



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

RBGEA

REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL



**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**

REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Publicação Científica da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

EDITORES

Prof. Dra. Alessandra Cristina Corsi - IPT
Prof. Dra. Kátia Canil - UFABC
Prof. Dra. Malva Andrea Mancuso - UFSM
Prof. Me. Marcelo Denser Monteiro - Metrô - SP / UAM

REVISORES

Adalberto Aurélio Azevedo - IPT	José Augusto de Lollo - UNESP
Alberto Pio Fiori - UFPR	José Domingos Gallas - USP
Aline Freitas da Silva - DRM-RJ	José Eduardo Zaine - UNESP
Alessandra Cristina Corsi - IPT	José Luiz Albuquerque Filho - IPT
Angelo José Consoni - TSAP	Kátia Canil - UFABC
Antonio Cendrero - Univ. da Cantabria (Espanha)	Leandro Eugênio da Silva Cerri - UNESP
Antonio Manoel Santos Oliveira - UNG	Luis de Almeida Prado Bacellar - UFOP
Candido Bordeaux Rego Neto - IPUF	Luiz Nishiyama - UFU
Clovis Gonzatti - CIENTEC	Luiz Fernando D'Agostino - Nucleo
Denise de la Corte Bacci - USP	Malva Andrea Mancuso - UFSM
Diana Sarita Hamburger - UFABC	Marcelo Fischer Gramani - IPT
Dirceu Pagotto Stein - Geoexec	Marcilene Dantas Ferreira - UFSCar
Edilson Pissato - USP	Marcelo Denser Monteiro - Metrô - SP / UAM
Eduardo Brandau Quitete - IPT	Marcia Pressinotti - IG/SMA
Eduardo Goulart Collares - UEMG	Marcio A. Cunha - Consultor
Eduardo Soares de Macedo - IPT	Maria Cristina Jacinto Almeida - IPT
Emilio Velloso Barroso - UFRJ	Maria Heloisa B.O. Frascá - Consultora
Eraldo L. Pastore - Consultor	Maria José Brollo - IG/SMA
Fábio Soares Magalhães - Vogbr	Marta Luzia de Souza - UEM
Flávio Almeida da Silva - Engecorps	Nelson Meirim Coutinho - GEORIO
Frederico Garcia Sobreira - UFOP	Newton Moreira de Souza - UnB
Ginaldo Campanha - USP	Noris Costa Diniz - UnB
Helena Polivanov - UFRJ	Reinaldo Lorandi - UFSCar
Jair Santoro - IG/SMA	Renato Luiz Prado - USP
João Francisco Alves Silveira - Consultor	Ricardo Vedovello - IG/SMA
Jorge Kazuo Yamamoto - USP	Yociteru Hasui - Consultor
José Alcino Rodrigues de Carvalho - Univ. Nova de Lisboa (Port.)	

APOIO EDITORIAL

Didiana Dórea

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Rita Motta - Editora Tribo da Ilha

Volume 6

2016

ISSN 2237-4590

DIRETORIA ABGE GESTÃO 2016/2018

Presidente: Adalberto Aurélio Azevedo
Vice Presidente: Lídia Keiko Tominaga
Diretor Secretário: Alessandra Cristina Corsi
Diretor Secretário Adjunto: Deyna Pinho
Diretor Financeiro: José Luiz Albuquerque Filho
Diretor de Cursos: Ivan José Delatim
Diretora de Eventos: Fábio Augusto Gomes Vieira Reis
Diretora de Eventos Adjunto: Renata Augusta Rocha N. de Oliveira
Diretor de Comunicação: Marcelo Denser Monteiro
Diretor de Comunicação Adjunto: Tiago Antonelli
Diretor de Publicação: Andrea Bartorelli
Diretor de Publicação Adjunto: Edilson Pissato

CONSELHO DELIBERATIVO

Adalberto Azevedo, Alessandra Corsi, Andrea Bartorelli, Deyna Pinho, Edilson Pissato, Fábio Reis, Flávio Almeida, Glaucia Cuchierato, Ivan Delatim, José Luiz Albuquerque Filho, Leandro Castro, Lídia Tominaga, Luiz Fernando, Marcelo Denser, Mateus Delatim, Renata Rocha, Silvia Kitaraha e Tiago Antonelli.

NÚCLEO RIO DE JANEIRO - Aline Freitas das Silva

Conselho Deliberativo: Aline Freitas Silva, Hugo Machado, Rodrigo França, Rodney Nascimento, Rúbia Azevedo e Thiago Santos

NÚCLEO MINAS GERAIS - Fábio Magalhães

Conselho Deliberativo: Alberto Amaral, Fábio Magalhães, Gilvan Sá, Luis Bacellar, Maria Giovana Parizzi, Sandra Fernandes e Thiago Teixeira

NÚCLEO SUL - Malva Andrea Mancuso

Conselho Deliberativo: Alberto P. Fiori, Andrea V. Nummer, Débora Lamberty, Eduardo C.B. Carvalho, Erik Wunder, Hermann Vargas, Juan Antonio A. Flores, Luiz A. Bressani e Malva Andrea Mancuso.

NÚCLEO CENTRO OESTE - Ingrid Lima

Conselho Deliberativo: Bruno Diniz, Dário Peixoto, Getúlio Ezequiel, Ingrid Lima, João Armelin, Kurt Albrecht, Juliana Sobreira e Ricardo Vilhena

NÚCLEO NORTE - Cláudio Szlafstein

Conselho Deliberativo: Dianne Danielle Farias Fonseca, Lenilson José Souza de Queiroz, Luciana de Jesus P.P. Miyagawa, José Antonio da Silva, Renato R. Mendonça, Jubal C. Filho e Nilton de Souza Campelo, Loury Bastos, Patrícia Mara Lages Simões, Raimundo Almir C. da Conceição, Sheila Gatinho Teixeira, Túlio A. de Araújo Mendes.

NÚCLEO NORDESTE - Carlos Henrique Medeiros

Conselho Deliberativo: Edval Lopes da Silva, Fagner França, Francisco Said Gonçalves, Heitor Neves Maia, José Braz Diniz Filho, Kleiton Cassimiro, José Vitoriano de Britto Neto, Marcos Paulo Souza Novais, Olavo Santos Junior, Ubiratã Maciel, Ricardo Farias do Amaral e Vanildo Fonseca



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

SECRETARIA EXECUTIVA

Secretária Executiva: Luciana Marques
Av. Profº Almeida Prado, 532 – Prédio 11 –
Cidade Universitária – São Paulo – SP
Telefone: (11) 3767-4361 / (11) 3719-0661
Email: abge@abge.org.br – Home Page: www.abge.org.br



APRESENTAÇÃO

É com grande satisfação que apresentamos o primeiro número da Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) do ano de 2016. Os artigos aqui compartilhados abordam diferentes temas da área da Geologia de Engenharia e Ambiental, que apresentam interesse para a área acadêmica e profissional. Apresentamos, a seguir, uma breve descrição dos estudos e pesquisas publicados nesta edição.

O artigo apresentado por Ligia Abreu Martins e colaboradores aborda a caracterização e o estudo da condutividade hidráulica de camadas compactadas de misturas de zeólita e bentonita. Os autores ressaltam que a adição de bentonita reduz a condutividade hidráulica da zeólita, que é um material adsorptivo utilizado em barreiras reativas. Devido à alta capacidade de troca catiônica da zeólita, a mistura é avaliada como opção de camada impermeabilizante para aterros sanitários.

Conceição e Lima apresentam o método Risk-Based profiling system (RBPS) para análise do potencial de risco de rompimento em barragens de rejeito de mineração para o estado do Pará. O método foi aplicado em seis barragens de rejeitos e em termos práticos, o resultado das análises se torna um instrumento qualitativo de tomadas de decisões baseada no risco.

Erik Wunder e colaboradores apresentam os resultados da caracterização geomecânica e hidrogeológica de um maciço arenítico brando, pertencente à unidade litoestratigráfica Arenito Sambaíba, que hospedou as escavações e recebeu as estruturas civis da Usina Hidrelétrica Estreito (1.087 MW) localizada no rio Tocantins, na divisa dos estados do Maranhão e Tocantins.

Na temática de estabilidade de taludes em mineração temos o artigo de Pires e colaboradores

que fizeram a caracterização geológica e geotécnica da mina do Vau Novo e esses dados serviram de input para a classificação geomecânica nos sistemas RMR (Rock Mass Rating) e SMR (Slope Mass Rating) e para a análise de estabilidade dos taludes da cava atual e do projeto para a cava final. Os autores constataram uma maior probabilidade de rupturas em cunha e tombamentos nos taludes subparalelos à foliação.

Com a finalidade de contribuir para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Sinop (MT), que é abastecido exclusivamente por águas subterrâneas e tem a sua economia voltada para o agronegócio, Theo Bajgielman Ayres e colaboradores estimaram as reservas renováveis, permanentes e explotáveis do Aquífero Utariti. A variação do nível estático, medida em poços tubulares profundos no ano de 2015, e a porosidade do solo permitiram aos autores estimar as reservas do aquífero.

Com vistas a subsidiar o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (RS), Jéssica Formentini e coautores estruturaram uma base de dados em Sistema de Informação Geográfica - SIG, que possibilita a caracterização e análise espacial da qualidade das águas subterrâneas da bacia do Rio da Várzea. O sistema conta com dados primários, obtidos a partir da parceria com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e com dados secundários, coletados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da CPRM.

A partir da estratégia federal de gestão de catástrofes, Dario Dias Peixoto e colaboradores realizaram o mapeamento de risco de quinze municípios do Estado do Mato Grosso (Brasil), aplicando a metodologia proposta pelo Serviço Geológico

do Brasil em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Na temática do planejamento territorial, Amintas Torres Silva Neto e coautores apresentam a Carta de Indicação de Uso e Ocupação de Santana do Paraíso, município da Região Metropolitana do Vale do Aço (MG). Com o objetivo de subsidiar a expansão urbana, as etapas desse trabalho contemplaram uma fase de inventário, trabalhos de campo, caracterização de uso e ocupação e verificação de conflitos. Como resultado, os autores indicam as áreas mais aptas para a ocupação urbana e propõem ações de planejamento e gestão das unidades, tendo em vista suas potencialidades.

Estamos certos de que o conjunto de artigos disponíveis em mais este número da RBGEA configura uma contribuição relevante de profissionais da área de Geologia de Engenharia e Ambiental, refletindo o estado da arte e novos métodos e técnicas de abordagem nas áreas de cartografia e hidrogeologia, assim como resultados relevantes no que se refere à caracterização geomecânica, hidráulica de materiais e análise de risco de rompimento de barragem de mineração.

Desejamos a todos uma ótima leitura!

- 8** ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DE MISTURA ZEÓLITA-BENTONITA PARA CAMADA DE BASE DE ATERRO SANITÁRIO
Ligia Abreu Martins
Yago Guidini da Cunha
Karla Maria Wingler Rebelo
- 21** ANÁLISE DO POTENCIAL DE RISCO DE ROMPIMENTO EM BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO DO ESTADO DO PARÁ UTILIZANDO A METODOLOGIA RISK-BASED PROFILING SYSTEM (RBPS)
Raimundo almir costa da conceição
Aline maria meiguins de lima
- 44** CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA E HIDROGEOLÓGICA DO ARENÍTICO EÓLICO DA FORMAÇÃO SAMBAÍBA – BACIA DO PARNAÍBA
Erik Wunder
- 56** CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DA MINA VAU NOVO (SP) COM ÊNFASE NA ANÁLISE DE DESCONTINUIDADES
Bruno Henrique Gramulha Pires
Camila Duelis Viana
Ginaldo Ademar da Cruz Campanha
- 75** ESTIMATIVA DE RESERVAS DO AQUÍFERO UTIARITI NO MUNICÍPIO DE SINOP – MT
Theo Bajgielman Ayres
Renato Blat Migliorini
Paulo Henrique Madureira Ogando
- 88** ESTRUTURAÇÃO DE BASE DE DADOS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS VOLTADA PARA A GESTÃO DA BACIA DO RIO DA VÁRZEA, RIO GRANDE DO SUL, BRASIL
Jéssica Formentini
Malva Andrea Mancuso
José Luiz Albuquerque Filho

- 98** INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE MASSA E ENCHENTES EM MATO GROSSO, BRASIL: RESULTADOS DE UMA SETORIZAÇÃO DO RISCO GEOLÓGICO
Dario Dias Peixoto
Hamilcar Tavares
Rodrigo Luiz Gallo Fernandes
Douglas Cabral
Guilherme Peret
- 112** SUBSÍDIOS DO MEIO FÍSICO E RESTRIÇÕES LEGAIS PARA O PLANEJAMENTO REGIONAL DO MUNICÍPIO DE SANTANA DO PARAISO, VALE DO AÇO-MG
Amintas Torres Silva Neto
Frederico Garcia Sobreira

ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DE MISTURA ZEÓLITA-BENTONITA PARA CAMADA DE BASE DE ATERRO SANITÁRIO

ANALYSIS OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF ZEOLITE-BENTONITE
MIXTURES TO BE USED AS LANDFILL LINERS

LIGIA ABREU MARTINS

Mestranda, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do
Espírito Santo. E-mail ligiaabreumartins@gmail.com

YAGO GUIDINI DA CUNHA

Graduando, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal
do Espírito Santo. E-mail yagoguidinic@gmail.com

KARLA MARIA WINGLER REBELO

Professora Dr^a. Efetivo, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal
do Espírito Santo. E-mail kmwingler@gmail.com

RESUMO ABSTRAC

A produção crescente de resíduos sólidos aliada à falta de tratamento ou disposição insatisfatórias desses resíduos vem causando problemas ambientais. A fim de evitar grandes impactos em caso de vazamentos da camada impermeabilizante a zeólita, material adsorptivo muito utilizado em barreiras reativas, seria uma opção para utilização em aterros sanitários devido à sua alta Capacidade de Troca Catiônica, removendo assim, metais pesados do meio. Devido sua característica arenosa, para utilização em camadas impermeabilizantes, a adição de bentonita seria uma alternativa para melhorar seu comportamento hidráulico. Esta pesquisa consiste na caracterização e estudo da condutividade hidráulica (k) de camadas compactadas de misturas Zeólita (Z)-Bentonita (B) (Z/B) nas proporções de 3%, 5% e 7% em peso seco de bentonita. A adição de bentonita reduziu a condutividade hidráulica da zeólita. Os resultados indicam que a adição de 3% de bentonita atinge permeabilidade de 3.8×10^{-7} cm/s, abaixo do prescrito para projeto de aterros sanitários.

Palavras-chave: aterro sanitário; camada impermeabilizante; zeólita; bentonita.

The increasing production of solid waste, combined with the lack of treatment or unsatisfactory disposal of these wastes, has caused environmental problems. To avoid major environmental impacts and to minimize the risk of contamination for soil and groundwater under waste containment systems, zeolite, minerals used as adsorptive material in permeable reactive barriers for remediation of groundwater contaminated by heavy metals, can be used as alternative material in constructions of landfill bottom liners. However, granular zeolite doesn't satisfy the required engineering properties, in that sense bentonite addition is a potential alternative to improve the hydraulic performance. The research consisted of the characterization and hydraulic conductivity (k) of Zeolite (Z) - Bentonite (B) (Z/B) prepared in the ratio of 3%, 5% and 7% in terms of dry weight. The bentonite addition considerably reduced k of soil sample. For instance, the addition of 3% resulted of 3.8×10^{-7} cm/s.

Keywords: sanitary landfills; impermeable barriers; zeolite; bentonite.

1 INTRODUÇÃO

A produção de resíduos sólidos aliada a falta de tratamento ou disposição final insatisfatórias desses resíduos vem causando problemas de âmbito ambiental, sanitário e social, dentre eles proliferação de doenças, contaminação do solo e lençóis subterrâneos, poluição pelo gás metano e pelo lixiviado e quando os lixões são a céu aberto, favorecem a presença de catadores. Em meio a esse problema, algumas medidas vêm sendo tomadas por órgãos governamentais a fim de mitigar tal situação, abrangendo assim, políticas de planejamento que visam soluções técnicas para tornar a disposição de resíduos segura e adequada. Em âmbito nacional e global a construção de aterros sanitários e industriais corresponde à solução econômica e técnica mais viável.

Uma das grandes preocupações na construção de um aterro sanitário é a contaminação do solo e cursos d'água nas proximidades do aterro pelo lixiviado, para isso tem-se lançado mão de barreiras impermeabilizantes de fundo (base) utilizadas na fundação do aterro. Para tal, a Norma Brasileira (NBR) 13896/97 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação, considera desejável a existência no local de um depósito natural extenso e homogêneo de materiais com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-7} cm/s.

Usualmente, as barreiras impermeabilizantes de fundo são constituídas por solos de baixa condutividade hidráulica e, mais recentemente, de materiais geossintéticos impermeabilizantes. Em geral, correspondem aos solos argilosos, solos altamente plásticos, que possuem características de contração e expansão com mudanças de umidade (HEINECK, 2002). Ainda segundo Heineck (2002), o ressecamento e a tendência ao recalque dos solos argilosos podem gerar trincas e fissuras, aumentando a condutividade hidráulica e tornando o meio propício a vazamentos do lixiviado, podendo assim atingir e contaminar solos e lençóis freáticos dos arredores. Diante desta situação, a utilização da zeólita, material muito frequente em barreiras reativas, pode ser uma alternativa para utilização como camada impermeabilizante.

A zeólita tem como função, segundo Oliveira (2011), propiciar a redução da concentração e/ou remoção dos contaminantes a níveis aceitáveis pela legislação vigente. Conforme Monte & Resende (2015), a elevada capacidade de troca catiônica (CTC) e o alto poder de adsorção habilitam as zeólitas, dentre outros usos, para recuperação de áreas afetadas por contaminação de metais pesados. Resaltado por Durukan et al (2004), zeólitas podem ser sugeridas como material alternativo para camadas impermeabilizantes devido à capacidade de troca catiônica e pelo fato de poderem ser encontradas em larga escala e a custo moderado em várias partes do mundo.

Apesar dos benefícios químicos da utilização da zeólita, a mesma geralmente apresenta-se com granulometria semelhantes a solos arenosos o que afeta conseqüentemente a permeabilidade do meio. No entanto, em situações em que o solo apresenta condutividade hidráulica inadequada para a construção da camada impermeabilizante, tem-se utilizado aditivos visando à melhoria deste comportamento.

Um aditivo comumente utilizado em obras de impermeabilização é a bentonita, uma argila de granulometria muito fina, composta pelos minerais do grupo das motmorilonitas pertencentes ao grupo das esmectitas. Segundo Morandini & Leite (2015), é conhecido que a bentonita pode reduzir consideravelmente a condutividade hidráulica e melhorar a capacidade de adsorção de solos arenosos.

A bentonita adequada para barreiras impermeáveis é a bentonita sódica, devido à sua maior capacidade de absorção de água e conseqüentemente expansibilidade. Ao se expandir esta tem poder de auto cicatrização reduzindo a probabilidade do lixiviado atravessar a camada de base do aterro pelas possíveis fissuras que podem aparecer com o tempo de funcionamento. Segundo Heineck (2002), devido sua característica expansiva, sob condições confinadas, as partículas expandidas da bentonita são forçadas uma contra as outras preenchendo os vazios entre as partículas de solo, formando uma barreira contra a passagem do fluido.

No contexto explicitado, alguns estudos como Lukiantchuki (2007), Camargo (2012) e Morandini e Leite (2015) analisaram o comportamento de mistura de solos locais com adição de

bentonita. Nesse sentido, faz-se necessária a realização de pesquisas em escala laboratorial a fim de analisar a viabilidade do uso de concentrados zeolíticos misturados com adição de percentuais de bentonita em camadas impermeabilizantes, visto que as zeólitas naturais podem se mostrar altamente eficazes na remediação de vazamentos da camada de base do aterro sanitário.

Diante deste cenário, pretende-se investigar o comportamento hidráulico de misturas zeólita-bentonita, nas proporções de 3%, 5% e 7% em massa de aditivo, por meio de ensaios de caracterização e condutividade hidráulica para utilização como barreiras impermeabilizantes. Cabe ressaltar que esta abordagem é de grande importância dentro de um projeto de aterros, pois compreende aspectos que afetam a eficiência e desempenho do sistema de impermeabilização, comprometendo a integridade da obra como um todo. Neste projeto de pesquisa não será analisada a viabilidade econômica visto que isto dependeria da presença desse solo na área do aterro, o que varia de região para região.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A zeólita utilizada é do tipo natural clinoptilolita e foi doada pela empresa "Celta Brasil". Por meio da análise de trabalhos anteriores, solicitou-se 25 kg do material com diâmetro igual ou inferior a 0,045 mm e 75 kg com diâmetro de 0,4 a 1 mm. As amostras são provenientes da cidade de Cotia - SP, sendo que foram coletadas pela própria empresa, acondicionadas em sacos e transportadas até o laboratório de mecânica dos solos da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Para o estudo, foi realizada uma mistura prévia de todo material recebido com as duas granulometrias, após a mistura inicial o material foi separado por quarteador mecânico em quatro frações e caracterizado antes da adição dos percentuais de aditivo, a fim de analisar a viabilidade da mesma para estudo.

O aditivo utilizado é comercializado pela Bentonisa - Bentonita do Nordeste S.A. e foi classificado como bentonita sódica apresentando,

desta forma, o sódio como cátion interlamelar, com isso, apresenta como característica o inchamento quando em presença de água, benéfico à estrutura das camadas impermeabilizantes.

Segundo Heineck (2002), uma bentonita sódica de média qualidade tem um Limite de Liquidez entre 300 e 500% e uma de alta qualidade entre 500 a 700%. Com isso a bentonita foi classificada como de qualidade média devido ao Limite de Liquidez apresentado de 378,12%.

Foram utilizadas misturas de zeólita-bentonita com teores previamente estabelecidos, a partir de análises de estudos anteriores de melhoramento de solos locais-bentonita, de 3%, 5% e 7% de aditivo. Para isso o solo foi previamente homogeneizado antes da adição de bentonita.

Os percentuais foram calculados sobre o valor de massa seca dos materiais. Após o cálculo da quantidade em massa de aditivo a ser adicionada para obtenção das proporções desejadas, a bentonita foi adicionada à zeólita e homogeneizada em lona. Para uma melhor homogeneização, devido à finura do aditivo, o procedimento foi repetido durante três dias consecutivos. As misturas já finalizadas foram quarteadas e separadas em sacos plásticos para os ensaios.

2.2 Métodos

Para o desenvolvimento desta pesquisa experimental, a realização dos ensaios foram divididas em duas etapas. A primeira englobou os ensaios de caracterização física e química do material e a segunda constituiu-se dos ensaios de condutividade hidráulica.

2.2.1 Caracterização das amostras

A caracterização física da zeólita pura e das misturas zeólita-bentonita, nas proporções de adição de 3%, 5% e 7% de aditivo, foi realizada por meio de ensaios previstos na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), dentre eles, granulometria (NBR 7181/16), massa específica dos grãos pelo método da aplicação de vácuo (NBR 6458/16), Limite de Liquidez (NBR 6459/16), Limite de Plasticidade (NBR 7180/16) e ensaios de compactação com energia do Proctor Normal (NBR 7182/16) com reuso.

A caracterização química das amostras de zeólita pura quanto da bentonita foi realizada pela empresa IBRA, localizada em Jardim Nova Veneza Sumaré - SP. Para a análise foram separadas aproximadamente 200g de cada material, acondicionados em sacos plásticos e enviados ao laboratório da empresa. Foram realizados os seguintes ensaios: pH em CaCl_2 e pelo método SMP, capacidade de troca catiônica, saturação de bases H+Al, macronutrientes e micronutrientes pelo extrator Mehlich. Os resultados foram recebidos após sete dias do recebimento das amostras.

Para a caracterização física da bentonita, devido sua característica expansiva e seu poder adsorptivo em que foi verificada a não hidratação total em um período de 24 horas, foram realizadas algumas modificações nos procedimentos normativos para a realização dos ensaios de granulometria e massa específica. Para o ensaio de granulometria, a amostra ensaiada foi reduzida de 70g para 25g e o material, para sua completa hidratação, ficou 7 dias em solução de 125 ml de hexametáfostato de sódio e água destilada. Para o ensaio de massa específica, a amostra ensaiada foi reduzida de 50g para 15g e para a completa hidratação, o material foi deixado em repouso por 7 dias em água destilada. Os demais ensaios realizados, Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, seguiram as diretrizes das normas NBR 6459/16 e NBR 7180/16, respectivamente.

2.2.2 Ensaios de condutividade hidráulica

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados em permeâmetro de parede flexível, e o método de ensaio foi executado conforme a norma americana ASTM D5084 - 10 Método A - Carga constante. Previamente, os corpos de prova foram compactados em cilindros com 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura, com energia do Proctor Normal utilizando compactador mecânico e umidade próxima à umidade ótima obtida nos ensaios de compactação. Foram considerados aceitáveis os corpos de prova com grau de compactação maior que 95% e com variação de

umidade inferior a 1%. Após a compactação, os mesmos foram moldados para atingir dimensões de $10 \pm 0,1$ cm de diâmetro e 5 ± 1 cm de altura. A redução da altura foi justificada a fim de se reduzir o tempo de ensaio, devido ao tempo de percolação do ensaio estar diretamente relacionado com a espessura da amostra.

A montagem do ensaio foi processada na seguinte sequência: sobre a base do equipamento foram colocados centralizados uma pedra porosa saturada, papel filtro, o corpo de prova a ser ensaiado, outro papel filtro e outra pedra porosa. Por fim, para envolver o corpo de prova e evitar fluxo lateral, foi realizado o revestimento do conjunto com uma membrana flexível de látex. O corpo de prova, após toda essa sequência, está ilustrado na Figura 1.

Para a execução do ensaio, a saturação foi realizada por percolação e a saturação foi considerada completa após a passagem de um volume de água de três a cinco vezes o volume de vazios do corpo de prova, seguindo orientação da própria norma. Esses valores foram adotados, visto que, não foi possível a verificação da saturação pelo parâmetro B de Skempton por limitação da aparelhagem na medida da variação da pressão neutra. Após a finalização do ensaio, a umidade final do material foi medida e a saturação foi confirmada por meio de correlações de índices físicos. Devido às limitações do equipamento e as imprecisões das medidas de saturação, considerou-se satisfatório valores de saturação acima de 95%.

Após o enchimento da câmara do equipamento, foi aplicada uma tensão confinante de 20kPa por um período de 8 horas para a estabilização do corpo de prova. Passando este tempo, a tensão confinante foi aumentada e concomitantemente aplicava-se uma tensão desviadora para a percolação de água. Após a etapa de saturação, as cargas foram mantidas constantes e assim realizaram-se leituras consecutivas do volume de água percolado durante o ensaio. O cálculo da condutividade hidráulica foi realizado por meio da equação de Darcy com um gradiente hidráulico de aproximadamente 20 kPa/cm.



Figura 1. Corpo de prova do ensaio no permeômetro de parede flexível.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma melhor interpretação, foram adotadas as nomenclaturas: Z00; Z03; Z05 e Z07 para designar zeólita pura; mistura com adição de 3% de bentonita; mistura com adição de 5% de bentonita e mistura com adição de 7% de bentonita, respectivamente.

3.1 Caracterização das amostras

Esta etapa inicial tem como objetivo caracterizar a zeólita e suas misturas e prever o comportamento como barreira impermeabilizante. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização.

Tabela 1. Resultado dos ensaios de caracterização.

Síntese dos Resultados	Z00	Z03	Z05	Z07	Bentonita
Massa específica (g/cm ³)	2,49	-	-	-	3,05
Argila (%)	4,27	4,58	6,86	8,53	77,98
Silte (%)	18,31	19,35	17,60	17,83	20,43
Areia Fina (%)	0,68	1,72	1,96	1,51	1,59
Areia Média (%)	12,35	11,65	12,27	12,97	0,00
Areia Grossa (%)	64,39	62,70	61,31	59,16	0,00
	LL(%)	69	82	95	379
Limite de Consistência	LP(%)	-	20	19	47
	IP(%)	-	51	63	332
Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	SM	SC	SC	SC	CH

Diante de sua caracterização, a zeólita pura foi classificada pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como uma areia siltosa (SM) apresentando um percentual em massa de 77,42% de areia, sendo deste total 64,39% de areia grossa. Analisando o comportamento esperado para um solo com essas características, no que diz respeito à condutividade hidráulica, preve-se que o material puro não é adequado para a construção de barreiras impermeabilizantes.

A bentonita foi classificada como uma argila de alta compressibilidade (CH) com um percentual

em massa de 98,41% de finos, sendo deste 77,98% de argila. Quanto à qualidade, pela análise dos resultados do Limite de Liquidez igual a 379%, o aditivo pode ser considerado como de média qualidade. Pelo SUCS as misturas foram classificadas como areia argilosa (SC), sendo assim, apresentam expectativa de comportamento hidráulico mais adequado para utilização como camada de base de aterro sanitário. As curvas granulométricas comparativas entre os materiais estudados estão apresentadas nas Figuras 2 e 3.

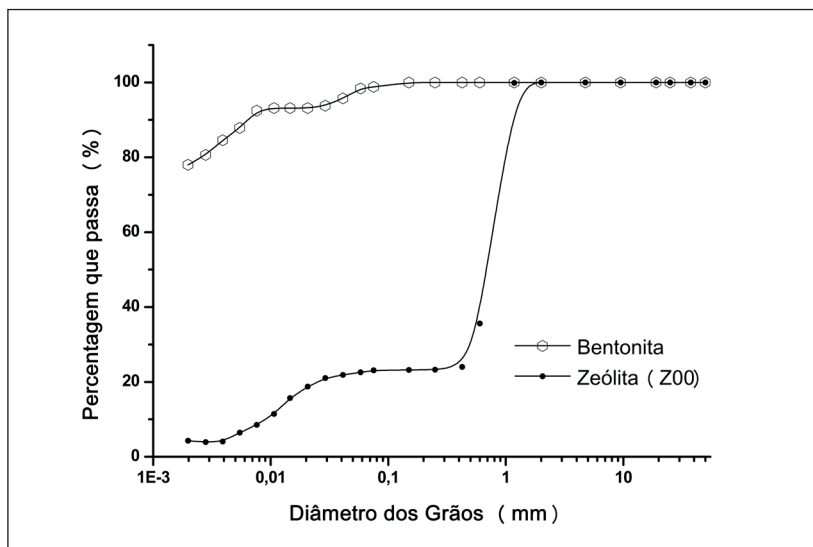


Figura 2. Análise das curvas granulométricas zeólita pura e bentonita.

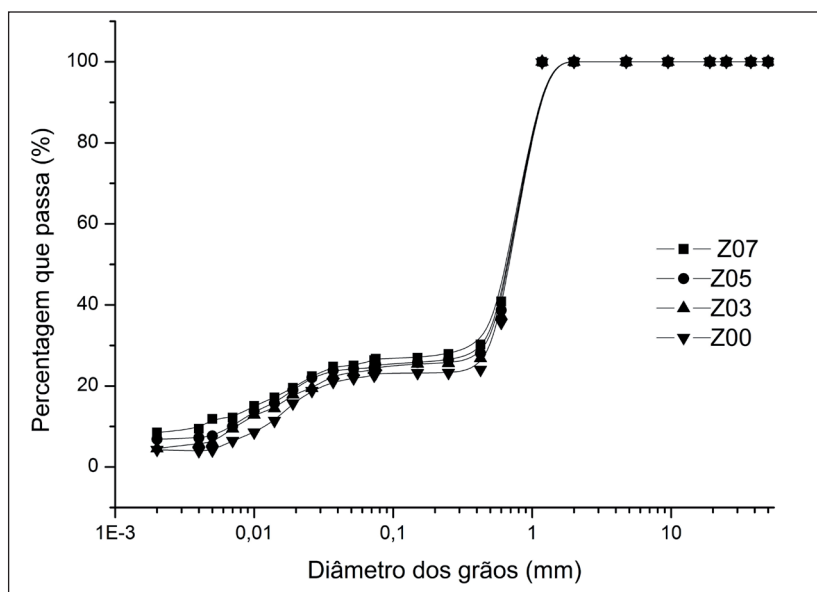


Figura 3. Análise das curvas granulométricas zeólita pura e misturas.

É nítido, na Tabela 1, que o incremento de aditivo nas misturas alterou consideravelmente os limites de Atterberg. No que diz respeito ao Limite de Plasticidade houve um aumento considerável entre a zeólita pura e as misturas; enquanto o material puro apresentou limite de plasticidade nulo, as misturas apresentaram um valor de aproximadamente 18%. No entanto entre as misturas o parâmetro se manteve praticamente constante, o que pode se explicado levando em consideração que a plasticidade do material depende prioritariamente da composição mineralógica a qual independe do percentual do aditivo.

Comparando o Limite de Liquidez, a zeólita pura já apresentava alto valor da propriedade e houve um aumento do fator com a adição de bentonita tanto entre o material puro e as misturas quanto entre as próprias misturas. Quanto ao índice de plasticidade, houve um crescimento linear do parâmetro com o aumento do aditivo, fato esperado pelo aumento de finos ocasionado com a inclusão do aditivo. A Figura 4 apresenta a relação entre o índice de plasticidade e o aumento de bentonita.

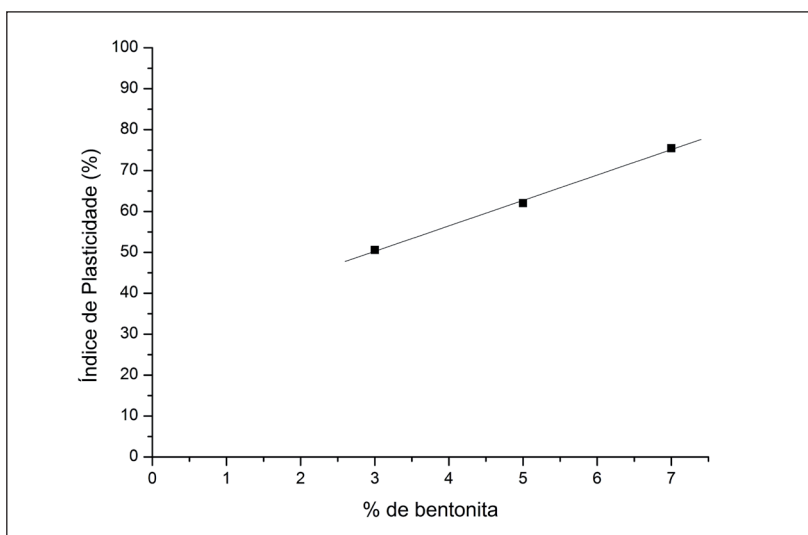


Figura 4. Análise da relação entre o índice de plasticidade e o aumento de bentonita.

O ensaio de compactação foi realizado com reuso do material. As curvas de compactação estão apresentadas na Figura 5.

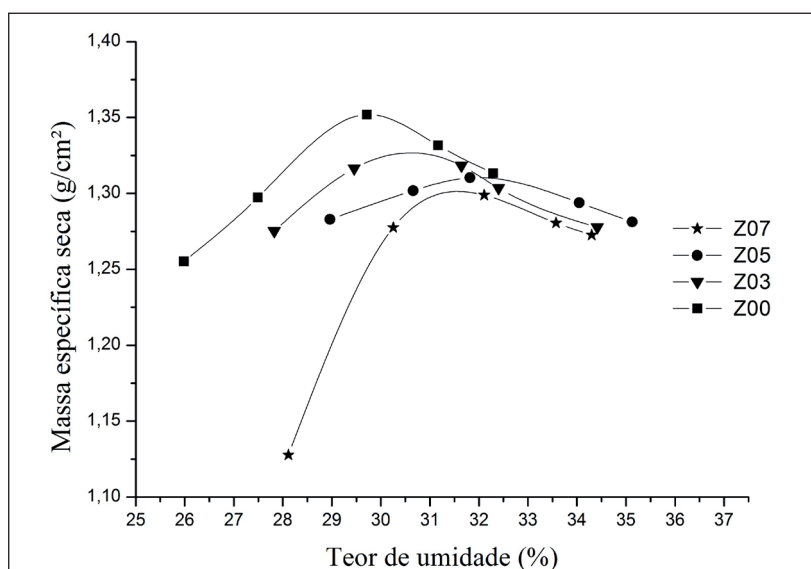


Figura 5. Curva de compactação da zeólita pura e suas misturas.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos parâmetros do ensaio de compactação da zeólita pura e das misturas-zeólita bentonita que servirão como base para a moldagem dos corpos de prova do ensaio de condutividade hidráulica.

Tabela 2. Parâmetros de compactação.

Parâmetros	Z00	Z03	Z05	Z07
Massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) (g/cm^3)	1,35	1,32	1,31	1,30
Umidade ótima ($w_{\acute{o}tima}$) (%)	29,6	30,7	31,7	31,9

É possível observar por meio dos resultados de ensaio, que tanto a zeólita pura quanto suas misturas apresentaram uma elevada umidade ótima e uma baixa massa específica. Tal fenômeno de adsorção de água do material zeolítico pode ser justificado pela sua elevada porosidade. Ademais é perceptível, apesar de pouco expressiva, a redução da massa específica e o aumento da umidade ótima com a adição de bentonita.

Referente à análise química, a zeólita apresentou uma CTC de 65,17 meq/100g. Comparando com Englert & Rubio (2005) e Oliveira (2011) que encontraram respectivamente valores de 74,00 e 57,8 meq/100g para zeólitas de mesma natureza, os valores estão dentro da margem esperada. Comparando com o valor emitido em laudo pela empresa Celta Brasil de CTC de 200 meq/100g o resultado está inferior ao esperado. Essa divergência pode ser justificada pelo tempo de contato das amostras com o cátion saturado durante o ensaio realizado pela IBRA, segundo Kitsopoulos apud Oliveira (2011), o tempo para que haja uma efetiva saturação é de 12 dias, logo o ensaio não foi realizado com saturação total.

Mesmo com o valor inferior ao esperado, foi comprovado que a zeólita analisada apresenta uma considerável capacidade de troca catiônica, podendo beneficiar assim a redução de impactos ambientais em caso de vazamento do lixiviado pela “filtragem” dos metais pesados provenientes

dos materiais lançados nos aterros sanitários. No entanto, faz-se necessário o estudo da redução de metais pesados com o passar do tempo utilizando o lixiviado, visto que devido a agressividade do meio de um aterro sanitário, o material pode reagir de forma diferente a das barreiras reativas, podendo ocorrer colmatação do liner ou reações químicas inesperadas. Assim como em zeólitas brasileiras estudadas pelos pesquisadores citados acima, a amostra apresentou equilíbrio de bases na CTC de 85,2% de Ca, 6,3% de Mg e 1,6% de K. Vale ressaltar que este percentual está diretamente relacionado com o tipo dos principais metais filtrados pela zeólita.

O material apresentou pH de 7,47, atendendo aos critérios estabelecidos para camadas impermeabilizantes de aterros sanitários de pH maior que 7,00. Este fator também está relacionado com a CTC do material, dado que, conforme Morali (2006), o pH tem um impacto significativo sobre a remoção dos metais pesados pela zeólita, uma vez que influencia a especificação do metal, a integridade da zeólita, além dos íons H^+ serem considerados competitivos na troca iônica.

3.2 Análise da condutividade hidráulica

Nesta etapa, foram realizados dois ensaios para cada percentual de aditivo a fim de validar os resultados. Os corpos de prova foram moldados conforme explicado no item 2.2.2. O tempo médio para saturação dos corpos de prova variou de 3 a 7 dias dependendo da permeabilidade do material. Para a análise da influência do percentual de bentonita na condutividade hidráulica, o valor utilizado para cada amostra foi obtido pela média entre os resultados dos dois corpos de prova relacionados a cada percentual. Vale ressaltar que para um mesmo percentual de aditivo os corpos de prova apresentaram resultados de mesma ordem de grandeza. A Tabela 3 apresenta as condições de moldagem e resultados dos ensaios de condutividade hidráulica.

Tabela 3. Condições dos ensaios e resultados para a zeólita pura e misturas zeólita-bentonita

Amostra	CP	w _{mold} (%)	Δw* (%)	ρd (g/cm ³)	GC (%)	Saturação (%)	k (cm/s)	k _{méd} (cm/s)
Z00	CPI	29,86	-0,26	1,3	97	99,12	1,96 E-06	2,16 E-06
	CPII	29,86	-0,26	1,28	95	98,92	2,36 E-06	
Z03	CPI	31,30	-0,60	1,27	96	97,71	3,91 E-07	3,83 E-07
	CPII	31,30	-0,60	1,32	100	98,57	3,74 E-07	
Z05	CPI	31,63	0,07	1,27	97	98,04	1,32 E-07	1,42 E-07
	CPII	31,86	-0,16	1,25	96	97,29	1,53 E-07	
Z07	CPI	31,79	0,11	1,25	96	97,80	8,55 E-08	8,91 E-08
	CPII	31,79	0,11	1,25	96	98,26	9,27 E-08	

Onde w_{mold} é a umidade na qual o corpo de prova foi moldado; Δw é desvio entre umidade ótima e umidade moldável; ρd é a massa específica seca; GC é o grau de compactação; k a condutividade hidráulica e k_{méd} é a média das condutividades hidráulicas.

Sabe-se que a percolação inicial do solo não saturado apresenta valores inferiores devido a dificuldade do percolado de atravessar os vazios compostos por a. À medida que ocorre a saturação do meio, a condutividade hidráulica vai

aumentando até a saturação total indicada pela estabilização dos valores medidos durante o ensaio. Para analisar a constância do parâmetro com o tempo, assim podendo estimar a saturação, durante o ensaio foram plotados gráficos de condutividade hidráulica em função ao tempo. As curvas condutividade hidráulica versus tempo para cada mistura estão apresentadas nas Figuras 6 e 7 para Z00 e Z03 e Figuras 8 e 9 para Z05 e Z07 respectivamente.

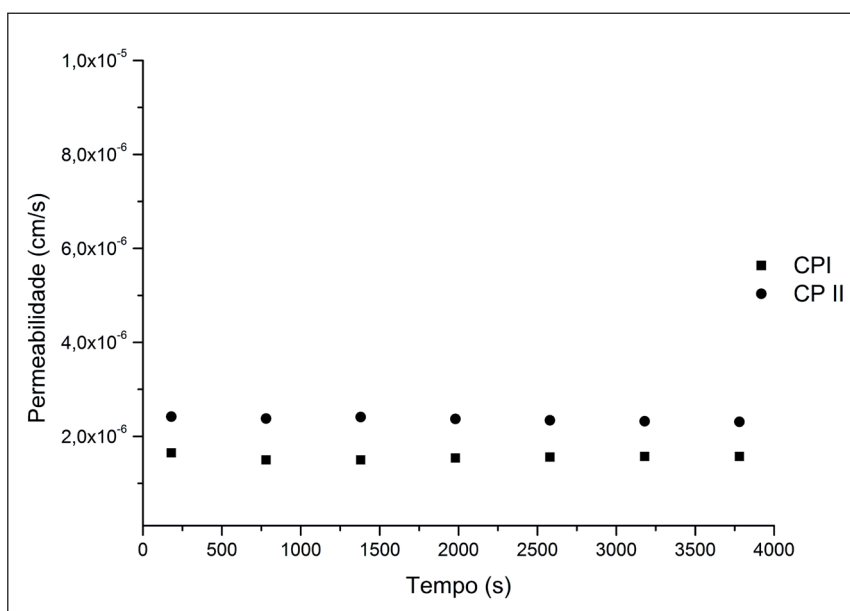


Figura 6. Variação da condutividade hidráulica em relação ao tempo em Z00.

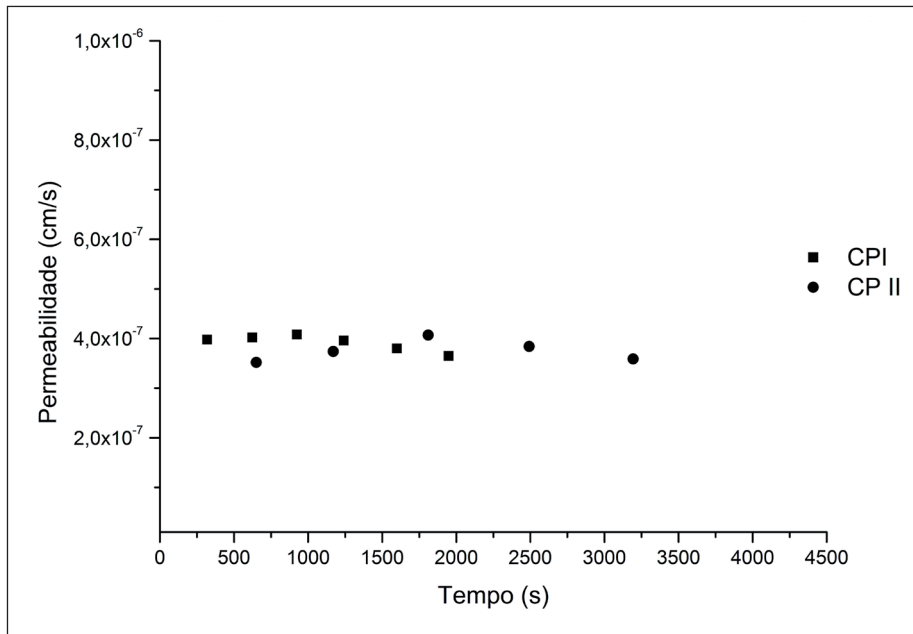


Figura 7. Variação da condutividade hidráulica em relação ao tempo em Z03.

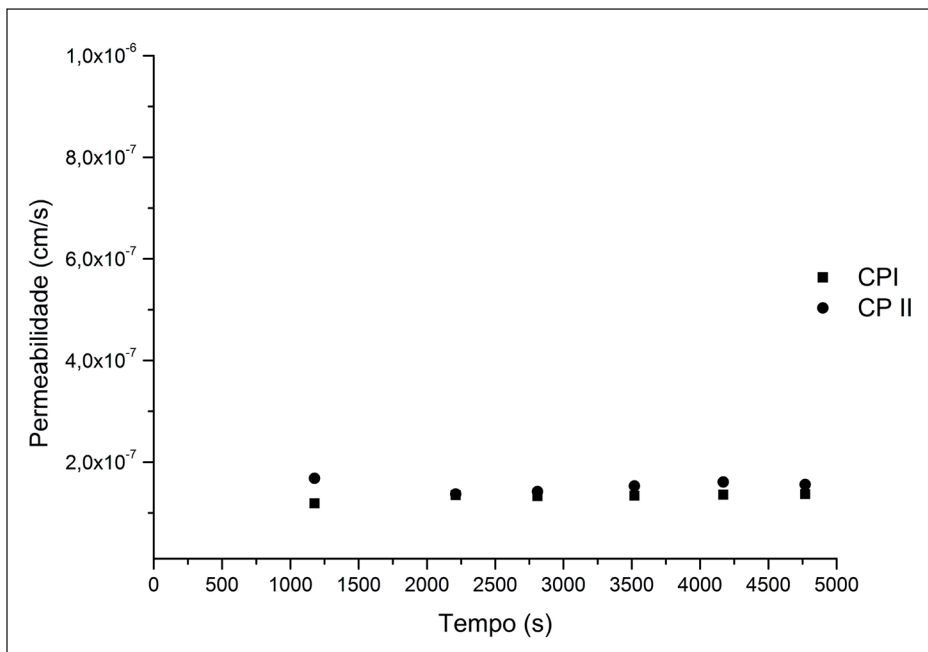


Figura 8. Variação da condutividade hidráulica em relação ao tempo em Z05.

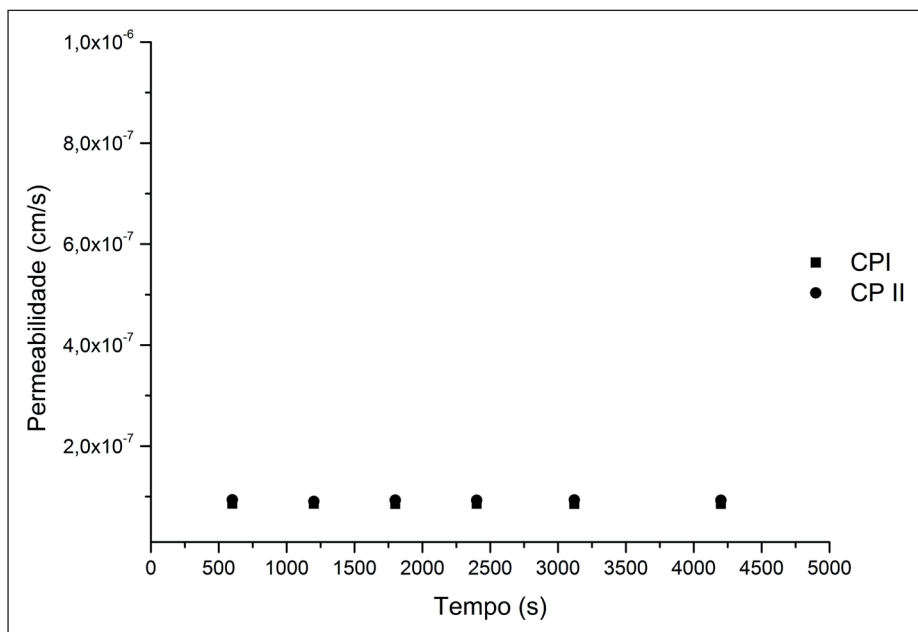


Figura 9. Variação da condutividade hidráulica em relação ao tempo em Z07.

Por intermédio dos valores apresentados na Tabela 3 foi montado um gráfico condutividade hidráulica versus percentual de aditivo a fim de se analisar o comportamento da curva gerada. A análise da condutividade hidráulica pelo percentual de bentonita está apresentada na Figura 10.

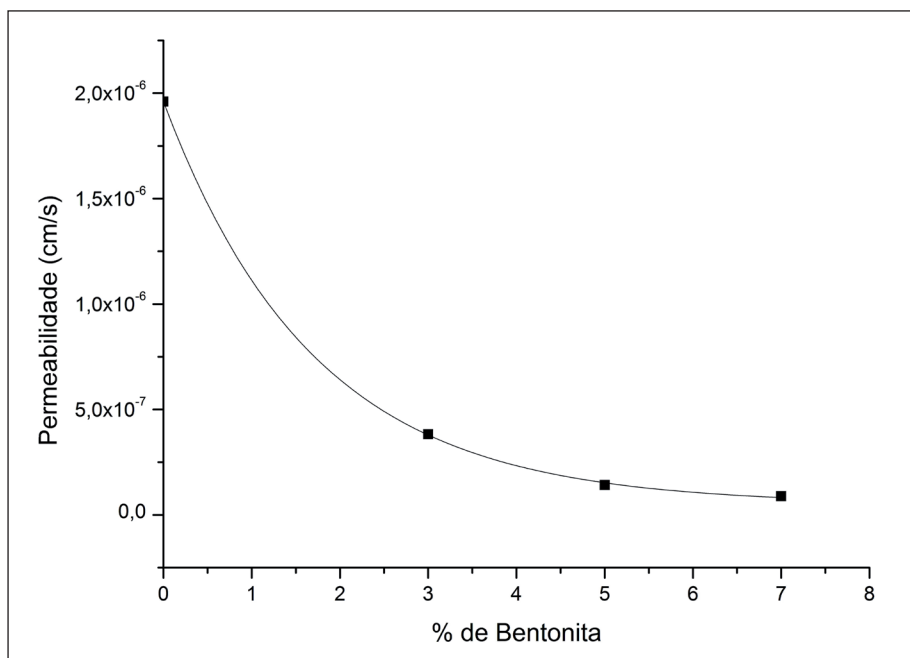


Figura 10. Variação da condutividade hidráulica versus percentual de bentonita.

Analisando a Figura 10 é possível constatar que a curva gerada pela variação de condutividade hidráulica com o aumento de bentonita denotou característica de uma exponencial logarítmica com $R^2 = 0,98$. Tal comportamento é convergente com estudos analisando misturas de solos locais-bentonita. É perceptível que para tal material de base a curva apresenta uma tendência a estabilização a partir da adição de 6% de aditivo.

A permeabilidade da zeólita pura encontrada foi da ordem de 10^{-6} cm/s e é compatível com uma areia siltosa, logo, o material em estado puro não ataria aos critérios de norma para camadas impermeabilizantes de aterro sanitário. A adição de um percentual de 3% de bentonita já implementou uma considerável redução do parâmetro resultando em uma condutividade hidráulica da ordem de 10^{-7} cm/s, valor compatível aos critérios normativos.

Comparando os resultados obtidos com estudos anteriores como Ören & Özdamar (2013), que concluíram que zeólitas com diferentes granulometrias, sem adição de bentonita, não atendiam a condutividade hidráulica para utilização como camadas impermeabilizantes, e Tuncan et. al. (2003) e Kaya & Durukan (2003) que concluíram com estudos de misturas zeólita-bentonita com um percentual de 10% e 20% de aditivo que as amostras apresentavam condutividade hidráulica compatível a utilização como camada de base de aterro sanitário, é possível constatar que a adição de bentonita faz-se necessária para utilização da zeólita como material base para camadas impermeabilizantes.

É relevante analisar que a utilização do aditivo em percentuais inferiores a 10%, valor base de pesquisas anteriores, como analisados neste estudo, já atingem a condutividade hidráulica prescrita em normas de aterros sanitários industriais e que a estabilidade da curva em aproximadamente 6% de aditivo demonstra que o aumento da quantidade de bentonita a partir deste percentual não gerou redução considerável de condutividade hidráulica no material analisado nesta pesquisa. Logo, a análise de percentuais de bentonita inferiores aos utilizados anteriormente faz-se necessária para as diversas granulometrias a fim de evitar desperdício do aditivo.

4 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho experimental indicaram que a condutividade hidráulica da zeólita em estado puro se apresenta na ordem de 10^{-6} cm/s, valor fora da margem de utilização para camada impermeabilizante de base de aterro sanitário, logo se faz necessária a adição de bentonita para a redução deste fator.. A adição de bentonita gerou um decréscimo de condutividade hidráulica nas misturas. Neste estudo, todas as misturas, ou seja, a partir do acréscimo de um percentual de 3% de bentonita, apresentaram resultados de ensaios inferiores ou dentro da ordem de 10^{-7} cm/s, valor pertinente à faixa aceitável para barreiras impermeabilizantes.

A determinação de um valor adequado de aditivo reduz o desperdício do mesmo, evitando assim a utilização de percentuais acima do necessário, permitindo posteriormente analisar a viabilidade econômica da utilização da mistura zeólita-bentonita. Após a adição de aproximadamente 6% de bentonita, percebe-se uma estabilização da condutividade hidráulica, sendo assim, a partir deste valor o aumento de aditivo não ocasiona variações expressivas na permeabilidade do material para este tipo de zeólita nesta faixa granulométrica.

A análise da zeólita para utilização como camada impermeabilizante de aterros sanitários mostrou que todas as misturas estudadas apresentaram comportamento adequado em termo de condutividade hidráulica. Além disto, observou-se um aumento do limite de liquidez, índice de plasticidade e alteração da classificação do material que passou de areia siltosa (SM) da zeólita pura para areias argilosas (SC) em todas as misturas, fatores relevantes para análise do comportamento à camada impermeabilizante. Quanto à capacidade de troca catiônica, fator importante para a escolha do material de estudo na utilização em camadas impemeabilizantes, o material apresentou elevado resultado, podendo gerar benefícios em caso de trincas e vazamentos na base do aterro, adsorvendo metais pesados e conseqüentemente mitigando possíveis problemas ambientais gerados pela contaminação de solos e lençóis freáticos próximos a área pelo lixiviado. No entanto, devido à agressividade da zeólita, se faz necessária

a análise em trabalhos futuros da estabilidade química da interação do lixiviado com a mesma.

