

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO COMO APOIO A ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS PARA GESTÃO AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE TRÊS CACHOEIRAS, LITORAL NORTE DO RS, BRASIL

Remote sensing and geoprocessing techniques as support to geological and geotechnical studies for environmental management in Três Cachoeiras County, north coast of Rio Grande do Sul, Brazil

Rosemary Hoff*

Juciara Carvalho Leite**

Ricardo Norberto Ayup Zouain***

RESUMO – As técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento são fundamentais para a integração de dados de mapeamento geológico-geotécnico para o gerenciamento e planejamento regional. O Município de Três Cachoeiras, situado no Litoral Norte do Rio Grande do Sul faz parte da "Reserva da Biosfera da Mata Atlântica" e tem conflitos ambientais diversos, como áreas para disposição de resíduos sólidos, assentamento de loteamentos residenciais e industriais, jazidas de extração de material para construção, fontes de abastecimento de água e áreas de preservação ambiental. O objetivo deste trabalho foi produzir mapas temáticos, empregando fotografias aéreas, imagens de satélite e modelo digital de elevação (MDE) e a integrar os dados num sistema de informações geográficas (SIG). Utilizaram-se fotografias aéreas, imagens de satélite ETM+ LANDSAT 7, além de informações altimétricas Shuttle RADAR Topographic Mission (SRTM). Foram investigados aspectos conflitantes pelo enfoque geológico-geotécnico, a partir de fotointerpretação, processamento de imagem e levantamento de campo, e os dados foram integrados por técnicas de geoprocessamento. A fotointerpretação gerou a rede de drenagem, litologia, morfo-estruturas e formações superficiais. O processamento digital de imagem gerou mapas temáticos de rochas/solos e uso/cobertura do solo pelo método de classificação máxima verossimilhança (MAXVER) da imagem orbital. O modelo digital de elevação gerou a carta de declividade e a delimitação de reservas ecológicas baseada na legislação ambiental. O cruzamento destes temas permitiu a obtenção das cartas de formações superficiais, hidrogeológica e litológica. A integração destes temas gerou as cartas de recomendação: de extração de materiais para construção civil; de implantação de obras de infra-estrutura; de disposição de resíduos sólidos e loteamentos; de agricultura; de implantação de áreas destinadas à preservação ambiental e à recuperação.

SYNOPSIS – Remote sensing and geoprocessing techniques are basic for data integration to geologic-geotechnical mapping for management and regional planning. Três Cachoeiras, situated in the North Coast of Rio Grande do Sul State is part of the "Reserva da Biosfera da Mata Atlântica", where occur environmental

* Geóloga, Doutora em Ciências, Pesquisadora em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento da Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves, RS, Brasil. E-mail: rosehoff@cnpuv.embrapa.br

** Geóloga, Doutora em Geotecnia, Professora Adjunta do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba - PR – Brasil. E-mail: juciara@ufpr.br

*** Geógrafo, Doutor em Ciências, Professor Associado do Departamento de Geodésia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS – Brasil. E-mail: ricardo.ayup@ufrgs.br

conflicts caused by human activities, such as waste and solid residue disposal, living and industrial settlement, quarries and mines for construction materials, water supply sources and environmental preservation areas. The objective of this study was to produce thematic mapping using aerial photographs, satellite images and digital elevation model (DEM) and integrate data in a geographic information system (GIS). High resolution aerial, ETM+ LANDSAT 7 orbital and Shuttle RADAR Topographic Mission (SRTM) elevation data have been used. The photos have supplied drainage, lithology, morpho-structures and surface formations. Conflicting aspects from geologic-geotechnical approach have been investigated by photo analysis, image processing and field survey and after combining data by geoprocessing techniques. The digital image processing has generated thematic maps such as rocks/soil and land cover/use by maximum likelihood classification (MAXLIKE) method on the orbital image. The DEM generated slope and ecological reserves limits based on the Environmental Laws. The crossing of these subjects provided the maps of surface formation, hydrogeology and lithology. Integration of these subjects generated recommendation maps: mining for construction materials; workmanships infrastructure; solid waste disposal and land divisions; agriculture and preservation and reclamation environmental areas.

PALAVRAS CHAVE – Sensoriamento remoto, SIG, mapeamento geotécnico, gestão de recursos naturais, regiões costeiras.

1 – INTRODUÇÃO

As atividades humanas, na sua maioria, mantêm vínculo direto com as superfícies dos terrenos, e o comportamento dessas superfícies depende diretamente da sua geologia e geomorfologia, bem como das condições de cobertura do solo e do clima atuante nas diversas regiões. Conhecer detalhadamente o relevo de uma região e o seu subsolo facilita o controle dos impactos ambientais. Os impactos gerados no meio físico mantêm relação direta com a biota e o meio antrópico, afetam ecossistemas e comprometem a qualidade de vida do ser humano. O emprego de geotecnologias permite estudo mais abrangente e processamento de informações com maior rapidez, como Sensoriamento Remoto (SR) e Sistema de Informações Geográficas (SIG), o que possibilita adaptar e aprimorar os levantamentos em geociências. O SR e o SIG vêm sendo bastante usados em estudos de regiões costeiras. No âmbito municipal, pode auxiliar na tomada de decisão dos gestores frente às necessidades das comunidades.

A área escolhida para este estudo foi o Município de Três Cachoeiras, que faz parte do litoral norte do RS (Figura 1). Limita-se com os municípios de Arroio do Sal, Morrinhos do Sul, Terra de Areia, Três Forquilhas e Dom Pedro de Alcântara, conforme divisão política de 01.01.93. A população é de, aproximadamente, 9500 habitantes numa área de 250 km², sendo a que população urbana e a rural se equívalem. A área do Município de Três Cachoeiras está totalmente incluída na Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, esta decretada pela UNESCO em 08.10.93 e objeto de estudo do Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro - GERCO. Com a intenção de envolver o Município na questão ambiental, bem como na Política Nacional de Meio Ambiente, procurou-se recomendar zonas propícias à criação de áreas de preservação ambiental (APAs).

Os contatos realizados com a Prefeitura Municipal de Três Cachoeiras levantaram as necessidades municipais, o que permitiu selecionar aquelas passíveis de investigação no âmbito do assunto proposto a partir de uma visão geológico-geotécnica. Tais necessidades envolviam o conhecimento de áreas propícias à obtenção de materiais para a pavimentação de rodovias vicinais, áreas favoráveis à agricultura, áreas com potencialidade para água subterrânea, áreas para localização de sítios adequados à disposição final de resíduos sólidos e áreas para assentamento de loteamentos residenciais ou industriais. Assim, a partir de levantamentos das características do meio físico, tais como declividade, litologia, formações superficiais, águas subterrâneas e uso do solo, recomendaram-se zonas favoráveis à extração de materiais para construção civil, à implantação de obras de

Litoral Norte do Rio Grande do Sul - LINORS, proposto pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), foi desenvolvido para diagnosticar problemas ambientais do meio físico (CPRM, 1994). Na mesma linha, tem-se o trabalho de Verdinelli e Verdinelli (1994), aplicado à gestão ambiental de zonas costeiras.

Os mapeamentos geotécnicos para fins de planejamento regional e municipal surgiram inicialmente no Estado de São Paulo. Destaca-se a proposta de sistemática para mapeamento geotécnico regional de Zuquette (1987), na qual são integrados dados geotécnicos com topográficos, imagens de satélite e informações sobre material inconsolidado e uso do solo, que produziram unidades de combinação, por meio de sucessivos cruzamentos entre atributos considerados no mapeamento geotécnico. A aplicação de sistemas de geoprocessamento para o mapeamento geotécnico foi discutida também por Moreira e Zuquette (1993), e Mattos e Vedovello (1992) compararam elementos texturais e estruturais de imagens de satélite LANDSAT e SPOT para mapeamento geotécnico como subsídio ao planejamento ambiental de áreas litorâneas. Áreas de risco no litoral paulista foram caracterizadas por Okida e Veneziani (1994), que usaram imagens digitais e estabeleceram zonas sujeitas a escorregamentos e inundações. Weber *et al.* (1998) classificaram ambientalmente uma bacia hidrográfica por meio de técnicas de SIG e Hoff *et al.* (2008) utilizaram sensoriamento remoto e geoprocessamento para classificar microbacias e avaliar o potencial poluidor das atividades humanas no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil.

2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O Litoral Norte caracteriza-se pelo estabelecimento de propriedades rurais com áreas inferiores a 50 hectares, constitui-se numa diversificada e importante zona agrícola, produtora e exportadora, estando sua pecuária entre as mais desenvolvidas do Estado do Rio Grande do Sul. Três Cachoeiras é grande produtor de abacaxi, banana e açúcar. A rede viária do interior do Município ainda não apresenta problemas geotécnicos maiores, por se tratar de obras de pequeno porte. No entanto, melhoramentos da rede viária, com a finalidade de facilitar o escoamento da produção e dar acesso a locais turísticos, podem gerar impactos ambientais característicos de obras rodoviárias, como exemplo do que ocorreu no Município de Terra de Areia por ocasião da construção da rodovia "Rota do Sol".

O Município de Três Cachoeiras situa-se entre as coordenadas geográficas $-29^{\circ} 22' 18''$ a $-29^{\circ} 36' 06''$ de latitude Sul e $-49^{\circ} 50' 07''$ a $-50^{\circ} 04' 37''$ de longitude Oeste. Caracteriza-se por ser zona com potencial para projetos de natureza turística e rodoviária, entre outros. No entanto, alguns desses projetos e empreendimentos geram conflitos que induzem a impactos ambientais por vezes irreversíveis; no entanto, se houvesse diretrizes ambientais estabelecidas em planos diretores dos municípios da região, tais impactos poderiam ter sido evitados ou, pelo menos, minimizados. A área mostra indícios de degradação do solo e subsolo, causado pelo uso agrícola nas encostas e pelo abandono das lavouras, resultando em superfícies descobertas suscetíveis à erosão e aos movimentos de massa.

