



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**Geoprocessamento Aplicado a Geração de Mapas de Favorabilidade à
Construção de Barragens e Reservatórios**

Guilherme Neiva Rodrigues Oliveira

MONOGRAFIA

BRASÍLIA
2016



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

Guilherme Neiva Rodrigues Oliveira

**Geoprocessamento Aplicado a Geração de Mapas de Favorabilidade à
Construção de Barragens e Reservatórios**

**Monografia de especialização em
Geoprocessamento Ambiental
apresentada a banca examinadora
do Instituto de Geociências como
exigência para a obtenção do
título de especialista em
Geoprocessamento**

Aprovada em 16/12/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr^a. Tati Almeida(orientadora) _____

Prof. Dr^a. Rejane Ennes Cicerelli _____

Doutorando Elton Souza Oliveira _____

Agradecimentos

Agradeço a minha família por sempre apoiar as minhas escolhas e por tudo que tem feito em minha vida, em especial aos meus pais e a tia Jane.

Não poderia de deixar de agradecer aos professores do Instituto de Geociências da UnB, pelo diversos aprendizados e formação acadêmica, principalmente a professora Tati pela grande contribuição ao longo desse curso.

Por fim, aos meus colegas de especialização pelos momentos de companheirismo durante esse ano que se passou, em especial ao Victor Paschoal, o qual sempre compartilhei minhas dúvidas.

“A verdadeira coragem é ser honesto consigo mesmo.”

Mr. Robot

Resumo

Analisando os dados disponíveis gratuitamente e tomando-se como base a proposta estabelecida no trabalho de Melo (2014), foram definidas as seguintes bases de dados: Mapa de Geodiversidade em escala 1:1.000.000 (CPRM) e Mapa Geológico de escala 1:1.000.000 (CPRM).

Os índices definidos para a determinação da favorabilidade a construção de barramentos e reservação de água que estão disponíveis na base de dados acima citada, são os índices de fraturamento, resistência, porosidade e mapa de geossistemas.

Os pesos de cada índice e de cada classe dos índices foram determinados utilizando a metodologia de análise multicritério Analytic Hierarchy Process (AHP), a qual é um dos principais modelos matemáticos correntemente disponíveis para suporte a tomadas de decisões, a qual foi proposta por Saaty em 1972.

Por fim, com a utilização de operações algébricas entre os mapas dos índices e com os seus respectivos pesos definidos, foram gerados os mapas finais de favorabilidade a construção de barragens e de reservatórios os quais tem a finalidade de auxiliar gestores durante as fases iniciais de implementação de um projeto.

A metodologia foi testada também com dados geológicos na escala 1:250.000, disponibilizados pela CPRM, assim foi possível concluir que a metodologia proposta é aplicável em diversas escalas, onde a escala é diretamente proporcional a qualidade dos mapas finais de favorabilidade.

Também se verificou que barragens já existentes estão localizadas em locais não favoráveis geologicamente, isso se justifica devido todo o curso do Rio Tocantins estar coberto por depósitos aluviais e coluviais, que apresentam baixa resistência e alta porosidade, o que é desfavorável à construção de barragens. Porém, devido ao fato de serem grandes barragens, esse material inconsolidado é geralmente retirado para construção do barramento, e totalmente saturado em água pelo reservatório, levando em consideração apenas as rochas abaixo desse material. Além disso, outros parâmetros são considerados para a construção de barragens, como geomorfologia, hidrologia e fatores socioeconômicos, sendo a geologia um dos fatores de mais baixa relevância, porém, essencial.

Abstract

Analyzing the data available free of charge and based on the proposal established in the work of Melo (2014), defined the following databases: the Map of Geodiversity in scale 1:1.000.000 (CPRM) and the Geological Map of 1:1.000.000 scale (CPRM).

The indexes defined for the determination of the favorability of the construction of dams and water reservoirs that are available in the database mentioned above are the elements of fracture, resistance, porosity and map of geosystems.

The weights of each index and each class of indices will be determined using the methodology of analysis multicriteria Analytic Hierarchy Process (AHP), which is one of the main mathematical models currently available to support decision making, which was proposed by Saaty in 1972.

Finally, with the use of algebraic operations between the index maps and their respective defined weights, the final maps of favorability were generated for the construction of dams and reservoirs, which has the purpose of assisting managers during the initial phases of implementation of a project.

The methodology was also tested with geological data in a scale of 1: 250,000, provided it is compatible, so it was possible to conclude that the proposed methodology is applicable in different scales, where the scale is directly proportional to the quality of the final maps of favorability.

It was verified that that already existing dams are located in places not favorable geologically, this is justified because the whole course of the Tocantins River area covered by alluvial and colluvial deposits, which present low resistance and high porosity, which is unfavorable to the construction of dams. However, due to the fact of being large dams, this unconsolidated material is usually removed for construction of the dams, and totally saturated in water by the reservoir, taking into account only the rocks below that material. In addition, other parameters are considered for the construction of dams, such as geomorphology, hydrology and socioeconomic factors, and the geology one of the factors of lower relevance, however, essential.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.2	LOCALIZAÇÃO	11
2.	GEOLOGIA REGIONAL.....	12
2.1	CINTURÃO ARAGUAIA	13
	EMBASAMENTO.....	13
	Grupo Rio do Coco	13
	Complexo Rio dos Mangues	13
	Complexo Porto Nacional	13
	Suíte Serrote	14
	Suíte Monte Santo.....	14
	FAIXA ARAGUAIA	14
	Grupo Estrondo	14
	Grupo Tocantins.....	15
2.2	COMPLEXOS OFIOLÍTICOS	15
2.3	SUÍTE SANTA LUZIA	15
2.4	GRANITO MATANÇA.....	15
2.5	BACIA DO PARNAÍBA	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	BARRAGENS E RESERVATÓRIOS.....	16
3.2	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	18
3.3	GEOPROCESSAMENTO COMO FERRAMENTA PARA PROSPECÇÃO DE LOCAIS FAVORÁVEIS A CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS E RESERVATÓRIOS	19
3.4	ALGEBRA DE MAPAS	19
3.5	MÉTODO AHP.....	20
4.	METODOLOGIA	21
4.1	DADOS DE ENTRADA.....	21
4.2	PRÉ-PROCESSAMENTO.....	23
4.3	FORMULAÇÃO DOS INDICADORES	23
4.4	PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	24
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5.1	CORREÇÕES	26
5.2	DADOS DERIVADOS DO MAPA GEOLÓGICO	28
5.3	DADOS DERIVADOS DO PROJETO GEODIVERSIDADE	29



5.3.1 Índice de Fraturamento.....	30
5.3.2 Índice de Resistência.....	30
5.3.3 Índice de Porosidade	30
5.4 DETERMINAÇÃO DO PESOS (AHP)	32
5.5 ÁLGEBRA DE MAPAS	34
6. CONCLUSÕES.....	43
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Localização da Área de Estudo.</i>	11
Figura 2. <i>Setores e Domínios do Sistema Orogênico Tocantins (Hasui, 2012).</i>	12
Figura 3. <i>Fugas de água em reservatórios: (a) fuga por hidrografia condicionada a zonas de falhas. (b) fuga por camadas de calcário. (c) Fuga por camada permeável; (d) fuga por material inconsolidado. Figura retirada de Costa (2012).</i>	18
Figura 4. <i>Fluxograma metodológico.</i>	21
Figura 5. <i>Folhas Geológicas 1:1.000.000 disponibilizadas pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM.</i>	22
Figura 6. <i>Folhas do Projeto Geodiversidade 1:2.500.000 disponibilizadas pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM.</i>	22
Figura 7. <i>Problemas encontrados nas folhas geológicas e do Projeto Geodiversidade da CPRM, onde ocorrem (A) erros de sobreposição, (B) buracos em grandes lagos e (C) buracos em grandes Rios.</i>	26
Figura 8. <i>Mapa Geológico corrigido da área de estudo.</i>	27
Figura 9. <i>Mapa de Geodiversidade corrigido da área de estudo.</i>	27
Figura 10. <i>Mapa de Geossistemas, obtido através da reclassificação dos dados geológicos da CPRM de escala 1:1.000.000.</i>	28
Figura 11. <i>Produtos da reclassificação do Mapa de Geodiversidade 1:2.500.000 (A). (B) Mapa do Índice de Fraturamento, (C) Mapa do Índice de Porosidade e (D) Mapa do Índice de Resistência.</i>	31
Figura 12. <i>Gráfico para o cálculo dos pesos finais, onde X é a porcentagem encontrada pelo método AHP e Y o peso final.</i>	33
Figura 13. <i>Ferramenta Feature to Raster de transformação de arquivos vetoriais para arquivos matriciais.</i>	35
Figura 14. <i>Ferramenta Reclassify, utilizada para o preenchimento dos pesos determinados.</i> ...	35
Figura 15. <i>Ferramenta Reclassify, utilizada para o preenchimento dos pesos determinados.</i> ...	36
Figura 16. <i>Ferramenta Reclassify, utilizada para o preenchimento dos pesos determinados.</i> ...	36
Figura 17. <i>Mapa de favorabilidade a construção de barragens com base em variáveis geológicas.</i>	37
Figura 18. <i>Mapa de favorabilidade a construção de reservatórios com base em variáveis geológicas.</i>	38
Figura 19. <i>Mapa de localização da área com dados geológicos em escala 1:250.000, em relação a Ottobacia nível 3 (área de estudo).</i>	39
Figura 20. <i>Mapa de favorabilidade a construção de barragens com base em variáveis geológicas em escala 1:250.000.</i>	40
Figura 21. <i>Mapa de favorabilidade a construção de reservatórios com base em variáveis geológicas em escala 1:250.000.</i>	41
Figura 22. <i>Localização das Usinas Hidrelétricas de Peixes e Luís Eduardo Magalhães, nos mapas de favorabilidade obtidos através das cartas geológicas 1:1.000.000.</i>	42
Figura 23. <i>Localização das Usinas Hidrelétricas de Peixes e Luís Eduardo Magalhães, nos mapas de favorabilidade obtidos através das cartas geológicas 1:250.000.</i>	42

Lista de Tabelas

Tabela 1. <i>Correlação entre a classe da rocha e o tipo de barragem mais adequada (MARQUES FILHO e GERALDO, 1998).</i>	18
Tabela 2. <i>Média dos graus de importância estabelecidos pelos especialistas através das respostas do questionário.</i>	32
Tabela 3. <i>Exemplo de tabela AHP para determinação dos pesos dos índices geológicos, onde os pesos finais estão na coluna de cor laranja.</i>	33
Tabela 4. <i>Pesos obtidos após execução da metodologia AHP.</i>	34

1. INTRODUÇÃO

Os eventos hidrológicos críticos têm sido amplamente debatidos por pesquisadores nacionais e internacionais, em função dos prejuízos causados à sociedade brasileira, devido principalmente à perda de vidas e de patrimônios materiais durante eventos de prolongadas estiagens ou de chuvas intensas.

Segundo Brito *et al* (2007), o Brasil está incluído entre os países de maior reserva de água doce, ou seja, 13,8% do deflúvio médio mundial, com uma disponibilidade hídrica per capita variando de 1.835 m³/hab./ano na bacia hidrográfica do Atlântico Leste e de 628.938 m³/hab./ano na bacia Amazônica. No entanto, devido às suas dimensões geográficas e diversidade climática, algumas regiões sofrem graves problemas de escassez de água, como o semiárido nordestino.

Em contraste a escassez de água, até mesmo as regiões afetadas pela seca sofrem durante o período de chuvas, onde a ocupação irregular do solo durante a época de estiagem somada a chuvas intensas em um curto período de tempo provocam inundações, as quais podem gerar prejuízos significativos. As inundações representam 50% dos desastres naturais relacionados com a água, dos quais 20% ocorrem nas Américas (TUCCI, 2007).

Neste contexto, destaca-se o caráter urgente da implantação de medidas que minimizem os impactos negativos dessa sazonalidade na sociedade. Uma alternativa que visa minimizar esses impactos é a construção de reservatórios, com a finalidade tanto para abastecimento público como para o controle de cheias.

Esse trabalho faz parte de um projeto maior denominado “Desenvolvimento de técnicas de geoprocessamento aplicadas à segurança em recursos hídricos no Brasil. Reservação, Monitoramento e Fiscalização” o qual visa prioritariamente à determinação e ordenamento de variáveis geológicas, se utilizando da metodologia de análise multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP), proposta por SAATY em 1972.

Para a melhor localização desses reservatórios MELO (2013) identificou três variáveis técnicas a serem consideradas: geológica, geomorfológica e hidrológica, sendo este trabalho responsável apenas pela análise da variável geológica.

A variável geológica será analisada a partir das cartas geológicas e de geodiversidade disponibilizadas gratuitamente pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM. Com base na integração das variáveis técnicas serão formulados os índices prospectivos de favorabilidade e de restrição de geossistemas.