5 AGRADECIMENTOS

A empresa Celta Brasil pelo fornecimento da zeólita, matéria-prima, para a realização deste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASTM D5084-10 (2001) *Standard test method for measurement of hydraulic of saturated porous Materials using a flexible wall permeameter*. ASTM International, West Conshohocken, USA, 23p.
- Camargo, K. R. (2012). *Avaliação da condutividade hidráulica e da resistência ao cisalhamento de misturas solo-bentonita: estudo de caso de um aterro sanitário localizado em Rio Grande (RS)*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 103 p.
- Durukan, S.; Pulat, H. F.; Yukselen-Aksoy, Y. (2004) *Suction characteristics of compacted zeolite-bentonite and sand-bentonite mixtures*. Waste Management & Research, v. 32[2], p.149-156.
- Englert, A. H.; Rubio, J. (2005) *Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite*. International Journal of Mineral Processing, v.75, p.21-29.
- Heineck, K. S. (2002) *Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis*. Master thesis, UFRGS, Porto Alegre, 251 p.
- Kaya, A.; Durukan, S. (2003) *Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner*. Applied Clay Science v.25 p.83-91.
- Lukiantchuki, J.A. (2007). *Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos. 124 p.
- Monte, M. B. M.; Resende, N. G. A. M. (2015), *Zeólitas Naturais*. CETEM, Comunicação técnica elaborada para edição do livro rochas & minerais industriais: usos e especificações, Rio de Janeiro, p. 699-720.
- Morali, N. (2006) *Investigation of zinc and lead removal from aqueous solutions using clinoptilolite*. Master Thesis, Middle East Technical University. Turkey, 93 p.
- Morandini, T.L.C.; Leite, A. L. (2015). *Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes*. Engeneering Geology, v.196, p.251 – 267.
- NBR 6458 (2016) *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 14p.
- NBR 6459 (2016) *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 5p.
- NBR 7180 (2016) *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 3p.
- NBR 7181 (2016) *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 12p.
- NBR 7182 (2016) *Solo – Ensaio normal de compactação de solos*. Rio de Janeiro, 9p.
- NBR 13896 (1997) *Aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação – procedimento*. Rio de Janeiro, 12p.
- Oliveira, S. A. (2011) *Estudo de adsorção de metais pesados em zeólitas para fins de uso em barreira reativa*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 220p.
- Ören, A. H.; Özdamar, T. (2013) *Hydraulic conductivity of compacted zeolitas*. Waste Management & Research v.31 [6] p.634-640.
- Tucan, A.; Tucan, M.; Koyuncu, H.; Guney, Y. (2003) *Use of natural zeolites as a landfill liner*. Waste Management & Research v.21 p.54-61.

ANÁLISE DO POTENCIAL DE RISCO DE ROMPIMENTO EM BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO DO ESTADO DO PARÁ UTILIZANDO A METODOLOGIA RISK-BASED PROFILING SYSTEM (RBPS)

ANALYSIS OF THE POTENTIAL RISK OF DAM BREAK IN TAILINGS DAM IN STATE OF PARÁ USING THE RISK-BASED PROFILING SYSTEM METHODOLOGY (RBPS)

RAIMUNDO ALMIR COSTA DA CONCEIÇÃO

Geólogo, Serviço Geológico do Brasil; Programa de Pós-Graduação em Gestão e Riscos e Desastres na Amazônia (PPGGRD), Universidade Federal do Pará (UFPA)
E-mail: almircosta@ufpa.br; raimundo.conceicao@cprm.gov.br

DR^a. ALINE MARIA MEIGUINS DE LIMA

Programa de Pós-Graduação em Gestão e Riscos e Desastres na Amazônia (PPGGRD),
Universidade Federal do Pará (UFPA)
E-mail: ameiguins@ufpa.br

RESUMO ABSTRACT

Os desastres socioambientais graves e muito graves relacionados ao rompimento em barragens de rejeito de mineração vêm apresentando mundialmente, uma tendência crescente desde a década de 1960 e isso está diretamente relacionado com as produções de resíduos cada vez maiores. Neste contexto, há necessidade fundamental de análises de risco e segurança dessas barragens, que podem ser feitas por métodos que estimam a probabilidade de ocorrência de eventos de rompimento, com a finalidade de tornar o processo de tomada de decisões mais balizado e seguro. Uma dessas análises é a denominada “*Risk-Based Profiling System*” (RPBS) que permite aferir, a partir de dados qualitativos, a probabilidade de um rompimento e suas prováveis consequências, a partir da formulação dos quatro cenários mais frequentes (estático, hidrológico, sísmico e operação e manutenção). Essa análise foi aplicada a seis barragens de mineração do estado do Pará. Os resultados mostraram que, no universo da análise, a barragem B3 foi a que apresentou o maior Índice de Falha (455,18), seguida da barragem B1 (428,63) e da B2 (375,66). Entretanto, a barragem com maior risco para as áreas a jusante foi a B2 com um Índice de Risco Total de 969,20 pontos devido, principalmente, ao número elevado de pessoas possivelmente atingidas (12.900 pessoas). Esta mesma barragem é a que afetaria o maior número

The serious and very serious socioenvironmental disasters related to disruption in mining tailings dams have been exhibiting worldwide, a growing tendency since the 1960s and this is directly related to the increasing production of waste. In this context, there is a fundamental necessity for risk and safety analyzes of these dams, which can be done through methods that estimate the probability occurrence of disruption events, in order to make the decision to have a process more focused and safe. One of these analyzes is the so-called “*Risk-Based Profiling System*” (RPBS), which allows us to gauge, from qualitative data, the probability of a disruption and its probable consequences, which comes from the four most frequent scenarios (static, hydrological, seismic and operation and maintenance). This analysis was applied to six mining dams in the State of Pará. The results showed, in the universe of analysis, dam B3 was the one with the highest failure rate (455.18), followed by the dam B1 (428.63) and the dam B2 (375.66). However, the dam with the highest risk for downstream areas was B2 with a Total Risk Index of 969.20 points, mainly due to the large number of possible people affected (12,900 people). This same dam is the one that would affect the greatest number of socioenvironmental components, defined then with possible cause of extreme damages. Compared with

de componentes socioambientais, definida então com possível causadora de danos extremos. Em comparação com a análise de risco estabelecida em lei, a análise RBPS, mostrou semelhanças, porém mais detalhada em função geração de quatro cenários de análise, ao invés de apenas um. Foi possível também a partir deste estudo, a elaboração de um guia de análise de risco para barragens de mineração.

Palavras-chave: Análise de risco; barragens; mineração; cenários.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade fundamental para o país e para o mundo em vários aspectos da vida humana. O Brasil no contexto mundial da mineração é um exportador global de nióbio, minério de ferro, manganês, titanita, bauxita, entre outros. Mundialmente, entre 1920 e 2010, a produção de minério de ferro foi de 100 milhões para 3 bilhões de toneladas. Neste mesmo período, a produção de bauxita foi de pouco mais de 1 milhão para 250 milhões de toneladas (IBRAM 2014).

A extração dos recursos minerais resulta na produção simultânea de um volume significativo de material residual, incluindo rejeitos (Kossoff et al. 2014). Sua quantidade global de aproximadamente 18 bilhões de m³ por ano é equivalente a da descarga real de sedimentos para os oceanos. Uma estimativa simplificada sugere que, devido à futura extração de minérios de baixo teor, a produção de resíduos de minas será duplicada dentro de um período de 20 a 30 anos (Forstner 1999).

Quando examinados os 100 anos (1910-2010) de falhas em barragens de armazenamentos de rejeito no mundo, os dados mostram uma tendência emergente e pronunciada desde 1960 em direção a uma maior incidência de falhas “Graves” e “Muito Graves”. Ou seja, a consequência da perda está se tornando cada vez maior. Esta consequência exponencialmente crescente é impulsionada por graus continuamente mais baixos em recursos identificados e queda contínua dos preços reais da maioria dos metais, fazendo com que maiores quantidades de rejeitos sejam produzidos, representando um desafio cada vez maior para o gerenciamento de resíduos de mina (Bowker & Chambers 2015).

the risk analysis established in law, the RBPS analysis showed similarities, but more detailed in function of the four scenarios of analysis that will be generated, rather than just one. A risk analysis guide for dams was created as well, which came out from this present study.

Keywords: Risk analysis; dams; mining; scenarios.

A maior frequência de falhas “Graves” e “Muito Graves” em barragens de rejeito tem significativas consequências sociais e econômicas, às vezes não remediáveis; 49% de todas as falhas “Graves” e “Muito Graves” registradas de 1940 a 2010 ocorreram a partir de 1990; dos 52 incidentes registrados, 1990-2010, 33% foram falhas “Graves”, ou seja, grandes o suficiente para causar impactos significativos ou envolver perda de vidas. Outros 31%, foram falhas “Muito Graves”, ou seja, falhas catastróficas que liberaram mais de 1 milhão de metros cúbicos de rejeitos e, em alguns casos, resultaram em múltiplas perdas de vida (Bowker & Chambers 2015). A taxa de falhas em barragens de rejeito foi estimada como sendo da ordem de 2 a 5 por ano. Dado o número atual de barragens no mundo, cerca de 3.500, a taxa de falha é de uma em 700 ou uma em 1.750. Essa é uma taxa considerada muito alta, principalmente se comparada às falhas em barragens de água, que é aproximadamente uma em 10.000 (Davies 2001).

Em termos socioambientais, a grande magnitude e muitas vezes a natureza tóxica do material dentro das barragens de rejeitos significa que sua falha e a consequente descarga nos sistemas fluviais afetarão invariavelmente a qualidade da água, dos sedimentos e a vida aquática e humana (Kossoff et al., 2014). São inquestionáveis os danos causados pela falha na barragem do Fundão, município de Mariana, Minas Gerais, onde 43 milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro causaram problemas ambientais, poluindo 668 km de cursos d’água do rio Doce até o oceano Atlântico e a morte de 19 pessoas (Carmo et al. 2017). Ou os danos causados pelo rompimento da barragem de rejeitos Aznalcóllar, 45 km a oeste de Sevilha, Espanha, que inundou aproximadamente 4600

hectares de terra ao longo dos rios Agrio e Guadamar, com aproximadamente 5,5 milhões de m³ de água ácida e 1,3 milhões de m³ de rejeitos de metal pesado (Hudson-Edwards et al. 2003). Neste contexto, foram adaptadas várias ferramentas de análise de risco para rompimento de barragens. Segundo McGrath (2000), essas análises foram criadas para aplicações nas indústrias de petróleo, química, nuclear e offshore com o objetivo de estimar probabilidades de falha em componentes ou sistemas e a magnitude das consequências resultantes, com a finalidade auxiliar na tomada de decisões em segurança. Colle (2008) afirma que atualmente são utilizadas por diversos países como Estados Unidos, Canadá, Noruega, França, Países Baixos, Suécia, Austrália, Portugal, Brasil, entre outros, para a análise de risco de rompimento de barragens.

De acordo com Escuder et al. (2007), apesar de em alguns casos a análise de risco utilizar probabilidade e buscar um número final exato, o seu objetivo principal é obter um panorama geral da condição exposta a partir dos dados disponíveis, com a finalidade de garantir um sistema de gestão mais seguro. No Brasil, a metodologia de análise de risco oficial para barragens de mineração e foi estabelecida pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) através da Portaria nº 143/CNRH. É utilizada atualmente pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (ANM/DNPM) em barragens que estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010).

Este método classifica a barragem quanto a Categoria de Risco (CR) que está relacionada com aspectos da própria barragem (características técnicas, estado de conservação, plano de segurança, etc.) que possam influenciar na possibilidade da ocorrência de acidente. E quanto ao Dano Potencial Associado (DPA) que é o dano que poderá ser causado à jusante pelo mau funcionamento da barragem (existência de população a jusante, impacto ambiental e socioeconômico) (CNRH, 2012).

A metodologia estabelecida pelo CNRH tem cumprido um papel fundamental na caracterização das barragens de mineração, porém não conseguem distinguir e detalhar algumas informações importantes para o gerenciamento de risco. Um exemplo da falta de detalhamento na metodologia do CNRH pode ser observado no trabalho

de Valerius (2014), que ao fazer a análise de risco das barragens do estado de Goiás, mostrou que uma das barragens possui um índice de risco quarenta vezes maior que o das outras barragens analisadas devido ao número de pessoas em risco, entretanto, ambas estão enquadradas na mesma classificação de risco do CNRH (Risco Baixo, DPA Alto, Classe C).

Durante sua análise, Valerius (2014), utilizou uma análise qualitativa denominada “*Risk-Based Profiling System*” (RBPS), criada pelo *United States Bureau of Reclamation* (USBR), Agência Federal Americana responsável pela gestão do abastecimento de água em 17 estados americanos. Essa metodologia foi adaptada às condições das barragens de rejeito e aplicada de forma qualitativa na identificação e classificação do risco.

O objetivo do presente estudo é aplicar a análise RBPS a seis barragens de mineração do estado do Pará, que estão enquadradas nas condições estabelecidas na Política Nacional de Segurança de Barragens (Brasil 2010) e comparar os resultados com a metodologia de análise do CNRH. A partir deste estudo também será elaborado um guia de análise de risco de barragem com a finalidade de estabelecer os principais aspectos metodológicos a serem seguidos nos trabalhos de análise de risco por parte do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), no âmbito do Acordo de Cooperação Técnica com o DNPM, que possibilita uma abordagem diferenciada do SGB/CPRM na elaboração de análises de risco de impacto a jusante das barragens (MME, 2016).

Ressalta-se que as análises qualitativas tem seu cerne na subjetividade, o que não deve ser motivo de desmerecimento, tendo em vista que o julgamento perceptivo tem estado presente em diversas abordagens tradicionais da engenharia e segurança de barragens, cujo o sucesso é indiscutível (Baptista 2008).

2 ÁREA DE ESTUDO

A análise foi realizada em seis barragens de mineração do estado do Pará (**Figura 1**). As principais características das barragens analisadas (**Tabela 1**) são descritas, conforme apresentadas no Plano de Ação Emergencial para Barragens de Mineração. As barragens em estudo receberam a denominação B1, B2, B3, B4, B5 e B6.

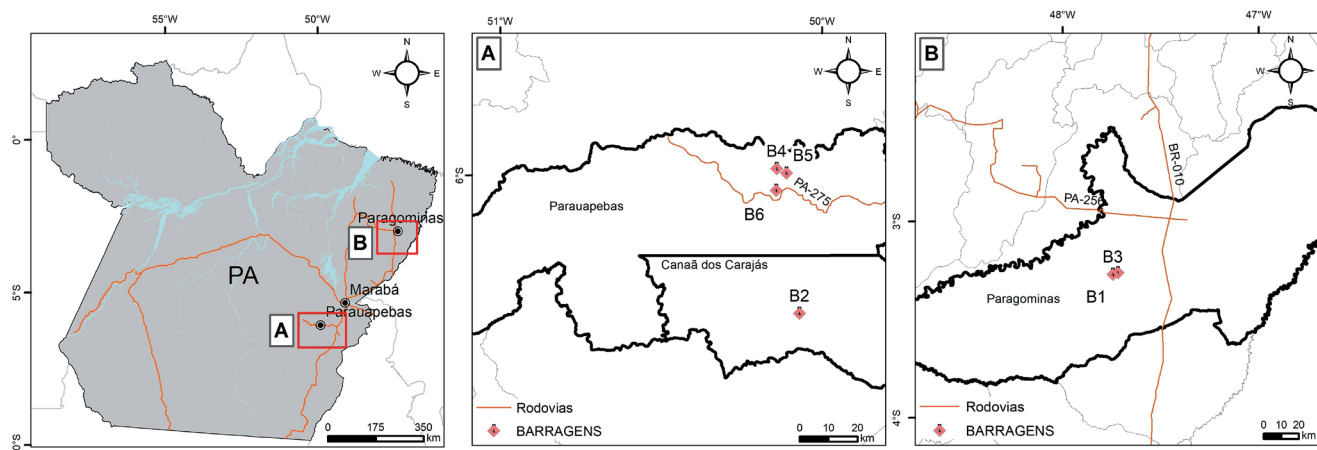


Figura 1. Localização das barragens em estudo.

Tabela 1. Principais características das barragens analisadas. Fonte: (VALE 2016a; VALE 2016b; VALE 2016c; VALE 2016d; HYDRO 2017a; HYDRO 2017b).

NOME	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Finalidade	Disposição de rejeito	Disposição de rejeitos/ armazenamento de água	Disposição de rejeito, contenção de sedimentos e captação de água	Regularização de vazão no abastecimento de água para a usina de beneficiamento e contenção rejeito	Contenção de minério proveniente da lavagem das instalações indústrias e controle de enchente	Acumulação de água e contenção de sedimentos
Cota da Crista	de 142,3 m a 149,30 m	251,9 m	89,00 m	217,4 m	218,0 m	320,0 m
NA Normal	146,0 m	245,96	87,00 m	214,0 m	214,50 m	316,0 m
Altura da Barragem	13,5 m	42,10 m	34,00 m	34,0 m	24 m	45,0 m
Volume do Reservatório	3,58 M m ³	154 M m ³	68,34 M m ³	136,86 M m ³	8,14 M m ³	5,6 M m ³
Tipo de Seção	Barragem de terra homogênea	Barragem de seção mista – solo e enrocamento compactado	Barragem homogênea compactada, areno-silto-argilosa.	Barragem homogênea – material argiloso compactado	Barragem homogênea – material argiloso compactado	Laterita compactada nos espaldares e núcleo com argila siltosa
Cheia de Projeto	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Obtenção e preparo dos dados

Os dados utilizados para a análise de risco (Tabela 2) são provenientes de Planos de Ação Emergencial para Barragens de Mineração (PAEBM), em formato impresso ou digital, das respectivas barragens avaliadas. Estes planos foram gentilmente disponibilizados pela Defesa Civil do Estado do Pará. Portanto, as barragens foram selecionadas de acordo com a disponibilidade e qualidade dos dados disponíveis.

A Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS-PA) forneceu o PAEBM da barragem B2, em formato digital (PDF) e a mancha de inundação proveniente da ruptura hipotética da barragem, em formato “shapefile”. Os PAEBM’s forneceram informações gerais sobre as barragens e o resultado das modelagens de ruptura hipotética, na forma de mapas de mancha de inundação.

O SIGBM (Sistema de Informação Geográfica de Barragens de Mineração) do Departamento Nacional de Produção Mineral (ANM/DNPM) foi outra fonte de dados consultada, principalmente

para obtenção de informações específicas de cada barragem analisada, como o método construtivo, estado de conservação e condições dos projetos de construção, dados constantes na Declaração de Condição de Estabilidade.

Como a maioria (5/6) dos PAEBM's foram disponibilizados em formato impresso, houve a necessidade de digitalização e georreferenciamento dos mapas de inundação das barragens B1, B3, B4, B5 e B6.

O cálculo da quantidade de moradias e pessoas em risco (Gonçalves et al. 2004) foi baseado na fotointerpretação de imagens de satélite, disponíveis no serviço de imagens online (*BaseMap*) do software ArcGis 10.2. Tratam-se de imagens *DigitalGlobe*, datadas de 07/09/2015, com resolução espacial de 0,5 m. O cálculo das moradias afetadas pela barragem B3, foi realizado sobre imagem *DigitalGlobe* de 22/05/2008, única disponível para área de forma gratuita.

As atividades de processamento, vetorização e análise espacial dos dados foram realizadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica - SIG, através dos softwares ArcGis 10.2 e Google Earth Pro. A caracterização dos cenários de solicitação foi definida por meio de um conjunto de planilhas eletrônicas para atribuição de pesos à determinadas características das barragens e do meio em que estão inseridas, foram realizadas através do software Excel 2016.

Na Seção VI dos PAEBM's são apresentados os resultados dos estudos de cenários para o rom-

pimento hipotético das barragens ("*Dam Break*"). Esses cenários são elaborados através de modelagens hidrológicas de escoamento bidimensional, utilizando dados topográficos (de diversas fontes, desde perfilhamento a laser a modelos digitais SRTM), parâmetros básicos do rejeito armazenado (densidade aparente, peso específico, volume armazenado, etc.), seleção de parâmetros da brecha (formato, largura média, altura, tempo de formação, etc.) e definição do hidrograma de ruptura.

Os cenários resultantes dependem fundamentalmente da quantidade de hipóteses estabelecidas e da qualidade dos dados utilizados. Por exemplo, para os cenários de ruptura da barragem B2, foram estabelecidas cinco hipóteses ruptura: i) Cota atual ruptura hipotética da barragem por instabilização do maciço pela ombreira direita; ii) Cota final ruptura hipotética da barragem por instabilização do maciço pela ombreira direita; iii) Simulação das vazões naturais com tempo de retorno de 100 anos, sem ruptura da barragem; iv) Cota atual ruptura hipotética da barragem por "*overtopping*" (galgamento) pela ombreira esquerda e; v) Cota final ruptura hipotética da barragem por "*overtopping*" pela ombreira esquerda. Para as barragens que possuem mais de uma hipótese de ruptura, adotou-se a mancha de inundação que caracteriza o cenário mais conservador (mais abrangente) em termos de espalhamento e danos associados (**Tabela 3**).

Tabela 2. Dados utilizados no estudo de análise de barragens

Nº	Tipo de Dado	Disponibilizado por	Formato	Mapa digitalizado
1	PAEBM B1	Def. Civil Estadual	Impresso	Sim
2	PAEBM B2	Def. Civil Estadual e SEMAS	Impresso/Digital	Não
3	PAEBM B3	Def. Civil Estadual	Impresso	Sim
4	PAEBM B4	Def. Civil Estadual	Impresso	Sim
5	PAEBM B5	Def. Civil Estadual	Impresso	Sim
6	PAEBM B6 pera	Def. Civil Estadual	Impresso	Sim
7	Sistema de Informação Geográfica para Barragem de Mineração - SIGBM	ANM/DNPM	Digital	

As etapas envolvidas na análise de risco através da aplicação da metodologia RBPS foram adotadas da seguinte maneira: i) obtenção dos PAEBM's e avaliação dos dados de interesse; ii) para barragens que não possuíam dados vetoriais

em SIG das manchas de inundação provenientes da modelagem de ruptura hipotética da barragem, os mapas impressos constantes nos PAEBM's foram digitalizados e georreferenciados no sistema de coordenadas SIRGAS 2000, projeção UTM 22

Tabela 3. Cenários rompimento hipotético de barragem (“Dam Break”) selecionados para a análise de risco

Nº	Barragem	Cenários	Dado topográfico	Escala do mapa impresso
1	B1	Ruptura da parede, com liberação do volume armazenado no reservatório associado a ocorrência de evento de precipitação com tempo de retorno de 10.000 anos	Perfilamento a laser aerotransportado (2016), curvas de nível (5 m), levantamento topográfico (2017) e MDE SRTM	1:20.000
2	B2	Ruptura da barragem por “overtopping” pela ombreira esquerda.	Aerolevantamento e curvas de nível geradas a partir de MDE SRTM	-
3	B3	Ruptura da barragem B3, com ruptura em cascata das barragens de jusante, para a condição de novo alteamento, associado evento de precipitação com tempo de retorno de 10.000 anos	Perfilamento a laser aerotransportado (2016), curvas de nível (5 m), levantamento topográfico (2017) e MDE SRTM	1:20.000
4	B4	Ruptura por “piping” ¹ no maciço em dia chuvoso, com tempo de retorno de 10.000 anos. Foi considerada a propagação de 1/3 do volume de rejeitos do reservatório.	Aerolevantamento e curvas de nível geradas a partir de MDE SRTM	1:40.000
5	B5	Ruptura associada ao evento de precipitação com tempo de retorno de 10.000 anos. Foi considerada a propagação de 1/3 do volume de rejeitos do reservatório.	Aerolevantamento e curvas de nível geradas a partir de MDE SRTM	1:40.000
6	B6	Ruptura associada ao evento de precipitação com tempo de retorno de 10.000 anos. Foi considerada a propagação de 1/3 do volume de rejeitos do reservatório.	Aerolevantamento e curvas de nível geradas a partir de MDE SRTM	1:15.000

S; iii) fotointerpretação das imagens de satélite para estimar do número de moradias e pessoas nas áreas recobertas pela mancha de inundação de cada barragem em análise; iv) qualificação dos fatores de resposta e obtenção dos pesos de cada característica associada para posterior soma dos pesos e obtenção do Índice de Falha; v) cálculo do Potencial de Perdas de Vidas Humanas; vi) cálculo do Índice de Risco e; vii) cálculo do Índice Socioeconômico.

3.2 Metodologia de análise “Risk-Based Profiling System” (RBPS)¹

Na análise RBPS, o risco é estimado combinando a probabilidade de ocorrência de algum cenário de solicitação (como a probabilidade de ocorrência de um terremoto) e, com a ocorrência do cenário, a probabilidade de ocorrência de alguma falha na barragem. Após determinar a possibilidade de ocorrer algum desses eventos, é possível mensurar a magnitude das consequências (Valerius 2014).

Então a avaliação é feita pela seguinte fórmula, onde R é o risco, P é a probabilidade estimada

para a ocorrência do cenário; P_c é a probabilidade de ocorrência de falha na barragem, caso ocorra um dos cenários (Harrald 2006):

$$R = \sum [P_{(carga)} \cdot P_{(resposta)}] \cdot Consequências \quad (1)$$

$P_{(carga)}$, pode ser denominado fator de carga e é imposto pelos regimes hidrológicos e sísmicos ou ainda pela condição estática da barragem (sem a influência de nenhum fator externo), que são os denominados “cenários” de acontecimentos da maioria das respostas adversas em barragens. Inclui-se também como cenário, o conjunto dos aspectos de operação, manutenção e segurança da barragem (Harrald 2006).

$P_{(resposta)}$, também denominado fator de resposta mede a resposta da barragem mediante os cenários ocorrentes (Harrald 2006). A multiplicação do fator de resposta pelo fator de carga resulta no Índice de Falha (IF) da barragem e representa o primeiro termo da equação (1).

Os IF's possuem um valor máximo para cada cenário (Tabela 4), e quando somados podem atingir o valor de 1.000 pontos, o que representa o Índice de Falha Total (IFT) da barragem. Quanto maior o valor obtido, maior será a probabilidade de falha. Para a obtenção do Índice de Falha Total, o avaliador necessita de diversas informações sobre as condições físicas da barragem, o que resulta no preenchimento de diferentes planilhas que

¹ “Piping”: processo erosivo que ocorre dentro do aterro ou fundação da barragem, o que torna limitada a visualização da erosão. É um fenômeno ainda pouco compreendido devido a sua complexidade (Mattson et al. 2008).

abordam as condições e a estrutura da barragem (Harrald 2006).

Tabela 4. Valores de pontuação atribuídos a cada cenário de solicitação na metodologia RBPS. Baseado em Harrald (2006).

Cenário	Pontuação
Estático	300
Hidrológico	300
Sísmico	300
Operação e manutenção	100
Total	1.000

O segundo termo da equação (1) é a estimativa das esperadas devido à ocorrência de cada cenário. Elas traduzem-se no Potencial de Perdas de Vida Humanas, estimado por dados como o número de pessoas a jusante da barragem, a severidade da inundação e o entendimento da população sobre a severidade (Graham 1999). O Potencial de Perdas de Vida Humanas é multiplicado pelo IF, para obtenção do Índice de Risco (IR) da barra-

gem. E após ser calculado para cada cenário é somado para se obter o Índice de Risco Total (IRT), que representa o risco que determinada barragem exerce sobre a população a jusante (Valerius 2014). Seguido do cálculo do IR é calculado também o Índice Socioeconômico, que resulta em um índice de risco bruto, pois é calculado pela multiplicação direta do índice de falha com a população em risco e posterior divisão por 1000. Este fator não representa diretamente o número de mortes, mas considera toda a área afetada por uma possível falha (Escuder et al. 2007).

Um resumo da metodologia pode ser visto na **Figura 2**. A seguir, os fatores de carga, os fatores de resposta e as consequências serão mais bem discutidos. Dentro do escopo da análise de risco, Valerius (2014) ainda inseriu a classificação do dano socioambiental, tendo como base o tipo de resíduo armazenado na barragens e as consequências de um possível rompimento para o abastecimento de água das cidades, para as áreas de conservação ambiental, áreas urbanas, corpos d'água, entre outros.

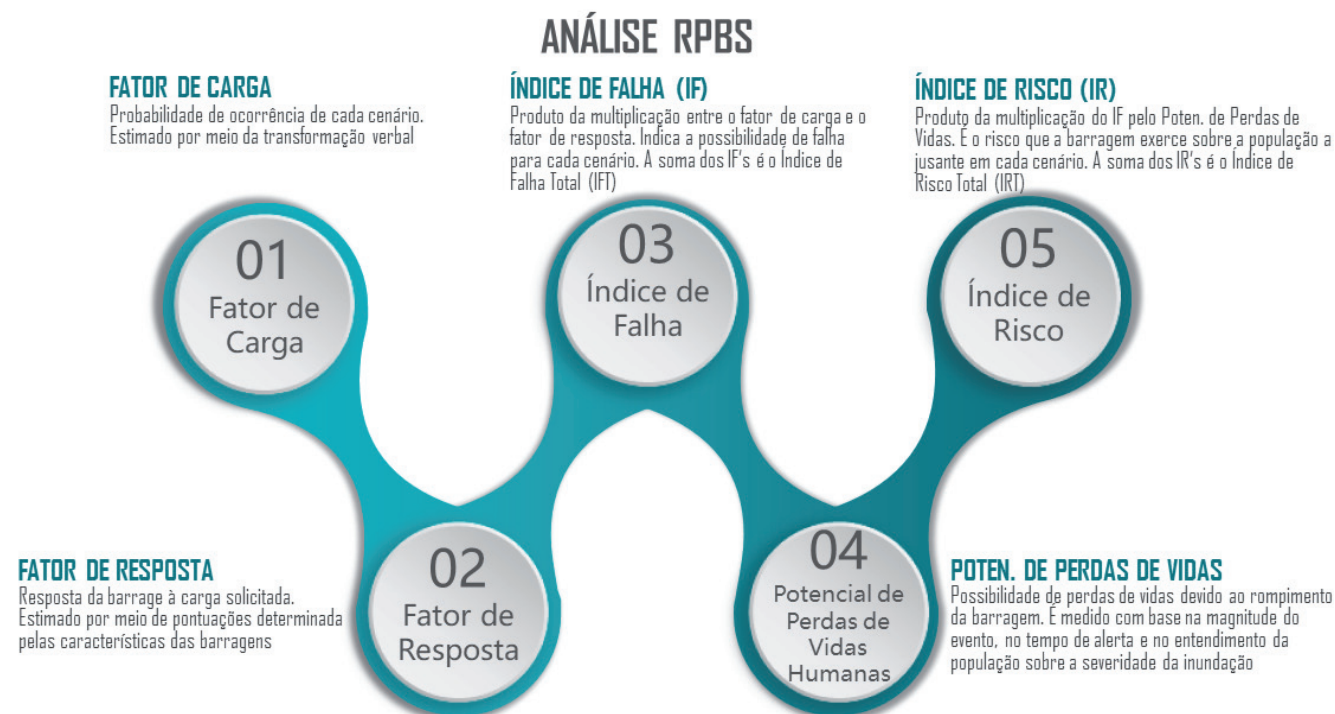


Figura 2. Fluxograma resumindo os passos da metodologia RBPS. Modificado de Valerius (2014).

3.3 Caracterização dos fatores de carga

Os fatores de carga foram estimados através de probabilidade subjetiva, isto é, o valor numérico ou a faixa de valores (**Tabela 5**) são julgados como críveis com base nas evidências disponíveis analisadas por um conjunto de especialistas, refletindo o grau de convicção na ocorrência de determinado evento (Baptista 2008, USBR 2015). Esta técnica é utilizada quando não é possível determinar numericamente a probabilidade de determinado evento ocorrer, tendo em vista a necessidade de estudos muito mais aprofundados e séries históricas muito longas, o que no momento não existe ou não está disponível para as barragens em análise. Neste trabalho ela será adotada para estimar a

probabilidade de ocorrência dos quatro cenários, conforme a **Tabela 6**.

Tabela 5. Probabilidades adotadas, através da técnica de transformação verbal (USBR 2015)

Descritor	Probabilidade atribuída
Virtualmente certo	0,999
Muito provável	0,99
Provável	0,9
Neutro	0,5
Improvável	0,1
Muito improvável	0,01
Vitualmente impossível	0,001

Tabela 6. Fatores de carga utilizados para todas as barragens. Adaptado de Valerius (2014)

Cenário	Probabilidade atribuída	Descrição
Condição estática	0,99	Muito provável
Hidrológico	0,9	Provável
Sísmico	0,5	Neutro
Operação e manutenção	-	Calculado diretamente

3.4 Caracterização dos fatores de resposta para os cenários de solicitação

Dada a concretização de um cenário, os fatores de resposta (**Tabelas 7, 8, 9 e 10**) são as características das barragens que mais influenciaram na probabilidade de ocorrência de uma falha na barragem, ou seja, as respostas da barragem ao cenário imposto, são enquadradas em um limiar de pontuação de define uma maior ou menor predisposição a efeitos adversos (Valerius 2014).

A maioria dos incidentes em barragens ocorrem em três situações; 25% estão relacionados a causas meteorológicas, como, eventos/períodos de chuva incomuns e neve; 14% relacionam-se a eventos sísmicos causados por terremotos

(liquefação sísmica); e 10% são causadas por mau gerenciamento das atividades humanas, como a práticas de gestão deficientes, falta de manutenção e estrutura defeituosa dos sistemas de drenagem das barragens. Outras causas envolvem má construção/localização, problemas de drenagem, infiltração e subsidência; e problemas causados por um conjunto de fatores (Rico et al. 2008 from which 26 located in Europe, was compiled in a database. This contains six sections, including dam location, its physical and constructive characteristics, actual and putative failure cause, sludge hydrodynamics, socio-economical consequences and environmental impacts. Europe ranks in second place in reported accidents (18%).

Tabela 7. Pontuação para os fatores de resposta do cenário estático.

Categorias	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Máxima
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de montante para jusante	50	50
	Único ponto, de jusante para montante	40	
	Descarga em vários pontos, de jusante para montante	20	
	De jusante para montante com <i>spray-bars</i>	10	
	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonagem	8	
Proteção do talude de jusante	Não existe	10	10
	Vegetação	5	
	Rip rap	3	
	Outra (considerar eficiência)	1 a 9	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	Não existe monitoramento	60	60
	Existe monitoramento	15	
	Existe monitoramento com níveis de alerta	5	
Fator de segurança de operação	Abaixo 1,3	50	50
	De 1,3 a 1,5	35	
	Acima de 1,5	10	
Volume armazenado	Abaixo de 500 mil m ³	2	10
	De 500 mil a 5 milhões m ³	4	
	De 5 milhões m ³ a 25 milhões m ³	6	
	De 25 milhões m ³ a 50 milhões m ³	8	
	Acima de 50 milhões m ³	10	
Verificação da água infiltrada no talude	Vazamento lamacento e com aumentos súbitos	50	50
	Vazamento lamacento	45	
	Vazamento límpido, aumentando gradualmente	30	
	Vazamento límpido e estável	20	
	Pequeno vazamento	15	
	Nenhum vazamento verificado	2	
Sistema de drenagem superficial	Nenhum	20	20
	Em más condições	10	
	Em boas condições	5	
Sistema de drenagem interna	Nenhum	40	40
	Tapete drenante	30	
	Dreno de Pé	20	
	Poços de Alívio	15	
	Em parte dos alteamentos	10	
	Em todos os alteamentos	5	
	Conjunto de Equipamentos drenantes	3	
	Outro tipo de drenagem (considerar eficiência)	39	
Problemas verificados no corpo da barragem	Trincas	4	10
	Deterioração dos taludes	2	
	Vazamento em tubulação de equipamento de descarga	2	
	Erosão no talude de jusante	2	
	Outros problemas (considerar a gravidade)	Σ de todos os problemas não pode ser maior que 10	

Tabela 8. Pontuação para os fatores de resposta do cenário hidrológico.

Categorias	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Máxima
Vazão de projeto dos vertedores	10.000 anos	5	55
	1.000 anos	20	
	500 anos	40	
	Menos de 500 anos ou desconhecido	55	
Sistema alternativo de descarga das vazões	Bombeamento	15	30
	Outro (considerar eficiência)	1 até 29	
Sistema de drenagem superficial	Nenhum	30	20
	Nenhum	20	
	Em más condições	10	
	Em boas condições	5	
	Nenhum	40	
	Tapete drenante	30	
Sistema de drenagem interna	Dreno de Pé	20	40
	Poços de Alívio	15	
	Em parte dos alteamentos	10	
	Em todos os alteamentos	5	
	Conjunto de Equipamentos drenantes	3	
	Outro tipo de drenagem (considerar eficiência)	39	
	Único ponto, de montante para jusante	35	
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de jusante para montante	25	35
	Descarga em vários pontos, de jusante para montante	15	
	De jusante para montante com spray-bars	5	
	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonação	3	
	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonação	3	
Proteção do talude de jusante	Não existe	10	10
	Vegetação	5	
	Rip-rap	3	
	Outra (considerar eficiência)	1 até 9	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	Não existe monitoramento	30	30
	Existe monitoramento	15	
	Existe monitoramento com níveis de alerta	5	
Configuração do depósito	Em vale	10	10
	Em fundo de vale	8	
	Em meia encosta	6	
	Em dique fechado	4	
Fator de segurança para falha no sistema de drenagem	Abaixo de 1,3	50	50
	De 1,3 a 1,5	40	
	Acima de 1,5	20	
	Não avaliado	35	
Volume armazenado	Abaixo de 500 mil m ³	2	10
	De 500 mil a 5 milhões m ³	4	
	De 5 milhões m ³ a 25 milhões m ³	6	
	De 25 milhões m ³ a 50 milhões m ³	8	
	Acima de 50 milhões m ³	10	
Área do reservatório	0,5 a 1 km ²	4	10
	1 a 1,5 km ²	6	
	1,5 a 2 km ²	8	
	Acima de 2 km ²	10	

Tabela 9. Pontuação para os fatores de resposta do cenário sísmico.

Categorias	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Máxima
Nível de vibração causado pelo plano de fogo	Alto	20	20
	Médio	10	
	Baixo	5	
	Não realiza monitoramento	10	
Sismicidade da região (casos históricos)	Desconhecido	20	20
	Médio	10	
	Baixo	5	
Problemas verificados no corpo da barragem	Trincas	15	30
	Deterioração dos taludes	5	
	Vazamento em tubulação de equipamento de descarga	5	
	Erosão no talude de jusante	5	
	Outros problemas (considerar a gravidade)	Σ de todos os problemas não pode ser maior que 30	
Fator de segurança para eventos sísmicos	Abaixo de 1,3	80	80
	De 1,3 a 1,5	70	
	Acima de 1,5	10	
	Não avaliado	50	
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de montante para jusante	60	60
	Único ponto, de jusante para montante	50	
	Descarga em vários pontos, de jusante para montante	35	
	De jusante para montante com <i>spray-bars</i>	15	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonagem	10	45
	Não existe monitoramento	45	
	Existe monitoramento	20	
Sistema de drenagem interna	Existe monitoramento com níveis de alerta	8	35
	Nenhum	35	
	Tapete drenante	30	
	Dreno de Pé	20	
	Poços de Alívio	15	
	Em parte dos alteamentos	10	
	Em todos os alteamentos	5	
Conjunto de Equipamentos drenantes	3		
Existência de estradas e/ou ferrovias próximas	Outro tipo de drenagem (considerar eficiência)	34	10
	Sim	10	
	Não	3	

Tabela 10. Pontuação para os fatores de resposta do cenário de operação e manutenção. As categorias destacadas em negrito foram adicionadas para este estudo.

Categorias	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Máxima
Plano de ação emergencial	Não possui (Quando obrigatório)	40	40
	Não possui (Não obrigatório)	20	
	Possui - avaliar abrangência/qualidade dos dados e determinar pontuação	1 a 39	
Documentação de projeto	Projeto executivo e "como construído" 5	5	20
	Projeto executivo ou "como construído" 10	10	
	Projeto básico 15	15	
	Não há projeto 20	20	
Manuais e procedimentos para inspeção de segurança	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação	2	10
	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento	5	
	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção	10	
Cópias dos PAE's entregues aos órgãos competentes	Sim	2	5
	Não	5	
Relatórios de inspeção e Análise de Segurança	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de análise de segurança	2	15
	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança	5	
	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento	10	
	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual	15	
Infrações cometidas	Multa aplicada nos últimos 10 anos	10	10
	Advertência aplicada nos últimos 5 anos	2	
	Outro tipo de infração (considerar relevância)	Σ de todos os problemas não pode ser maior que 10	

A pontuação dos fatores de resposta para cada cenário que será utilizada foi elaborada por Valerius (2014), com base em dados históricos, consulta a artigos e nos dados disponíveis. Para este estudo, foram retirados e adicionados alguns fatores de pontuação para melhor caracterização dos cenários.

Segundo Escuder et al. (2007) o fator de resposta está diretamente ligado ao comportamento estrutural da barragem e dependerá diretamente dos seguintes fatores: i) capacidade, estado, manutenção e funcionamento dos equipamentos de deságue; ii) aspectos de projeto e construção da barragem; iii) volume e área do reservatório; iv) características do rejeito armazenado; v) aspectos geológicos e geotécnicos da fundação e região do entorno; vi) existência de instrumentação e moni-

toramento da barragem; vii) em casos de sismos, a suscetibilidade à liquefação e as condições de estabilidade dos taludes; viii) cumprimento de normas e leis vigentes que estabelecem as diretrizes para a exploração em questão; ix) deformações, trincas, afundamentos e demais anomalias verificadas no corpo da barragem.

3.5 Caracterização do Potencial de Perdas de Vidas Humanas

O procedimento para determinação do Potencial de Perdas de Vidas Humanas pra barragens seguiu, o quanto os dados permitiram, as diretrizes propostas por Graham (1999) an extensive evaluation of dam failures and the factors that contributed to loss of life was conducted.

Every U.S. dam failure that resulted in more than 50 fatalities and every dam failure that occurred after 1960 resulting in any fatalities was investigated with regard to warning, population at risk (PAR. Segundo o autor, o procedimento pode ser dividido em sete etapas: i) determinar os cenários de falha da barragem; ii) determinar as categorias de tempo para as quais estimativas de perda de vida são necessárias; iii) determinar quando os avisos de falha de barragens foram iniciados; iv) determinar a área inundada para cada cenário de falha; v) estimar o número de pessoas em risco para cada cenário de falha e categoria de tempo; vi) aplicar equações baseadas empiricamente ou método para estimar fatalidades; vii) avaliar as incertezas.

Os cenários de falha utilizados foram os apresentados nos PAEBM's. Devido à distância das barragens analisadas em relação às moradias mais próximas, a categoria de tempo não foi definida. A determinação de quando os avisos de falha serão iniciados, foi definido como igual ao tempo em que ocorreu o rompimento da barragem. As áreas inundáveis foram as apresentadas nos PAEBM's e que hipoteticamente causariam o maior dano à população.

A estimativa de pessoas em risco foi determinada a partir multiplicação do número de unidades residências dentro das áreas inundáveis pelo número médio de pessoas por domicílios particulares permanentes (Gonçalves et al. 2004) no estado do Pará (4,1 pessoas por domicílio), de acordo com IBGE (2010).

Após concretizadas as etapas necessárias, o potencial de perdas de vida é definido pela multiplicação entre o número de pessoas em risco e a taxa de fatalidade. Esta, por sua vez, é determinada com base na gravidade da inundação, no tempo dos alertas emitidos e em uma medida de que as pessoas entendem a gravidade da inundação (**Tabela 11**).

Este método foi desenvolvido usando um conjunto de dados ampliado que totalizou aproximadamente 40 inundações, muitas das quais causadas por falhas de barragens, todas as falhas nas represas dos EUA causando 50 ou mais mortes e outros eventos de inundação que foram selecionados na tentativa de cobrir toda a severidade, advertência e gravidade das inundações entendendo suas combinações (Graham 1999)

Para este estudo, considerando que: i) o tempo de alerta foi definido como o momento da ruptura do barramento até a chegada da mancha de inundação; ii) todas as modelagens de rompimento presentes no PAEBM's, indicam que a mancha de inundação alcançará a localidade rural mais próxima após 2-3h do rompimento e; iii) o caráter aplainado do relevo a jusante, tende a manter a velocidade de escoamento relativamente baixa; adotou-se a taxa de fatalidade de 0,0002 (severidade baixa da inundação, tempo de alerta maior que 60 minutos e entendimento preciso da severidade da inundação por parte da população).

Tabela 11. Taxa de fatalidade derivada de estudos de caso (Graham 1999)

Severidade da Inundação	Tempo de alerta (minutos)	Entendimento da Severidade da Inundação	Índice de Fatalidade (Fração das pessoas em risco com expectativa de morte)	
			Sugerido	Limiar Sugerido
Alta	Sem aviso	Não aplicável	0,75	0,30 a 1,0
	15 a 60	Vago	Use os valores mostrados acima e aplique-se ao número de pessoas que permanecem na planície de inundação da falha da barragem depois que os avisos são emitidos. Nenhuma orientação é fornecida sobre quantas pessoas permanecerão na planície de inundação.	
		Preciso		
	> 60	Vago		
Preciso				
Média	Sem aviso	Não aplicável	0,15	0,03 a 0,35
	15 a 60	Vago	0,04	0,01 a 0,08
		Preciso	0,02	0,005 a 0,04
	Acima de 60	Vago	0,03	0,005 a 0,06
Preciso		0,01	0,002 a 0,02	
Baixa	Sem aviso	Não aplicável	0,01	0,0 a 0,02
	De 15 a 60	Vago	0,007	0,0 a 0,015
		Preciso	0,002	0,0 a 0,004
	Acima de 60	Vago	0,003	0,0 a 0,0006
Preciso		0,0002	0,0 a 0,0004	

3.6 Caracterização do dano socioambiental

O dano socioambiental está relacionado ao contato do rejeito armazenado na barragem com o ambiente urbano e florestal, promovendo consideráveis transtornos a ambos. A curto prazo (horas a meses), a depender da natureza do rejeito, os rompimentos afetam invariavelmente a qualidade da água e dos sedimentos, a vida aquática e humana por potencialmente centenas de quilô-

metros a jusante. A médio e longo prazo (anos e séculos) pode afetar os solos e os sedimentos das planícies, principalmente através de rejeitos com presença de minerais metálicos, afetando a pecuária e a produção de alimentos (Ahmed & Tahlawi 2011, Kossoff et al. 2014).

Nesse aspecto, relacionam-se a qualidade do rejeito armazenado aos danos causados ao ambiente, através de um sistema de pontuação, conforme a **Tabela 12**.

Tabela 12. Pontuação para classificação do dano socioambiental

Danos causados	Propriedade dos rejeitos armazenados (NBR 10004 - ABNT, 2004)		
	Perigoso	Não inerte	Inerte
Ruptura poderá causar transtornos para o abastecimento de água de alguma cidade	4	4	1
Ruptura poderá afetar alguma área de conservação ambiental	4	1	0,5
Ruptura poderá afetar um núcleo urbano	6	3	4
Ruptura poderá causar danos à mineradora	2	1	0,5
Ruptura poderá causar danos sobre corpos de água superficiais	2	1	0,5
Ruptura poderá afetar núcleos rurais	4	4	1
Ruptura poderá afetar estradas, pontes, rodovias, rede de energia elétrica e/ou telecomunicação, ferrovias, etc.	4	1	0,5

Segundo as características dos rejeitos eles foram classificados com Perigosos, Não inertes e Inertes, de acordo com a NBR 10004 (ABNT 2004). Os danos causados, foram obtidos junto aos PAEBM's e às análises de imagens de satélite. De acordo com a pontuação final, as barragens puderam ser enquadradas nas seguintes classes: i) \sum maior do que 6: Dano extremo; ii) \sum de 4 a 6: Dano muito alto; iii) \sum de 2 a 4: Dano alto; iv) \sum menor do que 2: Dano considerável (Valerius 2014).

4 RESULTADOS

4.1 Análise do Índice de Falha (IFT), do Índice de Risco Total (IRT) e do Potencial de Perdas de Vidas

Entre as seis barragens analisadas (Tabela 13), uma apresentou Índice de Falha Total (IFT) considerado baixo (B5: 329,47) e cinco com IFT considerado médio (B2: 375,66; B4: 341,22; B6:335,64; B3: 455,18; B1: 428,63).

Tabela 13. Resultado da análise de risco apresentando os fatores de resposta para cada cenário, o Índice de Falha, o Índice de Risco e o Índice Socioeconômico

Barragens	Cenários de solicitação	Fator de Carga	Fator de Resposta	Índice de Falha	Pot. de Perdas de Vidas Humanas	Índice de Risco	População em Risco	Índice socioeco-nômico
B1	Condição estática	0,99	147,00	145,53	0,00	0,00	0,00	0,00
	Hidrológico	0,90	169,00	152,10		0,00		0,00
	Sísmico	0,50	208,00	104,00		0,00		0,00
	Operação e manutenção	-	27,00	27,00		0,00		0,00
	Total			551,00		428,63		0,00
B2	Condição estática	0,99	134,00	132,66	2,58	342,26	12900,00	1711,31
	Hidrológico	0,90	150,00	135,00		348,30		1741,50
	Sísmico	0,50	158,00	79,00		203,82		1019,10
	Operação e manutenção	-	29,00	29,00		74,82		374,10
	Total			471,00		375,66		969,20
B3	Condição estática	0,99	162,00	160,38	0,01	2,10	66,00	10,52
	Hidrológico	0,90	182,00	163,80		2,15		10,75
	Sísmico	0,50	208,00	104,00		1,36		6,82
	Operação e manutenção	-	27,00	27,00		0,35		1,77
	Total			579,00		455,18		5,97
B4	Condição estática	0,99	118,00	116,82	1,16	135,51	5818,00	679,66
	Hidrológico	0,90	131,00	117,90		136,76		685,94
	Sísmico	0,50	151,00	75,50		87,58		439,26
	Operação e manutenção	-	31,00	31,00		35,96		180,36
	Total			431,00		341,22		395,82
B5	Condição estática	0,99	113	111,87	0,02	2,24	86,00	9,62
	Hidrológico	0,90	129,00	116,10		2,32		9,98
	Sísmico	0,50	151,00	75,50		1,51		6,49
	Operação e manutenção	-	26,00	26,00		0,52		2,24
	Total			419,00		329,47		6,59
B6	Condição estática	0,99	116,00	114,84	0,00	0,00	0,00	0,00
	Hidrológico	0,90	127,00	114,30		0,00		0,00
	Sísmico	0,50	151,00	75,50		0,00		0,00
	Operação e manutenção	-	31,00	31,00		0,00		0,00
	Total			425,00		335,64		0,00

As duas barragens com IFT mais elevado, apresentaram valores relativamente altos no cenário de condição estática (onde não há influências externas), pois na barragem B3 não existe proteção do talude de jusante e não há sistema de drenagem superficial, conforme consta no SIGBM. Já na barragem B1 não foi possível obter a informação tanto da proteção do talude quanto do sistema de drenagem superficial. Ambas também apresentaram trincas em sua estrutura, de acordo com informações do SIGBM.

Quanto ao Índice de Risco Total (IRT), a barragem do B2 foi a de maior destaque (969,20 pontos), 2,5 vezes maior do que a barragem do B4 (395,82). O IRT alto decorre da sua área de atingimento que pode afetar cerca de 12.900 pessoas, localizadas em propriedades rurais e principalmente na área urbana de Parauapebas, o que eleva a taxa de fatalidade média (que é função do número de pessoas). Ainda assim, o Potencial de Perdas de Vida é de 2,58, que, do ponto de vista prático é baixo e tende a zero, se considerarmos que a estimativa para a chegada da mancha de inundação à área urbana de Parauapebas é de 12 a 24h e que segundo Graham (1999) an extensive evaluation of dam failures and the factors that contributed to loss of life was conducted. Every U.S. dam failure that resulted in more than 50 fatalities and every dam failure that occurred after 1960 resulting in any fatalities was investigated with regard to warning, population at risk (PAR, mais de 99% das mortes ocorrem em menos de 24 km da barragem que falhou. Entretanto, a comunidade rural mais próxima (Vila Bom Jesus), localizada 5 km a leste a barragem, terá 17% (176 pessoas) dos residentes afetados, por uma onda de inundação que poderá chegar entre 2 e 3h após o rompimento, segundo as estimativas apresentadas no PAEBM.

A análise espacial da mancha de inundação do rompimento hipotético da barragem B4, mostrou que, apesar da área de atingimento ser praticamente duas vezes maior que a da mancha de inundação da barragem B2 (101 km² contra 57 km²), o número de pessoas afetadas é 2 vezes menor (5.818 pessoas), o que diminui o Potencial de Perdas de Vida (1,16). A mancha de inundação da barragem B5 poderá afetar cerca de 86 pessoas, o que, somando com um IFT baixo (329,47 pontos), produz um IRT muito baixo (6,59). A barragem

B3, apesar de um IFT médio, também mostrou um IRT baixo (5,97) em função do número estimado de pessoas afetadas (65 pessoas). Os demais barramentos, B6 e B1, não apresentaram manchas que afetariam pessoas ou moradias a jusante.

4.2 Análise dos cenários de solicitação

Na avaliação dos cenários de solicitação (**Figura 3**), as barragens B3 e B1, foram as que apresentaram maiores pontuações no cenário de condição estática (160,38 e 145,53 pontos, respectivamente) e no cenário hidrológico (163,80 e 152,10 pontos, respectivamente). Esses valores foram principalmente influenciados pela constatação da presença de trincas no talude de ambas as barragens, ausência de drenagem superficial na B3 (de acordo com dados do SIGBM), a falta dessa informação para a B1 e pela ausência de informação sobre o tipo de drenagem interna em ambas as barragens, tanto nos PAEBM's quanto no SIGBM. A presença de trincas também influenciou no aumento da pontuação para o cenário sísmico (104,00 pontos em ambas), cenários este que prioriza condições como a sismicidade natural da região ou a sismicidade induzida, como as causadas pelos planos de fogo ou deslocamento de caminhões pesados.

Vale ressaltar que há carência de informações para a elaboração de um cenário sísmico mais consistente, devido a exigência de estudos sobre a influência dos planos de fogo nas barragens e sobre a sismicidade regional que são os fatores mais importantes deste cenário. No cenário de operação e manutenção, o qual reflete basicamente a eficiência e responsabilidade com que as barragens são tratadas pelos empreendedores, todas apresentaram pontuações semelhantes, porém, destaca-se que as barragens do B5 e B6, possuem apenas o projeto executivo ou o "como construído", enquanto as demais apresentam ambas as documentações. As barragens do Sossego, B3 e B1, em seus relatórios de inspeção, não realizam análise de segurança.

Ainda no cenário de operação de manutenção, a avaliação dos PAEMB's, em termos de atendimento aos conteúdos mínimos foram satisfatórias. Verificou-se que todos atendem as diretrizes básicas, entretanto, os estudos de rompimento hipotético de barragem ("*Dam Break*"), apresen-

taram como base topográfica para a modelagem, uma junção entre dados de alta resolução (perfilamento a laser ou levantamento topográfico) nas áreas próximas às barragens e dados MDE/SRTM, que correspondem a resolução espacial de 30 m, no restante das áreas a jusante, inclusive nos núcleos urbanos. Segundo o DSG (2016), essa re-

solução espacial é compatível com trabalhos nas escalas entre 1:50.000 e 1:25.000. Mas para modelagens hidrológicas, nos moldes do rompimento de barragens, a escala topográfica mínima é de 1:25.000, devendo ser mais detalhada em zonas urbanas ou industriais e planícies povoadas (Cunge et al. 1980; Morris 2009; ANA 2015; USACE 2016).

