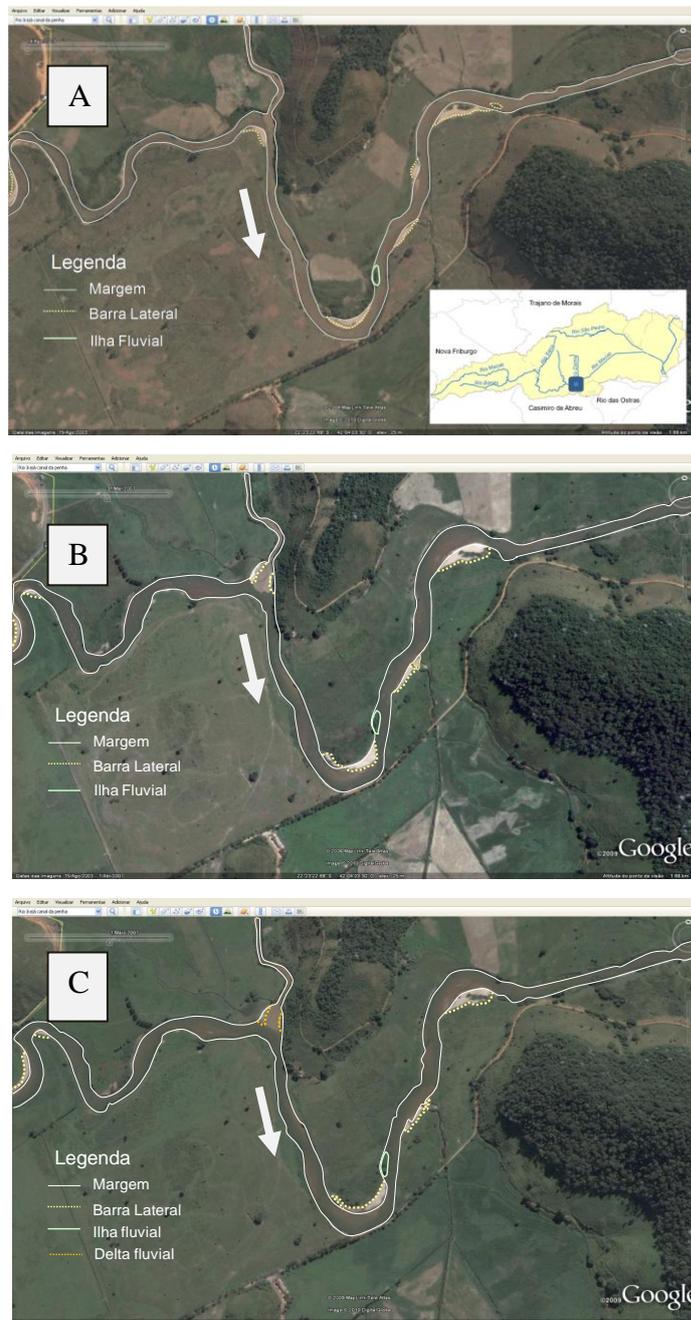


Figura 5-22: Dinâmica morfológica de feições deposicionais antes e após a confluência com o rio D'Antas. a) 14/08/2003; B) 31/03/2007; c) 01/05/2007. Fonte: Google Earth™.

A Figura 5-23, refere-se ao canal do rio São Pedro, próximo à retificação da sua calha. Nesse trecho verificou-se uma mudança pronunciada na calha do rio, resultante do processo de migração lateral entre Agosto de 2003 e Maio de 2007. Verifica-se o alargamento da calha, a remoção dos sedimentos depositados no leito do rio e formação de barras laterais. O caso do rio São Pedro merece análise mais conservadora, pois ocorre a derivação das águas do rio Macabú que aumenta significativamente a vazão e a capacidade erosiva do canal. Esta transposição pode estar diretamente relacionada ao grande aporte de sedimentos nesse trecho do rio São Pedro, bem como ao intenso processo erosivo das margens e ainda à formação de terraços fluviais que apesar de não serem datados, denotam um processo de entalhamento recente do canal no vale.

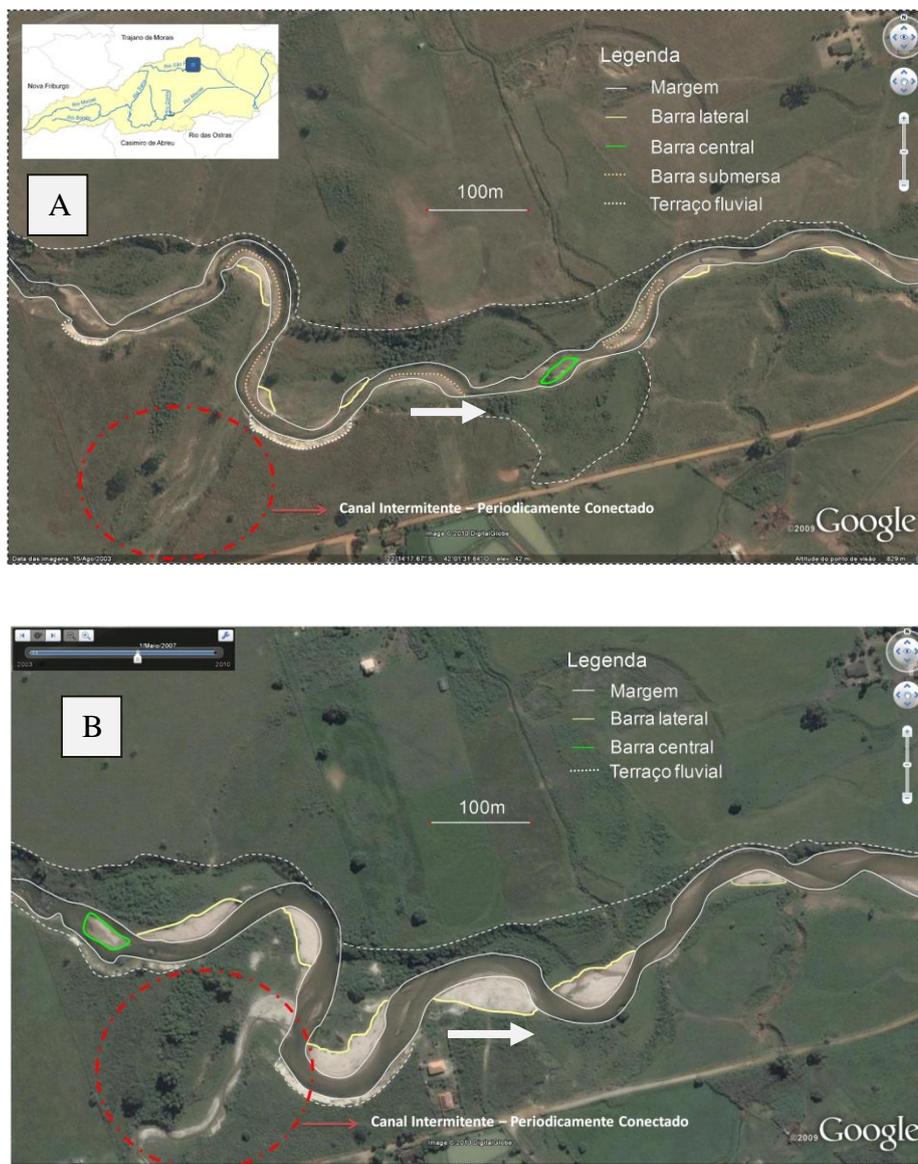


Figura 5-23: Ajuste lateral do rio São Pedro através da erosão e desbarrancamento das margens côncavas. A) 14/08/2003; B) 01/05/2007. Fonte: Google Earth™

## Retificação

No Brasil, os projetos de construção de redes de Macro drenagem, tiveram início na década de 1960, perdurando até meados de 1990. À época, o extinto DNOS (Departamento Nacional de Obras e Saneamento) realizou obras de retificação e alargamento da calha de rios com o objetivo de diminuir a área inundada durante as cheias, acabando com alagadiços e brejos que poderiam servir como vetores de transmissão da malária e febre amarela, promovendo assim, condições mais propícias à colonização e desenvolvimento da agropecuária nessas áreas.

As obras de retificação transformaram completamente o traçado natural do rio Macaé e, subsequentemente, as feições fluviais que outrora ocorriam, restando nos canais retilíneos pouquíssimos obstáculos ao fluxo d'água. A homogeneidade da calha em grande parte desse trecho não permitem a ocorrência de feições deposicionais, como pode ser visualizado na Figura 5-24.



Figura 5-24: Trecho retificado do canal do rio Macaé. Fonte: Relatório Técnico EMUHSA 2007

Através da forma em planta do canal e da análise das seções transversais (Item 5.2.2), foi possível diferenciar dois tipos de comportamento do setor retificado antes e após a confluência com o rio São Pedro. No primeiro segmento da retificação, o fluxo é caracterizado por uma sinuosidade do talvegue percebida através da formação de barras laterais submersas. As margens desprovidas de mata ciliar também apresentaram

processos erosivos durante regimes de alta energia, como pode ser visto na Figura 5-25. No entanto, esse segmento apresenta um padrão de baixa energia, quando comparada ao segundo segmento.

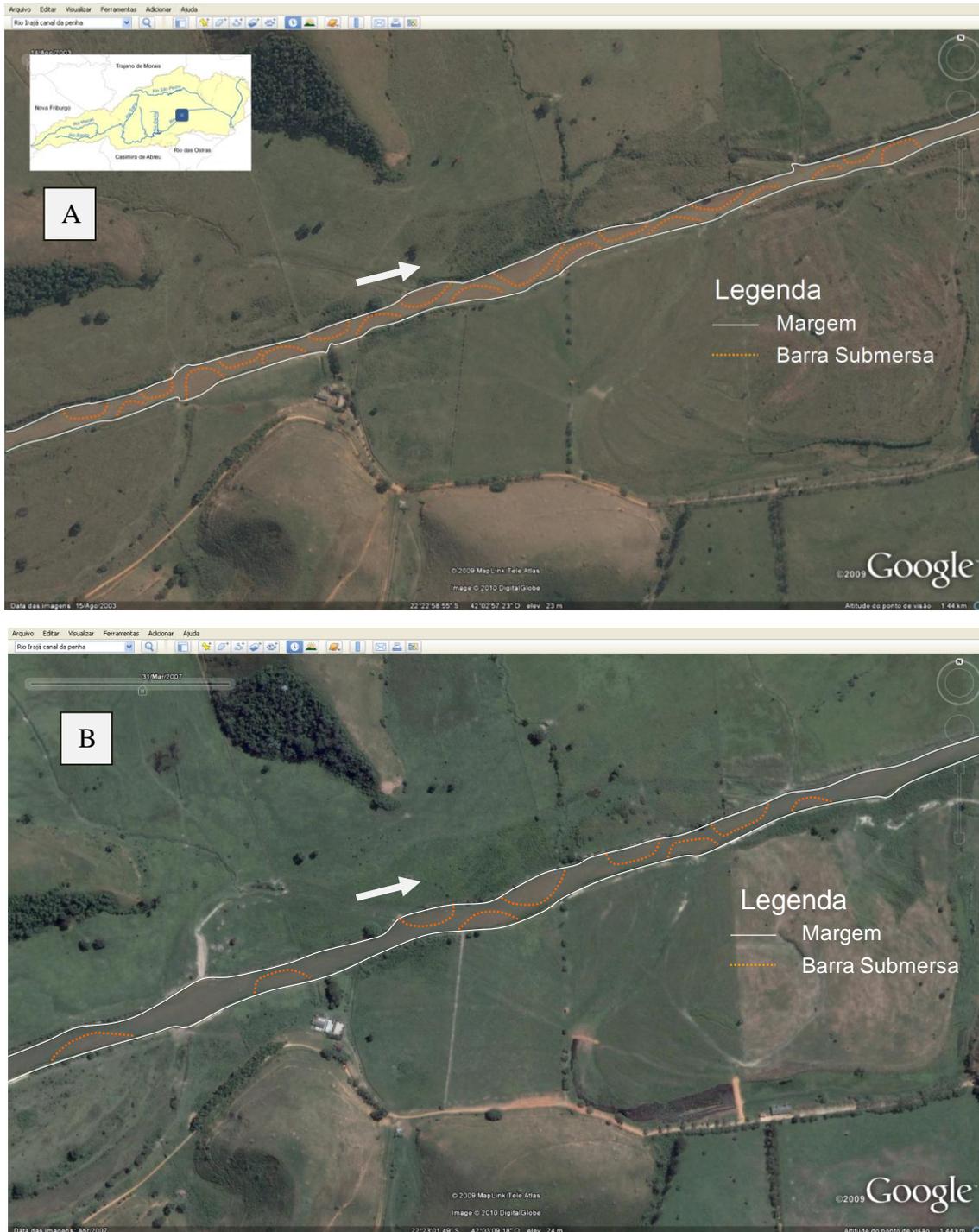


Figura 5-25: Barras submersas no trecho retificado do rio Macaé. A) 14/08/2003; B) 03/03/2007. Fonte: Google Earth™.

Após a confluência com o rio São Pedro, o canal retificado aumenta de largura e de capacidade de transporte, que associada aos sedimentos grosseiros que compõem o leito propiciam um processo erosivo das margens de maneira mais intensa. A capacidade de transporte do rio Macaé nesse trecho é evidenciado pela Figura 5-26, onde é possível verificar a remoção de três barras centrais que haviam sido fixadas por vegetação em 10/04/2003. Em março de 2007, nota-se algumas feições remanescentes desse trabalho fluvial.

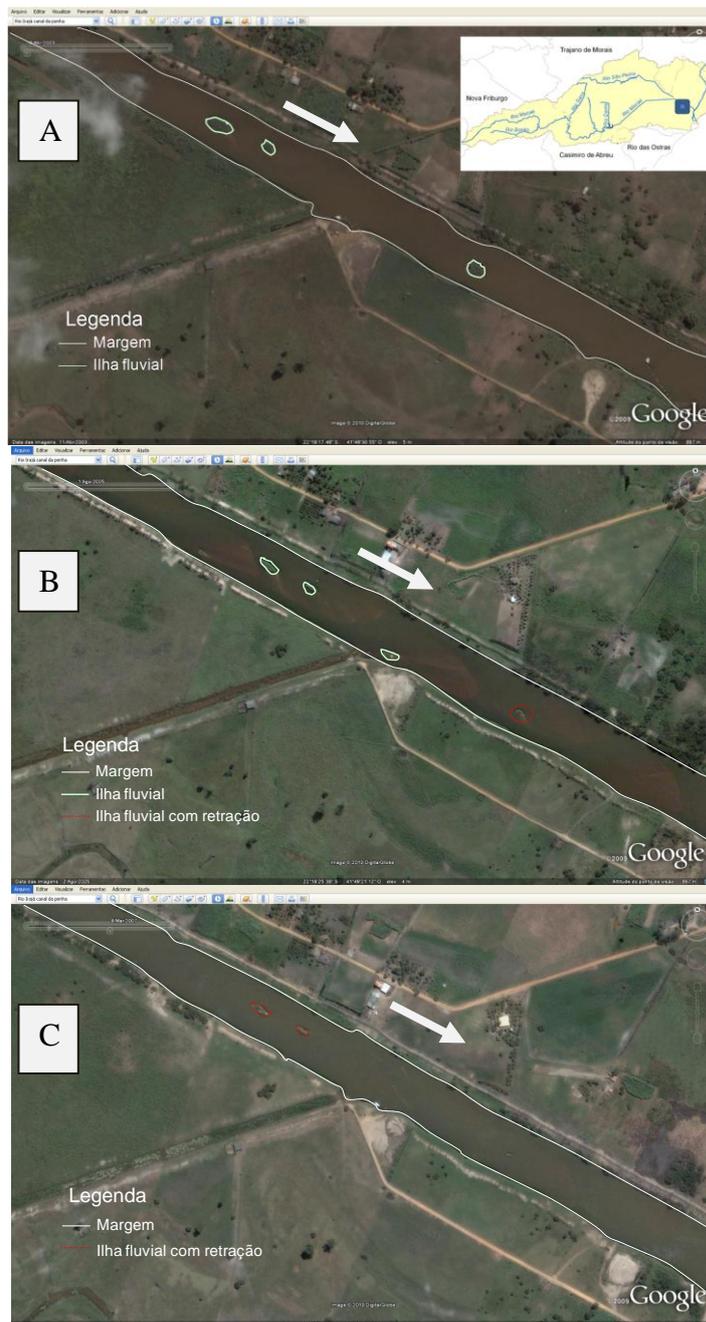


Figura 5-26: Retração de ilha fluvial no trecho retificado do rio Macaé. A) 10/04/2003; b) 01/08/2005; C) 08/03/2007. Fonte: Google Earth™.