A área escolhida para desenvolvimento da metodologia é uma Ottobacia nível 3 do Rio Tocantins, a qual possui dados geológicos disponíveis em variadas escalas, o que permitiu a comparação entre os resultados. Além disso, a área em questão sofre com problemas de abastecimento público, devido à escassez de água prolongada, e a construção de reservatórios nessa região é uma medida eficiente para mitigação desse problema.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é a proposição metodológica de índices prospectivos geológicos de favorabilidade a construção de barragens e reservatórios, se utilizando de dados gratuitos nas escalas 1:1.000.000 e 1:250.000, tendo como área de estudo a região da Bacia do Rio Tocantins.

A metodologia a ser desenvolvida tem como finalidade auxiliar e orientar gestores, durante as primeiras etapas de um projeto de construção de barragens.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A área escolhida para o desenvolvimento do trabalho se localiza na porção central do estado do Tocantins e parte do norte do estado de Goiás, como pode se observar na figura 1. A área de estudo engloba a cidade de Palmas – TO e é uma sub-bacia (Ottobacia nível 3) da Bacia Rio Tocantins.

Essa área foi escolhida por possuir dados geológicos disponibilizados pelo Serviço Geológico Brasileiro/CPRM em diferentes escalas (1:250.000 e 1.000.000), além de apresentar grande diversidade geológica e por possuir dois grandes reservatórios, que servirão de base para comparação com os resultados deste trabalho. Também foi levado em consideração o fato da região possuir grande necessidade de medidas mitigadoras para aliviar os efeitos de secas prolongadas, o que é comum nessa região, onde a construção de reservatórios serviria prioritariamente para o abastecimento público.

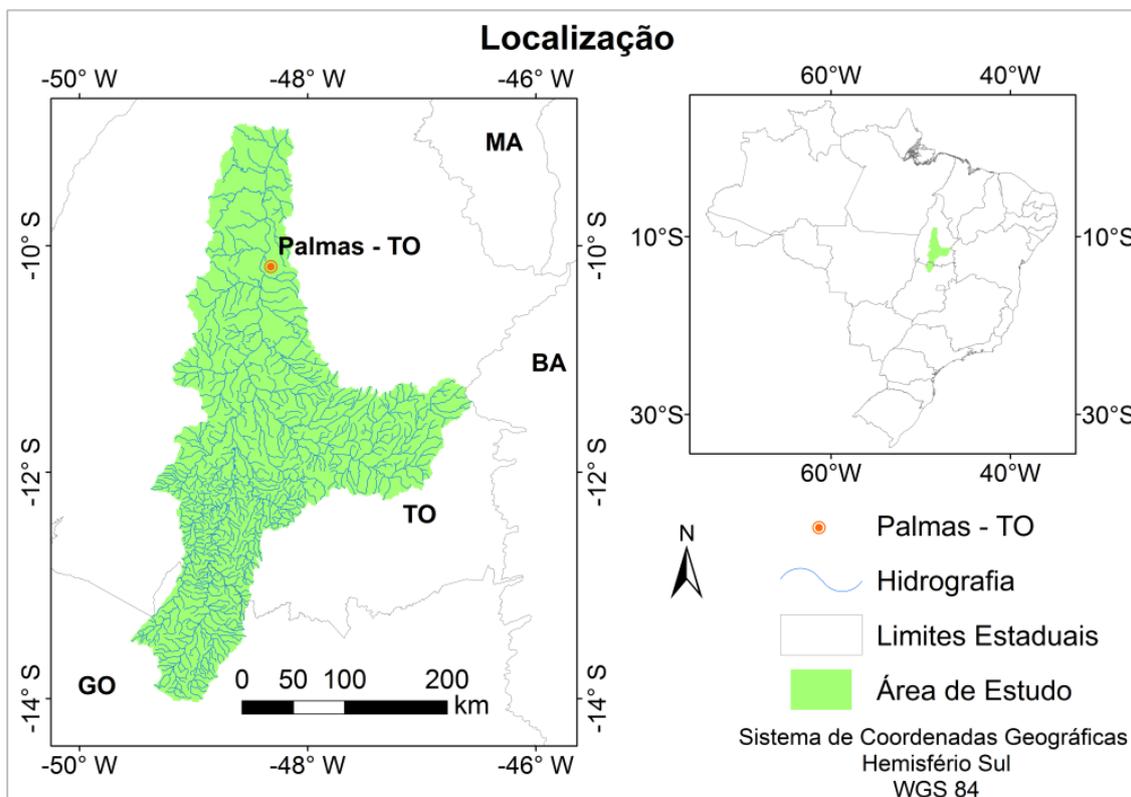


Figura 1. Localização da Área de Estudo.

2. GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo localiza-se no Cinturão Araguaia, pertencente à Província Tocantins e abrangendo partes da Bacia do Parnaíba. Tal província está localizada entre os crátons Amazônico e São Francisco, tendo seu limite a norte com a Bacia do Parnaíba e a sul com a Bacia do Paraná.

A Província Tocantins está inserida no contexto do Sistema Orogênico Tocantins, resultado da colisão entre os crátons Amazônico, São Francisco e Paranapanema, ocorrido durante o Neoproterozóico. Esta província é formada por um conjunto de três cinturões orogênicos: o Cinturão Brasília, que bordejia a porção oeste do Crátão São Francisco, e os Cinturões Araguaia e Paraguai, que bordejam o Crátão Amazônico (Figura 2).

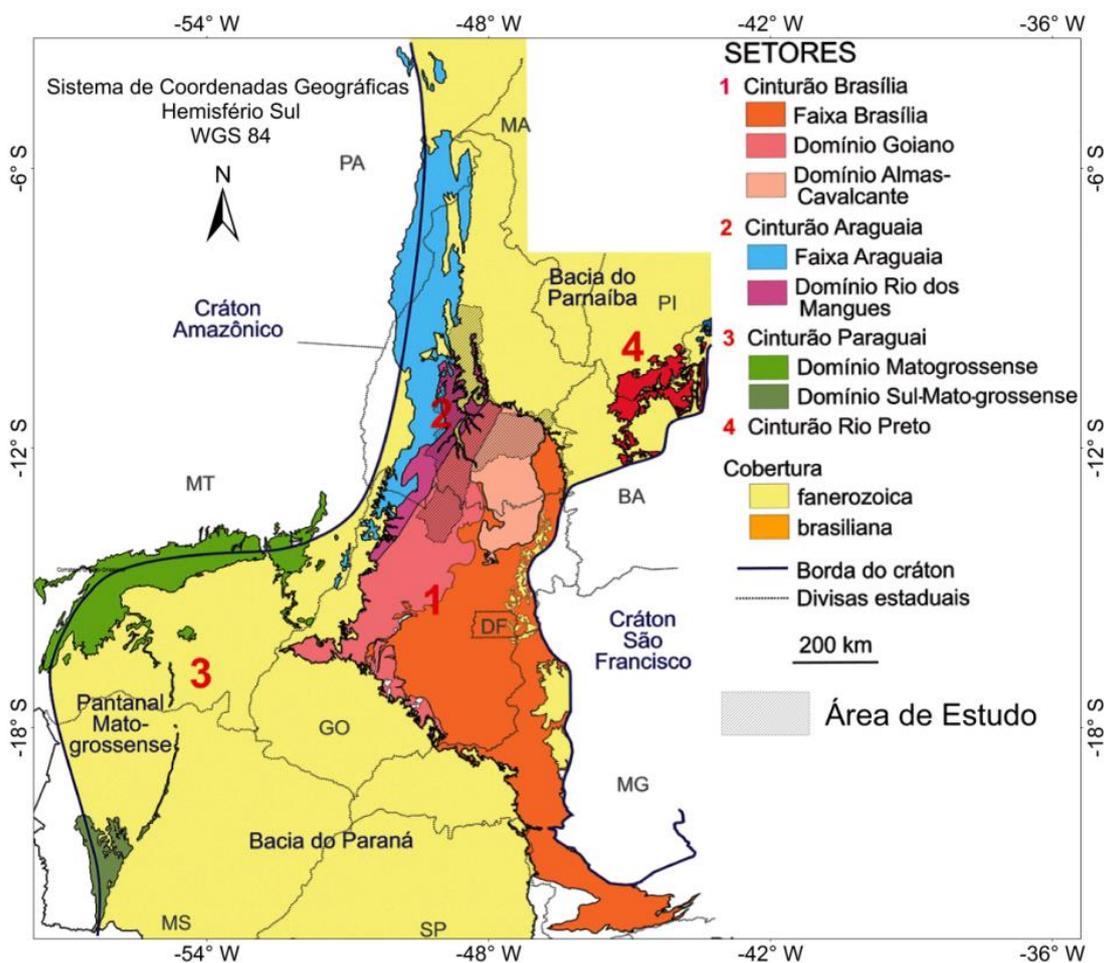


Figura 2. Setores e Domínios do Sistema Orogênico Tocantins (Hasui, 2012).

Como a geologia possui relação direta com o tema desse estudo, e é a variável a ser analisada, foi feita uma descrição sobre as principais unidades geológicas da região, englobando o Cinturão Araguaia, seu embasamento e principais intrusões associadas, além das rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba.

2.1 CINTURÃO ARAGUAIA

O Cinturão Araguaia é compartimentado em dois domínios, um sudeste representado pelo Domínio Rio dos Mangues, que é o seu embasamento exposto, e a porção oeste e norte representado pelo Domínio Faixa Araguaia (Hasui, 2012).

EMBASAMENTO

O embasamento do Cinturão Araguaia pode ser dividido em dois segmentos de idades distintas: um setentrional e o outro meridional (Arcanjo, 2002). O segmento setentrional compreende o Complexo Colméia e o Gnaiss Cantão (Souza, 1984), enquanto o segmento meridional inclui o Grupo Rio do Coco e o Complexo Rio dos Mangues (Arcanjo 2002). Na porção mais a sul encontra-se ainda o Complexo Porto Nacional (Gorayeb et al., 2000).

O Complexo Colméia é constituído predominantemente de ortognaisses de composição trondhjemitica, tonalítica, granodiorítica e granítica e apresentam uma deformação reliquiar de direção E-W (Arcanjo, 2002) correlacionada a eventos deformacionais arqueos (Costa, 1980). O Gnaiss Cantão, definido por Souza (1984) apresenta contato discordante com o Complexo Colméia e corresponde a ortognaisses com foliação marcante e bandamento incipiente.

Grupo Rio do Coco

No segmento meridional destaca-se a presença do Grupo Rio do Coco, uma sequência vulcano-sedimentar metamorfizada em fácies xisto verde, com características de um greenstone belt, e individualizada por Barreira (1980).

Baseado na predominância do tipo de sedimentação e na natureza das rochas ígneas que aparecem intercaladas, a sequência pode ser dividida em duas unidades com aparente discordância entre si, sendo que a unidade inferior é composta por intercalações de metassedimentos químicos e pelíticos com xistos magnesianos, enquanto na unidade superior predominam xistos feldspáticos carbonatados e anfíbolitos (Barreira, 1980).

Complexo Rio dos Mangues

Também no segmento meridional, o Complexo Rio dos Mangues corresponde a uma parte representativa do embasamento, sendo constituído por gnaisses tonalíticos e granodioríticos, além de gnaisses calcissilicáticos migmatizados, com leucossomas granodioríticos (Arcanjo & Moura, 2000) e ainda granada biotita paragneisses, ortoquartzitos, granitos-gnaisses e anfíbolitos associados (Costa et al., 1983).

Complexo Porto Nacional

O Complexo Porto Nacional é uma das duas principais unidades litológicas tectonicamente justapostas do Terreno de Alto Grau Metamórfico de Porto Nacional, e está inserido dentro do Maciço de Goiás. É constituído por granulitos máficos, enderbitos, cianita e/ou silimanita-granada gnaisses e corpos graníticos anatéticos (leucoenderbitos, trondhjemitos e granitos tipo S) (Gorayeb et al., 2000).

Suíte Serrote

Um batólito de formato elíptico, denominado Granito Serrote, encontra-se encaixado em rochas do Complexo Rio dos Mangues. Esta unidade está presente na parte centro norte do Complexo e seu corpo principal, que aflora na Serra do Serrote, possui o eixo maior de aproximadamente 19 km na direção NNE-SSW e o eixo menor de cerca de 14 km (Costa, 1985). Além do corpo principal, diversos outros corpos de pequena dimensão também afloram nas proximidades da serra (Arcanjo, 2002).

É constituída normalmente por rochas leucocráticas, de coloração rosa com tons acinzentados, granulação variando de média a grossa nas partes mais centrais do corpo, e mais fina em suas bordas (Arcanjo, 2002).

Segundo Arcanjo (2002), a mineralogia é, em geral, constituída por fenocristais de microclínio, plagioclásio e quartzo, muitas vezes orientados, e uma matriz formada basicamente por quartzo, microclínio e plagioclásio, com biotita lamelar, anfibólio e muscovita, em menor quantidade. Minerais acessórios podem incluir titanita, alanita, zircão, apatita, calcita, epidoto e opacos.