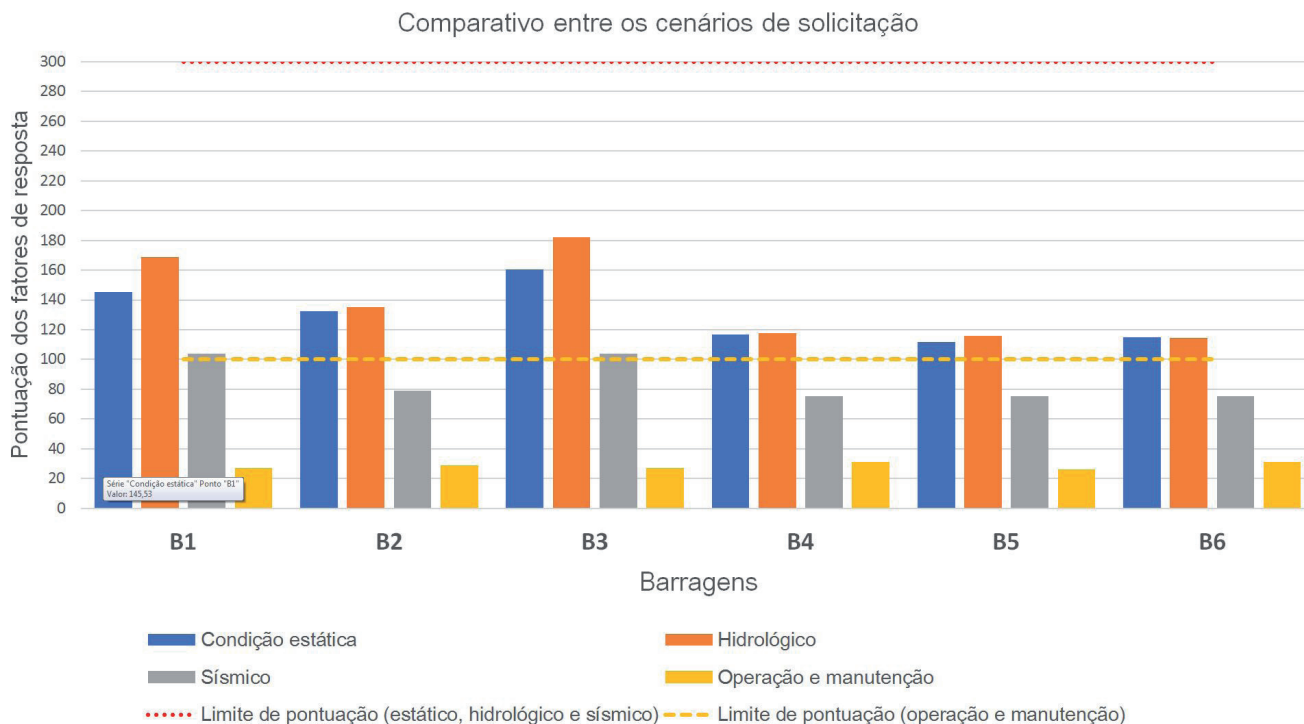


Figura 3. Gráfico comparativo entre os fatores de resposta para os cenários de solicitação das barragens

4.3 Análise socioambiental

Com relação ao dano socioambiental, quatro barragens foram classificadas como dano extremo, recebendo mais de 6 pontos. São elas: B2, B3, B4 e B5. As informações constantes na **Tabela 14** foram compiladas dos Planos de Ação Emergencial das respectivas barragens, sendo complementadas através de análise espacial em ambiente SIG.

As barragens B1 e B3 são reservatórios de rejeitos provenientes da produção de alumina. Conhecido como “lama vermelha” esse tipo de

rejeito é basicamente formado pela bauxita original, por óxidos insolúveis (principalmente ferro, silício, alumínio e titânio) dispersos em um meio altamente alcalino (Galembeck et al. 2009) e com grande capacidade de troca catiônica que pode causar sérios danos ambientais (Antunes & Navarro 2011) como a contaminação de águas superficiais e subterrâneas, contaminação do solo, danos a fauna e à flora, corrosão de equipamentos metálicos até o impacto visual sobre extensas áreas (Hind et al. 1999).

Tabela 14. Resultado da análise de risco socioambiental caracterizando a área potencialmente atingida a jusante

Barragem	Propriedade dos rejeitos armazenados (NBR 10004 – ABNT, 2004)	Danos possivelmente causados	Classificação
B1	Não inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 3,3 km² 2. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o igarapé Potiritá e seus afluentes; 3. Atingimento pontes, estradas, mineroduto e linhas de transmissão; 4. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 5. Impactos nas instalações da mineradora. 	5 Muito alto
B2	Não inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 57,0 km² 2. Atingimento de 3,6 km² (6%) do núcleo urbano de Parauapebas, afetando possivelmente o sistema de abastecimento de água e de distribuição elétrica; 3. Atingimento da borda leste da Floresta Nacional de Carajás, afetando entre 0,1 e 0,2% da sua área total; 4. Atingimento de 4,5 km² (0,6%) da recém-criado Parque Nacional dos Campos Ferruginosos (Decreto s/nº de 5 de junho de 2017); 5. Atingimento de parte da Vila Bom Jesus, 5 km a leste da barragem, e demais propriedades rurais a jusante, com atingimento de moradias, plantações, pastos, açudes, etc.; 6. Ruptura poderá causar danos sobre o rio Parauapebas e seus afluentes; 7. Atingimento pontes, estradas, rodovia PA-160 e ferrovia Estrada de Ferro Carajás, ambas em trechos localizados a norte de cidade de Parauapebas. 8. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 9. Impactos nas instalações da mineradora. 	11 Extremo
B3	Não inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 25,0 km² 2. Atingimento de propriedades rurais a jusante, com danos a moradias, plantações, pastos, açudes, etc; 3. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o rio Parariquara e seus afluentes; 4. Atingimento pontes, estradas, mineroduto e linhas de transmissão; 5. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 10. Impactos nas instalações da mineradora. 	7 Extremo
B4	Inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 101,0 km² 2. Atingimento de 2,5 km² (4%) do núcleo urbano de Parauapebas, afetando possivelmente o sistema de abastecimento de água. 3. Atingimento da porção nordeste da Floresta Nacional de Carajás, afetando entre 0,06 e 0,07% da sua área total; 4. Atingimento do limite norte da Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado, afetando aproximadamente 12,7 km² (5,45%) de área; 5. Atingimento de propriedades rurais a jusante, com danos a moradias, plantações, pastos, açudes, etc; 6. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o rio Parauapebas, ao igarapé Gelado e seus afluentes; 7. Atingimento pontes, estradas, rodovia PA-160 e ferrovia Estrada de Ferro Carajás, ambas em trechos localizados a norte de cidade de Parauapebas. 8. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 9. Impactos nas instalações da mineradora. 	6 Extremo
B5	Inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 40,0 km² 2. Atingimento de menos de 0,5% do núcleo urbano de Parauapebas, especificamente na confluência entre o igarapé Gelado e o rio Parauapebas; 3. Atingimento da porção nordeste da Floresta Nacional de Carajás, afetando entre 0,06 e 0,07% da sua área total; 4. Atingimento do limite norte da Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado, afetando aproximadamente 3,36 km² (1,44%) de área; 5. Atingimento de propriedades rurais a jusante, com danos a moradias, plantações, pastos, açudes, etc; 6. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o rio Parauapebas, ao igarapé Gelado e seus afluentes; 7. Atingimento pontes, estradas, rodovia PA-160 e ferrovia Estrada de Ferro Carajás, ambas em trechos localizados a norte de cidade de Parauapebas. 8. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 9. Impactos nas instalações da mineradora. 	6 Extremo
B6	Inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 1,0 km² 2. Atingimento de 0,02% da área da Floresta Nacional de Carajás 3. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) ao igarapé Geladinho; 4. Interrupção da Estrada de Ferro Carajás, nas proximidades da barragem 5. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 6. Impactos nas instalações da mineradora. 	2 Alto

4.4 Comparação entre a análise RBPS e a análise de risco utilizada no Brasil para barragens de mineração

Como é possível associar, em parte, a Categoria de Risco (CR) e o Dano Potencial Associado (DPA) da análise de risco estabelecida pela Resolução nº 143/CNRH (CNRH 2012), respectivamente, com Índice de Falha Total (IFT) e o Índice de Risco Total (IRT) da análise RBPS, foi possível traçar um comparativo entre ambas (**Tabela 15**), notando-se que houveram semelhanças nas classificações. Porém, enquanto a análise RBPS, categorizou as barragens B1, B2, B3, B4 e B6 como de IFT (equivalente ao CR) médio, a metodologia utilizada pelo DNPM, categorizou como de CR baixo. Observou-se também que, apesar de todas as barragens serem classificadas como DPA alto, a barragem B2 possui um IRT (equivalente do DPA), no mínimo, 2,5 vezes maior que as demais barragens analisadas. Vale ressaltar que a análise RBPS não classifica as barragens em alto, médio e baixo, logo para efeitos comparativos, os 1.000 pontos para IFT apresentados na **Tabela 4**, foram divididos em: i) baixo: ≤ 333 ; ii) $333 < \text{médio} \leq 666$; iii) alto: > 666 .

A análise buscou também estabelecer cenários aos quais as barragens podem ser submetidas (estático, hidrológico, sísmico e de operação de manutenção), demonstrando qualitativamente, a capacidade das mesmas de resistirem a eventos internos (qualidade da operação e manutenção) e externos (inundações e sismos), a exemplo das barragens B3 e B1, que tendem a uma maior possibilidade de falha em cenários hidrológicos e a barragem B6, ao cenário estático.

Diferentemente da análise oficial, para a metodologia utilizada neste estudo, o risco está relacionado diretamente com possíveis perdas de vida, na forma do Potencial de Perdas de Vidas Humanas, fator que permite uma visão mais clara sobre essa possibilidade que, no geral, apresentou-se baixa ou nulas para todas as barragens da análise. Dessa forma foi possível ainda observar que, no caso da barragem B2 e B4, os cenários mais conservadores indicam que cerca de 12.900 e 5.818 pessoas, respectivamente, podem ser atingidas, enquanto as estimativas da análise de risco oficial para ambas as barragens está entre 501 e 1.000 pessoas.

Tabela 15. Comparativo entre a metodologia aplicada neste estudo e a metodologia de análise de risco utilizada no Brasil

Barragens	Análise de risco utilizada no Brasil					Análise RBPS					
	CR	DPA	Classe	População em risco	Índice de Falha Total	Índice de Risco Total	Índice Socioeconômico	Dano socioambiental	População em risco		
B1	Baixa	Alto	B	0 - 100*	428,63	Médio	0	0	5	Muito alto	0
B2	Baixa	Alto	B	501 - 1.000	375,66	Médio	969,20	4846,01	11	Extremo	12.900
B3	Baixa	Alto	B	0 - 100	455,18	Médio	5,97	29,86	7	Extremo	65,6
B4	Baixa	Alto	B	501 - 1.000	341,22	Médio	395,82	1985,22	6	Extremo	5.818
B5	Baixa	Alto	B	1 - 100	329,47	Baixo	6,59	28,33	6	Extremo	86
B6	Baixa	Alto	B	1 - 100	335,64	Médio	0	0	2	Alto	0

* No SIGBM não consta o limiar de população atingida, mas informa que não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante.

5 CONCLUSÃO

A análise RPBS é, em termos práticos, um instrumento qualitativo de tomadas de decisões baseada no risco. A sua aplicação em barragens de rejeito de mineração do estado do Pará mostrou-se

com bons resultados, passível de utilização e com maior possibilidade de detalhamento em comparação à análise de risco utilizada atualmente para este tipo de barragem, tendo em vista que a RBPS baseia-se na avaliação de quatro cenários e na possibilidade de estimar (considerando as incertezas

das modelagens hidrológicas) o número de pessoas afetadas por um possível rompimento de barragem, na dissociação entre o risco à população e o risco ao ambiente, tanto urbano quanto natural (na forma do Índice de Risco Total e do Dano Socioambiental) e na projeção dos possíveis cenários de falha. Ainda assim, ambas cumpriram seu papel de forma satisfatória.

No aspecto da tomada de decisão baseada no risco, a barragem que mais apresentou potencial de afetar as áreas a jusante foi a barragem B2, pois seu rompimento afetaria uma série de aspectos ambientais (vegetação, corpos hídricos superficiais, vida animal, biota aquática, solo, tanto fora quanto dentro de áreas especiais de conservação) e aspectos urbanos (moradias, equipamentos de fornecimento de água e energia, hospitais, escolas, estabelecimentos comerciais, entre outros). Não menos importante, afetaria áreas rurais (sítios, sedes de fazenda, plantações, pastos, entre outros).

Dentre a barragens que afetariam o município de Parauapebas, o rompimento da barragem B2, atingiria 4% da área urbana, principalmente as porções localizadas às margens do rio Parauapebas e seus afluentes que cortam a cidade. Nessas áreas (várzea) geralmente estão estabelecidas as populações de menor poder aquisitivo, menor índice educacional, com pouco acesso a serviços básicos de saúde e segurança, aspectos que influenciam diretamente para tornar essas populações mais vulneráveis a riscos tecnológicos e socioambientais.

O ponto relevante e diferencial da metodologia RBPS é a possibilidade de análise de cenários individuais, para os quais, em cada um deles, determinados parâmetros das barragens e seu ambiente de entorno são exigidas em maior ou menor escala. Considerando que cada cenário receberá o máximo de 300 pontos para os fatores de resposta, com exceção do cenário de operação e manutenção, que recebe no máximo 100 pontos, nenhuma das barragens, em cada cenário, obteve pontuação próxima do seu máximo, indicando uma tendência equilibrada, onde nenhum cenário de solicitação apresentou-se como um ponto focal de possível rompimento.

Os estudos de rompimento hipotético de barragem ("*Dam Break*"), presentes nos PAEBM's foram fundamentais para a análise de risco das

áreas a jusante das barragens. Seu entendimento é fundamental para extrair e gerar informações derivadas que dão substância à análise. Fica claro que a qualidade desses estudos não deve ser desmerecida e é fundamental que, principalmente nas áreas urbanas, seja realizada a partir de dados topográficos de alta resolução.

Assim, a identificação e detalhamento do potencial de risco das barragens por meio da análise RBPS representa um instrumento que pode ser útil como subsídio a implantação de medidas mitigadoras de risco, tanto na barragem com nas áreas a jusante, atuando também de forma complementar a metodologia de análise vigente, sobretudo quanto aos cenários de solicitação e a caracterização do potencial de perdas de vidas e danos socioambientais nas áreas a jusante.

Entretanto, ainda existem fontes de incerteza que devem ser ponderadas para esta análise. Algumas podem ser dirimidas com a disponibilidade de informações, outras são inerentes à metodologia e à conjuntura social em que está inserida a barragem.

Para a construção dos cenários de solicitação, algumas informações não puderam ser obtidas, mesmo com os dados do SIGBM. As categorias fator de segurança, sistema de descarga de vazões, nível de vibração do plano de fogo e infrações cometidas foram definidas como "sem informação" para todos os cenários, recebendo valores intermediários para que sua ausência não influenciasse diretamente nos resultados. Ainda assim, são informações extremamente relevantes para a análise. Estabeleceu-se ainda que a posição do lançamento do rejeito dá-se em um único ponto, de montante para jusante em todas as reservatórios.

Ressalta-se ainda que os dados extraídos do SIGBM não foram validados em campo, logo, não se pôde definir a implicação específica, localização e dimensões (ou ainda medidas corretivas) das trincas e outros fatores que podem influenciar nos resultados. Logo, utilização desses dados teve caráter de experimentação metodológica a metodologia aplicada será amplamente discutida com a finalidade de alcançar os melhores resultados possíveis com os dados a disposição.

Metodologicamente, a incerteza está relacionada aos estudos de "*Dam Break*", que são extremamente complexos, pois o escoamento

proveniente da ruptura de barragens é tipicamente tridimensional com grande variação das grandezas hidráulicas (Monte-Mor 2004) e necessitam de dados de alta qualidade para obtenção de resultados consistentes, sendo que os estudos de “*Dam Break*” avaliados em grande parte foram elaborados a partir de MDE’s SRTM que são fontes incompatíveis com a escala da análise, podendo interferir, principalmente nos limites das áreas inundadas.

No caráter social, as fontes de incerteza são condições de vulnerabilidade e entendimento do risco por parte da população já que uma análise mais específica desses aspectos é necessária. E em âmbito geral as condições de governabilidade municipais, estaduais e federais que vão ditar, em parte, a resiliência nas áreas a jusante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Defesa Civil Estadual do Pará pelo suporte e disponibilização dos Planos de Ação Emergencial. À Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS-PA) por disponibilizar dados digitais do Plano de Ação Emergencial da Barragem do Sossego. Ao Departamento Nacional de Produção Mineral (ANM/DNPM) pela utilização dos dados do SIGBM. E ao Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) pelo suporte no desenvolvimento do trabalho.

REFERENCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. NBR 10004. CENWEB, 2, Rio de Janeiro.

Ahmed, S. S.; Tahlawi, M. R. E. Environmental Impacts of Mining Operations A Case Study: Monitoring the Impacts at Abu Tartour Phosphate Mine, Egypt. v. 1, n. 4, p. 1-6, 2011.

Antunes, M. L. P.; Navarro, G. R. B. Caracterização da Lama Vermelha Brasileira (Resíduo do Refino da Bauxita) e Avaliação de suas Propriedades para Futuras Aplicações. 3rd Internacional workshop advances in cleaner production, p. 10, 2011.

Baptista, M. DE L. P. Abordagens de risco em barragens de aterro. [s.l.] Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

Bowker L.N. & Chambers D.M. 2015. The risk, public liability & economics of tailings storage facility failures. *Earthwork Act*, 1-56, 2015.

BRASIL. 2010. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). *Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]*, Seção I, 181:1-2.

Carmo, F. F.; Kamino, L. H. Y.; Tobias Junior, R.; Campos, I. C.; Carmo, F. F.; Silvino, G.; Castro, K. J. S. X.; Mauro, M. L.; Rodrigues, N. U. A.; Miranda, M. P. S.; Pinto, C. E. F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. 2012. Resolução no 143, de 10 de julho de 2012. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2013/12/resolucao_cnrh_143__de_classificacao_barragens_categoria_risco.pdf>. Acessado em 31 mar 2017.

Colle G.A. 2008. Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 124 p.

Cunge J.A., Holly J.F.M., Verwey A. 1980. *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Edition, Boston.

Davies, M. P. Distinguished Lecturer Series - Impounded mine tailings: What are the failures telling us? *CIM bulletin.*, v. 94, n. 1052, p. 53, 2001.

DSG - DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO. Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército, 2. 195pp.

Escuder I., Membrillera M. G., Moreno P., Pérez O., Ardiles I., Jenaro E. 2007 Development of

a complementary program based on security risk analysis for dams of the hydrographic confederation of the Duero (in Spanish). In: Congreso de Ingeniería Civil, 5, Territorio y Medio Ambiente, Sevilla, Espanha, p. 15.

Forstner, U. Introduction. In: Azcue J.M. (eds) Environmental Impacts of Mining Activities. Berlin, Heidelberg: Environmental Science, Springer, 1999.

Galembeck, F.; Barbosa, C. A. S.; Sousa, R. A. Aproveitamento Sustentável de biomassa e de recursos naturais na inovação química. Química Nova, v. 32, n. 3, p. 571-581, 2009.

Gonçalves, C. D. A. B.; Souza, Í. M.; Pereira, M. N.; Freitas, C. C. Análise do ambiente residencial urbano visando a inferência populacional a partir do uso de dados de sensoriamento remoto de alta resolução. XIV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, p. 1-22, 2004.

Graham W. 1999. A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure. U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation Dam Safety Office, set, 43pp.

Harrald J.R. 2004. Review of risk based prioritization/decision making methodologies for dams. U.S. Army Crpos for Engineers, Washington DC, 29. Disponível em: <http://www.gwu.edu/~icdrm/publications/USACE_ICDRM_RepApr29.pdf>. Acessado em 30 jun 2017.

Hind, A. R.; Bhargava, S. K.; Grocott, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: A review. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 146, n. 1-3, p. 359-374, 1999.

Hudson-Edwards, K. A. et al. The impact of tailings dam spills and clean-up operations on sediment and water quality in river systems: the Ríos Agrio-Guadiamar, Aznalcóllar, Spain. Applied Geochemistry, v. 18, n. 2, p. 221-239, fev. 2003.

HYDRO. 2017a. Plano de ações emergenciais de barragens de mineração - PAEBM: Sistema de disposição de rejeitos área do Vale (B3). 99pp.

HYDRO. 2017b. Plano de ações emergenciais de barragens de mineração - PAEBM: Sistema de disposição de rejeitos área do Patlô 1 (RP-1). 99pp.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2010. Censo Demográfico. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acessado em 25 mai 2016.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MUSEUS. 2014. Perspectivas da Mineração no Mundo e no Brasil. UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 76pp.

Kossoff, D. et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. Applied Geochemistry, v. 51, p. 229-245, 2014.

Mattson H., Hellström J.G.I., Lundström T.S. 2008. On Internal Erosion in Embankment Dams: a literature survey of the phenomenon and the prospect to model it numerically. Research Report. 52pp.

Mcgrath S. 2000. To Study International Practice and Use of Risk Assessment in Dam Management. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/churchillreport.pdf>>. Acessado em 14 mai 2017.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. 2016. Acordo de Cooperação Técnica n° 001/2016. Ministério de Minas e Energia, Serviço Geológico do Brasil, Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. Projeto Segurança de Barragens de Mineração. 5pp.

Monte-Mor, R. C. A. Mapeamento de áreas inundáveis associadas à ruptura de barragens - Estudo de caso: Barragem de Ninho da Águia - MG. Belo: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004

Morris M., Hassan M., Kortenhuis A., Visser P.J. 2009. Breaching Processes: A state of the art review. Floodsite Project Report, 5, 2:1-70.

Rico, M. et al. Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. Journal of Hazardous Materials, v. 152, n. 2, p. 846-852, 2008.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. 2016. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Hydrologic Engineering Center (HEC), fev, 960pp.

USBR - UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. 2015. Subjective Probability and Expert Risk Management. In: USBR - UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. Risk Management - Best Practices and Risk Methodology. Disponível em: <<https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/I-6-20150608.pdf>>. Acessado em 30 jan. 2018.

VALE. 2016a. Plano de Ações Emergências de Barragens de Mineração - PAEBM: Barragem do Sossego. Canaã dos Carajás, 101pp.

VALE. 2016b. Plano de Ações Emergências de Barragens de Mineração - PAEBM: Barragem do Gelado. Parauapebas, 97pp.

VALE. 2016c. Plano de Ações Emergências de Barragens de Mineração - PAEBM: Barragem do Geladinho. Parauapebas, 95pp.

VALE. 2016d. Plano de Ações Emergências de Barragens de Mineração - PAEBM: Barragem do Pera Jusante. Parauapebas, 100pp.

Valerius M. B. 2014. Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. 121p.

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA E HIDROGEOLÓGICA DO ARENÍTICO EÓLICO DA FORMAÇÃO SAMBAÍBA – BACIA DO PARNAÍBA

GEOMECHANICAL AND HYDROGEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE
SAMBAÍDA FORMATION'S EOLIC SANDSTONE - PARNAÍBA BASIN

ERIK WUNDER

Geólogo, Estelar Engenheiros Associados Ltda.

RESUMO

Apresentam-se os resultados da caracterização geomecânica e hidrogeológica do maciço arenítico brando pertencente à unidade litoestratigráfica Arenito Sambaíba, que hospedou as escavações e recebeu as estruturas civis da Usina Hidrelétrica Estreito (1.087 MW), localizada no rio Tocantins, divisa dos estados do Maranhão e Tocantins. Este texto corresponde a um compêndio de dois artigos previamente publicados, um no 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics (Pequim, 2011) e outro apresentado na ISRM Specialized Conference on Soft Rocks (Pequim, 2014).

A apresentação deste texto foi motivada pela intenção e pela pertinência de tornar esse conjunto de informações mais fácil e diretamente disponível aos profissionais do meio geotécnico brasileiro.

Palavras-chave: arenito, rocha branda, caracterização geomecânica

ABSTRACT

It is presented in this article the results of the geomechanical and hydrogeological characterization of the soft sandstone belonging to the lithostratigraphic unit Arenito Sambaíba, which has hosted the excavations and the civil structures of the Estreito Hydro Power Plant (1,087 MW), located in the Tocantins River, the border of Maranhão State and Tocantins State. This paper corresponds to a compendium of two previously published articles, one at the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics (Beijing, 2011) and another presented at the ISRM Specialized Conference on Soft Rocks (Beijing, 2014).

The presentation of this text was motivated by the intention and the pertinence of making this set of information easier and directly available to the professionals of the Brazilian geotechnical environment.

Keywords: sandstone, soft rock, geomechanical characterization

1 INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica Estreito está localizada no rio Tocantins, divisa dos estados do Maranhão e do Tocantins. O sítio que hospeda a usina insere-se no ambiente geológico da Província Sedimentar do Meio Norte, ou Província Parnaíba (Figura 1) que consiste em quatro sítios deposicionais, quais sejam Bacia do Parnaíba, Bacia das Alpercatas, Bacia do Grajaú e Bacia do Espigão-Mestre.

Verifica-se no local uma sequência estratigráfica correspondente ao limite superior da sequência sedimentar da Bacia do Parnaíba com a base da sequência da Bacia Alpercatas, composta respectivamente pelos arenitos triássicos da Formação Sambaíba e pelos basaltos jurássicos da Formação Mosquito.

Os estratos da Formação Sambaíba posicionam-se como maciço de fundação das principais estruturas civis da usina. Esta unidade consiste de uma sequência arenítica caolinítica de granulometria fina bimodal de origem eólica, com estratificações acanaladas de grande porte, representante do final da fase de desertificação da bacia. Possui caracteristicamente grãos sub-angulares a sub-arredondados e superfície fosca, de coloração predominantemente avermelhada a alaranjada e amarelada (Figura 2).



Figura 1. Bacias sedimentares da Província Parnaíba



Figura 2. Talude de escavação para a implantação do circuito de adução e geração da usina mostrando o contato entre o Arenito Sambaíba (base) e o Basalto Mosquito (topo)

Em campo, a rocha apresenta-se com coerência branda (C4), com passagens muito a extremamente brandas (C5), exceto nas proximidades do contato com o Basalto Mosquito, onde o arenito mostra um processo de silicificação, apresentando-se relativamente mais coerentes (C3) que o restante da sequência.

Foram realizadas algumas campanhas de ensaios para a caracterização do Arenito Sambaíba quanto às suas propriedades de resistência, deformabilidade e condutividade hidráulica, além da caracterização geotécnica da rocha.

Os ensaios laboratoriais foram executados em amostras selecionadas dos testemunhos das sondagens executadas desde a fase de Estudo de Viabilidade até a fase do desenvolvimento do Projeto Executivo e implantação do empreendimento. As campanhas de ensaios laboratoriais estão descritas na tabela abaixo.

Tabela 1. Ensaios laboratoriais executados

Ensaio	Nº de Amostras
Caracterização Geotécnica	65
Permeabilidade	17
Resistência e Deformabilidade	23
Compressão Diametral	6
Carregamento Pontual	40
Cisalhamento Direto	11

Além dos ensaios de permeabilidade em laboratório, foram executados 387 ensaios de

perda d'água sob pressão nos furos de sondagens os quais forneceram um conjunto de informações essencial para a caracterização hidrogeológica do maciço arenítico.

2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Foram realizados 65 ensaios, cada um obtendo os parâmetros massa específica aparente seca (δ_{seca}), massa específica aparente saturada (δ_{sat}), absorção de água ($S_{\%}$) e porosidade ($P_{\%}$).

As amostras ensaiadas foram também identificadas conforme o local de coleta, sendo possível então discretizá-las conforme o local de origem, sendo leito do rio (23 amostras), na margem direita (18 amostras) ou na margem esquerda (24

amostras). Os valores médios estão apresentados na tabela abaixo:

Tabela 2. Resultados dos ensaios de caracterização física do Arenito Sambaíba

	δ_{seca} g/cm ³	δ_{sat} g/cm ³	S %	P %
Leito	1,91±0,11	2,12±0,07	11,28±2,94	21,23±4,43
M Direita	1,85±0,05	2,08±0,04	12,68±1,58	23,38±2,38
M Esquerda	1,89±0,09	2,10±0,05	11,17±2,88	20,95±4,48
GERAL	1,89±0,09	2,10±0,05	11,63±2,66	21,72±4,07

Os gráficos abaixo mostram as correlações massa específica x absorção (Figura 3) e porosidade x absorção (Figura 4).

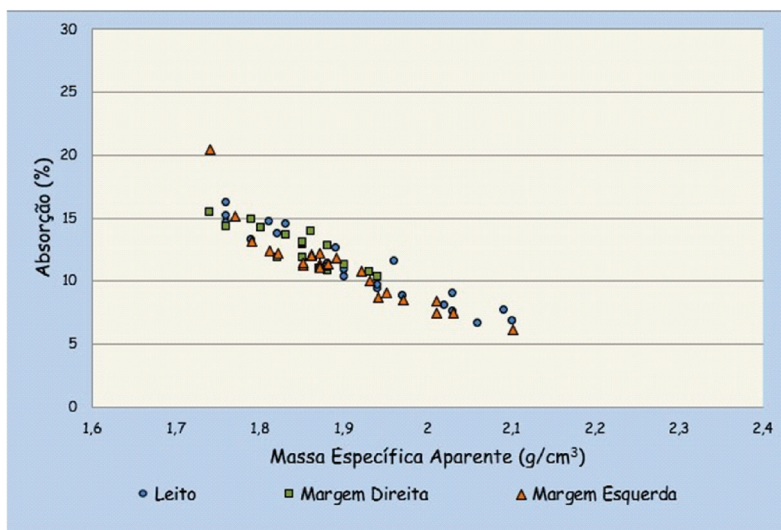


Figura 3. Relação Massa Específica Aparente Seca x Absorção d'Água

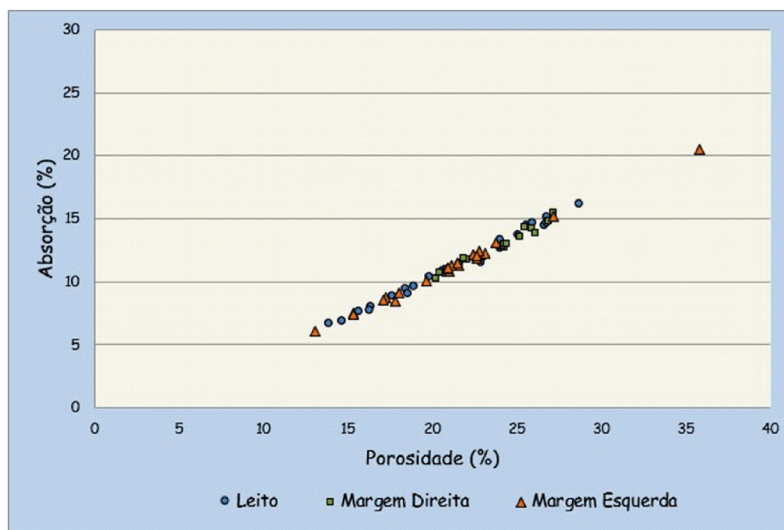


Figura 4. Relação Porosidade x Absorção d'Água

Os resultados apresentados nos gráficos acima confirmam numericamente o comportamento inversamente proporcional da absorção d'água ($S_{\%}$) em relação à massa específica aparente seca (r_{seca}), e a relação direta entre a absorção d'água ($S_{\%}$) com a porosidade ($P_{\%}$) das amostras de arenito, independentemente do local de amostragem.

Por uma aproximação linear destas relações tem-se:

$$S_{(\%)} = 62,46 - 26,95.dseca_{(g/cm^3)}$$

$$S_{(\%)} = 0,65.P_{(\%)} - 2,51$$

Os resultados da caracterização física foram também inseridos nos gráficos produzido por Kanji & Galván (1998) que correlacionam porosidade x massa específica seca e absorção e porosidade.

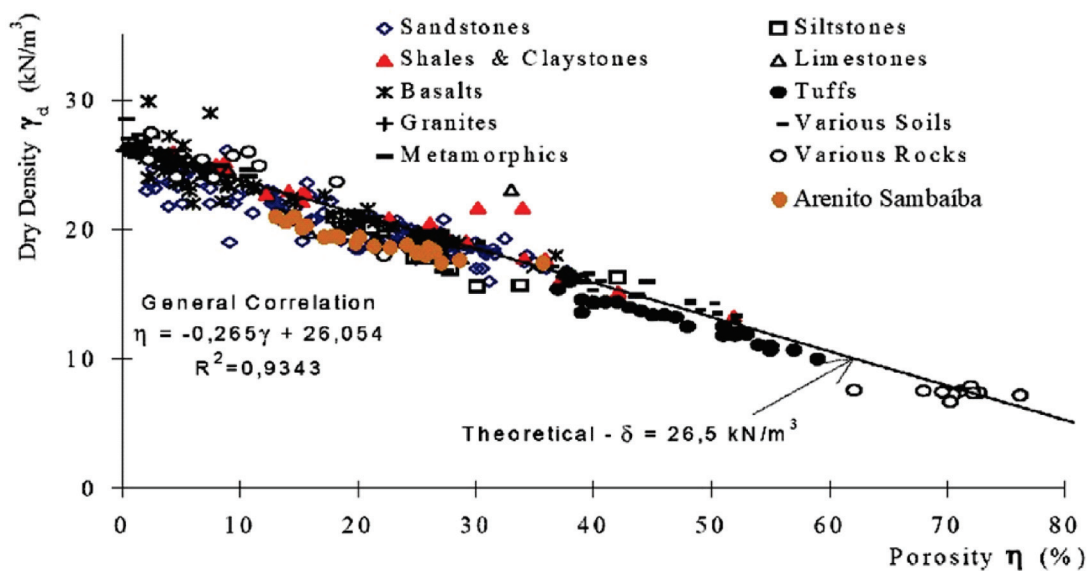


Figura 5. Gráfico de correlação entre porosidade e massa específica seca (Kanji & Galván 1998)

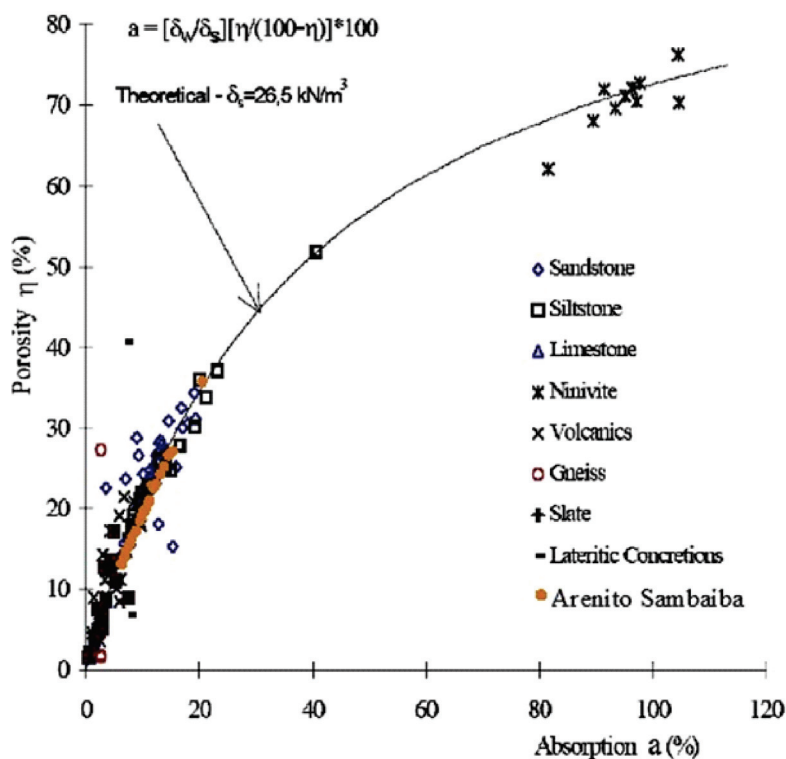


Figura 6. Gráfico de correlação entre absorção e porosidade (Kanji & Galván 1998)

Os resultados mostraram também boa adequação aos valores considerados por Kanji & Galván (1998), posicionando-se próximos aos pontos correspondentes aos outros arenitos considerados por aqueles autores.

3 CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

Compressão Simples e Módulo de Deformabilidade

A caracterização geomecânica foi feita através da obtenção dos parâmetros de resistência a compressão uniaxial (σ_c), resistência a tração por compressão diametral (σ_t) e de deformabilidade (E).

Foram testadas 23 amostras coletadas na margem direita, margem esquerda e no leito do rio, para a determinação de σ_c e E, e 6 amostras representantes do leito do rio e margem esquerda para obtenção da resistência à tração (σ_t). Os valores médios estão apresentados ao lado.

Os valores encontrados para a resistência à compressão uniaxial qualificam o Arenito Sambaíba

como uma rocha branda, de acordo com as classificações propostas por ISRM (1981) e Vaz (1996).

Tabela 3. Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (σ_c) e deformabilidade (E)

	δ_{aparente} g/cm ³	σ_c MPa	E GPa
Leito	1,86±0,15	14,24±7,19	19,69±9,75
M Direita	1,81±0,04	14,41±4,15	13,49±1,75
M Esquerda	1,92±0,09	25,06±6,83	17,83±3,66
GERAL	1,86±0,11	18,07±7,85	16,89±6,18

Tabela 4. Resultados dos ensaios de compressão diametral (σ_t)

	δ_{aparente} g/cm ³	σ_t MPa
Leito	1,75±0,05	1,17±0,31
M Direita	1,70±0,04	0,78±0,10
M Esquerda	---	---
GERAL	1,73±0,05	1,04±0,32

Class	Approx. Range of Strength σ_c (MPa)	Strength	Field Definition
R0	< 1	Extremely weak rock	Crumbles in hand
R1	1 to 5	Very weak rock	Thin slabs break easily under hand pressure
R2	5 to 25	Weak rock	Thin slabs break easily under heavy hand pressure
R3	25 to 50	Medium strong rock	Lumps on core broken by light hammer blows
R4	50 to 100	Strong rock	Lumps on core broken by heavy hammer blows
R5	100 to 250	Very strong rock	Lumps only chip with heavy hammer blows. Dull ringing sound
R6	> 250	Extremely strong rock	Rocks ring on hammer blows. Sparks fly

Figura 7. Quadro de classificação de rochas segundo a resistência à compressão uniaxial (ISRM, 1981)

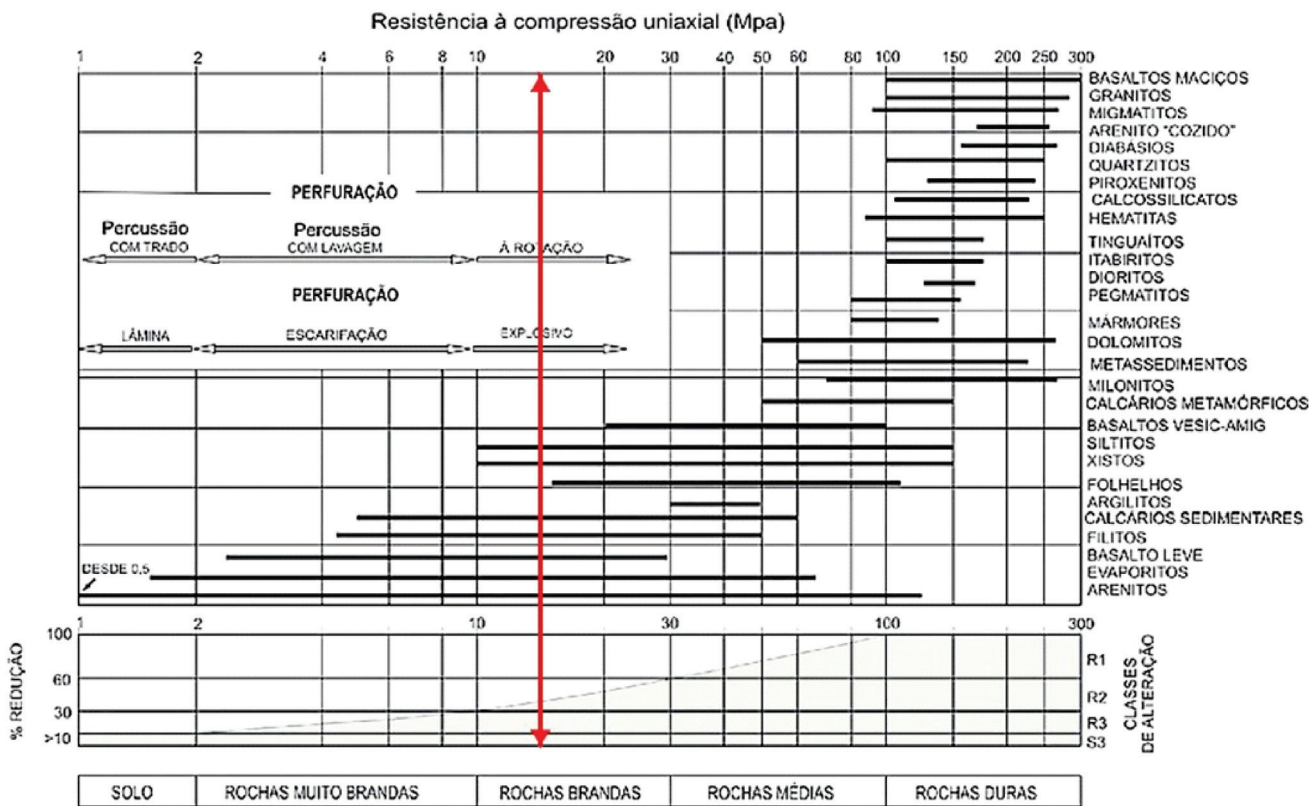


Figura 8. Ábaco de classificação dos materiais geotécnicos segundo a resistência à compressão simples (Vaz, 1996)

Os resultados foram lançados em gráficos e as figuras abaixo apresentam as correlações encontradas para massa específica x resistência

uniaxial (Figura 9), massa específica x deformabilidade (Figura 10) e resistência uniaxial x deformabilidade (Figura 11)

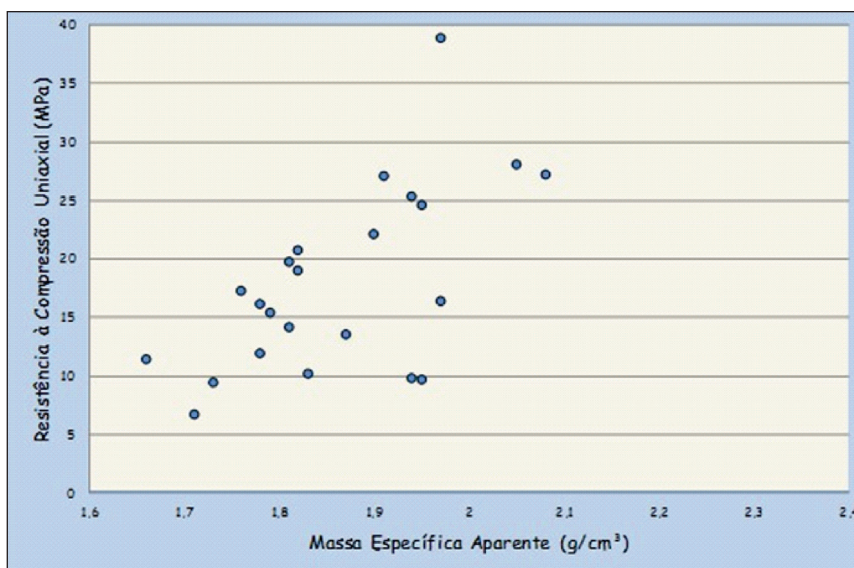


Figura 9. Resistência à compressão uniaxial x massa específica aparente

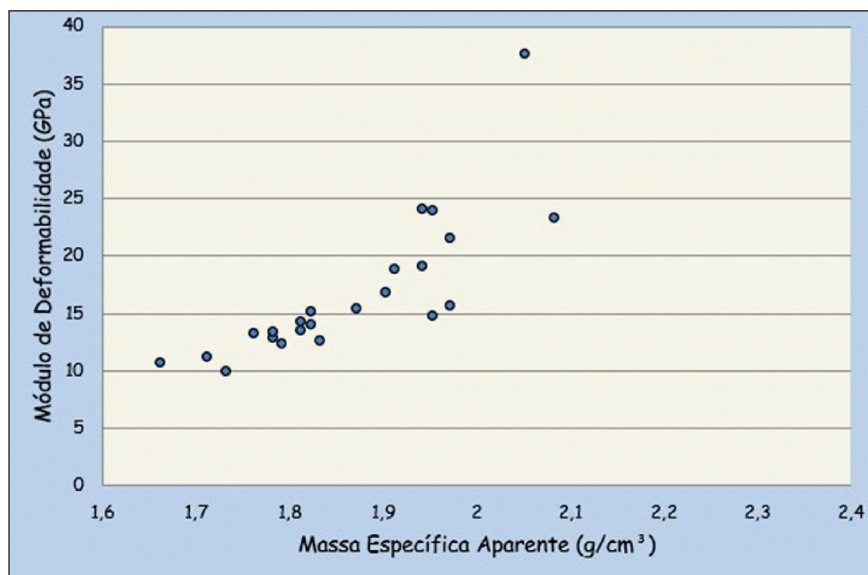


Figura 10. Módulo de deformabilidade x massa específica aparente

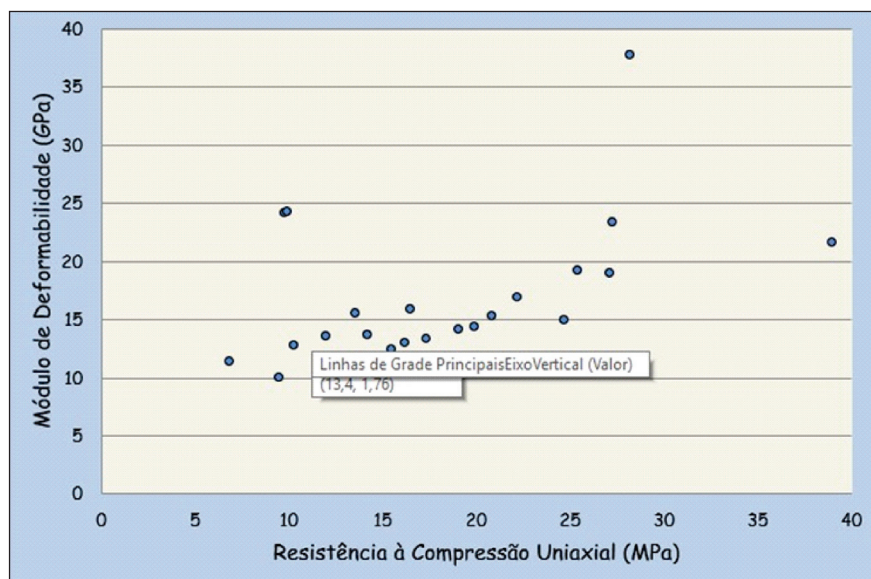


Figura 11. Resistência à compressão uniaxial x módulo de deformabilidade

É interessante notar que os valores de deformabilidade lançados em função da massa específica mostram-se melhor organizados e mais alinhados em comparação à respectiva disposição dos valores de resistência uniaxial.

Ao mesmo tempo, quando comparados entre si, os valores de resistência e de deformabilidade do Arenito Sambaíba mostram uma visível organização, com a esperada relação diretamente proporcional. Desconsiderando os valores

desalinhados, mais afastados, a aproximação linear é dada por:

$$E_{(MPa)} \cong 450 \cdot \sigma_{C(MPa)}$$

Estes resultados foram também lançados no gráfico de resistência à compressão uniaxial x módulo de deformabilidade produzido por Kanji & Galván (1998) e estão mostrados na Figura 12.

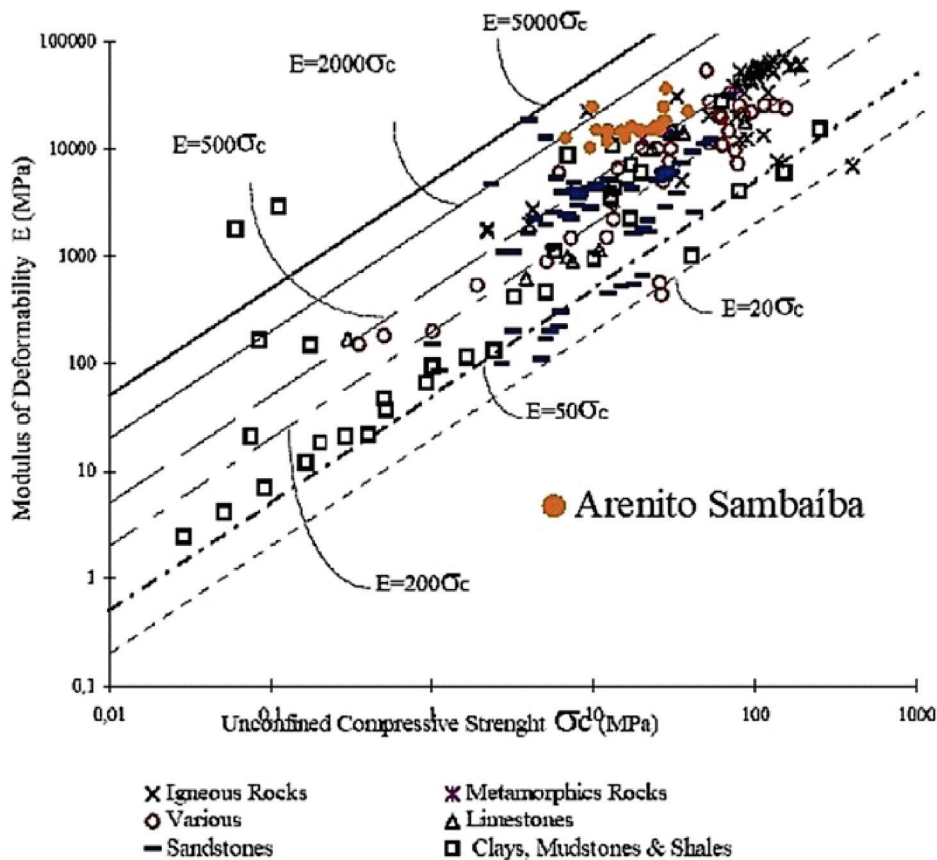


Figura 12. Resistência uniaxial x deformabilidade de Kanji & Galván (1998) com os valores do Arenito Sambaíba

Observa-se que os resultados do Arenito Sambaíba se aproximam dos demais pontos correspondentes a arenitos mas posicionam-se logo acima deles pois mostraram valores de módulo de deformabilidade relativamente superiores para os mesmos patamares de resistência uniaxial.

Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em 11 amostras, sendo que em 6 delas o carregamento normal foi paralelo ao acamamento e em 5 o carregamento normal foi perpendicular à estratificação. Na tabela abaixo estão apresentados os resultados dos ensaios:

Tabela 5. Resultados dos ensaios de cisalhamento

	σ_n (MPa)	τ (MPa)	φ (°)
Paralelo	0,993	0,980	44,6
	1,012	2,187	65,2
	1,975	3,072	57,3
	2,016	3,201	57,8
	3,003	4,135	54,0
	4,003	5,306	53,0
Perpendicular	1,034	2,725	69,2
	2,009	3,145	57,4
	2,505	3,776	56,4
	3,006	4,027	53,3
	4,006	5,815	55,4

O gráfico a seguir mostra a distribuição destes pontos no espaço $\sigma_n \times \tau$.

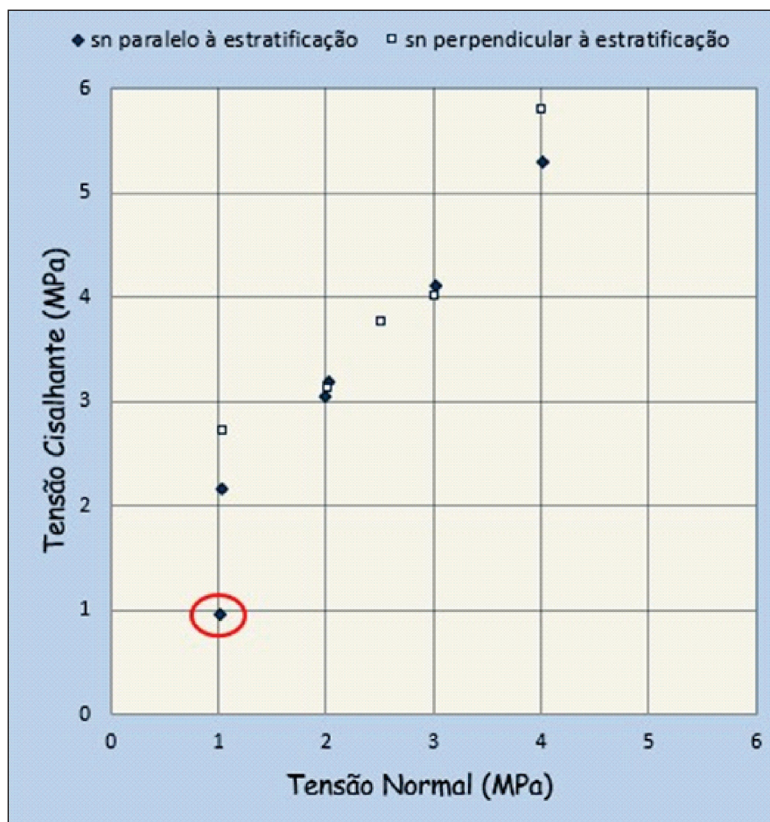


Figura 13. Envoltória de resistência do Arenito Sambaíba obtida por ensaios de cisalhamento direto.

O resultado salientado no gráfico foi atribuído à presença de uma descontinuidade que condicionou a baixa resistência ao cisalhamento do corpo de prova. Assim, desconsiderando-se este resultado, verifica-se que os demais pontos se

organizam próximo à linearidade no intervalo de cargas normais aplicadas. Deste modo, as aproximações lineares para as condições de carregamento consideradas foram:

Paralelo..... $\tau=1,040\sigma_n+1,081$ $c = 1,081 \text{ MPa} ; \varphi = 46,1^\circ$

Perpendicular..... $\tau=1,025\sigma_n+1,320$ $c = 1,320 \text{ MPa} ; \varphi = 45,7^\circ$

A distribuição dos pontos na Figura 13 mostra que a anisotropia estrutural dada pelos planos de estratificação oferece um condicionante marginal, porém presente sobre a resistência ao cisalhamento pela matriz arenosa do Arenito Sambaíba, o que é comum nas rochas brandas. O índice de anisotropia é de 1,22 para o parâmetro da coesão (c) e 1,008 para o ângulo de atrito interno (ϕ)

dade hidráulica, tanto da matriz arenosa (permeabilidade primária) como do maciço arenítico (permeabilidade secundária). A primeira foi avaliada através de ensaios laboratoriais em permeômetro com carga variável e permeômetro na câmara triaxial, enquanto que a segunda foi verificada através de ensaios de perda d'água realizados nos furos de sondagens.

4 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Foram executadas campanhas de ensaios e testes para avaliar as propriedades de condutivi-

Foram executados 17 ensaios laboratoriais, sendo 8 com carga variável e 9 na câmara triaxial. A tabela abaixo apresenta os valores médios obtidos.

Tabela 6. Resultados dos ensaios de permeabilidade em laboratório

	Número de ensaios	Carga Variável	Câmara Triaxial
		k_{20} (cm/s)	k_{20} (cm/s)
Leito	4	$7,24 \times 10^{-5}$	---
M Direita	2	$2,24 \times 10^{-5}$	---
M Esquerda	11	$6,00 \times 10^{-5}$	$6,41 \times 10^{-5}$
GERAL	17	$5,78 \times 10^{-5}$	

Esta campanha de ensaios indicou que a matriz arenosa tem condutividade hidráulica (k_{20}) de $5,78 \times 10^{-5}$ cm/s.

As campanhas de ensaios de perda d’água sob pressão acumularam 387 testes, distribuídos pela margem direita (151), margem esquerda (123) e leito do rio (113).

Fica clara a existência do efeito de escala sobre o coeficiente de permeabilidade, visto que, a permeabilidade secundária do maciço arenítico ($3,44 \times 10^{-4}$ cm/s) é, em média, uma ordem de

magnitude maior que a permeabilidade primária da matriz arenítica ($5,78 \times 10^{-5}$ cm/s).

Tabela 7. Resultados dos ensaios de perda d’água sob pressão em furos de sondagem

	Número de ensaios	$k_{médio}$ (cm/s)
Leito	113	$3,61 \times 10^{-4}$
M Direita	151	$2,06 \times 10^{-4}$
M Esquerda	123	$6,22 \times 10^{-4}$
GERAL	387	$3,44 \times 10^{-4}$

Os resultados dos ensaios de campo também foram analisados quanto à condição de confinamento, ou seja, quanto à existência de maciço basáltico sobreposto ao maciço arenítico, na região onde foi executado o ensaio. O gráfico abaixo mostra a distribuição dos resultados destes ensaios em função das respectivas elevações, identificando-os quanto a respectiva condição de confinamento.