## 5.2.2 Monitoramento das Seções Transversais

a) Velocidade e vazão.

A vazão do canal corresponde ao aspecto mais instável em um sistema fluvial. A flutuação das vazões em relação a sua frequência magnitude influencia diretamente no ajuste do canal e nas feições geomorfológicas que se desenvolvem e se estabelecem ao longo de seu leito e planície (Brierley & Fryirs 2005, Summerfield, 1991, Cunha1995).

A fim de apoiar a interpretação das formas mapeadas no item anterior e a dinâmica percebida no leito do canal através das seções transversais, foram utilizados os pluviogramas dos anos de 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 e 2009. Os totais climáticos de cada mês foram avaliados, sendo ressaltados os meses onde houve correlação entre chuvas intensas e transformações na calha do rio.

A Tabela 5-2, apresenta os valores de vazão medidos para cada estação em 5 períodos diferentes. De forma geral, observou-se uma grande discrepância entre os volumes apresentados nos meses secos em relação aos meses chuvosos. No mês de outubro de 2007, estação seca, apresentou vazão reduzida em todos os pontos de monitoramento, decorrente de uma longa estiagem ocorrida naquele ano, como se pode ver na Figura 5-27.

Tabela 5-2: Vazão calculada nas estações de monitoramento por meio de flutuadores (m<sup>3</sup>/s)

Seção / mês	Outubro / 2007	Março / 2008	Julho / 2008	Outubro / 2008	Março / 2009
1	Sem medição	Sem medição	Sem medição	Sem medição	Sem medição
4	Sem medição	Sem medição	Sem medição	Sem medição	Sem medição
5	3,97	49	19,67	37,4	19,39
6	13,09		9,28	13,64	24,59
7	7,81		48,28	20,55	52,8
8	12,11	59,4	22,5	6,77	62,4
2	11,86	57	28,1	33,5	39,63
3	19,56	121,48	36,7	39,7	70,75

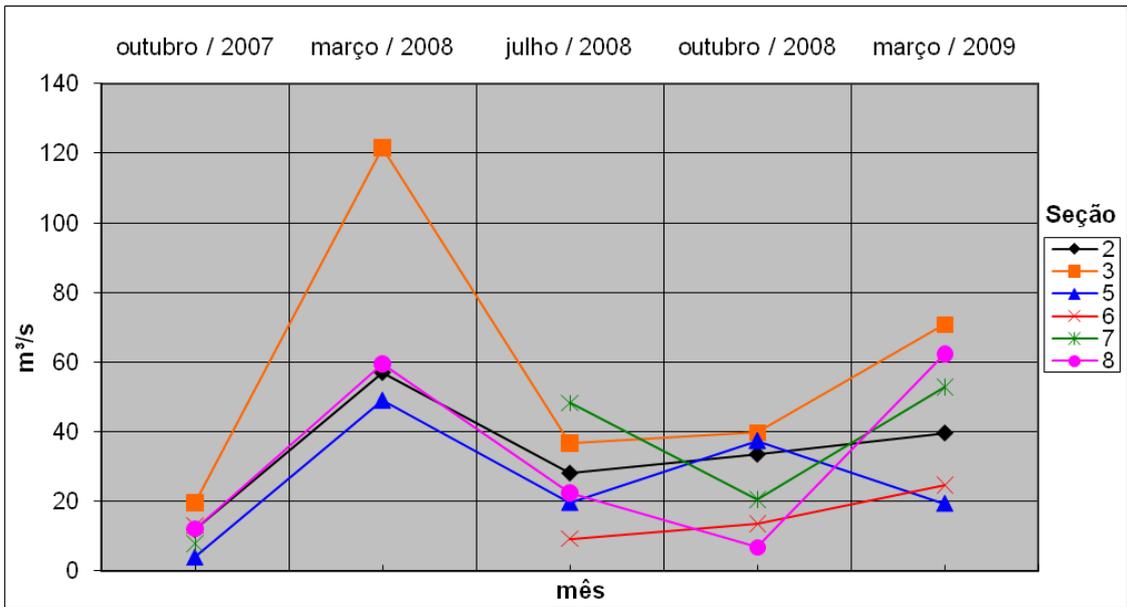


Figura 5-27: Variação da vazão do rio Macaé nas estações de monitoramento.

O conjunto de dados mostra que a vazão do rio Macaé comporta-se dentro do padrão esperado, dado o regime climático que a bacia se insere, apresentando maiores vazões no verão e menores no inverno, com alguns eventos extremos nos dois primeiros meses de monitoramento.

Apesar de não se ter registro da recorrência de grandes cheias durante o período estudado, verifica-se que os eventos de grande magnitude são extremamente importantes na dinâmica da bacia, apresentando diferentes implicações no ajuste da morfologia dos diferentes tipos de canais (Figura 5-28). À medida que for ampliada a série temporal desse monitoramento, será possível avaliar padrões nesses eventos, comparando-os às mudanças subsequentes na geometria dos canais.

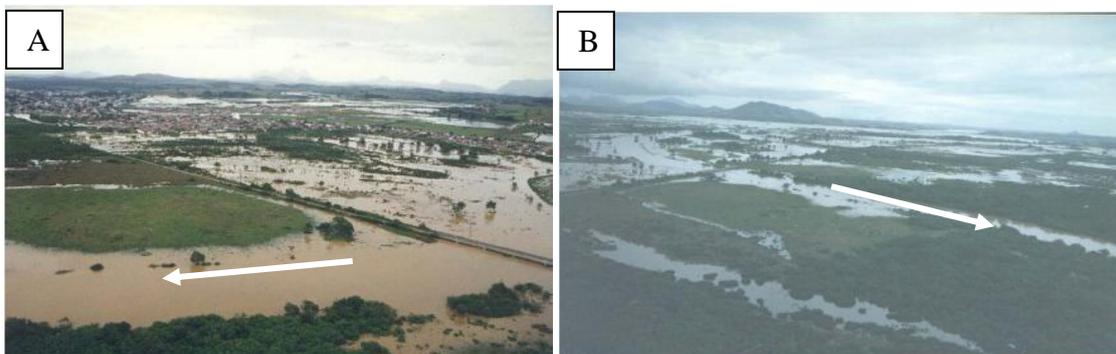


Figura 5-28: Cheia do rio Macaé em 1998. (A) rio Macaé na travessia da ponte ferroviária. (B) Vista para montante. Travessia da linha Férrea ao centro. Fonte: FGV 2004

#### b) Perfil Transversal e Sedimentos de Fundo

Os processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos no leito fluvial alternam-se no decorrer do tempo e espacialmente, sendo condicionados pela distribuição da velocidade e da turbulência do fluxo dentro do canal. São processos dependentes entre si e resultam não apenas das mudanças no fluxo, como, também da carga existente (Brierley & Fryirs, 2005; Leopold *et al*, 1964; Sumerfield 1991; Shcumm *et al*. 1984).

Em função do regime de chuvas na bacia (item 5-1-5), o rio Macaé apresentou, na maioria das estações monitoradas, grandes variações na altura da lâmina d'água, o que em diversos pontos culminou em ajustes do canal. Tais alterações se deram de maneira diferenciada em cada seção, indicando as tendências de comportamento para cada setor do rio Macaé.

Para facilitar a visualização das informações nos gráficos, os perfis transversais foram organizados da seguinte forma: O período seco (outubro) foi representado em tons de marrom, na qual os monitoramentos mais antigos correspondem às colorações mais escuras. O período chuvoso foi representado pela coloração azul, onde os meses mais antigos estão representados pelas colorações mais escuras. A lâmina d'água está representada pela linha pontilhada na mesma cor do período correspondente do monitoramento.

#### ***O rio Macaé após confluência com rio Bonito (seção de monitoramento 4).***

O rio Bonito nasce e desenvolve-se em condições bastante semelhantes às do rio Macaé, confluindo à sua margem esquerda, com acréscimo significativo de volume d'água. A confluência dos rios forma uma zona de amortecimento do fluxo, ocasionada por uma grande depressão. As condições de balneabilidade tornaram o local atrativo para turistas, sendo conhecido como “encontro dos rios”. Neste segmento, o rio Macaé encontra-se em vale confinado, e atravessa ambientes de escarpas serranas, ocorrendo sequências de soleiras prolongadas (*riffle*) e umbrais (*pool*). A seção 4 foi instalada em uma zona de alta energia, aproximadamente 500m à jusante do encontro dos rios, que devido à forte correnteza que se estabelece durante os meses chuvosos, só foi possível

realizar o monitoramento quando as águas estavam suficientemente baixas para permitir a sustentação do operador de campo. No mês de Julho de 2008, houve um aumento na lâmina d'água em 30 cm em relação a Outubro de 2007, que praticamente inviabilizou a coleta de dados. Isso se dá em função do confinamento e da elevada declividade do perfil longitudinal, que potencializam a descarga do rio e sua capacidade de transporte mesmo a coluna d'água elevando-se poucos centímetros.

O leito do canal praticamente não sofreu alterações, devido à sua composição rochosa, considerando-se ainda, que as diferenças no fundo deveram-se principalmente à presença de seixos e blocos arredondados (Figura 5-29). A elevada irregularidade e rugosidade do leito condiciona o fluxo de caráter turbulento, ocorrendo retenção mínima de sedimentos (Figura 5-30). Em função dessas características destaca-se que alguns trechos do rio Macaé são aproveitados para a prática do rafting, durante as cheias.

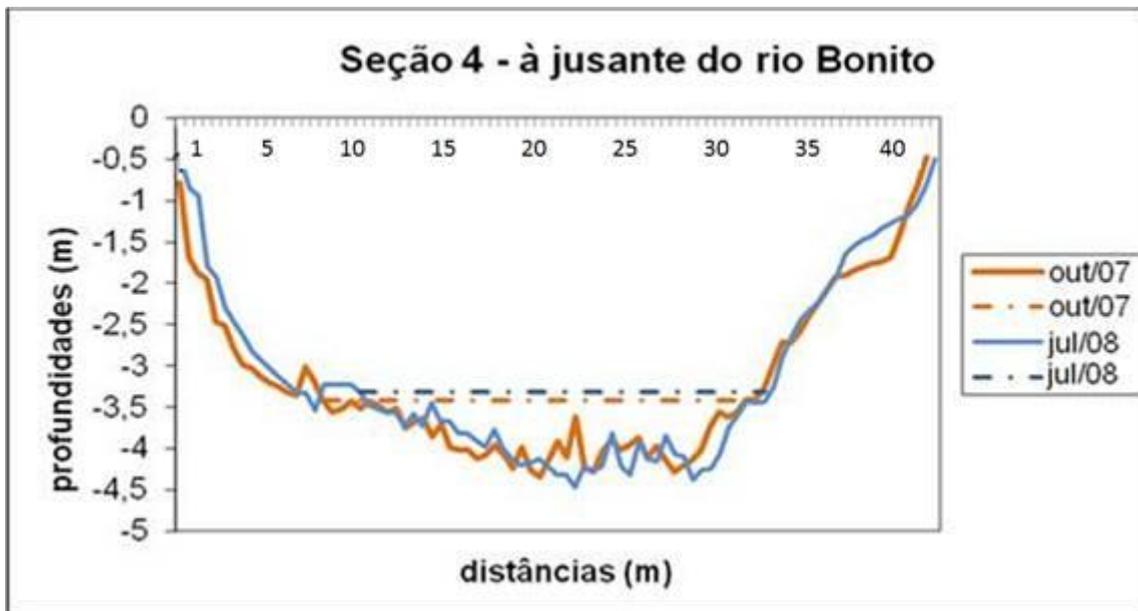


Figura 5-29: Seção transversal 4 (outubro de 2007 e Julho de 2008)



Figura 5-30: Foto da área da seção 4 (Fonte: Acervo Lagesolos)

### ***A confluência com o rio Sana (estações de monitoramento 5 e 6)***

As estações 5 e 6 foram posicionadas à montante e à jusante do rio Sana, respectivamente, à fim de comparar dois comportamentos distintos, que, no entanto, distam aproximadamente 300m. O rio Sana, afluente pela margem esquerda do rio Macaé, recebe tributários situados em escarpas extremamente íngremes, com grande densidade de canais erosivos de primeira ordem. Somando-se a isto, a região possui suscetibilidade à erosão extremamente alta (indicado pela coloração roxa na Figura 5-11), que caracteriza a região com elevado potencial de produção e aporte de sedimentos ao rio Macaé. Não obstante a essas observações, o trecho que se segue após a confluência é marcado pela presença de ilhas de grande porte.

A seção 5 foi instalada em um local de amortecimento do fluxo causado pelo aprofundamento longitudinal do leito do canal. Interessante observar que a depressão do leito (conhecida localmente como poço), fez com que a variação do nível d'água, nesse ponto fosse sutil em decorrência da zona de remanso formada (Figura 5-33). Essas áreas de fluxo tranquilo em ambientes tipicamente de alta energia pode acumular sedimentos finos, que decantam durante estágios de baixa energia, mas que são imediatamente removidos durante as cheias (Brierley & Fryirs 2005).

No perfil transversal (Figura 5-31), verifica-se que existe um processo natural de sucessivas remoções e deposições, com tendência de aprofundamento do talvegue do rio. A composição da margem é predominantemente de areia muito grossa, ocorrendo,

no entanto, pequeno percentual de silte/argila em função do relaxamento do fluxo (Figura 5-32).

Ressalta-se que entre o mês de Outubro de 2007 e Março de 2008, houve um intenso processo erosivo na margem direita, podendo ser verificado um alargamento de quase 5m de distância.