Suíte Monte Santo

A Suíte Monte Santo é formada por dois corpos de gnaisses alcalinos: o Serra da Estrela, intrudido em rochas do Complexo Rio dos Mangues, e Monte Santo (Arcanjo *et al.*, 2013). Estes complexos alcalinos foram estudados por Iwanuch (1991), que descreve ambos com uma grande variedade de rochas alcalinas metaígneas, híbridas e metassomáticas. Entre os principais litotipos descritos estão nefelinólitos, nefelina sienito-gnaisses, sienito-gnaisses com nefelina e álcali-sienitos.

FAIXA ARAGUAIA

A Faixa Araguaia por sua vez é representada por uma sucessão metassedimentar que varia de máfica a ultramáfica, com grau metamórfico e deformacional crescendo de oeste para leste, e enfeixadas no Supergrupo Baixo Araguaia (Abreu 1978).

Na região de estudo estão presentes rochas dos grupos Estrondo e Tocantins.

Grupo Estrondo

O Grupo Estrondo expõe-se na porção mais a leste do Cinturão Araguaia e é constituído pelas rochas de mais alto grau metamórfico da faixa. Foi desmembrado do topo para a base nas formações Xambioá, Canto da Vazante e Morro do Campo, e estão descritas a seguir:

- Formação Xambioá – Constituída por micaxistos, xistos grafitosos, quartzitos e anfi-bolitos, apresentando metamorfismo de baixo a médio grau.
- Formação Canto da Vazante – Apresenta quartzitos, micaxistos feldspáticos e grana-díferos.
- Formação Morro do Campo – Ocorrem micaxistos, quartzitos, meta-conglomerados, xistos grafitosos, micaxistos com granada, estauroлита e cianita, e anfibolitos. Todos se encontram metamorfizados em baixo a médio grau.

Grupo Tocantins

O Grupo Tocantins foi desmembrado nas formações Pequizeiro (base) e Couto Magalhães (topo) (Hasui e Costa, 1990), que estão descritas a seguir:

- Formação Pequizeiro – Constituída por clorita-xistos, com bandas de clorita e muscovita alternadas com outras quartzosas além de filitos e quartzitos. Apresenta metamorfismo de baixo grau.
- Formação Couto Magalhães – Apresenta ardósias, filitos, quartzitos, metachertes, me-tarcóseos, meta-conglomerados e meta-calcários. Todas apresentam metamorfismo de grau baixo a incipiente.

2.2 COMPLEXOS OFIOLÍTICOS

Os Complexos Ofiolíticos são reconhecidos como uma unidade neoproterozóica, são representados pelos complexos Quatipuru e Serra do Tapa. São pré-tectônicos, de idade 760 Ma, e se encontram entremeados no Supergrupo Baixo Araguaia.

- Complexo Quatipuru – Apresenta talcoxistos, serpentinitos, peridotitos, clorititos, ga-bros, wehrlitos, piroxenitos, silexitos e cromititos. Apresenta metamorfismo incipiente (Hasui 2012).
- Complexo Serra do Tapa – Constituído por serpentinitos, talcoxistos, metabasaltos, xistos máficos, gabros, silexitos, quartzitos, BIFs e filitos, com metamorfismo de baixo grau (Hasui 2012).

2.3 SUÍTE SANTA LUZIA

A Suíte Santa Luzia foi descrita segundo Hasui *et al.* (1984b) como um grupo de rochas graníticas expostas em forma de pequenos stocks, diques, lentes e veios concordantes ou não com a xistosidade da sequência das supracrustais do Grupo Estrondo. Ocorrem muscovita-biotita monzogranitos, muscovita-biotita granodioritos e granitos pegmatóides (Lamarão & Kotschoubey, 1994).

2.4 GRANITO MATANÇA

O Granito Matança se encontra a oeste do município de Porto Nacional em contato com as rochas dos Complexos Porto Nacional e Rio dos Mangues (Costa *et al.*, 1984). Apresenta granitos de coloração rosada, foliados, ricos em microclínio, com textura augen porfiróide e extensiva trama milonítica (Gorayeb, 1996).

2.5 BACIA DO PARNAÍBA

A Bacia do Parnaíba está localizada na porção noroeste do nordeste brasileiro e abrange parte dos estados do Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia. Compreende uma área de 600 mil km², atingindo uma profundidade de cerca de 3500 m em seu depocentro. Foi definida como uma bacia intracratônica, de contorno oval. Sua evolução consiste em uma combinação e sucessão de diversos processos de formação de

bacias, incluindo extensão continental, subsidência termal sobre grande área e ajuste isostático posterior.

A Bacia do Parnaíba desenvolveu-se diretamente sobre um substrato composto principalmente por rochas metamórficas oriundas de processos tectonomagmáticos não mais antigos que o Mesoproterozóico, sobre os quais se superpõem grabéns (Góes *et al.* 1992) preenchidos no Neoproterozóico e no Cambro-Ordoviciano.

A região apresenta rochas do Grupo Canindé, que é representado pelas formações Itaim, Poti, Pimenteiras, Cabeças e Longá (Góes *et al.*, 1993). Entretanto, encontram-se na área apenas as três últimas citadas.

A Formação Pimenteiras é composta por espessas camadas de folhelho cinza-escuro a preto, retratando um ambiente nerítico de plataforma dominada por tempestades (Della Fávera, 1990), que depositaram delgadas camadas de arenito fino.

A Formação Cabeças consiste de arenito fino, bem selecionado, depositado em ambiente nerítico plataformar sob a ação predominante de correntes induzidas por processos de marés (Della Fávera, 1982; Freitas, 1990) ou por correntes oceânicas, e eventual influência periglacial (Caputo, 1984), representada pela presença de diamictitos. Outra fácies importante é constituída de arenito fino a médio, bem selecionado, eventualmente associado a arenito grosso, depositado em ambiente fluvial (estuarino), também sob a influência periglacial (Plummer, 1946).

A Formação Longá foi depositada em ambiente deltaico e em planícies de maré no início do Carbonífero (Mississippiano), sendo formada por arenitos finos a médios sub-angulosos, argilitos e siltitos cinzas, micáceos e, por vezes, carbonosos. Ocorrem ainda folhelhos pretos, micáceos e carbonosos, localmente com lâminas de carvão nas porções inferiores.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Visando aprimorar o trabalho de Melo (2013), o qual se utilizou de variáveis geológicas para a determinação de índices prospectivos para localizar locais favoráveis à implementação de barragens e reservatórios para a geração de energia elétrica, este capítulo consiste na fundamentação teórica sobre a construção de barragens e reservatórios, além do levantamento bibliográfico dos métodos que serão utilizados.

Os métodos utilizados por este projeto se resumem na álgebra de mapas e o método de análise multicritério AHP que serão descritos adiante.

3.1 BARRAGENS

Uma barragem, especificamente uma grande barragem, é o tipo de obra que mais influencia o meio ambiente, ela modifica o regime do rio com a construção do seu barramento e conseqüente formação de um reservatório. Os níveis freáticos próximos à área represada também são modificados. O desnível da água entre montante e jusante da barragem criam gradientes hidráulicos elevados. As formações geológicas saturadas pelo represamento passam a ter um comportamento diferente.

As finalidades das barragens são, principalmente, as seguintes: abastecimento doméstico e industrial, irrigação, geração de energia elétrica, navegação, controle de enchentes e recreação.

Segundo Costa (2012) os principais problemas geológicos relacionados a barragens e reservatórios são:

- Erosão e Assoreamento;
- Sismicidade Induzida.
- Fugas Naturais;

A erosão é o conjunto de processos que desagregam e transportam solo e rochas morro abaixo. Esses processos transportam o material alterado de um local e depositam em outro de menor energia (PRESS, 2006).

Já o processo de assoreamento representa a deposição da carga sólida proveniente da erosão. O assoreamento inicia-se com a sedimentação da carga sólida mais grosseira logo que penetra no reservatório, e a carga de matérias finos como silte e argila sedimenta em porções mais interiores do lago. A medida que o assoreamento se intensifica, a carga do material grosseiro vai avançando sobre a sedimentação fina até completar o assoreamento de todo o reservatório (Costa, 2012).

Os problemas de sismicidade induzidas ocorrem devido à reativação de falhas, por aumento de esforços, causadas pela massa de água do reservatório, além da lubrificação dessas mesmas zonas de falhas (MIOTO, J. A. & RIBOTTA, L. C., 1995).

As possibilidades de fugas de água laterais em um reservatório são comuns quando o divisor de águas que limita a bacia hidrográfica está próximo ao nível máximo de acumulação. Essa possibilidade de percolação é ainda maior quando a rede de drenagem superficial se acha condicionada a zonas de falhas ou de fraturamento, o que constitui um caminho mais fácil para a percolação das águas subterrâneas (Figura 3a). Outra condição geológica que favorece essas fugas é a ocorrência de camadas permeáveis que propiciem o fluxo subterrâneo do reservatório para o seu exterior (Costa, 2012).

As situações de fugas de água são ilustradas na figura 3, onde em (b), uma camada de calcário, facilmente solúvel, o que gera dutos e cavidades por onde a água pode escapar. Em (c) o fluxo é propiciado por camadas de arenito, altamente poroso, o que também ocorre com materiais inconsolidados como ilustrado em (d).

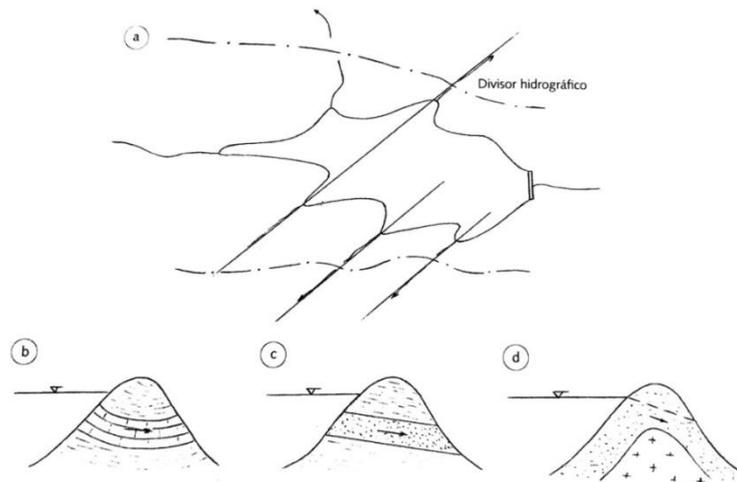


Figura 3. Fugas de água em reservatórios: (a) fuga por hidrografia condicionada a zonas de falhas. (b) fuga por camadas de calcário. (c) Fuga por camada permeável; (d) fuga por material inconsolidado. Figura retirada de Costa (2012).

3.2 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Para a implementação de uma barragem é essencial o estudo da fundação da obra, ou seja, o material no qual a barragem vai ser construída e suportada. As principais características físicas, químicas e mineralógicas desse material devem ser minuciosamente levantadas. Para a determinação da sua capacidade de suportar o peso da barragem (Marangon, 2004).

Segundo Souza, 2013 as análises de permeabilidade, resistência e deformabilidade da fundação são imprescindíveis na construção de barragens. Com os dados levantados é possível definir a viabilidade de um projeto e qual o tipo de barragem mais adequado (Tabela 1).

Tabela 1. Correlação entre a classe da rocha e o tipo de barragem mais adequada (MARQUES FILHO e GERALDO, 1998).

Classe de rocha	Simb	Rocha	Resistência a compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tipo de barragem adequada
muito resistente	R1	granitos, diabásios, basaltos maciços, andesitos, gnaisses, migmatitos, quartzitos, calcário, metarenito, metagrauvaca. (são muito mais resistentes que o concreto)	>120	>50	Qualquer
resistente	R2	Basaltos vesiculares, quartzito, anfíbólio-xisto, arenito, grauvacas e siltito. (são mais resistentes que o concreto)	120 a 60	50 a 20	menos adequadas p/ bar. de concreto em arco
pouco resistente	R3	Tufos soldados, brechas basálticas, micaxisto, filitos quartzosos, folhelhos silíticos compactos e arenitos medianamente resistentes.	60 a 30	20 a 5	Não apropriadas p/ bar. de concreto em arco ou em contrafortes
branda	R4	Folhelhos argilosos, arenitos brandos, filitos grafitosos, talco-xistos, etc.	30 a 10	5 a 1	estruturas de gravidade
muita branda	R5	Argilitos, siltitos brandos	<10	<1	estruturas de gravidade

Wang e Park(2002) determinaram que a permeabilidade de uma rocha está associada a parâmetros macroscópicos e microscópicos, e o tamanho, forma, orientação e interconexões entre os poros constituem a porosidade. Outro parâmetro que deve ser avaliado é o grau de fraturamento, que possui como características o tamanho da abertura, a rugosidade de superfície e sua distribuição pela rocha.