A área do Município de Três Cachoeiras pode ser classificada geomorfologicamente, segundo IBGE (1986 e 2003), como uma transição entre Planalto das Araucárias e a Planície Costeira Interna, e apresenta as unidades geomorfológicas (UGs) Serra Geral, Planície Alúvio-Coluvionar, e Planície Lagunar (Figura 2). Sobre estas unidades, desenvolveram-se tanto modelados de dissecação, quanto de acumulação. As rochas mais antigas são os arenitos eólicos Formação Botucatu (CPRM, 2008) de ambiente desértico do período Jurássico e são recobertos por rochas vulcânicas juro-cretáceas da Formação Serra Geral, que apresentam o basalto (Fácies Gramado), além de rochas vulcânicas ácidas a intermediárias (Fácies Caxias) encontradas nas porções mais elevadas. Após hiato temporal, formou-se extensa superfície, provavelmente devido à separação continental

América do Sul e África que gerou a planície costeira. Estão presentes também as litologias da terceira e quarta transgressões marinhas quaternárias (Villwock e Tomazelli, 1995). Segundo Horn F.º *et al.* (1988), depósitos de encosta, incluindo tálus e leques aluviais antigos e atuais, depósitos lagunares, incluindo depósitos fluviais e de retrabalhamento fluvial, depósitos eólicos de dunas litorâneas antigas e depósitos marinhos praias antigos são encontrados na região de Três Cachoeiras.



Fig. 2 – Vista panorâmica do Município de Três Cachoeiras, RS. Foto Fabio Cubas:
<http://www.panoramio.com/photo/1557367>

As bacias hidrográficas de Três Cachoeiras deságuam na lagoa Itapeva como as bacias do rio do Terra-Cardoso e dos arroios Paraíso, Pontal, Chimarrão e Caravaggio. O rio Cardoso, principal curso de água do Município de Três Cachoeiras, é um rio meandrante assim como os rios Maquiné e Três Forquilhas da planície costeira norte do Rio Grande do Sul (Tomazelli e Villwock, 1991).

O clima de Três Cachoeiras é classificado como úmido de mesoclima médio (C2) e fraco (C3), numa zona climática exposta aos sistemas de circulação extra-tropicais, resultante da interação de massas de ar com a barreira geográfica da Serra Geral. As principais massas de ar perturbadoras da área em estudo são a tropical atlântica, polar atlântica, tropical continental, correntes perturbadoras de leste e nordeste, além de correntes perturbadoras de sul. Segundo IBGE (2003), o balanço hídrico aponta um excedente entre 300-800 mm anuais, volume de água disponível para o deflúvio superficial e para recarga de aquíferos.

O Diagnóstico Preliminar dos Aspectos Ambientais do Litoral Norte do Rio Grande do Sul - LINORS (CPRM, 1994) indica abastecimento de água em Três Cachoeiras feito por poço profundo na área urbana e por ponteiros na área rural. O esgotamento de efluentes domésticos é feito por fossas sépticas e sumidouros em terrenos arenosos. Os resíduos sólidos são enterrados num local a 2000 metros da sede municipal, em terreno arenoso. A extração de material de empréstimo provém de saibreira, sendo que as pedreiras do Município de Torres abastecem o Município de Três Cachoeiras, o que implica na necessidade de selecionar novas jazidas. Os maiores problemas ambientais apontam para poluição dos aquíferos devido ao esgoto doméstico e à disposição de resíduos.

A situação da área, frente à legislação ambiental, insere o Município de Três Cachoeiras na área da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, no Projeto GERCO/RS e também a enquadra nas

Resoluções do CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. A delimitação da área da Mata Atlântica no Rio Grande do Sul foi estabelecida pelo IBAMA pela Portaria nº 438 de 04.08.89. Em 08.10.93, a Mata Atlântica foi reconhecida pela UNESCO como Reserva da Biosfera, também denominado Bioma Mata Atlântica (Embrapa, 2009). Sobre reservas ecológicas, a Resolução CONAMA nº 004 de 18.11.85 pode ser, em parte, aplicada ao Município de Três Cachoeiras, desde que sejam respeitadas as características e vocações da área no que se refere ao Art. 3º (Reservas Ecológicas) e Art. 4º (2/3 superiores de montanhas ou serras).

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e dados foram obtidos de instituições de pesquisa e de serviço público. O Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER) forneceu as fotografias aéreas, obra 074, escala 1:20.000, de 1975. O Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul disponibilizou cartas planialtimétricas (DSG, 1ª DL, 1979) na escala 1:50.000. O Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica – (CECO/UFRGS) cedeu o mapa geológico das Folhas Carta Três Cachoeiras/Torres e Carta Maquine/Arroio Teixeira, escala 1:100 000 (Horn F.º *et al.*, 1984). Foi utilizada uma imagem ETM+ LANDSAT7, WRS 220.80, bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, de 07.05.2000 (USGS, 2008) e o modelo de altimetria Shuttle RADAR Topographic Mission - SRTM (UMIACS, 2008). O processamento de imagens e o geoprocessamento dos dados foram desenvolvidos no programa SPRING (INPE, 2008) descrito por Câmara *et al.* (1996).

O estudo foi produzido na escala 1:50 000, seguindo a proposta metodológica de Zuquette e Gandolfi (1992), adaptada às necessidades do Município, e baseada na análise de atributos do meio físico para elaboração de cartas de recomendação. Os atributos foram agrupados em temas como declividade, litologia, formações superficiais, unidades hidrogeológicas e uso atual do solo. A partir do cruzamento no SIG, foram elaborados os produtos do mapeamento geológico/geotécnico na forma de cartas de recomendação à extração de materiais para construção civil, à implantação de obras de infra-estrutura, à disposição de resíduos sólidos e loteamentos, à agricultura e à implantação de área de preservação ambiental. Dados mais detalhados da metodologia e resultados estão descritos em Hoff (1996).

3.1 – Fotointerpretação

A análise das fotografias aéreas definiu os aspectos geológicos e geomorfológicos do Município de Três Cachoeiras, conforme metodologia de Soares e Fiori (1976) para interpretação do meio físico. Dessa análise, obtiveram-se informações de litologia, formações superficiais, morfoestruturas e padrões de drenagem. Utilizaram-se os critérios de Ricci e Petri (1965) para análise das morfoestruturas e das rochas. Para a drenagem, adotou-se a classificação de Strahler e Strahler (1996) e Christofolletti (1974), utilizadas para identificar as nascentes a partir dos cursos d'água de primeira ordem, as quais são consideradas como reservas ecológicas pela Resolução CONAMA 004 de 18.11.85. As distorções devidas à projeção cônica foram atenuadas com ortorretificação apoiada em pontos de controle no terreno.

3.2 – Trabalho de campo

Com base na análise das fotografias aéreas, foram estabelecidos pontos a serem descritos em campo, os quais foram fotografados, registrados com GPS e classificados conforme o relevo, lito-

logia, aspectos geotécnicos e o uso do solo. Assim, foi considerada a forma de relevo, ou situação do ponto descrito na paisagem, como planície, divisor de água, etc., bem como sua posição na vertente: sopé da encosta, meia encosta e alta encosta. A declividade foi estabelecida no entorno de 100 metros do local descrito. A amplitude das rampas foi estimada visualmente, com apoio do modelo digital de elevação (MDE).

Na litologia, procurou-se identificar a cor da rocha, a textura, as estruturas associadas, a classificação macroscópica e a unidade litoestratigráfica. Quanto aos aspectos geotécnicos, observou-se grau de alteração, espessura do solo, padrão erosivo, tendência a movimentos de massa, nível freático em pontos de ocorrências de fontes em taludes e em poços domiciliares. A permeabilidade foi estimada visualmente em função do tipo de rocha e/ou sedimento. No que diz respeito ao uso do solo, observaram-se cobertura vegetal predominante, tipo de cultura, existência de área urbana ou de aglomerado rural, proximidade com rodovias, além de tipo de atividade de mineração.

3.3 – Processamento de imagens

As técnicas de processamento digital de imagem (PDI) utilizadas no estudo envolveram pré-processamentos (correções geométrica e atmosférica), realce de contrastes, filtragem, classificação de imagens e pós-processamentos das imagens. Inicialmente, foi adotado o sistema de coordenadas na projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), datum Córrego Alegre, conforme a base cartográfica empregada, mas os produtos finais foram convertidos para SIRGAS 2000 (IBGE, 2008). A correção geométrica baseou-se em pontos de controle no terreno, apoiada pela carta planialtimétrica e baseando-se na banda TM3, identificaram-se pontos reconhecíveis tanto na imagem quanto na carta planialtimétrica. A reamostragem foi por interpolação dos valores de NDs (números digitais) pelo método vizinho mais próximo.

Foram selecionados tripletes de bandas pelo método de Chavez Jr. *et al.* (1982), como apoio visual a classificação das imagens. Foi aplicado aumento linear de contraste em todas as bandas, a fim de atenuar efeitos atmosféricos e de sombreamento. Para visualização das morfo-estruturas, aplicou-se filtro multidirecional 7X7 (Araújo e Carvalho Jr. 1994) Na banda 4. O uso do solo foi mapeado pelo método de classificação máxima verossimilhança (MAXVER), tendo mais de uma centena de amostras, com base em dados georreferenciados a campo.

3.4 – Geoprocessamento

O estudo abrangeu as coordenadas extremas do Município de Três Cachoeiras, escala 1:50.000; projeção UTM Córrego Alegre, com resolução espacial de 30 metros. A atualização dos dados da rede viária foi feita pela imagem de satélite. O limite da área estudada foi obtido pela malha municipal do IBGE, com exclusão da porção pertencente à Lagoa Itapeva. Para a delimitação de reservas ecológicas, utilizaram-se curvas de nível e ordens de drenagens, conforme a Resolução CONAMA n°. 004 de 18.11.85.

