

Contribuição das características geomorfológicas na sensibilidade ambiental ao óleo em rios: estudo de caso do Rio Araquá (SP, Brasil)

Daniela Ferreira RIBEIRO¹, Cenira Maria LUPINACCI² & Paulina Setti RIEDEL³

¹ Programa de Pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Av. 24 A, 1515, CEP 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil (danifebeiro@gmail.com).

² Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Av. 24 A, 1515, CEP 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil (cenira@rc.unesp).

³ Departamento de Geologia Aplicada, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Av. 24 A, 1515, CEP 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil (psriedel@rc.unesp.br).

Ribeiro, D.F., Lupinacci, C.M. & Riedel, P.S. 2018. Contribuição das características geomorfológicas na sensibilidade ambiental ao óleo em rios: estudo de caso do Rio Araquá (SP, Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 45: e0670.

DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.91384>

Resumo. O petróleo é uma das principais fontes de energia utilizada pelo homem atualmente. Essa intensa utilização acarreta riscos ao meio ambiente em relação a acidentes envolvendo derrames desse produto nos ecossistemas, provocando prejuízos socioeconômicos e ambientais. O principal objetivo dessa pesquisa é identificar e analisar os atributos geomorfológicos que contribuem para a sensibilidade ambiental em ambientes fluviais em um trecho do Rio Araquá (SP). A partir da identificação dos Índices de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (ISA), utilizando parâmetros geomorfológicos de origem fluvial do Rio Araquá, localizado no município de São Pedro (SP) foi elaborada a Carta de Sensibilidade Ambiental ao Óleo – Carta SAO desse curso fluvial. A área de estudo apresentou-se com um alto índice de sensibilidade devido à presença de inúmeros depósitos aluviais com presença de vegetação. Tais depósitos se devem à dinâmica meandrante do curso fluvial e também às inúmeras modificações provocadas pelas ações humanas, principalmente atividades de mineração. O mapeamento geomorfológico foi fundamental para a análise e identificação das feições geomorfológicas e para a determinação do ISA das feições. Por fim ressalta-se a importância do trabalho, visto que estudos relacionados a sensibilidade ambiental ao óleo em ambientes fluviais na escala trabalhada nessa pesquisa ainda são pouco desenvolvidos no Brasil.

Palavras-chave. Petróleo, Derrames de Petróleo, Índice de Sensibilidade Ambiental ao Óleo, Carta SAO, Mapeamento Geomorfológico.

Abstract. CONTRIBUTION OF GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS ON THE ENVIRONMENTAL SENSITIVITY TO OIL SPILL IN RIVERS: CASE STUDY ARAQUÁ RIVER (SP, BRAZIL). Petroleum is one of the main sources of energy used by man currently. This intense utilization entails risks to the environment in relation to accidents involving spills of this product in the ecosystems, tauting socioeconomic and environmental damages. The main objective of this research is to identify and analyze the geomorphological attributes that contribute to the environmental sensitivity in fluvial environments in a section of the Rio Araquá (SP). From the identification of the Environmental Sensitivity Indexes to Oil (ESI), using the geomorphological fluvial parameters of the Araquá River, located in the city of São Pedro (SP), for this river the Environmental Fluvial Sensibility Mapping to Oil was developed. The study area presented a high sensitivity index due to the presence of numerous alluvial deposits with presence of vegetation. These deposits are due to the meandering dynamics of the fluvial course and also to the innumerable changes caused by human actions, mainly mining activities. The geomorphological mapping was fundamental for the analysis and identification of the geomorphological features and for the determination of the ESI features. Finally, the importance of the work is highlighted, since studies related to environmental sensitivity to oil in fluvial environments in the scale worked on in this research are still underdeveloped in Brazil.

Keywords. Oil, Oil Spills, Environmental Sensitivity Index, ESI mapping, Geomorphology mapping.

1 Introdução

Atualmente, o petróleo é uma das principais fontes de energia utilizada pelo homem. Entretanto, a intensa utilização do petróleo acarreta riscos ao meio ambiente, devido à possibilidade de acidentes envolvendo vazamentos. O petróleo apresenta um alto teor de toxicidade, sendo altamente inflamável e nocivo. Segundo Mariano (2001), os impactos do petróleo podem gerar danos sobre a saúde, como irritação nos olhos, problemas no sistema cardiovascular e respiratório, bem como prejuízos irreversíveis à vegetação e aos ecossistemas, além de danos socioeconômicos e riscos a população.

Os acidentes envolvendo derrames de óleo estão diretamente relacionados ao processo de transporte dos hidrocarbonetos. Os tipos de transporte dividem-se em terrestres, como o ferroviário, rodoviário e dutoviário, e transportes aquaviários, que utilizam as vias hídricas para navegação. Os desastres ocorrem devido a colisões de navios transportadores, rompimento de dutos, explosões em plataformas e acidentes envolvendo veículos transportadores (Araújo *et al.*, 2002).

Dentro desse contexto, as Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo (Cartas SAO) constituem-se em ferramentas úteis para o gerenciamento de danos causados pelos vazamentos. De acordo com Jensen *et al.* (1998), as Cartas SAO representam importantes instrumentos de planejamento e resposta a derrames de óleo, cujo objetivo primordial é a localização de áreas mais sensíveis, visando a proteção desses locais e estabelecimento de estratégias adequadas de limpeza, bem como a redução dos possíveis impactos ambientais e sociais.

O conceito de Cartas SAO evoluiu a partir da década de 1970, período em que os Estados Unidos começaram a desenvolvê-las como elemento essencial aos planos de contingência para a proteção dos recursos naturais (Michel *et al.*, 1978). No Brasil, o Ministério do Meio Ambiente elaborou um documento intitulado “Especificações e normas técnicas para elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo” que apresentou um índice de sensibilidade do litoral (ISL) adaptado às condições dos ambientes

brasileiros, com uma escala de variação crescente, baseado no manual norte-americano elaborado pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). As Cartas SAO fornecem também informações sobre os aspectos bióticos e socioeconômicos, que são representados por ícones específicos (Ministério do Meio Ambiente, 2002).

Segundo Ministério do Meio Ambiente (2002), os estudos realizados sobre sensibilidade ambiental a derrames de petróleo focavam-se apenas nas regiões costeiras devido às dimensões dos acidentes nestas regiões. Entretanto, devido ao aumento de acidentes envolvendo veículos de transporte de óleo e derivados, verificou-se a necessidade de um maior conhecimento e identificação da sensibilidade ambiental das áreas terrestres, que não eram amplamente exploradas, pois eram consideradas pouco significativas. Ainda, segundo aqueles autores, os mapas de sensibilidade ambiental das regiões terrestres devem ser priorizados, pois se constituem em importantes ferramentas para auxiliar a reduzir as consequências ambientais em caso de vazamentos de petróleo e orientar os esforços de contenção, limpeza e remoção do óleo pela identificação da sensibilidade dos ecossistemas terrestres, seus recursos biológicos e atividades socioeconômicas que caracterizam a ocupação dos espaços e o uso dos recursos naturais.

A partir do exposto, o principal objetivo deste trabalho é identificar e analisar os atributos geomorfológicos que contribuem para a sensibilidade ambiental em ambientes fluviais em um trecho do Rio Araquá (SP). Optou-se por determinar como área de estudo um trecho do Rio Araquá, localizado no município de São Pedro, no Estado de São Paulo e, através da análise, identificação e mapeamento em detalhe das feições geomorfológicas de origem fluvial da região, foram estabelecidos os índices de sensibilidade ambiental das mesmas, e desenvolveu-se o mapa de sensibilidade ambiental ao óleo das feições geomorfológicas encontradas. Foram utilizadas como fundamentação teórica-metodológica as publicações internacionais referentes à sensibilidade ambiental ao óleo em ambientes fluviais de Hayes (1995, 1977), Zengel *et al.* (2001) e Mendoza-Cantú *et al.* (2011). Estas publicações mostraram-se eficazes, pois abordam métodos de

análise da sensibilidade ao óleo de feições tipicamente fluviais, bem como, apresentam propostas de classificação destes ambientes em termos de sensibilidade ao óleo. Também foram utilizadas publicações nacionais referentes à sensibilidade ambiental ao óleo em ambientes fluviais, como os estudos de Beaumord & Ferreira (2008) e Araújo *et al.* (2006), que contribuíram para identificação de índices de sensibilidade ambiental de feições fluviais típicas nacionais. Por fim, consultou-se também Costa (2013) que realizou um estudo amplo sobre todos os autores supracitados.

2 Sensibilidade ao Óleo em Ambientes Fluviais: breve revisão histórica

Os estudos envolvendo a sensibilidade ambiental ao óleo em ambientes fluviais encontram-se com maior destaque em publicações internacionais. Os mapeamentos realizados nos estudos de Hayes *et al.* (1997) focaram-se na construção de uma proposta para os rios americanos. A classificação do nível de sensibilidade ambiental dos trechos estudados foi elaborada a partir de dois critérios principais: o grau de dificuldade em conter ou recuperar a área em caso de acidentes envolvendo derrames e a sensibilidade e a vulnerabilidade das zonas alagáveis associadas (Hayes *et al.*, 1997).

Outro critério utilizado por Hayes *et al.* (1997) é a abundância de áreas alagáveis. Em seu estudo, os rios foram organizados em dois tipos: rios que possuem a maior parte de suas águas em regiões montanhosas e rios que possuem a maior parte de suas águas em regiões de planícies. Os rios cujas águas localizam-se em áreas montanhosas foram classificados como menos sensíveis, pois suas várzeas são mais restritas que as várzeas dos rios das regiões de planície, fato que diminuiria a dimensão atingida pelo óleo. Além disto, a maior velocidade das águas, decorrente da maior declividade destas regiões, favorece o transporte e a remoção do óleo.

Zengel *et al.* (2001) elaboraram mapeamentos voltados principalmente para a sensibilidade de rios na em Porto Rico. Foram mapeados dezesseis rios do país, escolhidos de acordo com os critérios de largura do canal, riscos de possíveis derrames e potenciais consequências ambientais.

A classificação de sensibilidade utilizada para o mapeamento dos corpos de água selecionados foi baseada nos seguintes fatores: grau de dificuldade previsto para a contenção e recuperação do óleo derramado a partir da superfície da água, grau de mistura de óleo na coluna de água, potencial de retenção de óleo (por exemplo, a penetração do óleo em sedimentos de granulação grossa nas barras ou entre grandes pedregulhos e aprisionamento de petróleo por vegetação em bancos), facilidade de limpeza, sensibilidade e vulnerabilidade das zonas alagáveis associadas, uso humano e sensibilidade e vulnerabilidade da biota nativa (Zengel *et al.*, 2001). Os autores também consideraram a dinâmica das correntes, o que dificulta a remoção de óleo, pois este se misturaria com as águas do canal.

Hayes *et al.* (1995) propuseram uma metodologia de avaliação de sensibilidade de todos os corpos d'água dos EUA, desde os grandes rios e lagos até os pequenos córregos e lagoas. Segundo os autores, deve ser utilizada a mesma metodologia de ambientes costeiros para os ambientes lacustres, estuarinos e para os grandes rios, e uma abordagem de bacia hidrográfica para os pequenos canais, visto que nestes ambientes, um pequeno derrame pode prejudicar todo o sistema envolvido.

A metodologia proposta para os grandes rios baseia-se na *Environmental Sensitivity Index* (ESI), considerando os aspectos geomorfológicos presentes nos ambientes e nas características de vegetação das áreas inundáveis, com presença de gramíneas ou arbustos. O Quadro 1 representa a proposta de classificação de sensibilidade das regiões estuarinas, lacustres e fluviais, em que o índice de sensibilidade proposto varia de 1, menor sensibilidade, a 10, maior sensibilidade.

Hayes *et al.* (1995) elaboraram uma metodologia diferente para as bacias hidrográficas, pois consideram que em córregos estreitos e rasos um pequeno derrame pode atingir todo o sistema e, portanto, este ambiente deve ser analisado de forma integrada, e não separando a sensibilidade de cada componente presente.

Foram elaboradas três classes para os pequenos rios, estas baseadas no gradiente e na descarga dos ambientes, na influência da biota no trecho, no tempo de residência do óleo, na mistura do

Quadro 1. Proposta de classificação de sensibilidade a derrames de óleo em ambientes estuarinos, lacustres e fluviais (Hayes et al., 1995).

Chart 1. Proposal of sensitivity classification to oil spills in estuarine, lacustrine and fluvial environments (Hayes et al., 1995).