Além de contribuir com a deformação, a permeabilidade do substrato rochoso também faz com que a água que está sendo mantida no reservatório possa escapar por baixo da barragem, seguindo seu curso natural. Portanto grandes permeabilidades impossibilitam também dessa forma a construção de uma barragem (Souza, 2013).

3.3 GEOPROCESSAMENTO COMO FERRAMENTA PARA PROSPECÇÃO DE LOCAIS FAVORÁVEIS A CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS E RESERVATÓRIOS

Desde a década de 1970 o uso de ferramentas de geoprocessamento vem sendo utilizadas no Brasil, que se iniciou pela CPRM para fins de pesquisas minerais (CPRM, 2012). A tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite uma coleta e análise de informações muito mais rápida e prática do que era possível com técnicas tradicionais de pesquisa, proporcionando assim, soluções de análises complexas através da compilação de dados de diversas fontes. Com isso é possível à geração de documentos gráficos, cartográficos e/ou temáticos resultantes da integração de diversos dados de diversas fontes, colaborando para uma maior compreensão de um fenômeno estudado (DEUS & NASCIMENTO, 2001).

Geoprocessamento já é utilizado com frequência em projetos de barragens, para melhor espacialização e locação de uma barragem. Também pode ser usada para análise ambiental, a exemplo de Schwalm (2008), e para manejo e/ou gestão de barragens e recursos hídricos. Dantas (2008) utilizou as ferramentas de geoprocessamento para identificar barragens não cadastradas em uma bacia hidrográfica específica.

Melo (2013) utilizou as técnicas de geoprocessamento para tentar determinar locais mais propícios a construção de barragens em grandes áreas para fins de geração de energia elétrica. Em seu trabalho são utilizados diversos parâmetros técnicos, socioeconômicos e ambientais para definição das melhores opções de locais de barramento em uma bacia.

3.4 ALGEBRA DE MAPAS

A modelagem cartográfica envolve modelos expressos em mapas, sendo tal definição proposta por Tomlin (1990), assim um modelo cartográfico pode ser simplificado a uma coleção de mapas ou camadas de mapas pertencentes a uma área comum e operações entre seus elementos. Este modelo de camadas pode ser visualizado por um conjunto de matrizes ou imagens a um registro comum (representação raster), onde cada camada de informação representa uma variável espacial descrevendo um aspecto da realidade (Burrough, 1991 e Berry, 1993).

A álgebra de mapas, também chamada de álgebra de campo, de acordo com Berry (1993), é uma extensão da álgebra tradicional, em que existe um conjunto de operadores, sendo que as variáveis utilizadas são campos geográficos. Estes operadores manipulam um, dois ou mais geo-campos, sendo que cada geo-campo descreve um atributo diferente ou um mesmo atributo com datas de aquisição diferentes.

Tomlin (1990) foi o primeiro autor a definir mapas como elementos que associam um valor quantitativo (escalar, ordinal, cardinal ou intervalar) ou qualitativo (nominal) para cada local de uma área de estudo; e defendeu a realização de operações matemáticas entre esses elementos de acordo com a vontade e bom-senso do modelador, sendo essa técnica, a precursora para o que definimos hoje como álgebra de mapas. Tomlin, 1990 define os elementos que associam a cada local, um valor quantitativo ou qualitativo como geo-campos. Os geo-campos origem podem ser definidos como as variáveis do tipo campo, usadas nas operações, de soma, subtração, divisão, multiplicação, média e combinação booleana, fatiamento ou reclassificação, e o geo-campo resultante da operação é chamado de geo-campo destino.

3.5 MÉTODO AHP

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) foi desenvolvido pelo Prof. Thomas Saaty, na década de 1970 e foi baseado em conceitos de matemática e psicologia. Essa metodologia é utilizada para ajudar as pessoas a escolher e a justificar suas escolhas. Desta forma, trata-se de um método a priori, determinando os critérios e seus pesos a partir das preferências dos decisores. Embora existam várias críticas ao método AHP (Dyer, 1990), principalmente no que tange a escala de preferências e o auto-vetor, trata-se de um método bastante utilizado.

O AHP fornece um procedimento compreensivo e racional para modelar um problema de decisão, representando e quantificando as variáveis envolvidas em uma hierarquia de critérios ponderados por preferências (pesos). O resultado é um modelo que permite analisar várias alternativas e as comparar rapidamente, por isso conhecido como um método de decisão e para justificar a decisão (Zambon et al, 2005; Jamel et al, 2007).

A hierarquia de critérios e pesos da AHP é definida pelos tomadores de decisão à medida que se constrói o modelo. Os critérios são comparados entre si dois a dois, o que introduz um componente subjetivo no modelo. Isto é, os critérios e pesos são resultados de julgamentos humanos, não simplesmente informações matemáticas.

O AHP, portanto, não é um modelo de observação da realidade. É um modelo que converte as preferências, ou julgamentos humanos, em valores numéricos para construir um modelo de tomada de decisão. Os pesos representam a prioridade dada a cada elemento ou critério, que podem ser organizados em hierarquias (Saaty, 1991).

Em resumo, AHP é um método tradicional de tomada de decisão baseado em multi-critério. Os critérios são modelados a partir das preferências dos tomadores de decisão para construir o modelo. Uma vez construído, ele pode ser utilizado para analisar, comparar e priorizar alternativas de soluções. Existem diversos softwares disponíveis para modelagem AHP.

4. METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido foi dividido nas seguintes etapas: definição dos dados de entradas, pré-processamento, formulação dos indicadores e processamento dos dados, descritos a seguir e ilustrados na figura 4.

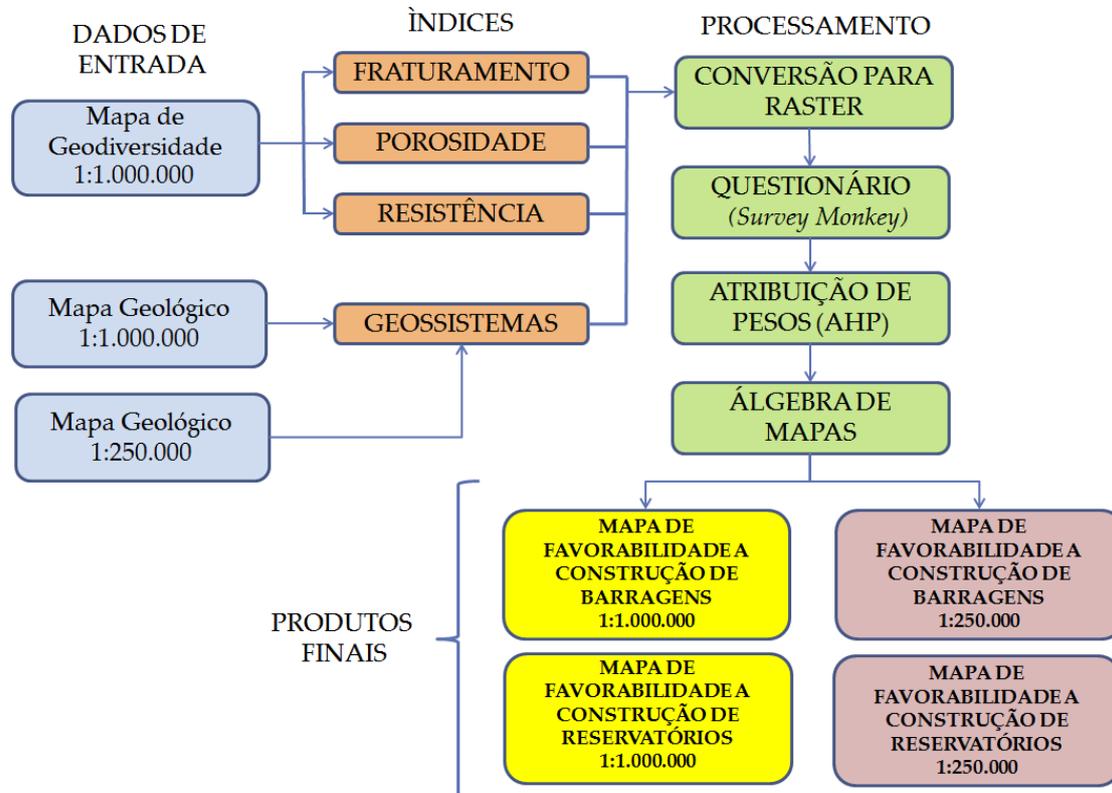


Figura 4. Fluxograma metodológico.

Para o processamento dos dados foi utilizado o software Arcgis 10.3 e o software Excel 2010 para utilização do método AHP, além da plataforma online *Survey Monkey* para a elaboração, divulgação e análise dos dados de um questionário de consulta a especialistas da área de geotécnica.

4.1 DADOS DE ENTRADA

Este trabalho se utilizou somente de dados disponíveis de forma gratuita, ou seja, dados disponíveis na web e distribuídos por instituições públicas e oficiais. Assim, os dados geológicos e do projeto Geodiversidade foram adquiridos na página online do Serviço Geológico Brasileiro – CPRM através da plataforma GEOBANK (<http://geobank.cprm.gov.br/>). Foram analisadas quatro folhas geológicas na escala 1:1.000.000 (folhas SC22, SC23, SD22 e SD23) como mostrado na figura 5, e quatro folhas do projeto Geodiversidade de mesmo nome das folhas geológicas e mesma escala (Figura 6).

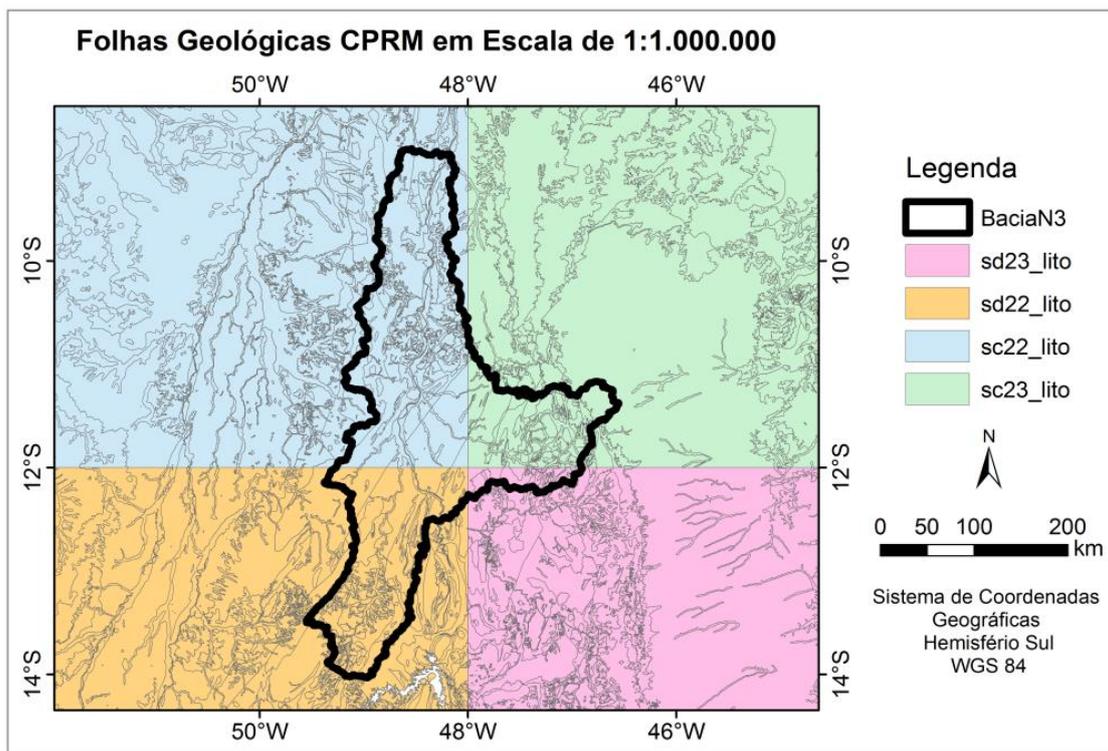


Figura 5. Folhas Geológicas 1:1.000.000 disponibilizadas pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM.