Para elaborar o MDE, utilizaram-se dados altimétricos SRTM com 90 metros de resolução. A declividade foi reclassificada com base no enfoque geotécnico, ambiental e aspectos observados em campo, como indícios de erosão em colúvios (declives maiores do que 5%) e movimentos de massa (declives maiores do que 30%). Foram estabelecidas classes nos intervalos 0-2%, 2-5, 5-12, 12-30, 30-45% e maiores do que 45%. Isto foi fundamental para cruzamentos posteriores, pois a variação da declividade constitui importante parâmetro para a análise do meio físico e avaliação da suscetibilidade a certos problemas geotécnicos. Os produtos da fotointerpretação foram digitalizados e juntamente com produtos de classificação da imagem de satélite, foram inseridos no SIG e integrados. O Quadro 1 exibe os cruzamentos no SIG.

Quadro 1 – Esquema de cruzamentos de temas no SIG.

Cruzamentos	Produtos
Litologia por fotointerpretação X Dados de campo	Carta litológica (CLIT)
Formações superficiais por fotointerpretação X Rochas/solos por classificação de imagem	Carta de formações superficiais (CFS)
CLIT X Morfo-estruturas por fotointerpretação	Carta de unidades hidrogeológicas potenciais (CUHP)
CLIT X CFS	Carta de recomendação à extração de material para construção civil (CRMC)
CFS X CUPH	Carta de recomendação para obras de infra-estrutura (CROI)
CLIT X Carta de declividade (CDEC) X CUPH	Carta de recomendação à disposição de resíduos sólidos e loteamentos (CRSL)
CDEC X CFS	Carta de recomendação geotécnica à agricultura (CRAG)
Carta limite de reservas ecológicas (CLRE) X CDEC X Carta de uso atual do solo (CUAT)	Carta de recomendação à implantação de áreas de preservação ambiental (CRAM)

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Rede de drenagem

O arranjo da drenagem na região de transição entre planalto e planície costeira dá-se conforme o condicionamento litológico, estrutural e deposicional dos terrenos. Sobre rochas vulcânicas (Formação Serra Geral) e colúvios, a drenagem apresenta padrões angular, paralelo e anastomosado. Sobre depósitos sedimentares quaternários, os rios apresentam padrão meandrante. O padrão angular é o entalhe segundo fraturas nos basaltos e rochas ácidas a intermediárias, em ângulos de 60° e 120° nas confluências, condicionado às morfo-estruturas NE-SW e NW-SE. O padrão meandrante ocorre na planície lagunar, as curvas dos meandros apresentam grandes raios, apresentando-se também sobre terraços aluviais. Nestes, a densidade de drenagem é mais alta e a textura mais fina do que nos depósitos lagunares, de textura grosseira com canais largos e segmentos longos. Os meandros podem estar confinados aos vales principais logo à jusante dos canais com padrão angular, se encaixam segundo a direção dos padrões de fraturas regionais, produzindo-se o padrão subangular.

Nas bacias hidrográficas do Município de Três Cachoeiras, as drenagens são de primeira a quarta ordem. A primeira ordem caracteriza nascentes situadas nas cotas mais elevadas sobre a unidade geomorfológica Serra Geral, mas também na unidade Planície Lagunar como raros arroios que deságuam diretamente na Lagoa Itapeva. As drenagens de segunda ordem situam-se sobre a unidade geomorfológica Serra Geral, e geralmente são afluentes dos rios maiores (rio do Terra-Cardoso e arroio Chimarrão). A terceira ordem representa o Arroio Chimarrão e os afluentes do Rio do Terra-Cardoso (quarta ordem). O estudo sobre fotografias aéreas pode estabelecer rios de ordem maior do que observada na carta plani-altimétrica, devido à escala mais detalhada.

4.2 – Litologia

4.2.1 – Seqüência mesozóica

Na fotografia aérea, observou-se que as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (J-K) dominam a área e encontram-se sobrepostas aos arenitos da Formação Botucatu (J), que ocupam

menor área. Tais litologias são indivisíveis devido a sua similaridade tonal e textural em fotografia aérea. Exibem-se em tom cinza claro, que escurece em direção à base da seqüência, com forte padrão de fraturas. As zonas de relevo acidentado do Município e morros testemunhos isolados entre os depósitos da planície costeira, caracterizam formas de relevo abruptas e alta declividade, taludes rochosos com vertentes verticais nos flancos dos vales, espigões agudos retilíneos nos interflúvios. Nas porções mais elevadas, ocorrem resquícios do Planalto dos Campos Gerais e topos planos situados na porção noroeste da área, onde são encontradas rochas vulcânicas ácidas a intermediárias.

Estruturalmente, essa seqüência apresenta escalonamento resultante dos sucessivos derrames de lava, dado por patamares rochosos intercalados com depósitos de tálus. Os principais lineamentos mostram direção NE-SW, secundariamente NW-SE, cruzados em ângulos de 60° e 120°, causados provavelmente por sistemas de fraturas de resfriamento, posteriormente reativadas na forma de falhas. Esses lineamentos revelam-se no padrão de drenagem angular (NE-SW), característico de rochas da Formação Serra Geral e pelo padrão paralelo (NW-SE).

A Formação Botucatu, litologia basal da área estudada, constitui-se por arenito feldspático de textura média, em geral bem classificada, de grãos sub-arredondados a arredondados. Como estrutura marcante, exibe estratificação cruzada de grande ângulo, o que evidencia a origem eólica do depósito. A cimentação da rocha pode ser por óxido de ferro que confere o caráter friável, e por sílica que dá maior resistência à desagregação intempérica. Seus solos são rasos e arenosos, e podem conter quantidade maior de matéria orgânica em terrenos planos e alagadiços. Nas encostas mais íngremes, os solos são litólicos e o arenito aflora em lajeados, os colúvios são arenosos e os depósitos de tálus circundam os morros-testemunhos. Situam-se no extremo nordeste do Município, com ocorrência também no sudoeste. Esses terrenos exibem relevo ondulado num conjunto de colinas arredondadas com declives médios. O uso predominante do solo é como pastagens, cultura de banana, além de serem encontrados remanescentes de mata nativa.

A Formação Serra Geral, composta por lavas básicas na porção inferior da seqüência (Fácies Gramado), por vezes observada no contato com Arenito Botucatu, apresenta cor melanocrática, textura afanítica e diáclases verticais. Próximo à cota 700m, há rochas ácidas e intermediárias (Fácies Caxias), caracterizadas pela cor acinzentada e fraturas horizontais que produzem lajes finas, e exibem paredões fortemente inclinados. Os basaltos exibem menor inclinação devido à cobertura dos depósitos de encosta gerados pelo intemperismo, mais intenso do que nas rochas ácidas e intermediárias. Os solos são latossolos marrom avermelhados, que podem conter blocos de rochas, além de solos litólicos bastante pedregosos. Esse conjunto litológico recobre amplamente o território municipal, principalmente a sul e sudoeste, retratado pelo relevo montanhoso com declives íngremes nas encostas superiores e declives intermediários em média e baixa encostas. A ocupação do solo caracteriza-se por pastagens, cultura de banana e mata nativa.

4.2.2 – Depósitos eólicos

Os depósitos eólicos compõem-se de areias finas ferruginosas de coloração avermelhada e os grãos são arredondados e bem classificados. O relevo é suavemente ondulado e a superfície do terreno é ocupada por florestas de eucalipto, lavouras de milho e cana-de-açúcar; além disso, há extração de material de empréstimo.

4.2.3 – Depósitos de colúvio

Observaram-se tons cinza claros e textura mosqueada na fotografia aérea, provavelmente causada pela mistura de materiais intemperizados com fragmentos de rocha. O padrão de drenagem sub-paralelo de alta densidade, drenagens finas, canais estreitos e pouco aprofundados, diagnostica

ainda melhor esta litologia. O entalhe da drenagem é controlado pelo escoamento superficial, provocando erosão em sulcos em direção ao curso d'água principal. Os colúvios situam-se sobre relevos ondulados a fortemente ondulados com declividades que variam de 15 a 30% (obtidas pelo MDE), localizam-se na média encosta e apresentam contato transicional com o terraço aluvial e contato brusco com os depósitos lagunares. Exibem blocos de rocha com dimensões centimétricas a métricas, imersos em matriz argilosa marrom avermelhada, provenientes da decomposição de basalto. Formam corpos contínuos situados na porção média e no sopé das encostas abruptas dos derrames, encostas essas de declives moderados a fortes, que chegam a encobrir o Arenito Botucatu na área onde os colúvios são mais espessos, a oeste do Município. A ocupação do solo é feita por lavouras, cultivo de banana e mata nativa.

4.2.4 – Depósitos de terraço aluvial

Corpos alongados em formato de cunha, constituem áreas planas a levemente inclinadas nas bordas mais próximas dos colúvios, e são encaixados nos vales estruturais inseridos na unidade geomorfológica Serra Geral. Apresentam tonalidade idêntica aos colúvios, de textura fina, o que indica deposição de planície de inundação com sedimentação fina, provavelmente areias muito finas e siltes. O padrão de drenagem é anastomosado irregular, caracterizado por ilhas, bifurcações e reencontros dos cursos d'água. Situam-se ao longo dos médios cursos do rio do Terra-Cardoso e arroio Chimarrão, apresentam contato gradativo com os depósitos de colúvio e contato marcante com os depósitos de terraço lagunar. Em campo, são formados por areias finas com intercalações de areias argilosas com níveis de cascalho. Caracterizam antigas várzeas semiplanas, originárias de planície de inundação do rio do Terra-Cardoso e do arroio Chimarrão. A ocupação atual destas várzeas dá-se por pastagens, plantio de banana e remanescentes de mata ciliar.