ISA	Estuários	Lagos	Rios (grandes lagos)
1A	Costões rochosos expostos	Paredões rochosos expostos	Bancos rochosos expostos
1B	Paredões artificiais expostos	Estruturas artificiais rígidas expostas	Revestimentos sólidos verticais
2	Plataformas de argila erodidas pelas ondas	Penhascos rochosos com depósitos de tatus, expostos	Bancos de rochas, lajes de leito rochoso
3	Praias de areia fina	Escarpas erodidas em sedimentos inconsolidados	Margens erodidas em sedimentos inconsolidados
4	Praias de areia grossa	Praias de areia	Barras de areia e bancos de baixa declividade
5	Praias mistas de areia e cascalho	Praias mistas de areia e cascalho	Praias mistas de areia e cascalho de baixa declividade
6A	Praia de cascalho	Praia de cascalho	Praia de cascalho de baixa declividade
6B	Enrocamentos	Enrocamentos	Enrocamentos
7	Planícies de maré expostas	Planícies de maré expostas	-
8A	Costões rochosos abrigados	Escarpas abrigadas em rocha, lama ou barro	Escarpas íngremes vegetadas
8B	Estruturas artificiais sólidas abrigadas	Estruturas artificiais sólidas abrigadas	Estruturas artificiais sólidas abrigadas
9A	Planícies de maré abrigadas	Bancos de vegetação herbácea abrigados	Bancos de vegetação herbácea
9B	-	Bancos de areia ou lama abrigados	Substrato lamoso (não vegetado)
10A	Pântanos salobros e salgados	-	-
10B	Manguezais	-	-
10C	Pântanos de água doce (vegetação herbácea)	Pântanos de água doce (vegetação herbácea)	Pântanos de água doce (vegetação herbácea)
10D	Pântanos de água doce (vegetação de mata)	Pântanos de água doce (vegetação de mata)	Pântanos de água doce (vegetação de mata)

óleo na coluna d'água e no tipo de resposta que o ambiente apresenta ao acidente. Os canais podem mudar de uma classe para outra, dependendo do gradiente que apresentam e do substrato geológico. Também deve ser considerado o caso dos canais intermitentes ou perenes, bem como, reconsiderar a classificação em situações de climas extremos. A presença de pequenos ambientes, como pântanos isolados ou pequenas lagoas precisam ser representados (Hayes *et al.*, 1995). As três classes elaboradas pelos autores são: (i) Tipo A: apresenta gradiente moderado, canais relativamente retos, presença de corredeiras intermitentes, com barras de areia e cascalho e uma moderada zona de vegetação ribeirinha. Curto tempo de residência do óleo, poucos locais para contenção e coleta. Razoável mistura do óleo na coluna d'água; (ii) Tipo B: apresenta gradiente relativamente baixo, com canais meandrantos, correntes moderadas, barras arenosas nas porções internas das curvas dos meandros, amplas zonas de vegetação ribeirinha. Médio tempo de residência do óleo, vários locais para coletar o óleo, a mistura na coluna d'água é menor se comparada com a anterior; e, (iii) Tipo C: apresenta alto gradiente, com correntes muito fortes, areias grossas no leito do rio e nos bancos.

Curto tempo de residência do óleo, grande mistura do óleo na coluna d'água, presença de muitas corredeiras. Quase não há local para conter e coletar o óleo.

Mendoza-Cantú *et al.* (2011) elaboraram uma metodologia para a realização do mapeamento dos rios mexicanos Coatzacoalcos e Tonalá, localizados no sudeste do Estado de Vera Cruz. Estes autores consideraram variáveis relacionadas aos aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos. O quadro 2 representa as variáveis selecionadas para cada condição e os seus critérios de interpretação.

A partir destes critérios, Mendoza-Cantú *et al.* (2011) elaboraram uma escala de vulnerabilidade que varia de 1 a 5, onde 1 é muito vulnerável e 5 menos vulnerável. Também foi realizada uma análise hierárquica ponderada em SIG para a atribuição dos índices, em que o aspecto físico tem peso de 40%, assim como o biótico, e os aspectos socioeconômicos correspondem a 20%.

No Brasil, a primeira metodologia relacionada à sensibilidade ambiental ao óleo em ambientes fluviais foi desenvolvida por Araújo *et al.* (2006) para os rios amazônicos de Manaus e Coari. A partir das informações das feições fluviais amazônicas e de adaptações da metodologia proposta

Quadro 2. Variáveis selecionadas para determinação de classes de nível de vulnerabilidade e a descrição dos seus respectivos critérios de interpretação (Mendoza-Cantú *et al.*, 2011).

Chart 2. Variables selected for determination of vulnerability level classes and description of their respective interpretation criteria (Mendoza-Cantú *et al.*, 2011).

Nível de vulnerabilidade	Descrição
I – Muito alto	<ul style="list-style-type: none"> Baixas planícies acumulativas permanentemente inundadas (áreas alagadas) Áreas naturais protegidas Assentamentos humanos até 15 mil habitantes Corpos d'água
II – Alto	<ul style="list-style-type: none"> Mangues Pântanos fluviais acumulativos e lagos de planícies (áreas alagadas)
III – Médio	<ul style="list-style-type: none"> Alta e média floresta perene tropical com vegetação secundária
IV – Baixo	<ul style="list-style-type: none"> Planície costeira acumulativa (campo de dunas) Planície costeira acumulativa (praias de areia) Agricultura com culturas anuais Mista
V – Muito baixo	<ul style="list-style-type: none"> Pastagens cultivadas e induzidas Culturas semi perenes e perenes Culturas de plantação Agricultura alagada residual

pelo Ministério do Meio Ambiente, em 2002, para ambientes costeiros, desenvolveu-se um índice de sensibilidade fluvial com variação de 1 a 10 (1 menor sensibilidade e 10 maior) apresentados no Quadro 3.

Beaumord & Ferreira (2008) realizaram um mapeamento de sensibilidade ambiental focada em outra realidade brasileira, nos cursos de água da bacia do Rio Canhanduba, localizada no município de Itajaí, em Santa Catarina. Neste local foi instalada uma base de distribuição da Petrobras Transporte S/A – TRANSPETRO, de onde se distribui diversos dutos. A realização do mapeamento e a obtenção dos Índices de Sensibilidade Ambiental basearam-se nas informações da publicação “Especificações e Normas Técnicas para a Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo”, do Ministério do Meio Ambiente do ano de 2002, as quais foram adaptadas para serem utilizadas em feições fluviais. De acordo com Beaumord & Ferreira (2008) a classificação da sensibilidade ambiental dos segmentos foi baseada no conhecimento de características geomorfológicas, dos constituintes das feições marginais e das características das margens fluviais no que se refere a aspectos bióticos e de uso e ocupação.

Quadro 3. Proposta de índice de sensibilidade ambiental para ambientes fluviais conforme Araújo *et al.* (2006).

Chart 3. Proposal of environmental sensitivity index for fluvial environments according to Araújo *et al.* (2006).

Índex	Feição
1	Estruturas artificiais
2	Laje ou afloramento rochoso
3	Corredeira/ cachoeira
4	Escarpa/ Barranco
5	Praia ou banco de areia/ seixo exposta
6	Praia ou banco de areia/ seixo abrigada
7	Praia ou banco de lama exposto
8	Praia ou banco de lama abrigado
9	Zona de confluência de rios e lagos
10a	Banco de macrófitas aquáticas
10b	Vegetação alagada (igapós, várzea, chavascal, campo etc.)

Através desses aspectos foi elaborado o Índice de Sensibilidade Ambiental, adaptado do Índice de Sensibilidade do Litoral, proposto pelo Ministério do Meio Ambiente. O índice possui escala de 1 a 10, sendo o valor maior, representativo de um maior grau de sensibilidade. A análise foi obtida através da aquisição das características geomorfológicas, biológicas, sociais e econômicas e feições marginais. O mapeamento de sensibilidade ambiental foi elaborado a partir da montagem de uma base cartográfica em plataforma computacional georreferenciada, sendo esta base integrada a um Sistema de Informações Geográficas – SIG (Beaumord & Ferreira, 2008).

Foram analisados e mapeados quatro trechos da área, cujos resultados obtidos encontram-se no quadro 4.

Através destes resultados foi possível inferir algumas características acerca da sensibilidade ambiental em ambientes fluviais.

De acordo com os autores, em caso de derrames nos trechos estudados, devido à baixa energia das correntes fluviais, a remoção natural de óleo seria dificultada; além disso, essa baixa energia gera um substrato de fundo com maior estabilidade, e que, por consequência, abriga uma maior variedade de espécies. O tipo de substrato determina os parâmetros, tais como permeabilidade, mobilidade do sedimento e permanência do óleo. Dessa forma a infiltração do óleo será mais profunda quanto mais grosseira for a granulometria dos sedimentos e quanto maior a esfericidade e uniformidade dos grãos (Beaumord & Ferreira, 2008).

Outro fator importante analisado por Beaumord & Ferreira (2008) diz respeito à inclinação das margens. Nos trechos analisados às margens encontradas eram geralmente altas, fazendo com que as áreas possivelmente atingidas pelo óleo sejam menores.

A partir do exposto, o presente trabalho utilizou como embasamento os estudos citados anteriormente, e a partir destes foi elaborada a Carta de Sensibilidade das Feições Geomorfológicas da área de estudo, utilizando os parâmetros que melhor se adequaram às características encontradas na região.

Quadro 4. Características fluviais analisadas e os respectivos resultados de sensibilidade ambiental ao óleo obtidos para os trechos analisados (Beaumord & Ferreira, 2008).

Chart 4. Fluvial characteristics analyzed and the respective results of environmental sensitivity to the oil obtained for the analyzed sections (Beaumord and Ferreira, 2008).

Caract. Físicas do Corpo d'água	SAO01	SAO02	SAO03	SAO04
Correntes Fluviais	Fraca	Média	Fraca	Fraca
Profundidade Média do Trecho	90 cm	100 cm	41 cm	120 cm
Largura Média do Trecho	3,80 m	3,00 m	3,20 m	3,40 m
Bancos de Areia	Nenhum	Nenhum	Um banco	Nenhum
Substrato de Fundo	Argiloso	Argiloso	Argiloso	Argiloso
Caract. Físicas das Margens	SAO01	SAO02	SAO03	SAO04
Altura Média	2,40 m	2,50 m	2,00 m	1,50 m
Declividade da Margem	Alta	Alta	Média	Média
Tipo de Substrato	Argilo-arenoso	Argilo-arenoso	Argilo-arenoso	Argilo-arenoso
Feições Marginais	SAO01	SAO02	SAO03	SAO04
Vegetação	Mata Ciliar Degradada e Cultivo de Arroz			
Impactos Antrópicos	Desmatamento devido plantações	Desmatamento devido plantações	Desmatamento devido plantações	Desmatamento devido plantações
Índice de Sensibilidade Ambiental	SAO01	SAO02	SAO03	SAO04
	7	6	9	6

3 Área, material e métodos

A área de estudo consistiu em um setor do Rio Araquá, localizado na porção sul do município de São Pedro, no setor centro-oriental do Estado de São Paulo, entre as coordenadas geográficas de 22°34'1,40" e 22°38'53,51" de latitude sul e 47°51'7,30" e 47°52'12,32" de longitude oeste (Fig. 1). Os limites da área escolhida para o estudo foram determinados de forma a abarcarem as feições geomorfológicas de origem fluvial; assim, delimitou-se a região através da curva de nível correspondente a 10 m de altitude a partir da calha do Rio Araquá. Para a obtenção desses dados foram utilizadas as folhas topográficas na escala 1:10.000 do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo, obtidas através do Instituto Geológico do Sistema Ambiental Paulista de São Paulo. Estas folhas foram georreferenciadas e vetorizadas no *software*

ArcGIS, onde também foi realizada a mudança de DATUM de Córrego Alegre para WGS 1984. Desta forma, para a realização do mapeamento, considerou-se a faixa de terrenos cobertos pelas duas primeiras curvas de nível a partir do curso d'água.

3.1 Caracterização da área

De acordo com Sanchez (1971), o município de São Pedro, em quase sua totalidade, insere-se na Depressão Periférica Paulista, especificamente na Zona do Médio Tietê, com uma pequena parte do município ocupando o *front* e o reverso da *cuesta*, localmente conhecidos como "serra" de São Pedro, que demarca a passagem da Depressão Periférica para o Planalto Arenítico Basáltico.

As características geomorfológicas da Baía do Rio Araquá correspondem, segundo o IPT (1981), a três unidades morfológicas distintas:

(i) Colinas Médias - caracterizam-se como relevo do tipo colinoso, com amplitudes locais inferiores a 100 m e declividades de encostas inferiores a 15%, possuindo interflúvios com áreas entre 1 a 4 km²; (ii) Morrotes Alongados e Espigões - com amplitudes locais inferiores a 100 m e declividades superiores a 15%; e as (iii) Escarpas Festonadas - constituem-se em relevo de transição entre a Depressão Periférica e as Cuestas Basálticas, com presença de amplitudes locais superiores a 100 m e declividades de encostas acima de 15%.