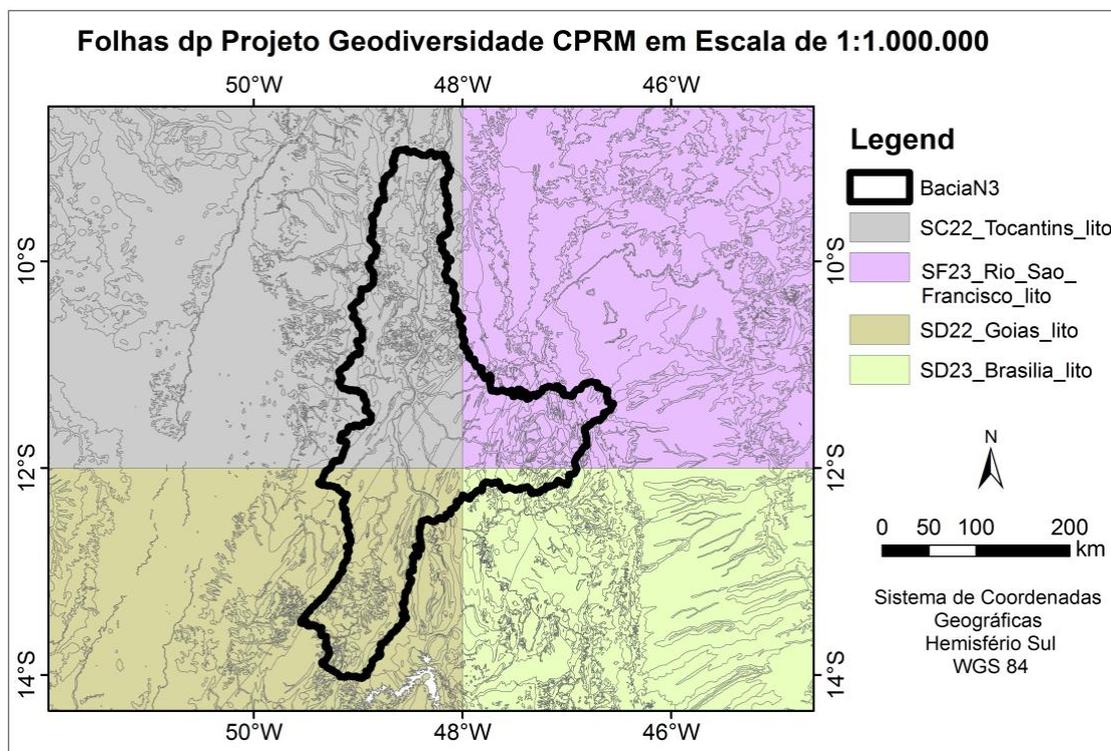


Figura 6. Folhas do Projeto Geodiversidade 1:1.000.000 disponibilizadas pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM.

Já o contorno da área de estudo como visto nas figuras 3 e 4, foi adquirido na biblioteca virtual da Agência Nacional de Águas - ANA (<http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/solicitacaoBaseDados.asp>), que corresponde a uma Ottobacia de nível 3 da Bacia do rio Tocantins.

Deve-se ressaltar que para este estudo torna-se necessário tanto a análise dos maciços rochosos, proveniente dos mapas geológicos clássicos, bem como das formações superficiais (coberturas detríticas, aluvionares e solos), que podem ser extraídas dos mapas de Solos, Hidrogeológicos e de Geodiversidade. Considerando que para a área de estudo os solos são muito rasos (RadamBrasil, V.23 - Folhas SB.24/25 Jaguaribe/Natal, 1981) e que estas informações foram consideradas na metodologia de construção dos mapas de geodiversidade pela CPRM, não foram usados os mapas de solos, entretanto os mesmos devem ser levados em consideração para outras regiões onde o clima tropical, por exemplo, permite a formação e espessos mantos intempéricos.

4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

Infelizmente os dados disponibilizados pela CPRM apresentam erros topológicos e de padronização, o que inviabiliza as operações algébricas entre os dados. Com isso, se é necessário à correção desses problemas, os quais ocorrem devido à sobreposição de cenas, vazios e diferentes nomenclaturas entre cartas.

4.3 FORMULAÇÃO DOS INDICADORES

Após a análise das informações disponíveis e correção dos dados foram definidos os seguintes indicadores geoambientais que foram elaborados a partir do mapa geológico na melhor escala disponível e utilizando-se das variáveis existentes no mapa de geodiversidade (Silva, 2008), visto que estas são as únicas informações disponíveis com abrangência nacional.

- Índice de Fraturamento;
- Índice de Resistência;
- Índice de Porosidade;
- Mapa de Geossistemas – (agrupamento de unidades geológicas).

O Mapa de Geossistemas foi construído a partir do agrupamento inicial proposto para o Mapa de Geodiversidade na escala de 1:1.000.000. Tendo este agrupamento como guia, o mapa geológico também de escala de 1:1.000.000 foi reanalisado buscando conjuntos geológicos de comportamento semelhante frente aos parâmetros geotécnicos necessários para a construção de barramentos e capacidade de reservação superficial.

Esta reanálise é necessária, pois, o principal objetivo da compartimentação proposta para o Projeto Geodiversidade é atender a uma ampla gama de usos e usuários interessados em conhecer as implicações ambientais decorrentes do embasamento

geológico na escala de 1:1.000.000, ao passo que o olhar deste projeto é bem mais específico.

Devido à dificuldade de obtenção de parâmetros locais quando ao estado de fraturamento das unidades geológicas, os índices de fraturamento, o de resistência das rochas e o de porosidade foram extraídos diretamente da proposta desenvolvida na construção do Mapa de Geodiversidade (Silva, 2008).

O Índice de Fraturamento permite a determinação da intensidade do fraturamento em cada unidade, onde quanto menos fraturada a unidade se encontrar maior a sua favorabilidade a construção de barragens e reservatórios.

O Índice de Resistência possui o objetivo de representar a resistência do material geológico a compressão uniaxial e classes de alteração. Neste estudo será utilizada a proposta modificada de Vas (1966) empregada no Mapa de Geodiversidade (Silva, 2008).

O Índice de Porosidade busca descrever o volume de vazios sobre o volume total do material geológico. Este índice será estabelecido seguindo a proposta do mapa de geodiversidade.

O Mapa de Geossistemas foi construído a partir da reclassificação do mapa geológico na escala disponível, disponibilizado pelo Serviço Geológico Brasileiro, CPRM, reanalisando os conjuntos geológicos de comportamento semelhante frente aos parâmetros geotécnicos necessários para a construção de barramentos e capacidade de reservação superficial.

4.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Após a determinação dos indicadores e construção de seus respectivos mapas, a próxima etapa consistiu na determinação do peso de cada índice e cada classe para a construção de barramentos e reservatórios, para posterior processamento através de operações de álgebra de mapas.

Os índices geológicos são variáveis qualitativas (geossistemas) ou de mensuração ordenadas (Stevens, 1951) os quais não devem ser convertidos em um índice integrado, como por exemplo, por uma equação de regressão simples. Considerando-se este fato, podemos utilizar a análise multicritério denominada Analytic Hierarchy Process (AHP) proposto por Saaty (1972).

Os pesos de cada índice geológico e de suas classes foram definidos com o auxílio da metodologia AHP, que é um dos principais modelos matemáticos correntemente disponíveis na teoria de suporte à decisão (Vargas, 2010) e o mais popular entre as técnicas de tomada de decisão multicritério (Pohekar e Ramachandran, 2004).

A determinação dos pesos é sem dúvida a etapa mais importante neste tipo de trabalho, os quais devem ser o mais condizente com as características de cada índice e classe que serão posteriormente processados. Para ter melhor noção da relação entre as variáveis existentes e para suporte na determinação dos pesos através da metodologia AHP, recomenda-se a consulta de diversos especialistas no tema.

Com uma boa noção da relação de importância entre os índices deve-se preencher a tabela da metodologia AHP, a qual determina a porcentagem da relação de cada

variável. Por fim as porcentagens determinadas pelo método AHP são normalizadas em uma escala de 1 a 9, através de uma simples equação linear. Esses dados normalizados serão os pesos finais de cada índice e classes analisadas.

Com os pesos definidos parte-se para a etapa do processamento final, que consiste na transformação para o formato raster de todos os dados vetoriais (shapes) dos índices, essa transformação é realizada no software *Arcgis*. Posteriormente devem-se adicionar os pesos para cada classe dos índices geológicos.

Após os arquivos raster dos índices geológicos estarem com os respectivos pesos para suas classes, inicia-se a ultima etapa do processamento, que é a execução da álgebra entre os mapas, que para esse trabalho consiste na soma dos índices geológicos multiplicados pelos seus respectivos pesos. O produto desse processamento será um mapa de favorabilidade geológica aplicada à construção de barragens e outro para a construção de reservatórios, sendo ambos os resultados finais deste trabalho.

Esta metodologia foi aplicada utilizando os dados geológicos em escala 1:1.000.000, disponível para todo o território nacional, e para efeito de comparação foi replicada em uma porção da área de estudo, que possui dados geológicos de maior escala (1:250.000), também disponibilizados pela CPRM.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CORREÇÕES

Tanto as folhas geológicas como as geomorfológicas adquiridas apresentam problemas topológicos e de georreferenciamento, o que inviabiliza as operações de álgebra de mapas se não forem corrigidos. Os problemas mais comuns encontrados são os de sobreposição entre folhas, vazios entre elas e “buracos” em locais de lagos e rios de grande porte (figura 7). Além da necessidade de correção desses fatores, também ocorrem problemas de padronização de nomenclaturas entre folhas.

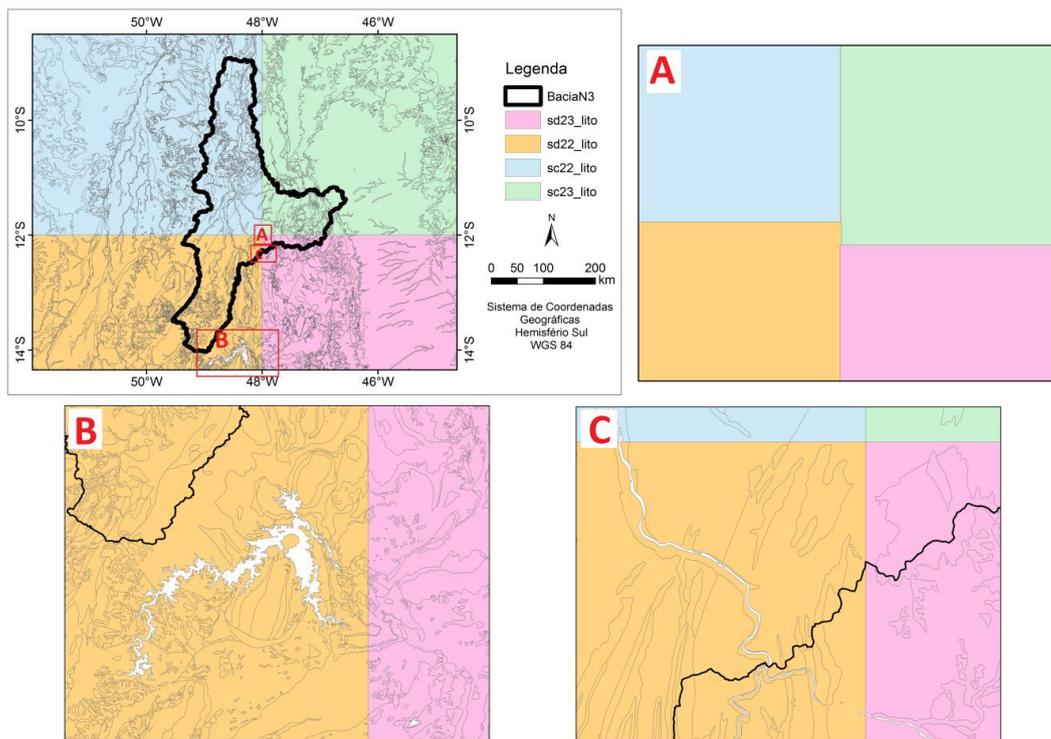


Figura 7. Problemas encontrados nas folhas geológicas e do Projeto Geodiversidade da CPRM, onde ocorrem (A) erros de sobreposição, (B) buracos em grandes lagos e (C) buracos em grandes Rios.

A correção dos problemas citados requereu grande esforço, sendo uma das etapas mais trabalhosas na execução desse projeto. Para a preparação desses dados foram utilizadas as ferramentas **Merge** para a junção das folhas e posteriormente a ferramenta **Clip** para o recorte para a área de estudo, seguido da ferramenta **Dissolve** para a união das classes em um único vetor, possibilitando a correção manual de cada “buraco” e vértice colocado de forma incorreta, por fim foi utilizada a ferramenta **Multipart for Single Part**, que segmentou as classes em vários vetores e por fim a função **Join** que reuniu os atributos no shape corrigido a partir do shape inicial.

Os dados após as correções devidas são um mapa geológico e o de geodiversidade para a área de estudo, e estão aptos a realização das próximas etapas de classificação e operações de álgebra de mapas. Os dados de geologia e geodiversidade corrigidos podem ser observados nas figuras 8 e 9 respectivamente.