4.2.5 – Depósitos de terraço lagunar

Situam-se em zonas muito planas, caracterizam-se como corpos irregulares com bordas arredondadas, de tonalidades muito mais claras do que as demais áreas, o que provavelmente indica constituição predominantemente arenosa. A inexistência de cursos d'água indica que são corpos bem drenados. São constituídos por siltes e areia muito fina, de coloração cinza à cinza-claro, e que caracterizam terraços lagunares em níveis marinhos outrora mais elevados do que os atuais. Tem como ocupação principal do solo o reflorestamento, e são os terrenos mais escolhidos para assentamentos urbanos de vilas e mesmo da sede municipal de Três Cachoeiras, atividades que requerem terrenos mais secos.

4.2.6 – Depósitos de planície lagunar

São superfícies extremamente planas, de tonalidade mais escura que os depósitos de terraço lagunar, possivelmente devido à retenção de água, o que indica a predominância de sedimentos argilosos. As estruturas nos pontais da Lagoa Itapeva são linhas de regressão do sistema lagunar holocênico e atual. Estes depósitos diferenciam-se dos depósitos de terraço lagunar pela existência de drenagem grosseira de grande porte. O padrão de drenagem é meandrante, os canais são bem mais largos que no restante da área, e constitui-se no baixo curso dos rios principais, como o rio Cardoso e o arroio Chimarrão. Os canais secundários são bastante longos em relação aos afluentes que ocorrem no restante da área. Estes sedimentos siltosos marrom-acinzentados, com pequena quantidade de areia muito fina, caracterizam a planície lagunar do final do período Quaternário ao Recente. São amplamente utilizados no plantio de arroz e culturas cíclicas.

4.2.7 – Depósitos flúvio-deltáicos

Localizam-se na desembocadura dos rios Cardoso, Três Forquilhas, arroio Chimarrão, bem como na desembocadura de canais entre lagoas, no caso do Rio Cornélio que liga as lagoas Itapeva e Quadros (Ayup-Zouain, 1991). Estas são áreas planas e úmidas, constituídas por sedimentos escuros, exibem estrutura progradante intra-lagunar, indicada pela existência de linhas de acréscimo direcionadas para dentro da Lagoa Itapeva, o que sugere a energia do aporte sedimentar fluvial. Apresentam sedimentos semelhantes aos depósitos de planície lagunar, embora localmente exibam estrutura de deposição fluvial e relevo extremamente plano.

4.3 – Formações superficiais

A rocha aflorante não se enquadra numa formação superficial, mas foi considerada como elemento de mapeamento em fotografia aérea para fins de delimitação e relação com as formações superficiais adjacentes. Os elúvios, que correspondem aos mantos alterados *in situ* sobre as rochas vulcânicas, ocupam, na maioria das vezes, os divisores de água de topos achatados, quando originados de rochas ácidas a intermediárias e, sobre os espigões alongados, quando originados a partir de rochas básicas. Correspondem às zonas mais elevadas do Município, embora restritas à baixa declividade. Esta condição pode ter possibilitado o desenvolvimento desses depósitos. Nas bordas, são delimitados por paredes de rocha aflorante bastante escarpadas.

Ao longo da encosta, entre os elúvios e os colúvios, visualizou-se uma unidade que se denominou de elúvio+tálus+rocha indivisos, correspondendo à formação superficial intermediária que contém depósitos de tálus alternados, lateralmente, com rocha sã e rocha alterada (elúvio). Os pequenos depósitos de tálus, situados a grandes altitudes neste Município, estão intercalados com superfícies rochosas. São caracterizados por coberturas muito suscetíveis à erosão e aos movimentos de massa. Os colúvios mostram quebra negativa de relevo quando em contato com a unidade anterior, e quebra positiva em relação aos depósitos aluviais e lagunares. As declividades destes corpos são menores do que nas zonas de elúvio+tálus+rocha, porém ainda elevadas. Os colúvios caracterizam-se coberturas espessas, sujeitas à erosão e a deslizamentos e rolamentos de blocos. Os alúvios, depósitos pleistocênicos, também apresentam quebra negativa de relevo. Sua declividade varia de baixa a média (5 - 15%), o que leva à boa estabilidade morfodinâmica nos locais mais planos.

Os depósitos lagunares, sedimentos holocênicos e pleistocênicos de origem lagunar (terraços e planícies), apresentam relevo extremamente plano com declividade praticamente nula. Os depósitos flúvio-deltáicos, produzidos por deltas holocênicos, restringem-se à desembocadura dos cursos d'água na lagoa Itapeva. São formações extremamente planas que não mostram quebra de relevo em relação aos depósitos lagunares, e diferenciam-se destes pela maior quantidade de água e pelas linhas de acréscimo lateral.

4.4 – Aspectos geotécnicos e econômicos

4.4.1 – Formação Botucatu

Os materiais de alteração derivados dos arenitos da Formação Botucatu caracterizam-se pela difícil compactação. A rocha é caracterizada pela relativa facilidade quanto ao desmonte na extração e nos cortes, e pelo intenso desgaste do equipamento utilizado devido ao elevado grau de abrasividade. Não é recomendada como fonte de material para aterro, por ser muito erodível e de difícil compactação, o que leva à necessidade de aplicação de revestimento nas superfícies dos aterros. Geralmente, esses materiais são impenetráveis a trado à pouca profundidade, apresentam condições de suporte e fundação de aterros excelentes, além de boas condições de fundação para obras civis. A drenagem do subsolo é excelente, os cortes são passíveis de afloramento de água, e a ótima per-

meabilidade da rocha facilita o escoamento do lençol subterrâneo, constituindo-se em excelente aquífero. A estabilidade dos cortes na rocha são ótimas, o que permite taludes de corte verticais. Os produtos de alteração dos arenitos da Formação Botucatu são considerados ótimos materiais para emprego na produção de solo-cimento, e também como base e sub-base de pavimentos rodoviários, pois permitem tráfego regular de veículos mesmo após precipitações intensas.

4.4.2 – Formação Serra Geral

Os materiais inconsolidados da Formação Serra Geral, quando homogêneos, permitem fáceis escavabilidade e compactação. Quando atingido o nível rochoso, há necessidade de escarificação e uso de explosivos nas atividades de extração para fins econômicos, ou mesmo para a construção de obras. As rochas são fornecedoras boas condições de suporte, enquanto que a profunda alteração gera materiais argilosos bastante plásticos com blocos de rocha dispersos, condição esta insatisfatória para a fundação de obras devido à baixa capacidade de suporte. Quando essas rochas estão inalteradas, são excelentes materiais para produção de brita para concreto, para base, sub-base, e material drenante, bem como para blocos estruturais, blocos ou placas de pavimentação e rochas de revestimento. No entanto, são raras as ocorrências dessas jazidas no Município.

4.4.3 – Depósitos de colúvio

Constituem material de difícil compactação devido à heterogeneidade, e de escavação facilitada quanto menor o tamanho dos blocos imersos no material argiloso. É fonte restrita de material para aterro, face aos aspectos como compactação deficiente, pequeno volume de argila em relação ao volume de matacões, além da reduzida distribuição dessas jazidas na área. A erosão dos colúvios dá-se pela instabilidade do material e pelas condições de alta declividade (15% - 30%) destes depósitos. Apresentam, geralmente, más condições de suporte e de compactação de aterros. A drenagem do material coluvial é ruim a regular, o que reduz a possibilidade de constituir-se num aquífero. Os taludes de corte, de elevada instabilidade, facilitam os escorregamentos e deslizamentos. As considerações econômicas para o material dos depósitos de colúvio excluem a sua utilização em qualquer tipo de obra de engenharia, salvo quando material argiloso livre de blocos de rocha.

4.4.4 – Depósitos eólicos

Permitem fácil escavação de suas areias, boa compactação, características que lhe conferem uma ótima fonte de material para aterro de obras civis. Contudo, necessitam de tratamento de revestimento dos taludes de aterro para evitar erosão. Quando compactados, apresentam boas condições de suporte. As areias destes depósitos são altamente permeáveis, e podem formar aquíferos localizados. Devido à alta desagregabilidade e textura arenosa do material, são muito suscetíveis à erosão, o que torna não recomendados os taludes íngremes, tanto de aterro quanto de corte. No Município de Três Cachoeiras, esse material é amplamente empregado nos aterros para construção civil e também utilizado na produção de solo-asfalto e solo-cimento.

4.4.5 – Depósitos de terraço lagunar

Devido à grande quantidade de finos, são materiais de difícil compactação, embora sejam facilmente escaváveis e escarificáveis em condições secas, mas muito difícil quando saturados. Por serem muito compressíveis, apresentam baixa capacidade de suporte, o que resulta em material inadequado para aterros de suporte e fundações de obras.

4.4.6 – Depósitos aluviais

Constituem materiais de fácil escavação, porém, sua compactação *in situ* torna-se difícil, devido à heterogeneidade, anisotropia e plasticidade. A baixa capacidade de suporte, devido à presença de camadas argilosas alternadas com outras camadas, impossibilita as condições de compactação necessárias ao uso como fundação, o que não permite a implantação de obras civis. Como esperado, sua drenagem é boa nas camadas arenosas, e péssima nas camadas argilosas, o que inviabiliza a água subterrânea. Mostram-se resistentes quando secos, porém instáveis quando saturados e, por isso, não são recomendáveis à execução de cortes profundos, embora admitam cortes verticais de até 1 metro no material argiloso, mas podem servir como material de empréstimo compactado.

4.4.7 – Depósitos lagunares e deltáicos

São materiais de difícil compactação, devido à predominância de material fino. Quase sempre de difícil escavação e terraplanagem, pois a presença do nível freático, geralmente aflorante ou muito próximo da superfície, o torna muito saturado. A capacidade de suporte é péssima, devido à presença de solos moles e, por isso, não são recomendados para fundações. A drenagem deficiente é devida à constante saturação dos sedimentos permanentemente inundados, de permeabilidade nula. Não se recomendam cortes neste material.