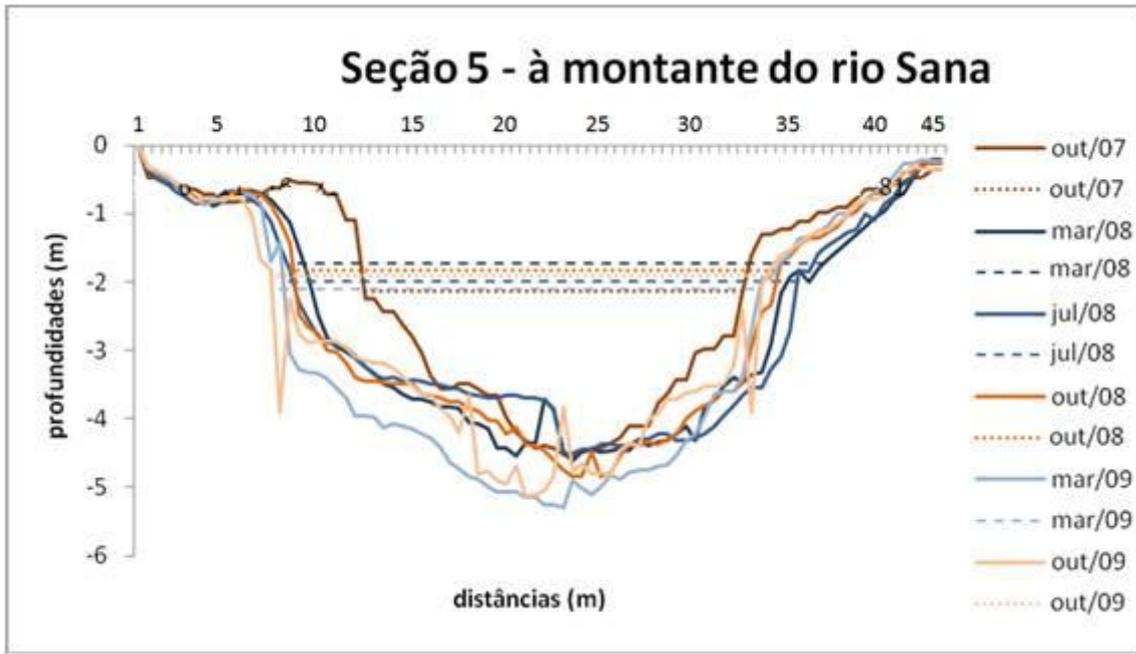


Figura 5-31: Seção transversal 5 (out/07, mar/08, jul/08, out/08, mar/09, out/09).

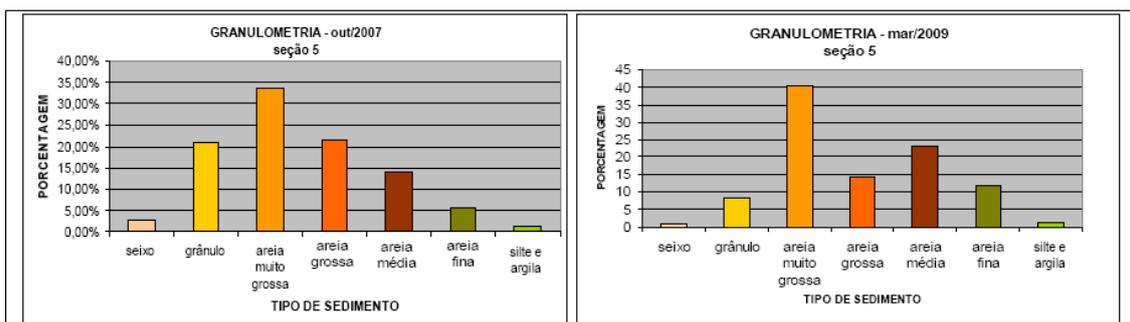


Figura 5-32: Composição granulométrica da Seção 5

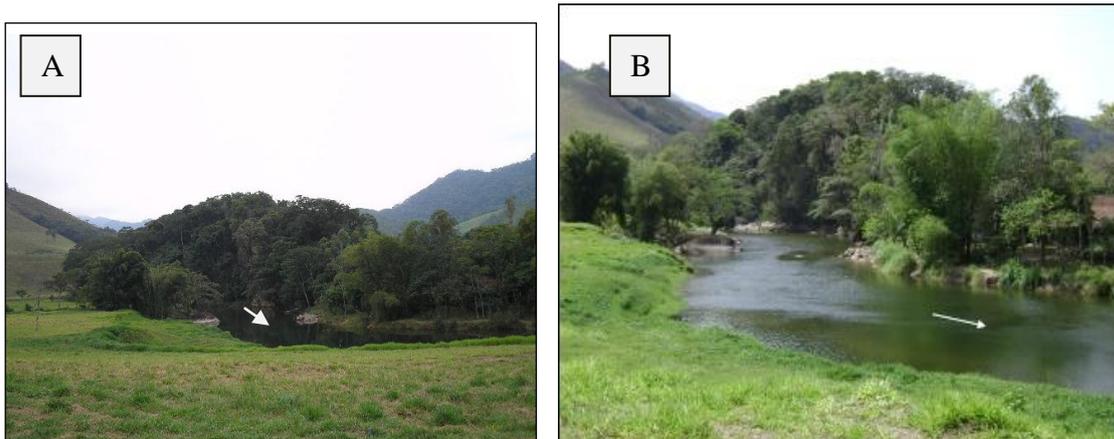


Figura 5-33: Foto da área da seção 5. (A) Outubro de 2007 (B) Março de 2009

(Fonte: Acervo Lagesolos)

A seção 6 está localizada à jusante do rio Sana, em região caracterizada pelo estabelecimento de ilhas fluviais. Essas unidades geomorfológicas são compostas por blocos, seixos e uma grande variedade granulométrica, como indicam os gráficos da Figura 5-35. Essas áreas costumam ser ativas durante as cheias, permitindo retrabalhar inclusive os sedimentos fixados às margens das ilhas (Figura 5-36). Observa-se na, que o fundo migra verticalmente apresentando um processo hidrológico ritmado de acumulação e remoção, durante o período de monitoramento (Figura 5-34 ).

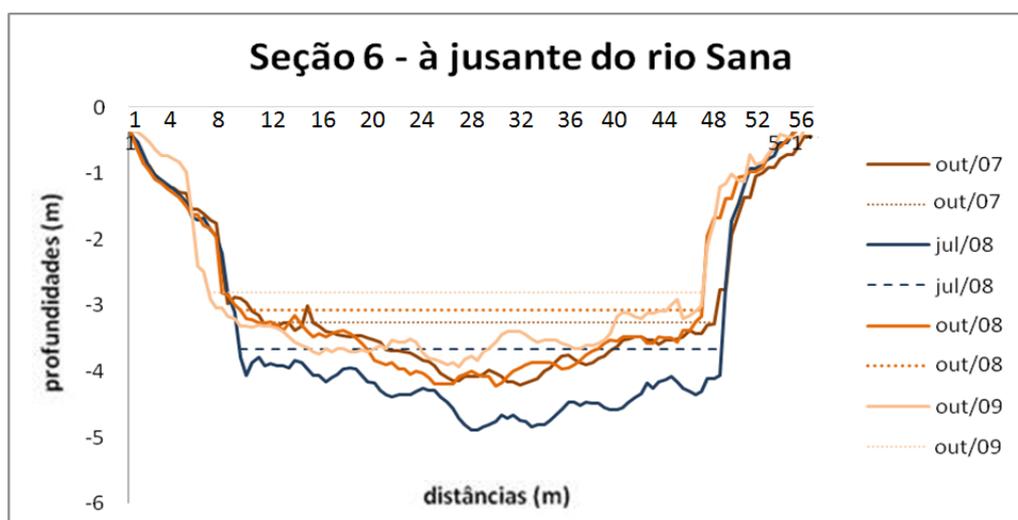


Figura 5-34: Seção transversal 6 (out/07, jul/08, out/08, out/09)

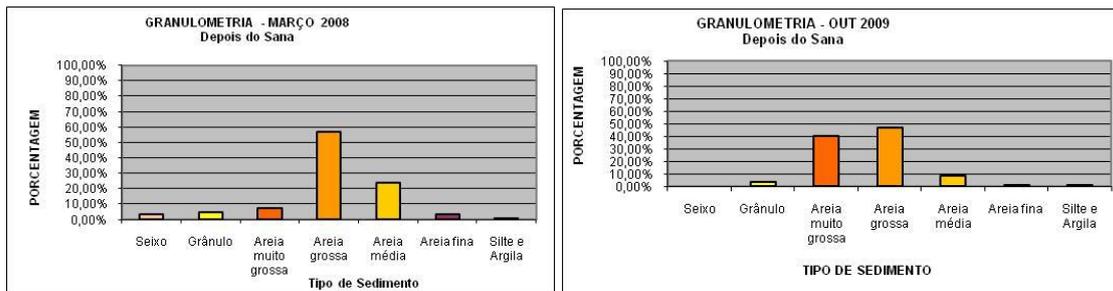


Figura 5-35: Composição granulométrica da seção 6

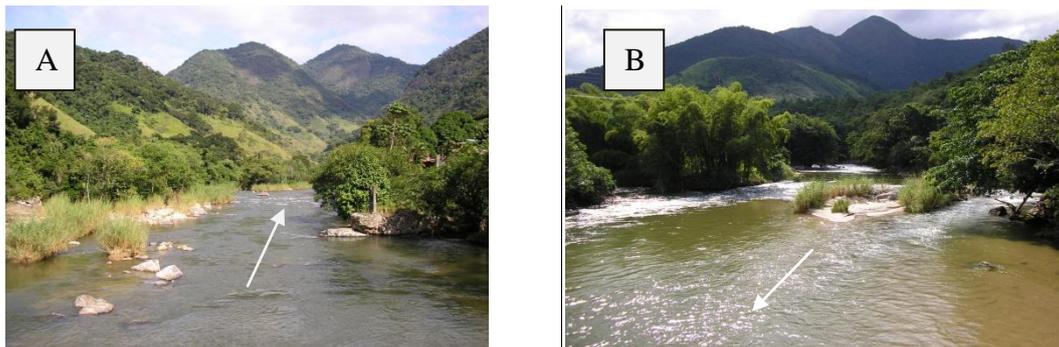


Figura 5-36: Foto da área da seção 6 (A) Vista da ponte no Portal do Sana para jusante (B) Vista da ponte no Portal do Sana para montante. (Fonte: Acervo Lagesolos)

### ***A confluência com o rio D'Antas (estações de monitoramento 7 e 8)***

O rio D'Antas é um afluente pela margem esquerda do rio Macaé, cuja desembocadura encontra-se no trecho de baixo curso. Neste segmento, o rio desenvolve-se em ampla planície fluvial, possibilitando a sua migração lateral. As estações, localizadas próximas às curvaturas de meandros, permitiram avaliar ao longo do período do monitoramento uma variabilidade relativamente baixa na migração vertical do rio, ao passo que lateralmente o rio apresentou mudanças significativas. Em ambas as estações, a expansão do canal ocorre de forma acelerada, podendo este processo estar sendo potencializado pela ausência de cobertura ciliar.

No caso analisado, o leito arenoso permite que o fluxo ataque as bases da margem côncava do rio, que colapsam como pode ser observado na Figura 5-39. Esse processo acarreta no aporte de sedimentos para o rio e na migração do mesmo a partir da mudança na sua forma (Figura 5-37). Neste ponto ocorre ainda uma grande variação da vazão do rio, sendo que o maior pico registrado se deu no mês de Março de 2009. Neste período a coluna d'água apresentou quase 3m de profundidade, com aprofundamento do talvegue na região central do canal. Esse evento pode explicar o processo o recuo da margem percebido no monitoramento seguinte de Outubro de 2009.

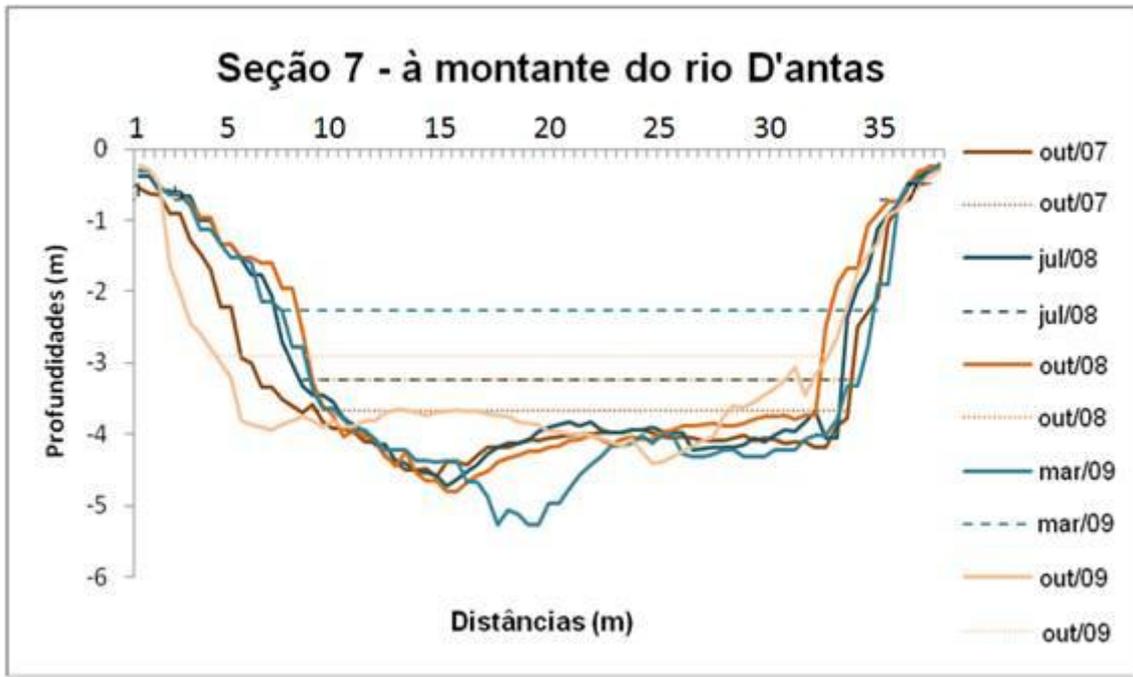


Figura 5-37: Seção transversal 7 (out/07, jul/08, out/08, mar/09, out/09)

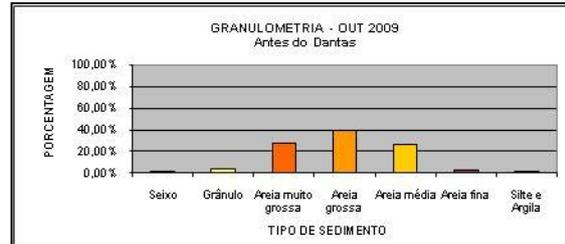
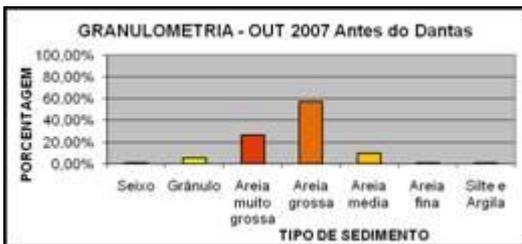


Figura 5-38: Composição granulométrica da seção 7.



Figura 5-39: Foto seção 8 (Fonte: Acervo Lagesolos).

A seção 8, localizada a alguns metros a montante do último meandro do rio Macaé antes da retificação, apresentou um processo de formação de um talvegue na margem esquerda, que culmina num gradativo processo de erosão desta margem e aprofundamento do talvegue. Essa dinâmica mostra uma tendência de fluxo periódico de sedimentos, condicionados pelo regime hidráulico, que no verão proporciona um comportamento erosivo e no inverno uma tendência maior à deposição (Figura 5-40).

Apesar desta ser uma tendência natural deste tipo de canal, a velocidade com que o alargamento e a migração do canal tem operado, pode ser um indicador de ajustes do canal frente à perda da mata ciliar.