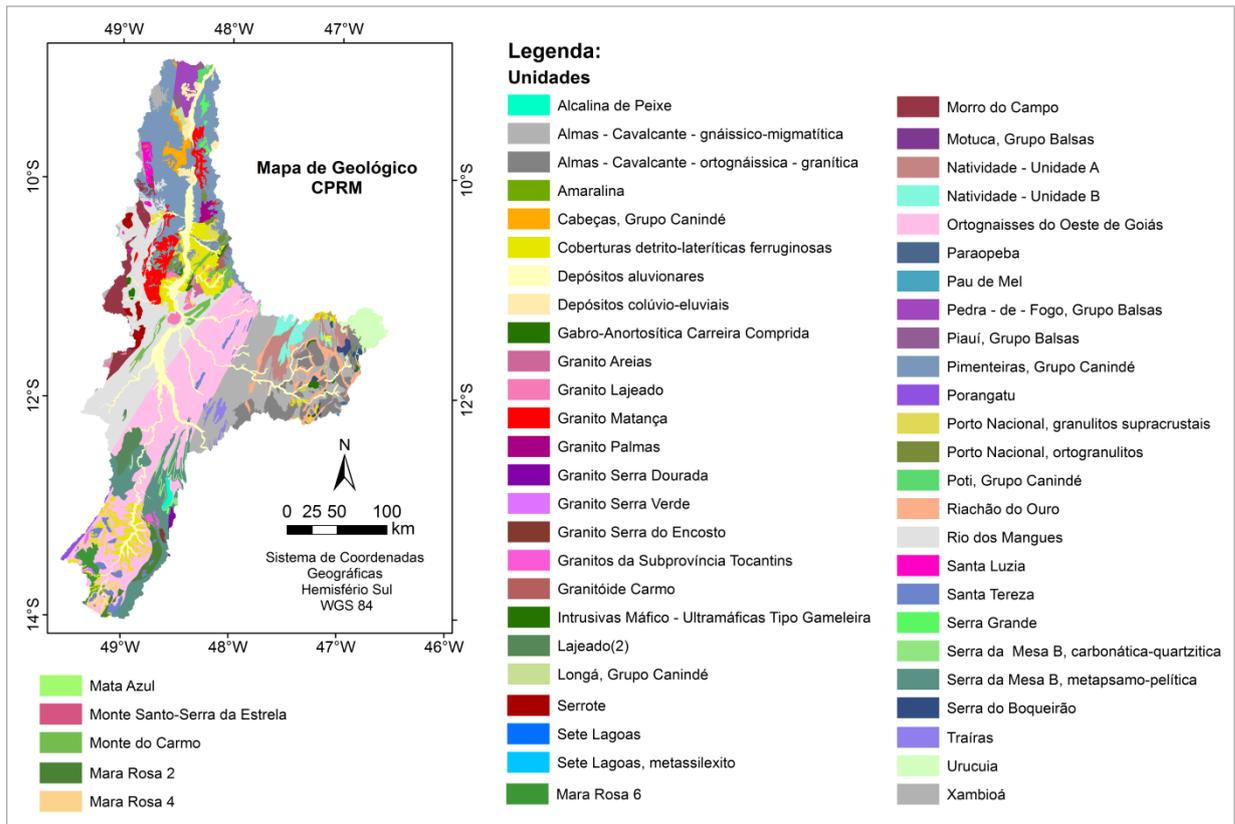


Figura 8. Mapa Geológico corrigido da área de estudo.

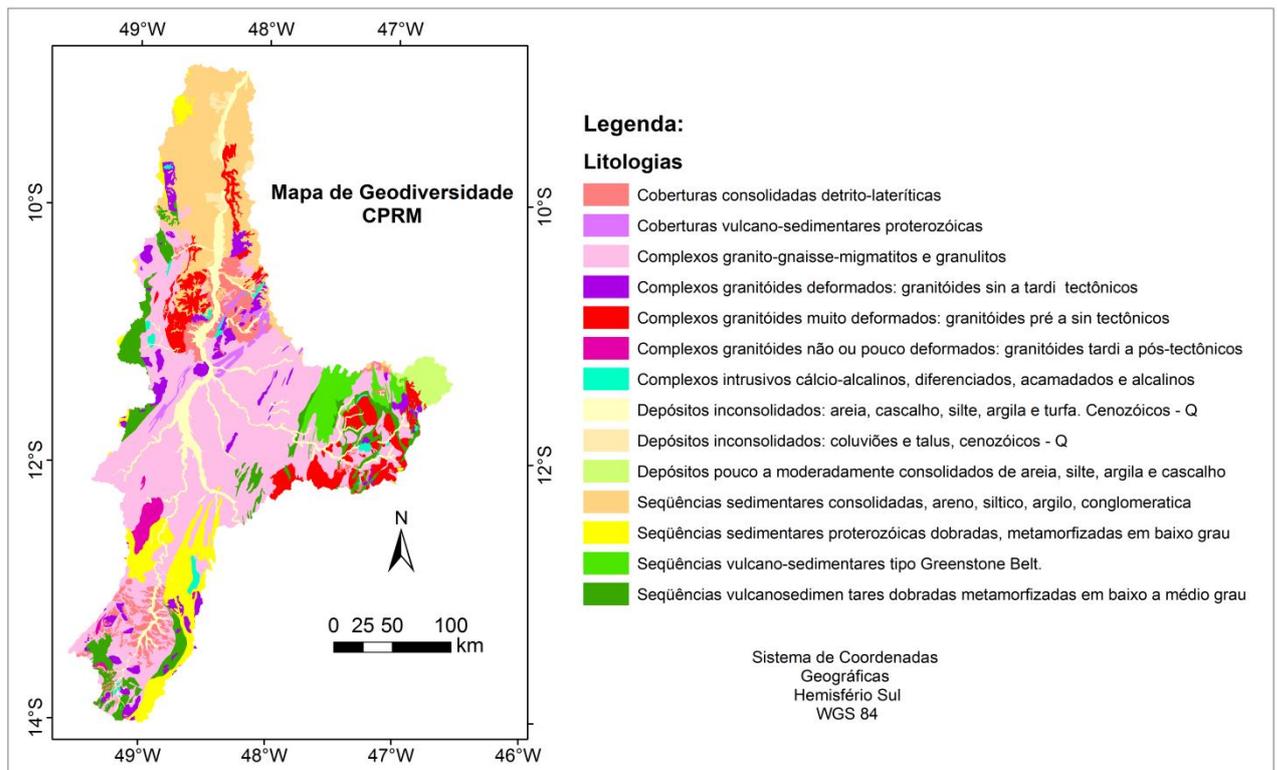


Figura 9. Mapa de Geodiversidade corrigido da área de estudo.

5.2 DADOS DERIVADOS DO MAPA GEOLÓGICO

Com o mapa geológico de escala 1:1.000.000 corrigido topologicamente, foi gerado o chamado Mapa de Geossistemas, que consiste na classificação e agrupamento das unidades geológicas de acordo com suas características geotécnicas, esse agrupamento foi realizado após análises das descrições das unidades, presentes na tabelas de atributo do dado geológico vetorial. O Mapa de Geossistemas pode ser observado na figura 10, onde as rochas presentes foram agrupadas nas seguintes classes:

- Rochas Carbonáticas;
- Depósitos Aluvionares/Coluvionares/Coberturas Detríticas;
- Rochas Alcalinas e Rochas Máficas-Ultramáficas;
- Rochas Sedimentares/Metassedimentares Siliciclásticas;
- Sequências Vulcanossedimentares;
- Complexos Granito-Gnaissicos;
- Rochas Graníticas.

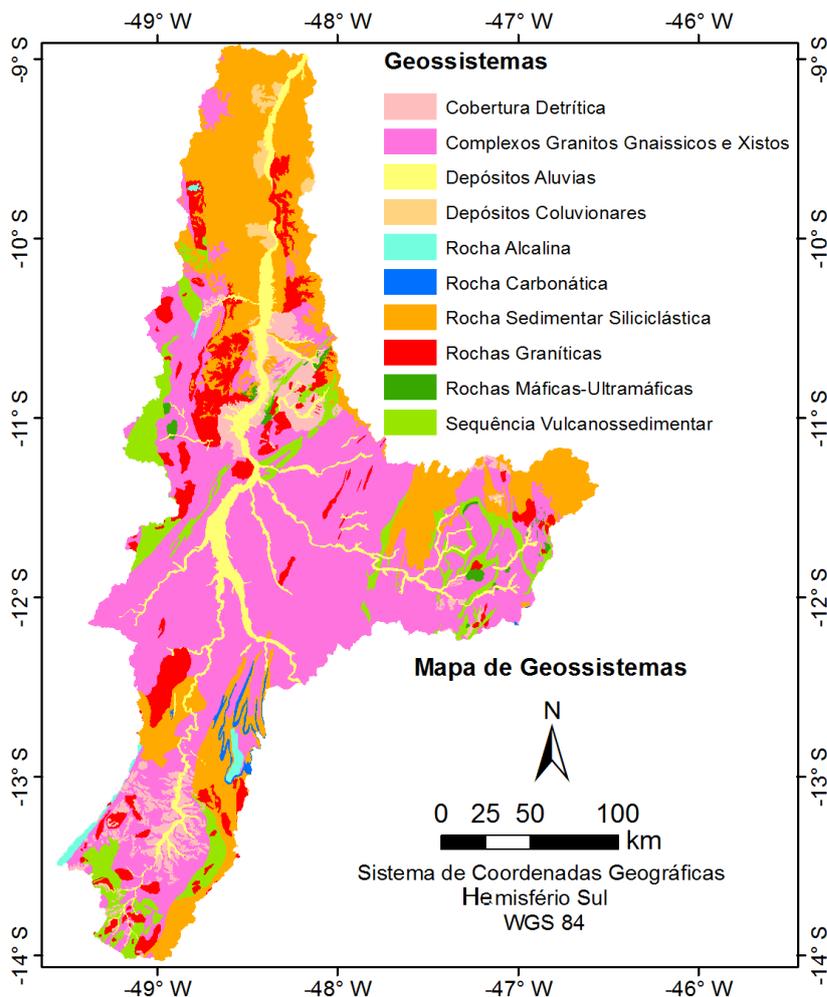


Figura 10. Mapa de Geossistemas, obtido através da reclassificação dos dados geológicos da CPRM de escala 1:1.000.000.

As rochas carbonáticas são compostas principalmente por calcários, dolomitos e margas, as quais possuem como característica física principal ser muito solúvel em água, o que favorece a formação de cavidades e dutos que podem ser responsáveis pela perda de água de um reservatório, caso haja algum sobre essas rochas.

Os Depósitos Aluvionares e Coluvionares, são materiais transportados por rios e córregos, e são constituídos principalmente por cascalho, areia, argila e silte, assim como as Coberturas Detríticas esses depósitos estão descritos como material inconsolidado, de alta porosidade e baixa resistência.

Rochas Alcalinas são compostas principalmente por sienitos, e são rochas que possuem relativa solubilidade a água. As rochas Máficas-Ultramáficas são formadas principalmente por peridotitos e anfibolitos. As rochas máficas-Ultramáficas foram classificadas no mesmo geossistema das rochas alcalinas, pois ambas possuem grau de intemperismo baixo, apesar das diferentes composições. Foi interpretado que as rochas alcalinas e máficas-ultramáficas põem características geotécnicas muito próximas, compondo assim uma única classe de geossistema.

Rochas Sedimentares e Metassedimentares Siliciclásticas são compostas por sedimentos transportados já litificados, ou seja, materiais como areia, silte e argila que sofreram processos de diagênese ou até já foram deformados em eventos tectônicos, como é o caso das rochas metassedimentares. Diferentemente dos depósitos aluvionares e coluvionares, as rochas sedimentares siliciclásticas possuem maior coesão entre os grãos, suas principais rochas são arenitos, conglomerados, argilitos e siltitos.

As Sequências Vulcanossedimentares, são compostas pela intercalação de rochas sedimentares e rochas vulcânicas como basalto e riolito, que apesar de possuírem resistência maior em relação às rochas sedimentares, possuem também como característica o elevado grau de fraturamento.

Os Complexos Granitos-Gnaissicos, como o próprio nome diz, são compostas por vários tipos de rochas graníticas e gnáissicas, geralmente rochas antigas, amalgamadas por eventos tectônicos, possuem elevada resistência e porosidade baixa, características geotécnicas muito favoráveis para a construção de barragens.

As Rochas Graníticas são de origem ígnea plutônica e ocorrem geralmente na forma de batólitos, assim como os complexos granito-gnaissicos, apresentam grande resistência a esforços compresionais e muito baixa porosidade, mas foram colocadas em diferentes classes de geossistemas por possuírem grau de fraturamento relativamente menor, sendo consideradas rochas mais estáveis.

5.3 DADOS DERIVADOS DO PROJETO GEODIVERSIDADE

Assim como os dados geológicos os dados do Projeto Geodiversidade necessitam de passarem pelo processo de correção topológica, mostrado na metodologia deste trabalho. Com todas as correções realizadas o Mapa de Geodiversidade da CPRM de escala 1:2.500.000, foi reclassificado segundo o seu grau de fraturamento, porosidade e resistência, tendo como resultado os mapas de Índices de Fraturamento, Índices de Porosidade e Índices de Resistência que serão mostrados a seguir (Figura 11).

Os índices se encontram disponíveis nas cartas do projeto geodiversidade e foram reclassificadas para cada índice.