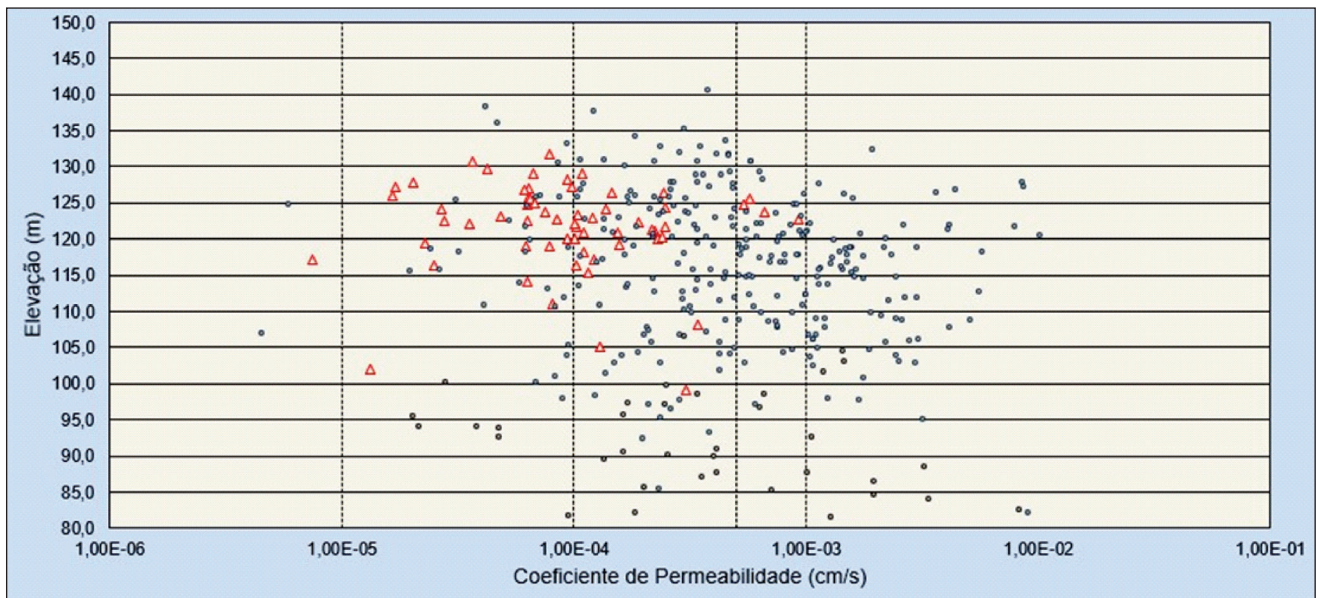


Figura 14. Resultados dos ensaios de perda d’água sob pressão com triângulos vermelhos indicando os pontos “confinados”, subjacente ao maciço basáltico.

A tabela a seguir apresenta os valores médios obtidos nos ensaios de perda d’água sob pressão,

identificando-os conforme o local de execução e condição de confinamento.

Tabela 8. Valores médios obtidos por ensaios de perda d'água

	n° de ensaios		k (cm/s)	
	confinado	não confinado	confinado	não confinado
Leito	---	113	---	$3,61 \times 10^{-4}$
M Direita	59	92	$9,37 \times 10^{-5}$	$3,44 \times 10^{-4}$
M Esquerda	2	46	$2,88 \times 10^{-5}$	$2,45 \times 10^{-4}$

(1)-"confinado": existência de camada basáltica sobre o maciço arenítico; "não confinado": maciço arenítico aflorante, sem a cobertura do maciço basáltico

Nota-se então que a condição de confinamento do maciço arenítico tem marcante influência sobre a respectiva característica de permeabilidade, de modo que a condição "não confinada" apresenta comparativamente uma maior condutividade em aproximadamente 1 (uma) ordem de magnitude.

Outra característica interessante mostrada pelos resultados dos ensaios de perda d'água

corresponde à influência do alívio de carga litostática, gerado pela escavação. A tabela abaixo apresenta os valores médios de condutividade hidráulica obtidos por testes executados antes do início da escavação e os resultados dos testes feitos após a execução da escavação para a implantação das estruturas civis.

Tabela 9. Valores médios de condutividade hidráulica antes e depois das escavações

Local	Condição	N° ensaios	k(cm/s)
M Esquerda	confinado	2	$2,88 \times 10^{-5}$
M Esquerda	não confinado	46	$2,45 \times 10^{-4}$
M Esquerda	pós escavação	75	$1,15 \times 10^{-3}$

O gráfico abaixo mostra a distribuição dos valores de coeficiente de permeabilidade em função das respectivas elevações, salientando os pontos ensaiados após a execução da escavação.

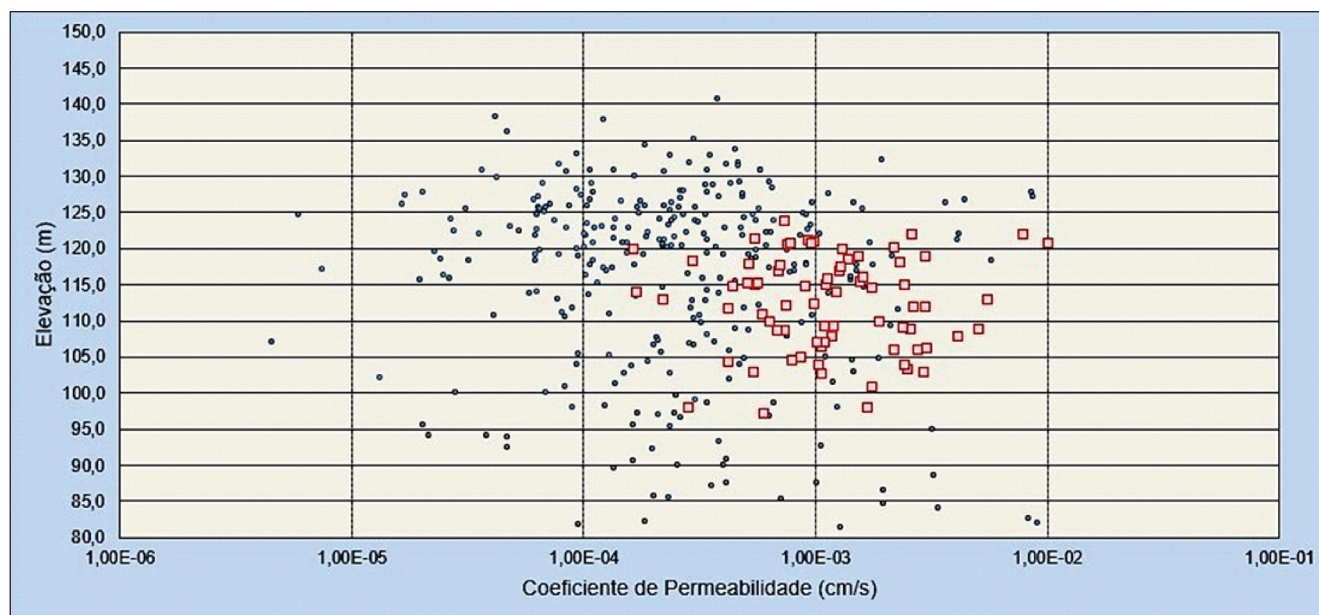


Figura 15. Resultados dos ensaios de perda d'água sob pressão salientados os pontos correspondentes à condição "pós escavação".

É interessante notar que os resultados mostram um aumento de 1 (uma) ordem de magnitude da condição "pós escavação" em relação à condição "não confinada" e de 2 (duas) ordens de magnitude em relação à condição "confinada", o

que deixa evidente o forte condicionante do alívio das cargas litostáticas sobre as características de fluxo hidráulico pelo maciço arenítico do Arenito Sambaíba.

5 CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios laboratoriais forneceram informações que qualificam o maciço arenítico pertencente à Formação Sambaíba como uma rocha branda. A tabela abaixo apresenta os valores médios dos parâmetros geotécnicos e geomecânicos encontrados.

Tabela 10. Valores médios dos parâmetros geológicos e geomecânicos

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor médio
Massa específica seca	δ	g/cm ³	1,89
Absorção	S	%	11,63
Porosidade	P	%	21,72
Resistência uniaxial	σ_c	MPa	18,07
Resistência a tração	σ_t	MPa	1,04
Módulo de deformabilidade	E	GPa	16,89
Coesão (paralelo)	c	MPa	1,081
Ângulo de atrito interno (paralelo)	ϕ	(°)	46,1
Coesão (perpendicular)	c	MPa	1,320
Ângulo de atrito interno (perpendicular)	ϕ	(°)	45,7

A análise dos resultados de coeficiente de permeabilidade obtidos em laboratório e por ensaios de perda d'água em campo mostram um aumento de 1 (uma) ordem de magnitude da permeabilidade secundária em relação à permeabilidade primária. Interessante também foi a verificação de que o Arenito Sambaíba pode oferecer diferentes níveis de condutividade hidráulica dependendo da sua condição de confinamento ou de sobrecarga litostática, com o aumento de 1 (uma) ordem de magnitude da permeabilidade da condição "" para a condição não "confinado" (sem cobertura de basalto) e, desta, um novo acréscimo de 1 (uma) ordem de magnitude para a situação "confinado".

Por fim, a realização das campanhas de investigações in situ e em laboratório proporcionou a reunião de informações geológicas e geotécnicas de grande importância para o projeto e essenciais

para a elaboração da caracterização geomecânica e hidrogeológica do maciço arenítico de fundação das estruturas civis do empreendimento.

Apesar de ser onisciente no meio geológico e geotécnico nacional, essa constatação nunca está suficientemente salientada e merece ser sempre ressaltada, pois ainda nos dias de hoje, não é raro nos encontramos em situações onde temos que justificar, argumentar e convencer os tomadores de decisão quanto a importância de se realizar investigações geológicas em quantidade e em qualidade tais que proporcionem as condições e as informações suficientes para o conhecimento do ambiente geológico em nível adequado à respectiva fase do projeto.

REFERÊNCIAS

- Bizzi, L. L., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Gonçalves, J. H. (eds), 2003 – Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. CPRM
- Hawkings, A. B., 1998 – Aspects of rock strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol 57.
- Kanji, M. A. & Galván, V. R., 1998 – Correlation of properties of soft rock. *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks. Anais do II International Symposium, Napoles.*
- Vaz, L. F., 1996 – Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. *Solo e Rocha – Revista Brasileira de Geotecnia*. São Paulo.
- Wunder, E., Meirelles, M. C., Borchardt, N., Calcina, A. M., Camargo, M. A. – Estreito HPP – Geotechnical and geomechanical characterization of the sandstone foundation rock mass. *Anais do 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Pequim, 2011.*
- Wunder, E. & Meirelles, M. C. – Soft sandstone physical and geomechanical characterization. *Anais do ISRM Specialized Conference on Soft Rocks, Pequim, 2014.*

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DA MINA VAU NOVO (SP) COM ÊNFASE NA ANÁLISE DE DESCONTINUIDADES

ROCK MASS CLASSIFICATION AND SLOPE STABILITY ANALYSIS OF VAU NOVO MINE (SP) WITH ENPHASIS IN THE DISCONTINUITIES ANALISIS

BRUNO HENRIQUE GRAMULHA PIRES

*Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: bruno.pires@usp.br*

CAMILA DUELIS VIANA

*Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: camila.viana@usp.br*

GINALDO ADEMAR DA CRUZ CAMPANHA

*Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: ginaldo@usp.br*

RESUMO ASTRACT

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização geológica e geotécnica da mina Vau Novo, localizada no município de Santana de Parnaíba - SP, onde a empresa Geocal Mineração Ltda. exerce atividades de mineração extraíndo rochas metacarbonáticas do Grupo São Roque. Os dados obtidos foram utilizados para a classificação geomecânica nos sistemas RMR (*Rock Mass Rating*) e SMR (*Slope Mass Rating*), e para a análise de estabilidade de taludes da cava atual e do projeto para a cava final. Com os resultados foi possível determinar a qualidade dos maciços através dos sistemas de classificação supracitados e identificar as famílias de descontinuidades mais problemáticas para a estabilidade dos taludes através da análise cinemática. Os sistemas de classificação não mostraram grandes diferenças em relação à classificação final, no entanto o SMR foi julgado mais adequado, por considerar quantitativamente a influência da orientação das descontinuidades. Com a análise de estabilidade, foi constatada a maior probabilidade de rupturas em cunha e tombamentos, sendo que a família mais problemática presente na mina é a foliação principal, com atitude média aproximada de 340/60 (rumo do mergulho / mergulho). Os taludes com maior risco de rupturas são aqueles subparalelos à foliação, aumentando a probabilidade de escorregamento em cunha e tombamentos com o aumento da inclinação do talude.

Palavras-chave: estabilidade, taludes, descontinuidades, classificações geomecânicas, mineração.

This study aimed the geological-geotechnical characterization of Vau Novo mine, located in Santana de Parnaíba - SP, where the Geocal Ltda. company exploits metacarbonate rocks from the São Roque Group. The data were used in order to classify the rock mass with the RMR (*Rock Mass Rating*) and SMR (*Slope Mass Rating*) systems, and for the slope stability analysis of the current pit and the design for the final pit. The results allowed determining the quality of the rock mass and identifying the most problematic sets of discontinuities for the slope stability. The rock classification systems did not show large differences in the final classification, however the SMR was considered the most appropriate because it weights quantitatively the influence of the discontinuities orientation. The stability analysis showed that wedge sliding and toppling are the most likely failure modes to occur. The most problematic set of discontinuities in the mine is the main foliation with an average 340/60 dip direction / dip attitude, and the slopes with increased risk of sliding are just the ones approximately parallel to the main foliation, increasing the chance of sliding with the increasing of the slope inclination.

Keywords: stability, slopes, discontinuities, geomechanical classifications, mining.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de estabilidade de taludes é essencial para o planejamento e desenvolvimento de qualquer empreendimento ou obra de engenharia onde há riscos geotécnicos envolvidos. Aliado à classificação geomecânica de maciços, este estudo se faz ainda mais necessário em cavas de mineração a céu aberto, uma vez que eventuais deslizamentos de rocha podem gerar prejuízos que variam desde a perda de produção devido a remoção do material até o risco de vida da equipe.

Assim, este trabalho teve como objetivo a classificação geomecânica de maciços rochosos nos sistemas RMR (*Rock Mass Rating*) e SMR (*Slope Mass Rating*) e a avaliação da estabilidade de taludes de corte através da análise cinemática na mina Vau Novo, onde a empresa Geocal Mineração Ltda. exerce atividades de lavra para a extração de metacalcários do Grupo São Roque, localizada no município de Santana de Parnaíba, região metropolitana de São Paulo (Figura 1).

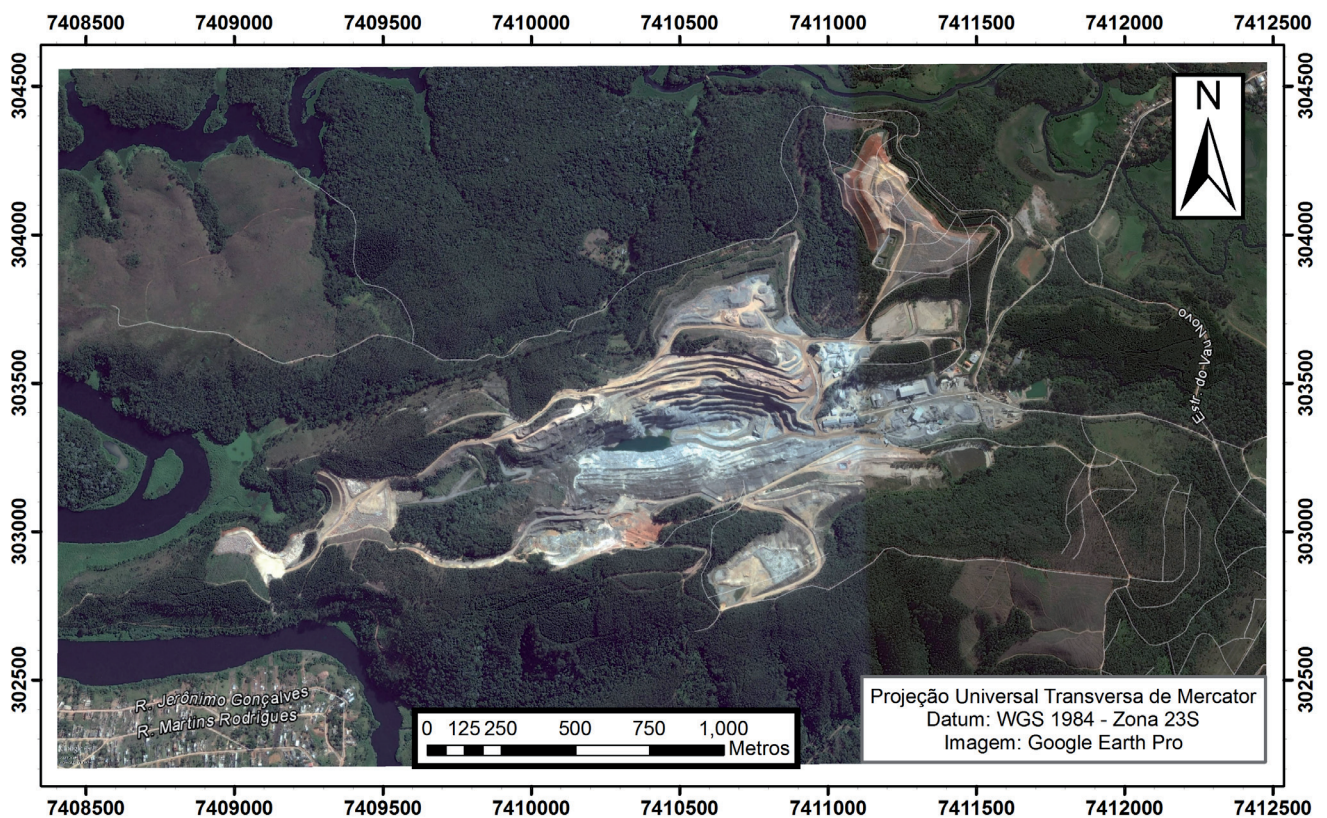


Figura 1. Localização da mina Vau Novo (Fonte: Google Earth Pro - 2016).

2 CONTEXTO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL LOCAL

A mina Vau Novo situa-se na região central da Província Mantiqueira (Almeida *et al.*, 1981), mais especificamente inserida no Grupo São Roque

(Oliveira, 1925, Henrique-Pinto *et al.*, 2015), de idade proterozóica, constituído por uma sequência metavulcanossedimentar delimitada, em conjunto com o Grupo Serra do Itaberaba (Juliani *et al.*, 1986), pelas zonas de cisalhamento Itu-Jundiuvira e Taxaquara (Hasui *et al.*, 1969) (Figura 2).

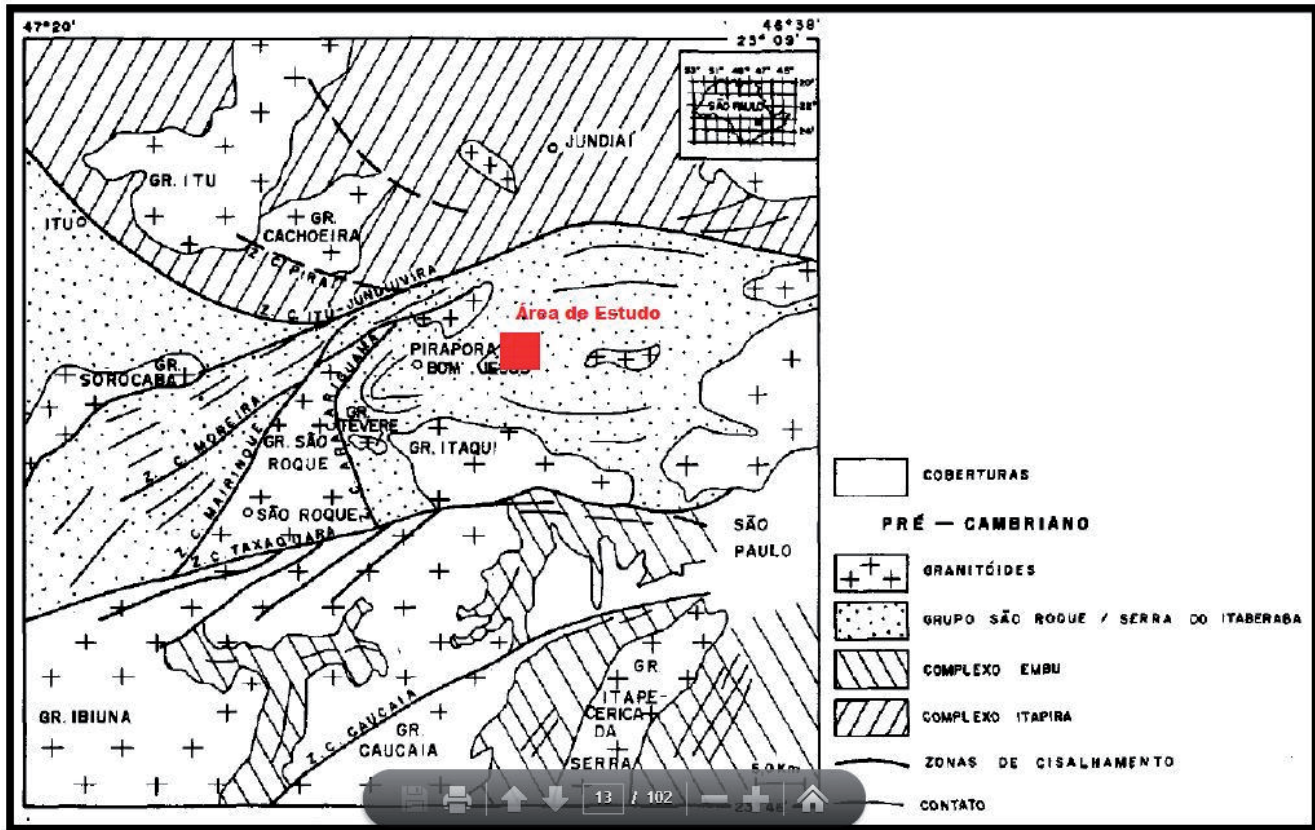


Figura 2. Mapa geológico regional: mostrando o contexto da área de estudo (Extraído de Hackspacher et al.,1993).

O Grupo São Roque apresenta um padrão estrutural complexo. A área de estudo está inserida no centro da estrutura regional conhecida como Sinclinório de Pirapora. Neste contexto Bistrichi (1982), considerou que o Grupo São Roque possui duas fases de deformação bem definidas, e uma terceira relacionada a dobramentos localizados. Relacionou a fase F1 com a geração de dobras fechadas e cerradas com clivagem ardosiana plano-axial. O mesmo autor define a segunda fase de deformação (F2) como a principal, sendo responsável pelas dobras da clivagem ardosiana e pela estrutura regional de maior ordem, com falhas inversas associadas. Esta fase de deformação apresenta eixos, no geral, sub-horizontais e planos axiais com direções que variam de N60E a E-W, nas proximidades da área de estudo. Já a fase F3 possui ocorrência restrita, sem influência na estrutura geral. Já Bergmann (1988) reconheceu cinco fases de dobramentos superimpostas, três delas sin a tardi-metamórficas e duas pós-metamórficas; as dobras recumbentes da segunda fase controlariam a geometria dos contatos entre as unidades

litoestratigráficas, gerando intensa repetição aparente das mesmas. A terceira fase de dobramentos é tardia ao metamorfismo, e desenvolveria clivagem plano axial espaçada; seguiriam duas fases pós-metamórficas, a fase do Sinclinório de Pirapora, com eixo mergulhante a N60-70E, e outra fase tardia em torno de NS-NNW.

Durante a etapa de mapeamento, as unidades litológicas aflorantes na cava foram identificadas como quartzito, metarritmito, metarenito com intercalações de metassiltito, brecha dolomítica, metarritmito carbonático, metassiltito homogêneo e metassiltito com intercalações de metarenito (Figura 3). Na litoestratigrafia do Grupo São Roque proposta por Bergmann (1988), a qual realizou o último mapeamento geológico de semidetalle abrangendo a área de estudo, os metacalcários da mina do Vau Novo estão incluídos na Formação Pirapora, e os demais metassedimentos na Formação Estrada dos Romeiros.

Com exceção ao quartzito e à brecha dolomítica, os litotipos mapeados apresentam bandamento composicional, com granulação fina a

média, diferindo-se, principalmente, pela predominância entre porções silto-argilosas e arenosas. O quartzito apresenta estrutura maciça e granulação fina a média, enquanto a brecha dolomítica aflora como uma rocha acinzentada escura, em geral não foliada, com fragmentos angulosos de dimensões variadas, de centimétricas a

decimétricas, com vênulas brancas de calcita irregulares e de tamanhos variados. No geral, as rochas apresentam grau de alteração mais elevado nas bancadas superiores, tornando-se mais frescas na região central da mina, onde o decapeamento está mais avançado.

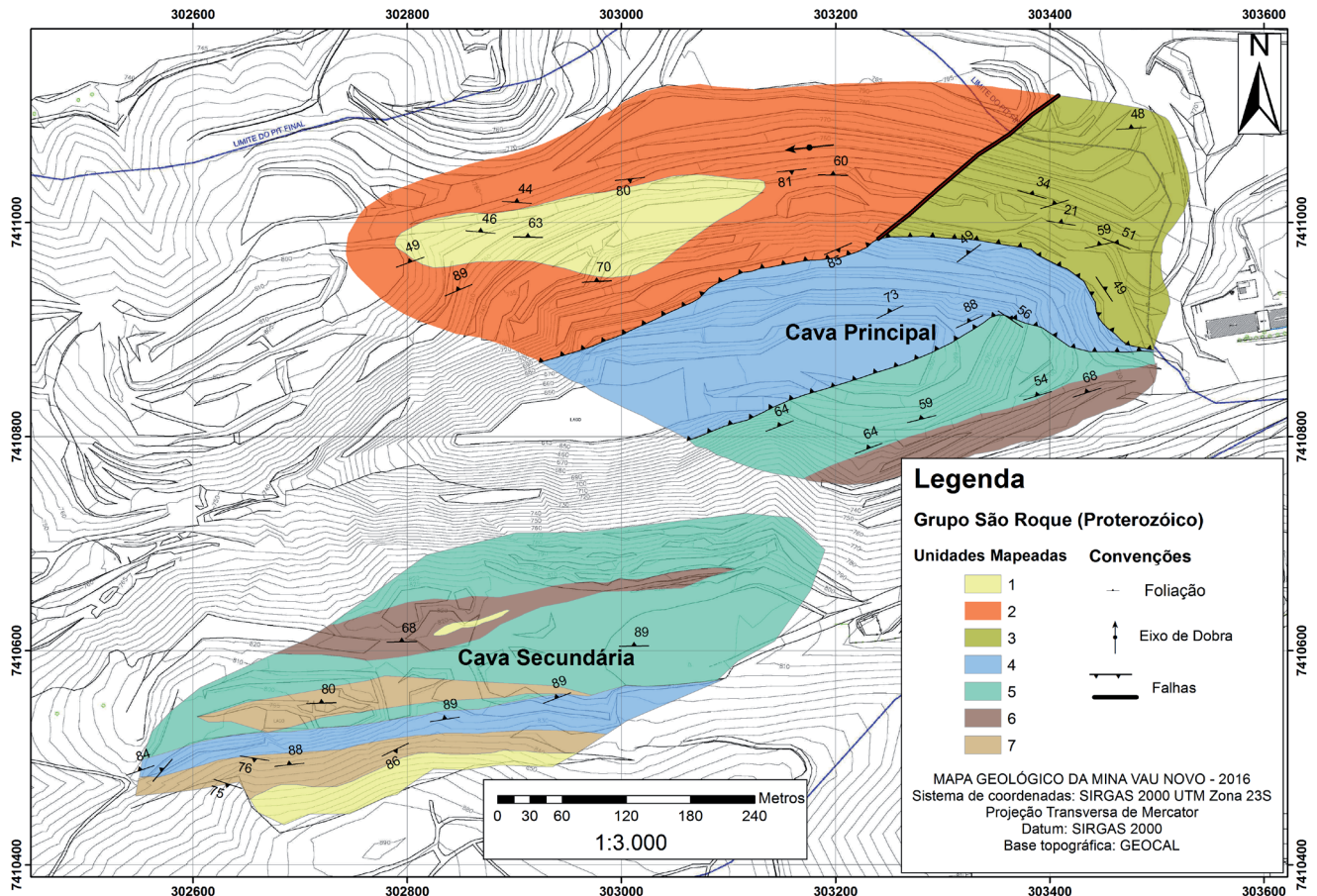


Figura 3. Mapa geológico da mina Vau Novo: 1 - Quartzito; 2 - Metarritmito; 3 - Metarenito com intercalações de metassiltito; 4 - Brecha dolomítica; 5 - Metarritmito carbonático; 6 - Metassiltito homogêneo; 7 - Metassiltito com intercalações de metarenito.

Na mina Vau Novo as rochas mapeadas apresentam estrutura geral na direção ENE-WSW, com mergulhos altos para norte, marcada pelo acamamento sedimentar paralelo a uma clivagem ardósiana ou xistosidade fina, caracterizando a foliação principal ($S_0//S_n$) (Figura 4). O acamamento é nítido principalmente nas rochas com bandamento composicional, e a xistosidade definida por minerais micáceos principalmente nas porções pelíticas, paralela ao acamamento.

O eixo central da mina do Vau Novo é condicionado por duas zonas de cisalhamento de ca-

ráter dúctil-rúptil que delimitam os contatos sul e norte da brecha dolomítica, a qual constitui o principal minério lavrado. Dobras fechadas a isoclinais, de amplitude decimétrica a decamétrica, podem ser observadas em algumas bancadas, afetando a foliação principal ($S_0//S_n$).

Ao plotar em diagrama Schmidt-Lambert os dados referentes a todos os litotipos mapeados (Figura 5), observa-se uma concentração preferencial com atitude 343/63 (rumo do mergulho / mergulho), correspondendo à atitude da foliação predominante na mina, embora haja um viés para

o metarritmico carbonático, onde foi possível coletar mais medidas e as mesmas não possuem grande variação. Os dados também sugerem o ajuste a uma guirlanda com eixo b com caimento 073/01;

esta conformação sugeriria um dobramento mais aberto da foliação principal ($S_0//S_n$), o qual é apenas observado na porção leste da cava principal, onde a foliação principal torna-se horizontal.



Figura 4. Vista geral da mina Vau Novo (Corte S-N) - Foliação principal ($S_0//S_n$) bem marcada no lado esquerdo, com mergulho para norte.

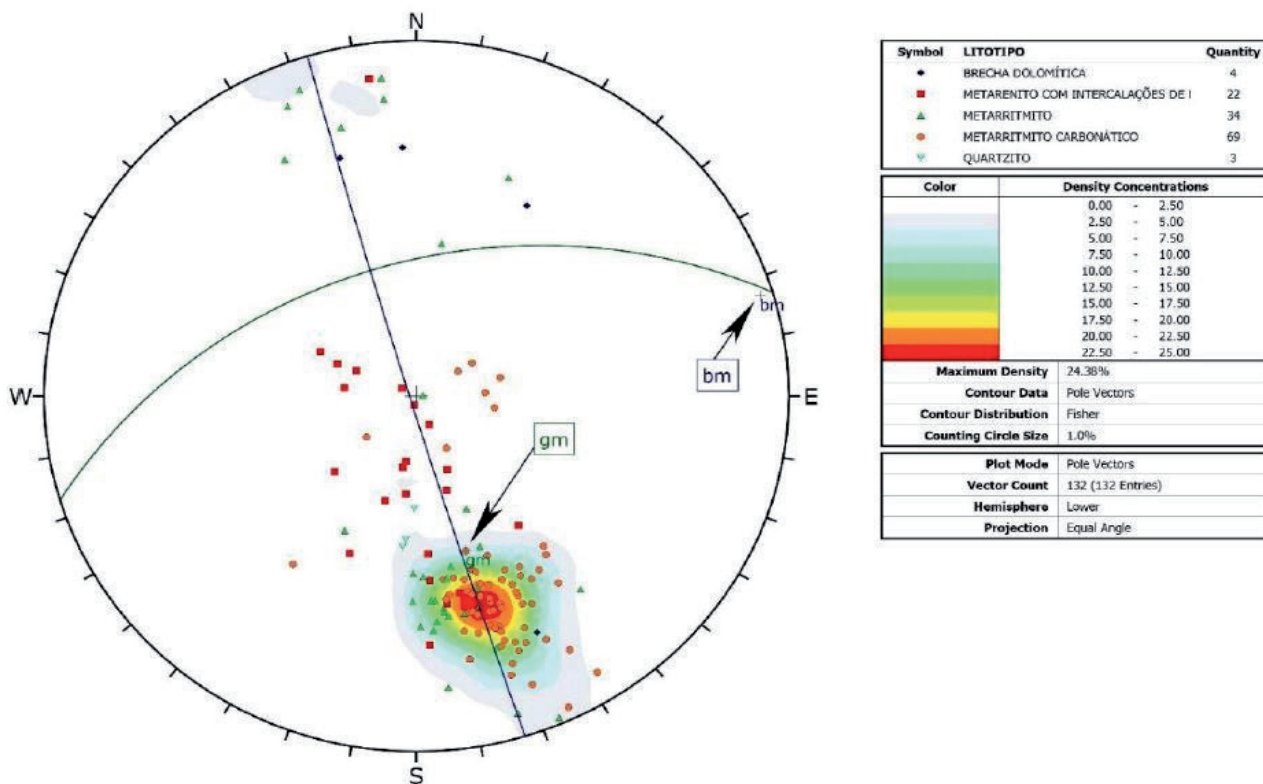


Figura 5. Polos das foliações dos litotipos mapeados. Em azul o plano com o melhor ajuste dos dados e seu eixo b inferido (bm), em verde o plano referente à média das medidas de foliação (gm). Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior.

Falhas mais tardias são também observadas, com dimensões variadas (decimétricas a decamétricas), geralmente caracterizadas por planos estriados e ondulados. O estereograma da Figura 6 mostra que as falhas tem direção preferencial ENE e mergulhos superiores a 50 graus para NNW e SSE. As estrias são em geral oblíquas com caimento para WSW. A maioria dos planos analisados não apresentavam indicadores cinemáticos confiáveis, sendo que alguns possuíam *steps* indi-

cando movimentação dextral. Uma zona de falha rúptil mais expressiva foi observada e mapeada no talude norte da cava principal. Apresenta espessura de zona deformada da ordem de 10 metros, com atitude aproximada 140/60, colocando em contato as unidades metarenito com intercalações de metassiltito e metarritmito, coalescendo-se na parte basal da cava principal com a zona de cisalhamento que limita a parte superior da brecha dolomítica.

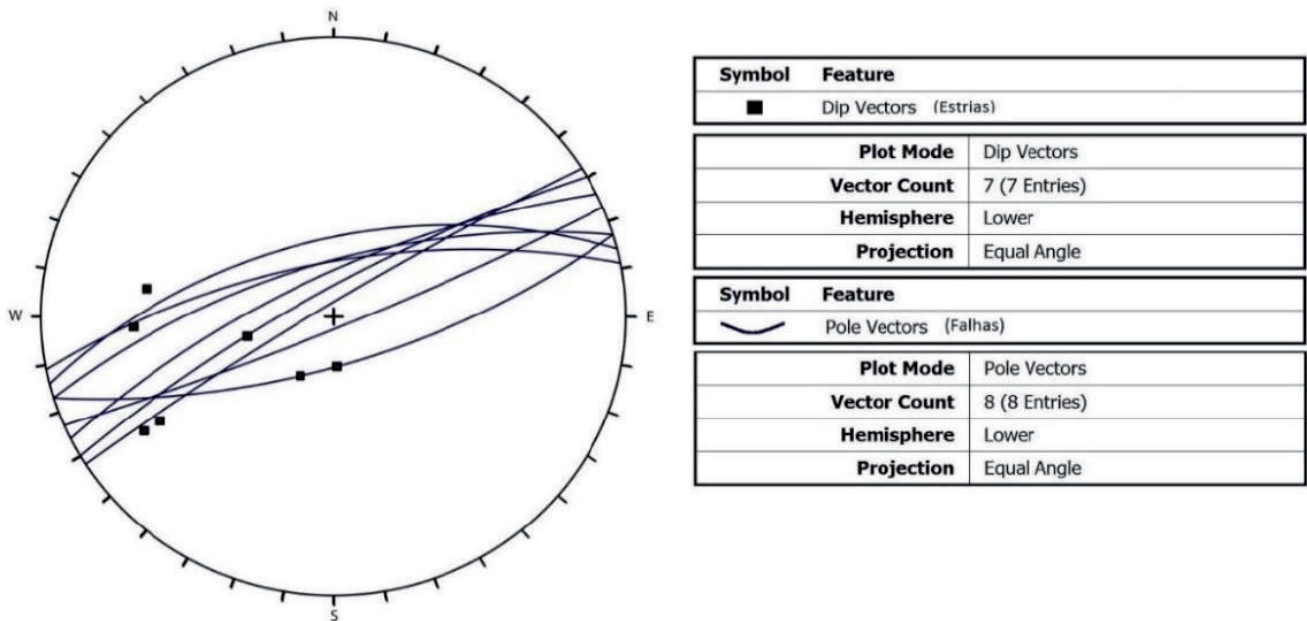


Figura 6. Estereograma com medidas de planos de falhas e estrias. Diagrama Schmidt-Lamber, hemisfério inferior.

3 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

Existem diversos sistemas de classificação de rochas desenvolvidos ao longo dos anos, desde a década de 70. Eles são uma maneira de avaliar o comportamento dos taludes de corte baseado em parâmetros estruturais e litológicos, descrevendo quantitativamente as condições do maciço rochoso (Pantelidis, 2009). Cada sistema possui características particulares e utiliza-se de diferentes parâmetros obtidos do maciço, sendo que os mais recorrentes são o espaçamento e frequência das descontinuidades, RQD (*Rock Quality Designation*) (Deere e Deere, 1989), orientação das descontinuidades, resistência da rocha, grau de alteração e presença de água.

Segundo Priest e Hudson (1981) o espaçamento médio (x) e a frequência (λ) de descontinuidades são dados pelas seguintes expressões:

$$x = \frac{L}{N}$$

$$\lambda = \frac{N}{L} = \frac{1}{x}$$

onde: L é o comprimento da linha de amostragem e N é o número total de descontinuidades que interceptam a mesma.

O espaçamento médio é uma medida estatística utilizada para a classificação geomecânica que

não leva em consideração a orientação da linha de amostragem (*scanline*). O espaçamento real entre as descontinuidades da família, como mostrado na Figura 7, pode ser calculado pela expressão:

$$S = dm \operatorname{sen} \alpha$$

Onde: *dm* é o espaçamento médio da família medido ao longo da *scanline* e α é o ângulo entre a *scanline* e a família amostrada.

O RQD é um índice de qualidade baseado na modificação da porcentagem de recuperação de testemunhos de sondagem, onde são considerados apenas os fragmentos com comprimento superior ou igual a 100 mm. Matematicamente é expresso por:

$$RQD = 100 \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{L} \%$$

Onde: *x_i* são os comprimentos dos fragmentos maiores ou iguais a 100 mm e *n* é o número destes fragmentos em um testemunho de comprimento.

Para aplicação em estudo de taludes, pode ser utilizada uma aproximação numérica para determinar o valor de um RQD “teórico” (RQD*), onde são consideradas as medidas dos espaçamentos entre as fraturas contidas em uma linha de amostragem (*scanline*). Para Deere e Deere (1989), apesar de ser impossível uma correlação direta, a mais apropriada é aquela proposta por Priest e Hudson (1976) onde o RQD* é calculado pela expressão:

$$RQD^* = 100 (\lambda t + 1) e^{-t\lambda}$$

Onde λ é a frequência de fraturas na linha de amostragem (número de fraturas dividido pelo comprimento da linha) e t é uma variável de corte que pode ser substituída por 0,1 para o cálculo do RQD* de 100 mm ou por outros valores para obter RQD* referente à fragmentos de outros comprimentos.

A resistência da rocha pode ser obtida utilizando-se o índice de compressão uniaxial (ISRM, 1978), podendo também ser estimada de acordo com propriedades físicas da rocha observadas em campo (Tabela 1).

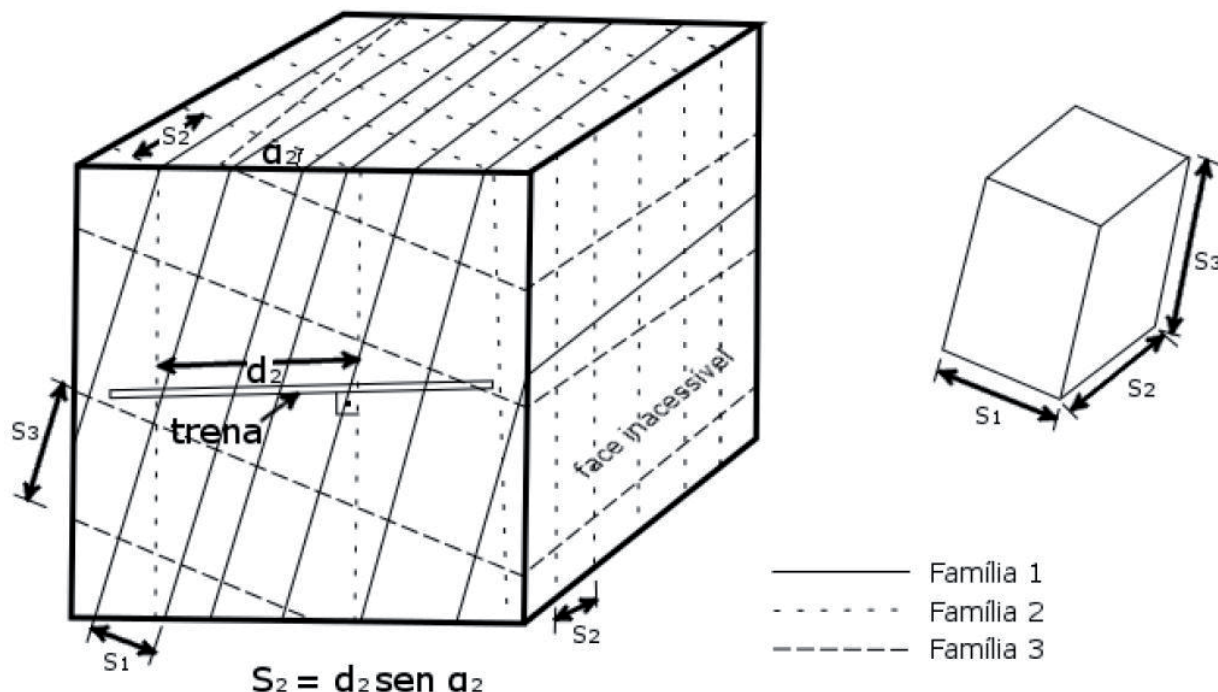


Figura 7. Exemplo para o cálculo do espaçamento real entre famílias de descontinuidades. Traduzido de IRSM (1978).

A rugosidade das paredes de uma descontinuidade é um componente essencial de sua resistência ao cisalhamento, especialmente em juntas não preenchidas, sendo quanto menor for a abertura dos planos de descontinuidade, maior será sua influência (ISRM, 1978). Este parâmetro pode ser determinado numericamente a partir de testes de inclinação nas superfícies da descontinuidade, resultando em um valor que representa o coeficiente de rugosidade da junta (JRC), apresentado no trabalho de Barton e Choubey (1977) ou por comparação com perfis esquemáticos utilizados em campo.

3.1 Sistema RMR

O Sistema RMR (*Rock Mass Rating*) (Bieniawski, 1973), originalmente desenvolvido para aplicação em túneis, é um dos mais utilizados e já passou por várias alterações, porém manteve o mesmo princípio ao longo do tempo. A classificação atual proposta por Bieniawski (1993) utiliza como parâmetros: resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, RQD, espaçamento das descontinuidades, condição das descontinuidades, presença d'água e orientação das descontinuidades.

Para sua aplicação, o maciço rochoso é dividido em regiões de características estruturais relativamente uniformes e cada região é avaliada de acordo com os parâmetros citados, sendo atribuídos pesos para a variação de cada um deles conforme mostrado na Tabela 2. Os pesos são somados resultando no valor do RMRb, onde é adicionado um fator relativo à orientação das descontinuidades, resultando no valor final do RMR. O resultado é utilizado para classificar o maciço em 5 classes diferentes: muito bom, bom, regular, pobre e muito pobre.

3.2 Sistema SMR

O valor do RMR sem o ajuste para a orientação das descontinuidades (RMRb) pode ser uti-

lizado no sistema SMR (*Slope Mass Rating*), proposto por Romana *et al.* (2003), que consiste em uma adaptação do sistema RMR para o estudo de taludes. Neste sistema é adicionado ao RMRb um ajuste referente à orientação relativa entre as descontinuidades e o talude, e outro referente ao método de escavação, segundo a equação:

$$SMR = RMRb + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

(Romana *et al.*, 2003)

onde:

- RMRb é calculado de acordo com Bieniawski (1993);
- F_1 depende do paralelismo entre as descontinuidades e a direção do talude, de acordo com a equação $F_1 = (1 - \text{sen } A)^2$, sendo A o ângulo entre a direção do talude e as descontinuidades;
- F_2 representa o ângulo de mergulho da descontinuidade no modo de ruptura planar, segundo a equação $F_2 = \text{tg}^2 B_j$, onde B_j é o ângulo de mergulho da descontinuidade. Para rupturas do tipo tombamento, o valor de F_2 é constante, igual a 1,00.
- F_3 reflete a relação entre a face do talude e o mergulho da descontinuidade. Neste caso, os pesos apresentados pela classificação RMR são mantidos. No caso de rupturas planares, este valor reflete a probabilidade de a junta aflorar na face livre.
- F_4 é o fator de ajuste para o método de escavação, determinado empiricamente.

A partir dos valores dos quatro parâmetros apresentados, é possível obter-se o valor do SMR, que assim como na classificação RMR, deve ser calculado para cada família de descontinuidades. Os valores de classificação do SMR e os fatores de ajuste são apresentados na Tabela 3.

Tabela 1. Estimativa da resistência à compressão uniaxial de rochas. Traduzido de ISRM (1978).

Grau de Resistência	Descrição	Identificação de Campo	Resistência à compressão uniaxial aproximada (MPa)
R0	Rocha extremamente branda	Pode ser endentada pela unha	0,25 - 1,0
R1	Rocha muito branda	Esmigalha-se com um golpe firme do martelo geológico, pode ser riscada pelo canivete	1,0 - 5,0
R2	Rocha branda	É riscada por canivete com dificuldade, pode ser endentada superficialmente pela ponta do martelo geológico	5,0 - 25
R3	Rocha medianamente resistente	Não pode ser riscada pelo canivete. Amostras quebram-se sob um único impacto firme do martelo geológico	25 - 50
R4	Rocha resistente	Amostras requerem mais de um golpe do martelo geológico para quebrar	50 - 100
R5	Rocha muito resistente	Amostras requerem muitos golpes firmes com o martelo geológico para quebra	100 - 250
R6	Rocha Extremamente resistente	Amostras são apenas lascadas com o martelo geológico	> 250

Tabela 2. Parâmetros e pesos relativos para classificação geomecânica no sistema RMR. Traduzido de Bieniawski (1993).

Parâmetros		Valores e Pesos Relativos				
	Índice Puntiforme	10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 Mpa	Utilizar compressão simples
Resistência da rocha intacta	Compressão Simples	250 MPa	100-250 MPA	50-100 MPa	25-50 MPa	15-25 MPa 1-15 MPa 1 MPa
	Peso Relativo	15	12	7	4	2 1 0
RQD (<i>rock quality designation</i>)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25
	Peso Relativo	20	17	13	8	3
Espaçamento de fraturas		> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm
	Peso Relativo	20	15	10	8	5
Condições das fraturas		Superfícies muito rugosas; não contínuas; fechadas; paredes duras	Superfícies pouco rugosas; abertura <1mm; paredes duras	Superfícies pouco rugosas; abertura <1mm; paredes moles	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5 mm ou abertura 1-5 mm; contínuas	Preenchimento mole > 5 mm ou abertura > 5 mm; contínuas
	Peso Relativo	30	25	20	10	0
Infiltração em 10 m de túnel		Nenhuma ou	< 10 ou	10-25 ou	25-125 ou	> 125 ou
Água Subterrânea	Relação: [pressão de água na fratura/ tensão principal máxima]	0 ou	< 0,1 ou	0,1-0,2 ou	0,2-0,5 ou	> 0,5 ou
	Condições gerais	Completamente seco	Úmido	Molhado	Água sob pressão moderada	Problemas sérios de água
	Peso Relativo	15	10	7	4	0
Ajuste para orientação das descontinuidades em taludes						
Direção e mergulho		Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável
	Peso Relativo	0	-2	-25	-50	-60
Classes do maciço rochoso						
Classe		I	II	III	IV	V
Descrição		Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito Pobre
Soma dos Pesos		100 - 81	81 - 61	60 - 41	40 - 21	20

Tabela 3. Fatores de ajuste e classes SMR. Traduzido de Romana *et al.* (2003).

Fatores de ajuste para as descontinuidades					
Caso	Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável
$P \mid \square_j - \square_{j'} \mid$					
$T \mid \left(\frac{\square_j - \square_{j'}}{180^\circ} \right) -$	$> 30^\circ$	$30 - 20^\circ$	$20 - 10^\circ$	$10 - 5^\circ$	$< 5^\circ$
$P/T \square_1$	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
$P \mid \square_j \mid$	$< 20^\circ$	$20 - 30^\circ$	$30 - 35^\circ$	$35 - 45^\circ$	$> 45^\circ$
$P \square_2$	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
$T \square_2$	1	1	1	1	1
$P \square_j - \square_{j'}$	$> 10^\circ$	$10 - 0^\circ$	0°	$0 \text{ a } -10^\circ$	$< -10^\circ$
$T \square_j + \square_{j'}$	$< 110^\circ$	$110 - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-
$P/T \square_3$	0	-6	-25	-50	-60

Onde: P, ruptura planar; T, tombamento; \square_j direção de mergulho da junta; $\square_{j'}$ direção de mergulho do talude; \square_j mergulho da junta; $\square_{j'}$ mergulho do talude.

Valores de F4 para ajuste ao método de escavação					
Método	Talude natural	Presplitting	Detonação suave	Detonação ou mecânico	Detonação deficiente
F4	+15	+10	+8	0	-8
Descrição das classes SMR					
Classe	SMR	Descrição	Estabilidade	Rupturas	Suporte
I	81 - 100	Muito bom	Completamente estável	Nenhuma	Nenhum
II	61 - 80	Bom	Estável	Alguns blocos	Ocasional
III	41 - 60	Normal	Parcialmente estável	Algumas juntas ou muitas cunhas	Sistemático
V	21 - 40	Ruim	Instável	Planar ou grandes cunhas	Importante/corretivo
V	0 - 20	Muito ruim	Completamente instável	Planares grandes ou circular	Reescavação

4 ESTABILIDADE DE TALUDES EM ROCHA

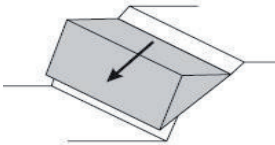
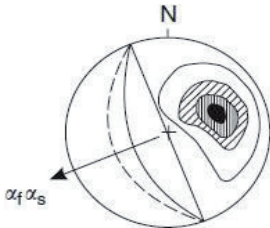
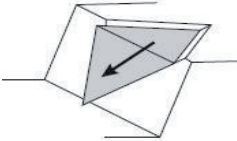
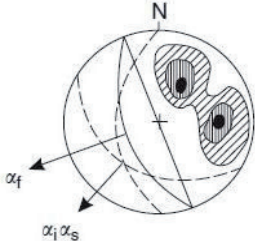
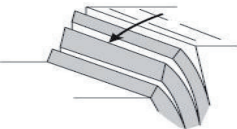
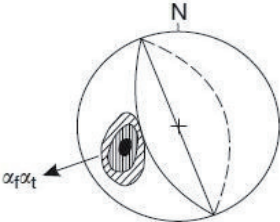
A estabilidade de taludes rochosos é fortemente influenciada pelo controle estrutural e litologia em questão, em especial as descontinuidades. Em geral as rupturas ocorrem preferencialmente ao longo destes planos de fraqueza, que podem ser estratificações, foliações, juntas e falhas. Assim, é essencial que estas descontinuidades sejam caracterizadas de forma adequada para uma análise de estabilidade confiável.

Diferentes tipos de rupturas estão associados a diferentes estruturas geológicas, podendo formar padrões de ruptura planar, em cunha, por tombamento ou circular (Wyllie e Mah, 2004). Essas rupturas podem ser reconhecidas através da análise geométrica, também conhecida como Teste de Markland (Markland, 1972), com o auxílio

de estereogramas, onde são plotadas medidas de atitude dos planos de descontinuidades e do talude (Tabela 4).

Assim, pode-se determinar a forma dos blocos gerados por intersecções de descontinuidades e a direção na qual eles podem deslizar, porém a análise permite chegar a conclusões apenas em relação à orientação, não sendo possível determinar espaçamentos, posição e dimensões. Também há possibilidade de rupturas circulares, geralmente em rochas muito alteradas, onde há grande quantidade de solo e muitas descontinuidades orientadas aleatoriamente, ou rochas muito fraturadas, que comportam-se como solos. Este tipo de ruptura não será detalhada neste trabalho uma vez que os estudos foram concentrados no maciço rochoso pouco alterado.

Tabela 4. Tipos de ruptura e condições de instabilidade. Traduzido de Wyllie e Mah (2004).

Tipo de Ruptura	Estereograma	Condições Estruturais
<p>Planar</p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Descontinuidade apresenta ângulo de mergulho menor que o do talude e direção paralela à face do talude. - Mergulho da descontinuidade maior que o ângulo de atrito.
<p>Em Cunha</p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Direção da intersecção dos planos de descontinuidade próxima da direção do mergulho do talude. - O mergulho da intersecção menor que o mergulho do talude e maior que o ângulo de atrito.
<p>Tombamento</p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Rocha resistente contendo descontinuidades com mergulho alto para dentro do talude. - Normal ao plano de tombamento com mergulho menor que a inclinação do talude e menor que o ângulo de atrito

Legenda:

 Concentração dos polos

 Grande círculo representando a face do talude

 Grande círculo representando as descontinuidades.

α_i Direção do mergulho da face do talude
 α_s Direção de deslizamento
 α_t Direção de tombamento
 α^i Direção do mergulho da linha de intersecção

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado o mapeamento dos litotipos aflorantes na mina com o objetivo de estabelecer o modelo geológico-estrutural adequado para a classificação geomecânica e análise de estabilidade de taludes. Para isso, foi utilizado como base um mapa topográfico em escala 1 : 2.000, resultante de levantamento realizado em outubro de 2015. As medidas de atitudes de camadas e das descontinuidades foram efetuadas com uma bússola COCLA em notação rumo de mergulho/mergulho e as coordenadas dos pontos de mapeamento foram obtidas com o auxílio de um aparelho GPS portátil Garmin eTrex 10.

Os dados referentes às descontinuidades foram coletados através de *scanlines* em trechos avaliados como representativos dos domínios es-

truturais. Este método consiste em colocar uma fita graduada paralela a face exposta do talude, onde são medidas as atitudes de todas as descontinuidades que a intersectam, e descritos os parâmetros necessários para classificação do maciço, como RQD*, espaçamento das descontinuidades, resistência da rocha, grau de alteração das paredes e presença de água. Os dados foram então organizados em planilhas *Excel* e lançados em projeção estereográfica, tendo suas frequências corrigidas de acordo com a orientação da linha de amostragem.

Os dados obtidos foram analisados no programa *Dips 6.0*, da empresa Rocscience. O *Dips 6.0* permite a análise cinemática através de estereogramas e a identificação dos possíveis tipos de ruptura.

6 RESULTADOS

6.1 Classificação geomecânica

A classificação geomecânica foi feita por litotipo, uma vez que foi observado em campo que as características estruturais do maciço va-

riam segundo este aspecto. Foram realizadas 5 *scanlines* na cava principal, em quatro litotipos diferentes. A escolha da localização das mesmas se deu pela facilidade de acesso nestas bancadas e por estarem em locais com pouca atividade de lavra (Figura 8).