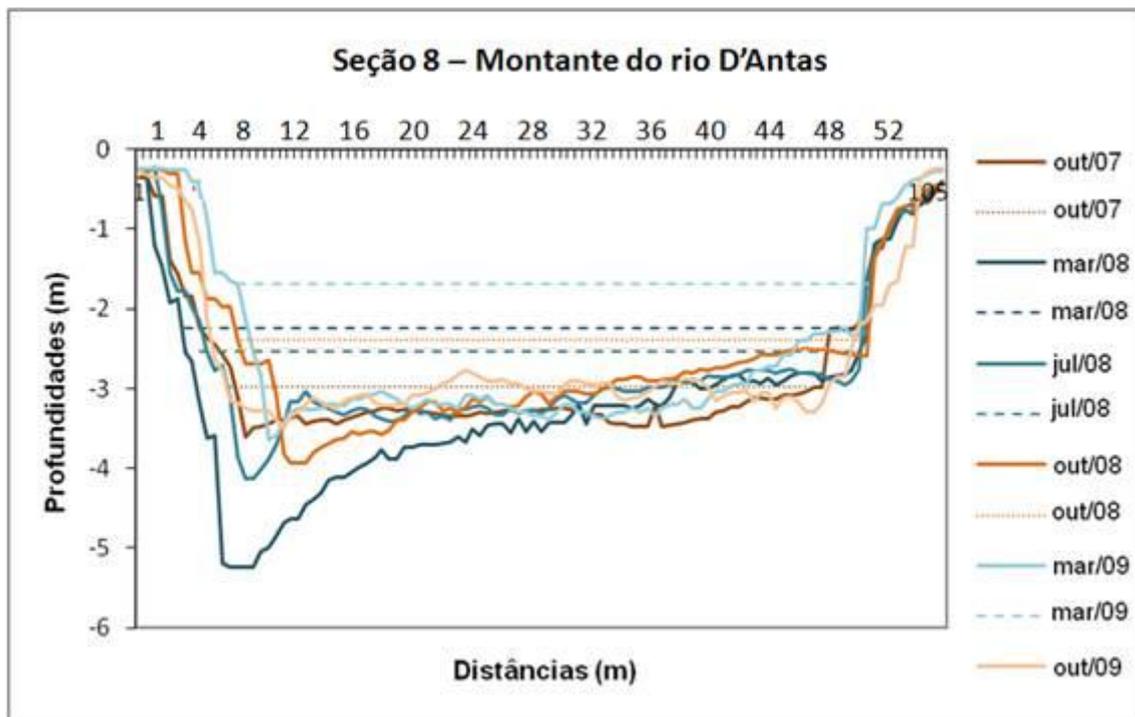


Figura 5-40: Seção transversal 8 (out/07, mar/08, jul/08, out/08, mar/09, out/09)

### ***A confluência com o rio São Pedro (estações de monitoramento 3)***

Neste trecho o rio Macaé sofreu modificações em seu percurso e na geometria de seu canal através de obras de retificação, realizadas pelo extinto DNOS (Departamento Nacional de Obras e Saneamento). Com o objetivo de acelerar o escoamento das águas em eventos de cheias e diminuir áreas alagadas, essa intervenção realizou o encurtamento do comprimento do canal, aumentou o gradiente de declividade do perfil longitudinal, e removeu todas as feições geomorfológicas do rio, para que estas não causassem obstáculos ao escoamento das águas (Figura 5-43). Estes procedimentos desencadearam uma série de reajustes na dinâmica de deposição e erosão.

À partir da Figura 5-41, verifica-se uma grande variação no nível d'água, tendo sido observado uma profundidade mínima de 0,5m no mês de Outubro de 2007, enquanto em Março de 2008, o canal não somente apresentou um rebaixamento de seu fundo em 1,5m, como a coluna d'água apresentou aproximadamente 2m de profundidade. Segundo Brookes (1987), os canais retificados costumam apresentar grandes amplitudes entre a vazão máxima e mínima, em função da velocidade do escoamento, sendo intensificados, também, os processos de erosão e sedimentação. Ressalta-se que as margens não apresentaram tanta erosão quanto nos trechos

meândricos, no entanto, a migração vertical do canal foi bastante pronunciada, observando-se a predominância de areia grossa e muito grossa. Apesar de estar inserida em uma região com dinâmica de transferência e deposição de sedimentos finos, em função das obras de retificação, o canal apresenta capacidade de remoção de sedimentos grosseiros em função da largura e profundidade do seu leito (Figura 5-42).



Figura 5-41: Seção transversal 3 (out/07, mar/08, jul/08, out/08, mar/09, out/09)

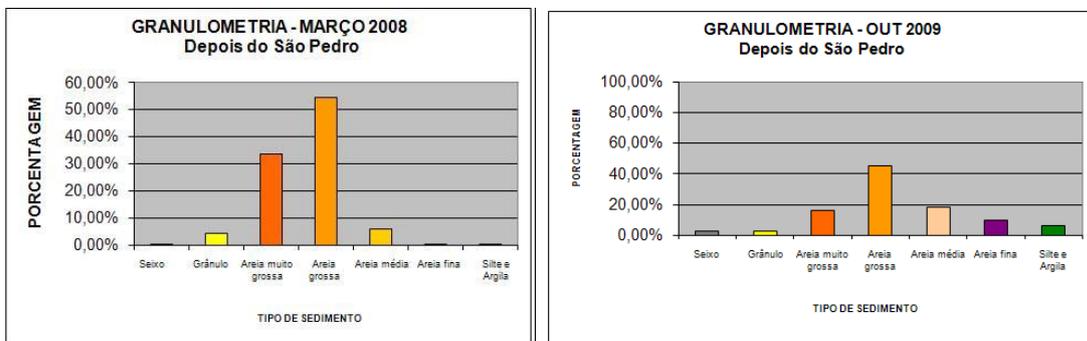


Figura 5-42: Composição granulométrica da seção



Figura 5-43: Foto da área da seção 3 (Fonte: Acervo Lagesolos).

### 5.3 Mapeamento de Tipologias de Canais Fluviais Através da Metodologia River Styles®

Tendo-se como princípio que os rios não são estáticos, a avaliação temporal permitiu identificar o comportamento do rio tanto em período seco, como durante as cheias. A partir dessa abordagem foi possível identificar a dinâmica com que cada rio está operando, embasando avaliações sobre tendências futuras de ajustes e transformações.

O Sistema de classificação teve como base de avaliação, os parâmetros levantados nos itens 5.1 e 5.2, sendo reunidos e organizados através do arcabouço metodológico dos Estilos Fluviais, gerando assim, um sistema de classificação para o canal do rio Macaé, cujas nomenclaturas derivam da distinção do caráter (forma, sinuosidade, feições) e comportamento (energia, processos de deposição ou transporte) observados ao longo de todo o seu curso. Foram individualizados, portanto, 8 estilos fluviais, sendo representados espacialmente através da Figura 5-53 e 5-54, e sumarizados na Figura 5-55.

A diferenciação entre os tipos de sinuosidade foi realizado com base na classificação de Kellerhals *et al.*, (1976) (Figura 5-44)

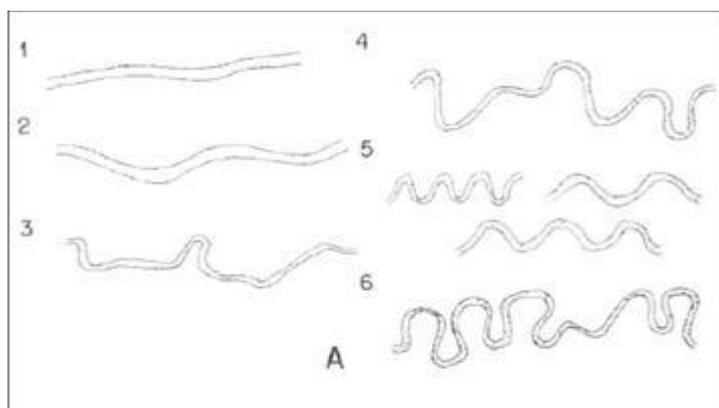


Figura 5-44: Classificação de canais segundo Kellerhals, Church e Bray, 1976. (1) reto; (2) sinuoso; (3) irregular; (4) meandros irregulares; (5) meandros regulares; (6) meandros tortuosos.

A energia do rio, como um importante elemento para definir o comportamento, principalmente em canais confinados, foi realizada a partir das interpretações das feições e das transformações observadas nos canais. Para diferenciar qualitativamente

alta e baixa energia, utilizou-se o esquema de classificação de Schum (1981) (Figura 5-45).

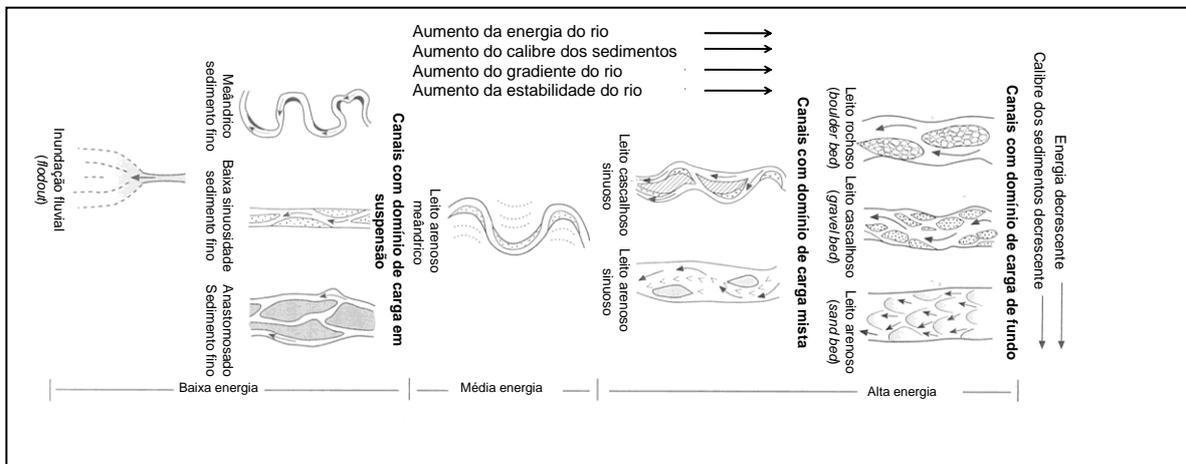


Figura 5-45: Classificação de canal com base no seu padrão e carga de sedimento. Representação deformada esquemática da relação entre os tipos de canal em termos de carga em suspensão e de sustentabilidade. Atentar para a relação entre tipo de carga a energia do canal. Fonte: Adaptado de Schumm, (1981).

Em geral, grande parte da bacia apresenta domínios de relevos escarpados onde ocorrem quatro diferentes estilos fluviais: *confinado média energia* (Figura 5-52); *confinado alta energia* (Figura 5-51); *forte erosivo* (Figura 5-50); e *meandros sob controle estrutural* (Figura 5-49). Nessa região, o perfil longitudinal apresenta sequências distintas de desníveis, que associados ao grau de confinamento do vale formam as subdivisões de diferentes segmentos de estilos fluviais nessa região.

Após sair do ambiente de escarpas, o rio Macaé inicia o seu trabalho de dissipação de energia em decorrência da diminuição da declividade e do confinamento do vale. Nesse ponto, o rio Macaé desenvolve o estilo *meandros irregulares com carga arenosa elevada* (Figura 5-48), em função da grande quantidade de sedimento oriunda das escarpas. Nesse ponto, inicia-se uma nova fase de transferência dos sedimentos de forma mais lenta para jusante. A produção de sedimentos nesse setor é baixa, restringindo-se à erosão das margens e algumas colinas isoladas que encontram-se conectadas ao rio.

Com o contínuo processo de alargamento da planície, o rio Macaé passa a ajustar-se lateralmente, formando o estilo *meandros tortuosos com carga arenosa moderada* (Figura 5-47), uma vez que o aporte de sedimentos começa a se distribuir ao

longo do canal em forma de barras laterais, apresentando ainda predominância do processo de transferência de sedimentos em detrimento da deposição.

Logo após a confluência com o rio D'Antas, o Macaé sofreu obras de retificação que induziram artificialmente o aumento da sua velocidade e capacidade erosiva, intensificada após o encontro com o rio São Pedro. Nesse trecho, verifica-se um aumento da discrepância entre a vazão máxima e mínima em decorrência da velocidade do escoamento tendo sido classificado o estilo *canal retificado* (Figura 5-46).

A seguir são sumarizados os principais atributos de cada estilo fluvial:

- **Canal Retificado**

*Característica do vale* – Não confinado

*Forma em planta* – Canal retilíneo com presença de erosão nas margens acelerada em função da ausência de cobertura ciliar.

*Unidades geomorfológicas*- Em função da homogeneidade da calha, o rio não apresenta feições geomorfológicas.

*Comportamento do rio* – Grande variação de vazão em função da velocidade do fluxo. Durante períodos secos, o canal apresenta vazões baixíssimas, de modo que barras centrais ocasionalmente emergem. Durante períodos chuvosos essas barras são cobertas e erodidas pela energia do fluxo, que é substancialmente elevada.



Figura 5-46: Canal retificado (A). Variação do nível d'água entre outubro de 2007 (B) e março de 2008 (C) – Fonte: Acervo Lagesolos

- **Meandros irregulares com carga arenosa moderada**

*Característica do vale* – Não confinado

*Forma em planta* – Canal com sinuosidade elevada apresentando padrão meandrítico irregular. Margens ativas, evidenciando processos de erosão nas margens côncavas, intensificada pela ausência de cobertura ciliar. Processo de deposição nas margens convexas.

*Unidades geomorfológicas* – Ocorrência de cordões marginais convexas e depósito laminar arenoso.

*Comportamento do rio* – depósitos arenosos sofrem retração e acreção tanto lateral como vertical em função do caráter sazonal do regime hidrológico operado pelo rio Macaé. A baixa declividade no perfil longitudinal faz com que a predominância de processos de transferência ou deposição se intercale de acordo com a vazão.



Figura 5-47: Erosão na margem côncava do rio Macaé

- **Meandros tortuosos com carga arenosa elevada**

*Característica do vale* – Não confinado

*Forma em planta* – Canal com sinuosidade elevada apresentando padrão meândrico tortuoso. Trechos retilíneos alternados com curvas acentuadas. Grande aporte sedimentar no canal, que apresenta talvegue sinuoso.

*Unidades geomorfológicas* – Ocorrência de cordões marginais convexos, depósito laminar arenoso, barras centrais e, barras laterais

*Comportamento do rio* – localizado na base da escarpa, onde o rio Macaé entra no domínio das planícies fluvio-lagunares, o rio sofre diminuição do seu gradiente, que associado ao alargamento do vale dissipa a energia, formando meandros. Em função do grande aporte sedimentar, e do padrão de sinuosidade do canal, os sedimentos acumulam-se nos períodos secos, sendo retrabalhados nos períodos de cheia.

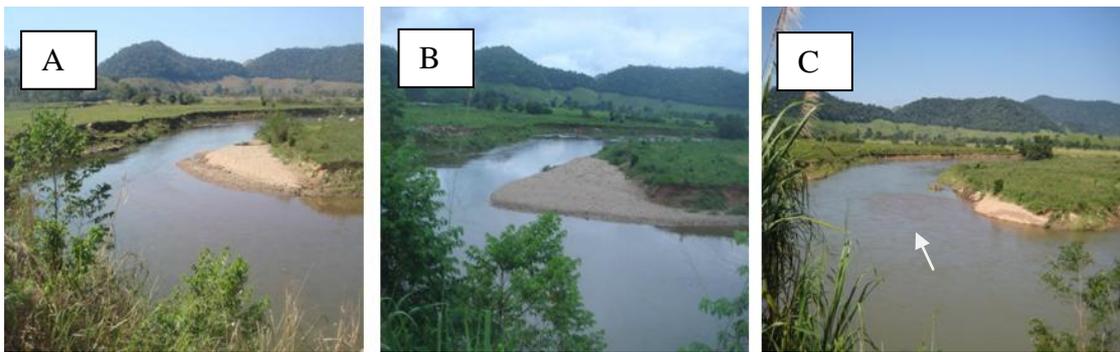


Figura 5-48: Dinâmica de barra arenosa no rio Macaé nos anos de (A) Agosto de 2000, (B) Dezembro de 2007 e (C) Abril de 2008 (Fonte: Acervo Lagesolos).

- **Meandros sob controle estrutural**

*Característica do vale* – Semi-confinado

*Forma em planta* – Vale encaixado, tortuoso, com ocorrência de planícies em forma de alvéolos.