De acordo com Carpi Júnior (1996), as unidades geomorfológicas que se encontram na área de estudo correspondem a planícies colúvio-aluvial, pedimentos dissecados e pedimentos tabuliformes (Fig. 2).

A unidade planície colúvio-aluvional apresenta-se como o compartimento mais rebaixado da área, com altitudes abaixo de 500 m. Abrange as planícies de inundação ou várzeas (Fig. 2). Nesta unidade predominam os processos deposicionais, destacando-se formas típicas relacionadas à dinâmica fluvial, tais como vales de fundo plano, terraços aluviais, entre outros (IPT, 1981).

A unidade pedimentos dissecados (Fig. 2) compreende interflúvios amplamente desgastados pela ação erosiva. Destaca-se uma rede de drenagem densa e formas de relevo com rupturas de declive e vertentes escalonadas com patamares; suas altitudes variam entre 600 e 900 m e apresenta classes variadas de clinografia, atingindo classes intermediárias em relação a dissecação vertical e

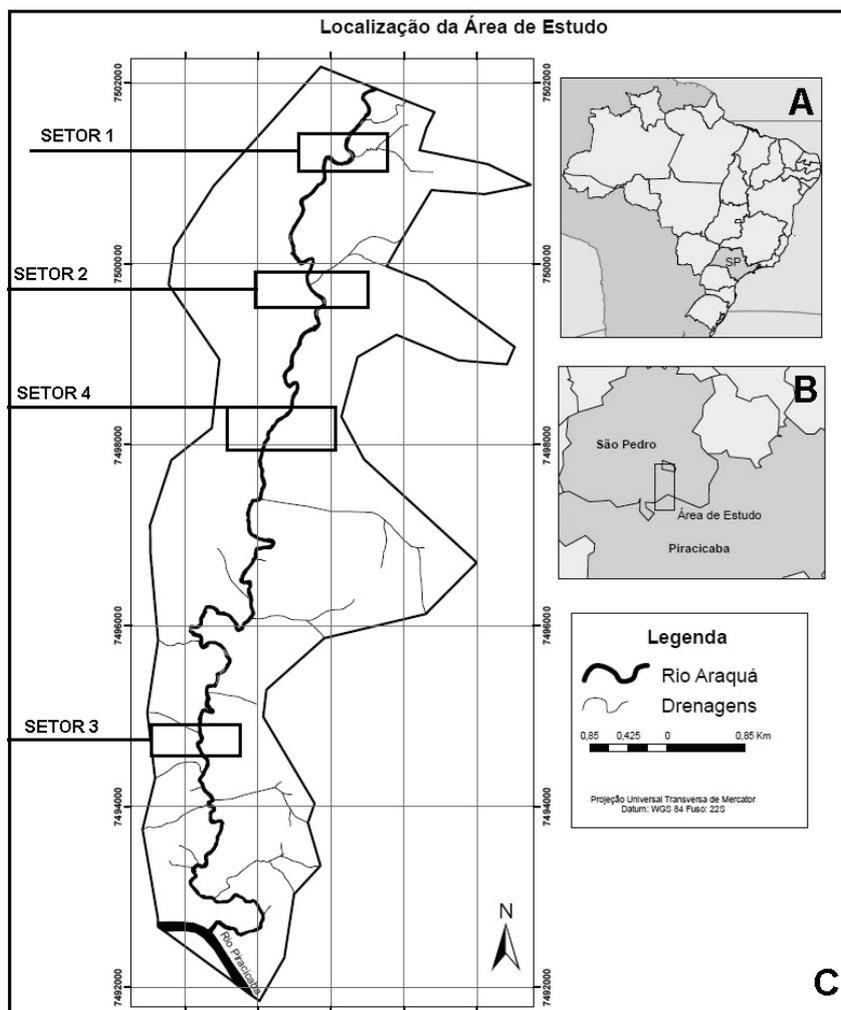


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. A) Localização do Estado de São Paulo no Brasil; B) Localização da área de estudo nos municípios de São Pedro e Piracicaba; C) Localização da área de estudo.

Figure 1. Map of the study area. A) Location of the state of São Paulo in Brazil; B) Location of the study area in the municipalities of São Pedro and Piracicaba; C) Location of the study area.

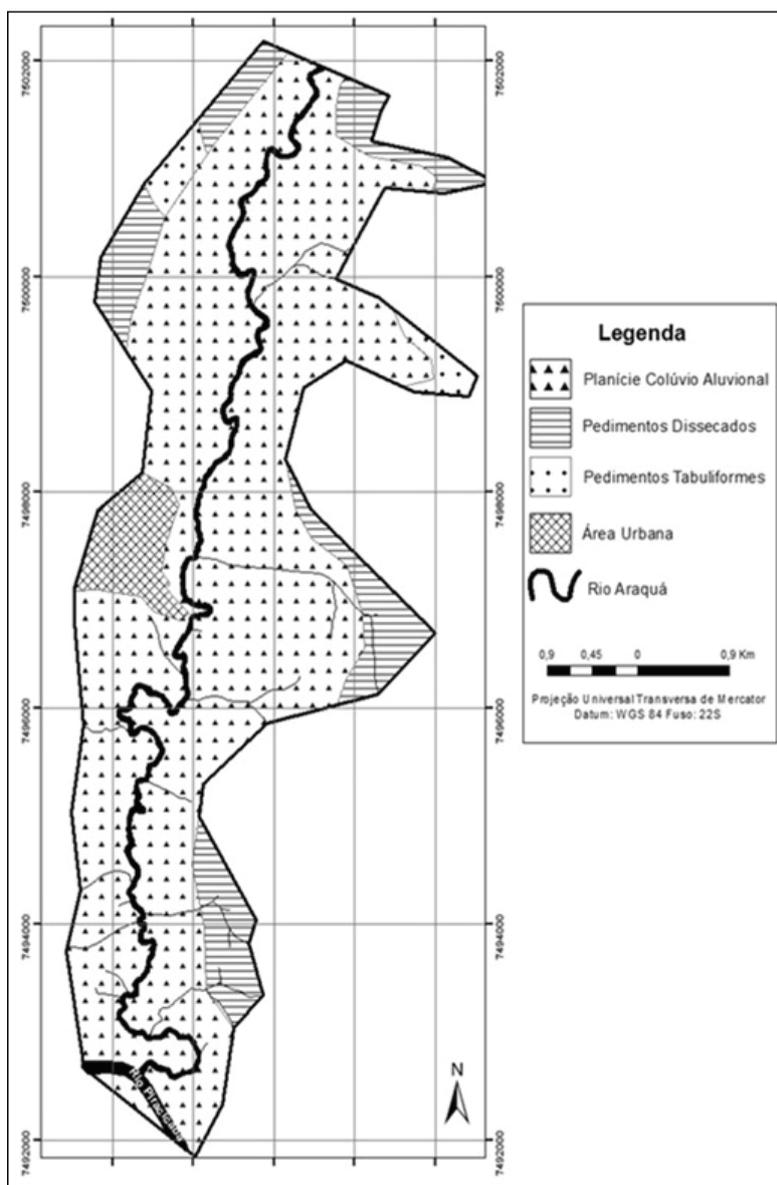


Figura 2. Unidades geomorfológicas presentes na área de estudo (Modificado de Carpi Júnior, 1996).
 Figure 2. Geomorphological units present in the study area (Modified from Carpi Júnior, 1996).

valores médios, forte e muito fortes em relação à dissecação horizontal (Carpi Júnior, 1996).

A unidade pedimentos tabuliformes (Fig. 2) caracteriza-se por interflúvios com topos planos ou levemente convexizados, sub-tabulares, pouco dissecados e de extensões variadas. Apresenta altitude média de cerca de 600 m, podendo chegar a um máximo de 700 m. A unidade pedimentos tabuliforme possui fraca densidade de drenagem, e o escoamento superficial concentrado através de canais pluviais, vertente abaixo dos interflúvios, marca o contato com a unidade pedimentos dissecados (Carpi Júnior, 1996).

Geologicamente, a área de estudo pertence à Bacia Sedimentar do Paraná. De acordo com o

IPT (1981), as unidades litoestratigráficas da área compreendem a Formação Corumbataí, menos permeável, com siltitos, argilitos e folhelhos cinzentos a roxo acinzentado, possuindo cimentação calcárea em sua parte superior; seguindo-se abaixo uma sucessão de camadas siltsas alternadas com lâminas ou delgadas camadas cuja litologia varia entre argilosa e arenosa fina. Na área de estudo também há presença da Formação Piramboia, mais permeável, representada por sequência de camadas arenosas, de granulação média a fina; localmente com arenitos grossos e conglomeráticos, ou então, lâminas localizadas de silte e argila (Fig. 3).

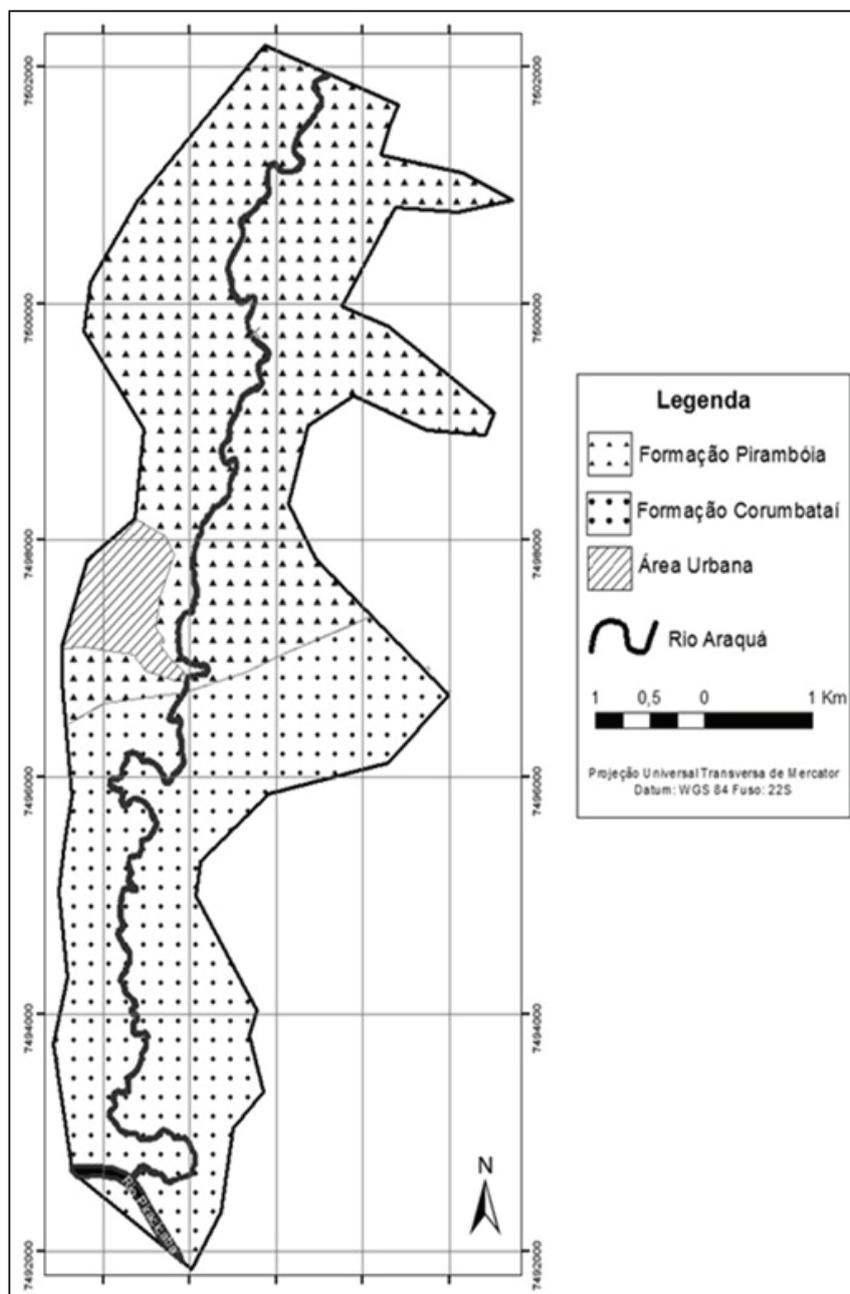


Figura 3. Unidades geológicas presentes na área de estudo (modificado de IPT, 1981).