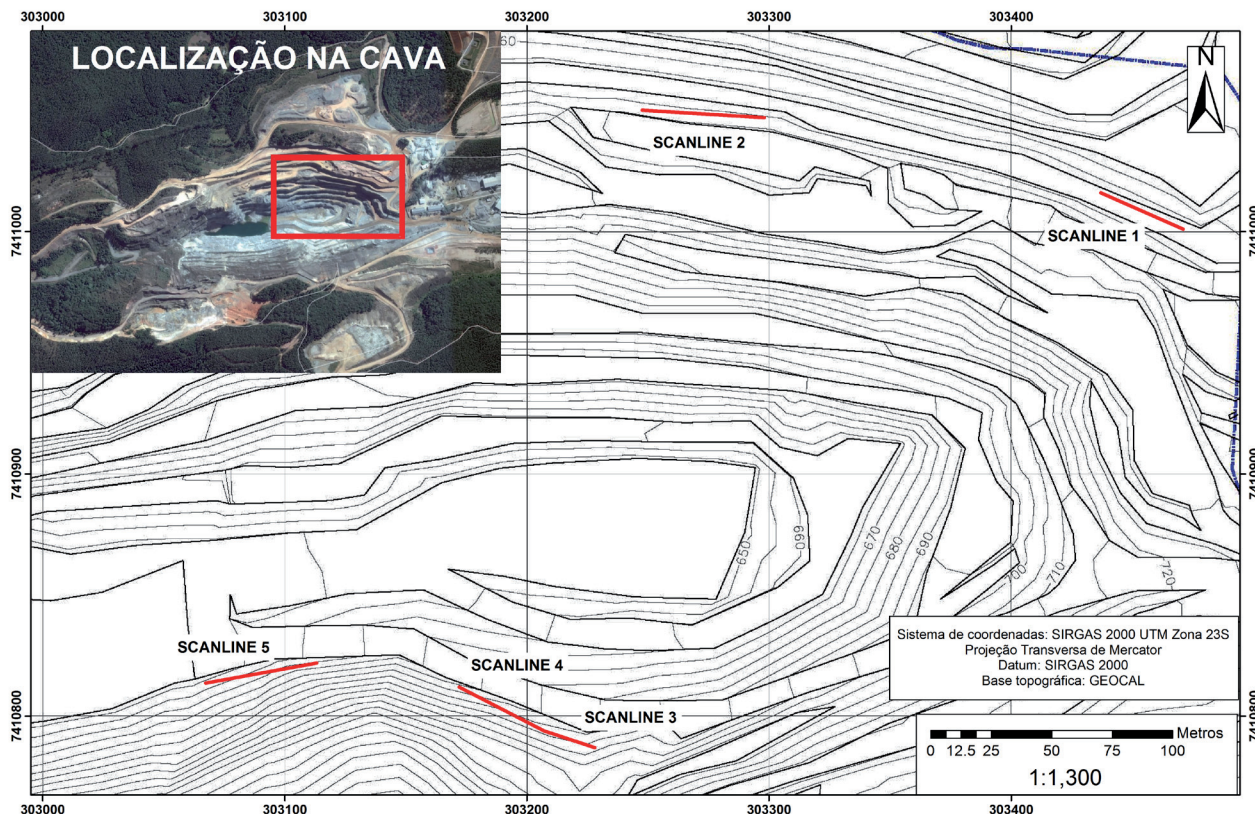


Figura 8. Localização das bancadas onde foram realizadas as *scanlines*.

6.1.1 Parâmetros para classificação

Para cada litotipo amostrado, foram calculados os pesos relativos para os parâmetros utilizados no sistema de classificação RMR e, com os resultados, aplicou-se as correções necessárias para a classificação no sistema SMR.

Os índices de resistência à compressão uniaxial foram estimados com base nas observações de campo (segundo os critérios da Tabela 1) e nos resultados de ensaios com Esclerômetro de Schmidt disponibilizados pela mineradora. Com os valores obtidos, os litotipos foram agrupados em classes, conforme os critérios sugeridos pela ISRM (1978) (Tabela 5).

Com base nos dados obtidos nas linhas de amostragem, foram calculados os parâmetros referentes à todas as famílias de descontinuidades presentes em cada *scanline*, incluindo frequência, espaçamento médio e RQD* para valores de 0,1 m, 0,3 m e 1,0 m (Tabela 6).

Em seguida, os dados foram corrigidos de acordo com a orientação das *scanlines* e projetados em diagramas de igual-área (rede de Schmidt-Lambert), definindo agrupamentos de famílias por *cluster* com raio de busca de 30°. Os parâmetros foram novamente calculados para cada família de descontinuidade, como mostra a Tabela 7.

Tabela 5. Classes de resistência à compressão uniaxial para os litotipos das *scanlines*.

Scanline	Litotipo	Resistência uniaxial da rocha intacta (MPa)	Resistência
Scanline 1	Metarenito com intercalações de metassiltito	25 - 50	R3
Scanline 2	Metarritmito	50 - 100	R4
Scanline 3 e 4	Metarritmito Carbonático	100 - 250	R5
Scanline 5	Brecha Dolomítica	100 - 250	R5

Tabela 6. Parâmetros referentes à todas as famílias de descontinuidades.

	Scanline 1	Scanline 2	Scanline 3	Scanline 4	Scanline 5
Frequência (fratura/ m)	3,232	1,015	2,047	0,976	1,060
Espaçamento médio (m)	0,309	0,985	0,488	1,024	0,943
RQD* 0,1 m (%)	95,778	99,518	98,170	99,553	99,476
RQD* 0,3 m (%)	74,697	96,204	87,341	96,463	95,898
RQD* 1,0 m (%)	16,710	79,016	39,337	74,447	71,370
Número total de dados	140	48	52	40	53

Observa-se que as *scanlines* 1, 2, 3 e 4 apresentam uma família com atitude aproximada 340/70, correspondente à foliação metamórfica predominante paralela ao acamamento ($S_0//S_n$). Este padrão não é reconhecido na Scanline 5, correspondente à brecha dolomítica, que mostra um padrão de faturamento irregular, com grande dispersão nas atitudes das descontinuidades, o que dificulta o agrupamento em famílias. Nota-se ainda que, apesar de as linhas de amostragem 3 e 4 terem sido feitas na mesmo litotipo, a primeira possui maior número de fraturas e famílias, o que pode ser explicado devido à proximidade ao contato com o metassiltito homogêneo, onde a foliação é mais intensa e marcante, ocorrendo também uma zona cisalhada no maciço.

As informações coletadas em campo mostraram que as descontinuidades de todas as *scanlines*

apresentam algumas características semelhantes: são consideradas fechadas, com abertura inferior a 2,5 mm, paredes duras, lisas a pouco rugosas, predominantemente sem preenchimento. Na unidade do metarenito com intercalações de metassiltito e no metarritmito há veios de quartzo milimétricos, porém sem representatividade suficiente para afetar a classificação geomecânica.

Em relação aos aspectos hidrogeológicos, não foi constatada a presença de nenhuma surgência de água nas faces dos taludes estudados. Para este trabalho não foi realizado monitoramento do nível d'água subterrâneo, assim, para efeito de classificação, foi considerado que o maciço encontra-se completamente seco. Ressalte-se que os levantamentos foram feitos essencialmente em época de estiagem.

Tabela 7. Parâmetros calculados para cada família de descontinuidade.

	Scanline 1					Scanline 2					Scanline 3					Scanline 4					Scanline 5				
Atitude do Talude (Dip/Dipin)	202/41					187/41					023/64					023/64					339/65				
Família	Sn	F1A	F1B	F1C	F1D	Sn	F2A	F2B	Sn	F3A	F3B	F3C	Sn	F4A	F4A	F5A	F5B	F5C	F5D						
Atitude média (Dip/Dipin)	312/71	270/82	331/05	176/89	225/73	347/67	161/73	251/70	341/70	075/72	031/14	195/64	340/60	029/75	016/80	052/90	304/65	098/82							
Frequência (fraturas/ m)	0,375	1,422	0,474	0,867	0,237	0,451	0,365	0,368	1,168	0,518	0,404	0,242	0,611	0,300	0,236	0,301	0,213	0,134							
Espaçamento médio (m)	2,665	0,703	2,111	1,154	4,221	2,219	2,741	2,720	0,856	1,931	2,474	4,135	1,637	3,337	4,236	3,326	4,701	7,442							
RQD* 0,1 m (%)	99,931	99,079	99,891	99,645	99,972	99,901	99,935	99,934	99,369	99,870	99,920	99,971	99,821	99,956	99,973	99,956	99,978	99,991							
RQD* 0,3 m (%)	99,412	93,114	99,081	97,153	99,759	99,164	99,443	99,435	95,123	98,911	99,321	99,749	98,513	99,620	99,761	99,617	99,805	99,921							
RQD* 1,0 m (%)	94,496	58,412	91,767	78,468	97,600	92,437	94,764	94,691	67,424	90,434	93,731	97,507	87,457	96,314	97,616	96,921	98,034	99,175							
Persistência	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	1-3 m	< 1 m	< 1 m	1-3 m	1-3 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m						
Número de dados	12	56	18	33	9	19	14	11	29	9	8	4	24	11	11	14	10	10	6						

6.1.2 Sistema RMR

Como proposto em ambos os sistemas de classificação, decidiu-se utilizar as famílias de descontinuidades com características mais desfavoráveis para a qualidade do maciço. As mesmas foram escolhidas com base na análise de estabilidade,

utilizando a família mais propícia para rupturas. Para efeito de classificação, foi considerada a atitude do talude onde as *scanlines* foram realizadas. Após o cálculo de todos os parâmetros necessários, foi atribuído o peso relativo proposto por Bieniawski (1993) para a família que define pior qualidade para cada *scanline* (Tabela 8).

Tabela 8. Pesos relativos para a classificação no sistema RMR.

Parâmetro	Scanline 1	Scanline 2	Scanline 3	Scanline 4	Scanline 5
Atitude do Talude	202/41	187/41	203/64	203/64	339/65
Atitude da Família	270/82	347/67	341/70	340/60	304/65
Resistência da rocha intacta	4	7	12	12	12
RQD* (<i>rock quality designation</i>)	20	20	20	20	20
Espaçamento médio de fraturas	15	20	15	20	20
Condições das fraturas	25	25	25	25	25
Água Subterrânea	15	15	15	15	15
RMRb	79	87	87	92	92
Ajuste para orientação das descontinuidades	-2	-25	-2	-2	-2
Total	77	62	85	90	90
Classificação	Bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom

Por se tratar de um parâmetro qualitativo e designado originalmente para túneis, o ajuste para a orientação das descontinuidades é de difícil aplicação neste estudo. Decidiu-se então basear o peso do parâmetro nos fatores de segurança obtidos com a análise de estabilidade, onde o metarritmo apresentou os piores resultados.

O resultado final mostra que o maciço encontra-se nas classes Bom e Muito Bom segundo a classificação RMR. É possível ainda observar uma correlação entre a qualidade do maciço e a profundidade das bancadas, com considerável

melhoria nas bancadas inferiores, onde as rochas encontram-se menos alteradas e mais resistentes.

6.1.3 Sistema SMR

A classificação no Sistema SMR foi feita com base no valor RMRb, utilizando as correções propostas por Romana *et al.* (2003) de acordo com as orientações das descontinuidades mais desfavoráveis para a qualidade do maciço. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Pesos relativos para classificação no sistema SMR.

Fator de Correção	Scanline 1	Scanline 2	Scanline 3	Scanline 4	Scanline 5
Atitude do Talude	202/41	187/41	203/64	203/64	339/65
Atitude da Família	270/82	347/67	341/70	340/60	304/65
F1 <i>Planar</i>	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
F1 <i>Tombamento</i>	0,15	0,40	0,15	0,15	0,15
F2 <i>Planar</i>	1	1	1	1	1
F2 <i>Tombamento</i>	0	0	-6	-50	0
F3 <i>Planar</i>	-25	0	-25	-25	-25
F3 <i>Tombamento</i>	-25	0	-25	-25	-25
(F1 x F2 x F3)	-3,75	0	-3,75	-7,5	-3,75
F4	0	0	0	0	0
RMRb	79	87	87	92	92
Total	75,25	87	83,25	84,5	88,25
Classificação	Bom	Muito Bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom

Dentro da classificação SMR o maciço também se enquadrava nas classes Bom e Muito Bom, com pouca probabilidade de rupturas, sendo mais provável que aconteça tombamento. Esta classificação, no entanto, não avalia a possibilidade de rupturas em cunha.

6.2 Análise de estabilidade de taludes

Assim como a classificação geomecânica, a análise de estabilidade de taludes também foi realizada para cada litotipo. Como os dados das *scanlines* 3 e 4 foram amostrados no metarritmito carbonático, os mesmos foram agrupados para a análise de estabilidade, sendo consideradas as famílias mais representativas de cada *scanline*.

Para a análise de estabilidade na cava atual foram consideradas 8 orientações de taludes glo-

bais e de bancada, obtidas através do mapa topográfico utilizado no mapeamento geológico-estrutural. Já para a geometria da cava final, foram consideradas as 5 atitudes dos taludes globais previstos no projeto da mina Vau Novo.

Tabela 10. Ângulos de atrito utilizados na análise de estabilidade para cada litotipo obtidos através de ensaios.

Litotipo	Ângulo de atrito (ϕ)
Metarenito com intercalações de metassiltito (Mta)	39,44
Metarritmito (Mtr)	24,69
Metarritmito Carbonático (Mrc)	40,19
Brecha Dolomítica (Dol)	35,34

Tabela 11. Orientações dos taludes da cava atual e as orientações previstas para a cava final utilizadas nas análises de estabilidade.

Talude	Cava atual		Talude	Cava Final	
	DipDir	Dip		DipDir	Dip
T1A	000	70	T1F	162	41
T2A	015	65	T2F	214	41
T3A	086	30	T3F	352	41
T4A	143	56	T4F	332	41
T5A	180	40	T5F	067	41
T6A	210	40			
T7A	255	50			
T8A	340	65			

Nas Tabelas 12 e 13 são apresentados os resultados da análise cinemática para a cava atual e a cava final, respectivamente. Em cada orientação de talude considerada, foi feita a análise para todos os litotipos amostrados nas *scanlines* em

relação aos mecanismos de ruptura planar, em cunha e tombamento.

Os taludes T3A, T5A e T6A da cava atual, não apresentaram potencial de ruptura para nenhum dos litotipos amostrados.

Tabela 12. Análise cinemática para orientações de talude da cava atual, mostrando número de ocorrência e famílias de descontinuidade envolvidas nos mecanismos de ruptura.

Talude	Litotipo	Planar	Estruturas	Cunha	Estruturas	Tombamento	Estruturas
T1A	Mta	0	-	1	F1A x Sn	1	F1C
	Mtr	1	Sn	2	F2B x Sn ; F2A x Sn	1	F2A
	Mrc	1	Sn	1	Sn x F4A	1	F3C
	Dol	1	F5A	2	F5B x F5C; F5C x F5D	1	F5A
T2A	Mta	0	-	1	F1A x Sn	2	F1C ; F1D
	Mtr	1	Sn	0	-	0	-
	Mrc	2	Sn; F4A	1	Sn x F4A	1	F3C
	Dol	1	F5A	1	F5C x F5D	1	F5A
T4A	Mta	0	-	0	-	1	Sn
	Mtr	0	-	0	-	0	-
	Mrc	0	-	0	-	1	Sn
	Dol	0	-	0	-	0	-
T7A	Mta	0	-	0	-	1	F1A
	Mtr	0	-	0	-	0	-
	Mrc	0	-	1	Sn x F3C	0	-
	Dol	0	-	0	-	0	-
T8A	Mta	1	Sn	1	F1A x Sn	1	F1C
	Mtr	1	Sn	1	Sn x F2B	1	F2A
	Mrc	1	Sn	1	Sn x F4A	0	-
	Dol	0	-	2	F5B x F5C; F5C x F5D	0	-

Tabela 13. Análise cinemática para orientações de taludes da cava final, mostrando número de ocorrência e famílias de descontinuidade envolvidas nos mecanismos de ruptura

Talude	Litotipo	Planar	Estruturas	Cunha	Estruturas	Tombamento	Estruturas
T1F	Mta	0	-	0	-	1	F1C
	Mtr	0	-	0	-	0	-
	Mrc	0	-	0	-	0	-
	Dol	0	-	0	-	0	-
T2F	Mta	0	-	0	-	0	-
	Mtr	0	-	0	-	0	-
	Mrc	0	-	0	-	0	-
	Dol	0	-	0	-	1	F5A
T3F	Mta	0	-	0	-	1	F1C
	Mtr	0	-	0	-	1	F2A
	Mrc	0	-	0	-	0	-
	Dol	0	-	1	F5C x F5D	0	-
T4F	Mta	0	-	0	-	0	-
	Mtr	0	-	0	-	0	F2A
	Mrc	0	-	0	-	0	-
	Dol	0	-	0	-	0	-
T5F	Mta	0	-	0	-	1	F1A
	Mtr	0	-	0	-	1	F2B
	Mrc	0	-	0	-	0	-
	Dol	0	-	0	-	1	F5B

Ressalta-se que esta análise com base na determinação estatística da atitude média das famílias principais de descontinuidades possui algumas restrições. Uma ou duas estruturas de maior persistência, eventualmente negligenciadas na análise estatística, desde que com as orientações adequadas, podem ser responsáveis por rupturas maiores do maciço rochoso. A presença de água nas descontinuidades, que não foi observada durante o levantamento, aumentaria a instabilidade do maciço, refletindo nos índices das classificações geomecânicas e diminuindo o ângulo de crítico de estabilidade nas avaliações das rupturas planares e em cunha.

7 CONCLUSÕES

A principal proposta deste trabalho foi abordar os parâmetros geotécnicos relevantes para a classificação geomecânica e análise de estabilidade de taludes, correlacionando-os com os aspectos geológicos. Desta forma, o mapeamento inicial foi de suma importância não só para o reconhecimento da Geologia e estruturação local, mas também para identificar os problemas relacionados à estabilidade, assim como as dificuldades para utilizar a metodologia escolhida.

O modelo geológico mostrou o forte controle estrutural presente na mina Vau Novo, levando a escolha da amostragem por litotipo, uma vez que os mesmos apresentam padrões próprios de fraturamento e deformação.

Os sistemas de classificação geomecânica escolhidos apresentaram resultados satisfatórios, sendo o sistema SMR considerado mais adequado para estudos envolvendo análise de estabilidade de taludes. Nos dois sistemas utilizados os maciços se enquadraram nas classes bom e muito bom, com pouca discrepância quando comparados os resultados finais.

A análise cinemática permitiu identificar que os maiores problemas em relação à estabilidade estão relacionados com a foliação principal das rochas e com os taludes com atitudes aproximadas à desta foliação. Dentre os mecanismos de ruptura observados, os mais recorrentes são por cunha e tombamento, condizente com os aspectos observados em campo. Na cava principal os maiores problemas estão nas regiões onde aflora o

metarritmito, provavelmente devido às condições de alteração do mesmo, também constatadas na classificação geomecânica.

REFERÊNCIAS

Almeida, F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck, R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces: An Introduction.

Earth-Science Reviews, 17(1/2): 1-29.

Barton, N.R. e Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mech. 10(1-2), 1-54.

Bergmann, M. 1988. Caracterização Estratigráfica e Estrutural da Sequência Vulcano-Sedimentar do Grupo São Roque, na região de Pirapora do Bom Jesus - SP. (Dissertação) Mestrado. São Paulo: Instituto de Geociências - USP.

Bieniawski Z.T. 1973. Engineering classification of rock masses. Trans S. Afr. Inst. Civ. Eng., 15:335-44. Bieniawski, Z. T. 1993. Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. In:

Hudson, J.A. Comprehensive rock engineering. Londres: Pergamon Press (v. 3, p. 553-573).

Bistrichi C.A. 1982. Geologia do Sinclínório de Pirapora, SP. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 92 p.

Deere D.U. e Deere D.W. 1989. Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years. US Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station, 100 p.

Google Earth Pro 2016. Google Earth™, serviço de mapas.

Hasui Y., Penalva F., Hennies W.T. 1969. Geologia do Grupo São Roque. In: 23 CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Salvador. Anais... Salvador, p. 101-134.

Henrique-Pinto R., Janasi V.A., Vasconcellos A.C.B.C., Sawyer E.W., Barnes S.-J., Basei M.A.S., Tassinari

- C.C.G. 2015. Zircon provenance in meta-sandstones of the São Roque Domain: Implications for the Proterozoic evolution of the Ribeira Belt, SE Brazil. *Precambrian Research*, 256: 271-288.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences* 15: 319-368.
- Juliani C., Beljavskis P., Schorscher H.D. 1986. Petrogênese do vulcanismo e aspectos metalogenéticos associados: Grupo Serra do Itaberaba na região de São Roque (SP). In: 34 Congresso Brasileiro de Geologia, Goiânia. *Anais... Goiânia*, v.02, p.730-750.
- Markland, J. T. 1972. An useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. *Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 19*, 10 pp.
- Oliveira E.P. 1925. *Analyses de Calcários*. Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil. Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio. *Boletim* 10: 1-45.
- Pantelidis, L. 2009. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46: 315-325.
- Priest S.D. e Hudson J.A. 1976. Discontinuity Spacings in Rock. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 13: 135-148.
- Priest S.D. e Hudson J.A. 1981. Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys. *Int. J. of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18: 183-197.
- Romana, M., Serón, J. B., Montalar, E. 2003. SMR geomechanics classification: application, experience and validation. In: *Proceedings of the international symposium on role of rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy. P.1-4.
- Wyllie, D. C., Mah, C. W. 2004. *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. Londres: Spon Press, 456

ESTIMATIVA DE RESERVAS DO AQUÍFERO UTIARITI NO MUNICÍPIO DE SINOP – MT

ESTIMATION OF UTIARITI AQUIFER RESERVATIONS IN THE MUNICIPALITY OF SINOP – MT

THEO BAJGIELMAN AYRES

Geol., Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil, E-mail: geologia.theo@gmail.com

RENATO BLAT MIGLIORINI

Geol., Dr, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil, E-mail: rena@ufmt.br

PAULO HENRIQUE MADUREIRA OGANDO

Geol., Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil, E-mail: ogandoph@gmail.com

RESUMO ABSTRACT

Com a finalidade de contribuir com a gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Aquífero Utiariti no município de Sinop - MT, este trabalho teve por objetivo estimar suas reservas renovável, permanente e explorável. É importante destacar que a cidade tem sua economia voltada ao agronegócio e é abastecida exclusivamente por águas subterrâneas. Após as pesquisas bibliográficas sobre o meio físico iniciaram os trabalhos de campo, que consistiram nas medidas da variação do nível estático dos poços tubulares profundos e na coleta de amostras de solo. As amostras foram enviadas ao laboratório, onde foram realizados os ensaios de porosidade seguindo o manual da EMBRAPA (1997). Por fim, as reservas foram estimadas seguindo a metodologia proposta por Feitosa *et al.* (2008). A variação do nível estático entre o auge do período chuvoso até a estiagem do ano de 2015 foi de 4,6 m. Os solos da região possuem 57,38% de porosidade total, 36,75% de porosidade específica e 19,48% de porosidade efetiva. Os valores de reservas para o Aquífero Utiariti no município de Sinop foram estimadas em $3,53 \times 10^9 \text{m}^3$ de reserva renovável, $5,48 \times 10^9 \text{m}^3$ de reserva permanente e $1,175 \times 10^9 \text{m}^3$ de reserva explorável.

Palavras-chave: Sinop; Aquífero Utiariti; Reservas; Disponibilidade.

In order to contribute to the management of the underground water resources of the Utiariti Aquifer in the municipality of Sinop - MT, this work aimed to estimate its renewable, permanent and exploitable reserves. It is important to emphasize that the city has its economy focused on agribusiness and is supplied exclusively by groundwater. The work began with the bibliographical research on the physical environment. After the fieldwork, which consisted of the measurements of the static level of the deep tubular wells and the collection of soil samples, these were sent to the laboratory, where the porosity tests were carried out following the EMBRAPA manual (1997). Finally, the reserves were estimated based on Feitosa *et al.* (2008) and interpreted in an office. The static level variation between the peak of the rainy season and the drought of 2015 was 4.6 m. The soils of the region have 57.38% of total porosity, 36.75% of specific porosity and 19.48% of effective porosity. The values of reserves for the Utiariti Aquifer in the municipality of Sinop were estimated to be $3,53 \times 10^9 \text{m}^3$ of renewable reserve, $5,48 \times 10^9 \text{m}^3$ of permanent reserve and $1,175 \times 10^9 \text{m}^3$ of exploitable reserve.

Keywords: Parecis basin, Utiariti aquifer, Reserves estimation.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento das cidades e a expansão populacional, a necessidade de água, tanto em quantidade como em qualidade, torna-se desafio cotidiano. Nesse sentido, a água subterrânea é uma alternativa viável e cada vez mais utilizada.

Segundo dados da UNESCO (2011), mais de 40% da população mundial depende de água subterrânea para sobreviver, e aproximadamente 50% da água utilizada para a produção alimentícia é proveniente dessa fonte.

O município de Sinop, no Estado do Mato Grosso, não conta com rios propícios para o abastecimento público e segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2010), a cidade é abastecida somente por águas subterrâneas.

A região tem como principais aquíferos o Utiariti e o Salto das Nuvens. Ambos são aquíferos do tipo livre em meio poroso, e sendo a economia de Sinop controlada principalmente pelo

agronegócio, existe a constante preocupação com a qualidade e com a quantidade das águas desses aquíferos.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi estimar a reserva renovável, a permanente e a explorável do Aquífero Utiariti no município de Sinop - MT.

2 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS DO MEIO FÍSICO

O município de Sinop dista, aproximadamente, 500 km de Cuiabá, capital do Estado de Mato Grosso. Segundo o IBGE (2016) a cidade tem em torno de 132.934 habitantes, 3.942,229 km² de território e localiza-se no Centro-norte do Estado (Figura 1). A partir de Cuiabá, o acesso, por via rodoviária, pode ser feito pelas rodovias BR070, BR163 e BR364, além da opção de acesso via aérea pelo Aeroporto Municipal Presidente João Figueiredo.

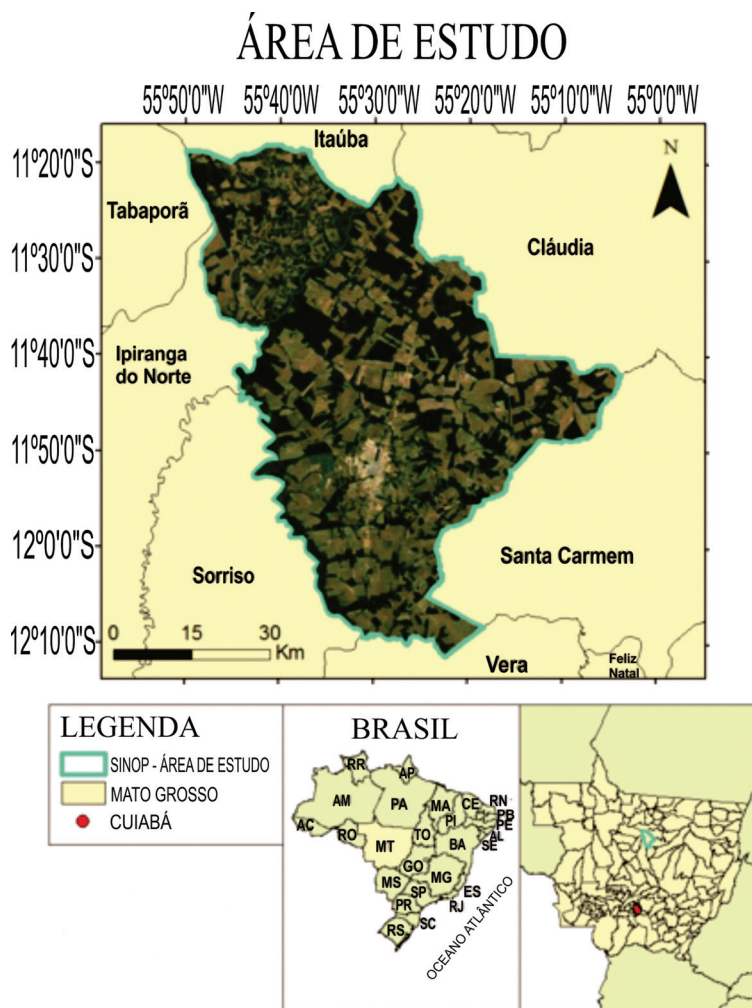


Figura 1. Localização da área de estudo.

A região está inserida na unidade climática equatorial úmida e quente, com estação de estiagem e estação úmida bem definidas. O período chuvoso se concentra nos meses de verão e o regime de estiagem ocorre no inverno. A pluviosidade média anual é de 2.500 mm e a temperatura média anual é de 24,2°C (SEPLAN, 2007).

No Estado de Mato Grosso existem três ecossistemas principais: o Pantanal, o Cerrado e a Floresta Amazônica, representando respectivamente 10 %, 40 % e 50 % da área do Estado (Coutinho, 2005). A região de Sinop se encontra na zona de transição entre os ecossistemas de Cerrado e Floresta Amazônica.

Sinop está inserida na Bacia Hidrográfica Amazônica, mais precisamente na Bacia do Rio Telles Pires, que tem como afluentes o Curupi, Rio Quente, Caibis, Azul e Ribeirão Preto. Está inserida na sub-bacia Hidrográfica do Rio Tapajós. Os principais córregos urbanos da cidade de Sinop são: Nilsa, Isa, Marlene, Nádia e Curupi (Comeli, 2011).

Com relevo plano e suavemente ondulado, predomina na paisagem o Latossolo vermelho escuro distrófico de textura argilosa. Ocorrem também os Latossolos vermelho-amarelos distrófico, com textura argilosa. Esses solos apresentam baixa fertilidade natural e uma elevada saturação em alumínio (Oliveira *et al.*, 1982).

Nas cotas topográficas mais baixas e menos conservadas, o solo é o Neossoloquartzarênico, constituído de material mineral, com textura areia ou areia franca em todos os horizontes. O solo é essencialmente quartzoso, com frações de areias grossas e areia fina, 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala, e quase não há presença de minerais alteráveis, menos resistentes ao intemperismo (Oliveira *et al.*, 1982).

A cobertura geomorfológica é denominada Planalto dos Parecis e compreende um extenso conjunto de relevos caracterizados por feições distintas, esculpidas nas rochas do Grupo Parecis. A primeira feição é uma vasta superfície composta por relevos dissecados do qual emerge uma superfície mais alta, já a segunda feição é mais conservada (Ross & Santos, 1982).

A Chapada dos Parecis compreende a subunidade mais elevada acima de 550 m, a Norte o contato é com a subunidade Planalto Dissecado

dos Parecis, através de espigões delimitados por escarpas que avançam para o Norte, separando os corredores rebaixados, que também se abrem na mesma direção e pertencem ao Planalto. Alguns dos limites são com superfície ligeiramente mais rebaixada. No topo dessa chapada existem alguns rios que drenam esse topo. São eles os rios: Juruema, Papagaio, Juína, Verde, Formiga, Camaré, Buriti e do Sangue. Todos esses se voltam para o Norte e fazem parte da Bacia Juruema-Telles Pires (Ross & Santos, 1982).

O Planalto Dissecado dos Parecis constitui a subunidade mais extensa e expressiva dentro da unidade geomorfológica Planalto dos Parecis. A principal característica deste é a continuidade e a relativa homogeneidade com predominância de formas dissecadas tabulares (Ross & Santos, 1982).

A área de estudo está situada na parte Central-Norte da Bacia Sedimentar do Parecis, uma das maiores bacias intracratônicas do Brasil. Localiza-se na região Centro-Oeste (Figura 2), entre as bacias do Solimões, Alto Tapajós e Paraná, na região “foreland” da Cordilheira dos Andes. Situa-se na porção Sudoeste do Cráton Amazônico e estende-se em direção W-E, abrangendo cerca de 500.000 km², nos Estados de Rondônia e Mato Grosso. Constitui pacote com aproximadamente 6.000 m de sedimentos Paleozoicos, Mesozoicos e Cenozoicos de composição essencialmente silici-clástica (Bahia, 2007).



Figura 2. Mapa de situação da Bacia do Parecis. Fonte: Modificado de Bahia (2007)

O embasamento dessa bacia é constituído de rochas do Cráton Amazônico. Compreendem rochas de alto e baixo grau metamórfico, rochas metassedimentares, bem como rochas intrusivas (Bahia, 2007).

Siqueira (1989) classifica a bacia como intracontinental de fratura, evoluindo posteriormente para o tipo Interior Sag. Sua formação deu-se inicialmente por esforços de tensões que afetaram as rochas do Cráton Amazônico e com isso culminaram com as subsidências.

A Bacia do Parecis compreende as formações: Cacoal, Furnas, Ponta Grossa, Pimenta Bueno, Fazenda da Casa Branca, Anari, Rio Ávila, Salto das Nuvens, Utiariti e Ronuro, porém, segundo Bahia (2007), a região de Sinop está inserida no contexto geológico do Grupo Parecis (formações Salto das Nuvens e Utiariti), e também compreende as formações Rio Ávila e Ronuro (Figura 3).

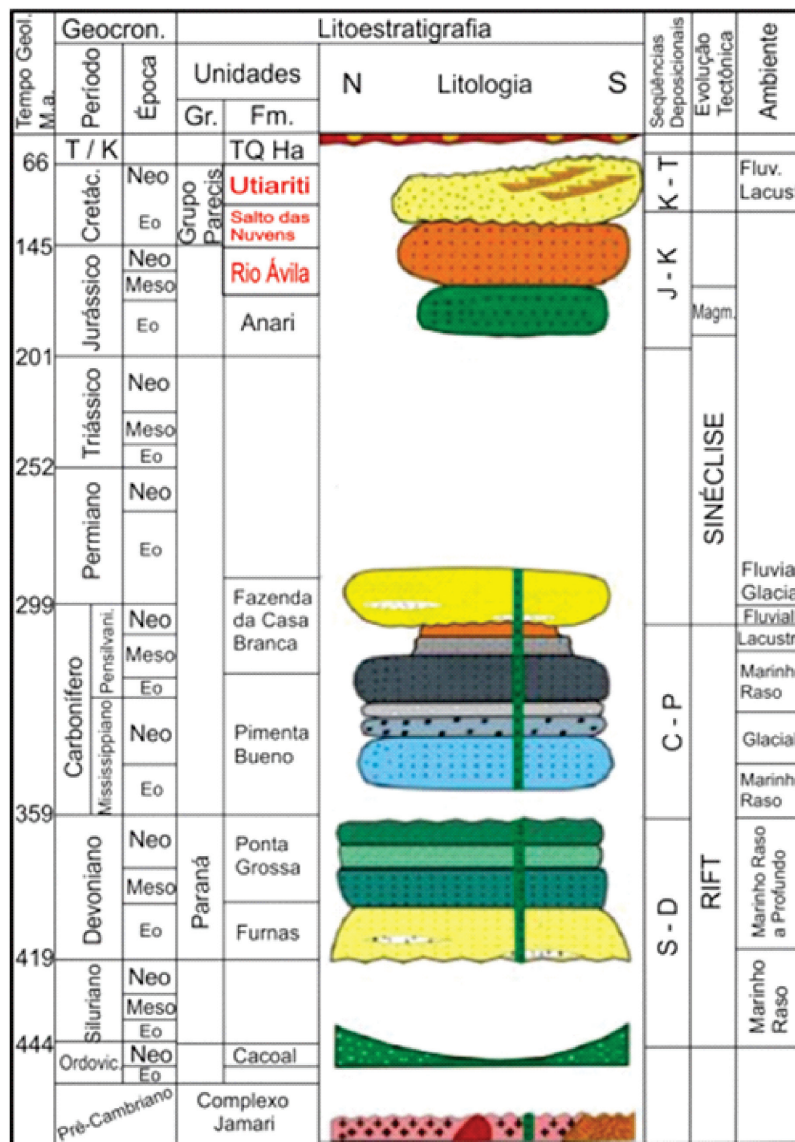


Figura 3. Coluna estratigráfica da Bacia do Parecis.

Fonte: Modificado de Bahia (2007)

Formação Rio Ávila ocorre a Norte de General Carneiro, no Vale do Rio Culune e a Noroeste de Vilhena é limitada por falhas, aflorando em escarpas, evidenciando os arenitos bimodais, cor de rosa, de granulometria fina à média, com es-

tratificação cruzada tabular de grande porte, bem selecionados e arredondados (Bahia, 2007).

Na Bacia do Parecis a Formação Rio Ávila tem evidências de origem eólica. Ribeiro Filho *et al.* (1975) interpreta o acamamento cruzado

como eólico. Isso foi confirmado com base nas observações feitas a Noroeste de Vilhena, onde é observado o arenito com estratificações cruzadas de grande porte e bimodalidade dos grãos.

O contato inferior é com a Formação Ponta Grossa ao Norte de General Carneiro, já o contato superior se dá com sedimentos Cenozoicos e com o Grupo Parecis. A espessura da Formação Rio Ávila é em torno de 90 m (Siqueira, 1989).

O Grupo Parecis ocorre a Sudoeste da Bacia do Parecis e é constituído por conglomerados, arenitos e pelitos (Bahia, 2007).

Segundo Barros *et al.* (1982) o Grupo Parecis é dividido em duas formações, a Formação Salto das Nuvens para a porção inferior e Formação Utiariti para a porção superior. A Formação Salto das Nuvens foi criada para designar os conglomerados petromíticos de matriz argilo-arenosa intercalados por lentes de arenitos vermelhos de granulometria variável desde muito fina a conglomerática. Sobreposto aos conglomerados ocorre um arenito imaturo com estratificação cruzada de médio porte, contendo seixos e calhaus de diversos litotipos. Também ocorrem camadas de arenitos bimodais, maciços, de espessura variável, intercalado com

lentes de argila vermelha. No topo desta sequência é comum o arenito bimodal estar bem laminado e com estratificação cruzada de grande porte. O ambiente deposicional é continental fluvial de semiaridez, com manifestações desérticas esporádicas em algumas seções da unidade.

Barros *et al.* (1982) denominou de Formação Utiariti, correspondendo as cotas mais altas do planalto. Os arenitos desta unidade ocorrem nas corredeiras do Rio Papagaio, tendo um contato gradativo com as unidades inferiores. As rochas são de cores variadas: amarela, roxa a avermelhada, compostas essencialmente de quartzo e feldspato. São rochas maciças, ou localmente apresentando estratificação plano-paralela ou cruzada de pequeno porte. A granulometria varia de fina à média, com ocorrência de seixos nas porções mais basais. Ainda de acordo com Barros *et al.* (1982), na sequência intermediária, o arenito apresenta inúmeros canais preenchidos por conglomerados, com mais de 7 m de largura e 1 m de profundidade. No topo da sequência, argilito e arenito argiloso exibem intercalações lateralmente persistentes de arenitos com estratificações cruzadas de grande porte (Figura 4).



	Litologia	Descrição	Interpretação
150 metros		Arenito bimodal com estratificação cruzada acanalada cuneiforme, interestratificado com argilito.	Lagos interdunas invadidos por dunas migrantes.
		Arenito bimodal com estratificação cruzada tabular de grande porte.	Dunas tipo <i>seif</i> ou partes de dunas tipo barcanas ou estrelas.
		Arenito com estratificação cruzada acanalada com níveis de seixos na base e lentes de argilito.	Fácies fluvial; avulsão do canal indica baixa subsidência.
		Arenito bimodal com estratificação cruzada tabular de grande porte.	Dunas eólicas tipo <i>seif</i> .
		Arenito fino com níveis de <i>chert</i> e marcas onduladas.	Lagos interdunas.
Formação Salto das Nuvens		Conglomerado com seixos de arenito e quartzo, intercamadado com arenito fino	Seqüência fluvial de alto gradiente. Os conglomerados representam depósitos de abandono.
		Arenito fino a médio com intercalações de argilito e conglomerado.	Ambiente desértico: lagos rasos e planícies de areia e cascalho.
		Arenito fino com estratificação plano-paralela.	Barras transversais e antidunas.
		Conglomerado polimítico, mal selecionado com seixos de gnaise, arenito e ardósia, intercalado com arenito fino.	Planície de areia e cascalho ou <i>wadis</i> .

Figura 4. Coluna estratigráfica do Grupo Parecis.

Fonte: Modificado de Bahia (2007)

Acima da Formação Utiariti encontra-se a Formação Ronuro, que tem idade Terciária/Quaternária, aflora continuamente na porção Leste da Bacia dos Parecis, no domínio da Sub-bacia Alto Xingu, capeando discordantemente as formações Paleozoicas. Constituem-se de sedimentos pouco consolidados, representados por areia, silte, argila e cascalho, além de lateritas. Esta unidade foi depositada em uma depressão tipo sinéclise a partir da intensa erosão no Plioceno, que mobilizou a crosta laterítica formada no início do Terciário (Schobbenhaus *et al.*, 1975).

Com relação à hidrogeologia, o município de Sinop está inserido no Sistema Aquífero Parecis, que é constituído pelos aquíferos Rio Ávila, Salto das Nuvens e Utiariti. Na região estudada aflora o Aquífero Utiariti, que é um dos principais aquíferos de Mato Grosso, caracterizado como do tipo livre em meio poroso. Possui extensão regional e apresenta excelentes condições de armazenamento e circulação das águas subterrâneas (Migliorini *et al.*, 2006).

Os poços nesse aquífero apresentam vazões variadas, geralmente de 15 a 50 m³/h, para rebalçamento de 25 m. As águas são de boa qualidade físico-química, porém é comum a ocorrência de água ferruginosa (Migliorini *et al.*, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos do trabalho foram desenvolvidos em quatro etapas: levantamento bibliográfico, trabalhos de campo, laboratório e a última etapa em escritório.

O levantamento bibliográfico teve início com a obtenção de trabalhos anteriores sobre o meio físico (geologia, geomorfologia, relevo, clima, hidrografia, hidrogeologia e vegetação).

Os trabalhos de campo consistiram no monitoramento do nível estático dos poços tubulares perfurados no Aquífero Utiariti nas épocas da chuva e na estiagem. Também foram realizadas coletas de amostras para os ensaios de porosidade.

O monitoramento do nível estático foi realizado em duas oportunidades. A primeira ocorreu

no auge das chuvas (maio de 2015). A segunda ocorreu no ápice da estiagem (setembro de 2015). A diferença da altura dos níveis estáticos indicou a coluna de água dentro do poço entre as estações.

Nas etapas de campo, foram medidos o nível estático dos poços tubulares profundos, ativos e desativados. Na seleção desses contou-se com o auxílio de um técnico da companhia “Águas de Sinop”, empresa responsável pelo abastecimento público. Assim foi possível distribuir o mais homogêneo possível os poços a serem amostrados pela área de estudo. Foram escolhidos um total de oito (8) poços tubulares profundos. Foi tomado o cuidado de interromper o bombeamento dos poços ativos por volta de 60 minutos antes de medir o nível estático.

No campo foram utilizados os seguintes materiais: medidor de nível d’água GPSMAP62 da marca Garmin, caderneta, caneta, fita métrica e calculadora. O processo teve início com a abertura do tubo guia ao lado da tubulação principal do poço. Com auxílio do medidor de nível d’água, foi obtida a profundidade do nível estático. Para maior exatidão nos dados, foi descontada a altura da boca do poço. Por fim, os dados foram anotados na caderneta de campo.

Foram monitorados poços inativos e ativos, sendo assim, para estimar a variação do nível estático dos poços do aquífero entre as estações (estiagem e chuva), foi imposto peso 2 aos poços inativos e 1 aos ativos. Ou seja, a média da variação do nível d’água foi calculada segundo a equação (1) abaixo gerada pelos próprios autores, com intuito de valorizar os dados dos poços desativados:

$$\Delta NE = \frac{[(2 \times MI) + (1 \times MA)]}{3} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: ΔNE é a variação do nível estático; MI é a média do NE nos poços inativos e MA é a média do NE nos poços ativos.

Na coleta do solo, houve a cautela de manter a amostra indeformada, para preservar suas características físicas (figuras 5A e 5B).



Figura 5. A: Cilindro fora do solo; B: Coletando amostra do solo e materiais utilizados.

Iniciou-se a coleta com a limpeza da área, retirando toda a matéria orgânica e todo o solo mais superficial do local com a enxada, objetivou-se ultrapassar a profundidade que houvesse qualquer resquício vegetal e não foram observadas estruturas no solo. Após a limpeza, o cilindro foi inserido verticalmente no solo, sendo auxiliado pela marreta. Para retirar o cilindro sem deformar o material que se encontra em seu interior foi necessário cuidado. Nesse momento, utilizou-se a espátula e o canivete. Retirada a amostra, a mesma foi identificada com caneta permanente e fita crepe e por fim, embalada com o papel filme.

Foram coletadas 20 amostras distribuídas pela área de estudo, em diversas profundidades, representando o melhor possível a porosidade do solo na região. Os dados de porosidade foram utilizados para estimar as reservas do aquífero.

Após a etapa de campo, o material foi encaminhado ao Laboratório de Física dos Solos (UFMT). Com o auxílio do técnico, os recipientes foram preparados para iniciar o processo de

obtenção de dados sobre a porosidade dos solos, utilizando a metodologia proposta pelo manual da EMBRAPA (1997).

Inicialmente o cilindro foi limpo e todos seus excessos foram desprezados, restando apenas o cilindro com o material. Foram posicionados panos presos com elásticos que serviram como “tampões”, evitando a queda do material, e fitas para sua identificação.

Com as amostras preparadas, foi iniciada a saturação por capilaridade, a saturação consistiu em espalhar os recipientes sobre uma bandeja, onde foi feita a injeção de alguns cm de água, sem que ela fosse despejada sobre o solo. Em um prazo de 3 a 5 dias ocorreu a saturação por capilaridade (Figura 6.A). Após a saturação, as amostras foram pesadas individualmente com o auxílio de uma balança de precisão (Figura 6.B) e os seus valores foram anotados em uma planilha de dados. Foi tomado o cuidado de utilizar a mesma balança em todas as pesagens.



Figura 6. A: Amostras em processo de saturação por capilaridade; B: Balança de precisão.

Na etapa seguinte, o material saturado em água foi encaminhado à mesa de tensão, que consiste em um equipamento que determina a retenção de água em baixas tensões, até 100 hPa (Figura 7). O equipamento foi calibrado em 60 hPa. A mesa de tensão só foi aberta quando o sistema entrou em equilíbrio e parou de pingar água das amostras. Esse equipamento age como um fator gravitacional e no final desse processo o material perdeu toda água contida em seus poros conectados. As amostras foram pesadas individualmente e os valores foram anotados na planilha de dados.

A última fase no laboratório foram acondicionados os recipientes na estufa para que os poros não conectados perdessem sua umidade. Foi tomada a precaução de retirar os elásticos dos cilindros, pois a temperatura de 105 °C podia derretê-los. As amostras permaneceram na estufa por aproximadamente 48 horas e após este período o material foi pesado e os dados plotados na planilha.



Figura 7. A: Mesa de tensão fechada; B: Amostras dentro da mesa de tensão; C: Mesa de tensão aberta com amostras.

$$PSF = PSI - PC - PPU - PE \quad (\text{Eq. 2})$$

$$PEF = PEI - PC - PPS \quad (\text{Eq. 3})$$

$$PMF = PMI - PC - PPU - PE \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde: *PC* é o peso do cilindro; *PPU* é o peso do pano úmido; *PPS* é o peso do pano seco; *PE* é o peso do elástico; *PSF* é o peso saturado final; *PSI* é o peso saturado inicial; *PEF* é o peso pós-estufa final; *PEI* é o peso pós-estufa inicial; *PMF* é o peso pós mesa de tensão final e *PMI* é o peso pós mesa de tensão inicial.

Os valores de *PSF*, *PEF* e *PMF* foram utilizados para determinar os seguintes volumes: volume de vazios, volume gravitacional e volume retido. Esses três volumes, em conjunto com o volume total, que foi calculado pela quantidade de água que coube no cilindro, possibilitaram avaliação das porosidades. Porosidades estas que foram posteriormente aplicadas para a estimativa de reservas do aquífero.

O volume de vazios (*Vv*) foi dado pela subtração do pelo *PEF* (Equação 5); o volume gravitacional (*Vg*) foi dado pela subtração do *PSF* pelo *PMF* (Equação 6); o volume retido (*Vr*) foi obtido pela subtração do *PMF* pelo *PEF* (Equação 7) e o volume total (*Vt*) foi calculado pela quantidade de água necessária para preencher o cilindro. Os dados de volume foram plotados em mm, conforme a equação abaixo (Filho, 2008):

$$Vv = PSF - PEF \quad (\text{Eq. 5})$$

$$Vg = PSF - PMF \quad (\text{Eq. 6})$$

$$Vr = PMF - PEF \quad (\text{Eq. 7})$$

Depois que os volumes foram determinados, foi possível fazer os cálculos de porosidades da seguinte maneira: a porosidade total (*m*) é a divisão do *Vv* pelo *Vt*, multiplicado por 100 (Equação 8); a porosidade efetiva (*me*) é a divisão do *Vg* pelo *Vt*, multiplicado por 100 (Equação 9); a porosida-

de específica ou retenção específica (*ms*) pôde ser determinada de duas maneiras: com a divisão do *Vr* pelo *Vt*, multiplicado por 100 (Equação 10) ou pela subtração de *m* por *me* (Equação 11). Ao fazer a porosidade específica das duas maneiras e o resultado ser o mesmo, houve a comprovação de que as contas estavam corretas. Todos os valores de porosidades foram dados em porcentagem, conforme as equações abaixo (Filho, 2008):

$$m = \frac{Vv}{Vt} \times 100 \quad (\text{Eq. 8})$$

$$me = \frac{Vg}{Vt} \times 100 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$ms = \frac{Vr}{Vt} \times 100 \quad (\text{Eq. 10})$$

$$ms = m - me \quad (\text{Eq. 11})$$

Para a estimativa das reservas foram utilizados os valores da porosidade efetiva, pois é a porosidade que efetivamente contribui para o fluxo da água subterrânea. A estimativa foi feita para o perímetro do município de Sinop, sendo esta a área de estudo.

Feitosa *et al.* (2008), adota a expressão *reserva* a uma certa quantidade armazenada, no caso de água subterrânea. As unidades que expressam as reservas de água subterrânea têm dimensões de volume, sendo comum a utilização de metro cúbico, hectômetro cúbico ou mesmo o litro. Os aquíferos livres têm unicamente reservas de saturação, que podem ser avaliadas utilizando os seguintes parâmetros: Área do aquífero, espessura saturada mínima e porosidade efetiva.

Para avaliar a reserva renovável ou reserva reguladora, este método foi aplicado considerando o aquífero como poroso, livre e homogêneo, os outros parâmetros e variáveis foram desconsiderados. A reserva renovável foi estimada mediante análise de variações potenciométricas sazonais, ou seja, a espessura saturada foi equivalente à variação do nível estático (ΔNE) do período de maior pluviosidade até o período extremo da estiagem. Sendo o relevo da região de Sinop plano e suavemente ondulado, praticamente não existe variação

de cota topográfica (Ross & Santos, 1982). Por esta razão, a variação da topografia foi desconsiderada, mesmo sabendo de sua influência na variação do nível d'água em aquíferos livres.

Adequando a equação de Feitosa *et al.* (2008), tivemos a equação (12):

$$R = A \times me \times \Delta NE \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde: *R* é a estimativa de reserva renovável; *A* é a área de estudo; ΔNE é a variação do nível estático e *me* é a porosidade efetiva.

A reserva permanente, ou reserva geológica, foi definida como águas armazenadas no tempo geológico, da qual é possível dispor de uma certa quantidade regularizada, durante um certo período de tempo (Feitosa *et al.*, 2008).

Para avaliar a reserva permanente, o aquífero foi considerado como: poroso, livre e homogêneo. Os outros parâmetros e variáveis foram desconsiderados. Para a reserva permanente, a espessura da camada saturada é equivalente à espessura do aquífero no auge da estiagem, ou seja, é o valor de reservas totais (reservas naturais) subtraído o valor da reserva renovável.

Adequando a equação de Feitosa *et al.* (2008), tivemos a equação (13):

$$Rp = A \times me \times es \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde: *Rp* é a reserva permanente; *A* é a área de estudo; *me* é a porosidade efetiva e *es* é a espessura da camada saturada.

O termo *reserva explotável* é definido como o *safe yield* (descarga segura ou descarga permissível). Não há um consenso em relação a essa definição, pelo contrário, a constante divergência entre autores vem dificultando não apenas a avaliação realista dos recursos hídricos subterrâneos, mas também a comunicação entre os especialistas (Feitosa *et al.*, 2008).

A reserva explotável é a quantidade de água que pode ser explorada de um determinado aquífero, sem que o mesmo seja prejudicado. A avaliação da reserva explotável neste caso foi considerada a soma da reserva renovável com 15% da reserva permanente.

Adequando a equação de Feitosa *et al.* (2008), tivemos a equação (14):

$$Rexp = R + \%Rp \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde: *Rexp* é a reserva explotável; *R* é a reserva renovável e *Rp* é a reserva permanente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A variação do nível estático dos poços tubulares medidos no auge da chuva e da estiagem variaram de 0,85 a 8,29 m (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de Nível Estático e situação dos poços.

Poço	Situação	NE chuva	NE estiagem	Diferença NE
ptp1	Ativo	41,50 m	43,35 m	1,85 m
Ptp2	Ativo	13,00 m	28,72 m	15,72 m
Ptp3	Ativo	28,76 m	29,90 m	1,14 m
Ptp4	Inativo	3,56 m	11,85 m	8,29 m
Ptp8	Ativo	34,36 m	35,25 m	0,89 m
Ptp20	Inativo	2,00 m	6,10 m	4,10 m
Ptc1	Inativo	0,82 m	4,55 m	3,73 m
Ptc2	Inativo	3,21 m	4,90 m	1,69 m

- Média do NE dos Poços Ativados + Desativados= 4,67 m.

- Média do NE dos Poços Desativados= 4,45 m.

- Média do NE dos Poços Ativados= 4,9 m.

Com esses resultados, foi considerado que 4,6 m é a diferença do nível estático, que representa a variação do nível d'água dentro do poço

entre o período de estiagem e o chuvoso, para os 3.942,229 km² da área do município. Essas medidas foram utilizadas para estimar as reservas do

Aquífero Utariiti na região, no ano de 2015. Como foi mencionado acima, o relevo da região é plano e suavemente ondulado, sendo assim, foi considerado no momento da estimativa da variação do nível d'água

Na Tabela 2 foram expostos os dados de porosidade total, porosidade efetiva e porosidade específica. Observa-se que a porosidade efetiva variou de 8,72% até 34,06%.

Tabela 2. Porosidades dos solos e suas médias.

Amostra	Porosidade total (%)	Porosidade efetiva (%)	Porosidade específica (%)
PE01	57,73	19,34	38,39
PE02	62,22	22,20	40,02
PE03	51,80	21,46	30,34
PE04	57,02	23,70	33,32
PE05	62,34	28,05	34,29
PE06	69,58	34,06	35,52
PE07	58,72	15,06	43,66
PE08	59,62	19,13	40,49
PE09	60,04	17,38	42,66
PE10	52,61	16,12	36,49
PE11	54,01	13,74	40,27
PE12	47,38	8,72	38,66
PE13	46,10	8,95	37,15
PE14	46,42	10,92	35,50
PE15	48,48	18,66	29,82
PE16	58,93	19,61	39,32
PE17	56,43	19,67	36,76
PE18	56,01	20,03	35,98
PE19	59,69	22,95	36,74
PE20	60,29	26,16	34,13
MÉDIAS	57,38	19,48	36,75

Pode ser observado na Tabela 2, que a média da porosidade efetiva foi de 19,48%. Os valores das médias de porosidade total e porosidade específica resultaram, respectivamente, 57,38 % e 36,75 %.