5.3.1 Índice de Fraturamento

O Índice de Fraturamento está classificado em: **(1) Não fraturada** – como no caso das coberturas inconsolidadas; **(2) Pouco a moderadamente fraturada** – sequências sedimentares moderadamente consolidadas; **(3) Intensamente fraturada**, a exemplo das coberturas vulcanossedimentares proterozóicas; e **(4) Zonas de Cisalhamento** – regiões intensamente deformadas por processo tectônico gerando faixas de concentração de deformação dúctil (Cinturões de Deformação).

5.3.2 Índice de Resistência

O Índice de resistência possui o objetivo de representar a resistência do material geológico a compressão uniaxial e classes de alteração. Neste estudo utilizou-se a proposta modificada de Vas (1966) empregada no Mapa de Geodiversidade (Silva, 2008). O índice de resistência está classificado em: **(1) Muito brandas**; **(2) Brandas**; **(3) Duras**; e **(4) Muito duras**.

5.3.3 Índice de Porosidade

O Índice de Porosidade busca descrever o volume de vazios sobre o volume total do material geológico. Este índice será estabelecido seguindo a proposta do mapa de geodiversidade. Assim, a classificação proposta possui as seguintes classes: **(1) Baixa** - (0 a 15%); **(2) Moderada** –(15 a 30%) e **(3) Alta** – (>30%).

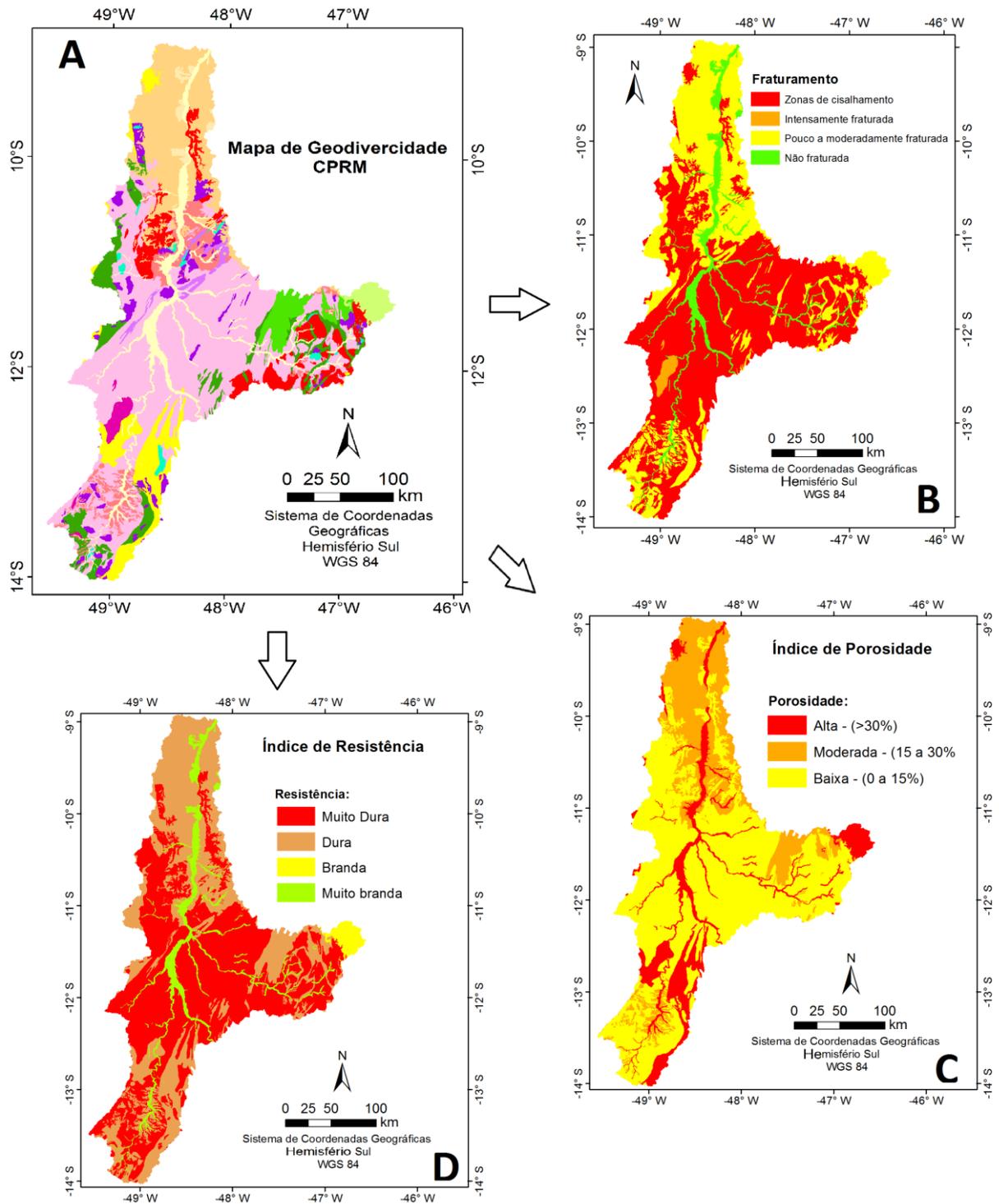


Figura 11. Produtos da reclassificação do Mapa de Geodiversidade 1:2.500.000 (A). (B) Mapa do Índice de Fraturamento, (C) Mapa do Índice de Porosidade e (D) Mapa do Índice de Resistência.

5.4 DETERMINAÇÃO DO PESOS (AHP)

Para a determinação dos pesos primeiramente foi elaborado um questionário online na plataforma *Survey Monkey*, com 10(dez) questões do tipo escala de avaliação, sobre os graus de importância dos índices geológicos determinados e de suas respectivas classes, esse questionário se encontra disponível no seguinte link: <https://pt.surveymonkey.com/r/SVBGLC9>, e foi encaminhado para diversos profissionais atuantes da área de geotécnica, incluindo professores e autores de livros sobre o tema.

A escala do grau de importância de cada variável varia de 1 a 9, sendo quanto maior a importância do índice ou classe, maior o valor a ser preenchido. As médias das respostas obtidas através do questionário podem ser observadas na tabela 2.

Tabela 2. Média dos graus de importância estabelecidos pelos especialistas através das respostas do questionário.

Índice	Classe	Importância
Porosidade	Baixa 0 - 15%	9
	Moderada 15 - 30%	6,3
	Alta > 30%	2
Resistência	Muito Branda	1
	Branda	1,6
	Dura	2,5
	Muito Dura	4
Fratura	Não Fraturada	9
	Pouco a Moderadamente Fraturada	7,3
	Intensamente Fraturada	4,6
	Zona de Cisalhamento	2,6

Índices para a Barragem	
Fratura	3
Porosidade	4,3
Resistência	5,3
Geossistemas	3,3

Índices para o Reservatório	
Fratura	1,6
Porosidade	3,6
Resistência	3,3
Geossistemas	3,3

Índice	Classes	Importância
Geossistemas	Rochas Carbonáticas	1
	Depósitos Aluviais/Coluviais/Coberturas	6
	Rochas Alcalinas/Máficas/Ultramáficas	5
	Rochas Sedimentares/Metassedimentares	6
	Sequência Vulcanosedimentares	6
	Complexos Granito-Gnaissicos	7,6
	Rochas Graníticas	8

Levando em consideração os graus de importância acima estabelecidos, foram preenchidas as tabelas para determinação dos pesos de cada índice geológico e suas classes, através da metodologia de análise multicritério AHP, onde é avaliado o relacionamento entre cada variável par a par, respeitando a tolerância de 10% da relação de consistência (CR).

As tabelas com a metodologia AHP foram elaboradas no Excel 2010, onde foram preenchidos levando em consideração a favorabilidade para construção tanto de barramento quanto para reservatórios.

Após o preenchimento da planilha AHP para todos os índices e classes, os seus respectivos pesos foram obtidos através da porcentagem determinada pela tabela, onde essa porcentagem foi normalizada em uma escala de pesos de 1 a 9, elaborando uma

simples equação linear, considerando a maior porcentagem sendo equivalente ao peso 9 e a menor porcentagem ao peso 1.

A tabela 3 é um exemplo de tabela AHP utilizado para a determinação dos pesos, assim como o gráfico e a equação da reta (figura 12).

Tabela 3. Exemplo de tabela AHP para determinação dos pesos dos índices geológicos, onde os pesos finais estão na coluna de cor laranja.

	porosidade	geossistema	Resistência	Int. Fraturamento		Intensidade de Importância																						
porosidade	1	2	2	4		1																						
geossistema	0,5	1	1	3		3																						
Resistência	0,5	1	1	3		5																						
Int. Fraturamento	0,25	0,333333333	0,333333333	1		7																						
SOMA	2,25	4,333333333	4,333333333	11																								
SEMPRE: DOMINÂNCIA DA CLASSE (LINHA)/DOMINÂNCIA DA CLASSE (COLUNA)																												
	Geologia	Int. Fraturamento	Resistência	Hidrogeologia		PESOS																						
porosidade	0,444444444	0,461538462	0,461538462	0,363636364	43,28%	9																						
geossistema	0,222222222	0,230769231	0,230769231	0,272727273	23,91%	4																						
Resistência	0,222222222	0,230769231	0,230769231	0,272727273	23,91%	4																						
Int. Fraturamento	0,111111111	0,076923077	0,076923077	0,090909091	8,90%	1																						
SOMA	1	1	1	1	100,00%																							
λ_{MAX}	4,02479927	<table border="1"> <thead> <tr> <th>N</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RI</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0,58</td> <td>0,9</td> <td>1,12</td> <td>1,24</td> <td>1,32</td> <td>1,41</td> <td>1,45</td> <td>1,49</td> </tr> </tbody> </table>					N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																		
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49																		
N	4	Se CR < 10%, as avaliações das intensidades par a par estão consistentes. Caso contrário, refazer as avaliações.																										
CI	0,00826642																											
RI	0,9																											
CR	1%																											

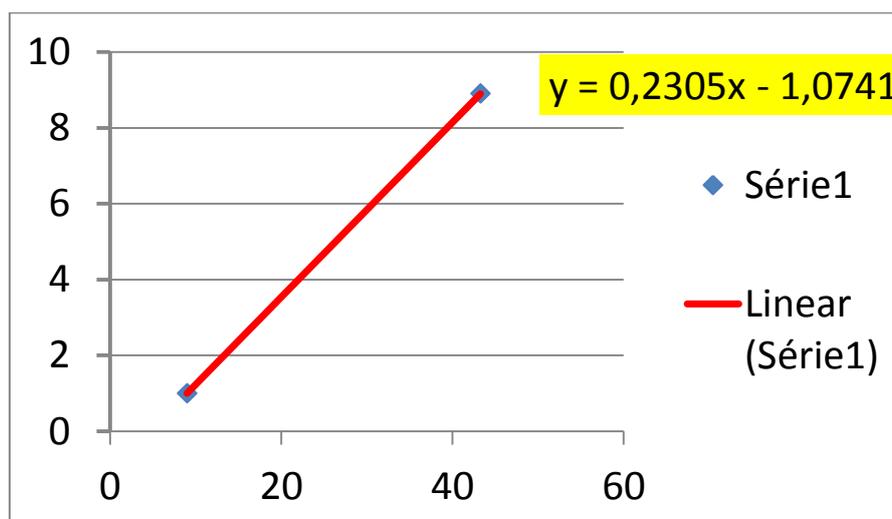


Figura 12. Gráfico para o cálculo dos pesos finais, onde X é a porcentagem encontrada pelo método AHP e Y o peso final.

Os pesos finais de cada índice geológico e suas classes estão ilustrados na tabela 4. Esses pesos posteriormente farão parte da equação final para obtenção dos mapas de favorabilidade de construção de barragens e reservatórios, através das operações matemáticas de álgebra de mapas.

Tabela 4. Pesos obtidos após execução da metodologia AHP.

Índice	Classe	Peso	Índices para o Barramento	
Porosidade	Baixa 0 - 15%	9	Geossistemas	9
	Moderada 15 - 30%	4	Porosidade	1
	Alta > 30%	1	Resistência	2
Resistência	Muito Branda	1	Fratura	6
	Branda	2		
	Dura	6	Índices para o Reservatório	
	Muito Dura	9	Geossistemas	9
Fratura	Não Fraturada	9	Porosidade	1
	Pouco a Moderadamente Fraturada	5	Resistência	4
	Intensamente Fraturada	2	Fratura	4
	Zona de Cisalhamento	1		

Índice	Classes	Peso
Geossistemas	Granitos	9
	Complexo Granito Gnaissico	9
	Sequência Metavulcanosedimentar	5
	Rocha Sedimentar	4
	Rocha Alcalina e Rocha Máfica-Ultramáfica	3
	Depósito Aluvionar/Coluvionar/Cobertura Detrítica	2
	Rocha Carbonática	1

5.5 ÁLGEBRA DE MAPAS

Com os pesos definidos se inicia a etapa de processamento final dos dados, onde se é necessário a transformações de todos os dados vetoriais em dados matriciais, esse processo foi realizado no Arcgis 10.3 através da ferramenta *Feature to Raster* (figura 13), onde todos os mapas de índices foram convertidos para o formato raster com pixels de 30 metros, para posterior incremento dos pesos e por fim a realização da álgebra de mapas.