Figure 3. Geological units present in the study area (modified from IPT, 1981).

Ocorrem na área quatro diferentes tipos de solos: nas áreas de unidade geomorfológica Planície Colúvio-Aluvial, ocorrem solos aluviais, pouco evoluídos, com presença de hidromorfismo, característica própria de terrenos frequentemente inundáveis, e Gleissolos, associados aos depósitos recentes; nas unidades Pedimentos Dissecados predominam os Argissolos, especialmente aqueles de textura arenosa-média e que estão associados à Formação Piramboia e ao relevo mais dissecado, com declividades acentuadas. Nas proximidades do município São Pedro, estes solos mesclam-se

aos Neossolos Litólicos, que compreendem solos rasos, pouco evoluídos, com profundidades inferiores a 50 cm até o substrato rochoso, com dificuldade de penetração de raízes por parte das plantas, sendo mais indicados para reservas naturais, reflorestamentos e pastagens. São atribuídos aos intensos processos erosivos, que tem levado à retirada das camadas superficiais do solo, permitindo o afloramento do substrato rochoso; e na unidade Pedimentos Tabuliformes há presença de Neossolos Quartzarênicos, caracterizados por solos profundos, quartzosos, com textura areia ou areia

franca ao longo de pelo menos 2 m de profundidade, com pouca capacidade de armazenamento de água e pobreza em nutrientes para as plantas, sendo mais indicadas ao reflorestamento, com restrições ao uso agrícola (Oliveira *et al.*, 1992) (Fig. 4).

Em relação aos aspectos climáticos, de acordo com Sanchez (1971), registra-se clima tropical típico de área de transição, no qual ocorre o conflito das massas de ar vindas do leste, a Tropical Atlântica, do noroeste, a Equatorial e Tropical Continental, e as do sul, ou seja, as Polares. O município de São Pedro apresenta um período chuvoso nos primeiros e últimos meses do ano, e um período sensivelmente mais seco nos demais meses. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região consiste no tipo Tropical de Altitude – Cwa – que apresenta como características principais um verão quente e úmido e um inverno frio e seco (Ayoade, 2010).

Em relação ao uso da terra e vegetação, de acordo com Facincani (1995), a área da Bacia do Rio Araquá possui áreas recobertas por cerrados e resquícios da vegetação original correspondente a Floresta Latifoliada em locais onde predominam declives acentuados. A vegetação original em grande parte foi devastada dando lugar a pastagens, cultivo de cana, laranja, reflorestamento e culturas anuais.

3.2 Materiais e métodos

A base cartográfica da área de estudo, necessária para a realização dos mapeamentos, foi organizada a partir da coleta de cartas topográficas e de fotografias aéreas. As cartas topográficas utilizadas, referentes ao Plano Cartográfico do Estado de São Paulo, constituíram-se nas seguintes folhas: Bairro do Pilão (SF-23-Y-A-IV-1-SE-A), Águas de São Pedro II (SF-23-Y-A-IV-1-NE-E) e Ribeirão da Grama (SF-23-Y-A-IV-1-NE-C), na escala 1:10.000, fornecidas pela Divisão de Geografia da Coordenadoria de Ação Regional da Secretaria de Economia e Planejamento do Governo do Estado de São Paulo.

Para a elaboração do mapa geomorfológico detalhado foram utilizadas fotografias aéreas digitais que englobam o município de São Pedro, com

resolução de 0,45 cm, obtidas junto a Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano – EMPLASA. Para a realização da digitalização, vetorização dos dados e edição final do mapeamento foi utilizado o *software* ArcGIS 9.3 (ESRI, 2014).

As feições geomorfológicas foram identificadas a partir da interpretação de fotografias aéreas, considerando aspectos importantes para definir a sensibilidade de tais feições ao óleo, tendo por base as orientações de Cunha (2001), adaptadas das propostas de Tricart (1965) e Verstappen & Zuidam (1975). Tricart (1965) afirma que as cartas geomorfológicas detalhadas devem conter as seguintes informações: morfometria, morfografia, morfogênese e cronologia.

A morfometria compreende aos atributos geométricos da forma de relevo e são fundamentais na apreensão de sua estrutura morfológica. A morfografia é representada através de símbolos que localizam e especializam as formas de relevo, representando a extensão e os processos que as originaram, bem como o momento em que as formas se desenvolveram, identificando a morfogênese e a cronologia. Assim, cada forma identificada na área de estudo foi agrupada segundo sua origem em grandes grupos de modelados, sendo esses: Feições Hidrográficas, Formas de Acumulação, Modelado de Entalhe e Formas de Origem Denudativa.

O mapeamento abrangeu as principais feições geomorfológicas de origem fluvial da área e, a partir da análise destas feições, realizou-se um estudo do seu significado em termos de sensibilidade ambiental a derrames de óleo. Também foram identificadas feições como formas de origem denudativa, modelado antrópico e alterações na topografia, que estavam diretamente relacionados com os processos que ocorrem nas feições geomorfológicas fluviais da região.

A figura 6 apresenta as feições encontradas na área de estudo e os critérios utilizados para identificá-las nas fotografias aéreas.

A partir da identificação destas feições foi realizada a vetorização e edição dos dados através do *software* ArcGIS 9.3. As feições geomorfológicas foram classificadas em pontos, linhas e áreas e, a partir desta classificação, criou-se um *shapefile* no ArcCatalog para cada elemento representativo do

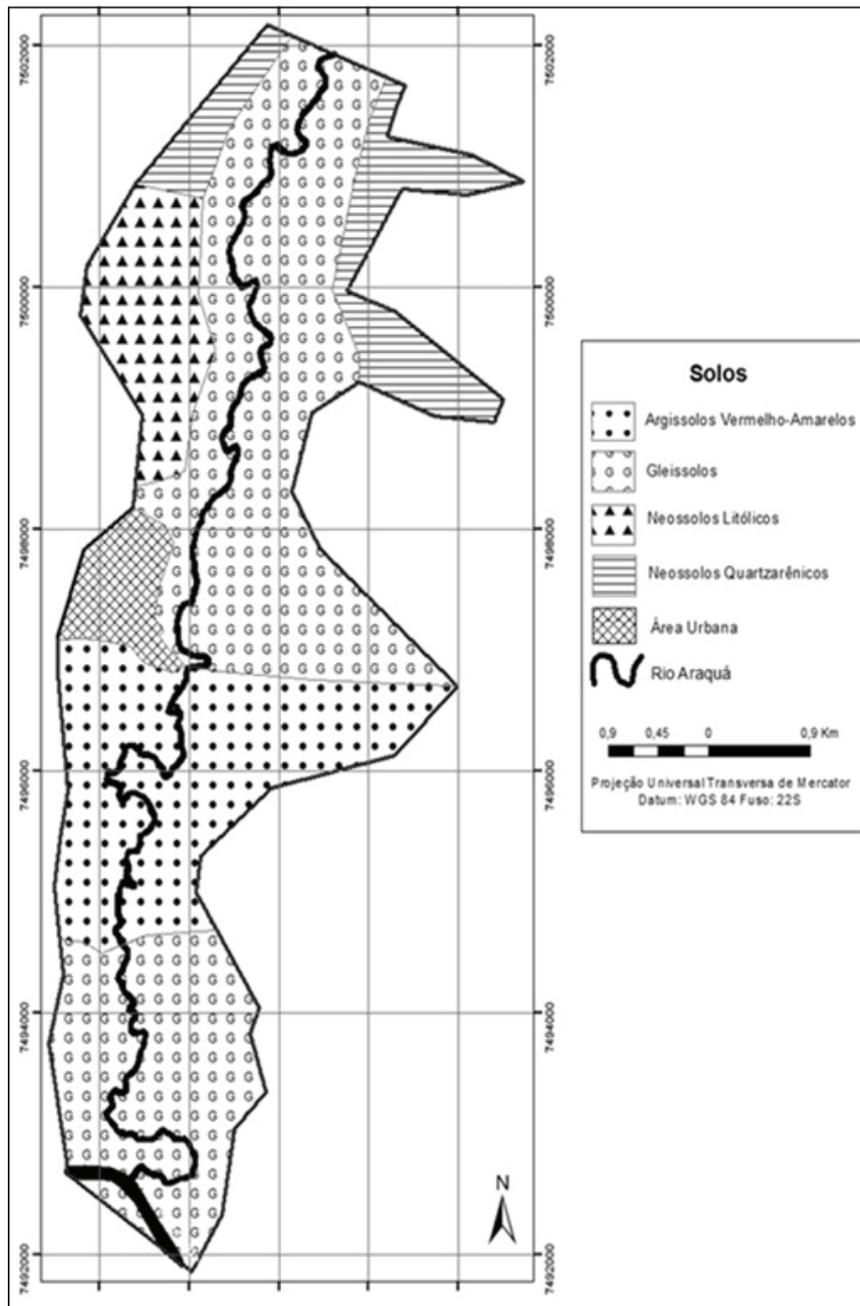


Figura 4. Tipos de solos presentes na área de estudo (modificado de Carpi Júnior, 1996).
 Figure 4. Types of soils present in the study area (modified from Carpi Júnior, 1996).

relevo. As simbologias foram construídas de acordo com a proposta de Paschoal *et al.* (2010), utilizando o ArcGIS 9.3.

Os elementos relacionados às áreas de acumulação e terraço fluvial foram identificados por meio de áreas. As feições como linhas de erosão, canais, meandros abandonados e voçoroca foram representadas por *shapefiles* configurados como linha. Para a identificação da mineração e os corpos d'água artificiais foram utilizados *shapefiles* configurados como pontos, com figuras adequa-

das a representação dessas características. Para a representação da erosão fluvial lateral utilizou-se do *shapefile* configurado como linha, pois nesse é possível ocultar a linha e trabalhar apenas com a sua finalização, que pode ter o símbolo modificado de acordo com a sua utilização (Paschoal *et al.*, 2010).

A partir da elaboração do mapeamento geomorfológico da área de estudo, foi construída a Carta de Sensibilidade das Feições Geomorfológicas ao Derrame de Óleo. Para a realização deste

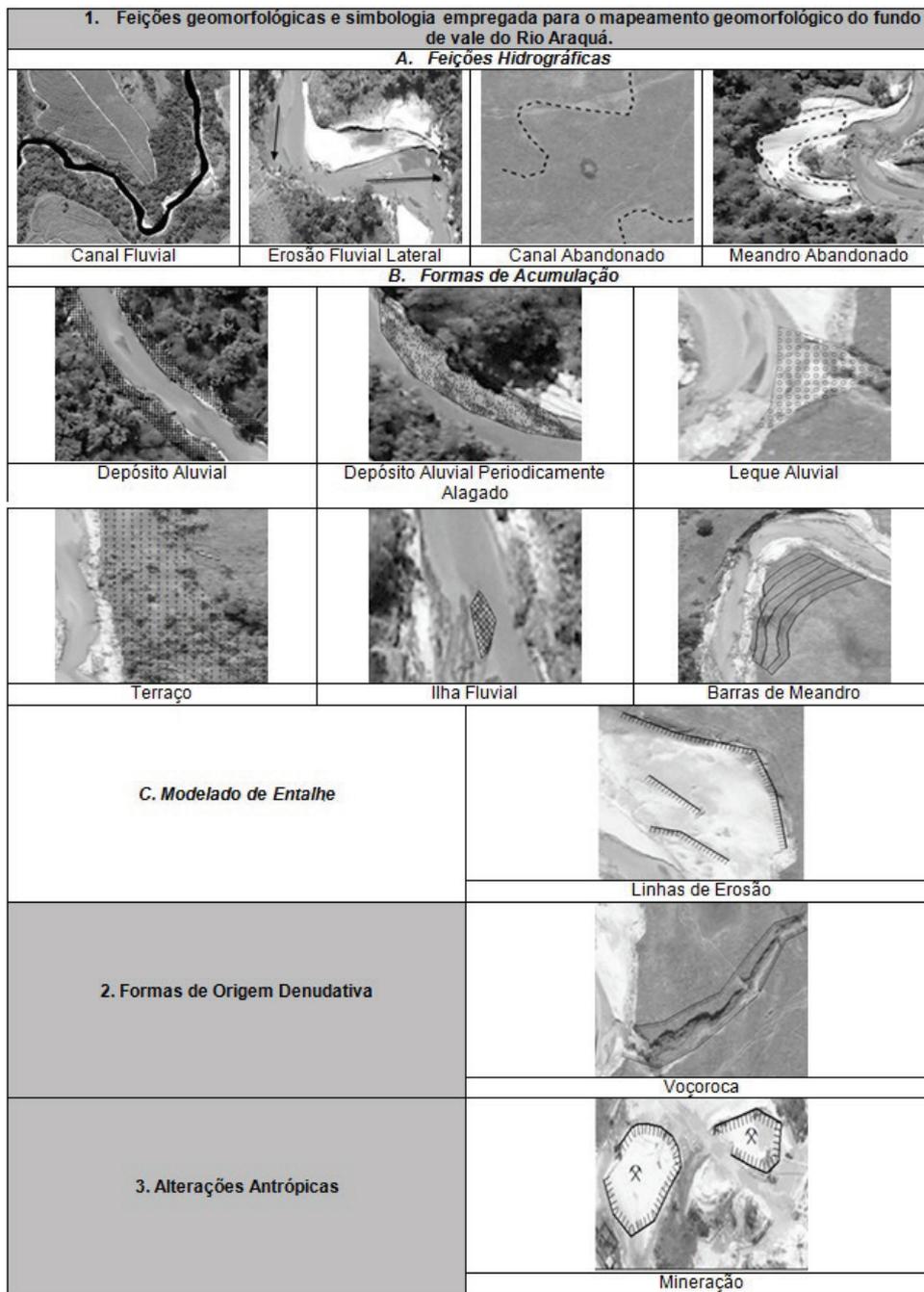


Figura 5. Feições geomorfológicas e simbologia empregada para o mapeamento geomorfológico do fundo de vale do Rio Araquá. A) Feições Hidrográficas; B) Formas de Acumulação; C) Modelado de Entalhe.
 Figure 5. Geomorphological features and symbology used for the geomorphological mapping of the Araquá River valley bottom. A) Hydrographic features; B) Forms of Accumulation; C) Modeling of Notch.