Devido à grande complexidade geológica dos reservatórios subterrâneos e a consequente dificuldade que os mesmos oferecem a uma compreensão satisfatória das suas geometrias e variação especial das propriedades hidrodinâmicas (Feitosa *et al.*, 2008), para avaliar a reserva do Aquífero Utariiti foi utilizado o valor de 19,49 % para a porosidade efetiva do mesmo.

Sendo ΔNE a variação de 4,6 m do nível estático do período chuvoso até a estiagem, A os 3.942,229 km² da área de estudo do projeto e a porosidade efetiva de 19,48%, obtém-se valor para a reserva renovável conforme equação (12), já demonstrada anteriormente:

$$R = 3.942,229 \times 10^6 \text{m}^2 \times 0,1947647 \times 4,6\text{m}$$

$$R = 3,53 \times 10^9 \text{m}^3$$

(Eq. 12)

O volume de água que diminui do Aquífero Utariiti do período do auge das chuvas até o período mais extremo da estiagem de 2015, foi estimado em $3,53 \times 10^9 \text{m}^3$.

Lussi (2013), utilizando Sondagens Elétricas Verticais (SEV), determinou que a espessura média da zona saturada do Aquífero Utariiti é de 76 m.

Com a espessura média da zona saturada do Aquífero Utariiti de 76 m, o valor utilizado para estimar a reserva permanente foram os 76 m subtraindo 4,6 m, que é a média da variação do nível estático no Aquífero Utariiti.

Utilizando a espessura da camada saturada de 71,4 m, a porosidade efetiva 19,48% e a área de estudo 3.942,229 km², temos com a equação (13), já demonstrada anteriormente:

$$Rp = 3.942,229 \times 10^6 \text{m}^2 \times 0,1947647 \times 71,4\text{m}$$

$$Rp = 5,48 \times 10^{10} \text{m}^3$$

(Eq. 13)

A reserva permanente do Aquífero Utiariti na região de estudo foi estimada em 5,48 x 10⁹m³ de água, com esse dado e o da reserva renovável foi estimado o valor da reserva explorável.

Não existe consenso entre os autores para o conceito de reserva renovável (Feitosa *et al.*, 2008), nesse trabalho, é compreendido como a quantidade de água que pode ser extraída de um aquífero sem que o mesmo seja prejudicado. É avaliada pela soma da reserva renovável com uma porcentagem da reserva permanente. Como esta porcentagem varia de autor para autor, no presente trabalho foi considerada de 15 %, devido à alta capacidade de armazenamento e circulação das águas subterrâneas.

Com a reserva renovável estimada em 3,53 x 10⁹m³ e a reserva permanente em 5,48 x 10⁹m³, tem-se com a equação (14), já demonstrada anteriormente:

$$Rexp = 3,53 \times 10^9 \text{m}^3 + (0,15 \times 5,48 \times 10^{10} \text{m}^3)$$

$$Rexp = 1,175 \times 10^{10} \text{m}^3$$

(Eq. 14)

A reserva explorável foi estimada em 1,175 x 10¹⁰m³ de água para o Aquífero Utiariti nos 3.942,229 km² de área de estudo.

Para que seja compreendida a quantidade de água que esses valores representam, pode se usar como referência uma piscina olímpica que contém 3.125 m³ de água e este valor é equivalente a 3.125.000 litros. O valor de 1,175 x 10¹⁰m³ é equivalente a 3.760.000 piscinas olímpicas, ou seja, 1,175 x 10¹³ litros de água.

Segundo dados da SABESP (2016), uma pessoa consome aproximadamente 180 litros de água por dia, que é equivalente a 65.700 litros por ano. O município de Sinop é abastecido totalmente por

água subterrânea e o volume de água da reserva explorável analisado neste trabalho é suficiente para abastecer 178.843.227 pessoas anualmente.

5 CONCLUSÃO

Inicialmente, antes de concluir o trabalho, torna-se necessário enfatizar que na estimativa de reserva de aquíferos, procura-se avaliar uma certa quantidade de água subterrânea, isto é, uma avaliação aproximada. O que é compreensível, devido à grande dificuldade de informações geológicas dos reservatórios em subsuperfície. Em estudos hidrogeológicos não se calcula reserva, e sim, se estima ou avalia. Isto posto, a reserva renovável, permanente e explorável do Aquífero Utiariti na cidade de Sinop - MT foram estimadas respectivamente em 3,53 x 10⁹m³, 5,48 x 10⁹m³ e 1,175 x 10¹⁰m³.

REFERÊNCIAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2010. Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional. Brasília: ANA, Engecorps/Cobrape. 68 p.
- Bahia R.B.C., Neto, M.A., Barbosa, M.S., Pedreira, A.J. 2006. Revisão Estratigráfica da Bacia do Parecis. Amazônia. Revista Brasileira de Geofísica. Vol. 36 (4). p. 692 - 703.
- Bahia R.B.C. 2007. Evolução tectonossedimentar da Bacia do Parecis - Amazônia. Tese de Doutorado em Ciências Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto. 140 p.
- Barros A.M., Silva R.H., Cardoso O.R.F.A., Freire F.A., Souza Júnior J.J., Rivetti M., Luz D.S., Palmeira R.C.B., Tassinari C.C.G. 1982. Geologia da folha SD-21. Cuiabá - In: DNPM. Projeto RADAMBRASIL, Rio de Janeiro - RJ. v. 26. 531 p.
- Comelli C. 2011. Estudos preliminares sobre a hidrogeologia e hidroquímica da zona urbana de Sinop-MT. Dissertação de Mestrado em Geologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 66 p.
- Coutinho A. C. 2005. Dinâmica das queimadas no Estado de Mato Grosso e suas relações com as

- atividades antrópicas e a economia local. Tese de Doutorado em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo. 308 p.
- EMBRAPA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. 1997. Manual de métodos de análise de solo. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 212 p.
- Feitosa E. C., Filho J. M., Costa W. D., Feitosa F. A. C., Demetrio J. G. A., França H. P. M. 2008. Avaliação de Recursos Hídricos Subterrâneos. In: FEITOSA, F. A. C. (Organização e Coordenação Científica). Hidrogeologia conceitos e aplicações. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 3ª edição. p. 661 - 669.
- Filho J. M. 2008. Ocorrência das Águas Subterrâneas. In: Feitosa, F. A. C. (Organização e Coordenação Científica). Hidrogeologia conceitos e aplicações. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 3ª edição. p. 53 - 74.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2016. Disponível em <http://cod.ibge.gov.br/6RI>. Acessado em 06 nov 2016.
- Lussi C. 2013. Avaliação hidrogeológica do sistema aquífero Parecis, na região de Sinop, MT. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos. Universidade Federal de Mato Grosso, 134 p.
- Migliorini R.B., Barros M.S., Apoitia L.F.M., Silva J.J.F. 2006. Diagnóstico preliminar das principais províncias hidrogeológicas do Estado de Mato Grosso: uma proposta de mapa hidrogeológico de reconhecimento. In: FERNANDES, C.J.; VIANA, R.R. Recursos Hídricos de Mato Grosso. Coletânea geológica de Mato Grosso. Cuiabá: EdUFMT, v. 3, p. 41 - 42.
- Oliveira V.A., Amaral Filho Z.P., Vieira P.C. 1982. Pedologia da folha SD-21. Cuiabá - In: DNPM. Projeto RADAMBRASIL, Rio de Janeiro - RJ. v. 26, p. 260 - 262.
- Ribeiro Filho W., Luz J.S., Abreu Filho W. 1975. Projeto Serra Azul. Reconhecimento Geológico. Relatório final. Goiânia, DNPM/CPRM. v.1.
- Ross J.L.S., Santos L.M. 1982. Geomorfologia da folha SD-21. Cuiabá - In: DNPM. Projeto RADAMBRASIL, Rio de Janeiro. v. 26, p. 216 - 229.
- SABESP – COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2016. Disponível em: site.sabesp.com.br/site/Default.aspx. Acessado em 10 de mai de 2016.
- SEPLAN-MT. SECRETARIA DE ESTADO DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL. 2007. Mato Grosso: Solos e Paisagens. 272 p.
- Siqueira L.P. 1989. Bacia dos Parecis. Boletim de Geociências da Petrobrás. p. 3 - 16.
- Schobbenhaus Filho C., Oguino K., Ribeiro C.L., Oliva L.A., Takanohashi J.T. 1975. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folha Goiânia. Brasília, DNPM. 87 p.
- UNESCO - UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. 2011. Groundwater for Emergency Situations: A Methodological Guide. IHP-VII Series on Groundwater No 3 International Hydrological Programme Division of Water Sciences. Paris: UNESCO. 317 p.

ESTRUTURAÇÃO DE BASE DE DADOS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS VOLTADA PARA A GESTÃO DA BACIA DO RIO DA VÁRZEA, RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

STRUCTURING OF DATABASE OF GROUNDWATER QUALITY FOCUSED ON THE
MANAGEMENT OF THE RIO DA VÁRZEA BASIN, RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL

JÉSSICA FORMENTINI

*Mestre em Engenharia Ambiental e Engenharia Sanitarista e Ambiental - Bioma
Engenharia & Consultoria Ambiental, Ibirubá, RS, Brasil. E-mail: bioma.jf@gmail.com*

MALVA ANDREA MANCUSO

*Professora adjunta do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária - Universidade Federal de Santa Maria,
UFSM - Campus de Frederico Westphalen, Frederico Westphalen, RS, Brasil. E-mail: malvamancuso@ufsm.br*

JOSÉ LUIZ ALBUQUERQUE FILHO

*Geólogo e Pesquisador do Centro de Tecnologias Geoambientais - CTGeo - Instituto de Pesquisas e
Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. São Paulo, SP, Brasil. E-mail: albuzele@ipt.br*

RESUMO ABSTRACT

Este trabalho apresenta a base de dados desenvolvida em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), que foi estruturada com vistas a constituir subsídio para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos em bacias hidrográficas, no âmbito do Sistema Estadual de Recursos Hídricos (SERH). O estudo objetivou a estruturação de uma base de dados georeferenciados e sua aplicação na avaliação da qualidade das águas subterrâneas da Bacia do rio da Várzea, RS, com vistas a subsidiar a gestão da mesma. A metodologia consistiu na obtenção de dados primários provenientes de campanhas de campo em parceria com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e no tratamento dos dados secundários do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da CPRM. Os resultados obtidos permitiram concluir que a maioria dos poços não possui concentrações acima do Valor Máximo Permitido (VMP) pela Portaria MS 2914/11, com exceção de trinta e cinco poços (35) em desconformidade com os parâmetros de flúor, sódio, sulfatos, cloretos e condutividade elétrica. A estruturação de um banco de dados beneficia o gerenciamento da qualidade das águas subterrâneas no âmbito da bacia hidrográfica, uma vez que possibilita a identificação das regiões que necessitam de monitoramento ou da implantação de algum tipo de tratamento da água distribuída a população.

Palavras-chave: Bacia do Rio da Várzea; Águas subterrâneas; Qualidade da água.

This work presents a database developed in a Geographic Information System (GIS), which was structured to provide subsidy for the management of groundwater resources in hydrographic basins, within the framework of the State System of Water Resources (SERH). The study aimed at structuring a georeferenced data and its application in the evaluation of the groundwater quality of the Rio da Várzea basin, RS, in order to support the management of the same. The methodology consisted in obtaining primary data from field campaigns in partnership with the Brazil Geological Survey (CPRM) and the treatment of secondary data obtained from the CPRM - SIAGAS system. The results obtained allowed to conclude that most wells do not have concentrations above the Maximum allowed value (VMP) by the MS 2914/11, except for thirty-five wells (35) in disconformity with the parameters of fluorine, sodium, sulfates, chlorides and electrical conductivity. The structuring of a database benefits the management of groundwater quality within the watershed, since it allows the identification of the regions that need monitoring or the implementation of some type of water treatment distributed to the population.

Keywords: Varzea River Basin; Groundwater; Water quality.

1 INTRODUÇÃO

A água é o principal elemento para o desenvolvimento da vida, sendo fundamental tanto para a evolução natural quanto para progresso de uma nação. Por muitos anos, não houve nenhum tipo de preocupação quanto ao uso deste recurso devido a sua abundância, porém seu uso irracional levou ao comprometimento da oferta de água com boa qualidade em quantidade suficiente para suprir as necessidades (demandas) de seus usuários, em várias localidades do Brasil, podendo-se citar as recentes crises hídricas nas regiões metropolitanas de São Paulo, de Campinas, dentre outras.

A gestão integrada dos recursos hídricos foi concebida para que os diversos usos da água pudessem ser atendidos sem comprometer o abastecimento com boa qualidade e em quantidade adequada para a atual e para as futuras gerações. Para isso, foi sancionada a Lei Federal nº 9433 (Brasil 1997), que designou a bacia hidrográfica como a unidade físico-territorial para a aplicação da Política Nacional de Recursos Hídricos, por meio do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

No Estado do Rio Grande do Sul, esse modelo de gestão já havia sido proposto anteriormente,

conforme Lei nº 10350 (Rio Grande do Sul 1994), que regulamentou o Artigo 171 da Constituição do Estado (Rio Grande do Sul 1989), e estabeleceu o Sistema Estadual de Recursos Hídricos (SERH), adotando a bacia hidrográfica como unidade básica de planejamento e gestão de recursos hídricos.

Por meio dessa Lei, definiu-se a água como um recurso natural de disponibilidade limitada, bem de domínio público e dotado de valor econômico. Sua administração foi caracterizada como de gestão descentralizada e pela participação da sociedade na tomada de decisões.

A gestão dos recursos hídricos no Estado do Rio Grande do Sul é realizada com base na divisão territorial constituída por três Regiões Hidrográficas: a do Rio Uruguai, do Rio Guaíba e do Litoral. Essas regiões, por sua vez, estão subdivididas em 25 bacias geográficas (SEMA 2006).

A área do presente estudo está localizada no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, aproximadamente entre as coordenadas geográficas 27°00' a 28°20' de latitude sul e 52°30' a 53°50' de longitude oeste (Figura 1), no âmbito da Região Hidrográfica do Rio Uruguai. Compreende as bacias hidrográficas dos rios da Várzea, Guarita e Ogaratim, com uma área de drenagem de 9.910,49 Km² (Brasil 2008; SEMA 2010).

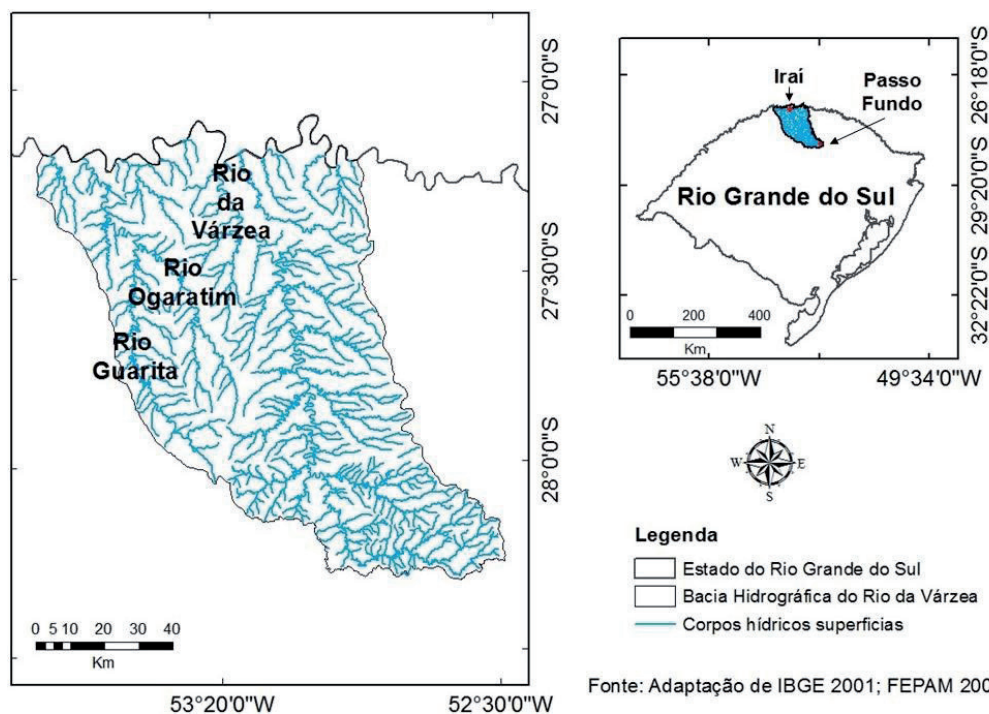


Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea

A Bacia Hidrográfica do rio da Várzea abrange parcial ou totalmente cerca de 55 municípios, com uma população estimada em 2010 de 323.924 habitantes (IBGE 2010), os principais usos da água se destinam à irrigação, à dessedentação animal e ao abastecimento humano. As atividades econômicas são predominantemente agrícolas (soja, trigo e milho), bem como avicultura e suinocultura. Além disso, possui aproveitamentos hidrelétricos e, também, comporta atividades de mineração (extração de pedras preciosas e semi-preciosas) (SEMA 2010).

Esta Bacia tem sua gestão feita por meio do Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (CBHV), criado por meio do Decreto Estadual nº 43.488 de 08 de dezembro de 2004 (Rio Grande do Sul 2004), que tem como área de atuação todo o território correspondente à bacia hidrográfica, que integra a Região Hidrográfica do Uruguai.

O CBHV redigiu o termo de referência, o qual norteará a elaboração de planos de trabalho para execução do Plano da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea, nos termos das Resoluções do CNRH nº 17/2001 (CNRH 2001) e CNRH nº 91/2008 (CNRH 2008). Essas resoluções, dizem respeito, respectivamente, às diretrizes complementares para elaboração dos Planos de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas e aos procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos (CBHV 2014).

Com intuito de apoiar a gestão dos recursos hídricos, superficiais e subterrâneos, aplicam-se tecnologias de geoinformação como ferramenta para avaliação integrada dos distintos aspectos de uma bacia hidrográfica, que possibilitem a caracterização desta quanto as suas potencialidades e vulnerabilidades, e principalmente, que considerem o uso do solo e os múltiplos usos da água.

A utilização de tecnologias de geoinformação na gestão dos recursos hídricos traz a possibilidade de aquisição de dados georreferenciados, bem como a sua manipulação e análise, para o desenvolvimento de mapas temáticos e de sistemas de apoio à tomada de decisão.

Essa tecnologia integra operações convencionais de bases de dados, tais como: captura, armazenamento, manipulação, análise e apresentação de dados, com possibilidade de seleção, busca de informações e análise estatística, aliadas à possibilidade de visualização e análise espacial/espacotemporal na forma de mapas temáticos estáticos ou dinâmicos (Beser de Deus et al. 2011).

Assim sendo, este estudo foi desenvolvido com o objetivo de estruturar uma base de dados espaciais, demonstrar seu potencial de aplicação na avaliação da qualidade das águas subterrâneas da bacia do rio da Várzea, RS, e fornecer subsídio para sua gestão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Estruturação de Bases de Dados

2.1.1 Elaboração de banco de dados secundários

O levantamento dos dados secundários foi realizado por meio de consulta a bibliografias e sítios eletrônicos do governo Brasileiro (Quadro 1) e com dados bibliográficos de estudos anteriormente realizados na região de interesse, tais como: Machado e Freitas (2005), Freitas et al. (2011), CPRM (2005), Mancuso et al. (2013), Schroeder (2014), Mancuso et al. (2014), Ecoplan (2007).

Quadro 1. Especificações dos dados levantados para alimentação do SIG

Dado	Especificação - (formato)	Fonte
Geodiversidade	Geologia/Estrutura 1: 750.000 - (.shp)*	GEOBANK, CPRM, 2002
Hidrogeologia e produtividade de aquíferos	Hidrogeologia, produtividade dos aquíferos- (.shp)	GEOBANK, CPRM, 2002
Recursos Hídricos	Drenagens 1: 250.000 - (.shp)	FEPAM, 2005
Unidade de Paisagem Natural x Bacia Hidrográfica	Delimitação das Bacias Hidrográficas do RS - (.shp)	FEPAM, 2005
Divisão Municipal do RS	Malha Municipal Digital - 2001 1: 2.500.000 - (.shp)	IBGE, 2001

*shp: *shapefile* (formato do arquivo digital)

Estes dados foram complementados, com dados provenientes do SIAGAS, onde foram obtidos os dados dos poços tubulares cadastrados nos 55 municípios que pertencem parcial ou totalmente à Bacia do Rio da Várzea. A partir de algoritmos específicos de consulta no âmbito do programa *Access*, arcabouço do banco de dados do programa SIAGAS, foram geradas consultas gerais para cada um dos municípios, cujos resultados fornecem, além das características construtivas e quantitativas dos poços, as concentrações de íons, de acordo com as análises realizadas para o universo de poços dos municípios da bacia. O resultado das consultas permitiu a confecção de uma tabela única em *Excel* com as informações gerais dos poços e os parâmetros químicos selecionados. Posteriormente, esses dados foram convertidos em arquivos tipo *shapefile* e espacializados no âmbito do *software* ArcGIS versão 10.2.1 (ESRI 2013).

Com isso, foi gerado um banco de dados secundário com informação de 916 poços tubulares, os quais localizam-se dentro dos limites da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea. Destes, aproximadamente 400 poços possuíam dados de análise química da água completa ou parcial.

2.1.2 Coleta de dados primários e análises laboratoriais para obtenção e complementação de parâmetros e informações necessárias

Os dados secundários, inicialmente obtidos no SIAGAS, foram complementados com informações produzidas por meio de três campanhas de campo executadas em 2013, no âmbito do Projeto CNPq/VALE n° 05/2012-Forma-Engenharia, relativo à capacitação laboratorial em escolas de engenharia e que foi desenvolvido no período 2012–2014. Os trabalhos contaram com auxílio do Projeto SIAGAS do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). As atividades de campo foram desenvolvidas no âmbito do projeto SIAGAS da CPRM, divididas em três etapas de 10 dias cada uma.

Nessa oportunidade, foi avaliada a qualidade das águas subterrâneas por meio de 103 poços, nos quais foram executadas duas campanhas, quais foram: realizada pela CPRM (Figura 2a) e a outra, entre os anos de 2014 e 2015, a partir de coleta e análises químicas realizadas pelo Laboratório de Recursos Hídricos (LARH) na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Campus Frederico Westphalen (FW) (Figura 2b).



Figura 2. Execução de campanha de campo da CPRM (2014) [a] e análise química sendo efetuada no LARH (UFSM/FW) – 2014/2015 [b].

2.1.3 Sistematização de dados e inserção da base de dados em ambiente de SIG

A partir das informações coletadas no SIAGAS e nos resultados das análises químicas das águas subterrâneas realizadas no Laboratório de

Recursos Hídricos (LARH), os dados obtidos foram sistematizados em *software* Excel e transferidos ao banco de dados organizado em SIG, *software* ArcGis versão 10.2.1 (ESRI 2013).

2.2 Análise de conformidade da qualidade das águas nos poços

2.2.1 Definição de parâmetros de qualidade das águas

Os parâmetros químicos considerados neste estudo foram: Na^+ , Ca^{+2} , So_4^{-2} , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^- , Mg^+ , K^+ , Condutividade Elétrica (CE) e pH, sendo estes dois últimos provenientes do estudo realizado por Schroeder (2014). De forma complementar, foi realizada a determinação de íons ausentes nas análises químicas por meio do método da diferença, o qual é baseado na diferença entre a soma dos ânions e dos cátions, dependendo do elemento a ser calculado (Filho et al. 2002).

2.2.2 Identificação de parâmetros em desconformidade

A identificação dos parâmetros químicos em desconformidade foi avaliada segundo a Porta-

ria do Ministério da Saúde nº 2914 (Brasil, 2011), a qual dispõe dos Valores Máximos Permitidos (VMP) requeridos para que sejam atendidos os padrões de potabilidade da água subterrânea para consumo humano.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Banco de dados

As figuras 3 e 4 apresentam o layout do Banco de Dados, em ambiente SIG, e exemplificam a consulta dos dados de qualidade da água subterrânea dentro do sistema.

O banco de dados (Quadro 2) contém informações específicas que poderão ser posteriormente utilizadas pelo Comitê de Bacia do Rio da Várzea como subsídio à gestão dos recursos hídricos.

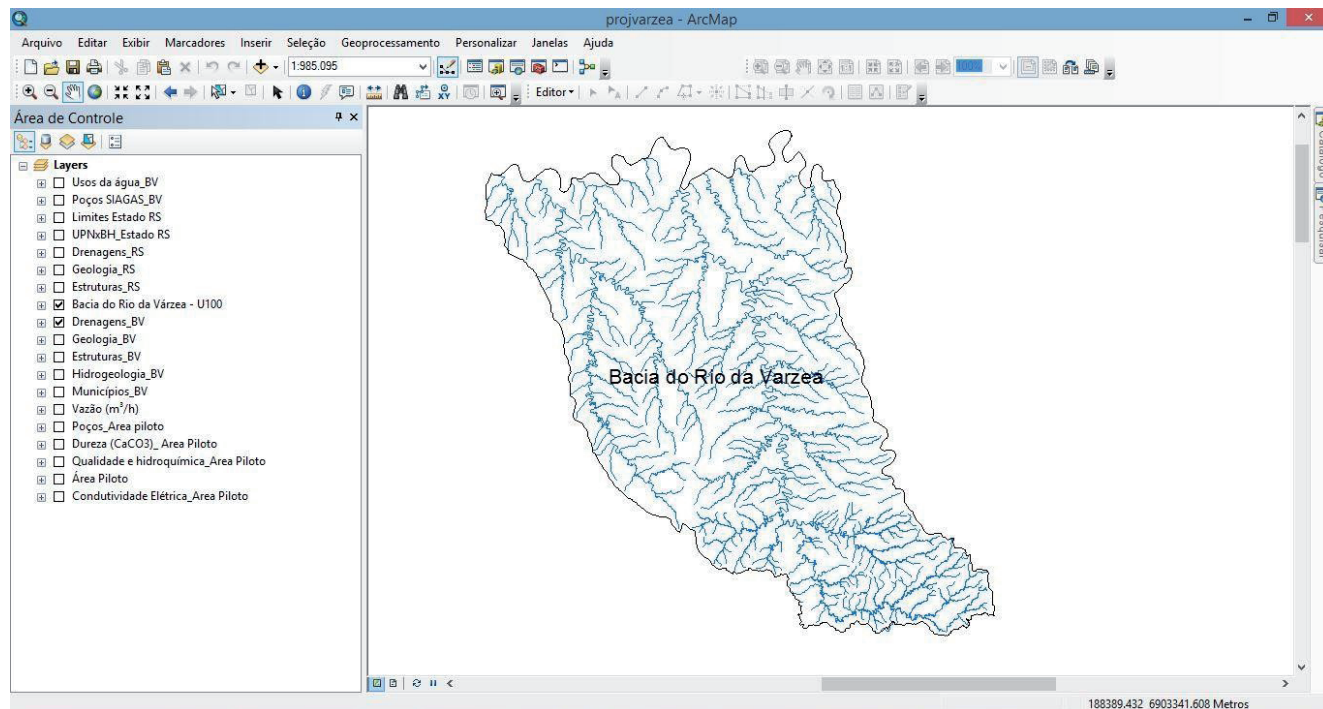


Figura 3. Layout do Banco de Dados em ambiente SIG

FID	Shape *	nome	muni	utm	utm	na	k	ca	mg	cl	co3	hco	so4	ce
0	Ponto	JC 716	Cristal do Sul	28032	696313	4	0	20.558112	6.232977	2.127	0	46.64	42.747358	160
1	Ponto	JC 765	Rodeio Bonito	28524	695847	11.8	0	19.223845	5.828064	1.418	0	72.16	35.06244	135
2	Ponto	JÁ 983	Rodeio Bonito	28530	695645	13	0	9.611922	2.91464	1.7725	0	62.48	16.129032	120
3	Ponto	JC 711	Cristal do Sul	27826	696106	14	0	12.814563	3.884971	2.836	0	89.76	0.960615	220
4	Ponto	JC 725	Cristal do Sul	27628	696051	16.4	0	5.339068	1.618434	1.418	0	80.96	4.516129	250
5	Ponto	JC 749	Rodeio Bonito	28900	696332	19.8	0	6.407281	1.943093	1.418	0	63.36	3.064516	127
6	Ponto	JÁ 991	Cristal do Sul	27823	695826	20	0	16.019204	4.856518	1.418	0	87.12	28.818444	307
7	Ponto	JP 137	Frederico Westphalen	26558	698114	21.4	0	12.280456	3.723249	2.127	0	89.76	3.709677	187
8	Ponto	JC 723	Cristal do Sul	27429	696130	22.5	0	8.543709	2.589981	1.7725	0	72.16	5.483871	224
9	Ponto	JC 737	Ametista do Sul	29014	696968	34.4	0	2.670534	0.809825	1.06	0	88	31.290322	275
10	Ponto	JC 696	Taquaruçu do Sul	25915	696832	44	0	17.087417	5.179961	1.418	95.04	52.8	1.935484	444
11	Ponto	JC 699	Taquaruçu do Sul	25829	696465	48	0	6.407281	1.943093	1.7725	3.52	100.32	4.677419	370
12	Ponto	JC 762	Rodeio Bonito	28927	696092	61.6	0	1.60232	0.485165	1.42	0	104.72	49.951969	141
13	Ponto	JC 757	Rodeio Bonito	27922	695771	67.5	0	2.670534	0.809825	2.13	0	140.8	8.387096	281
14	Ponto	JC 740	Ametista do Sul	28297	696919	72	0	22.960592	6.961333	1.0635	77.44	103.84	6.612903	782
15	Ponto	JC 730	Ametista do Sul	28163	697113	93.5	0	1.60232	0.485165	1.418	108.24	0	2.82	781
16	Ponto	JC 708	Taquaruçu do Sul	25899	697060	103.5	0	4.804961	1.456712	1.418	49.28	73.92	94.620557	397
17	Ponto	JÁ 987	Rodeio Bonito	28266	696351	113	0	4.538908	1.376459	2.13	109.12	19.36	17.096774	165
18	Ponto	JC 742	Ametista do Sul	28202	697088	144.2	0	0	0	2.127	162.8	3.08	16.854838	497
19	Ponto	JC 728	Ametista do Sul	27891	697157	0	0	5.607121	1.699903	11.344	0	0	0	1800
20	Ponto	JC 720	Cristal do Sul	27436	696433	24.8	0	12.014403	3.642996	2.127	0	116.16	0.725806	294
21	Ponto	JC 721	Cristal do Sul	27442	696429	17.965517	0	5.073015	1.538181	2.836	8.8	44.88	2.532258	272
22	Ponto	4795/ASK1	Ametista do Sul	27891	697112	122	0	1	0	12	66	89	73.3	578

Figura 4. Exemplo de consulta dos dados de qualidade da água subterrânea, dentro do Banco de Dados, em ambiente SIG

Quadro 2. Estrutura do banco de dados de águas subterrâneas da Bacia do Rio da Várzea

Dados	Formato ³
Perímetro da Bacia do Rio da Várzea	.shp
Delimitação dos municípios pertencentes à Bacia do Rio da Várzea	.shp
Hidrografia da bacia	.shp
Mapa estrutural da bacia	.shp
Geologia da bacia	.shp
Hidrogeologia da bacia	.shp
Poços cadastrados no SIAGAS ¹	.shp
Capacidade específica dos poços	.shp
Classificação dos usos das águas subterrâneas ²	.shp
Classificação das águas subterrâneas conforme Portaria MS 2914/11	.shp

¹Dados obtidos por meio de acesso ao SIAGAS (2014); ²Dados obtidos por meio do tratamento daqueles pesquisados no site do IBGE (2010); ³.shp: Shapefile; .xls: Excel.

3.2 Qualidade das águas subterrâneas

Em observância à Portaria do Ministério da Saúde nº 2914 (Brasil 2011), constata-se que 35 poços do universo amostrado (total de 503), apresentaram desconformidade em um ou mais parâmetros químicos avaliados, conforme apresentado na tabela 1 e figura 5.

O íon fluoreto (F⁻) apresentou teor maior do que 1,5 mg/L (Valor Máximo Permitido - VMP pela legislação vigente), em 33 poços na porção norte da bacia. Ressaltam-se os teores encontrados em três dos poços: 10,6 mg/L em Frederico

Westphalen (poço nº 6100/FDW1), 7,5 mg/L em Vicente Dutra (poço nº 4300002486) e 22,0 mg/L em Iraí (poço nº 4300023593).

O íon sulfato (SO₄⁻) apresentou teores superiores a 250 mg/L (VMP) em seis poços, sendo estes: nº 4300022777 em Pinheirinho do Vale (357 mg/L), nº 4300022773 em Vista Alegre (251 mg/L), nº 4300017432 em Rondinha (320 mg/L), nº 4300023372 em Barra do Guarita (937 mg/L), nº 4300020514 (549,0 mg/L) e nº 4300002486 (575,0 mg/L) em Vicente Dutra.

Os poços nº 4300020514 e nº 4300002486 localizados em Vicente Dutra, além de apresenta-

rem alto teor de sulfatos, apresentaram teores do íon cloreto (Cl⁻) de 550 mg/L (VMP 250 mg/L) e sódio (Na⁺) de 357,0 mg/L (VMP 200mg/L), respectivamente. Além disto, o poço n^o 4300002486 apresentou, ainda, teor de STD de 1244,8 mg/L (VPM 1000,0 mg/L).

Destaca-se o poço n^o 4300023372 localizado em Barra do Guarita, que além de apresentar teor de sulfatos de 937 mg/L (VMP 250 mg/L), apresentou teores significativos de sódio 771,0 mg/L (VMP 200 mg/L), cloretos 901 mg/L (VMP 250 mg/L), flúor 1,6 mg/L (VMP 1,5 mg/L), STD

3040,7 mg/L (VMP 1000 mg/L) e dureza 945 mg/L (VMP 500 mg/L). Todas essas concentrações se encontram acima do permitido pela legislação vigente. Esse poço foi perfurado em solo argiloso vermelho amarronzado de 0 a 5 m, seguido de basalto dos 5 aos 243 m (profundidade final). A água apresentou temperatura de 25,4 °C e pH 9,4. Este poço pertence à Prefeitura Municipal e foi perfurado com finalidade de abastecimento urbano, não havendo informações quanto à situação atual de uso.

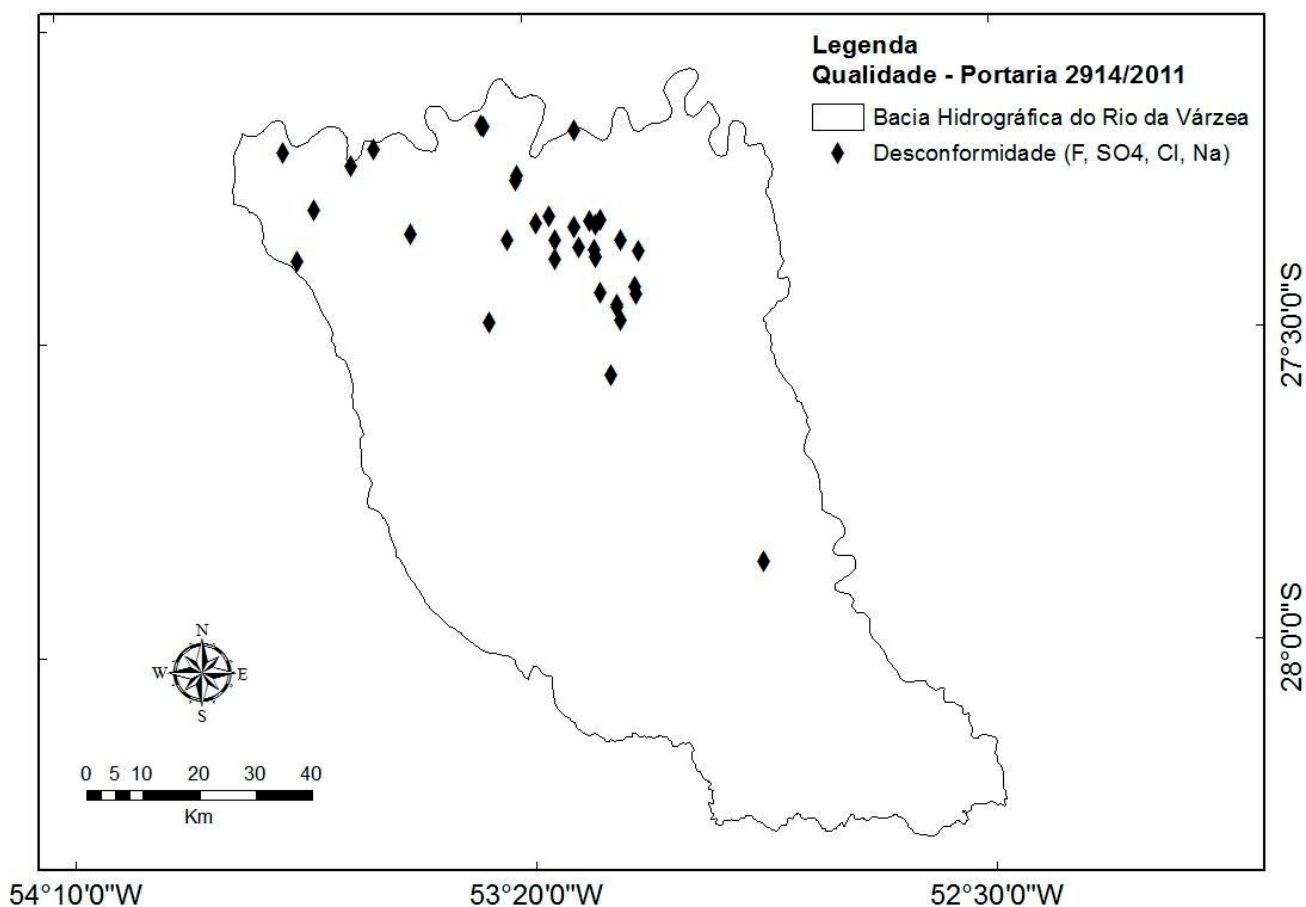


Figura 5. Poços amostrados que apresentaram desconformidade em um ou mais parâmetros químicos avaliados em relação à Portaria n^o 2914/11 do Ministério da Saúde

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos da água dos poços amostrados comparados com a legislação vigente

Poço	²³ Na ⁺ 200 mg/L	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻ 250 mg/L	CO ²⁻ 3	HCO ⁻ 3	SO ²⁻ 250 mg/L	CE	pH	F ⁻ 1,5 mg/L	Dureza 500 mg/L	⁶ STD 1000 mg/L
4300015409	117,00	NA	1,00	0,29	13,00	0,00	4,00	104,00	⁵ NA	10,00	4,66	3,70	⁵ NC
4300021940	79,00	NA	6,20	0,49	3,29	0,00	68,00	5,60	505,00	9,50	1,70	17,00	328,30
1JC 731	5,25	NA	0,19	0,09	0,08	2,23	3,00	0,83	276,00	9,70	2,80	14,00	179,40
5222/ABN2	43,00	31,00	52,70	7,20	2,00	0,40	NA	75,00	337,00	9,60	3,43	5,90	219,10
JC 741	3,13	NA	0,11	0,05	0,04	3,75	5,86	0,25	286,00	9,40	2,90	8,00	185,90
4300021943	74,00	NA	5,00	2,00	2,67	0,00	70,00	16,60	343,00	9,40	2,90	NA	223,00
JC 730	4,07	NA	0,08	0,04	0,04	3,61	NA	0,06	781,00	10,20	2,98	6,00	507,70
JC 732	6,18	NA	0,16	0,08	0,08	1,94	0,14	1,29	400,00	10,50	7,10	12,00	260,00
4300021931	122,00	NA	1,00	NA	12,00	0,00	89,00	73,30	578,00	9,50	2,40	2,00	375,70
4300015414	68,00	NA	0,30	0,20	NA	0,00	139,00	3,90	358,00	9,40	1,59	1,80	232,70
6126/TDA1	68,00	99,00	5,60	3,29	6,20	0,49	NA	79,00	505,00	9,40	4,60	8,80	328,30
4300023372	771,00	0,00	369,00	6,00	901,00	0,00	2,00	937,00	4678,00	9,40	1,60	945,00	3040,70
4300021356	66,00	20,00	1,80	0,97	0,87	0,00	100,00	6,30	271,00	8,20	4,60	8,80	176,20
4300021363	192,00	0,40	32,10	0,20	89,00	0,00	4,90	114,50	1045,00	9,50	1,60	80,00	679,30
3117/PUA 2	43,03	59,95	9,49	4,99	NA	0,90	0,50	82,00	326,00	9,80	4,80	3,00	211,90
4300021360	63,00	0,30	2,00	0,20	NA	0,00	76,90	3,30	253,00	9,30	2,40	5,00	164,50
6100/FDW1	49,00	39,00	94,00	113,00	38,00	2,00	NA	120,00	703,13	7,60	10,60	103,00	457,00
4300021358	73,00	NA	4,60	1,60	5,84	0,00	43,00	37,80	338,00	9,50	2,90	19,00	219,70
4300023593	NA	NA	4,50	11,40	194,00	0,00	232,00	224,00	NA	8,30	22,00	9,00	NC
4300023670	109,00	NA	0,80	0,50	4,00	56,40	115,90	33,40	469,00	9,30	2,20	2,00	304,90
4300023419	34,00	0,10	5,00	0,70	1,00	26,00	51,00	NA	197,00	9,40	1,70	15,00	128,10
4300022777	NA	NA	80,00	2,00	31,00	13,00	33,00	357,00	932,00	9,10	1,30	206,00	605,80
4300021834	62,00	0,70	3,00	0,90	2,00	0,00	108,00	8,20	301,00	9,60	3,90	12,00	195,70
JA 986	4,44	NA	0,37	0,19	0,04	2,14	0,64	0,20	225,00	7,00	2,26	28,00	146,30
4300021850	81,00	0,30	1,00	0,10	11,00	53,00	93,00	16,00	431,00	9,90	3,60	3,00	280,20
JC 743	2,61	NA	0,40	0,20	0,04	0,00	NA	NA	205,00	9,50	3,05	30,00	133,30
JC 768	2,61	NA	0,21	0,11	0,04	0,00	NA	0,12	189,00	9,70	1,90	16,00	122,90
JA 987	4,92	NA	0,23	0,11	0,06	3,64	0,32	0,36	165,00	7,90	1,74	17,00	107,30
4300017432	65,85	0,34	5,39	0,23	4,03	0,00	NA	320,00	406,00	8,90	0,21	9,00	263,90
4300023475	167,00	NA	1,00	0,22	NA	71,00	89,00	130,00	NA	9,60	5,40	3,50	NC
4300023487	64,00	NA	4,20	3,10	0,72	51,00	11,00	38,40	366,00	8,60	1,80	23,00	237,90
4300020514	NA	NA	86,50	10,70	550,00	0,00	116,00	549,00	NA	7,80	2,60	253,00	NC
430002486	357,00	0,60	60,00	1,00	7,00	13,00	13,00	575,00	1915,00	9,40	7,50	157,00	1244,80
4300022773	40,00	NA	12,00	6,00	NA	0,00	73,00	251,00	635,00	7,50	0,60	53,00	412,80
4300023477	78,00	NA	3,00	1,00	NA	50,00	96,00	18,00	374,00	9,50	2,10	12,00	243,10

¹Poços com as análises realizadas no LARH/FW e valores de CE e pH obtidos por Schroeder (2014);

²AM: Ametista do Sul; BG: Barra do Guarita; FW: Frederico Westphalen; IR: Irai; NT: Novo Tiradentes; PV: Pinheirinho do Vale; RB: Rodeio Bonito; RO: Rondinha; SB: Seberi; TP: Tenente Portela; VD: Vicente Dutra; VA: Vista Alegre; VG: Vista Gaúcha;

³Sódio (mg/L Na⁺), potássio (mg/L K⁺), cálcio (mg/L Ca²⁺), clorretos (mg/L Cl⁻), carbonatos (mg/L CO₃²⁻), bicarbonatos (mg/L HCO₃⁻), sulfatos (mg/L SO₄²⁻), fluoretos (mg/L F⁻), condutividade elétrica (µS/cm CE), pH, dureza total (mg/L CaCO₃), sólidos totais dissolvidos (mg/L STD);

⁴Teores em negrito estão acima do VMP pela legislação (Brasil 2011);

⁵NA: Não avaliado; NC: não calculado;

⁶STD: calculados por meio do software Qualigraf v.1.17 (FUNCEME 2014)

4 CONCLUSÕES

A base de dados elaborada a partir deste estudo é uma ferramenta que possibilita a identificação de regiões onde se faz necessário o monitoramento da água subterrânea e a sua correta gestão.

Este banco de dados pode ser replicado para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos em estudos regionais ou semi regionais, como é o caso de outras bacias hidrográficas do Estado e, com a inclusão de dados quantitativos e de uso das águas, possibilitará:

- o detalhamento de zonas com maior potencialidade hídrica subterrânea (produtividade);
- o zoneamento detalhado das características hidroquímicas das águas subterrâneas identificando zonas potenciais para abastecimento público e zonas com necessidades específicas de tratamento (conforme o íon);
- a utilização dos resultados e, principalmente, do banco de dados em SIG, como ponto de partida no desenvolvimento dos estudos de águas subterrâneas em planos de bacia hidrográfica.

A estruturação do banco de dados gerada por meio deste estudo serve de ponto de partida para todo e qualquer sistema de informação que venha a ser desenvolvido no processo de gestão da Bacia do Rio da Várzea. O banco de dados permitiu a reunião, organização, análise e difusão de informações das águas subterrâneas da bacia possibilitando apoio à tomada de decisão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas – FIPT por ter proporcionado a Bolsa de Iniciação Tecnológica (Chamada 06/2014) e, também, à Universidade Federal de Santa Maria - UFSM Campus de Frederico Westphalen, pela colaboração realizada por meio do Laboratório de Recursos Hídricos – UFSM/FW e ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM/SUREG- PA, pelo apoio ao estudo.

REFERÊNCIAS

ABAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 2014. Educação.

Beser De Deus L. A. et al. 2011. A utilização de sistema de informação geográfica como suporte ao gerenciamento de Bacias Hidrográficas Transfronteiriças – SIG GEOAMAZONAS. Revista Geográfica de América. Número especial EGAL, 2011. Costa Rica. 17 p.

Brasil 1997. Lei Nº 9433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. 17p.

Brasil 2008. Resolução Conama nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Publicada no DOU nº 66, de 7 de abril de 2008, Seção 1, 64-68p.

Brasil 2011. Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 34p.

CBHV - COMITÊ DE GERENCIAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DA VÁRZEA 2010. Comitê Várzea.

CBHV - COMITÊ DE GERENCIAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DA VÁRZEA 2014. Termo de Referência. 2014.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS 2001. Resolução n. 17 de 29 de maio de 2001.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS 2008. Resolução n. 91 de 05 de novembro de 2008. Dispõe sobre os procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL 2002. Banco de dados: GEOBANK.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL 2015. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS.

Conte B. et al. 2013. Análise espaço temporal do uso do solo de parte da Bacia Hidrográfica do Rio

- da Várzea nos anos de 1985, 1996 e 2010, RS, Brasil. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer – Goiânia, v.9, n.16, 215 p.
- Ecoplan 2007. Relatório Síntese da Fase A – RSA. Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul. Junho/2007.
- Esri 2014. ArcGIS for Server, v.10.
- FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER 2013. Biblioteca digital: base cartográfica digital do RS 1: 250.000. 2005.
- FUNCEME - FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. Qualigraf v.1.17. 2014.
- Filho W. D. C et al. 2002. Complementação de análises físico-químicas para a utilização em estudos hidroquímicos. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Florianópolis.
- IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA 2001. Mapeamento das unidades territoriais: Malha Municipal Digital do Brasil.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA 2010. Resultados Preliminares do Universo do Censo Demográfico 2010 – CENSO 2010.
- MACHADO J. L. F, FREITAS A. M. de. 2005. Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: relatório final. Porto Alegre: CPRM. 65p.
- Rio Grande do Sul 1994. Lei Estadual n.º 10.350, de 30 de dezembro de 1994. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul. Ministério Público do Estado do Rio Grande do Sul – RS.
- Rio Grande do Sul 2004. Decreto n.º 43.488, de 08 de dezembro de 2004. Institui o Comitê de Gerenciamento da Bacia do Rio da Várzea. Assembléia Legislativa do Rio Grande do Sul – RS.
- SEMA - SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE 2010. Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea.
- SEMA - SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE 2006. Relatório Anual sobre a situação dos Recursos Hídricos no Estado do Rio Grande do Sul.
- SCHROEDER J. K. 2014. Avaliação da ocorrência do íon fluoreto em águas do Aquífero Serra Geral utilizadas para o abastecimento público na região noroeste do Rio Grande do Sul, 2014. 75p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Ambiental e Sanitária) Universidade Federal de Santa Maria.

INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE MASSA E ENCHENTES EM MATO GROSSO, BRASIL: RESULTADOS DE UMA SETORIZAÇÃO DO RISCO GEOLÓGICO

INVENTORY OF MASS MOVEMENTS AND FLOODS IN MATO GROSSO, BRAZIL: RESULTS OF A GEOLOGICAL RISK MAPPING

DARIO DIAS PEIXOTO

Serviço Geológico do Brasil – Brasília. E-mail: dario.peixoto@cprm.gov.br

HAMILCAR TAVARES

Serviço Geológico do Brasil – São Paulo. E-mail: hamilcar.tavares@cprm.gov.br

RODRIGO LUIZ GALLO FERNANDES

Serviço Geológico do Brasil – Brasília. E-mail: rodrigo.fernandes@cprm.gov.br

DOUGLAS CABRAL

Serviço Geológico do Brasil – Goiânia. E-mail: douglas.cabral@cprm.gov.br

GUILHERME PERET

Serviço Geológico do Brasil – Goiânia. E-mail: guilherme.peret@cprm.gov.br

RESUMO ABSTRACT

O artigo apresenta os resultados do mapeamento de riscos realizado no período entre 2012 e 2014 em quinze municípios do estado do Mato Grosso - Brasil, de acordo com a metodologia desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. A oportunidade do presente trabalho foi gerada a partir da estratégia federal de gestão de catástrofes, composto por setores do governo envolvidos na análise de risco geológico, aplicados sobre um grupo de municípios previamente identificados como os mais críticos do país, no contexto de desastres naturais envolvendo vítimas. No artigo são apresentadas questões como os cenários identificados, as considerações sobre os conceitos estudados, a metodologia utilizada e notas sobre os resultados obtidos com o mapeamento.

Palavras-chave: Risco Geológico, Serviço Geológico do Brasil, Setorização de Risco, Mato Grosso

The article shows the results of risk mapping carried out in the period between 2012 and 2014 in fifteen municipalities in the state of Mato Grosso - Brazil, according to the methodology developed by the Brazilian Geological Service in partnership with the Institute of Technological Research of Sao Paulo. The opportunity of this work was generated from federal strategy for management of disasters, composed of government sectors involved in the analysis of geological risk, applied over a group of municipalities previously identified as the most critical of the country, in the context of natural disasters involving victims. In article are shown questions as the scenarios identified, the concepts studied, the methodology used and notes on the results obtained with the mapping.

Keywords: Risk Geological, Geological Service of Brazil, Risk Mapping, Mato Grosso

1 INTRODUÇÃO

É de consenso mundial o crescimento das ocorrências de fenômenos naturais que, intensificados ou não pela ação humana, tem tido maior impacto sobre áreas habitadas, causando prejuízos materiais e/ou perdas de vidas (Jha, Bloch e Lamond, 2012). No Brasil, os principais fenômenos relacionados a desastres naturais são os deslizamentos de encostas e as inundações, que estão associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados, repetindo-se a cada período chuvoso mais severo (Carvalho e Galvão, 2006).

Acompanhando a tendência de crescimento de desastres naturais, as políticas públicas do governo brasileiro vêm reconhecendo sua responsabilidade sobre o tema, e destinando mais recursos financeiros para a gestão de risco. Enquanto questões como a duração e frequência dos fenômenos climáticos naturais ainda estão fora do controle humano, existem variáveis dentro da vulnerabilidade dos ambientes urbanos que podem receber atenção dos gestores públicos no sentido de diminuir os efeitos negativos dos desastres. Sobre estas variáveis as esferas de governo têm atuado em parceria, operando ferramentas que fortalecem a capacidade de resiliência dos aglomerados urbanos.

Nesse contexto de mudança, houve a reestruturação do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil por meio da Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, além de um esforço técnico voltado à identificação dos principais desastres recorrentes no país e seleção dos principais municípios brasileiros onde os desastres se repetiram nos últimos 20 anos. Por meio dos registros municipais de situação de emergência e estado de calamidade pública, foram identificados 821 municípios considerados mais críticos para a intervenção federal.

No mesmo contexto foi estabelecida uma interação multissetorial entre diversos órgãos públicos que atuavam com a gestão de risco natural de forma isolada, e da reunião entre estes agentes públicos pôde ser definida uma abordagem organizada em objetivos e metas dentro de um programa de governo denominado *Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais*, lançado em agosto de 2012 (Bertone e Marinho, 2013).

Dentre as instituições identificadas pelos serviços relevantes à gestão nacional de desastres,

destaca-se a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, com experiência acumulada ao longo de mais de 40 anos de serviços em campos como o mapeamento das características geológicas do território brasileiro, monitoramento histórico dos índices fluviométricos em diversos rios nacionais e da própria atuação com identificação de riscos geológicos (Cprm, 2014).

A CPRM recebeu, como missão principal, detalhar o quadro de risco geológico de cada um daqueles 821 municípios e distribuir o resultado entre os demais órgãos federais, o que fez com que fossem designados inúmeros geólogos ao campo dentro do período de 2012 a 2014. Este extenso trabalho chegou ao seu final em setembro de 2014, quando a CPRM fez o comunicado oficial no 47º Congresso Brasileiro de Geologia, e onde foram apresentados, alguns dos resultados das setorizações realizadas em todo o Brasil.

Com esta mesma motivação de apresentação de resultados, este artigo tem por objetivo descrever as observações realizadas durante a execução da ação emergencial de *Setorização de Riscos a Movimentos de Massa e Inundações* no estado de Mato Grosso, para o período 2012-2014.

2 CONCEITOS E PROCEDIMENTOS

A Ação Emergencial para Reconhecimento de Áreas de Alto e Muito Alto Risco a Movimentos de Massa e Enchentes está calcada no Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais, apresentado à sociedade na forma como um programa dentro do Plano Plurianual 2012-2015. Tal programa esta segmentado em quatro eixos principais: *Mapeamento*, focado na produção de mapas de suscetibilidade, mapas de setorização de riscos e cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais; *Monitoramento e Alerta*, que visa estruturar a rede nacional; *Prevenção*, voltados à execução de obras, que foram incorporadas ao Programa de Aceleração do Crescimento e configuram a carteira PAC-Prevenção; e *Resposta*, voltado ao socorro, assistência e reconstrução.

O alvo daquele Plano recaiu sobre uma listagem de 821 municípios em todo o país considerados mais críticos em relação a desastres naturais.

{Bertone, 2013, Gestão de Risco e Resposta a Desastres Naturais: A Visão do Planejamento} Bertone e Marinho (2013) apontam que a estruturação desta listagem remonta ao período de elaboração do PPA 2012-2015, quando se buscou apoio do Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres da Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED/UFSC) para proceder à identificação dos principais desastres que ocorrem no país.

Ainda segundo os autores, os municípios críticos foram selecionados conforme a recorrência dos principais desastres, o número de pessoas desalojadas ou desabrigadas e o número de óbitos nos últimos 20 anos (entre 1991 e 2010), dados estes coletados a partir dos registros estaduais e municipais de situação de emergência e de estado de calamidade pública. A consolidação da listagem contou ainda com o apoio de informações do IBGE e IPT, fundamentando assim o número de 821 municípios “que representam 94% das mortes e 88% das pessoas afetadas”.

Dentro deste Plano, a CPRM foi incumbida de desenvolver o eixo mapeamento, ou seja, produzir conhecimento geológico-geotécnico em municípios com alto e muito alto risco a deslizamentos e inundações, visando “dar suporte à prevenção de desastres naturais no país e ao atendimento às necessidades de um planejamento urbano para ocupações futuras, identificado com as boas práticas de redução de risco” (Sampaio *et al.*, 2013).