*Unidades geomorfológicas* – Ocorrência de ilhas, barras transversas e sequência de soleiras e umbrais.

*Comportamento do rio* – Ocorrem em ambientes parcialmente confinados, com elevada sinuosidade em função da forma e orientação do vale. As curvaturas formadas funcionam como amortecimento do fluxo, sendo um dos elementos que concorrem para o desenvolvimento das ilhas, que é a principal característica desse estilo. Essas feições retratam um processo histórico de sedimentação, onde blocos aglomerados durante um período de elevada competência serviram de substrato para sedimentação posterior. São ambientes com altíssima energia durante eventos de cheias normais, o que ocasiona a submersão das ilhas, afetando a vegetação sobre ela, causando nesses períodos, erosão das ilhas e sua conseqüente retração.



Figura 5-49: Blocos acumulados servindo de embasamento para formação de ilhas  
(Fonte: Acervo Lagesolos)

- **Forte Erosivo**

*Característica do vale* – Confinado Sem planícies alveolares

*Forma em planta* – Vale encaixado e sinuosidade baixa, condicionada pela estrutura do vale.

*Unidades geomorfológicas* – Leito rochoso formado por cascalho, blocos, matacões e areia grossa. Apresenta quedas d'água e sequências de corredeiras com alta energia.

*Comportamento do rio* – feições são altamente estáveis, sofrendo alterações imperceptíveis na escala temporal e espacial utilizada. Ressalta-se que esses ambientes possuem elevado poder erosivo e de transporte de sedimentos, sendo aumentado em função da declividade do perfil longitudinal, do confinamento das vertentes do vale e do regime de cheias.



Figura 5-50: Vale confinado simétrico. Trecho onde o rio possui maior poder erosivo e de transporte (Fonte: Acervo Lagesolos).

- **Confinado Alta Energia**

*Característica do vale* – Confinado sem ocorrência de planícies alveolares.

*Forma em planta* – Vale encaixado e sinuosidade baixa, condicionada pela estrutura do vale.

*Unidades geomorfológicas* – Leito rochoso formado por cascalho, blocos, matacões e areia grossa. Quedas d'água ocorrem ocasionalmente em função de pequenos estrangulamentos do vale.

*Comportamento do rio* – Em função da relativa diminuição do gradiente do perfil longitudinal, a energia do rio é relativamente inferior ao estilo fluvial Forte erosivo. No entanto, também possui elevada capacidade de transporte. Diferencia-se principalmente pela formação de áreas de umbrais (pools) mais prolongadas.

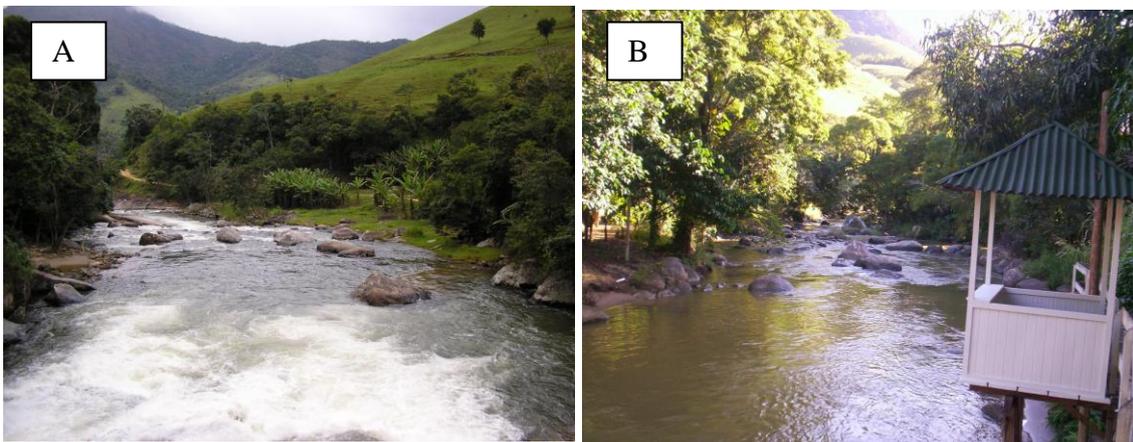


Figura 5-51: Rio Macaé com alta energia. (A) soleira (riffle), (B) depressão (*pool*)  
(Fonte: Acervo Lagesolos)

- **Confinado Média Energia**

*Característica do vale* – Confinado com ocorrência de planícies alveolares.

*Forma em planta* – Vale encaixado com abertura em ambientes de morros, que permitem ajustes pontuais do rio.

*Unidades geomorfológicas* – Leito arenoso com feições geomorfológicas praticamente ausentes, em função da pouca quantidade de sedimentos e capacidade de transporte suficiente para manter um fluxo contínuo de sedimentos. Canal com baixa energia em função do gradiente longitudinal.

*Comportamento do rio* – O potencial do canal em mobilizar sedimentos deve-se aos eventos de cheias, verificando-se que sua vazão média permite a acomodação dos sedimentos arenosos mais grosseiros.



Figura 5-52: Energia moderada durante fluxo de base (Fonte: Acervo Lagesolos)

O objetivo nesta etapa foi consolidar as informações sobre “como” e “por que” os rios se apresentam e se comportam de diferentes formas. Desse modo, a partir da avaliação dos fatores de controle, como geomorfologia, clima e uso do solo, buscou-se estabelecer relações entre declividade, descarga e o potencial de energia do rio identificados através dos diferentes estilos fluviais identificados.

A rede hierárquica na qual foi concebido o presente sistema de classificação (Figura 5-55) utilizou-se da *característica dos vales* como primeira instância de diferenciação do comportamento dos cursos d’água, ressaltando-se que este elemento está diretamente relacionado com a Geomorfologia e Geologia regional. Nessa escala, separam-se canais de elevada hidrodinâmica, representados por tons de azul e vermelho (Figura 5-53 e Figura 5-54), dos canais de baixa hidrodinâmica, representados pelas cores amarela e laranja. Através destes mapas, verifica-se a relação direta entre as *zonas Geohidráulicas* e os tipos de rios.

No entanto, dentro do contexto ambiental de cada Zona Geohidráulica, os padrões de comportamento dos rios variam, estando relacionados a fatores locais como o grau de sinuosidade dos vales e os tipos de materiais que compõem o leito.

Através da análise da distribuição espacial dos diferentes canais, foi possível identificar padrões no regime de produção, transporte e deposição de sedimentos na bacia, objetivando compreender, do ponto de vista geomorfológico, a sensibilidade do sistema.

Ressalta-se ainda, que a identificação de estilos fluviais presume a caracterização do ambiente fluvial, que por sua vez pode servir de instrumento de apoio ao planejamento de bacias hidrográficas para diversos objetivos, como distribuição da ictiofauna, potencial para pesca em rios, navegabilidade, potencial turístico (corredeiras para circuitos de *rafting* e ecoturismo em quedas d’água), e ainda apoio a estudos de potencial de geração hidrelétrica.

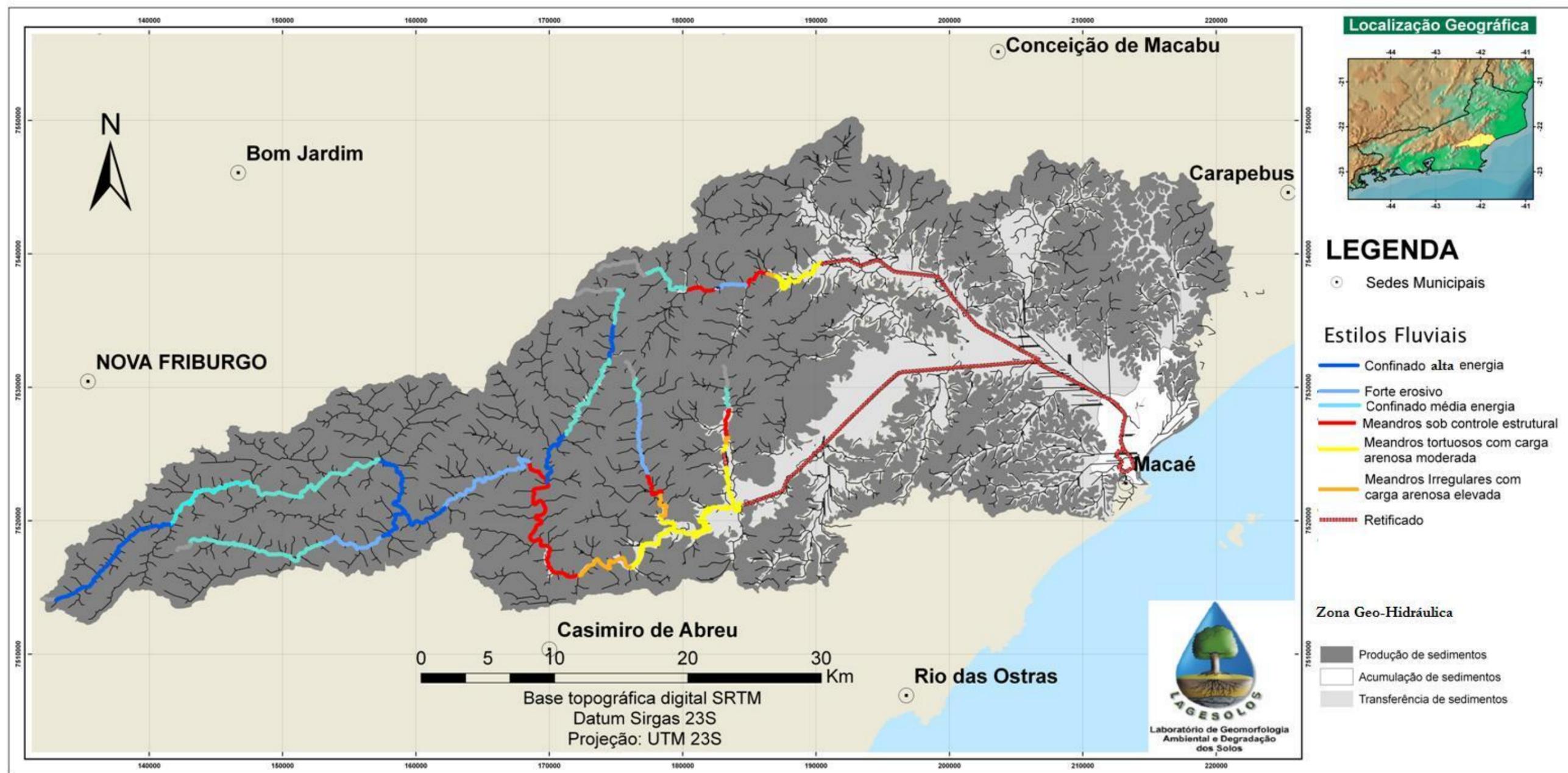


Figura 5-53: Estilos Fluviais e sua recorrência nas diferentes zonas geo-hidráulicas.

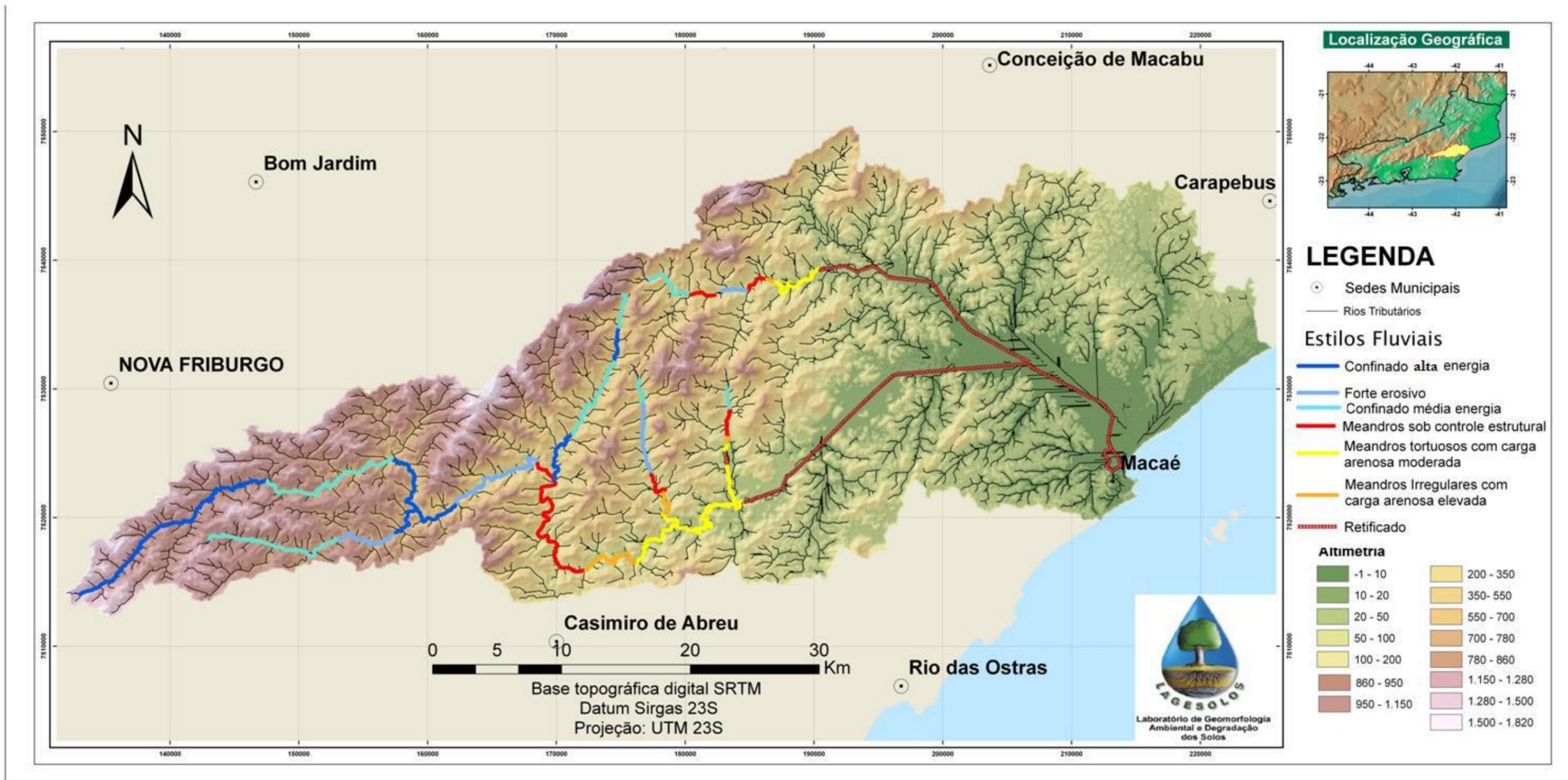


Figura 5-54: Estilos Fluviais e sua recorrência nas diferentes altimetrias.