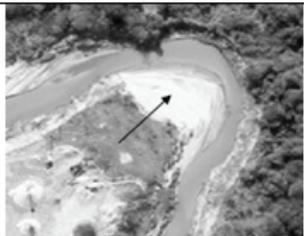
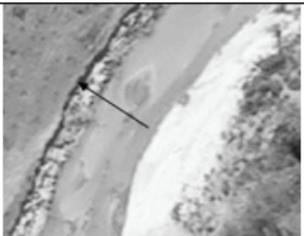
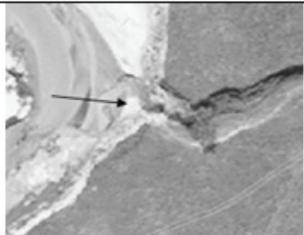
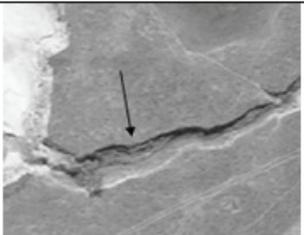
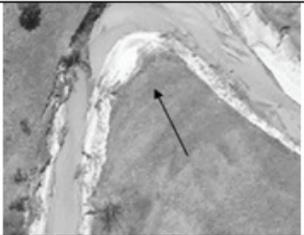
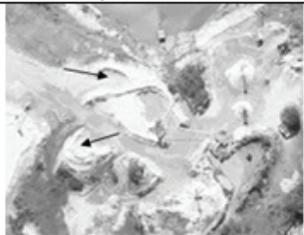
Feições encontradas na área de estudo e os aspectos morfológicos utilizados para sua identificação		
		
<p>Depósitos Aluviais Coloração em tons de branco, nas margens do rio.</p>	<p>Depósitos Aluviais Periodicamente Alagados Coloração cinza médio e claro, nos limites da calha fluvial.</p>	<p>Linhas de Erosão Formações lineares em tons de coloração preta e cinza escuro no interior dos depósitos aluviais.</p>
		
<p>Leques Aluviais Formato triangular, localizado em confluências de cursos d'água com o rio principal, coloração em tons de cinza médio e claro.</p>	<p>Meandro Abandonado Coloração em tons de cinza médio e escuro, formato circular nas margens do rio.</p>	<p>Voçoroca Formato linear no entorno de drenagens, coloração em tons de cinza escuro e preto.</p>
		
<p>Terraços Coloração em tons de cinza claro e médio, ao lado dos depósitos aluviais, em nível altimétrico superior ao dos depósitos atuais.</p>	<p>Ilhas Fluviais Manchas em formatos arredondados ou triangulares inseridos na calha fluvial.</p>	<p>Barras de Meandro Manchas lineares, em tons de cinza médio, próximas às margens do rio.</p>
		
<p>Mineração Formato circular em coloração branca.</p>	<p>Corpos d'água artificiais Tons de cinza escuro e médio, lagos em formatos retangulares, com bordas arredondadas.</p>	<p>Soleira Localizadas dentro do rio, em tons de cinza escuro e médio.</p>

Figura 6. Feições encontradas na área de estudo e os aspectos morfológicos utilizados para sua identificação.
 Figure 6. Features found in the study area and the morphological aspects used for its identification.

mapeamento também foram utilizadas as fotografias aéreas já citadas e o mapa geomorfológico, sendo a identificação da sensibilidade igualmente realizada através de meio digital. As áreas foram identificadas e mapeadas com seus respectivos índices de sensibilidade (ISA), de acordo com os critérios apresentados no Quadro 5.

De acordo com Hayes *et al.* (1997), as soleiras fluviais apresentam índice menor, classificando-se como três, pois são ambientes em constante exposição à ação do hidrodinamismo, sendo incapazes de acumular óleo de forma significativa, facilitando a limpeza desse ambiente.

As margens erosivas também apresentam um índice menor de sensibilidade, classificando-se como índice 3 quando forem seguidas por terraços e quatro quando forem seguidas por vertentes. Esta classificação ocorre devido aos processos de limpeza serem facilitados em ambientes que apresentam terraços. De acordo com Hayes *et al.* (1997), estas áreas apresentam substratos semi-permeáveis ao óleo, com baixa penetração, onde o mesmo pode ser acumulado em pequena quantidade; desta forma, a permanência do óleo se dá em médio prazo e não há necessidade de ações de limpeza, pois a mesma se processa de forma natural. Os depósitos aluviais que não apresentam vegetação recebem índice cinco, pois apresentam pequena extensão e maior facilidade de limpeza (Araújo *et al.*, 2006) se comparada a outros ambientes que apresentam cobertura vegetal.

As ilhas fluviais recebem índice 7. De acordo com Wieczorek (2006), a formação das ilhas fluviais está associada diretamente à vazão e competência do rio (tamanho máximo do material que pode ser movido) vinculada à acumulação de sedimentos em áreas de baixa ação hidrodinâmica e pequena declividade. Na área de estudo foram identificadas diversas ilhas fluviais, o que caracteriza um rio de pouca profundidade e com um hidrodinamismo baixo, o que dificulta a limpeza em caso de derrames de óleo.

Os depósitos aluviais alagados, leques aluviais e barras de meandro apresentam um alto índice de sensibilidade ambiental, atingindo o nível nove. Segundo Wieczorek (2006), os depósitos aluviais alagados são regiões geralmente saturadas por água, com pouco espaço intersticial, o que

limita a penetração do óleo, entretanto, possuem baixo hidrodinamismo, aumentando o tempo de permanência do óleo. Nesses ambientes a limpeza se torna difícil devido à tendência do óleo em se transferir às camadas mais profundas. Os leques aluviais também apresentam índice nove, pois há uma multiplicidade de direções em que o petróleo pode fluir e a probabilidade de contenção e de recuperação é dificultada (Hayes *et al.*, 1997). As barras de meandro devido aos constantes depósitos de sedimentos, recebe índice nove, pois o óleo pode ser soterrado, dificultando as ações de limpeza (Wieczorek, 2006).

Por fim, os depósitos aluviais recobertos por vegetação foram classificados com índice de sensibilidade maior, dividindo-se em depósitos aluviais com vegetação arbórea (ISA 10A) e depósitos aluviais com vegetação arbustiva (ISA 10B). Esses depósitos aluviais são constantemente alimentados por sedimentos, bem como apresentam diferentes tipos de substratos que determinam a probabilidade de permanência do óleo e abrigam uma maior variedade de espécies (Beaumord & Ferreira, 2008).

A vetorização e edição dos dados também foi realizada através do *software* ArcGIS 9.3. O índice de sensibilidade ambiental foi classificado em polígonos e linhas, e a partir desta classificação criou-se um *shapefile* no ArcCatalog para cada índice de sensibilidade ambiental.

Quadro 5. Feições mapeadas na área de estudo com o índice de sensibilidade ambiental ao óleo correspondente.
Chart 5. Characteristics mapped in the study area with the corresponding environmental sensitivity index to the oil.

Feições	ISA
Margem erosiva seguida por terraços e soleiras fluviais	3
Margem erosiva seguida de vertentes	4
Depósitos aluviais sem vegetação	5
Ilhas Fluviais	7
Depósitos aluviais alagados, leques aluviais e barras de meandro	9
Depósitos aluviais com vegetação arbustiva	10B
Depósitos aluviais com vegetação arbórea e meandros abandonados	10A

4 Resultados e discussões

O Rio Araquá apresenta uma complexa dinâmica morfohidrográfica, com amplas planícies aluviais bem desenvolvidas, com presença de trechos meandantes, alternando margens abruptas, nas porções mais ao sul da área de estudo, sujeitas a intensas atividades erosivas, marcadas por uma maior energia cinética da água; e margens de topografia mais suave, nas porções mais ao norte da área de estudo, marcadas por uma menor energia.

A evolução do sistema de meandros do curso originou diversas feições deposicionais ao longo do rio, como extensos depósitos aluviais em alguns setores periodicamente inundados, próximos às margens. Observam-se linhas de erosão que delimitam diferentes níveis de acumulação de sedimentos fluviais e processos de erosão fluvial lateral, que em muitos trechos alteraram significativamente o curso original do rio. Com o auxílio das cartas topográficas da região, datadas de 1979, foi possível verificar a significativa mudança do curso do Rio Araquá, o que pode ter colaborado para o desenvolvimento de retomadas erosivas que geraram voçorocas nas cabeceiras de afluentes, assim como meandros e canais abandonados.

Notou-se a presença de inúmeros canais fluviais conectados ao canal principal, os quais contribuem para o acúmulo de sedimentos. Registrou-se a presença de terraços fluviais e soleiras em alguns pontos da área de estudo.

Ainda foi possível observar a presença de uma concentrada área urbana na região, responsável por alterações nas características morfológicas naturais do trecho analisado. A área de estudo é marcada por uma notória mancha urbana em sua porção central, caracterizada pelo distrito de Águas de São Pedro e propriedades destinadas a lazer e veraneio. Notou-se também a presença de áreas de piscicultura próximas às margens do rio e áreas com ausência de cobertura vegetal. A área de estudo apresenta também uma grande atividade mineradora próxima às margens do rio, a qual pode contribuir para a acumulação de sedimentos nesta região.

A partir destas considerações gerais sobre a área de estudo, optou-se por selecionar setores significativos a fim de ilustrar as características

geomorfológicas e suas possíveis respostas a acidentes envolvendo derrames de óleo.

No primeiro setor selecionado localizado na região sul da área de estudo (Fig. 7) observa-se a presença de uma ampla voçoroca em um canal afluente do rio principal; um leque aluvial; depósitos aluviais com ausência de vegetação; depósitos aluviais alagados; linhas de erosão; e presença de um canal abandonado que representa antigos cursos d'água do rio.

A Bacia do Rio Araquá constitui-se em uma área sujeita à ação de diversos processos erosivos. De acordo com Facincani (1995), a área do município de São Pedro apresenta uma evolução significativa das voçorocas devido à influência das estruturas e da tectônica da região. Segundo a autora, as voçorocas são controladas pelas descontinuidades estruturais, representadas pelas falhas, juntas e acamamento. Eventos tectônicos, de caráter resurgente, teriam reativado descontinuidades preexistentes, mais propensas à percolação de águas, e a conseqüente alteração dos litotipos, desencadeando o controle da rede de drenagem e das feições lineares do relevo. Observa-se um leque aluvial, que têm origem nos processos erosivos que ocorrem na voçoroca (Fig. 7). Segundo Wieczorek (2006) essas áreas são importantes nas épocas de cheia, pois podem proporcionar o acesso do óleo a locais mais abrigados, os quais apresentam ecossistemas importantes no processo reprodutivo e alimentar de várias espécies de peixes. Nessas confluências, o contaminante pode atingir as planícies ou lagoas impactando grandes extensões de áreas sensíveis podendo permanecer por vários meses (Wieczorek, 2006). Assim, em relação à sensibilidade ambiental ao óleo (Fig. 8) o leque aluvial e os depósitos aluviais alagados apresentam índice de sensibilidade 9 devido às dificuldades de limpeza relacionadas a constante saturação por água. De acordo com Mendoza-Cantú *et al.* (2011), quanto maior a permeabilidade do material, mais profunda será a penetração do óleo e maior será a sua persistência, sendo mais difícil a sua limpeza e reparação.