Esta tarefa foi enfrentada pelo Serviço Geológico do Brasil a partir de quatro linhas de ação: 1. Setorização de Riscos a Movimentos de Massa e Inundações; 2. Cartas Municipais de Suscetibilidade a Movimentos de Massa e Inundações, 3. Desenvolvimento e Implementação do Sistema de Cadastro de Deslizamentos e Inundações – SCDI, e 4. Cursos de Capacitação de Técnicos Municipais na Gestão de Riscos, das quais a primeira foi desenvolvida como uma **ação emergencial** “com vistas a proceder à identificação, delimitação e caracterização dos setores considerados como de risco alto e muito alto” (Sampaio *et al.*, 2013).

Estas linhas de ação delimitam a atuação do Serviço Geológico dentro de um campo mais amplo, do qual fazem parte outras instituições e outras áreas de conhecimento. A vasta dimensão do termo Risco nos leva a abordar a conceituação

e marcar a delimitação teórica para o Risco Geológico.

Conceitos

O termo Risco está relacionado a conjuntos de relações causa-consequência com interferência em tantas áreas de conhecimento quantos forem seus processos geradores. Dentro do contexto dos desastres naturais, enfoca-se o termo perante definições como a do Glossário de Defesa Civil: estudos de riscos e medicina de desastres (Brasil, 2002), onde o termo **risco** representa “1. medida de dano potencial ou prejuízo econômico expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência e de intensidade ou grandeza das consequências previsíveis”. Para Carvalho & Galvão (2006), o termo **risco** está associado a “probabilidade de ocorrência de algum dano a uma população (pessoas ou bens materiais)”, e está expressa na fórmula mostrada na figura 01.

$$R = (fA) * C(fV) * g - 1$$

“Onde um determinado nível de risco **R** representa a probabilidade **P** de ocorrer um fenômeno físico (ou perigo) **A**, em local e intervalo de tempo específicos e com características determinadas (localização, dimensões, processos e materiais envolvidos, velocidade e trajetória); causando consequências **C** (às pessoas, bens e/ou ao ambiente), em função da vulnerabilidade **V** dos elementos expostos; podendo ser modificado pelo grau de gerenciamento **g**, ou seja, o incremento no gerenciamento diminui o risco.”

Figura 1. Equação do Risco segundo Carvalho & Galvão (2006)

Riscos Ambientais aparecem como a classe mais ampla (Parizzi, 2014), respectivamente desmembrada nas classes de riscos Naturais, Tecnológicos e Sociais. O risco geológico aparece nesta estrutura como uma subdivisão dentro dos riscos Naturais, associado por sua vez ao mesmo nível dos riscos Atmosféricos e Hidrológicos, e está definido como a “possibilidade de um processo geológico ou fenômeno causar impactos sobre a saúde, danos materiais, perda de meios de subsistência e de

serviços, perturbações sociais e econômicas ou danos ambientais.”

O Ministério da Integração Nacional apresenta a hierarquização de riscos naturais na forma da Instrução Normativa nº 01, de 24 de agosto de 2012, que institui a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres, COBRADE (Tabela 01), onde as categorias de riscos naturais e tecnológicos estão segmentadas nos grupos geológico, hidrológico e meteorológico e subgrupos respectivos. Na tabela abaixo, estão apresentadas as

tipologias dos grupos geológico e hidrológico, que incluem também processos geodinâmicos como terremotos e emanações vulcânicas. Contudo, ressalta-se que, na finalidade específica do programa de governo, a ação emergencial da CPRM esteve focada nas tipologias envolvidas com os subgrupos movimento de massa e também do grupo hidrológico, ainda que outras ocorrências mais marcantes tivessem sido registradas, a exemplo do subgrupo erosão.

Tabela 1. COBRADE – Grupos Geológico e Hidrológico. Fonte: Ministério da Integração Nacional

Categoria	Grupo	Subgrupo	Tipo	Subtipo
Natural	Geológico	Terremoto	Tremor de Terra	-
			Tsunami	-
		Emanação Vulcânica	-	-
			Quedas, Tombamentos e rolamentos	Blocos
				Lascas
		Matações		
		Lajes		
		Movimento de Massa	Deslizamentos	Deslizamento de solo e/ou rocha
			Corridas de Massa	Solo/Lama
				Rocha/Detrito
			Subsidências e Colapsos	-
			Erosão Costeira/Marinha	-
			Erosão de Margem Fluvial	-
			Erosão	Erosão Continental
		Ravinas		
Boçorocas				
Hidrológico	Inundações	-		
	Enxurradas	-		
	Alagamentos	-		

Procedimento

A setorização do risco geológico realizada pela CPRM consiste em uma delimitação espacial, na forma de um polígono, sobre uma área da malha urbana onde há ocorrência ou potencial para sofrer algum tipo de processo, natural ou induzido, que possa causar danos, conforme a metodologia especificamente desenvolvida em Pimentel *et al* (2012) para este fim. Os setores identificados dependem de uma vistoria *in loco*, onde são reconhecidas e confirmadas as condições propícias para a causa de acidentes de maior intensidade. Este procedimento encontra analogia com as

investigações geológico-geotécnicas de superfície (Cerri *et al.*, 2007), ao “identificar em campo as condicionantes naturais e induzidas de processos adversos, reconhecer indícios de seu desenvolvimento, bem como feições e evidências de instabilidade”.

Os setores identificados são organizados em uma representação gráfica e métrica, onde são incluídas fotos com as evidências e indícios observados no terreno e moradias, além da descrição da tipologia do processo e informações para a compreensão das condições das rupturas. Realiza-se uma estimativa ampla sobre o número de moradias e pessoas afetadas ou passíveis de serem afetadas, e apresentam-se sugestões em

relação a possíveis intervenções estruturais e não estruturais, tais como obras de contenção, drenagem, educação ambiental, remoção ou relocação de moradores e moradias.

A finalização dos trabalhos é efetuada por meio do repasse de um relatório para os representantes do município, com apresentação e disponibilização dos mapas em arquivos do tipo PDF (impresso e digital), bem como os dados vetoriais e base de dados para o próprio município. Cópia deste material é enviada para o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (Cenad), Ministério das Cidades e outros órgãos e instituições integrantes do Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais do governo federal (Sampaio *et al.*, 2013).

Vale considerar que a setorização empreendida pela CPRM se aproxima de duas das atividades básicas do modelo padrão de abordagem para

o enfrentamento de acidentes naturais da UNDRRO – Escritório das Nações Unidas para a Redução de Desastres: a **identificação de riscos** e **análise de riscos** (Alheiros, 2008): “Enquanto a identificação dos riscos refere-se aos trabalhos de reconhecimento de ameaças e a identificação das áreas de riscos, incluindo a retroanálise de acidentes já ocorridos; a análise de riscos inicia-se a partir da identificação, aprofundando informações em termos de elementos das áreas de risco (formas de ocupação, vulnerabilidade, presença de cortes e aterros, macro e micro drenagem, entre outros) e buscando hierarquizar as diferentes situações em níveis de risco (baixo, médio alto e muito alto).”

A hierarquização dos níveis de riscos é realizada com base na metodologia do ministério das cidades (Carvalho e Galvão, 2006), revisada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, que estabelece quatro graus de acordo com critérios para definição da probabilidade de ocorrência de processos destrutivos (tabela 02).

Tabela 2. Graus de probabilidade de ocorrência de processos destrutivos. (Fonte: Carvalho e Galvão, 2006)

Graus de Risco	Descrição
R1 Baixo	Não há indícios de desenvolvimento de processos destrutivos em encostas e margens de drenagens. Mantidas as condições existentes, não se espera a ocorrência de eventos destrutivos.
R2 Médio	Observa-se a presença de alguma(s) evidência(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porém incipiente(s). Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
R3 Alto	Observa-se a presença de significativa(s) evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes etc.). Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
R4 Muito Alto	As evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de escorregamento, feições erosivas, proximidade da moradia em relação ao córrego etc.) são expressivas e estão presentes em grande número e/ou magnitude. Mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.

Sem prejuízo ao que já foi colocado – que representa a essência do trabalho que foi desenvolvido durante a setorização de áreas em todo o país – pretende-se aqui adicionar alguns pontos em relação a como foram desenvolvidos os trabalhos, fruto do amadurecimento deste grupo durante os três anos de aplicação desta metodologia. Assim, uma forma de apresentar os procedimentos desenvolvidos seria apresentar as seguintes etapas:

Pré-campo: Uma vez encaminhada, pela coordenação nacional, a listagem de municípios aos pesquisadores, estabeleceu-se um contato inicial com os representantes oficiais dos municípios

respectivos para: apresentar à prefeitura a equipe da CPRM que iria atuar em campo; conhecer os representantes da defesa civil no município, mensurar previamente a quantidade de setores; e marcar datas específicas para encontros. O valor dessa ação fica demonstrado por evitar choques com agendas municipais (feriados locais) e também com o próprio funcionamento das prefeituras, que em algumas localidades funciona em meio expediente. Mensurar previamente o tamanho do serviço a ser feito tornou mais fácil programar uma agenda considerando o tempo médio gasto em cada município. Os representantes estaduais

das defesas civis também foram informados em todas as ocasiões em que os pesquisadores estiveram em campo.

O pré-campo ainda incluiu levantamentos sobre informações gerais do município sobre as últimas ocorrências de desastres registradas na mídia, bibliografias gerais ou específicas para antecipar os relatórios; e um trabalho de pré-processamento de informações georreferenciadas, incluindo o carregamento de shapes de limites municipais, conversão de arquivos kml e localização de arquivos em formato CAD.

Campo: Esta etapa de coleta primária é representada essencialmente pelo que foi colocado nos parágrafos iniciais, e é iniciada com o deslocamento para o município a ser setorizado. Os deslocamentos são um caso específico em regiões extensas como o Centro - Oeste e Norte do Brasil, onde, para chegar a algumas localidades são necessários três dias de carro antes que sejam iniciados os trabalhos. Os veículos usados, no caso desta equipe, foram sempre da própria CPRM, usando a Superintendência de Goiânia como ponto de partida. Outra questão relevante é que os trabalhos de campo estiveram focados quase sempre nas sedes municipais, exceto em casos específicos onde foram observados problemas de gravidade acentuada em distritos ou áreas rurais.

Esta etapa sempre foi realizada em companhia do representante da defesa civil municipal ou, quando na falta deste, um representante da prefeitura que mais estivesse familiarizado com os problemas de risco, o que muitas vezes recaía sobre o engenheiro da secretaria de obras quando não o próprio secretário. A identificação dos setores e a indicação de finalização dos trabalhos de campo eram diretamente proporcionais ao conhecimento do representante municipal no apontamento das áreas mais graves. Ocasionalmente algum material adicional pré-campo foi coletado durante esta etapa, e alguns de importância significativa para ajudar na compreensão do planejamento urbano, como era o caso de arquivos vetoriais da malha de arruamentos e quadras em formato CAD.

Também nesta etapa pode ser incluído um importante trabalho de filtragem: a percepção de risco de cada agente de defesa civil - ou análogo - em cada município difere em grande proporção.

A cada pesquisador coube fazer uma análise para separar, após o apontamento de todas as áreas identificadas, aquilo considerado como risco alto ou muito alto, daquilo considerado como risco médio e baixo. Áreas rurais, por exemplo, apesar de terem sido alvo de observação por parte dos pesquisadores, nem sempre foram consideradas como áreas de risco alto por não afetarem diretamente aglomerados populacionais.

Escritório: Após a finalização da observação em campo, e de posse das informações na forma de pontos GPS e descrições de caderneta, a tarefa esteve voltada a organizar os dados coletados entre os pesquisadores - o que compunha um debate sobre o que cada integrante considerava viável de inserir ou não como polígono oficial -, na organização das fotografias, produção dos arquivos vetoriais (formatos .kml e .shp) e na representação gráfica destinada ao relatório e apresentação (Figura 2).

As etapas de campo e escritório dependeram em grande parte da quantidade de polígonos identificados. No caso de municípios com maior número de material, o procedimento envolvia suspender o campo e iniciar um debate sobre aquilo que já havia sido coletado, organizando as informações. Depois se iniciava o campo novamente para dar continuidade à coleta primária.

Apresentação: Também resultado do amadurecimento ao longo dos anos, individualizou-se a apresentação como uma etapa específica, e de grande importância na divulgação e valorização do trabalho desenvolvido pelo Serviço Geológico. Uma vez com todas as informações prontas em com um bom nível de conhecimento do município e seus representantes, torna-se quase uma consequência destinar à prefeitura um tempo específico para conversar, apresentar os resultados e esclarecer dúvidas.

Mais que isso, a apresentação foi um momento de nivelamento entre os setores do governo municipal a respeito do tema desastres naturais. Uma vez que problemas atuais estão calcados em gestões anteriores, que possuíam outros níveis de informação no passado, este momento foi singular no que tange à formação de consciência para o futuro da gestão de desastres. Ao final, e não menos importante, a etapa de apresentação trata de valorizar ao máximo a prestação de serviço do governo federal - na forma do Serviço Geológico - em benefício das municipalidades.

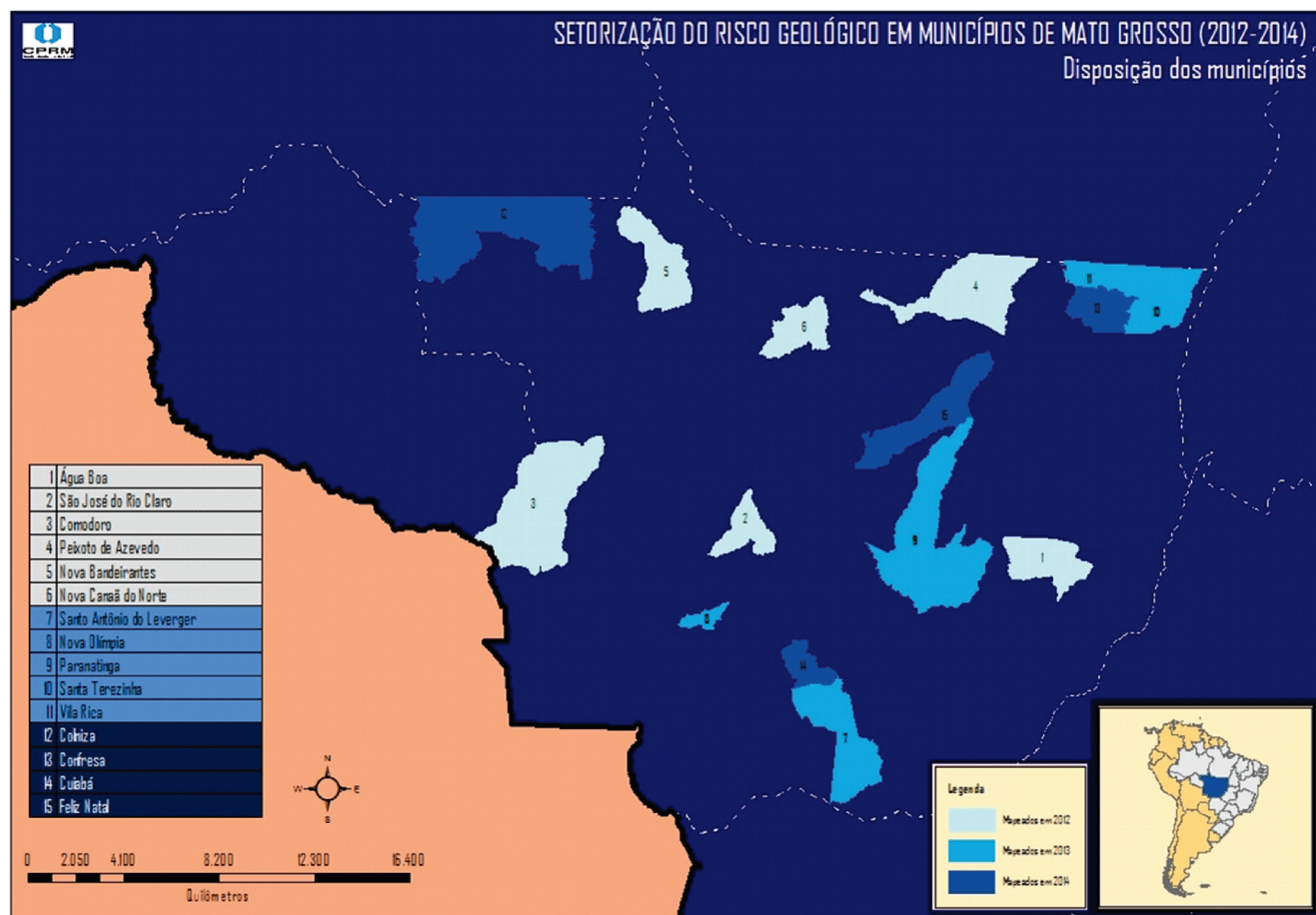


Figura 2. Representação gráfica destinada ao relatório e apresentação.

3 SETORIZAÇÃO DE RISCO EM MATO GROSSO

Os municípios mato-grossenses tratados a seguir foram encaminhados pela coordenação nacional da CPRM, e fazem parte de uma listagem de 821 municípios em todo o país considerados mais críticos em relação a desastres naturais. Segundo Bertone e Marinho {Bertone, 2013, Gestão de Risco e Resposta a Desastres Naturais: A Visão do Planejamento } (2013), a estruturação desta listagem remonta ao período de elaboração do PPA 2012-2015, quando se buscou apoio do Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres da Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED/UFSC) para proceder à identificação dos principais desastres que ocorrem no país.

O Serviço Geológico, responsável pela setorização deste heterogêneo grupo de municípios, distribuiu a tarefa entre geólogos, geógrafos e engenheiros distribuídos pela maioria dos estados

brasileiros “com vistas a proceder à identificação, delimitação e caracterização dos setores considerados como de risco alto e muito alto” (Sampaio *et al.*, 2013).

Ao longo de três anos de trabalho (novembro de 2011 a outubro de 2014), a presente equipe de pesquisadores recebeu uma demanda de 43 municípios nos estados de Tocantins, Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, para a qual houve revezamento e aplicação dos procedimentos de setorização. Com foco no estado de Mato Grosso, iniciamos a discussão apresentando as características essenciais dos quinze municípios selecionados segundo conhecidas fontes de informação nacional (Pnud/Iphea, 2013; Ibge, 2014), como as datas de criação do município, população e IDHM¹, sendo que este último parâmetro está as-

1 IDHM é o índice de desenvolvimento humano municipal. É obtido pela média aritmética de três sub-índices, referentes às dimensões Longevidade (IDH-Longevidade), Educação (IDH-Educação) e Renda (IDH-Renda).

sociado à capacidade de resiliência do município, ou a capacidade de um município propor, discutir e absorver métodos de prevenção de desastres naturais (Marcelino, Nunes e Kobiyama, 2006). Também foram retratadas características dos

municípios nos ambientes hidrológicos, geológicos e padrões de relevo indicados pelo programa Geodiversidade de Mato Grosso (Moraes, 2010). A localização de cada município pode ser observada na figura 3.

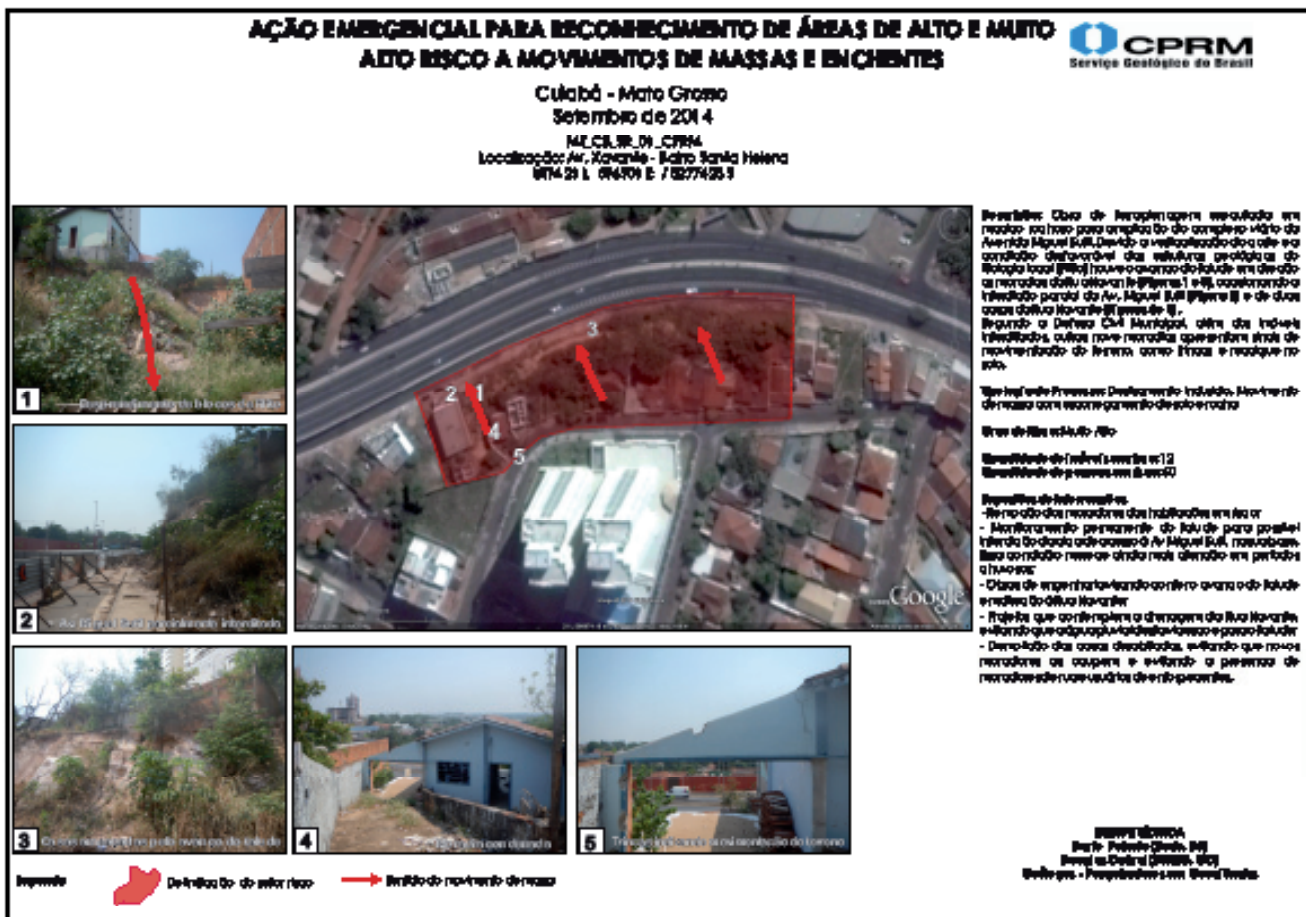


Figura 3. Disposição dos municípios setorizados. Fonte: CPRM, 2014.

Água Boa

Este município, criado em 1979, possui 20.856 habitantes distribuídos em uma área de 7.512,08 km². Pertence à mesorregião Nordeste do Mato Grosso, e fica distante 644 km da capital Cuiabá. Seu IDHM (2010) pontua em 0,729. O município está localizado entre os limites das bacias hidrográficas do Amazonas e do Tocantins, e sua sede é drenada pelos tributários deste último. A geologia identifica folhelhos e argilitos e siltitos da formação neoproterozóica Diamantino (Almeida, 1964a) capeados por coberturas detrito-lateríticas ferruginosas cenozóicas. O relevo conta com

planaltos com declividades entre 0 a 5 graus e amplitudes topográficas de 20 a 50 metros.

São José do Rio Claro

Município criado em 1979, possui 17.124 habitantes distribuídos em uma área de 5.074,56 km². Localizado na região norte mato-grossense, fica distante 317 km de Cuiabá, e seu IDHM (2010) pontua em 0,682. A sede municipal é drenada pelos tributários do rio Claro, todos pertencentes à bacia Amazônica. A geologia indica arenitos, siltitos e argilitos da formação mesozoica Salto das Nuvens (Barros *at al.*, 1982; *apud* Bahia *et al.*,

2006), em relevo associado ao domínio das coberturas sedimentares e vulcanosedimentares mesozoicas e paleozóicas pouco a moderadamente consolidadas.

Comodoro

Município criado em 1986, possui 18.178 habitantes distribuídos em 21.826,65 km². Está localizado no extremo oeste do estado, distante a 638 km de Cuiabá. Seu IDHM (2010) pontua em 0,689. A geologia indica arenitos e argilitos da Formação Utiariti (Mesozóico) (Barros *et al.*, 1982; *apud* Bahia *et al.*, 2006), circundada por coberturas detrito lateríticas, drenados por corpos d'água associados ao rio Piolho, pertencente à bacia Amazônica. O relevo aponta regionalmente para planaltos com declividades entre 0 a 5 graus e amplitudes topográficas de 20 a 50 metros.

Peixoto de Azevedo

Município criado em 1986, possui 30.812 habitantes distribuídos em 14457,35 km². Fica localizado na região norte mato-grossense, distante 676 km de Cuiabá, e seu IDHM (2010) pontua em 0,649. A geologia indica rochas plutônicas paleoproterozoicas da Suíte Intrusiva Matupá (fácies 1), recoberta por sedimentos de depósitos aluvionares neógenos. O relevo aponta para o domínio das superfícies aplainadas degradadas com declividades de 0 a 5 graus e amplitudes topográficas de 10 a 30 metros, associadas localmente com *Inselbergs*. O município é drenado pelos tributários do rio Peixoto de Azevedo, pertencente à bacia Amazônica.

Nova Bandeirantes

Município fundado em 1993, possui 11.643 habitantes distribuídos em 9.573,21 km². Localizado na mesorregião norte mato-grossense, distante aproximadamente 1004 km de Cuiabá, e seu IDHM (2010) pontua em 0,650. A geologia regional apresenta terrenos gnáissicos paleoproterozóicos do complexo Nova Monte Verde arrançados em limites metamórficos com o complexo paleoproterozóico Bacaeri Mogno, associado ainda com a suíte intrusiva Vitória. O relevo está inserido no

domínio de colinas amplas e suaves com declividades entre 3 a 10 graus e amplitudes topográficas entre 20 e 50 metros.

Nova Canaã do Norte

Município criado em 1986, possui 12.127 habitantes distribuídos em 5.966,71 km². Localizado na mesorregião norte mato-grossense, distante 718 km de Cuiabá, e seu IDHM (2010) pontua em 0,686. A geologia aponta para rochas plutônicas paleoproterozóicas da unidade Nova Canaã (unidades 1, 3 e 4) associadas às rochas da suíte intrusiva paleoproterozóica São Pedro. O relevo do município está inserido no domínio das superfícies aplainadas degradadas com declividades de 0 a 5 graus e amplitudes topográficas de 10 a 30 metros, drenados pelos tributários do rio Kaiapá, pertencentes à bacia Amazônica.

Santo Antônio do Leverger

Este município, fundado em 1899, faz fronteira com a capital, da qual está distante 34,3 km. Possui 18.463 habitantes distribuídos em 12301,06 km², e seu IDHM (2010) pontua em 0,656. A geologia conta com filitos e metaarenitos neoproterozóicos do Grupo Cuiabá capeados pelos depósitos sedimentares cenozóicos da Formação Pantanal (Ribeiro Filho *et al.*, 1975) e depósitos aluvionares mais recentes. O relevo do município está inserido nos domínios de planícies fluviais ou fluviolacustres com declividade de 0 a 3 graus e amplitude zero, associadas a superfícies aplainadas degradadas com declividades de 0 a 5 graus e amplitudes topográficas de 10 a 30 metros. O rio Cuiabá e seus afluentes são a principal influência hidrológica da região, que pertence à bacia do Paraná.

Nova Olímpia

Município criado em 1986, possui 17.515 habitantes distribuídos em 1.572,86 km². Localizado na mesorregião sudoeste mato-grossense, dista 203 km de Cuiabá, seu IDHM (2010) pontua em 0,682. A geologia mostra folhelhos, argilitos e siltitos pelágicos neoproterozóicos da formação Diamantino, recobertas por depósitos aluvionares

da formação Pantanal. O relevo do município está associado a terraços fluviais com declividade não superior a 3 graus e amplitude topográfica entre 2 e 20 metros. As formas de relevo são drenadas pelos tributários do rio Branco, bacia do Paraná.

Paranatinga

Município criado em 1979, possui atualmente em torno de 19.290 habitantes distribuídos em 24.272,24 km². Pertence a mesorregião norte mato-grossense, distante 342 km de Cuiabá, seu IDHM (2010) pontua em 0,667. A geologia mostra regionalmente a presença de folhelhos, argilitos e siltitos pelágicos neoproterozóicos da formação Diamantino recobertas por coberturas detrito lateríticas cenozóicas. O relevo do município está relacionado a presença de tabuleiros dissecados com declividades entre zero e três graus, e amplitudes entre 20 e 50 metros. A sede municipal é drenada pelo rio Paranatinga, bacia Amazônica.

Santa Terezinha

Município criado em 1980, possui 7.397 habitantes distribuídos em 6476,34 km². Pertence a mesorregião nordeste, distante 1.165 km de Cuiabá. Seu IDHM (2010) pontua em 0,609. A geologia regional aponta para gnaisses mesoarqueanas do complexo Xingu recobertas por sedimentos por terraços e depósitos aluvionares da Formação Araguaia (Barbosa, *et al.*, 1966). O relevo municipal desenvolve-se na forma de terraços e planícies fluviolacustres com baixas declividades e amplitudes não superiores a 20 metros. A dinâmica hídrica está associada essencialmente ao rio Araguaia, bacia do Tocantins.

Vila Rica

Município criado em 1986, possui 21.382 habitantes distribuídos em 7468,7 km². Pertencente à mesorregião nordeste do estado, fica distante 1.110 km de Cuiabá. Seu IDHM (2010) pontua em 0,688. A geologia indica para rochas granitóides, gnaisses e charnoquitos mesoarqueanos relacionadas ao do complexo Xingu, formando relevos que vão desde degraus estruturais e rebordos erosivos com declividades entre 10 e 45 graus e amplitudes entre 50 e 200 metros, até superfícies

aplainadas degradadas de baixas declividades (zero a cinco graus) e baixas amplitudes (10 a 30 metros). O município é drenado pelos tributários dos rios Xingu e Araguaia.

Colniza

Este município, fundado em 2000, possui 26.381 habitantes distribuídos em 28070,68 km². Localizado na mesorregião norte mato-grossense, fica distante aproximadamente 1.100 km de Cuiabá. Seu IDHM (2010) pontua em 0,611. A geologia indica granitos metamorfizados paleoproterozóicos da Suíte Intrusiva São Pedro associados aos sienogranitos mesoproterozóicos (Aripuanã). O relevo municipal está nos domínios de colinas amplas e suaves, com declividades de 3 a 10 metros e amplitudes entre 20 e 50 metros, drenados por tributários dos rios Aripuanã e Roosevelt, bacia amazônica.

Confresa

Município criado em 1993, possui 25.124 habitantes distribuídos em 5.819,29 km². Pertence à mesorregião nordeste, dista 1.007 km de Cuiabá, e seu IDHM (2010) pontua em 0,668. A geologia aponta para a presença de rochas sedimentares paleoproterozóicas da Formação Gorotire (Amaral, 1974) envolvidas por rochas vulcanoclásticas paleoproterozóicas do Grupo Iriri, ambas capeadas por depósitos aluvionares da formação Araguaia. O relevo resultante está associado a superfícies apainadas degradadas com declividade de zero a cinco graus e terraços aluviais com amplitudes de 2 a 20 metros. Os terrenos são drenados pelos tributários do rio Araguaia, bacia Tocantins.

Cuiabá

Este município, fundado em 1719, possui 551.098 habitantes distribuídos em 3.552,82 km². Localizado na mesorregião Centro Sul, seu IDHM (2010) pontua em 0,785, na faixa de desenvolvimento alto. A geologia aponta para a presença de rochas metamórficas do grupo Cuiabá (subunidades 5 e 6) capeadas pelos depósitos aluvionares da formação Pantanal, e seu relevo figura no domínio das colinas amplas e suaves com 3 a 10 graus de declividade e 20 a 50 metros de amplitude.

A principal influência hidrológica está associada ao rio Cuiabá e seus tributários, todos associados à bacia do Paraná.

Feliz Natal

Este município, criado em 1997, possui 10.933 habitantes distribuídos em 11.491,38 km². Pertence à mesorregião norte mato-grossense, fica distante 514 km de Cuiabá. Seu IDHM (2010) pontua em 0,692. A geologia aponta para a presença de arenitos e siltitos mesozóicos da Formação Salto das Nuvens recobertas por sedimentos inconsolidados cenozóicos da Formação Ronuro (SCHOBENHAUS *et al.*, 1981; *apud* BAHIA *et al.*, 2006). O relevo municipal é representado por chapadas, platôs e baixos platôs dissecados, com declividades não superiores a cinco graus amplitudes não maiores que 50 metros.

3.1 Resultados da setorização em Mato Grosso

A visão geral apresentada na tabela 03 pode ser dividida em dois grupos, onde o primeiro

pertence aos sete municípios onde foram observadas ocorrências de alto e muito alto risco instalado e potencial, o que corresponde a 46% do total. O segundo grupo corresponde aos oito municípios restantes, ou os 54% que não estiveram caracterizados dentro do escopo da setorização, por motivos diferentes que serão abordados a frente.

No grupo dos sete municípios em situação de alto e muito alto risco foram delimitados 21 setores (tabela 03), envolvendo aproximadamente 1284 moradias e 6392 habitantes. Um número de 71,4% setores (15 setores) envolveu a tipologia inundação, enquanto 14,2 % (três setores) envolveu erosão, e 14,2 % (três setores) envolveu movimento de massa.

De fato, há uma correlação estreita entre as tipologias, uma vez que a verificação em campo mostra que uma tipologia tem interferência sobre outra. Eventos hidrológicos têm ação fundamental na formação de processos erosivos e movimentos de massa, e não seria verdadeiro isolar as ocorrências de forma separada, como se não tivessem ligação. Contudo, para a finalidade estatística e descritiva, optou-se por enquadrar os setores segundo o processo predominante observado.

Tabela 3. Resultado geral da setorização 2012-2014

	Município	Tipologia	n° setores
2012	Água Boa	-	-
	São José do Rio Claro	-	-
	Comodoro	Erosão	02
	Peixoto de Azevedo	-	-
	Nova Bandeirantes	-	-
	Nova Canaã do Norte	-	-
2013	Santo Antônio do Leverger	Inundação/Mov. Massa	05
	Nova Olímpia	Inundação/ Mov. Massa	01
	Paranatinga	Inundação	01
	Santa Terezinha	Inundação/ Mov. Massa	03
	Vila Rica	-	-
2014	Colniza	Inundação	01
	Confresa	-	-
	Cuiabá	Inundação/Mov Massa/Erosão	08
	Feliz Natal	-	-
	Total	-	21

Em relação às ocorrências de inundação, destacam-se os municípios de Cuiabá e Santo

Antônio de Leverger, cujas sedes urbanas foram desenvolvidas sobre antigas planícies de inunda-

ção do rio Cuiabá, e onde foram identificados dez dentre os quatorze setores totais. Em Leverger, os polígonos foram desenhados em função das inundações do rio sobre os bairros localizados em áreas de baixada, envolvendo aproximadamente 1585 pessoas em risco periódico. Já em Cuiabá os problemas de inundação pela ação do rio Cuiabá foram sensivelmente diminuídos, pela construção da UHE Manso², que serviu como reguladora de vazão, contendo parte do aporte hídrico daquele tributário. Na capital, entretanto, verificam-se problemas associados à ocupação humana sobre áreas de preservação dos 34 córregos que cruzam a área urbana, e em eventos chuvosos existem pelo menos 350 famílias distribuídas em seis setores de risco.

Em relação à erosão, destaca-se a cidade de Comodoro com as ocorrências mais significativas, onde as formações arenosas do grupo Parecis, predominantemente da formação Utiriti, vêm sendo progressivamente degradadas e propiciam a formação de ravinas e voçorocas entre 400 e 600 metros de extensão. Segundo relatos da defesa civil, moradias já foram desalojadas dos locais mais críticos no passado, e todo ano há um reinvestimento em canalização de água. Estão envolvidas atualmente em torno de 52 pessoas afetadas nos dois polígonos identificados.

Sobre a tipologia movimento de massa, destaca-se novamente o município de Leverger, onde aproximadamente 125 pessoas estão na área de influência da erosão hídrica natural sobre uma curva do rio Cuiabá, na altura do bairro denominado Barranco Alto, que provoca desbarrancamentos sucessivos da margem do rio em direção às moradias.

Em relação ao grupo onde não houve setorização, observou-se que nem sempre a falta de setores mapeáveis coincide com inexistência de risco. Em cinco dos oito municípios vistoriados as situações diferentes envolveram questões como: riscos administrados pelas prefeituras (02 municípios) e riscos instalados de categoria baixa e média (02 municípios). Retiradas estas outras situações,

restaram três municípios onde, de fato, não foram localizadas ocorrências nem histórico, segundo as informações das autoridades locais. Destacam-se a seguir detalhes das situações diferenciadas.

Os municípios onde os riscos foram administrados são Água Boa e São José do Rio Claro. O primeiro declarou o enfrentamento recorrente de problemas com erosão do solo, na forma de intensos ravinamentos e voçorocamentos, que trouxeram inúmeros problemas à população, inclusive com interdição de moradias por apresentarem risco de desabamento. Contudo o município tem buscado há aproximadamente sete anos, soluções na forma de aterramento destas feições. Paralelo a isto, houve investimentos na captação das águas pluviais, com instalação das galerias, escoadores e bacias de captação. Já em São José do Rio Claro, foi relatada a intervenção nos processos erosivos mais graves, e atualmente existem outros problemas associados com a gestão e direcionamento das águas pluviais.

Os municípios que apresentaram riscos baixo e médio são Peixoto de Azevedo e Vila Rica. Em ambos os municípios foram observados problemas ainda incipientes de processos erosivos atravessando bairros dentro da malha urbana. As dimensões ainda não seriam de grande porte e, ainda que os processos estejam em evolução, não há ocorrências de moradias interditadas nem de prejuízos econômicos.

No município de Nova Canaã foram relatadas quedas de pontes e pinguelas nas travessias que ligam vilarejos de áreas rurais, fruto de enxurradas localizadas. A área urbana da cidade ainda não possui asfaltamento completo, o que contribui para a infiltração e diminuição da velocidade das águas de chuvas torrenciais.

Por fim, os municípios sem risco identificado nem histórico de ocorrências são Confresa, Feliz Natal e Nova Bandeirantes. As respectivas autoridades municipais relataram questões tipologias fora de escopo (queimadas e vendavais), ou ocorrência de alagamentos de menor expressão, sem atingimento significativo de moradias.

Na medida em que alguns municípios não apresentaram riscos geológicos. Foram observadas, em conversa com autoridades locais, ocorrências que dizem respeito a outros problemas que não são classificados como risco geológico

2 UHE Manso - A usina hidroelétrica de Manso está situada no rio Manso, principal afluente do rio Cuiabá. Seu reservatório está formado sobre os municípios de Chapada dos Guimarães e Nova Brasilândia. Funciona desde fevereiro de 1999. (<http://www.furnas.com.br/>).

ou hidrológico como, por exemplo, o município de Confresa, que enfrenta graves problemas com queimadas e vendavais (típicos da região) e, assim, acaba por acionar regularmente a Defesa Civil do Estado de Mato Grosso.

Uma vez apresentados os municípios segundo as tipologias encontradas, observam-se nos resultados encontrados outras considerações relevantes. Segundo o Anuário de Desastres 2011 (MCID, 2012), a região centro-oeste “tem registrado o menor número de desastres no país, bem como o menor número de mortes e afetados (...)”. De fato, quando comparados os números totais de setores mapeados em Mato Grosso com municípios da região Sudeste, verifica-se um relativo menor número.

Contudo, o pequeno número de riscos identificados pode estar associado também a uma menor densidade da ocupação humana nestes locais. Mais de 90% dos 15 municípios selecionados possuem menos de 50 mil habitantes, sendo que apenas Cuiabá representa uma ocupação mais densa, e coincidentemente, reúne maiores problemas com risco geológico. Isso pode significar que o adensamento populacional nos locais onde não foram observados setores pode, em um futuro ainda não determinável, produzir novas áreas de risco. Há necessidade de que estes municípios lidem desde agora com o tema, visando a prevenção e o ordenamento territorial como ação principal.

Em termos físicos, observando o mapa geológico de Mato Grosso, verifica-se que muitas das sedes municipais visitadas estão assentadas sobre terrenos sedimentares de baixa declividade e amplitudes relativamente pequenas, o que confere a estes locais, de maneira ampla, um menor risco de escorregamentos quando comparado com eventos de inundação e erosão. Os eventos de escorregamento encontrados em Mato Grosso, até o momento, estão relacionados ao avanço lateral de ravinas e voçorocas, a erosão fluvial em margem de cursos d'água e também à gestão inadequada das águas pluviais dentro dos centros urbanos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pretendeu-se neste artigo apresentar os resultados da setorização dos quinze municípios mato-grossenses selecionados em listagem nacional

considerados como críticos do ponto de vista de riscos geológicos. A investigação representou um grande esforço técnico que envolveu gerenciamento administrativo, comprometimento científico e investimento de recursos públicos.

A característica emergencial da ação de setorização não representou o levantamento da situação completa de risco existente em cada município. Conforme foi verificado, nem sempre a não existência de risco alto e muito alto representou a isenção de problemas associados. Um diagnóstico completo depende de um trabalho continuado, a ser realizado tanto pela esfera federal, como estadual e municipal, seja por meio da estruturação das defesas civis municipais, seja pela criação de linhas de crédito específicas para mapeamento, seja pela contratação municipal de serviços para o mapeamento de riscos, cartas geotécnicas e outros instrumentos de planejamento que possibilitem a ideal organização do espaço.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Serviço Geológico do Brasil, pelas capacitações oferecidas, reuniões de ajustes metodológicos, e principalmente pela oportunidade de trabalhar com um assunto de extrema relevância para um país em desenvolvimento como o Brasil, de grande extensão territorial, diversidade cultural e grandes desigualdades sociais – esta última fonte de muitas das situações de risco instalado.

6 REFERÊNCIAS

ALHEIROS, M. M. Introdução ao gerenciamento de áreas de risco. In: (Ed.). **Gestão e Mapeamento de Riscos Socioambientais**: MCID / UFPE, 2008. cap. Modulo 1, p.196.

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de. **Os Fundamentos Geológicos**. In.: AZEVEDO, A. de. Brasil, a terra e o homem. São Paulo:Comp. Ed. Nacional, 1964a. v.1, p.55-120. (Brasília, Formato Especial, 1).

AMARAL, G. - 1974 - **Geologia Pré-Cambriana da Região Amazônica**. Tese, Inst. Geoc. Univ. S. Paulo.

- BAHIA, B.C.R., MARTINS-NETO, M. A., BARBOSA, M. S. C. **Revisão Estratigráfica da Bacia dos Parecis – Amazônia**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.36, n.4, p.692-703. Dez. 2006.
- BARBOSA, O. **Geologia estratigráfica e econômica da área do Projeto Araguaia**. Monografia da Divisão de Geologia e Mineralogia – CPRM, v. 19, p.1-94, 1996.
- BERTONE, P.; MARINHO, C. **Gestão de Risco e Resposta a Desastres Naturais: A Visão do Planejamento VI Congresso CONSAD de Gestão Pública**. Centro de Convenções Ulysses Guimarães: VI Congresso CONSAD de Gestão Pública: 24 p. 2013.
- BRASIL. **Glossário de Defesa Civil: estudos de riscos e medicina de desastres**. 3 ed (2009). Ministério da Integração Nacional Secretaria Nacional de Defesa Civil, 2002. 283 ISBN CDU 351.852(81)(038).
- CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. **Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais** Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006. Disponível em: <[http://www.crpsp.org.br/portal/comunicacao/diversos/mini_cd_oficinas/pdfs/Prevencao-Riscos-Deslizamento-Encostas-\(Ministerio-Cidades\).pdf](http://www.crpsp.org.br/portal/comunicacao/diversos/mini_cd_oficinas/pdfs/Prevencao-Riscos-Deslizamento-Encostas-(Ministerio-Cidades).pdf)>.
- CERRI, L. E. D. S. et al. **Mapeamento de Risco em Assentamentos Precários no Município de São Paulo (SP)**. Geociências. 26: 143-150 p. 2007.
- CPRM. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2014. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?tpl=home>>.
- IBGE. IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2014. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>.
- JHA, A. K.; BLOCH, R.; LAMOND, J. **Cidades e Inundações: Um guia para a Gestão Integrada do Risco de Inundação Urbana para o Século XXI**. THE WORLD BANK GFDRR p.54. 2012
- MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBAYAMA, M. **Mapeamento de risco de desastres naturais do estado de Santa Catarina**. CAMINHOS DE GEOGRAFIA - revista on line: 13 p. fev/2006.
- MCID. **Anuário Brasileiro de Desastres Naturais: CENAD**. Ministério da Integração Nacional/ Secretaria Nacional de Defesa Civil: 80 p. 2012.
- MORAES, J. M. O. **Geodiversidade do estado do Mato Grosso**. 2010. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/Geodiversidade_MT.pdf>. Acesso em: 22/10/2014
- PIMENTEL, Jorge; FERREIRA, Carlos Eduardo Osório; SHINZATO, Edgar; MAIA, Maria Adelaide Mansini; SILVA, Sandra Fernandes; HOELZEL, Marlon; PFALTZGRAFF, Pedro Augusto; MORAES, Juliana Maceira; PARISI, Giovanni Nunes; SILVA, Cristiane Neres; OLIVEIRA FILHO, Ivan Bispo de; FREGOLENTE, Andrea. **Atuação do Serviço Geológico do Brasil no mapeamento de riscos geológicos para a redução de impactos decorrentes de eventos extremos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2012, Santos, SP. Anais... São Paulo: SBG Núcleo São Paulo, 2012. 1 CD-ROM.
- PARIZZI, M. G. **Desastres Naturais e Induzidos e o Risco Urbano**. Geonomos. 22(1): 1-9 p. 2014.
- PNUD/IPHEA. **Atlas do Desenvolvimento Humano 2013**. 2013. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/2013/pt/o_atlas/o_atlas/>. Acesso em: 11/11/2014.
- RIBEIRO FILHO, W.; LUZ, J. S.; ABREU FILHO, W. **Projeto Serra Azul: reconhecimento geológico**. Relatório Final. Escala 1:500.000. Goiânia: CPRM, 1975. v.1 (Convênio DNPM/CPRM).
- SAMPAIO, T. D. Q. et al. **A Atuação do Serviço Geológico do Brasil - CPRM na Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais**. TERRITORIAL, D. D. G.; TERRITORIAL, D. D. H. E. G., et al. Conselho Nacional de Secretários de Estado da Administração: VI Congresso CONSAD de Gestão Pública 2013.

SUBSÍDIOS DO MEIO FÍSICO E RESTRIÇÕES LEGAIS PARA O PLANEJAMENTO REGIONAL DO MUNICÍPIO DE SANTANA DO PARAISO, VALE DO AÇO-MG

CHARACTERIZATION GEOENVIRONMENTAL THE AREA EXPANSION OF THE MUNICIPALITY OF SANTANA DO PARAISO, VALE DO AÇO-MG

AMINTAS TORRES SILVA NETO
Progen Engenharia. E-mail: amintastorres@gmail.com

FREDERICO GARCIA SOBREIRA
Universidade Federal de Ouro Preto. E-mail: sobreira@degeo.ufop.br

RESUMO ABSTRACT

Sendo o Plano Diretor um instrumento básico da política de desenvolvimento e expansão urbana, ele isoladamente não expressa a relação entre a ocupação urbana e as características do meio físico onde se instala. Para suprir essa necessidade, o mapa Geoambiental referencia-se como instrumento público de gestão do uso do solo. Este trabalho teve como objetivo a elaboração da Carta de Indicação de Uso e Ocupação da área apresentada no plano diretor em termos de planejamento territorial, destinada à expansão urbana de Santana do Paraíso, município integrante da Região Metropolitana do Vale do Aço - MG. A sua elaboração teve como critérios e fundamentos básicos a geologia e a geomorfologia, sendo esta última, preponderante na definição das unidades de uso e ocupação. A metodologia proposta para realização deste trabalho dividiu-se em 4 etapas: Fase de Inventário, Trabalhos de Campo, Caracterização de Uso e Ocupação e Verificação de Conflitos. Foram delimitadas quatro (4) unidades de Uso e Ocupação distintas. As informações referentes a cada unidade de Uso e Ocupação foram obtidas confrontando-se o mapa de uso atual do solo com as cartas de processos geodinâmicos, restrições legais e de geomorfologia, possibilitando a determinação das áreas mais aptas para a ocupação urbana, proposição de ações de planejamento e gestão das unidades, considerando suas potencialidades.

Palavras-chave: Carta de Uso e Ocupação, Geomorfologia, Planejamento Urbano.

Master Plan is a basic tool of development policy and urban sprawl, but itself can't express the relationship between the urban occupations and the characteristics of the environment where it's located. In order to fix this serious shortcoming, the geoenvironmental letter takes place as a public instrument of soil use management. The objective of this work was the elaboration of the Letter of Indication of Use and Occupation of the area presented in the master plan in terms of territorial planning, destined to the urban expansion of Santana do Paraíso, a member municipality of the Metropolitan Region of Vale do Aço - MG. The map elaboration had as criteria and base, the geology and geomorphology, where geomorphology was more predominant while defining the use and occupation units. The proposed methodology for the realization of this study was divided into 4 stages: the inventory, fieldworks, use and occupation characterization and verification of conflicts. We defined four (4) distinct units of use and occupation. The information of each unit of information and occupation, were obtained confronting the current letters of soil use, geodynamic process, legal restriction and the geomorphologies one. Through this process we were able to determine the most suitable and appropriate areas for the urban occupation, propose planning and unit management actions, considering its potential. The map of use and occupation identification is an essential tool for the city's urban and territorial planning.

Keywords: Use and occupation map, geomorphology, urban planning

1 INTRODUÇÃO

O efeito da urbanização no meio físico tem levado à necessidade do ordenamento territorial das cidades. Quando estas crescem sem planejamento, as consequências da expansão urbana ocasionam uma série de graves problemas, tanto em termos ambientais como socioeconômicos: enchentes, movimentos de massa, favelização, contaminação e degradação dos recursos naturais. No Brasil, várias tentativas de realização de diagnósticos do meio físico, seguindo diferentes metodologias, vêm sendo realizadas com vista a avaliar o estado da qualidade ambiental e propor soluções para a questão.

O município de Santana do Paraíso, localizado no Leste de Minas Gerais, mais especificamente na região do Médio Vale do Rio Doce (Figura 1), vem sofrendo o efeito da cornubação dos demais municípios que integram a Região Metropolitana do Vale do Aço - RMVA (Ipatinga, Coronel Fabriciano e Timóteo). Dos quatro municípios, Santana do Paraíso é o mais novo, com apenas 15 anos de emancipação, e já vivencia os efeitos da metropolização, em virtude da ausência de áreas adequadas disponíveis para expansão urbana nas demais cidades de médio porte que integram a RMVA, em especial Ipatinga, pela maior proximidade entre as sedes.

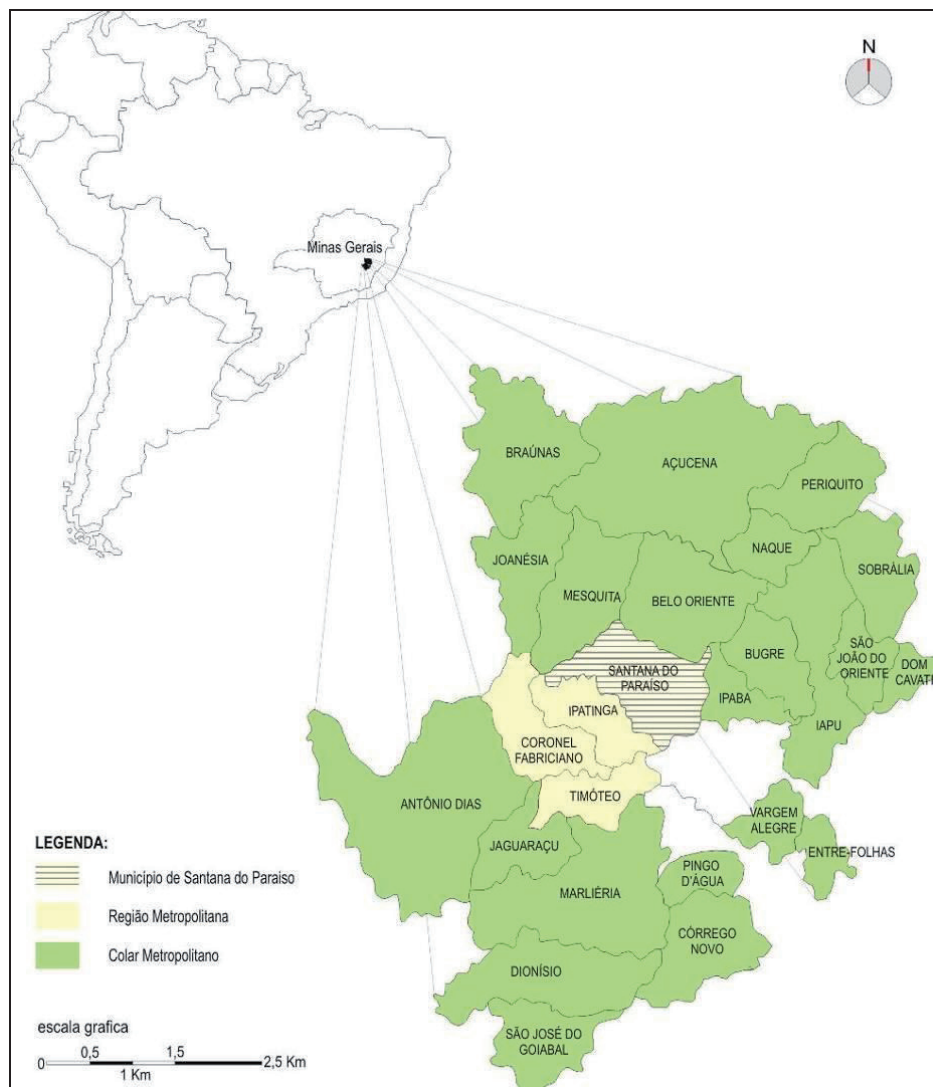


Figura 1. Localização do município de Santana do Paraíso na Região Metropolitana do Vale do Aço.

Fonte: PMS (2006).

Esta tendência é alavancada pela maior disponibilidade de áreas e, conseqüentemente, menores preços, criando situações reais a serem administradas. Embora o município conte com um Plano Diretor desde 2006 (PMSP, 2006), durante a sua elaboração os aspectos do meio físico foram abordados apenas superficialmente, com maior ênfase às questões socioeconômicas do município. Segundo dados do IBGE, a taxa de crescimento da cidade de Santana do Paraíso foi de 47,67% em 10 anos, contra a taxa de suas cidades vizinhas em torno de 5,70% em Coronel Fabriciano, 5,71% em Ipatinga e 8,16% em Timóteo.

Em função da atual situação, este trabalho visa ao estudo do meio físico da área urbana e

as áreas previstas pelo plano diretor para futura ocupação urbana do Município de Santana do Paraíso (Figura 2), enfocando os aspectos geológicos e ambientais, com base nas principais metodologias empregadas no Brasil, como as Metodologias do IG-UFRJ, IPT e SOBREIRA (1995) adequadas à realidade da área. A partir da análise de produtos cartográficos compilados foram avaliadas as características gerais dos terrenos, os conflitos de usos e os impactos existentes, visando definir a capacidade das unidades do território para absorver os diversos usos e orientar a expansão e ocupação dos terrenos, sendo abordados os principais problemas relacionados ao meio físico e seu uso e elaborada a Carta de Indicação de Uso e Ocupação.