Economicamente, os depósitos aluviais, depósitos de terraço lagunar, depósitos de planície lagunar e depósitos deltáicos têm aplicação muito restrita. Como leito de rodovia, mostram intrafegabilidade sob chuvas moderadas. No entanto, o material argiloso pode ser empregado em cerâmica. Conforme observado durante os trabalhos de campo, as situações de ocupação do solo influenciaram no comportamento geotécnico dos terrenos em Três Cachoeiras. Certos tipos de culturas comprometeram a estabilidade dos colúvios, como as culturas cíclicas, sendo que outras ajudaram a manter a estabilidade dos solos, como é o caso do cultivo de banana nas encostas.

As obras de rodovias municipais, mesmo aquelas não pavimentadas, têm estabilidade dos cortes e leito de estrada, embora haja locais em que foram realizadas medidas de contenção de taludes e de pavimentação do leito da estrada com paralelepípedos. Em campo, foi possível observar que o Município possui poucas frentes de lavra de materiais de construção, fato confirmado pela Prefeitura Municipal de Três Cachoeiras. Os materiais que requerem especificações técnicas mais rigorosas, como rocha para brita, são trazidos do Município de Torres a, aproximadamente, 25 quilômetros de distância.

4.5 – Produtos do processamento de imagens

Inicialmente, foram feitas correções geométricas das imagens utilizadas neste estudo, e foram posteriormente cruzados no SIG os produtos do processamento durante o desenvolvimento do trabalho. A partir da aplicação do método de Chavez Jr. *et al.* (1982), estabeleceu-se o fator de índice ótimo - FIO, em função do triplete com menor correlação entre as bandas e selecionados os tripletes 3-4-5, 1-4-5 e 2-4-5, composições coloridas que auxiliaram a interpretação visual das feições de relevo e uso do solo.

4.5.1 – Aumento de contraste

Em todas as bandas, foi aplicado aumento de contraste, o que fez com que os histogramas fossem expandidos, resultando na melhor visualização da cena em cada banda espectral, como uma melhora da banda 1, muito escura e originalmente pouco contrastante devido à contribuição atmosférica. Essas bandas foram muito importantes na definição de áreas alagadas e corpos d'água (Novo, 1989).

4.5.2 – Filtragens

A banda TM4 mostrou formas de relevo bem definidas e corpos d'água em contraste (ND \cong 0), muito discrepante das outras bandas e a maior reflectância da vegetação atenua o contraste do uso do solo, evidenciando-se os elementos do relevo. Conseqüentemente, a visualização dos lineamentos melhora para revelar as morfo-estruturas. A filtragem multidirecional realçou os lineamentos estruturais e estes foram digitalizados sobre a imagem filtrada, compondo um arquivo de dados vetoriais, obtendo-se uma população em torno de milhares de vetores.

4.5.3 – Classificação de Imagens

A classificação da imagem foi testada para dois temas, rochas/solos (rochas e formações superficiais) e cobertura/uso do solo (recobrimento do solo e ocupação). Foram identificados alvos como água fluvial, água lagunar, áreas alteradas e sombra, para os dois temas, o que permitiu reconhecer a limitação do sistema no sentido de distinguir alvos dentro da área sombreada. A imagem classificada mostrou ruídos, como pixels isolados ou agrupamentos menores contendo pixels de classes diversas, situados nas proximidades de zonas mapeadas homoganeamente (Schowengert, 1983). Possivelmente isto é devido a topografia acidentada e pixel-mistura e para minimizar este problema empregou-se a técnica de uniformização sobre a imagem classificada.

Para rochas/solos, identificaram-se elúvios, colúvios, alúvios, sedimentos lagunares e também rochas, e estabeleceram-se as classes em função de pontos conhecidos no terreno e reconhecidos na imagem. Ressalta-se que, devido à cobertura vegetal, os alvos investigados neste tema (solos e rochas), também foram identificados por meio de aspectos de contexto, pois seus atributos espectrais puderam ser observados apenas em locais que continham solos expostos, pedreiras, etc. Considerando-se limitações de resolução espacial e radiométrica da imagem, foram separadas as classes depósitos flúvio-lagunares; depósitos alúvio-deltaicos; depósitos de colúvio; depósitos de elúvio; rochas aflorantes + depósitos de elúvio; água fluvial e água lagunar.

Foram identificados alvos de cobertura/uso do solo que estabelecessem classes frente aos aspectos importantes para o comportamento geotécnico da superfície do terreno. A amostras foram obtidas de pontos conhecidos nos trabalhos de campo, e reconhecidos na imagem como mata nativa, campo/cultura de banana, culturas temporárias, reflorestamento cultura de banana, áreas alagadas, áreas alteradas, água fluvial, água lagunar e sombra (Quadro 2).

Quadro 2 – Distribuição das classes uso do solo obtidas por PDI.

Classes	Área (hectares)	Porcentagem (%)
mata nativa	3135.24	23.98
campo	3569.13	27.30
agricultura	2495.61	19.09
reflorestamento/banana	1137.69	8.70
áreas inundáveis	1469.52	11.24
áreas alteradas	424.53	3.28
água fluvial	31.32	0.24
água lagunar	36.99	0.28
sombra	774.45	5.92
Total	13074.48	99.99

4.6 – Geoprocessamento

Os produtos preliminares referem-se aos dados extraídos da carta plani-altimétrica, aos dados obtidos por fotointerpretação e aos produtos do processamento digital de imagem. A partir do tema limite da área estudada, obteve-se a área total do Município de Três Cachoeiras em 13.074,48 hectares. A partir do modelo numérico do terreno, gerou-se a carta de declividade, para a qual foram estabelecidas as classes de declividade. O Quadro 3 mostra a distribuição das classes de declividade e a área classificada. No Quadro 4, as áreas definem apenas limites estabelecidos pela legislação ambiental dentre aqueles que puderam ser fornecidos pela carta plani-altimétrica, e que, posteriormente, auxiliaram no estabelecimento de áreas de preservação ambiental.

Quadro 3 – Distribuição das classes de Declividade.

Classes	Morfologia	Área (hectares)	Porcentagem (%)
0-2%	– planícies e terraços lagunares	2825,55	21,73
2-5%	– talvegues dos rios maiores e diferenças de cota entre os terraços e planícies lagunares;	1590,48	12,23
5 - 12%	– rupturas de declives nos terraços fluviais, depósitos de encosta e nos morros testemunho;	3315,60	25,55
12 - 30%	– depósitos coluvionares da zona escarpada	4035,51	31,04
30 - 45%	– topo superior das encostas e morros testemunho	1130,49	8,69
>45%	– Morro do Capitão e montante da Bacia do Arroio Chimarrão	104,58	0,80
Total		13074,48	100,04

Quadro 4 – Limite de reservas ecológicas definidas pela Legislação Ambiental.

Classes	Área (hectares)	Porcentagem (%)
2/3 elevação	4789.62	36.63
margem lagunar	450.63	3.44
margem rio	280.44	2.14
nascente	329.58	2.52
não enquadrada	7224.21	55.25
Total	13074.48	99.98

4.6.1 – Produtos de cruzamentos em SIG

4.6.1.1 – Carta de recomendação à extração de material para construção civil

Esta carta foi produzida baseando-se em dados como de tipo de rocha e material de alteração, e obtida pelo cruzamento das cartas litológica e de formações superficiais. Estes materiais são vistos na Figura 3, e encontram-se distribuídos segundo a Tabela anexada à mesma figura. Com base em critérios como presença de material inconsolidado e de afloramentos de rocha, geraram-se

as seguintes classes, em conformidade com a demanda da região para os materiais destinados à construção civil:

- Arenito ou pedra-grés, pertencente à Formação Botucatu, utilizado como blocos estruturais, calçadas e revestimentos externos e internos de pisos e paredes;
- Basalto e rochas vulcânicas pertencentes a Formação Serra Geral, usadas no revestimento de ruas e calçadas (*petit pavé*), também como lajes de revestimentos de pisos externos e internos, como rocha ornamental de soleira, bancadas e tampos de mesas, bem como na produção de agregados para concreto e enrocamento;
- Argilas e solos argilosos dos depósitos coluviais, para emprego como material impermeabilizante para aterros;
- Cascalhos e areias grossas, encontrados nos leitos atuais dos rios, barras, pontais e leitos abandonados nos terraços fluviais; usados para revestimento de estradas vicinais;
- Areias finas ferruginosas dos depósitos eólicos atualmente utilizadas no corpo de aterros de rodovias e como material de empréstimo para aterros da construção civil.

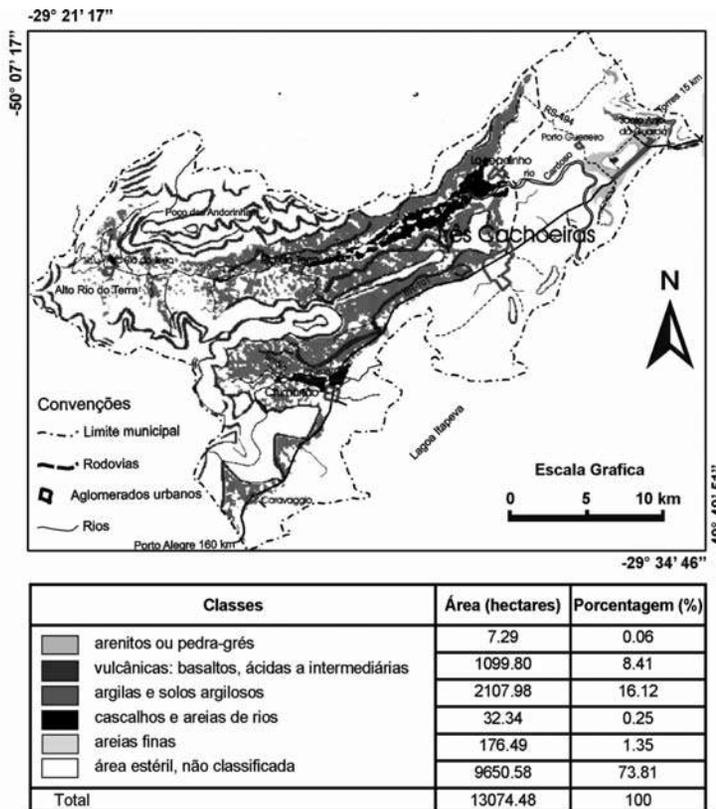


Fig. 3 – Carta de recomendação à extração de material para construção civil Município de Três Cachoeiras, RS.