Na porção esquerda do setor (Fig. 8), ocorre um amplo depósito aluvial com ausência de vegetação, advindo dos processos de deposição de sedimentos realizado pelo trabalho do rio neste

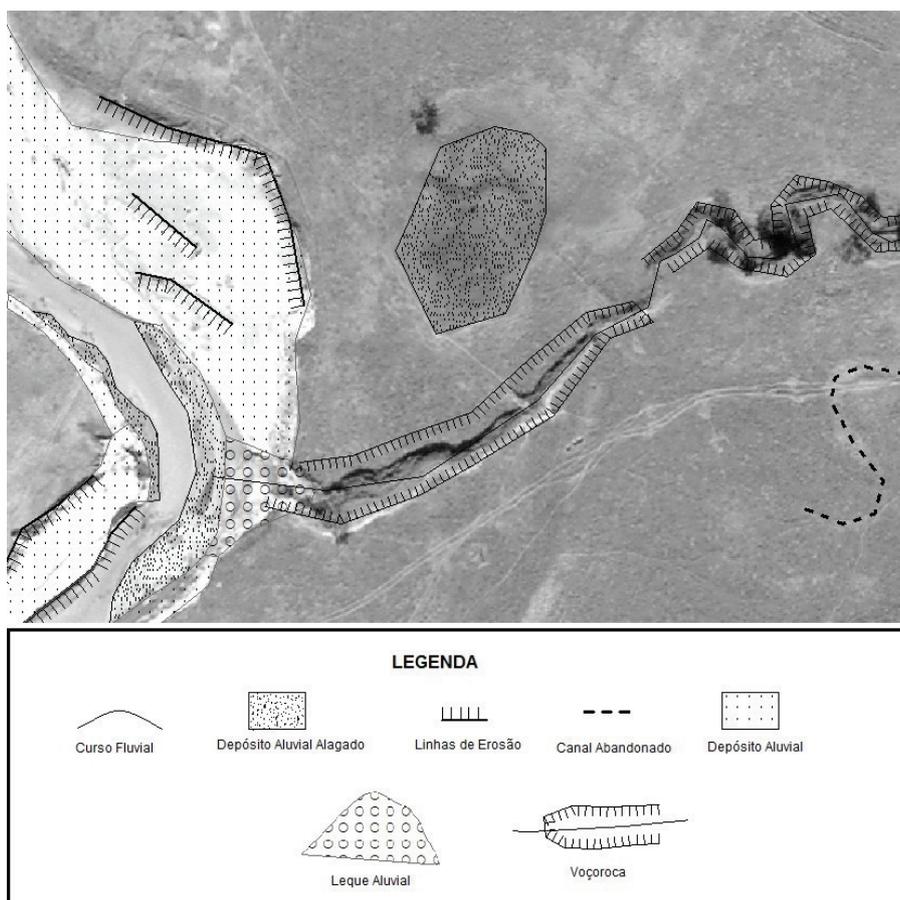


Figura 7. Trecho do mapa geomorfológico do setor 1.
 Figure 7. Stretch from the geomorphological map of the sector 1.

local, que se apresenta com uma topografia suave, com margens menos íngremes, facilitando os processos de deposição. Este apresenta um índice de sensibilidade 5, porém, os bancos arenosos, numa situação de derramamento de óleo são propícios à adesão aos sedimentos saturados em água e a limpeza tende a transferir o óleo para camadas mais profundas e novos sedimentos tendem a recobrir os contaminados com óleo, dificultando os processos de limpeza.

Nota-se a presença de canais abandonados provenientes de antigos cursos do rio, bem como áreas alagadas, caracterizando uma região bastante úmida, típica do clima quente e úmido. Os canais abandonados recebem o maior índice de sensibilidade ambiental, pois podem acumular óleo por tempo indeterminado, transferir o contaminante para outros cursos d'água, dificultando os procedimentos de limpeza e contenção.

No segundo setor avaliado verifica-se, na porção esquerda da imagem (Fig. 9), a presença de um depósito aluvial com ausência de vegetação,

com diversas linhas de erosão em seu interior.

Notam-se também diversos depósitos aluviais alagados próximos às margens e uma ilha fluvial no interior do rio, localizada mais ao centro deste, o que representa um contínuo processo de deposição de sedimentos advindos de uma baixa energia cinética. Segundo Costa (2013), a formação das ilhas fluviais está associada diretamente à vazão e competência do rio (tamanho máximo do material que pode ser movido) vinculada à acumulação de sedimentos em áreas de baixa ação hidrodinâmica e pequena declividade. Em geral, a área de estudo apresenta diversas ilhas fluviais, o que caracteriza um rio de baixa profundidade e com reduzido hidrodinamismo.

Em relação à sensibilidade ambiental ao óleo, as linhas de erosão representam um baixo índice de sensibilidade, entretanto, assim como os depósitos aluviais com ausência de vegetação, estas feições podem acumular óleo em camadas mais profundas, dificultando os procedimentos de limpeza.

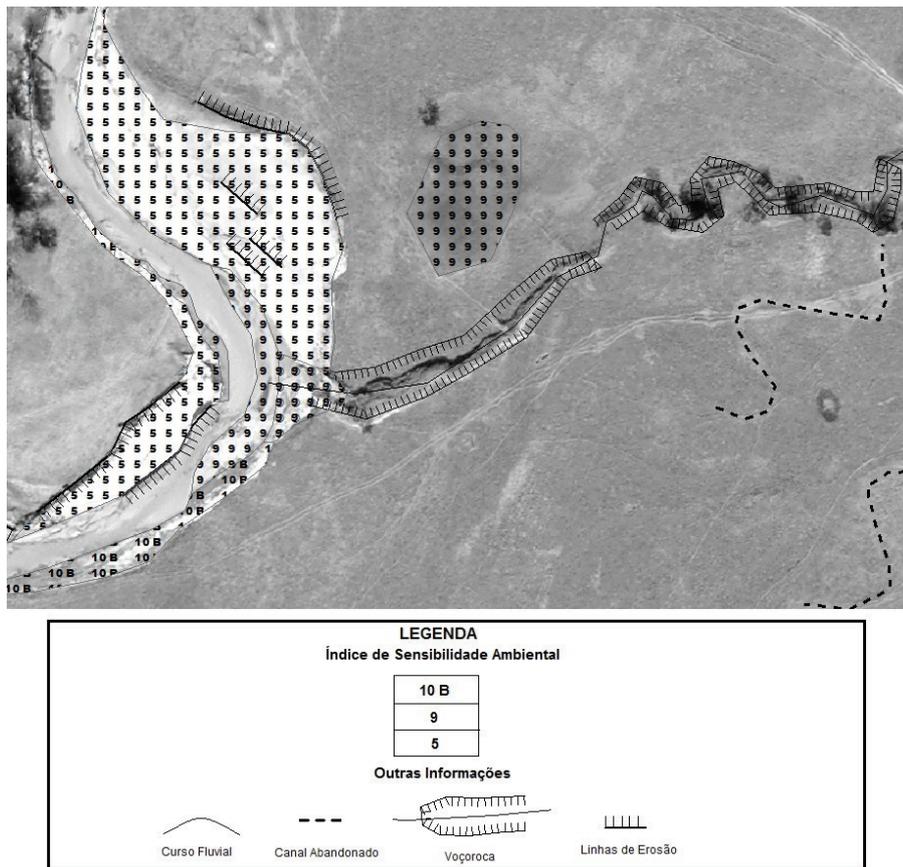


Figura 8. Trecho do mapa de sensibilidade ambiental ao óleo do setor 1.
Figure 8. Stretch of the environmental sensitivity to oil map of sector 1.

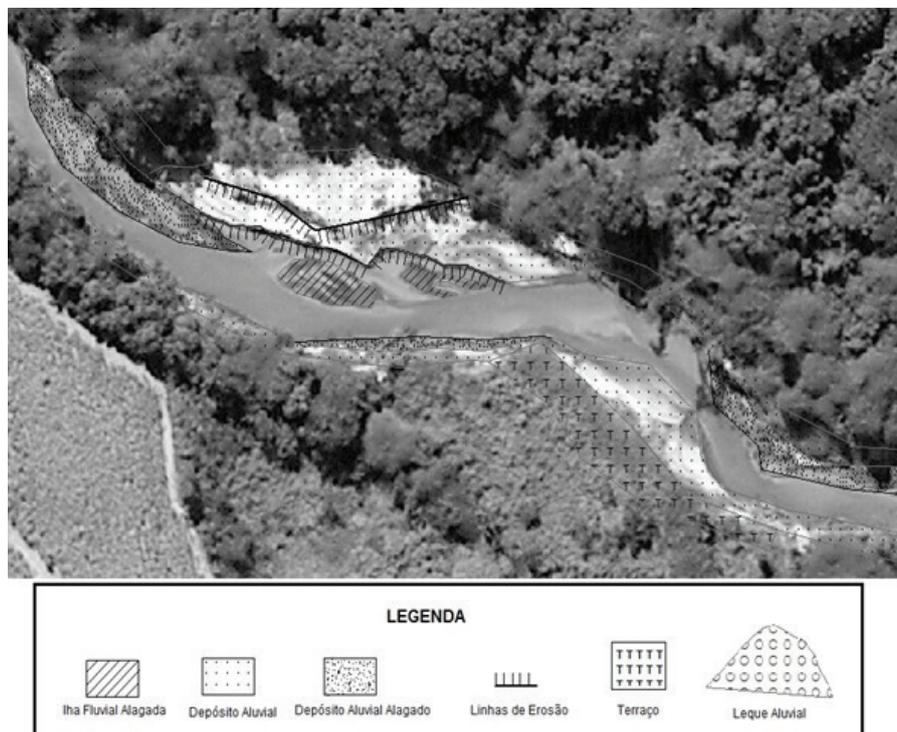


Figura 9. Trecho do mapa geomorfológico do setor 2.
Figure 9. Stretch from the geomorphological map of the sector 2.

Os depósitos alagados caracterizam um rio mais raso, o que representa uma alta sensibilidade. De acordo com Beaumord & Ferreira (2008) à baixa energia das correntes fluviais dificulta a remoção natural de óleo; ademais essa baixa energia gera um substrato de fundo com maior estabilidade e que, por consequência, abriga uma maior variedade de espécies, apresentando assim, uma sensibilidade maior.

No recorte do mapa de sensibilidade ambiental ao óleo do setor (Fig. 10) é possível observar depósitos aluviais com vegetação arbórea, cujo índice de sensibilidade ambiental classifica-se como 10A, e depósitos aluviais com vegetação arbustiva, com índice 10B. Esta diferenciação ocorre, pois os depósitos aluviais possuem índice de sensibilidade ambiental variando de acordo com o tipo e porte da vegetação encontrada na região. As áreas com vegetação arbórea são responsáveis por uma maior retenção de óleo se comparadas às áreas de vegetação arbustiva, possuindo sensibilidade maior. Tal sensibilidade deve-se também a

uma maior dificuldade nos procedimentos de limpeza, podendo aumentar o tempo de permanência do óleo (Hayes *et al.*, 1997). No terceiro setor selecionado (Fig. 11) nota-se a presença de um amplo terraço aluvial, com atividade de mineração em seu interior.

Os terraços aluviais representam antigas planícies de inundação que foram abandonadas e surgem como patamares aplainados, de largura variada, limitados por uma ruptura de declive em direção ao curso d'água. Neste setor, a antiga planície de inundação é utilizada para retirada de material, caracterizando a mineração, uma das principais responsáveis pelos diversos processos erosivos e alterações na dinâmica fluvial da região. De acordo com Carpi Júnior (1996) a região de São Pedro apresenta uma aceleração dos processos erosivos devido a fatores antrópicos, sendo estes principalmente caracterizados por devastação da cobertura vegetal e construção de estradas, fatores típicos da instalação de atividades mineradoras.