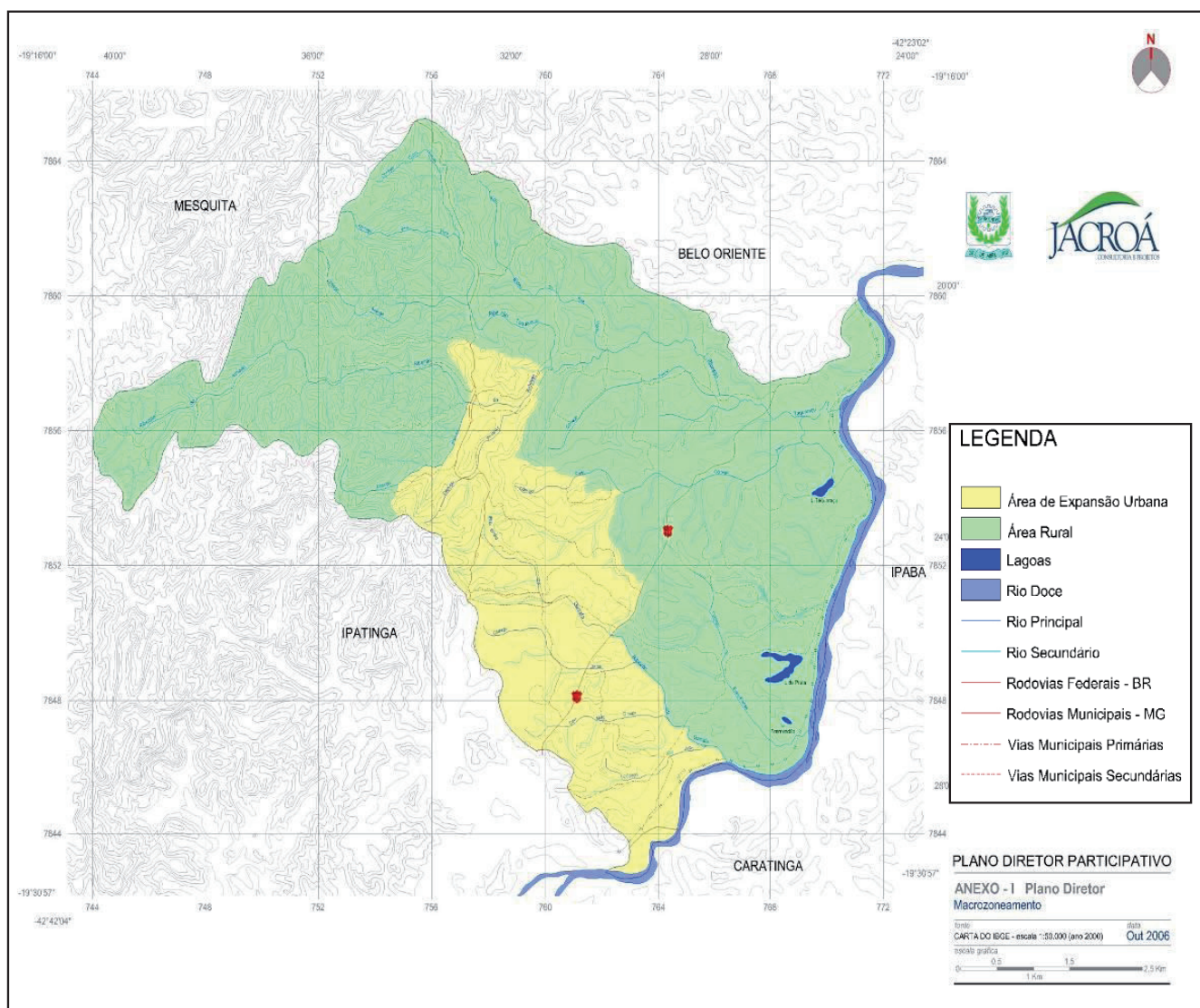


Figura 2. Área de Expansão Urbana do município de Santana do Paraíso.

Fonte: PMSP (2006), adaptado da Carta do IBGE (2000) - Escala 1:50.000.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Tomando-se como referência as metodologias nacionais e os dados disponíveis, como planejamento territorial, cartas geoambientais e geotécnicas como IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IG-UFRJ, Sobreira (1995) e Freitas, (2000), procurou-se uma abordagem que visasse à elaboração de um produto cartográfico no qual as características geoambientais da área de expansão proposta pelo município fossem apresentadas sob uma linguagem clara, com informações diluídas e de fácil acesso ao público não especialista.

A área de estudo consiste na zona destinada à expansão urbana pelo Plano Diretor do Município de Santana do Paraíso, sendo a metodologia proposta para realização deste trabalho dividida em 4 etapas, descritas a seguir.

2.1 Fase de inventário

Na fase de inventário, além da pesquisa bibliográfica sobre o tema proposto, foram levantadas informações disponíveis sobre a área de estudo. Dentre os documentos cartográficos e dados inventariados nesta etapa estão: Topografia (1:25.000 SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*); Imagem Google (Visualizar); Bases Cartográficas do PDM (Plano Diretor Municipal); Plano Diretor Municipal; Ortofotos (1:10.000 CEMIG); Mapa Geológico (1:100.000 CPRM); Avaliação Ambiental Integrada (AAI) dos Aproveitamentos Hidroelétricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (Sondotécnica). Com o intuito de minimizar os erros das informações geológicas e topográficas, optou-se por trabalhar na escala de 1:10.000 (base das ortofotos) e gerar os arquivos a Carta de Indicação de Uso e Ocupação na escala 1:50.000.

Os dados inventariados foram manipulados com auxílio do software Arcview 9.3, sendo compiladas e geradas as seguintes bases cartográficas: Base topográfica; Modelo Digital de Elevação (hipsometria e declives com curvas de níveis espaçadas a cada 10m); e Mapa Geológico.

Através de técnicas de fotointerpretação das ortofotos e da imagem Google foram gerados os seguintes mapas: Mapa da Rede Hidrográfica e Mapa de Uso Atual do Solo.

2.2 Trabalhos de campo

Os trabalhos de campo serviram para validar as informações existentes pertinentes ao meio físico, geradas e compiladas (relevo, litologia, drenagem e solo).

Ainda nesta etapa foi realizado o levantamento dos processos geodinâmicos (erosão linear nas formas de sulcos, ravinas e voçorocas; e escorregamentos) e dos problemas induzidos pela ocupação (implantação de sistema viário, loteamento, disposição de resíduos).

Ao final desta etapa foram gerados os seguintes produtos: Mapa Geomorfológico e Mapa de Processos Geodinâmicos.

2.3 Caracterização de uso e ocupação

Os resultados do trabalho de campo e os dados inventariados serviram para verificar possíveis diferenças no comportamento de materiais de diferentes características geológicas, levando à obtenção do mapa de Restrições Legais que está detalhado quando esse mesmo assunto for mencionado novamente. Com esse mapa em mãos e novamente os dados inventariados, plano diretor municipal (2006) e observações de campo desenvolveu-se a Carta de Indicação de Uso e Ocupação.

2.4 Verificação de conflitos

A análise dos conflitos foi realizada a partir de adaptação da metodologia utilizada por Abreu e Augusto Filho (2009), cruzando as informações referentes ao meio físico com as informações de uso de solo, de processos geodinâmicos instalados ao longo da área e as restrições legais foi possível definir as áreas impróprias, restritas à ocupação ou não, e elaborar diretrizes de ocupação e uso do solo, considerando os atributos levantados anteriormente.

3 RESULTADOS

Santana do Paraíso tem extensão territorial de 276,067 km² (IBGE, 2010), contando com 10 (dez) comunidades rurais (povoados), 12 (doze)

comunidades urbanas (bairros) e 1 (um) distrito industrial (PMSP, 1996). Desde sua emancipação em 1992, se mantém entre os municípios que mais crescem no Estado de Minas Gerais (Censos IBGE, 2000 e 2010), e também como o município de maior crescimento demográfico no Vale do Aço. Este excepcional crescimento populacional de 47% em 10 anos contra a taxa de crescimento de suas cidades vizinhas em torno de 5% Coronel Fabriciano e Ipatinga e 8% Timóteo, é uma das principais fontes de problemas de infraestrutura urbana do município.

De toda a área de expansão urbana do município de Santana do Paraíso, 12,91% (aproximadamente 911 ha), caracteriza-se como área urbana atual. Dentro da área urbana atual as áreas que estão no limite com o município de Ipatinga, se apresentam dentro da região metropolitana conurbada, onde se concentra grande parte da infraestrutura de toda a região, onde se localizam: aeroporto regional, linha férrea, linhas de alta tensão, duas rodovias federais, uma rodovia estadual, dois distritos industriais e também o aterro sanitário. Não por acaso, é nesta mesma região que se localizam praticamente todos os novos grandes empreendimentos e loteamentos da região.

3.1 Geologia

Segundo dados do Projeto Leste (CPRM, 2000), a região em apreço tem sido alvo de muitos estudos em termos de cartografia geológica, referentes às Folhas de Ipatinga e Dom Cavati. Foram observados na região domínios geológicos que possuem idades superiores a 2,5 bilhões de anos, e que correspondem à fase final de formação das rochas profundas dos continentes, até os depósitos sedimentares atuais. As litologias da área de estudo estão descritas da seguinte forma:

3.1.1 Planícies aluvionares

É uma pequena área plana resultante de acumulação fluvial atual, composta por material arenoso. Está sujeita a inundações periódicas, pois correspondem às várzeas atuais, presentes ao longo do leito do rio Doce, ao sul da área de estudo. É também representado por sedimentos relacio-

nados à atual rede de drenagem. Incluem cascalho, areia e argila. Os depósitos mais expressivos ocorrem ao longo do rio Doce. Esses depósitos pode ser observados também na sede do município ao longo do ribeirão do Achado e seus tributários, formando cordões isolados às margens e no interior dos cursos d'água. São depósitos recentes, pertencentes ao Quaternário.

3.1.2 Formação São Tomé

Compreende um conjunto de rochas representado por quartzitos e xistos, rochas arenosas e argilosas com predomínio da fração mais fina. A rocha é constituída por quartzo e mica branca.

De acordo com CPRM (2000), os quartzitos constituem intercalações nos xistos e gnaisses e formam desde estratos delgados até bancos com dezenas de metros. Podem ser pouco foliados, recristalizados, laminados/bandados e micáceos. Possuem uma granulação variando de fina a média.

A Formação São Tomé encontra-se bastante alterada, sendo difícil observar seus afloramentos. A área de ocorrência abrange cerca de 47.9% do substrato da área estudada.

3.1.3 Complexo Mantiqueira

De acordo com CPRM (2000), o termo Mantiqueira é aqui utilizado para denominar as rochas gnáissicas da região, apresentando bandamento composicional onde se alternam bandas félsicas com bandas máficas com predomínio da mica.

Esta unidade ocupa 26,06% da área de estudo e não foram observados afloramentos de rocha, uma vez que se encontra em avançado estado de alteração.

3.1.4 Granito Açucena

Constitui uma área montanhosa bastante dissecada, com vales condicionados pela estruturação, com destaque para as formas de pão-de-açúcar. De acordo com PIRH (2009), esta unidade é caracterizada pelo conjunto de corpos graníticos identificados na região leste do Estado de Minas Gerais, entre Itabira e Guanhães.

A unidade abrange 4.98 % da área de estudo. Na porção oeste da área verificam-se afloramentos desta litologia formando a Serra do Achado que se estende para a área rural e municípios vizinhos.

3.2 Geomorfologia/Relevo

As interpretações de ortofotos, fotos aéreas, dados topográficos e trabalhos de verificação em campo, revelaram um relevo característico, classificado como acidentado-ondulado-plano, concentrado na maior parte da área.

A evolução do relevo regional caracterizou-se pela dissecação (erosão fluvial) de antigas áreas planas mais elevadas. Na área podem-se observar formações granito-gnáissicas de idade pré-cambriana, principalmente na porção de relevo mais acentuado. Todavia, existe uma predominância de planícies e terraços, principalmente próximos aos cursos d'água.

Foram delimitadas cinco (5) unidades distintas de relevo, apresentadas na Figura 3, a seguir.

3.2.1 Relevo escarpado

A unidade relevo escarpado tem como substrato o Granito Açucena e restringe-se à porção noroeste da área, onde as altitudes mais elevadas chegam a 850 m. Constitui a região de relevo íngreme, com feições do tipo “pão-de-açúcar”, onde o substrato rochoso se encontra menos alterado e coberto por camada de solo pouco espesso. Ao longo da unidade é possível observar alguns depósitos de encosta do tipo tálus, porém não mapeáveis na escala deste trabalho. Dadas as condições do relevo, esta unidade não se apresenta urbanizada.

3.2.2 Colinas

O relevo ondulado ocorre na maior parte da área, com colinas mais arredondadas, vertentes suaves e espigões alongados. As altitudes variam entre 220 e 350 m. Em alguns pontos da área tais morros se encontram quase completamente ocupados. As declividades se encontram na ordem de 10% a 30%, sendo maiores na parte norte da

área de expansão urbana e diminuindo gradativamente no sul da área, próximo ao rio Doce. A extensão territorial dessa forma de relevo atinge aproximadamente 80% da área de expansão.

3.2.3 Rampas de colúvio

São superfícies de declividade moderada (na ordem de 10%) e perfil retilíneo a suavemente côncavo, que ocupam a parte baixa das cabeceiras dos afluentes. São formadas pela coalescência de leques aluvionares e coluvionares, constituídos por sedimentos que guardam forte similaridade com as formações superficiais das encostas que os circundam. Geralmente estão recobrimo o substrato cristalino alterado e ocorrem em altitudes variadas. O termo colúvio é empregado para designar depósitos de material pouco selecionado, de aspecto terroso. No mapa são representadas somente as rampas de extensão compatíveis com a escala do trabalho.

3.2.4 Planícies aluvionares

Constituem superfícies basicamente planas, com altitudes entre 220 e 245 m, formadas por depósitos aluvionares compostos por areias e argilas, depositados em ambiente fluvial ao longo de calhas e planícies de inundação dos ribeirões Achado e da Garrafa. Ocupam aproximadamente 12% da área, abrigam o centro do município e se apresentam parcialmente urbanizadas. No entanto, ao longo de toda área, há muitas outras planícies sem ocupação.

3.2.5 Terraços aluvial

Ocorrem em cotas superiores às das planícies aluviais, ao longo dos cursos d'água. São constituídos, predominantemente, de material arenoso relativamente selecionado, com níveis de seixos e intercalações irregulares de sedimentos finos. Nas porções mais grossas desses sedimentos sobressaem os cascalhos, ricos em seixos de diferentes tamanhos e formas, além de abundantes matacões. As estruturas primárias mais comumente encontradas correspondem ao acamadamento bem definido ou lâminas sedimentares dominan-

temente plano-paralelas e estratificações cruzadas de pequeno porte, que formam depósitos com materiais consistentes e inconsistentes e friáveis.

Constituem as superfícies de acumulação fluvial do rio Doce, com forma plana, levemente inclinada em alguns pontos. Estes terraços ocorrem

na porção sul da área de estudo, devido à proximidade com o rio Doce, com altitudes que variam entre 200 e 230 m. São compostos por sedimentos arenosos apresentando algumas intercalações de argila. Atualmente se encontram quase que totalmente preservados.

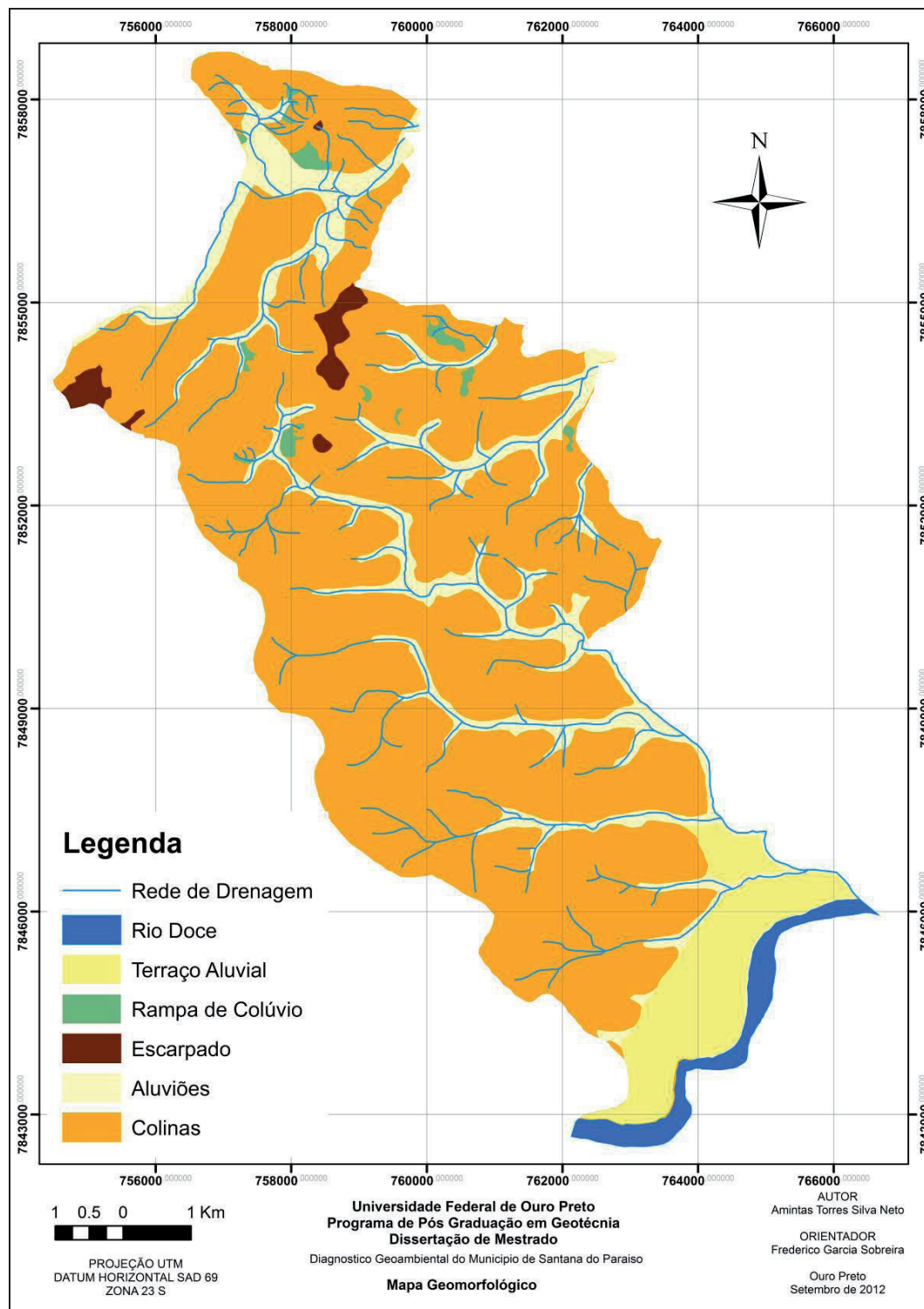


Figura 3. Unidades Geomorfológicas da área de expansão urbana do Município de Santana do Paraíso.

3.3 Hipsometria/Declividade

A análise hipsométrica evidencia claramente a passagem do relevo escarpado a montanhoso, típico da Serra do Achado, a noroeste, para o relevo de montanhas a colinas, a leste, e o relevo de planície ao sul, através da queda acentuada das altitudes. A feição mais marcante a noroeste é a Serra do Achado, com altitudes que ultrapassam os 850 m. Nas faixas entre 200 m a 875 m a quebra de relevo é marcante, registrando-se variações bruscas de até 500 m. As menores altitudes são observadas ao sul da área, com valores na faixa dos 250 m. As altitudes entre os 300 m e 350 m representam a maior parte da área, e nelas se concentram as áreas urbanas do município.

A análise de declividade foi obtida por meio da interpolação de funções do *software* ArcGIS, tendo como base a imagem SRTM de 2005 com articulação compatível com a escala 1:25.000. Essa escolha foi feita em função da ausência de mapas topográficos de maior escala. Devido à obtenção ser baseada em um material não muito adequado para a escala desejável, as declividades apresentam deficiências para uma análise espacial mais precisa.

A existência de diferentes propostas de classificação de declividade revela o interesse no estabelecimento de critérios que sejam capazes de orientar o uso adequado do relevo, possibilitando a identificação de áreas suscetíveis a processos erosivos e a movimentos de massa (IBGE, 2009). Informações a respeito do declive das vertentes por si só são de considerável importância, tendo em vista a possibilidade de indicar fatores críticos e restritivos a determinados usos. A análise das declividades considerou o uso urbano e suas restrições legais, conforme os trabalhos de Souza (2004) e Abreu e Augusto Filho (2009). Foram assim adotadas 4 classes de declividades, neste estudo sendo elas: 0 a 2%, 2 a 10%, 10 a 30% e maior de 30%, baseado nas leis Federais 4.771/65 e 6.766/79.

As declividades mais acentuadas, > 30%, se concentram na proporção noroeste da área de expansão urbana, devido à presença do relevo bem acentuado. Na região sul da área de estudo a declividade perde intensidade chegando a < 2%, na região próxima ao rio Doce. Na faixa central da

área de estudo a declividade tem um comportamento entre 2 e 10%, próximo aos cursos d'água, e de 10 a 30% na maior parte da área, característica do relevo de colina.

3.4 Recursos Hídricos

O município de Santana do Paraíso está inserido na Bacia do rio Doce, fazendo parte do domínio dos chamados Mares de Morros florestados. Trata-se de um domínio espacial que engloba todo o leste mineiro e, hoje, se encontra quase devastado por uma combinação desordenada de processos antrópicos cumulativos. O município possui rede hidrográfica rica com riachos, cachoeiras, ribeirões e rios em sua maioria com nascentes a noroeste, na Serra do Achado.

A rede hidrográfica da área de expansão é formada por três bacias hidrográficas principais: as bacias do ribeirão do Achado e o córrego Preto, que são tributários do ribeirão Taquaraçu e se encontram fora da área de expansão urbana, e a bacia do ribeirão da Garrafa. O ribeirão Taquaraçu, segue dentro dos limites do município, e deságua no rio Doce, na sua porção leste, enquanto o ribeirão da Garrafa deságua no rio Doce, ao sul do município. Ambos possuem um padrão de drenagem dendrítico.

O ribeirão do Achado é o manancial mais expressivo da área com 14.440 ha, e geograficamente melhor situado em relação à malha urbana, pois é o que passa dentro da área central de Santana do Paraíso. Possui diversas corredeiras e resulta em várias cachoeiras, dentre as quais se destacam a Cachoeira do Paraíso e a Cachoeira do Engenho Velho no centro da cidade.

Com área de 4.570 ha, a bacia do ribeirão da Garrafa, por abrigar o maior número de bairros do município, apresenta características de ocupação das mais diversas, registrando problemas de inundações e assoreamento nos fundos de vales.

3.5 Uso e ocupação do solo

Para o diagnóstico do uso e ocupação do solo da área de expansão urbana de Santana do Paraíso foram utilizadas informações da Prefeitura Municipal, especialmente do Plano Diretor Municipal

(PMSP, 2006), visitas de campo e interpretação de imagens de satélites. As classes estabelecidas são as seguintes:

3.5.1 Mata e silvicultura

A vegetação encontrada em Santana do Paraíso pertence à formação das florestas estacionais semideciduais, nas suas variações submontana e montana, levando-se em consideração a variação altimétrica encontrada. Contudo, atualmente a vegetação encontra-se severamente alterada, tendo sofrido ao longo do processo de ocupação humana, uma considerável depauperação, pela retirada de espécies para uso nobre em serraria, corte raso para implantação de culturas agrícolas e pastagens, além dos incêndios florestais.

Observa-se também uma grande parte do município ocupada pela plantação de eucalipto, principalmente em terras cultivadas pela Cenibra (Celulose Nipo-Brasileira S. A.), para produção de celulose, que compreende a maior parte das áreas de mata e silvicultura.

3.5.2 Campos

Os campos compreendem a maior parcela de uso e ocupação do solo no Município. De modo geral, a vegetação apresenta-se com estrutura bastante alterada. Esses fragmentos caracterizam-se por constituírem-se de áreas de pastagem e áreas de regeneração natural, com maior ou menor grau de desenvolvimento. É relativamente comum a ocorrência de fragmentos em estágio médio de sucessão secundária.

3.5.3 Aterro sanitário e industrial

No município também se encontram os aterros sanitário e industrial, sendo o primeiro, o responsável por receber os resíduos urbanos dos municípios de Timóteo, Coronel Fabriciano, Ipatinga e Santana do Paraíso; enquanto o aterro industrial é pertencente à Usiminas (Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S. A.), recebendo assim somente resíduos de sua fábrica.

3.5.4 Áreas urbanas

As áreas urbanas compreendem o perímetro urbano e demais áreas edificadas do município, que cresceu de forma bastante fragmentada. Os parcelamentos que se situam na área central, próximos à sede do município, são em sua maioria, mais antigos, anteriores à emancipação, cerca de 40% da população, segundo o IBGE (2010), concentra-se nesta região.

O bairro Industrial situado às margens de Ipatinga (concentra cerca de 30% da população) e a comunidade mais afastada, Águas Claras (abriga 8,85% da população), já existiam à época da emancipação do município e foram analisadas individualmente.

3.5.5 Área Central

Na Área Central, a ocupação se deu ao longo dos fundos de vale e subindo as encostas. Em torno dos córregos Soveno e Achado foram implantados lotes com os fundos para os cursos d'água, sem usá-los como referência paisagística, deixando-os escondidos.

O lançamento de esgotos sem tratamento nos cursos d'água colabora para criar uma situação ambiental precária, além das edificações que impermeabilizam os vales, elevando as cotas de cheia e provocando situações de risco de enchentes.

A ocupação nas encostas revela uma situação preocupante, uma vez que foram aprovados parcelamentos em áreas de declividade acentuada, sem a devida infraestrutura implantada. Em alguns casos, o que já existia está danificado em função dos processos erosivos decorrentes da retirada contínua da cobertura vegetal.

Ainda na área central, o bairro Residencial Paraíso também não possui infraestrutura completa, principalmente nos lotes localizados na região de encostas. A implantação destes lotes ocasionou a realização de cortes nos taludes para a construção das moradias, o que, somado à falta de infraestrutura, principalmente redes de drenagem pluvial, tem provocado situações de risco. A área institucional que consta na planta do loteamento, situada no alto do morro e próximo à caixa d'água, está ocupada por cerca de 50 famílias, com moradias precárias, pouca infraestrutura, e acesso através de becos e vielas sem calçamento.

3.5.6 Bairro Industrial

Próximo a Ipatinga, o bairro Industrial é um loteamento instalado no território de Santana do Paraíso, mas que tem sua dependência ligada ao município vizinho. Com pouca infraestrutura instalada, apesar do tempo de ocupação, apresenta graves problemas: lotes implantados em encostas de declividade acentuada e sem infraestrutura; vias sem condições de tráfego tomadas pela erosão, com redes danificadas deixando o esgoto a céu aberto; ocupações irregulares nas encostas e topos de morro com moradias em risco de desabamento; ocupações irregulares nas margens do córrego Garrafa, com moradias construídas em “pilótis” sobre o córrego, que recebe o esgoto de todo o bairro sem nenhum tratamento; possui poucas áreas destinadas a praças, lazer e a áreas verdes.

3.5.7 Águas Claras e região

A ocupação desta região foi iniciada pelo parcelamento da área que pertencia à Companhia Acesita Florestal - CAF, na década de 1980. Localizada junto à Estrada Municipal 010 que liga as rodovias MG 232 e a BR 381, representa um vetor de expansão urbana, atraindo para a região os mais recentes empreendimentos do município.

O loteamento aprovado possui alguma infraestrutura, mas não há informações sobre as condições e capacidade das redes instaladas. O bairro é adensado, com muitas situações irregulares, como por exemplo: áreas institucionais ocupadas por moradias, ocupação com moradias construídas às margens do córrego Águas Claras, construções que invadem o passeio público e as vias, e a ocupação ao redor do campo de futebol, mais recente.

Em implantação nesta região, os loteamentos Jardim Vitória I e II, Residencial Bethânia Paraíso e Expansão e o Bom Pastor, embora estejam com a infraestrutura incompleta, já têm muitos lotes ocupados e em construção. Os lotes, em sua maioria, estão localizados em encostas com declividade bastante acentuada. É comum o corte do terreno em taludes verticais, que exigem obras de contenção onerosas para a ocupação dos lotes. Poucas construções aproveitam a declividade natural do terreno. Com a infraestrutura em implantação, o

bairro carece de arborização e equipamentos nas áreas de praça e de conclusão das redes de drenagem.

3.6 Processos geodinâmicos

O município de Santana do Paraíso não conta com sistema de análise e prevenção de acidentes geológico-geotécnicos. A única ferramenta utilizada pela Secretaria de Obras e pelo departamento de Defesa Civil do município consiste em um registro das ocorrências, geralmente na época de chuvas, em um mapa cadastral do município. De posse deste mapa de ocorrências e através de trabalhos de campo, foi possível levantar os principais processos geodinâmicos presentes ao longo da área de expansão proposta para o município que estão descritos a seguir.

3.6.1 Alagamento

Com base no registro de ocorrências da defesa civil do município, existem poucos pontos de inundação nas principais bacias da área. São pontuais e concentram-se na sede e no bairro Industrial. A ocorrência mais alarmante ocorreu no ano de 2011 devido à construção do muro de um clube no bairro Águas Claras, que impediu o escoamento das águas pluviais, causando um alagamento na área a montante do clube. Realizado verificações no local e confirmado que o incidente ocorreu devido problemas nos dispositivos de drenagens configurando assim um alagamento.

3.6.2 Erosão linear

Os processos erosivos instalados na área de estudo correspondem a erosões lineares originados pelo acúmulo do fluxo superficial concentrado ao longo das encostas, ocasionando uma série de pequenas e médias ravinas em toda a extensão da área de estudo.

Estão localizados em sua maioria nas áreas urbanas com falta de infraestrutura, como rede de drenagem e asfaltamento das vias, promovendo um caminho preferencial de escoamento das águas pluviais, causando as erosões e, consequentemente, transtornos aos moradores e à administração municipal.

Como consequências deste processo tem-se a degradação do meio físico pela perda de solo ou áreas de interesse ao crescimento urbano, o carreamento deste material para as drenagens e, conseqüentemente, assoreamento dos cursos d'água, que favorece ainda mais a ocorrência de enchentes e inundações nas porções baixas da área.

3.6.3 Escorregamentos

No caso de Santana do Paraíso, a ação antrópica, representada pela supressão da vegetação das encostas, concentração do fluxo superficial pelas pastagens, obras de drenagem mal dimensionadas ou ausentes e a realização de cortes com inclinação excessiva, favorecem a exposição dos horizontes mais erodíveis e, conseqüentemente, o desencadeamento dos movimentos de massa gravitacionais, principalmente pelo solapamento da base dos taludes.

3.6.4 Aspectos gerais dos processos atuantes

Ao final do levantamento dos processos geodinâmicos atuantes na área, pode-se concluir que a maioria é de natureza antrópica. São originados por algum tipo de intervenção, decorrente de obras públicas e privadas, realizadas de maneira equivocada e sem atender aos critérios de projetos exigidos em função do tipo de solo da região, principalmente das condições de relevo locais.

Esta situação é agravada pela falta de um instrumento que auxilie o poder público, Prefeitura Municipal e Defesa Civil em ações preventivas, cabendo apenas ações pontuais de atendimento das ocorrências, principalmente durante o período chuvoso.

Os processos levantados estão distribuídos ao longo da área urbana, na unidade de relevo colinas (escorregamentos e erosão) e nas áreas mais baixas (inundações e/ou alagamento), região das planícies aluvionares e aluviões. Mesmo com os altos declives na região de domínio do relevo escarpado, não foram verificados processos atuantes, o que confirma a relação das ocorrências com as formas inadequadas de intervenção e utilização dos terrenos.

3.7 Restrições legais

O mapa de Restrições Legais (Figura 4) foi elaborado a partir do mapa topográfico, definindo-se o terço superior dos morros com altura mínima de 100 (cem) metros e inclinação média maior que 25°, as faixas marginais de cursos d'água e as áreas com declives maiores que 100%, representando-se assim as áreas de APP, conforme a Lei Federal n.º 12.651, de 25 de maio de 2012. Esta Lei, que tem como objetivo o desenvolvimento sustentável, diz que as Áreas de Preservação Permanente - APP, apresentam a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora e o solo, além de assegurar o bem-estar da população humana e das gerações futuras, estabelece parâmetros para identificar e quantificar as APP de topos de morro.

As APAs, Parques e Reservas legais, das esferas Federal, Estadual e Municipal não estão localizada dentro do limite da área em estudo, área essa prevista pelo Plano Diretor do município de Santana do Paraíso como área destinada a expansão do município, dessa foram as APAs, Parques e Reservas Legais não estão representadas no mapa de Restrições Legais, mas sim previsto no Plano Diretor fora da área destina a expansão do Município.

3.7.1 APP dos topos de morro

Topos de morro e montanha

As áreas de topos de morro e montanha são caracterizadas pelas altitudes das vertentes mais expressivas e configuram-se como dispersores de águas de determinada região (CAMPOS, 2010). A legislação define topo de morro como o terço superior, para proteção permanente, reconhecido por sua capacidade de infiltração e seu potencial na recarga dos lençóis freáticos.

De acordo Casseti (2005) e Campos (2010), o topo de morro exerce uma espécie de "efeito esponja" sobre as áreas do entorno, impedindo que o escoamento superficial concentre grandes quantidades de água e provoque processos erosivos pluviais. O topo de morro plano e de solo desenvolvido tem capacidade de infiltração superior às das vertentes íngremes. Em suma: apresenta

considerável potencial para recarga dos lençóis d'água.

Encosta com declividade superior a 100%

A inclinação (ou declividade) da encosta facilita o escoamento da água pela força da gravidade. Mas o escoamento pluvial, apesar de consistir em fenômeno natural, pode ser acelerado e amplificar significativos impactos ambientais, com as condições de degradação do solo comumente encontradas. Os efeitos diretos do escoamento da água pluvial são facilmente observados e percebidos, destacando-se a erosão e os movimentos de massa, principais fenômenos causadores de outros impactos ambientais, como o assoreamento de corpos d'água e a perda de fertilidade do solo.

A classificação da encosta como APP justifica-se pelo fato de que a inclinação repercute diretamente no aumento do potencial erosivo das águas pluviais. A equação universal da perda do

solo destaca esse fenômeno, sendo a declividade uma importante variável para suas projeções (CAMPOS, 2010).

A inclinação acima de 30° apresenta suscetibilidade de deslizamento mais frequente. Acima de 60°, o regolito é menos espesso e, teoricamente, com menor possibilidade de ocorrência de escorregamento, mas fenômenos desse tipo já foram verificados em áreas cujo manto de regolito era pouco espesso como no caso de Teresópolis/Nova Friburgo, em 2011 (SMA, 1990).

As APP de topos de morro estão distribuídas em áreas constituídas por campos, matas e silvicultura, não havendo ocupação urbana. Os limites de topo de morro foram delimitados a partir da curva de nível correspondente a 2/3 (dois terços) da altura mínima da elevação, sempre em relação à base, sendo essa definida pelo plano horizontal determinado por planície ou espelho d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação.

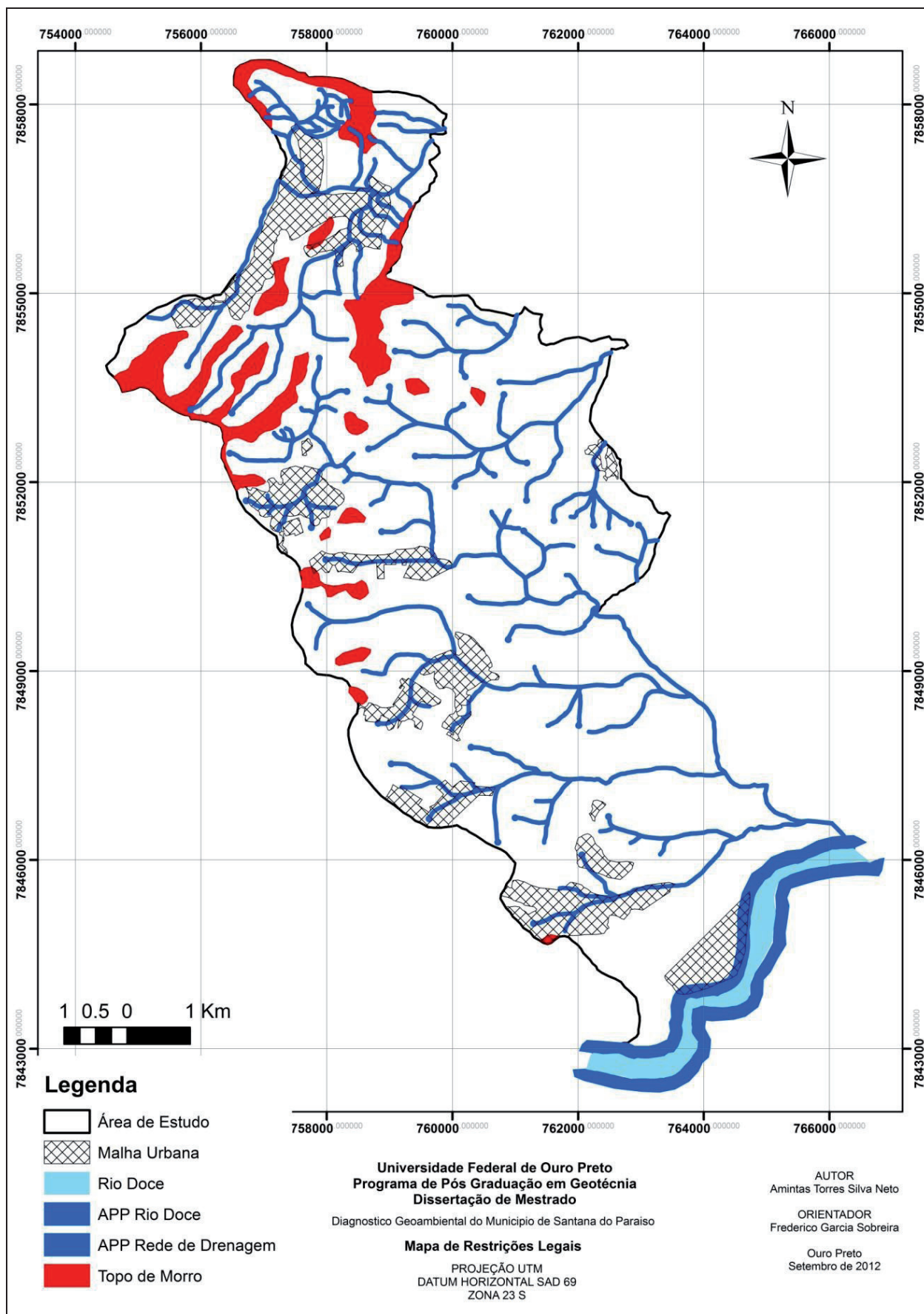


Figura 4. Mapa de Restrições Legais da área de expansão urbana do município de Santana do Paraíso.

3.7.2 APP Relativas a Corpos d'água Corrente

Faixa marginal de cursos d'água

Uma das principais funções das APP das margens dos cursos d'água (zona ripária) é dar suporte à grande diversidade de fauna e flora, devido ao potencial de abrigar espécies adaptadas às condições de alta umidade e/ou encharcamento do solo, configurando importantes áreas para alimentação e dessedentação de espécies da fauna terrestre e aquática (CAMPOS, 2010). A faixa adotada nos corpos d'água da área de estudo é de 30 m a partir das margens, levando em conta que os corpos d'água possuem a largura menor que 10 m e 200 m para o rio Doce, pois as suas margens, na área, tem de 200 a 600 m de largura.

Nascente

Devido à escala do mapeamento, as nascentes não são apresentadas na legenda do Mapa de Restrições Legais (Figura 4), permanecendo as mesmas delimitadas juntamente com a APP Rede de Drenagem.

Podem ser encontradas em encostas, depressões do terreno ou no nível de base representado pelo curso d'água local. Podem ser perenes (de fluxo contínuo), temporárias (de fluxo apenas na estação chuvosa) e efêmeras (que surge durante a chuva, permanecendo por apenas alguns dias ou horas).

Adotando as especificações legais e o mapeamento da área estudada, conclui-se que rios e córregos cortam somente uma pequena parcela dentro da malha urbana e essa pequena parcela se encontra em más condições de conservação, não sendo respeitadas as especificações legais, o que contribui para as causas de assoreamento e enchentes.

A preservação da vegetação ripária é fundamental para a proteção dos córregos e rios,

principalmente os que atravessam as cidades, pois estes estão sujeitos a um elevado grau de intervenção antrópica. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2005), a perda dessas áreas de preservação implica no assoreamento dos corpos d'água, diminui a qualidade dos recursos hídricos, dificulta o controle do regime hídrico, interfere na diversidade de espécies tanto da flora quanto da fauna, entre outros problemas.

4 DISCUSSÕES

A elaboração da carta de uso e ocupação da área de expansão urbana de Santana do Paraíso foi realizada com base dados de campo levantados pelo autor, geomorfologia, imagens de satélites e mapas do plano diretor. Em seguida, elaboraram-se mapas temáticos de Geologia Local, Hipsométrico, Declividade, Geomorfológico, Hidrográfico, Uso e Ocupação, Processos Geodinâmicos e Restrições Legais que correspondem às características físicas da área estudada. Com a junção e integração desses mapas obteve-se a carta de Indicação de Uso da área de expansão urbana, que retrata o ambiente local e suas reais características para o ordenamento da ocupação.

4.1 Carta de uso e ocupação

A Figura 5 apresenta a carta de Indicação de uso e ocupação da área de expansão urbana do município de Santana do Paraíso. Conforme se observa na figura, em função da geomorfologia, como fator preponderante na delimitação das unidades, a carta representa uma releitura do mapa geomorfológico, porém acrescentado do mapa de restrições legais e do mapa de processos geodinâmicos. Com base nisso, diferenciam-se as seguintes áreas:

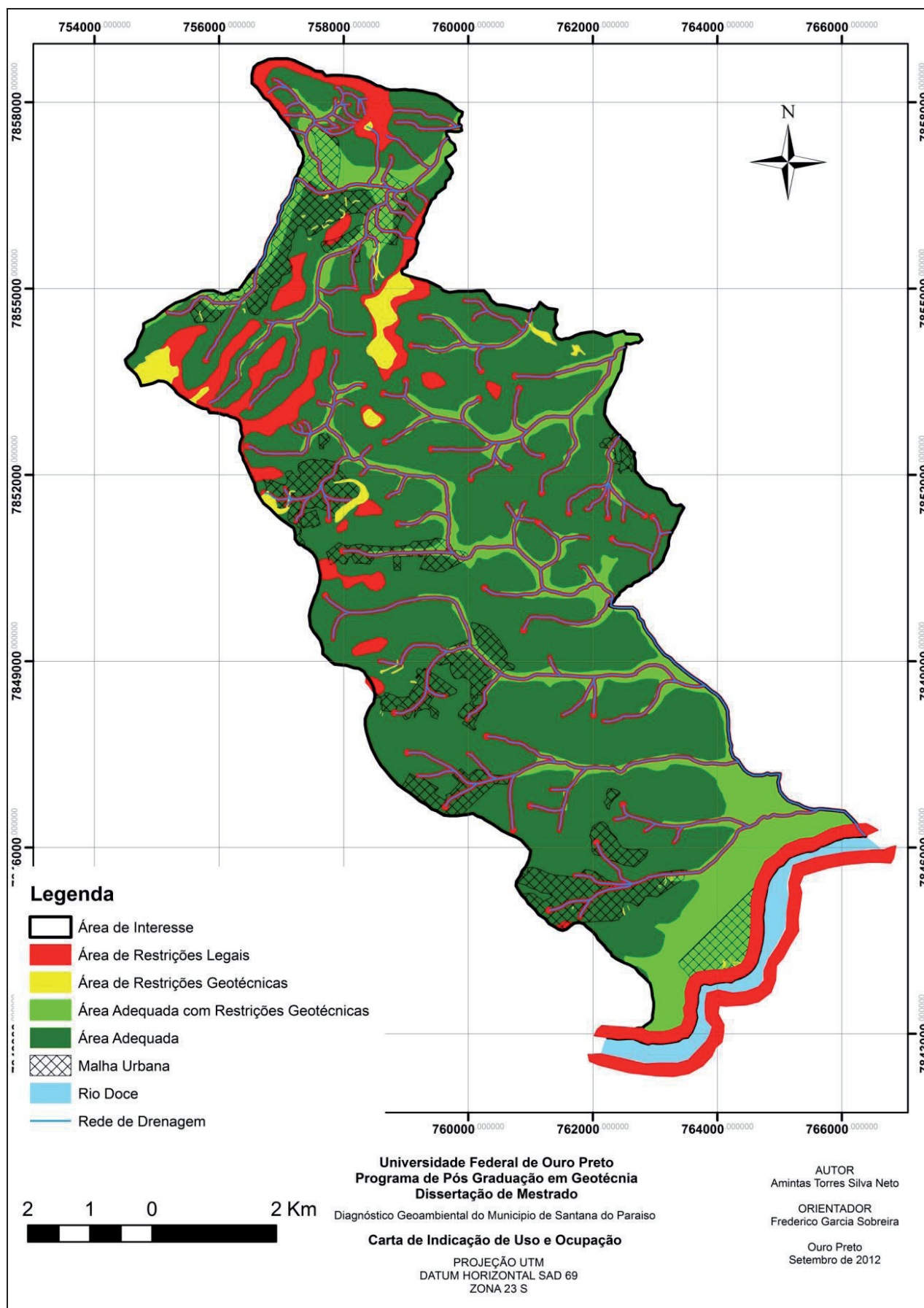


Figura 5. Carta de Indicação de Uso e Ocupação da área de Expansão Urbana do município de Santana do Paraíso.

3.7.3 Áreas de restrições legais

Área de Preservação Permanente

Representa a unidade que em certos casos possui características favoráveis ao uso urbano e expansão de novos bairros, porém essa unidade é delimitada por APP de topo de morro, regulamentada pela Lei Federal n.º 12.651/12, que define os limites de área de preservação permanente, mas mesmo assim essa área fica excluída para expansão urbana, ou atividades agrícolas e silvícolas.

Segundo Santos (2011) em topo de morro, para o caso urbano, do ponto de vista de riscos geológicos e geotécnicos, como deslizamentos e processos erosivos, é extremamente mais favorável a ocupação do que as áreas de encostas. Essa qualidade geotécnica das áreas de topo de morro deve-se à formação de solos mais espessos e evoluídos, portanto, mais resistentes à erosão e à quase inexistência de esforços tangenciais decorrentes da ação da força de gravidade. Situação inversa ocorre com as encostas de alta declividade, instáveis por natureza e palco comum das recorrentes tragédias geotécnicas que têm vitimado milhares de brasileiros. Esse aspecto geológico e geotécnico sugere que, dentro de um regulamento ambiental da expansão urbana, possa-se evoluir na concordância em se liberar, sob determinadas condições, a ocupação dos topos de morro, aumentando-se as restrições para a ocupação das encostas.

3.7.4 Área de restrições geotécnicas

Apresentam características do meio físico que restringem a ocupação.

Relevo Escarpado

Esta área é inadequada à urbanização, pois possui declividade acentuada com um solo raso. Recomenda-se nessa unidade o estudo detalhado com levantamento de áreas de risco de escorregamentos e formulações para medidas e obras para contenção e prevenção a esses possíveis processos de instabilidade, que possam prejudicar as comunidades instaladas a jusante dessas áreas.

Zonas Instáveis

Compreende a região onde se tem ocupação urbana desordenada, caracterizando atividades antrópicas como a maior deflagradora e aceleradora de processos geodinâmicos devido à ocupação predatória e de áreas inadequadas. O solo, apresenta-se bem espesso, com um horizonte coluvionar sobreposto a um horizonte C residual, ocorrendo em alguns locais um solo de aterro com presença de lixo.

São áreas restritas à ocupação, pois são encostas com topografia acentuada e solo de alteração mais profundo, porém podem ser ocupadas mediante verificação de procedimentos técnicos específicos para implementação da obra.

Recomenda-se, em áreas de terraplenagem e aberturas de vias, a realização de obras de correção e prevenção à erosão, como sistemas de terraços, leiras e de drenagem pluvial; além de estudos detalhados com levantamento de áreas de risco a escorregamentos; e formulação de diretrizes para medidas e obras para contenção e prevenção desses processos de instabilidade.

3.7.5 Áreas adequadas com restrições geotécnicas

São subdivididas nas seguintes subáreas.

Aluvião

Esta unidade está localizada nas planícies aluvionares dos principais cursos d'água da área (ribeirões Achado e Garrafa), tributários do rio Doce e, portanto, apresenta um relevo plano, o que de início possibilitou a urbanização da sede do município, mesmo sem ser adequada geotecnicamente.

Além da baixa capacidade de suporte, a unidade apresenta vários processos geológicos, como assoreamento, erosão das margens e enchentes, que tornam as áreas com restrições para a ocupação. Além destes aspectos, as planícies aluviais abrangem áreas de preservação permanente que, pela legislação, não devem ser ocupadas.

Um aspecto alarmante referente a esta unidade é o processo de verticalização que passa a cidade,

com a construção de edifícios de maior porte, fundados sobre material de aluvião, que pode vir a acarretar/ocasionar problemas estruturais em algumas obras.

Recomendam-se estudos detalhados dos locais com o processo de verticalização na sede do município, problemas de erosão das margens e inundações da área urbana, para que futuros problemas possam ser evitados ou minimizados, assim como a formulação de diretrizes para medidas e obras de contenção e prevenção dos processos de instabilidade e de enchentes e inundações das estruturas já consolidadas.

Terraço Aluvial

São terrenos planos localizados na porção sul da área de estudo. Estes depósitos foram formados por materiais carregados pelo rio Doce em diferentes épocas e níveis de base distintos, e que hoje comportam o crescimento do Distrito Industrial já instalado na área.

Pela proximidade ao rio Doce parte deste depósito constitui Área de Preservação Permanente (APP), de acordo com o Código Florestal Brasileiro, mas vem sendo ocupada por obras de pequeno e grande porte, além da utilização para deposição de resíduos.

3.7.6 Área adequada

Rampas de Colúvio

Esta unidade compreende as áreas dispostas nos fundos de vale, que apresentam uma inclinação suave. Ocorre em setores de baixa encosta, em segmentos côncavos que caracterizam as reentrâncias ou depressões do relevo nos anfiteatros. Tais depósitos consistem em leques aluvionares e coluvionares constituídos por sedimentos imaturos advindos das encostas, com origem nas diferentes litologias presentes na área de estudo. Esta unidade apresenta grande adequabilidade à ocupação pela topografia suave e propriedades geotécnicas favoráveis. Recomenda-se apenas uma avaliação detalhada do comportamento geotécnico dos materiais e da profundidade do nível d'água.

Colinas

Essa unidade recoberta por campos e plantio de eucalipto tem perdido essa característica para abrigar a expansão urbana de vários bairros. A unidade foi considerada adequada por apresentar características geotécnicas mais favoráveis à ocupação, onde os declives são mais suaves e por possuir perfil de alteração espesso.

4 CONCLUSÃO

Para o planejamento urbano adequado e crescimento ordenado de uma área é necessário ter o mínimo de conhecimento do seu meio físico. Esse conhecimento se adquire através de processos de mapeamento que façam uma análise como um todo e avaliem o comportamento dos seus componentes em termos geoambientais e suas características de interesse à implementação das formas de ocupação.

A partir do levantamento das características geológicas, geomorfológicas e de solo descritas no decorrer do artigo, mostrou-se, para a área de estudo, que a geologia apesar que o substrato rochoso se encontra bastante intemperizado, ou seja, em avançado estado de alteração junto com a geomorfologia ser o fator importante para delimitação das unidades finais. Assim, foi considerada desnecessária a subdivisão da unidade de relevo colinas, segundo o substrato geológico de origem.

A geologia/geomorfologia foi, portanto, o fator mais importante na definição das unidades de mapeamento. Esta informação, agregada a outras características físicas como hidrografia e os processos geodinâmicos, possibilitou a identificação da adequabilidade à ocupação urbana de cada unidade da área estudada.

A utilização de uma abordagem mista, com base em aspectos relevantes das metodologias de mapeamentos já consagradas e citadas, e adequação destas à realidade de Santana do Paraíso, possibilitou a delimitação de quatro unidades geoambientais indicativas de uso e ocupação:

Área de Restrições Legais, representada pelos locais delimitados e regulamentados por resoluções e leis que impossibilitam sua ocupação.

Área de Restrições Geotécnicas, retratando os ambientes onde as características do meio

físico dificultam a ocupação, tais como relevo com declividade elevada e regiões instáveis.

Áreas Adequadas com Restrições Geotécnicas, indicando as áreas propícias à ocupação, porém com ressalvas, uma vez que devem ser melhor investigadas para a determinação das formas de tratamento dos locais.

E por fim, as Áreas Adequadas, mostrando os locais favoráveis à ocupação devido às suas características, mas não insentando de uma avaliação local detalhada por um profissional capacitado.

Considera-se alcançado o objetivo principal desta pesquisa, que foi gerar um produto cartográfico com as características geoambientais da área de expansão urbana, apresentado de forma de fácil acesso e interpretação ao público não especialista. Sua principal aplicação está no planejamento e gestão territorial da área de expansão urbana do município de Santana do Paraíso. Porém, este documento cartográfico não deve substituir as investigações locais de detalhe.

Por ser um trabalho de âmbito geral, recomenda-se a realização de trabalhos futuros voltados ao detalhamento das unidades geoambientais e a realização de trabalhos de quantificação de riscos geológicos das áreas problemáticas, principalmente para elaboração de um Plano Municipal de Redução de Riscos.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ e a Fundação de Amparo e Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG pelo financiamento e ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia - NUGEO da UFOP.

REFERÊNCIAS

ABREU, A. E. S.; AUGUSTO FILHO, O. Mapeamento geotécnico para gestão municipal. **Geotecnia - Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, Lisboa, n.115, p.45-80, Mar-2009.

BRASIL. Leis e Decretos. Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm> Acesso em 26/01/2013.

BRASIL. Leis e Decretos. **Resolução CONAMA nº369, de 28 de março de 2006. Dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Área de Preservação Permanente-APP**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=489>> Acesso em 22/07/2011.

CAMPOS, F. L. M.. **Áreas de Preservação Permanente: efetividade da legislação e novas propostas para gestão ambiental**. (Mestrado em Engenharia Ambiental - Modo Profissional), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Campos dos Goytacazes - RJ. 2010.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. (S.I.): 2005. Disponível em: <http://www.funape.org.br/-geomorfologia/pdf/index.php>. Acesso em: 15 set. 2011. 2005

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM (Belo Horizonte, MG). **Projeto Leste: mapeamento geológico e cadastramento de recursos minerais**. Belo Horizonte, 2000. Escala 1:100.000.

FREITAS, C. G. L. **Cartografia geotécnica de planejamento e gestão territorial: proposta teórica e metodológica**. 238 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. São Paulo: 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo 2010**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia-vizualiza.php>. Acesso em 31 ago. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Apresenta informações sobre os municípios brasileiros quanto a população, economia e cartografia dentre outros. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 15 out. 2011.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Projeto orla: guia de implementação**. Brasília. Ministério do Meio Ambiente, 2005.

PLANO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO DOCE - PIRH. Disponível em: < <http://www.pirhdoce.com.br>> Acesso em 10 mar. de 2011.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTANA DO PARAÍSO - PMSP. **Plano Diretor Participativo do Município de Santana do Paraíso Minas Gerais**. Volume II Diagnóstico e Propostas. Jacroá Consultoria . Ipatinga. Ipatinga. Outubro de 2006.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTANA DO PARAÍSO. **Site oficial do município**. Disponível em: <<http://www.santanadoparaiso.mg.gov.br>> Acesso em 20 ago. de 2011.

SANTOS, A. R. **Carta Geotécnica - Um salto à frente no Estatuto das Cidades**. Artigo

disponível em: <http://www.ecodebate.com.br/2009/06/22/carta-geotecnica-um-salto-a-frente-no-estatuto-das-cidades-artigo-de-alvarodos-santos/> . Acesso em 29 ago. 2011.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DE SÃO PAULO - SMA; Governo do Estado de SP. **Instabilidade da Serra do Mar no Estado de São Paulo**. São Paulo, v. 3: Conceitos básicos. 1990.

SOBREIRA, F. G. **Estudo Geoambiental do Conselho de Sesimbra**. 347p. Tese (Doutorado). Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa: 1995.