4.6.1.2 – Carta de recomendação à agricultura

Este produto, obtido pelo cruzamento das cartas de declividades e de formações superficiais, com enfoque puramente geotécnico, surgiu da necessidade de identificar problemas de estabilidade

dos terrenos que podem ser originados pelo manejo agrícola inadequado quanto à cobertura/uso do solo. A distribuição destas classes pode ser observada na Figura 4 e na tabela anexada, sendo estabelecidas as seguintes classes:

- Recomendável para culturas temporárias ou cíclicas, porque a baixa declividade dos terrenos permite o manejo intensificado e periódico da superfície do solo, sem ocasionar problemas geotécnicos imediatos, como erosão;
- Recomendável para culturas permanentes, como reflorestamentos com eucalipto, plantio de banana; a declividade de até 30% em leques aluviais, colúvios e depósitos de encosta requer a fixação de raízes para que sejam minimizados problemas geotécnicos como escorregamentos, deslizamentos, quedas e rolamento de blocos;
- Desfavorável para agricultura, porque declividade, superior a 30% em coberturas coluviais e tálus associados a blocos de rocha, podem gerar movimentos de massa catastróficos como deslizamentos, rolamentos de blocos, etc., intensificados pelas práticas agrícolas.

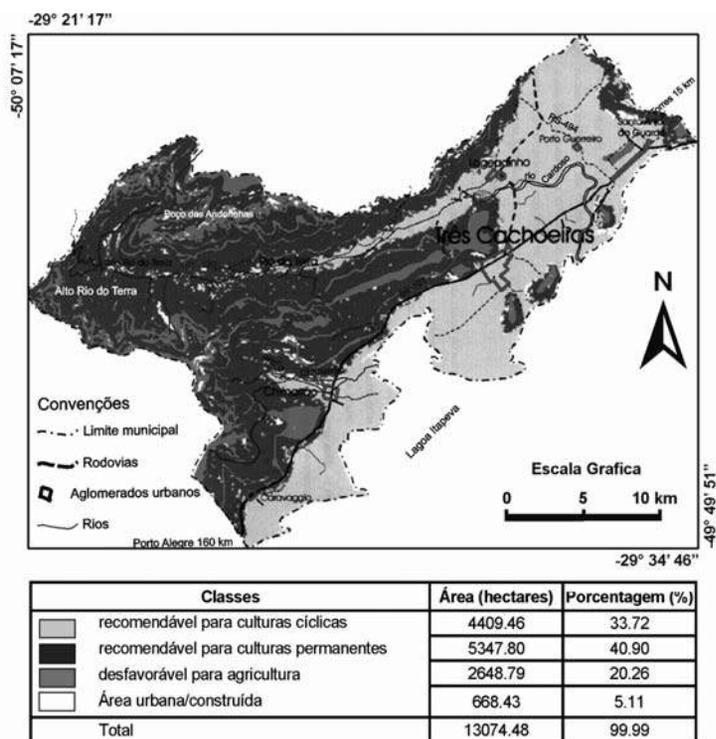


Fig. 4 – Carta de recomendação à agricultura Município de Três Cachoeiras, RS.

4.6.1.3 – Carta de recomendação à implantação de áreas de disposição de resíduos sólidos e loteamentos

Para a geração deste produto, considerou-se a potencialidade de contaminação do solo e subsolo em função dos efluentes gerados pela implantação de um sitio de disposição de resíduos sólidos como de alto risco, e por loteamentos de médio risco, face às características das rochas e sedimentos e sua definição como aquífero. Como base, usaram-se os trabalhos de Leite e Zuquette (1995,1996). Estas classes são observadas na Figura 5 e tabela anexa. Em função da variação de declividade, foram consideradas as áreas de maior ou de menor risco para implantação de moradias.

Sendo assim, foram cruzadas as cartas litológica, hidrogeológica e de declividades. Com isso, estabeleceram-se as novas classes:

- não recomendável para resíduos sólidos e loteamentos – zonas permanentemente alagadas ou alagadiças por longos períodos, o lençol freático é aflorante, ou é área de recarga de aquífero. Elevada vulnerabilidade à contaminação por chorume de aterros sanitários, lixões, e fossas ou sumidouros, ou ainda por efluentes de esgoto; áreas de altas declividades são áreas de risco para implantação de núcleos habitacionais;
- desfavorável para resíduos sólidos e loteamentos – altas declividades constituem risco para ocupação, e ainda aquelas onde existem aquíferos granulares ou de fraturas, que são passíveis de contaminação por chorume e efluentes de fossas ou sumidouros, áreas de preservação permanente protegidas por lei;
- desfavorável para resíduos sólidos e indicado para loteamentos – apresenta áreas de aquíferos costeiros, onde lençol freático é próximo à superfície; por esse motivo, são desfavoráveis para resíduos, entretanto, a topografia plana aliada às baixíssimas declividades e à drenagem permanente do terreno permite indicar para assentamento de lotes, desde que os cuidados necessários sejam tomados para não contaminação do subsolo por meio de adequado saneamento básico;
- favorável para resíduos sólidos e para loteamentos – áreas em que não existem aquíferos, mas aquícludes, e cujas declividades médias e baixas não constituem risco para ocupação humana nesses terrenos.

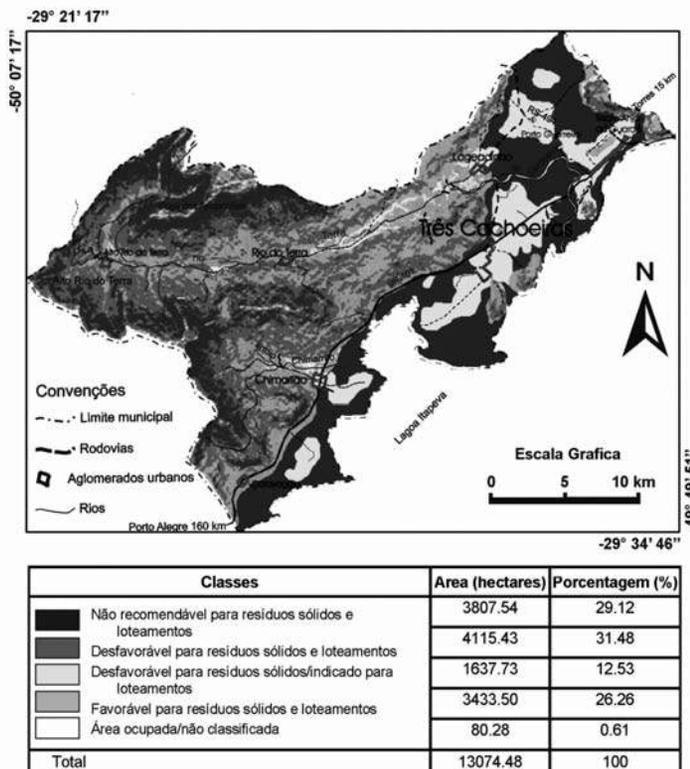


Fig. 5 – Carta de recomendação à implantação de áreas de disposição de resíduos sólidos e loteamentos Município de Três Cachoeiras, RS.

4.6.1.4 – Carta de recomendação à implantação de obras de infra-estrutura

Consideram-se obras de grande porte como barragens, estradas, dutovias, etc. e a implantação destas obras deve estar em conformidade com os declives, as condições de fundação do subsolo e a capacidade de suporte dos terrenos (Figura 6 e tabela anexa). Se estas características forem desfavoráveis podem comprometer a vida útil das obras e de seu funcionamento. Para isto, foram cruzadas as cartas de declividades e de formações superficiais, sendo então estabelecidas as classes:

- desfavorável à implantação – a fim de evitar áreas alagadas extremamente planas, provavelmente as possuem solos com baixa capacidade de suporte, desfavorável para fundações e sujeitas a subsidências, assim como áreas de declividades maiores que 12% com ocorrência de tálus, pois caracterizam terrenos muito instáveis aos cortes e fundações;
- implantar com ressalvas – requer cuidados geotécnicos, principalmente em áreas com até 30% de declive, evitando-se os depósitos de tálus, porque são instáveis quando cortados ou escavados;
- favorável à implantação – áreas bastante planas, que não estão sujeitas aos alagamentos; são os terraços lagunares, os sopés de colúvios e os terraços fluviais com declives suaves.