# Característica do vale

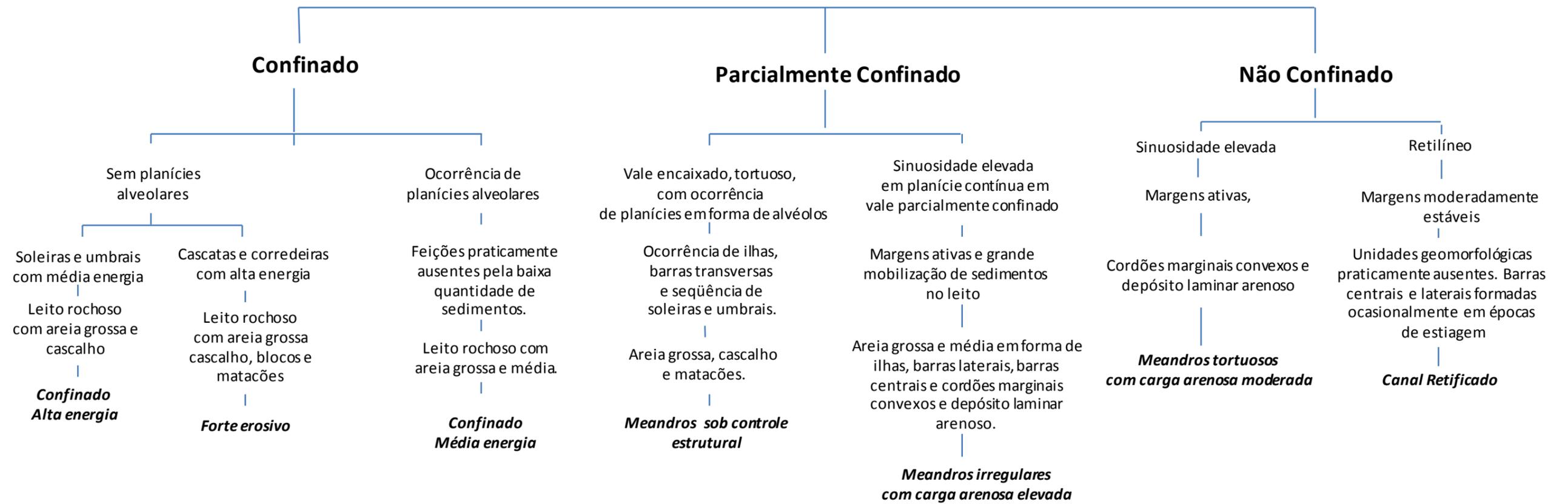


Figura 5-55: Rede hierárquica dos atributos de diferenciação dos Estilos Fluviais identificados.

## 6 CONECTIVIDADE E AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO SISTEMA

A configuração dos ambientes fluviais e os tipos de conectividade foram interpretados através das transferências de matéria e energia de cada subsistema, permitindo avaliar como ocorre a distribuição dos sedimentos e a velocidade com que eventos extremos se propagam a partir do efeito sinérgico, isto é, o efeito sequencial de um ambiente sobre o outro, conforme Fryirs *et al.* (2007).

Neste sentido, buscou-se estabelecer os padrões de conectividade longitudinal na bacia do rio Macaé, sendo avaliada no contexto da rede de drenagem, que inclui: relações montante-jusante; encosta-calha e canal principal-tributários. A força e o tipo da conectividade depende, portanto, das características geomorfológicas dos sistemas e subsistemas, que podem atuar como impedimentos (desconectividade) ou condicionantes (conectividade), para a movimentação dos sedimentos na bacia, refletindo a capacidade do rio em transportar diferentes calibres.

Ao avaliar a configuração geomorfológica da bacia do rio Macaé, verifica-se que grande parte do sistema hidrográfico compreende zonas de produção de sedimentos (1100 km<sup>2</sup> - 61%), drenadas por rios com elevada energia e potencial erosivo. Cerca de 29% (525 km<sup>2</sup>), correspondem a zonas de transferência, onde predominam processos de transporte gradual de sedimentos em detrimento da produção. Nessa região a densidade de canais é bem inferior e o terreno é drenado por canais meandantes de energia moderada, que culminam em uma menor velocidade no transporte de sedimentos.

Deste modo, a configuração do sistema mostrou-se dominada por grande área de nascentes (fonte de sedimentos), que conectam-se com zonas de transferência de sedimento localizadas nas planícies e terras baixas, que transportam esses materiais eficientemente até a saída do sistema (Figura 6-1).

Em decorrência da retificação de diversos canais na planície do rio Macaé, houve dificuldade em delimitar o trecho correspondente à zona de acumulação. A estimativa foi realizada em função das características dos paleocanais (Figura 6-1 E), e atuais zonas de ocorrência de enchentes, próximas ao estuário do rio Macaé, correspondendo a 10 % (178 km<sup>2</sup>), da área total da bacia.

Dentro das zonas de produção de sedimento, pôde-se observar (Figura 6-2) que grandes cargas são fornecidas naturalmente ao canal coletor, através de processos

erosivos naturais nas encostas, desencadeados por complexos de voçorocas, erosão em lençol e/ou movimentos de massa (Figura 6-1). Ressalta-se que estes ambientes possuem alta suscetibilidade à erosão (classificação EMBRAPA), por conta da combinação dos elementos relevo, clima e solos, de maneira que a cobertura vegetal tem um papel importantíssimo a desempenhar na proteção dos solos e na regulação dos processos erosivos nas encostas. Normalmente ao serem liberados no sistema, os sedimentos são eficientemente transportados pelos canais tributários e pelo coletor principal, sendo dispersos com mais ou menos velocidade, de acordo com a competência do fluxo e do regime hidrológico de cada rio. Trechos de estocagem de sedimentos ocorreram em níveis de bases locais e em função da interação do canal principal com afluentes, que forçam a ocorrência de zonas de remanso ou depressões (pools) (Figura 6-1). Nesses pontos, sedimentos mais grosseiros podem ficar retidos.

Nas zonas de transferência, localizadas nas terras baixas e planas (Figura 6-2), os sedimentos conseguem ser efetivamente descarregados para fora do sistema, percebidos através da pluma de sedimentos formada na foz do rio Macaé (Figura 6-1). No entanto, esta zona apresenta uma grande diminuição da taxa de transferência. A lentidão no transporte de sedimentos (*sediment slug*) deve-se ao baixo gradiente do canal e pode ser verificada através de feições geomorfológicas como barras e ilhas, que demonstram o transporte gradativo desse material (Figura 6-1).

A bacia do rio Macaé não apresenta um setor bem definido onde ocorra predominantemente processos deposicionais. Com a retificação, o canal aumentou sua capacidade de transporte, no baixo curso, ocorrendo acumulação apenas através de alguns de seus canais tributários, que se conectam ao rio principal apenas em eventos de grande cheia (Figura 6-1). Desse modo, a zona de acumulação de sedimentos fica limitada a uma pequena região próxima à desembocadura do rio Macaé, onde podem ocorrer processos mais pronunciados de deposição, verificados através de feições fluviais na planície, como paleocanais e meandros abandonados (Figura 6-1) (Assumpção, 2009; Hingel, 2010).

A partir dos estilos fluviais mapeados (Figura 5-53 e Figura 5-54), foi possível definir espacialmente os padrões de conectividade existentes na bacia, de acordo com a classificação proposta por Hooke (2003) e Fryirs *et al.*, (2007), onde quatro tipos de conectividade são diferenciados com base em sua dinâmica, e através da “força” da conectividade (*connectivity strenght*) (Figura 6-2). Essas abordagens se complementam na avaliação da **sensibilidade dos ambientes** fluviais na bacia, uma vez que permitem

perspectivas temporais e espaciais, respectivamente. De acordo com a classificação de Hooke (2003), foram identificados 3 tipos de conectividade no sistema: **conectados**, **potencialmente conectados** e **periodicamente conectados**. O autor define ainda sistemas desconectados, que não foram observados na bacia, dentro da escala estudada.

Os **sistemas conectados**, definidos pela capacidade dos sedimentos se moverem facilmente e frequentemente, foram identificados nos ambientes onde os vales são confinados e o gradiente do canal confere energia para transferir constantemente os sedimentos que chegam ao mesmo (Figura 6-2). Dada a configuração escarpada em grande área da bacia, o confinamento do vale promove ainda a conectividade lateral (sistema encosta-calha), de modo que os sedimentos derivam grande parte de colúvios e depósitos de tálus (Fryirs *et al.* 2007). A força da conectividade nestes ambientes é dividida em **alta** e **muito alta**, em função da diversidade encontrada nos estilos fluviais (Figura 6-2).

Os sistemas **potencialmente conectados** foram definidos como ambientes onde os sedimentos grosseiros podem se mover de um trecho para o outro; mas isso não ocorre porque não há disponibilidade de sedimentos suficiente ou em função da ocorrência de níveis de base locais que podem reter sedimentos, mobilizando-os em eventos de grande magnitude (Figura 6-2). Esse tipo de conectividade é comum nas áreas próximas às cabeceiras de drenagem e com baixo gradiente de declividade em altitude.

Nas partes baixas da bacia ocorrem os sistemas **periodicamente conectados**. São definidos como sistemas em que há um pequeno transporte de sedimentos grosseiros entre um trecho e outro, exceto em eventos extremos. Este sistema se diferencia dos demais, pois há evidências de que os sedimentos grosseiros são transportados ocasionalmente em eventos de grandes cheias. Devido à essa característica, a força da conectividade nesses ambientes é relativamente menor devido ao processamento e distribuição lento (*sediment slug*) da carga sedimentar que aporta nestes setores (Figura 5-20, Figura 5-21, Figura 5-22, Figura 5-23).

Desse modo, a diferenciação na taxa de produção e transporte de sedimentos ao longo da bacia, permitiram identificar os padrões de sinergia entre os sistemas. Esse comportamento pressupõe a propagação de energia (fluxo) e matéria (sedimentos) sendo captadas, absorvidas e transferidas de acordo com a conectividade de cada subsistema, permitindo ainda, avaliar respostas do sistema à impactos decorrentes de transformações no uso e cobertura da terra.

Observou-se, ainda, que a bacia do rio Macaé apresenta um elevado padrão de conectividade, com equilíbrio relativo no balanço entre a entrada e a saída dos sedimentos no sistema em função do relevo acidentado em grande parte da bacia, garantindo tanto a geração de grande quantidade de sedimentos para o sistema, como a eficiência no transporte dos materiais oriundos das encostas (Figura 6-2).

De acordo com Fryirs & Brierley (2009), bacias hidrográficas com essas características possuem um elevado potencial para recuperação de canais geomorfologicamente degradados, uma vez que existem energia e matéria suficiente para que ocorra um novo estado de equilíbrio, sendo possível em muitos casos, a recuperação total do comportamento hidráulico e das feições originais.

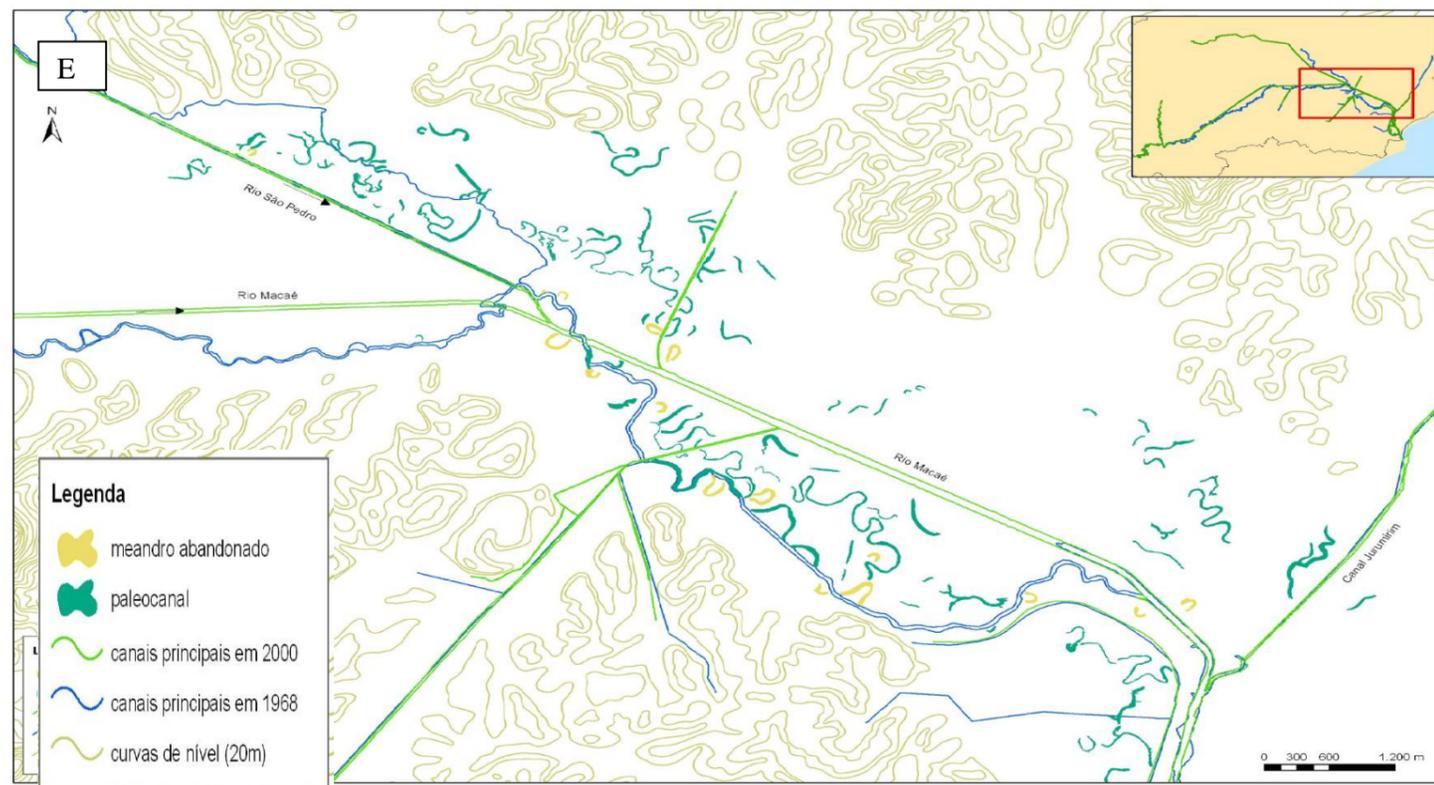


Figura 6-1: (A) Encosta com erosão laminar evoluindo para voçorocas. (B) Movimento de massa em talude de estrada. Materiais erodidos nas vertentes caem diretamente nos canais fluviais. (C) Leque fluvial formado no encontro do rio D'Antas com o rio Macaé. Neste ponto, o rio Macaé cria um pequeno efeito de remanso no rio D'Antas, fazendo com que os sedimentos sejam transferidos mais lentamente. (D) Encontro do rio Macaé com o rio Bonito. A depressão formada no encontro dos rios retém sedimentos grosseiros no fundo. (E) Meandros abandonados e paleocanais na planície do rio Macaé. As marcas deixadas indicam antigas zonas de deposição na porção mais próxima ao estuário. (F) Pluma de sedimentos na foz do rio Macaé demonstra o potencial dos sedimentos em percorrerem toda a rede de drenagem até a saída na cidade de Macaé.