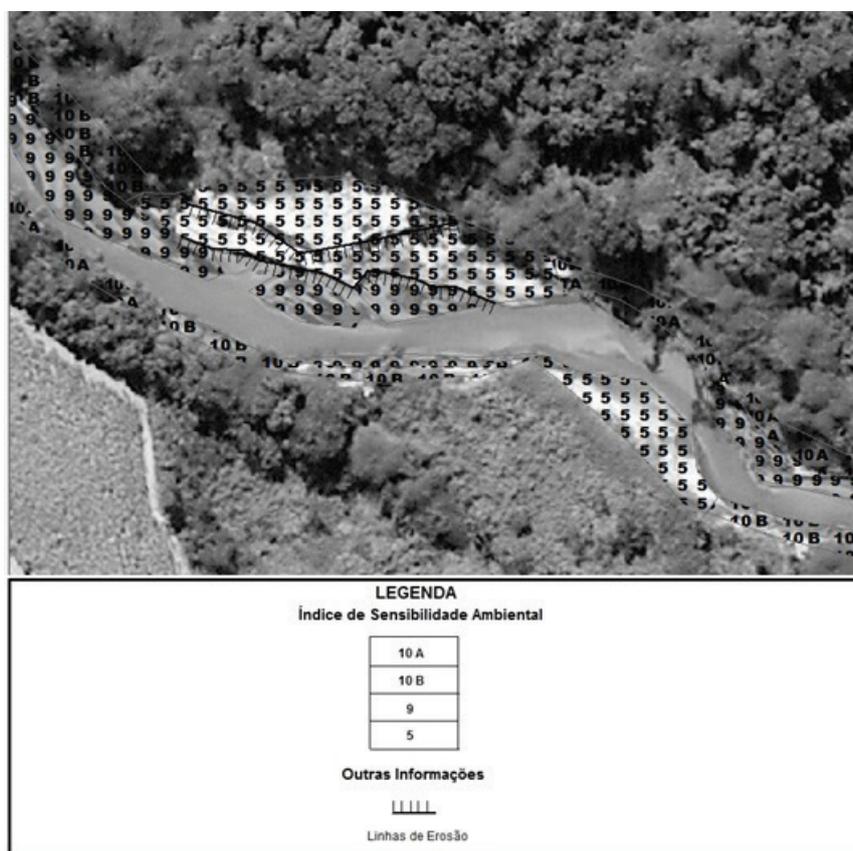


Figura 10. Trecho do mapa de sensibilidade ambiental ao óleo do setor 2.
Figure 10. Stretch of the environmental sensitivity map to the oil of sector 2.

Em termos de índice de sensibilidade ambiental, baseado nas bibliografias utilizadas, os terraços não apresentam um índice de sensibilidade ambiental individual, pois caracterizam os índices das feições as quais estão conectados. A mineração também não apresenta um índice específico pois não se caracteriza como uma feição natural, entretanto, Costa (2013) ressalva que a presença de cavas provenientes da mineração pode reter óleo e resíduos em uma cheia excepcional, o que pode dificultar os procedimentos de limpeza, em caso de acidentes envolvendo derrames de petróleo.

No quarto setor selecionado observa-se a presença de uma soleira fluvial, possivelmente responsável pela alteração do curso d'água do rio principal (Fig. 12).

De acordo com Guerra A. & Guerra J. (1966), a soleira classifica-se como uma barra de rocha dura que funciona como nível de base num ciclo de erosão; estas feições são importantes nos leitos fluviais por servirem de nível de base, comandando a erosão. A presença de soleiras gera um sistema lótico, com presença de fortes correntezas.

Nota-se também a presença de um meandro

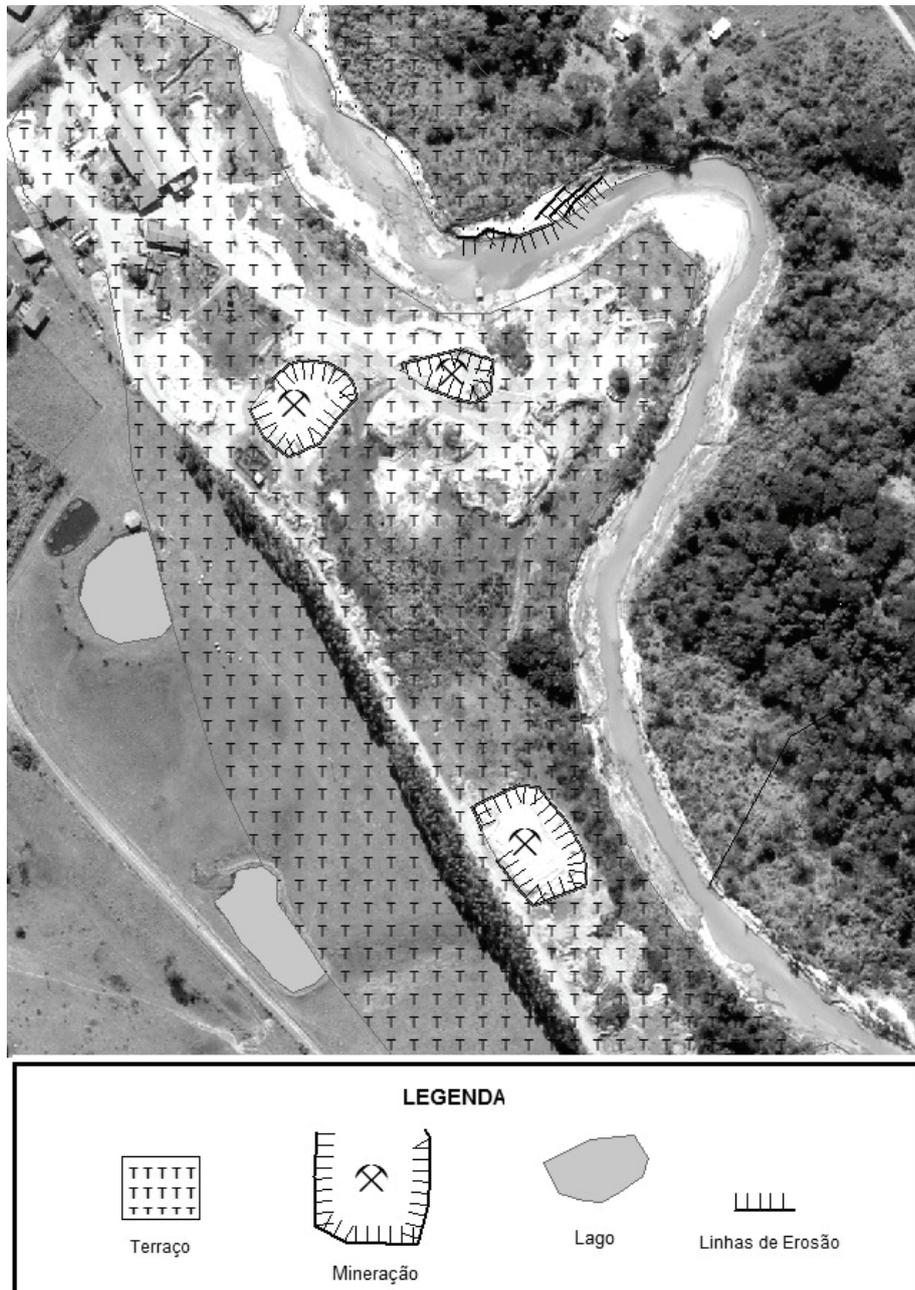


Figura 11. Trecho do mapa geomorfológico do setor 3.
Figure 11. Stretch from the geomorphological map of the sector 3.

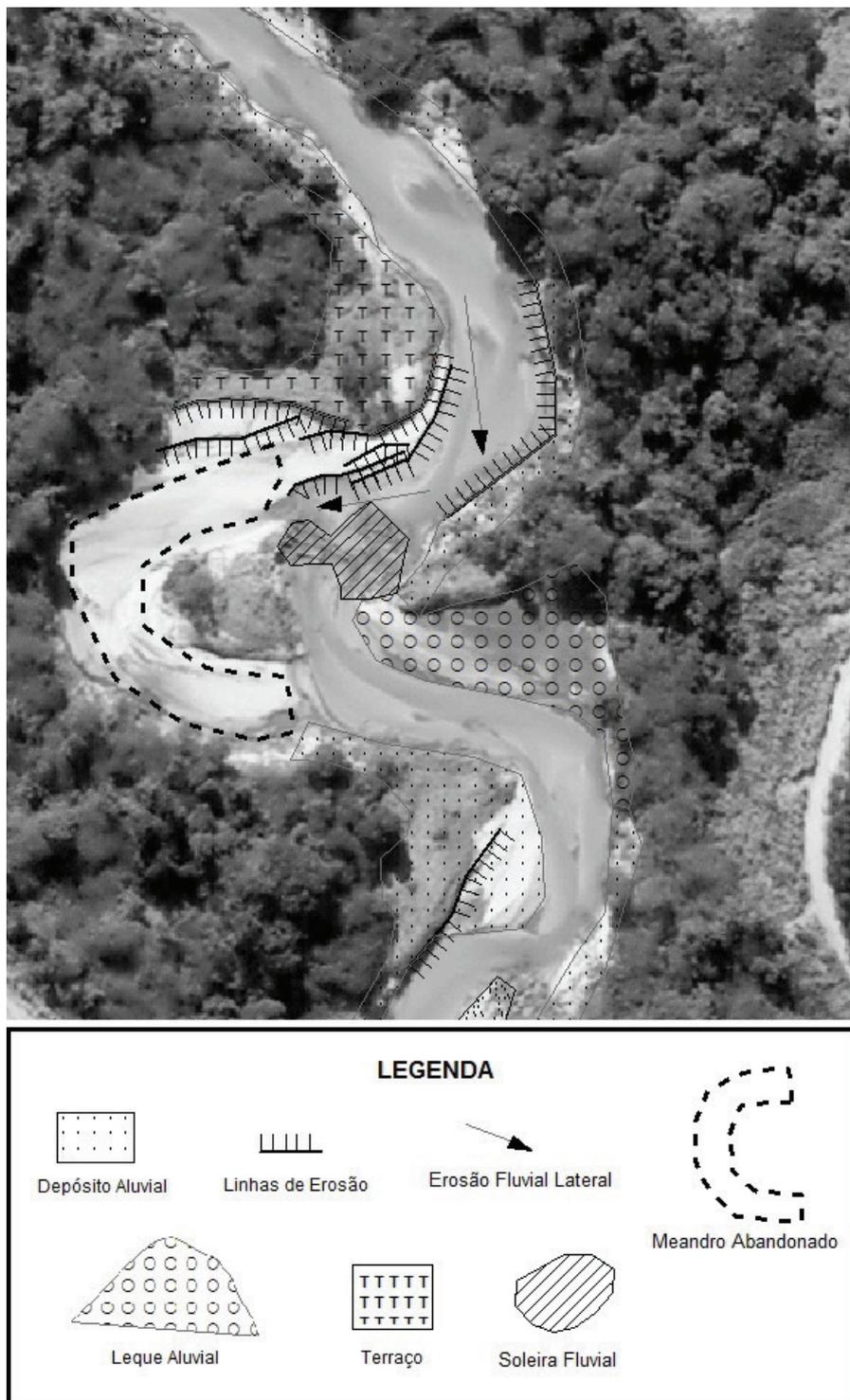


Figura 12. Trecho do mapa geomorfológico do setor 4.
 Figure 12. Stretch from the geomorphological map of the sector 4.

abandonado, proveniente das mudanças do curso do rio, possivelmente advindas de uma maior energia cinética no trecho e dos amplos processos erosivos que ocorrem na área, estes demonstrados pela presença de processos de erosão fluvial lateral e linhas de erosão no interior dos depósitos aluviais. De acordo com Suguio & Bigarella (1990), o abandono dos meandros se deve às mudanças graduais nos cursos dos rios, podendo ser ocasionado por dois processos: atalhos de corredeira e atalhos em colo. Os atalhos de corredeira são resultado do encurtamento da curva do meandro pelo corte de um novo canal que surge por entre as barras do meandro, aproveitando a planície de inundação pantanosa. Com isso, o arco do meandro abandonado é isolado do novo curso por sedimentos da carga de fundo; esse é preenchido progressivamente pela carga de sedimentos em

abandonado por dois processos: atalhos de corredeira e atalhos em colo. Os atalhos de corredeira são resultado do encurtamento da curva do meandro pelo corte de um novo canal que surge por entre as barras do meandro, aproveitando a planície de inundação pantanosa. Com isso, o arco do meandro abandonado é isolado do novo curso por sedimentos da carga de fundo; esse é preenchido progressivamente pela carga de sedimentos em

suspensão conduzidos pelas enchentes (Sugiuo & Bigarella,1990). Nessa situação pode haver o confinamento e o soterramento do óleo, dificultando os procedimentos de limpeza. O atalho em colo ocorre devido ao corte da parte estreita entre duas curvas de meandro que estão próximas. Nesse caso, os sedimentos da carga de fundo preenchem as extremidades do canal abandonado dando origem a um lago; o preenchimento ocorre advindo dos sedimentos em suspensão durante as enchentes (Sugiuo & Bigarella,1990).