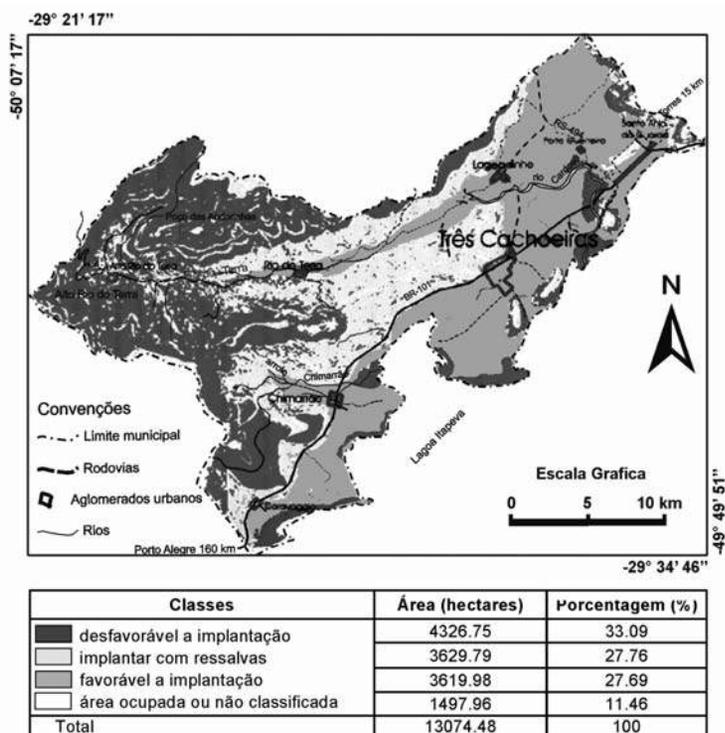


Fig. 6 – Carta de recomendação à implantação de obras de Infra-estrutura, Município de Três Cachoeiras, RS.

4.6.1.5 – Carta de recomendação à implantação de áreas de preservação ambiental e/ou à recuperação

Para este produto ser viabilizado, consideraram-se as informações atualizadas pela imagem de satélite, que indicou as áreas de mata nativa e zonas alagadas (banhados), as altas declividades dadas pela carta específica e outras áreas definidas como reservas ecológicas pela Resolução CONAMA n° 004 de 18.11.85. Assim, esta carta foi gerada por meio do cruzamento das cartas de

uso atual do solo, carta de declividades e limite de reservas ecológicas. Baseado nisso, produziram-se as classes citadas que estão representadas na Figura 7 e sua distribuição em área encontra-se na tabela anexa à mesma figura.

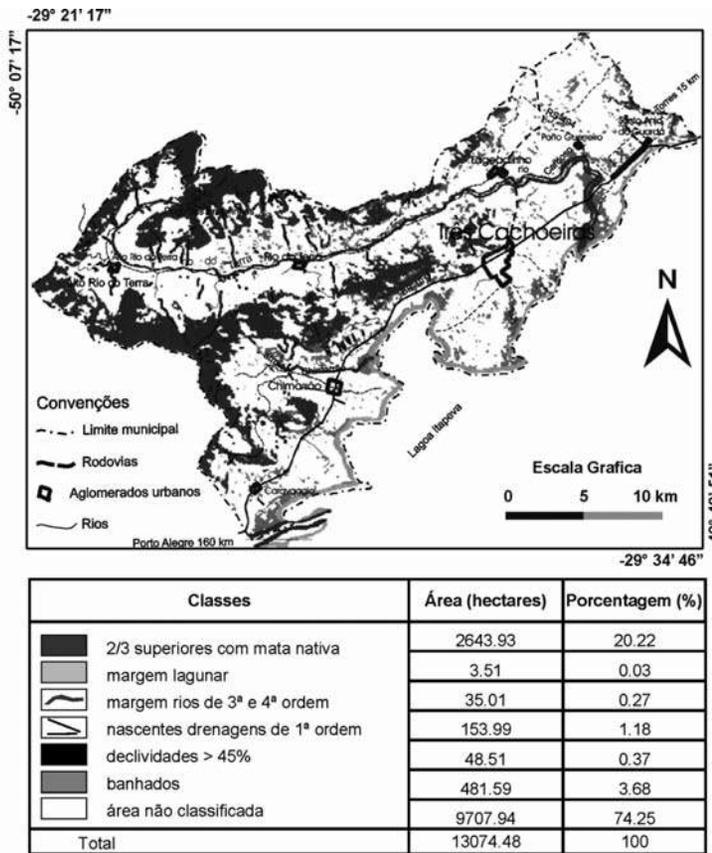


Fig. 7 – Carta de recomendação à implantação de áreas de preservação ambiental e/ou à recuperação, Município de Três Cachoeiras, RS.

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A fotointerpretação mostrou-se mais eficiente na extração da ordem de drenagem do que a carta plani-altimétrica, porque os rios de primeira ordem estavam omitidos na carta, contribuindo para que as nascentes fossem classificadas pelas drenagens desta ordem. Obteve-se a distinção das U. G. Serra Geral e Planície Lagunar. No entanto, na fotointerpretação, a semelhança entre padrões das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral com as rochas areníticas da Formação Botucatu, não permitiu distinção devido à ocorrência de espessas coberturas colúvias e elúvias no contato entre essas rochas.

As variações posicionais dentro da UG Planície Lagunar foram satisfatoriamente distinguidas na fotografia aérea. As areias eólicas pleistocênicas, ao contrário, assemelham-se em tonalidade e textura, são passíveis de ser confundidas com os depósitos de terraços lagunares, e são, assim, melhor distinguidas em campo.

As formações superficiais, em geral, foram mais satisfatoriamente visualizadas na foto do que as unidades de subsolo (rochas) por estarem aflorantes. Na escala da fotografia aérea (1:20.000), as morfoestruturas foram melhor visualizadas na zona serrana, e apresentam-se encobertas pelo manto de alteração nas áreas de transição com a planície costeira. Entretanto, a filtragem multidirecional permitiu processar a imagem e investigar melhor este alvo.

Pelas observações de campo, foram individualizadas as rochas da "seqüência mesozóica" observadas durante a fotointerpretação, o que permitiu constatar uma zona de ocorrência predominante do Arenito Botucatu na porção nordeste do Município, com pequenas coberturas de rochas vulcânicas. Na porção oeste, caracterizada por ser a região mais elevada da área, há uma certa diversidade de rochas vulcânicas, e ali as rochas básicas dão lugar às rochas ácidas a intermediárias em direção ao topo das elevações. Também foram individualizadas em campo as areias eólicas ferruginosas, separadas dos depósitos de terraços lagunares.

Observou-se que os terrenos situados em altas declividades, como os depósitos de tálus e colúvios com solo descoberto são os mais susceptíveis a movimentos de massa, mas colúvios com baixa declividade apresentaram marcas de movimentos de massa sobre áreas de agricultura em fase de pousio. Os depósitos holocênicos, lagunares e deltáicos estão sujeitos a subsidências, por serem materiais com baixa capacidade de suporte para obras civis, devido à tendência à presença de argilas expansivas.

Devido ao pouco aproveitamento do potencial de exploração de material para construção civil, há necessidade de zoneamento geotécnico baseado na carta de recomendação à extração de materiais para construção civil apresentada neste trabalho. Nesta carta, mais de 25 % da área é promissora e os bens minerais podem ser prospectados e/ou explotados mediante levantamentos detalhados.

A classificação de imagem de satélite mostrou-se um eficiente método para obter as informações de cobertura e uso do solo; podendo ser atualizada periodicamente, pois há uma diversidade de produtos orbitais disponíveis no mercado, inclusive gratuitamente. Os campos predominam em Três Cachoeiras, seguidos pela mata nativa, que ocupa quase um quarto da área estudada. Na planície, predomina a atividade agrícola, seguida pela área alagada. As áreas alteradas (solo descoberto) perfazem menos de 2,0 % do total do Município.

O emprego do geoprocessamento permitiu calcular os valores das áreas das classes para todos os temas, suas dimensões de forma muito mais rápida quando em comparação aos métodos convencionais de medição. O MDE foi suficiente para determinar a altimetria e calcular as declividades como áreas críticas com pendentes maiores que 45% e definir às áreas de preservação permanente. A partir de dados vetorial e raster, o SIG mostrou eficácia na elaboração de produtos derivados de cruzamentos, o que permitiu a recomendação de zonas de uso para diversas atividades e o estabelecimento de limites de reservas ecológicas, possibilitando delimitar bem as áreas de preservação ambiental do Município, dado importante para a gestão ambiental.

A carta hidrogeológica aponta pequena área aflorante para a ocorrência do Aquífero Guarani no Município, importante fonte para abastecimento público. A ocorrência do Aquífero Guarani em sub-

superfície pode ser mais investigada por meio de pesquisa hidrogeológica e execução de poços profundos. O aquífero fraturado das rochas vulcânicas pode também fornecer água de boa qualidade.

A carta de recomendação à agricultura mostra que um quinto da área não é recomendável à atividade agrícola, devido, principalmente, às altas declividades que comprometem a dinâmica superficial das rochas e solos, e que facilitam os movimentos de massa e os processos erosivos.

Pela carta de recomendação à implantação de áreas de disposição de resíduos sólidos e de loteamentos, observou-se que o Município dispõe mais 25% do território onde tais atividades podem assentar-se sobre depósitos coluvionares, que têm baixa permeabilidade e inclinações médias. Em uma área de 38 %, podem ser implantados loteamentos sobre depósitos de terraços lagunares, pela baixa declividade e por não oferecer risco de ocupação.

A carta de recomendação à implantação de obras de infra-estrutura revela áreas desfavoráveis à implantação de obras em mais de um terço do Município, observando-se que obras de infra-estrutura estão localizadas, em sua maioria, sobre a zona favorável à implantação.

A carta de recomendação à implantação de áreas de preservação ambiental e/ou destinadas à recuperação indicou zonas com mata nativa, com banhados, de alta declividade e áreas de preservação permanente definidas desde a Resolução CONAMA nº 004, de 18.11.1985. A área de Três Cachoeiras integra a Reserva da Biosfera da Mata Atlântica e a presença desta floresta remanescente significa a manutenção das condições ambientais favoráveis para estabilidade de terrenos frágeis situados em alta declividade sujeitos à erosão e movimentos de massa, fenômenos comuns na encosta serrana do litoral norte do Rio Grande do Sul.