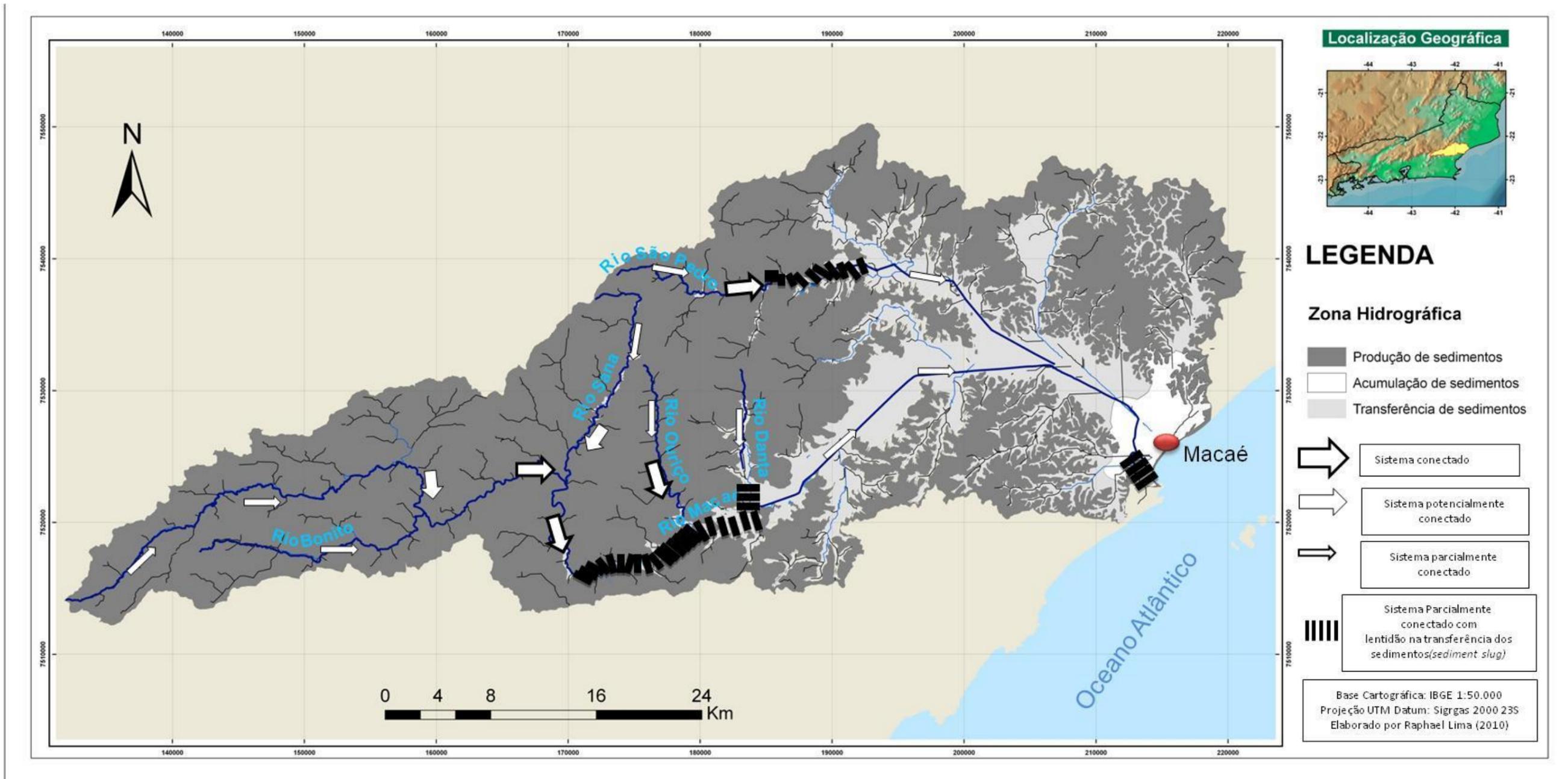


Figura 6-2: Mapa dos tipos de conectividade do rio Macaé e seus principais afluentes. O tamanho das setas procura indicar o tipo da conectividade, bem como dar noção da sua intensidade e magnitude.

Em virtude do aporte sedimentar e sua capacidade de retrabalhamento, a conectividade e as transformações na geomorfologia fluvial puderam ser percebidas em espaços de tempo curtos, observando-se entre os anos de 2003 e 2009, mudanças de diferentes magnitudes na forma em planta e na geometria dos canais ao longo da bacia. A partir dos dados analisados, ressalta-se que as modificações ocorridas no canal do rio Macaé não podem ser diretamente atribuídas às transformações no uso e ocupação da terra, uma vez que os ajustes observados fazem parte de um comportamento natural, verificado em bacias com componentes fisiográficos semelhantes (Summerfield, 2005; Thomas, 2000; Vanacker *et al.*, 2005; Hoyle et al 2008).

Considerando, no entanto, as tendências de mudanças do uso e ocupação da terra e aumento da pressão sobre fragmentos florestais na bacia, salienta-se que a descrição dos processos de movimentação dos sedimentos, contribuíram para exercícios de avaliação e predição da trajetória de ajustes geomorfológicos frente à cenários de intensificação dos distúrbios no sistema. Deste modo, é possível indicar locais ou zonas mais sensíveis onde as mudanças no comportamento poderão ser observadas mais rapidamente no rio, em resposta à nova condição de aporte de sedimentos (Tabela 6-1).

No mapa de uso da terra referente ao ano de 2005, elaborado por Moté (2008), nota-se que as regiões mais baixas onde predominam morros, colinas e planícies fluviais, já apresentam grandes áreas com perda da vegetação original, substituídas por pastagens e cultivos. Entretanto, essa alteração não teve importância significativa para mudanças no regime do rio, uma vez que estas áreas possuem suscetibilidade à erosão média e baixa (Lima<sup>1</sup>, 2008), somando-se ao fato de que o sistema encosta-calha é desconectado em função da planície fluvial, e do caráter intermitente de grande parte dos afluentes que drenam essas áreas.

Nas regiões mais altas da bacia, onde predominam vales encaixados e solos com suscetibilidade à erosão alta e muito alta, Lima<sup>1</sup> (2008), aponta que mesmo havendo predominância de processos de erosão em lençol (*sheet erosion*), a falta de práticas de manejo conservacionistas tem contribuído para a recorrência de movimentos de massa e voçorocamentos. A conectividade no sistema encosta-calha, condicionado pelo confinamento das vertentes, faz com que grande parte dos sedimentos produzidos alcance o canal coletor e sejam incorporados à drenagem.

Segundo Fryirs *et al.* (2007), ambientes com elevado grau de conectividade, tendem a propagar os efeitos dos impactos, sendo absorvidos em regiões mais sensíveis, com menor conectividade, onde os ajustes à nova condição do sistema começam a ser

verificados mais rapidamente. A partir destas ponderações, e com base nos parâmetros analisados nesta pesquisa, verificou-se ao longo das **zonas geo-hidráulicas de produção, transferência e deposição de sedimentos**, estilos fluviais com diferentes tendências e tipos de resposta ao aumento de processos erosivos nas encostas (Tabela 6-1).

Em um cenário de intensificação dos processos erosivos no alto curso da bacia, supõe-se que os primeiros estilos fluviais a sofrerem ajustes sejam os *meandros irregulares com carga arenosa elevada*, localizados na base da escarpa. Neste trecho, onde o gradiente é suave e o vale parcialmente confinado, ocorre uma ruptura no padrão de conectividade (Figura 6-2), sendo verificada a diminuição na velocidade de transferência de sedimentos. Durante os períodos secos, de Maio à Outubro, esse trecho apresenta grande quantidade de depósitos arenosos, que indicam que os rios à montante continuam a transferir sedimentos, mesmo após a capacidade deste segmento ter sido superada. O mesmo procedimento pode se desdobrar quase que concomitantemente para os estilos fluviais *meandros tortuosos com carga arenosa moderada*, ocorrendo ainda à intensificação dos processos erosivos nas margens em decorrência da migração lateral do rio. Nos segmentos denominados *retificados*, em função dos ajustes já sofridos pelo canal após as obras hidráulicas, poderão ocorrer pontos críticos de assoreamento durante os períodos secos, bem como a intensificação das enchentes na desembocadura do rio como consequência da diminuição da profundidade do canal e da elevada velocidade de escoamento das águas.

No alto curso da bacia, os estilos fluviais são resilientes a esses impactos em virtude de sua elevada capacidade de transferir sedimentos. No entanto, essa resiliência não é infinita, isto é, a capacidade de transferência pode restringir-se em função de um aumento excessivo no aporte sedimentar. O estilo fluvial *confinado média energia* no alto curso é mais sensível, uma vez que a baixa declividade do seu perfil longitudinal limita a energia do fluxo e consequentemente a sua capacidade de transporte.

Levando-se em consideração a complexidade dos sistemas hídricos, ressalta-se que outros tipos de ajustes podem ocorrer. A precisão deste prognóstico depende de mais verificações específicas nos canais, que permitam maior detalhamento sobre a dinâmica desses sistemas.

Tabela 6-1: Sensibilidade dos principais tipos de ambientes identificados na bacia do rio Macaé.

Característica do Vale	Conectividade	Caráter do leito	Morfologia do canal	Forma em Planta	Capacidade natural de ajuste e sensibilidade
Confinado	Conectado	A diversidade do tipo, tamanho de sedimento e diversidade hidráulica são compelidos pelo leito rochoso, condicionando ajustes à retrabalhamentos constantes de carga de fundo.	Tamanho, forma do canal e morfologia das margens são controlados pelas estruturas geológicas e materiais antigos. Erosão das margens é insignificante. Declives locais induzem o padrão das unidades geomorfológicas, como as sequências de corredeiras (riffle) e calmarias (pool).	Sem potencial de ajuste do número de canais, sinuosidade, ou estabilidade lateral. Feições geomorfológicas são bastante fixas e vegetação ripária não representa grande controle na estrutura do canal.	Resiliente
Confinado – média e baixa energia	Conectado	Leito muitas vezes controlado pelo embasamento rochoso. Leito arenoso e pedregoso permite a formação de barras laterais, corredeiras, ilhas, que induzem uma grande diversidade hidráulica. As transformações no leito ocorrem de forma lenta e gradual, a partir da sequência histórica de transporte sedimentar (mudanças climáticas).	Largura, forma do canal e erosão das margens podem ocorrer em locais onde se formam pequenas planícies (foodplain pockets). Entretanto, são condicionados pelo embasamento rochoso ou materiais antigos presentes ao longo das margens. Feições geomorfológicas no canal sofrem ajustes locais onde o tamanho do canal permite.	Potencial local para transformações nas curvas do rio produzidas pelo controle litológico. Pequenas planícies podem ser propensas às correntezas e retrabalhamentos, sendo os ajustes restritos às áreas onde essas feições ocorrem.	Moderadamente resiliente
Parcialmente Confinado – média e baixa energia	Parcialmente Conectado	A diversidade do tipo, tamanho de sedimento e diversidade hidráulica são controlados por materiais arenosos e pedregosos, que compõem e protegem o leito. Descargas curtas induzem ajustes locais. Quando estes ajustes ocorrem eles tendem a ser significativos, uma vez que são conduzidos por eventos de frequência irregular e elevada magnitude	O tamanho do canal se ajusta de forma gradual. Potencial moderado de erosão das margens. As feições geomorfológicas são dominadas por cargas de fundo.	Potencial moderado para ajuste lateral e sinuosidade. Elevado potencial de retrabalhamento dos materiais depositados	Moderadamente Sensível
Não confinado média e baixa energia	Parcialmente Conectado	Leito instável, sujeito à mudanças recorrentes em sua forma, composição e hidráulica, na medida que a geometria do canal e sua forma em planta se modificam. Variações superficiais e subsuperficiais são observadas. Ajustes no leito refletem o histórico de eventos de transporte e deposição.	Tamanho e forma do canal podem se ajustar lateralmente e verticalmente no vale, formando sistemas de carga sedimentar mista. Elevado potencial para erosão do leito, sendo importante o controle da mata ciliar na estabilidade das margens e na evolução das feições geomorfológicas. Elevado potencial de retrabalhamento destas feições	Elevado potencial de para ajuste lateral e sinuosidade, resultando em grande variedade de feições fluviais.	Muito sensível
	Pontencial de ajuste limitado(resiliente)				
	Pontencial de ajuste localizado (moderadamente resiliente)				
	Pontencial de ajuste significativo (sensível)				

## 7 CONCLUSÕES

Ao longo da pesquisa, buscou-se reunir informações que contribuíssem para uma melhor compreensão dos processos fluviais atuantes na bacia do rio Macaé, à luz da conectividade “intra” e “entre” subsistemas existentes. Os procedimentos metodológicos de campo e gabinete permitiram identificar zonas mais sensíveis às transformações no uso do solo, tanto do ponto de vista da rede de drenagem, como através das mudanças pontuais nos canais. Para isso, utilizou-se um modelo empírico que representasse a conectividade fluvial, tendo como base, diversos autores que trabalham com a temática da conectividade e sensibilidade fluvial.

Com base nas informações coletadas, observou-se que a magnitude dos impactos ambientais que ocorrem hoje na bacia do rio Macaé, possui diferentes naturezas e tem culminado em diferentes respostas do sistema. Os principais sinais de fragilidade na bacia foram observados através dos processos erosivos no alto curso, servindo como importante indicador de desajustes internos no sistema. Frente a essas mudanças, a capacidade de resiliência do sistema fluvial demonstrou que, do ponto de vista geomorfológico, os canais tem sido capazes de absorver esses impactos, devendo-se ressaltar, no entanto, que tal resiliência não é infinita e cumulativamente, a degradação do meio físico pode comprometer a funcionalidade geomorfológica e ecológica dos rios, bem como a qualidade de vida da população.

A classificação dos estilos fluviais, juntamente com outras metodologias, proporcionaram uma ferramenta de análise para a organização das informações coletadas, culminando na análise integrada da evolução da paisagem no âmbito da bacia de drenagem. Desse modo foi possível estabelecer um melhor entendimento dos principais processos geomorfológicos responsáveis pelos ajustes dos canais.

Ressalta-se que a utilização do programa Google Earth™ foi uma excelente alternativa para o mapeamento da forma em planta do canal ao permitir acesso fácil e gratuito às imagens de alta resolução e em períodos diferentes, o que possibilitou a análise temporal dos rios. Através da interpretação das imagens, foram identificadas diversas transformações na paisagem, operadas entre os 6 anos de análise que compreenderam o estudo. A limitação dessa ferramenta ainda está na dificuldade transpor as imagens para outros SIGs, como o ArcGis, de modo que estudos quantitativos ainda não puderam ser realizados utilizando-se essas imagens.

As abordagens relativas à preservação, reabilitação e recuperação dos rios variam significativamente em diversas partes do mundo, refletindo marcas deixadas por ações humanas pretéritas, pressões sobre sistemas fluviais em curso, e a capacidade/vontade da sociedade em responder à estas preocupações. Tentativas de melhorar a saúde do rio estão subordinadas aos esforços de gerir o espaço e o uso da água de forma mais eficaz, minimizando as consequências negativas do homem nos sistemas fluviais (Brierley & Fryirs 2008).

Na região Norte Fluminense, grandes investimentos têm sido realizados em operações desconectadas e pontuais, como obras de dragagem de canal, principalmente na rede de canais retificados (Sistemas de Macrodrenagem do Norte Fluminense). Esse tipo de operação tem se mostrado ineficaz, pois demanda uma quantia elevada em dinheiro, que não compensa o investimento, uma vez que o aporte de sedimentos nessas áreas não cessa, isto é, a cada evento de cheia, o canal carrega novamente grande volume de sedimentos.

Em muitos países desenvolvidos, como Estados Unidos, Japão, Inglaterra, Austrália e França, tem-se reconhecido que a antiga filosofia de “domesticar” os rios de acordo com as necessidades imediatas da sociedade tornou-se indesejável, pois é prejudicial ao ambiente, dispendioso economicamente, ineficiente do ponto de vista da engenharia e insustentável devido à necessidade de esforços frequentes em manutenção.