Em termos de sensibilidade ambiental (Fig. 13), o setor destacado apresenta um índice menor, excetuando o meandro abandonado. A soleira

apresenta um baixo índice de sensibilidade, pois caso ocorra um derrame de óleo, a dispersão seria facilitada devido à alta energia de circulação da água, a qual propiciaria sua dissipação, evitando a concentração do contaminante neste setor do rio.

Por fim, convém destacar um último setor marcado pela presença de alterações antrópicas características de produção de peixes de água doce, denominada piscicultura (Fig. 14). Esses processos consistem em mudanças em pequenos cursos d'água com construção de açudes ou represas, fatores que alteram consideravelmente a dinâmica fluvial dos rios, e conseqüentemente os processos erosivos.

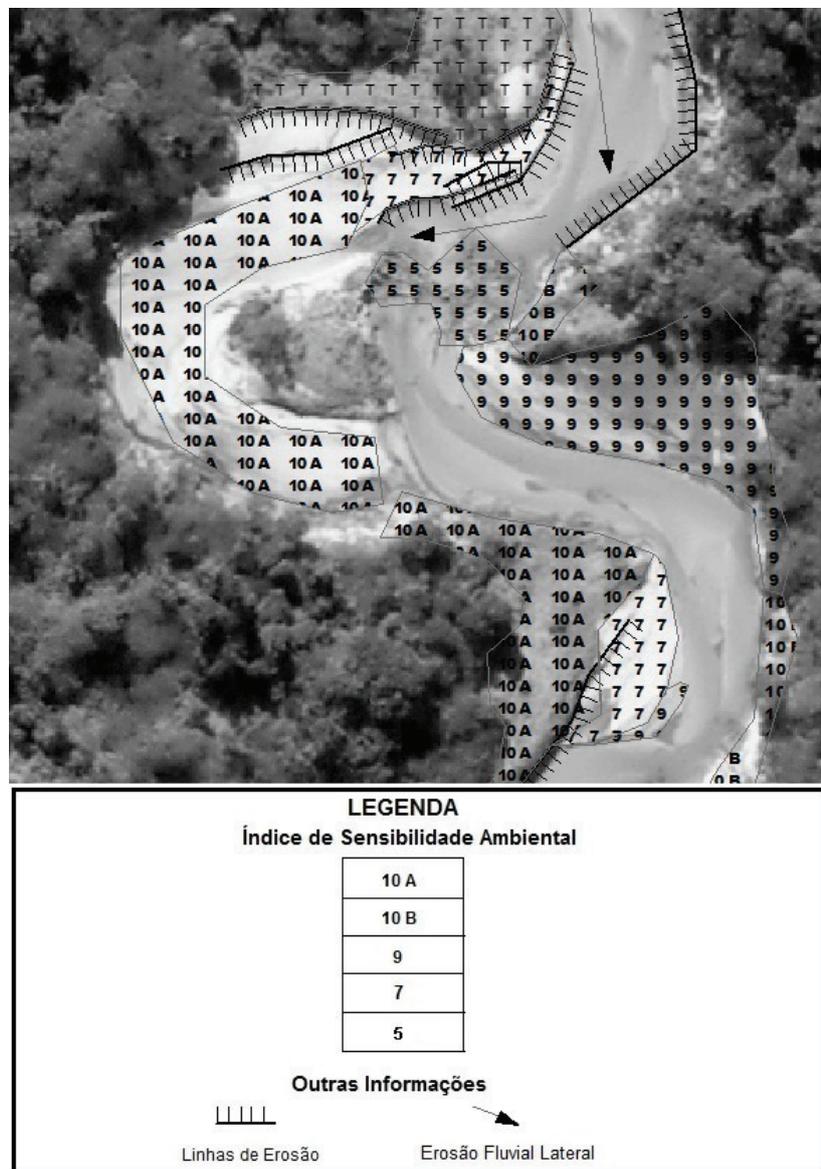


Figura 13. Trecho do mapa de sensibilidade ambiental ao óleo do setor 4.
Figure 13. Stretch of the environmental sensitivity map to the oil of sector 4.



Figura 14. Presença de piscicultura e concentração urbana. A) Simbologia empregada para identificação da piscicultura; B) Sensibilidade ambiental da piscicultura.

Figure 14. Presence of fish farming and urban concentration. A) Symbology used to identify fish farming; B) Environmental sensitivity of fish farming.

Nota-se uma área com uma concentrada área urbana, o que representa um alto índice de sensibilidade devido aos efeitos nocivos que o óleo apresenta à saúde da população. A presença da piscicultura também representa um alto índice de sensibilidade, atribuindo ao setor o maior índice, classificado como 10, pois caso estas feições sejam atingidas por derrames de óleo, poderá ocorrer perdas socioeconômicas à população, além da retenção do contaminante por mais tempo.

Por fim, ressalta-se que os recortes analisados são representativos das feições geomorfológicas mapeadas e analisadas em termos de sensibilidade ambiental ao óleo em toda a área de estudo; portanto estas se repetem ao longo do curso fluvial mapeado.

5 Conclusões

A partir da realização do mapeamento geomorfológico das feições de caráter fluvial da região, foi possível determinar que o Rio Araquá é um rio com intensa dinâmica deposicional, possivelmente devido aos diversos processos típicos de erosão e deposição dos canais meandantes, bem como de uma evolução desses processos advindos de modificações realizadas pelo homem, como represamentos, áreas destinadas à piscicultura e ampla atividade mineradora.

O mapeamento geomorfológico mostrou-se fundamental para a análise das feições em relação à sensibilidade ambiental ao óleo. De acordo com as características de cada feição foram atribuídos

índices de sensibilidade segundo as possíveis dificuldades de limpeza e remoção e perdas irreversíveis.

A partir desse pressuposto e da realização do mapa de sensibilidade ambiental, foi possível observar que o Rio Araquá possui uma alta sensibilidade ambiental ao óleo, exibindo feições geomorfológicas que, em caso de acidentes envolvendo derrames de petróleo, serão contaminadas, podendo ocasionar danos irreversíveis, tanto biológicos quanto ambientais e econômicos.

O Rio Araquá apresenta-se bastante assoreado, com predomínio em suas margens de áreas de depósitos aluviais com vegetação arbustiva (ISA 10 B) e depósitos aluviais alagados (ISA 9). Em relação as feições com maior sensibilidade (ISA 10 A), trinta e dois locais possuem depósitos aluviais com vegetação arborea; seis pontos caracterizam-se com meandros abandonados; dez locais apresentam piscicultura; e onze locais possuem canais abandonados. Dezoito pontos do rio são classificados com índice 9 de sensibilidade (ISA 9), representados por depósitos aluviais alagados localizados nos canais do rio principal; onze locais com leques aluviais; e apenas um local com barras de meandro. Em relação às feições com menores índices, os depósitos aluviais com ausência de vegetação (ISA 5) foram as mais frequentes, localizando-se em aproximadamente cinquenta pontos na área, ocorrendo as margens do rio principal, próximos aos leques aluviais e em locais marcados pelos processos de erosão fluvial lateral. As feições margens erosivas seguidas por terraço, soleiras e ilhas fluviais tiveram poucas ocorrências, variando entre quatro e cinco locais.

Uma das preocupações da presente pesquisa consistiu em ampliar as discussões sobre a temática de Sensibilidade Ambiental ao óleo para ambientes fluviais, com o intuito de colaborar com o desenvolvimento destes estudos no Brasil, visto que são pouco abordados. Este estudo buscou também contribuir como subsídio às Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo e aos planos de contingência para a determinação de ações de resposta eficazes que auxiliem a proteção dos ambientes fluviais.

As técnicas utilizadas na pesquisa, juntamente aos objetivos propostos, se demonstraram

adequados, pois permitiram mapear e avaliar a sensibilidade das feições do relevo aos derrames de óleo. Compreende-se que esse mapeamento deverá ainda ser complementado com outros dados, principalmente socioeconômicos, visando melhor avaliar a sensibilidade das comunidades locais ao derrame de óleo.

Referências bibliográficas

- Araújo, S.I., Silva, G.H. & Muehe, D. 2002. *Manual Básico para elaboração de Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo no Sistema Petrobras: Ambientes Costeiros e Estuarinos*. Rio de Janeiro, Petrobrás, 133p.
- Araújo, S.I., Silva, G.H. & Muehe, D. 2006. *Mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo: ambientes costeiros, estuarinos e fluviais*. Rio de Janeiro, Petrobras, 168p.
- Ayoade, J.O. 2010. *Introdução à climatologia para os trópicos*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 332p.
- Beaumord, A.C. & Ferreira, M.F. 2008. Mapeamento da sensibilidade ambiental a derrames de óleo nos cursos de água da bacia do Rio Canhanduba, Itajaí, SC. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 12(2): 61-72.
- Carpi Júnior, S. 1996. *Técnicas cartográficas aplicadas à dinâmica da Bacia do Ribeirão Araquá - SP*. Rio Claro, 188p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Costa, D.M. 2013. *Estabelecimento de um índice de sensibilidade ambiental ao óleo em ambientes fluviais, com o suporte da ferramenta MORPH*. Rio Claro, 193p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Cunha, C.M.L. 2001. *A Cartografia do Relevo no Contexto da Gestão Ambiental*. Rio Claro, 128p. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- ESRI. 2014. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

- Facincani, E.M. 2005. *Influência da estrutura e tectônica no desenvolvimento das boçorocas da Região de São Pedro (SP): proposta de reabilitação e aspectos jurídico-institucionais correlatados*. Rio Claro, 124p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Guerra, A.T. & Guerra, J.T. 1966. *Dicionário geológico-geomorfológico*. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 446p.
- Hayes, M. O., Michel, J., Dahlin, J.A., Barton, K. 1995. Identifying and mapping sensitive resources for inland area planning. In: INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE, 1997, California. *Anais...* California, IOSC, v. 1, p. 365-371.
- Hayes, M.O., Michel, J. & Montello, T.M. 1997. The environmental sensitivity index (ESI) for mapping rivers and streams. In: INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE, 1997, California. *Anais...* California, IOSC, v. 1, p. 343-350.
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 1981. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 2 v., escala 1:1.000.000.
- Jensen, J.R., Halls, N.J. & Michel, J. 1998. A system approach to environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil spill contingency planning and response. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 64(10): 1003-1014.
- Mariano, J.B. 2001. *Impactos Ambientais do Refino de Petróleo*. Rio de Janeiro, 216p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, Instituto de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Mendoza-Cantú, A., Heydrich, S.C., Cervantes, I.S. & Orozco, O.O. 2011. Identification of environmentally vulnerable areas of priority of prevention and management of pipeline crude oil spills. *Journal of Environmental Management*, 92(7): 1706-1713.
- Michel, J., Hayes, M.O. & Brown, P.J. 1978. Application of an oil spill vulnerability index to the shoreline of lower Cook Inlet, Alaska. *Environment geology*, 2(2): 107-117.
- Ministério do Meio Ambiente. 2002. *Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo*. Rio de Janeiro, MMA, 22p.
- Oliveira, J.B., Jacomine, P.K.T. & Camargo, M.N. 1992. *Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento*. Jaboticabal, FUNEP, 201p.
- Paschoal, L.G., Conceição, F.T. & Cunha, C.M.L. 2010. Utilização do ArcGis 9.3 na elaboração de simbologias para mapeamentos geomorfológicos: Uma aplicação na área do Complexo Argileiro de Santa Gertrudes/SP. In: VIII SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 8., 2010. *Anais...* Recife, SINAGEO, p. 1-13.
- Sanchez, M.C. 1971. Contribuição aos conhecimentos das bases naturais dos municípios de São Pedro e Charqueada (SP). *Notícia Geomorfológica*, 11(21): 47-60
- Suguió, K. & Bigarella, J.J. 1990. *Ambientes fluviais*. Florianópolis, UFSC, 181 p.
- Tricart, J. 1965. *Principes et méthodes de la géomorphologie*. Paris, Masson et Cie, 496p.
- Verstapen, H.T. & Zuidam, R.A. van. 1975. *System of geomorphological survey*. Netherlands, Manuel ITC Textbook, 52p.
- Wieczorek, A. 2006. *Mapeamento de sensibilidade a derramamentos de petróleo do Parque Estadual da Ilha do Cardoso – PEIC e áreas de entorno*. Rio Claro. 157p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista.
- Zengel, S., Hayes, M.O., Michel, J. White, M. 2001. Integrated planning front the mountains to the sea: environmental sensitivity mapping in the Caribbean. In: INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE, 2001, California. *Anais...* California, IOSC, p. 1-5.