Os banhados formam um conjunto de ecossistemas costeiros e propiciam que espécies vegetais e animais, incluindo as migratórias, desenvolvam-se sem risco de extinção e devem ser preservados. Foram também indicadas áreas de preservação permanente nas margens de rios e da lagoa Itapeva, os quais podem ser recuperadas com a introdução de cobertura vegetal nativa daqueles ecossistemas. Recomenda-se que seja feita a delimitação das áreas de preservação ambiental com base em estudos semelhantes aos discutidos, cujo enquadramento oficial poderá beneficiar atividades ambientalmente sustentáveis no Município de Três Cachoeiras.

6 – AGRADECIMENTOS

Ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia/UFRGS, pela infra-estrutura de apoio e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio à pesquisa. À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa e à Universidade Federal do Paraná.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, A. H.; Carvalho Jr. (1994) – *Arquitetura e implementação computacional de filtros digitais multidirecionais para aplicação na detecção de lineamentos estruturais e contatos geológicos*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Balneário Camboriú, 1994. Resumos Expandidos, SBG: p.335-337.
- Ayup-Zouain, R. N. (1991) – *Aplicação de Técnicas Especiais de Sensoriamento Remoto para o estudo de canais lagunares temporais em sistemas costeiros*. In: 4º Simpósio de Geografia Física Aplicada, 1991, Porto Alegre. ANAIS. Porto Alegre, RS, Brasil, 1991. v. 1, pp. 637-638.
- Câmara, G.; Souza, R. C. M.; Freitas, U. M.; Garrido, J. C. P. (1996) – *SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling*. Computers and Graphics, vol.15, n.6, July 1996, pp.13-22.

- Chavez Jr., P. S.; Berlin, G. L.; Sowers, L. B. (1982) – *Statistical method for selecting Landsat MSS ratios*. Journal of Applied Photographic Engineering, v. 8, pp. 23-31.
- Christofoletti, A. (1974) – *Geomorfologia*. Edgard Blücher/Edusp, São Paulo, 230p.
- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente (2008) – *Legislação ambiental brasileira*, disponível: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legi.cfm>
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2008) – Mapa Geológico do Rio Grande do Sul. Escala 1:750.000. CPRM/MME. Disponível <http://www.cprm.gov.br/>
- CPRM – Companhia de Pesquisa de recursos Minerais – *Diagnóstico Preliminar dos Aspectos Ambientais do Litoral Norte do Rio Grande do Sul* – RS. 1994. Litoral Norte do Rio Grande do Sul – LINORS. Disponível: <http://www.cprm.gov.br>
- Gomes, L; Tricart, J.; Trautmann, J. (1987) – *Estudo ecodinâmico da estação ecológica do Taim e seus arredores: planície costeira do Rio Grande do Sul*. Ed. da Universidade, UFRGS, Porto Alegre, 84 p.
- Hoff, R. (1996) – *Técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicadas ao mapeamento geológico/geotécnico no Município de Três Cachoeiras, litoral norte do RS*. Dissertação de Mestrado, CEPARM/UFRGS, Porto Alegre, 132 p., Ilustr.
- Hoff, R.; Vaccaro, S.; Krob, A. J. D. (2008) – Aplicação de geotecnologias: detecção remota e geoprocessamento: para a gestão ambiental dos recursos hídricos superficiais em Cambará do Sul, RS, Brasil. *Tekhné, Barcelos*, v. 6, n. 10, pp. 103-127.
- Horn Filho, N.; Loss, E. L.; Tomazelli, L. J.; Villwock, J. A.; Dehnhardt, E. A.; Koppe, J. C. (1984) – *Mapa Geológico das Folhas de Três Cachoeiras e Torres*. In: Atlas Geológicos da Província Costeira do Rio Grande do Sul. CECO/DGC, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre.
- Horn F., N. O.; Villwock, J. A.; Dehnhardt, E. A.; Tomazelli, L. J.; Loss, E. L. ; Bachi, F. A.; Godolphim, M. F. (1988) – *Mapeamento Geológico da Província Costeira do Rio Grande do Sul*. In: Simpósio Sobre Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras: Origem, Características Geotécnicas e Experiência de Obras, 1988, Rio de Janeiro. ANAIS. Rio de Janeiro. v. 2, pp. 1-21.
- IBGE – Fundação IBGE – *Levantamento dos recursos naturais. Folha Porto Alegre. Uruguaiana e Lagoa Mirim*, v. 33. Fibge, rio de janeiro, 796 p. 1986/2003 - Cd-Rom.
- IPARDES - Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (1995) – *Diagnóstico ambiental da APA de Guaraqueçaba*. 166 p., Curitiba (IPARDES), 2ª ed.
- Leite, J. C. ; Zuquette, L. V. (1995) – Carta de susceptibilidade à contaminação e poluição das águas subsuperficiais de Ribeirão Preto, SP. In: REGEO'95 - III Simpósio de Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, v. 2, pp. 453-460.
- Leite, J. C. ; Zuquette, L. V. (1996) – Atributos fundamentais à elaboração da carta de susceptibilidade a contaminação e poluição das águas subsuperficiais. In: VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, pp. 647-657.
- Leite, J. C. (1995) – *Metodologia para elaboração de cartas de susceptibilidade à contaminação e poluição de águas subsuperficiais*. Dissertação de mestrado: Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

- Mattos, J. T.; Vedovello, R. (1992) – *Compartimentação fisiográfica para Zoneamento Geotécnico através de Sensoriamento Remoto Orbital*. In: 37º Congresso Brasileiro de Geologia, 1992, São Paulo, 1992. Boletim de resumos expandidos, pp. 149-149.
- Merico, L. F. K. (1987) – *A estabilidade do meio morfodinâmico e sua aplicação no planejamento ambiental*. In: III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Atas. Curitiba: SBG.
- Moreira, E. C.; Zuquette, L. V. (1993) – *Avaliação do sistema de informação geográfica para aplicação em mapeamento geotécnico*. In: 1º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, Anais. São Paulo.
- Novo, E. M. L. M. (1989) – *Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações*. Ed. Edgar Blucher.
- Okida, R.; Veneziani, P. (1994) – *Caracterização de área de riscos associadas a escorregamentos e inundações através de técnicas de sensoriamento remoto: uma proposta metodológica*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38., 1994, Camboriú. Boletim de Resumos Expandidos. Camboriú: SBG, 1994, pp. 451-452.
- Ricci, M.; Petri, S. (1965) – *Princípios de Aerofotogrametria e Interpretação geológica*. Companhia Editora Nacional, 226p.
- Schowengerdt, R. A. (1983) – *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*. Academic Press. N.Y.
- Soares, P. C.; Fiori, A. P. (1976) – *Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia*. In: Notícias Geomorfológicas, 1976. 16(32): 71-104.
- SPVS – Sociedade de Proteção a Vida Selvagem (1992) – *Plano Integrado de Conservação para a Região de Guaraqueçaba*, Paraná, Brasil. Vol. I. Curitiba, Paraná. 83 p.
- Strahler, A. H.; Strahler, A. (1996) – *Physical geography*. New York: John Wiley.
- Suertegaray, D. M.; Nunes, E. S. L.; Weber, E. J.; Gonçalves, G. A.; Duarte, G. F.; Moraes, M. R.; Hoff, R. (1994) – *Diretrizes para o gerenciamento ambiental da barreira quaternária da laguna dos Patos*. In: COBRAC - 1994, 1o Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Tomo II, pp. 29-35, Florianópolis - SC.
- Tomazelli, L. J.; Villwock, J. A. (1991) – *Geologia do sistema lagunar holocênico do Litoral Norte Do Rio Grande do Sul*. Rev. Pesquisas em Geociências, 18(1): 13-24.
- Tricart, J. (1977) – *Ecodinâmica*. SUPREN - IBGE, Rio de Janeiro.
- University of Maryland. *Global Land Cover Facility* (2008) – NASA/UMIACS.
[Http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml](http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml)
- USGS – United States geological survey. *Shuttle radar topography mission* (2008) – USGS/NASA.
[Http://srtm.usgs.gov/](http://srtm.usgs.gov/)
- Velasques, I. F.; Bered, A.; Dobrovolski, R. (1992) – *O macrozoneamento costeiro do Rio Grande do Sul, metodologia de abordagem, programa de gerenciamento costeiro* - GERCO/ RS, Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM, relatório 14 p., Porto Alegre.
- Veneziani, P.; Anjos, C. E.; Gomes, A. O.; Valério Filho, M. ; Kurkdjian, M. L. N. O.; Florenzano, T. G. (1990) – *Contribuição da geologia para a atualização do macrozoneamento da Região*

- do Vale do Paraíba e Litoral Norte do Estado de São Paulo com a utilização de dados de imagens TM-Landsat.* In: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, 1990, Natal. Boletim de Resumos.
- Verdinelli, M. E. P.; Verdinelli, M. A. (1994) – *Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Ambiental de Zonas Costeira.* In: I Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário., 1994, Florianópolis, SC. Anais do I COBRAC Tomo II. Desenvolvimento Tecnológico e o Cadastro Técnico Multifinalitário. pp. 93-97.
- Villwock, J. A.; Tomazelli, L. J. (1995) – *Geologia costeira do Rio Grande do Sul.* Notas técnicas. CECO/IG/UFRGS, 45 p., Porto Alegre.
- Weber, E.; Duarte, G. F.; Frank, M.; Hoff, R.; Zomer, S.; Bassani, E.; Junqueira, I. (1998) – Estruturação de sistemas de informação ambiental em bacias hidrográficas: o caso da Bacia Hidrográfica do Rio Caí - RS. In: Congresso E Feira Para Usuários De Geoprocessamento, 4, 1998, Curitiba, Anais [S.l.: s.n., 1998]. Não paginado. GIS Brasil 98.
- Zuquette, L. V. (1987) – *Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras.* (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos.
- Zuquette, L.V.; Gandolfi, N. (1992) – *Mapeamento geotécnico da região de Campinas (SP, Brasil) e sua importância para o planejamento regional.* Geociências, São Paulo, v.11, n.2, pp.191-206.