Desse modo, para uma gestão ambiental eficiente, deve-se ter em conta os efeitos sinérgicos de cada bacia, bem como a trajetória de ajuste dos rios e dos valores da própria sociedade perante os seus recursos naturais.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. (1967). Origem e Evolução da Plataforma Brasileira. Rio de Janeiro. DNPM/DGM, 241, 40p.
- ASMUS, H.E. & FERRARI, A.L. (1978). Hipótese sobre a causa do tectonismo cenozóico na região Sudeste do Brasil. In: Aspectos Estruturais da Margem Continental Leste e Sudeste do Brasil. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 41p.
- ASSUMPTÃO, A. P. (2009) Retificação de Canais Fluviais no Baixo curso da Bacia do Rio Macaé (RJ) - Uma Abordagem Geomorfológica. Rio de Janeiro 170p. (Dissertação de Mestrado, Depto. Geografia/IGEO-UFRJ).
- BEZERRA, P.E.L. (2000). Análise Estrutural da Drenagem. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE. Diretoria De Geociências Belém/PA, Setembro de 2003.
- BIGARELLA, J.J., SUGUIO, K., BECKER, R.D. (1979). Ambiente Fluvial: Ambientes de Sedimentação, sua interpretação e importância. Editora da Universidade Federal do Pará. Associação de Defesa e Educação Ambiental, 183, p.
- BRIERLEY, G.J. & FRYIRS, K.A. (2000) River Styles, a geomorphic approach to catchment characterization: Implications for river rehabilitation in Bega Catchment, NSW, Australia. *Environmental Management* 25 (6), 661- 679.
- BRIERLEY, G. & FRYIRS, K.A. (2003) The River Styles® framework: The short course conceptual book. Macquarie Research Limited.151pp.
- BRIERLEY, G.J. & FRYIRS, K.A. (2005). *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing, Oxford, UK. 398 pp.
- BRIERLEY, G.J., FRYIRS, K.A., JAIN, V., (2006). Landscape connectivity: The geographic basis of geomorphic applications. *Area* 38.2, 165–174.
- BRIERLEY G.J. & FRYIRS, K.A. (2008) Space, place and a healthy dose of realism grounding the process of river repair. 4h ECRR Conference on River Restoration. Italy, Venice S. Servolo Island 16-21 June 2008
- BROOKES, A. (1988). Restoring the Sinuosity of Artificially Straightened Stream Channels. *Environmental Geology and Water Science* 10(1):33-41.

- BROOKES, A. & SHIELDS, F.D. (1996) Perspectives on river channel restoration. In.: BROOKES, A. AND SHIELDS, F.D. (orgs.) River Channel Restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 1-19
- BRUNSDEN, D., (2000). A critical assessment of the sensitivity concept in geomorphology. *Catena* 42, 101–125.
- BRUNSDEN, D. & THOMES, J. (1979) Landscape sensitivity and change. *Transactions of the Institute of British Geographers*, Vol. NS4, 463–484.
- CAINE, N. & SWANSON F. J. (1989) Geomorphic coupling of hillslope and channel systems in two small mountain basins *Zeitschrift fur Geomorphologie* 33 189–203
- CAL, 2006. Estudo de Impacto Ambiental do Porto do Açú, RJ.
- CARVALHO FILHO, A.; LLUMBERAS, J.F.; SANTOS, R.D. (2001). Os solos do Estado do Rio de Janeiro in CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Rio de Janeiro: geologia, geomorfologia, geoquímica, geofísica, recursos minerais, economia mineral, hidrogeologia, estudos de chuvas intensas, solos, aptidão agrícola, uso e cobertura do solo, inventário de escorregamentos, diagnóstico geoambiental. Rio de Janeiro: CPRM: Embrapa Solos; [Niterói]: DRM-RJ, 2001. 1 CD-ROM. Contém texto e mapa color., escala 1:500.000. cap.6 (Capítulo de livro).L
- CHRISTOFOLETTI, A. 1969. Análise morfométrica das bacias hidrográficas. *Notícias Geomorfológicas*. Campinas p.25.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1979) Análise de Sistemas em geografia. Hucitec, EDUSP. São Paulo. 106 p.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1990) A Aplicação da Abordagem em sistemas na Geografia Física. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 52, n 2, p. 21 – 35.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1999) Modelagem de sistemas ambientais. E. Blucher, São
- CHORLEY, R.J. & KENNEDY, B.A. (1971) *Physical Geography: A Systems Approach*, London: Prentice Hall. 370.
- CHORLEY, R.J.; SCHUMM, S.A.; SUGDEN, D.E. (1984) *Geomorphology*. Methuen and Co. Ltd, New York.
- COSTA, L. A. M.; GOMES, B. S.; MOREIRA, C. R. D.; et al. (1982) A Geologia das Folhas de Macaé e Cabiúnas. Projeto Carta Geológica do Rio de Janeiro. DRM/TRISERVICE. Escala 1:50.000.
- COTRIM, L.R.A (2004) Caracterização Geomorfológica e Problemas Ambientais na Sub-Bacia do Rio São Pedro. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ pp.38

- CUNHA, S. B. (1995) Geomorfologia Fluvial. In: GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. (Orgs.) Geomorfologia Exercícios Técnicas e Aplicações – Rio de Janeiro; Bertrand Brasil, 1996.
- DANTAS, M. E. (2000). Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro. CPRM, Brasília.
- DAVIS, W.M. (1990). Geographical Essays, Boston: Ginn (republished 1954, New York: Dover).
- DEFFONTAINES, B. & CHOROWICS, J. (1991). Principles of drainage basin analysis from multisource data: application to the structural analysis of the Zaire Basin. *Tectonophysics*, 194: 237-263.
- DRM-RJ – Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro. Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro – DRM-RJ / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, 1983, Rio de Janeiro
- EMUHSA (2007) Relatório Técnico – Levantamento Sócioambiental da Bacia do rio Macaé.
- FGV Projetos (2004). Projeto de Pesquisa de Estudo de Cheias no Baixo Curso do Rio Macaé, em Especial sobre o Núcleo Urbano. Convênio SEMADUR/SERLA/UTE NORTEFLUMINENSE S.A. / ECOLOGUS 2º relatório. Diagnóstico da Situação Atual dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Macaé.
- FRYIRS K.; BRIERLEY G.; PRESTON C.; SPENCER J. (2006) Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the upper Hunter catchment, New South Wales, Australia. *Geomorphology* 20p.
- FRYIRS, K.A.; BRIERLEY, G.J.; PRESTON, N.J.; KASAI, M. (2007) Buffers barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. *Catena* 70 pp.49-67.
- FRYIRS, K.A., SPINK, A. Brierley, G.J. (2009). Post-European settlement response gradients of of river sensitivity and recovery across the upper Hunter catchment, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*.34 pp. 897-918
- FRYIRS, K.A. & BRIERLEY, G.J. (2009) Naturalness and place in river rehabilitation. *Ecology and Society*. 14 (1), 20 URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss1/art20/>
- GILBERT, G.K. (1914). The transportation of debris by running water. US Geological Survey Professional Paper 86.
- GARDINER J.L. (1991) River Projects and Conservation: a Manual for Holistic Appraisal, Wiley, Chichester.

- GUERRA, A. J. T. 1998. Processos Erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA S.B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil S.A., p.149- 208.
- HARVEY, A.M., (2002). Effective timescales of coupling within fluvial systems. *Geomorphology* 44, 175–201.
- HASUI, Y. (1990) Neotectônica e Aspectos Fundamentais da Tectônica Ressurgente no Brasil. SBG/MG. Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental no Sudeste Brasileiro, Belo Horizonte, 1: pp. 1-31.
- HINGEL, R. L.; NASCIMENTO, F. J. B.; VILLAS BOAS, G.H.; MARÇAL, M. S. (2009). Análise temporal e espacial das variações pluviométricas na bacia do rio Macaé/RJ: contribuição na identificação de áreas suscetíveis à erosão. XII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Viçosa.
- HINGEL, R. L. Mapeamento de feições geomorfológicas no canal do rio Macaé (RJ). Rio de Janeiro: UFRJ/IGEO, 2010.
- HOOKE, J., (2003). Coarse sediment connectivity in river channelsystems: a conceptual framework and methodology. *Geomorphology* 56, 79– 94.
- HOYLE, J., BROOKS, A. BRIERLEY, G.J., FRYIRS, K. & Lander, J. (2008). Spatial variability in the timing, nature and extent of channel response to typical human disturbance along the Upper Hunter River, New South Wales, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*. 33, 868–889.
- JAIN et al. (2008) Where do floodplains begin? The role of total stream power and longitudinal profile form on floodplain initiation processes *Geol Soc Am Bull.*; 120: 127-141
- KELLERHALS, R., CHURCH, M., BRAY, D.I. (1976). Classification and Analysis of river processes. *Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, 102: 813-829.
- KONDOLF, G.M. (1995) Geomorphological Stream channel Classification I aquatic habitat restoration: uses and limitations. *Aquatic Conservation* 5: 109-126
- KONDOLF, G.M.; MONTGOMERY, D.R.; PIEGÁY, H.; SCHMITT, L. (2003). Geomorphic Classification of Rivers and Streams. In: KONDOLF, G.M. & PIEGÁY, H. *Tools in Fluvial Geomorphology*. pp.171-204.
- LANE, S. N. & RICHARDS, K.S. (1997). Linking river channel form and process: time, space and causality revisited. *Earth Surface Processes and Landforms* 22 249–60.

- LEMONS, J. & VICTOR, R. (2008) Uncertainty in River Restoration. In: DARBY, S. SEAR, D. River Restoration. Managing the Uncertainty in Restoring Physical Habitat. England
- LEOPOLD, L.B.; WOLMAN, M.G. & MILLER, J.P. (1964) Fluvial Process in Geomorphology. W.F. Freeman & Co. San Francisco, pp.552.
- LIMA<sup>1</sup> D.M., (2008) Suscetibilidade à Erosão dos Solos nas Sub-bacias do médio e alto cursos da Bacia do Rio Macaé / RJ. 127p. (Dissertação de Mestrado, Depto. Geografia/IGEO-UFRJ)..
- LIMA, R.N.S., MARÇAL, M.S., VILLAS BOAS, G.H. (2009) Applied Fluvial Geomorphology in Macaé catchment, Rio de Janeiro, Brazil. 7th International Conference on Geomorphology (ANZIAG) Melbourne Australia. 6 - 11 July, 2009
- MARÇAL, M.S.;LUZ, L.M.;DIOS, C, B.;GARCIA, A S.G. (2002) Avaliação dos Problemas Ambientais no Litoral Norte Fluminense (RJ)-Área de Influência da Bacia Petrolífera de Campos. IV Simpósio Nacional de Geomorfologia, São Luis Maranhão.
- MARÇAL, M.S. & LUZ, L.M. (2003) Planejamento e gestão da Bacia do Rio Macaé – Litoral Norte Fluminense, com base em estudos integrados de Geomorfologia e uso do solo. In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Recife, PE, CD-ROM
- MARÇAL, M.S., LIMA, R.N.S., VILLAS BOAS, G.H. (2009) Channel Bed Morphology and Hydrosedimentological Research in Macaé Catchment, Rio De Janeiro, Brazil. 7th International Conference on Geomorphology (ANZIAG) Melbourne Australia. 6 - 11 July, 2009
- MICHAELIS, K. & WAINNIGHT, J. (2002) Modelling the effects of hillslope–channel coupling on channel hydrological response Earth Surface Processes and Landforms 27 1441– 57
- NEWSON, D.M. & CLARK, M.J. (2008) Uncertainty and the Sustainable Management of Restored Rivers. In: DARBY, S. SEAR, D. River Restoration. Managing the Uncertainty in Restoring Physical Habitat. England.
- OLIVEIRA, F.L. E MELLO, E.F. (2007) A mineração de areia e os impactos ambientais na bacia do rio São João, RJ. Revista Brasileira de Geociências. Brasil, 2(37):374-389.
- Peçanha, R. M. & Neto, R. S. (orgs.) (2004). Economia e desenvolvimento no norte fluminense: da cana de açúcar aos royalties do petróleo. Ed. WTC, Rio de Janeiro

- PALMER, L. (1976). River Management criteria for Oregon and Washington. In: Coaes, DR., Ed., *Geomorphology and Engineering*, Stroudsburg, Pennsylvania: Dowden, Hutchinson, and Ross, PP. 329-346.
- PIEGAY, H. & SCHUMM, S.A. (2003). System Approaches in Fluvial Geomorphology. In : KONDOLF, G.M. & PIEGÁY, H. *Tools in Fluvial Geomorphology*. pp.105-134.
- ROSGEN, D.L (1994) A classification of natural rivers. *Catena* (22) pp. 169-199.
- SANTOS, R.F. (2004) *Planejamento ambiental : teoria e prática*. São Paulo, Oficina de Textos p.184
- SCHUMM, S.A. (1977). *The fluvial System*, Chichester, UK: John Wiley and Sons, 338p.
- SCHUMM, S.A. (1981) Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. *The Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Special Publ. no.31*, 19-29.
- SCHUMM, S.A.; KHAN, H.R. Experimental study of channel patterns. In: *Geological Society of American Bulletin*, v.83, p. 1755-1770. 1972.
- SCHUMM, S. A. - 1985 - Explanation and extrapolation in Geomorphology: seven reasons for deologic uncertainty. *Transactions. Japanese Geomorphological Union* 6(1):1-18.
- SEAR, D.A. & ARNELL, N.W. (2006) The application of palaeohydrology in river management. *Catena* (66) pp.169 – 183
- SEAR DA, NEWSON MD. (1993). River channel change: a neglected element of environmental change monitoring. *Science of the Total Environment*.
- SILVA, T.M. (2002). *A Estruturação Geomorfológica do Planalto Atlântico no Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, 265p. (Tese de Doutorado, Depto. Geografia/IGEO-UFRJ).
- SILVA, L.C. & CUNHA, H.C.S. (2001) *Geologia do Estado do Rio de Janeiro*. CPRM, Brasília.
- SIMON, A. & CASTRO, J. (2003). Measurement and Analysis of Alluvial Channel Form. pp. 291-322. In: KONDOLF, M & PIEGAY, H. (2003) *Tools in Fluvial Geomorphology* p.688.
- STRAHLER, A. N. (1957) Quantitative analysis of watershed Geomorphology. *Amer. Geoph. Union*, v.38, p. 913-920.

- SOTCHAVA, V.B. (1977). O estudo de geossistemas. Revista IG-USP, 16; 1-52.
- SUGUIO, K. & BIGARELLA, J. J. (1990) Ambientes Fluviais. Florianópolis; Editora da UFSC: Editora da Universidade Federal do Paraná.
- SUMMERFIELD, M.A. (1991) Global Geomorphology: An introduction to the study of landforms. New York, Longman Scientific & Technical, 537p.
- SUMMERFIELD, M. A. (2005) The changing landscape of geomorphology Earth Surface Processes and Landforms 30 779–81
- THOMAS, M.F., (2000). Landscape *sensitivity* in time and space. Catena 42, 83–99.
- USHER, M.B. (2001). Landscape sensitivity: from theory to practice. Catena 42 pp. 375-383. [Online] URL: [www.elsevier.com/locate/catena](http://www.elsevier.com/locate/catena)
- VANACKER, V; MOLINA, A; GOVERS, G; POESEN, J; DERCON, G; DECKERS, S. (2005) River channel response to short-term human-induced change in landscape connectivity in Andean ecosystems. Geomorphology 72 pp. 340– 353
- VANNOTE, R; MINSHALL, G.W.; CUMMINS, K.W.; SEDELL, J.R.; CUSHING, C.E The river continuum concept. In: Canadian Journal Fish. Aquatic Science, vol. 37, n.2, p.130-137. 1980.
- VILLAS BOAS G. H. (2010) Análise de Dados Morfométricos da Bacia do rio Macaé Através da Utilização de GIS. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesq. do Estado do Rio de Janeiro. Orientador: Mônica dos Santos Marçal.
- WENTHWORTH, C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. Journal of Geology, 30. pp. 377 – 392.
- WARD, J.V. (1989). The four-dimensional nature of lotic ecosystems, J. North Am. Benthol Soc. 9,2-8.

## Websites Consultados

**Dados Hidrológicos, Agência Nacional de Águas – ANA.**

[http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/informacoes\\_hidrologicas/informacoes\\_hidro.aspx](http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/informacoes_hidrologicas/informacoes_hidro.aspx)

**Imagens SRTM - EMBRAPA**

<http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br/download/index.htm>, acesso em 03/07/2009.

**Imagens de Satélite do software GoogleEarth™**

[www.googleearth.com](http://www.googleearth.com)