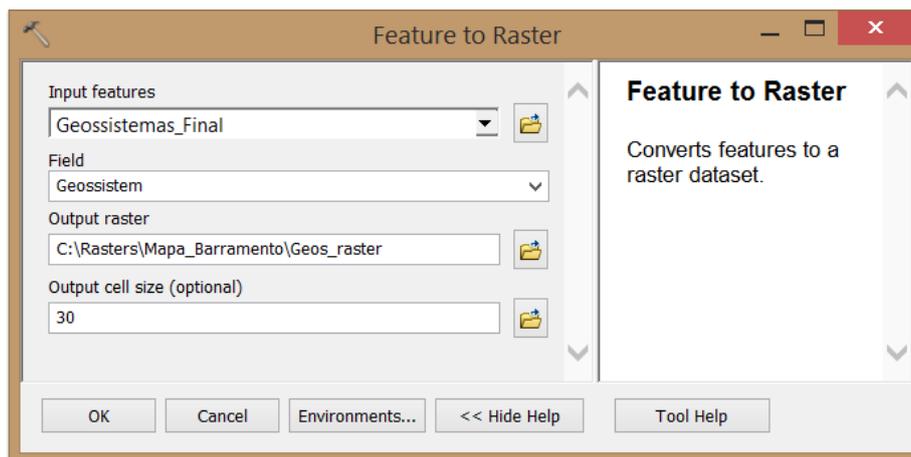


Figura 13. Ferramenta *Feature to Raster* de transformação de arquivos vetoriais para arquivos matriciais.

Após os mapas dos índices geológicos se encontrarem em formato raster, foram acrescentados os pesos a cada classe dos índices, através da ferramenta **Reclassify**, onde os valores das colunas VALUE foram substituídos pelos seus respectivos pesos. (Figura 14).

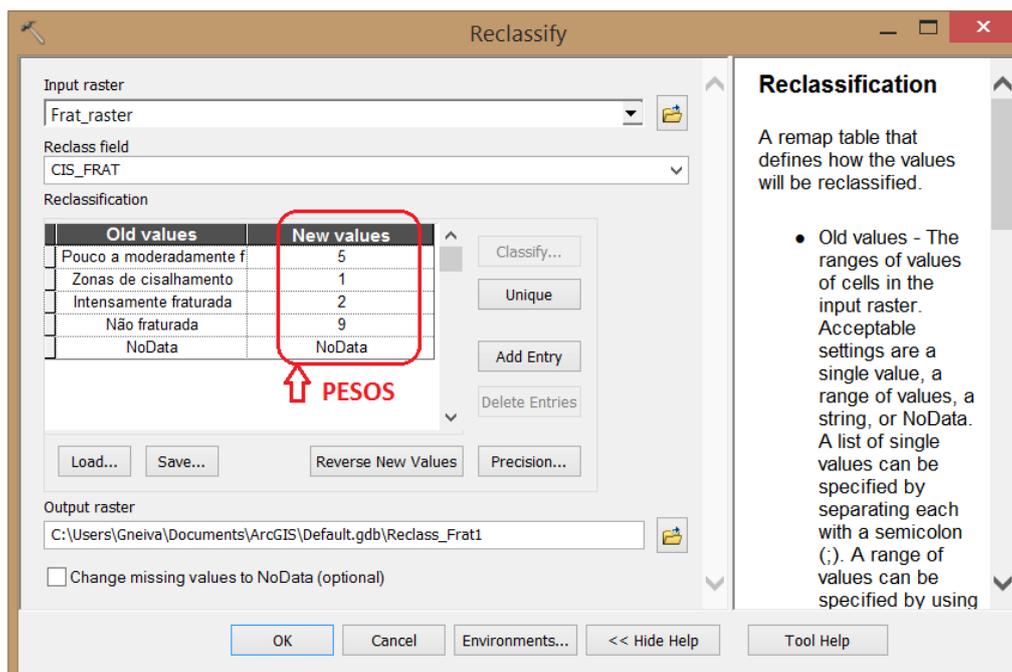


Figura 14. Ferramenta *Reclassify*, utilizada para o preenchimento dos pesos determinados.

O próximo e último passo é a execução da álgebra de mapas, onde foi utilizada a ferramenta **Raster Calculator** (Figuras 15 e 16).

Para calcular o índice de favorabilidade a construção de barragens a equação foi:

$$(\text{Geossistemas} * 9) + (\text{Fraturamento} * 6) + (\text{Resistência} * 2) + (\text{Porosidade} * 1)$$

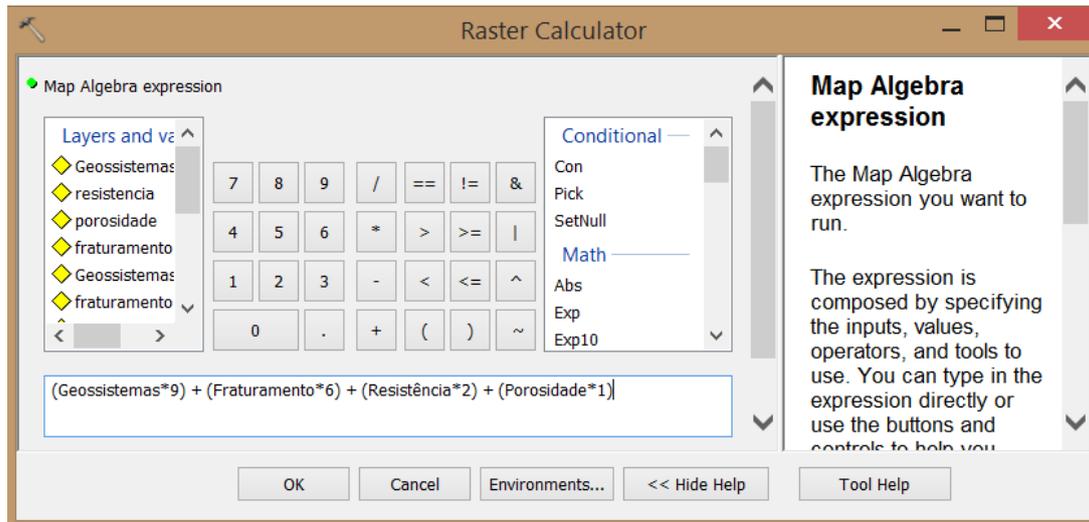


Figura 15. Ferramenta Reclassify, utilizada para o preenchimento dos pesos determinados.

Já para o cálculo do índice de favorabilidade a construção de reservatórios, a equação é a seguinte:

$$(Geossistemas*9) + (Fraturamento*4) + (Resistência*4) + (Porosidade*1)$$

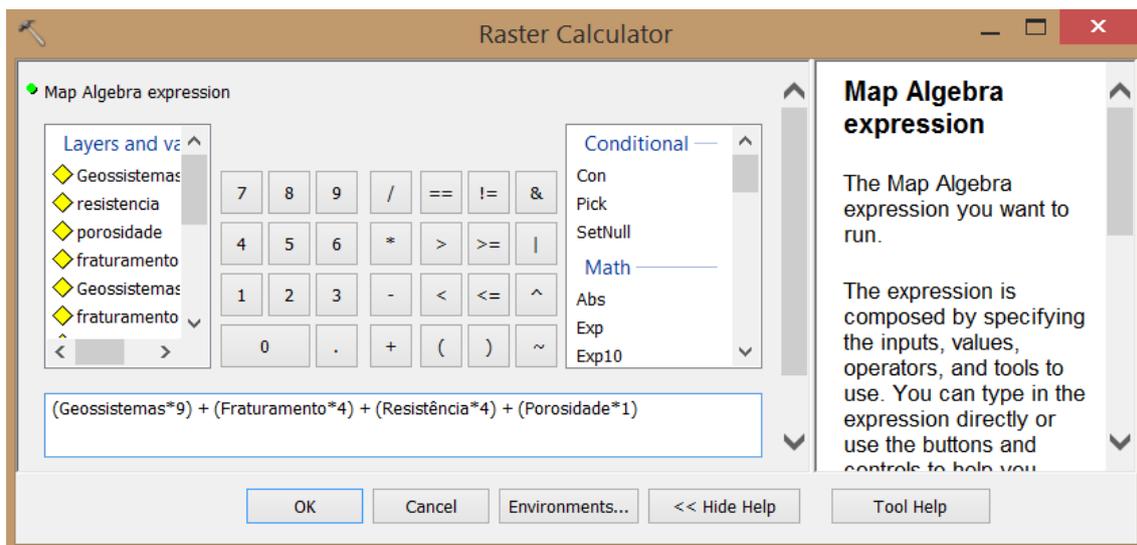


Figura 16. Ferramenta Reclassify, utilizada para o preenchimento dos pesos determinados.

Os mapas finais de favorabilidade a construção de barragens e reservatórios com base apenas em variáveis geológicas pode ser observado nas figuras 17 e 18.

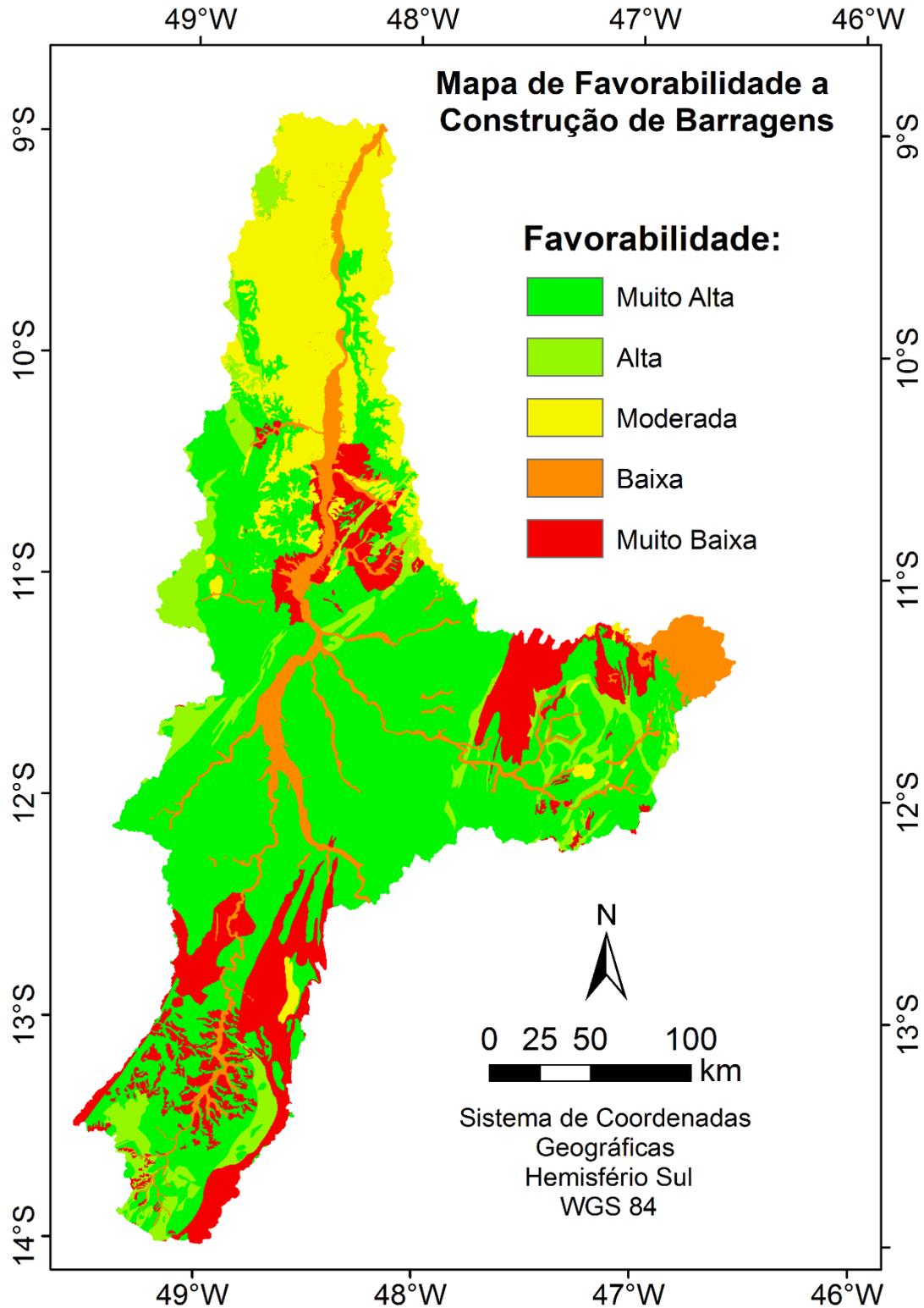


Figura 17. Mapa de favorabilidade a construção de barragens com base em variáveis geológicas.

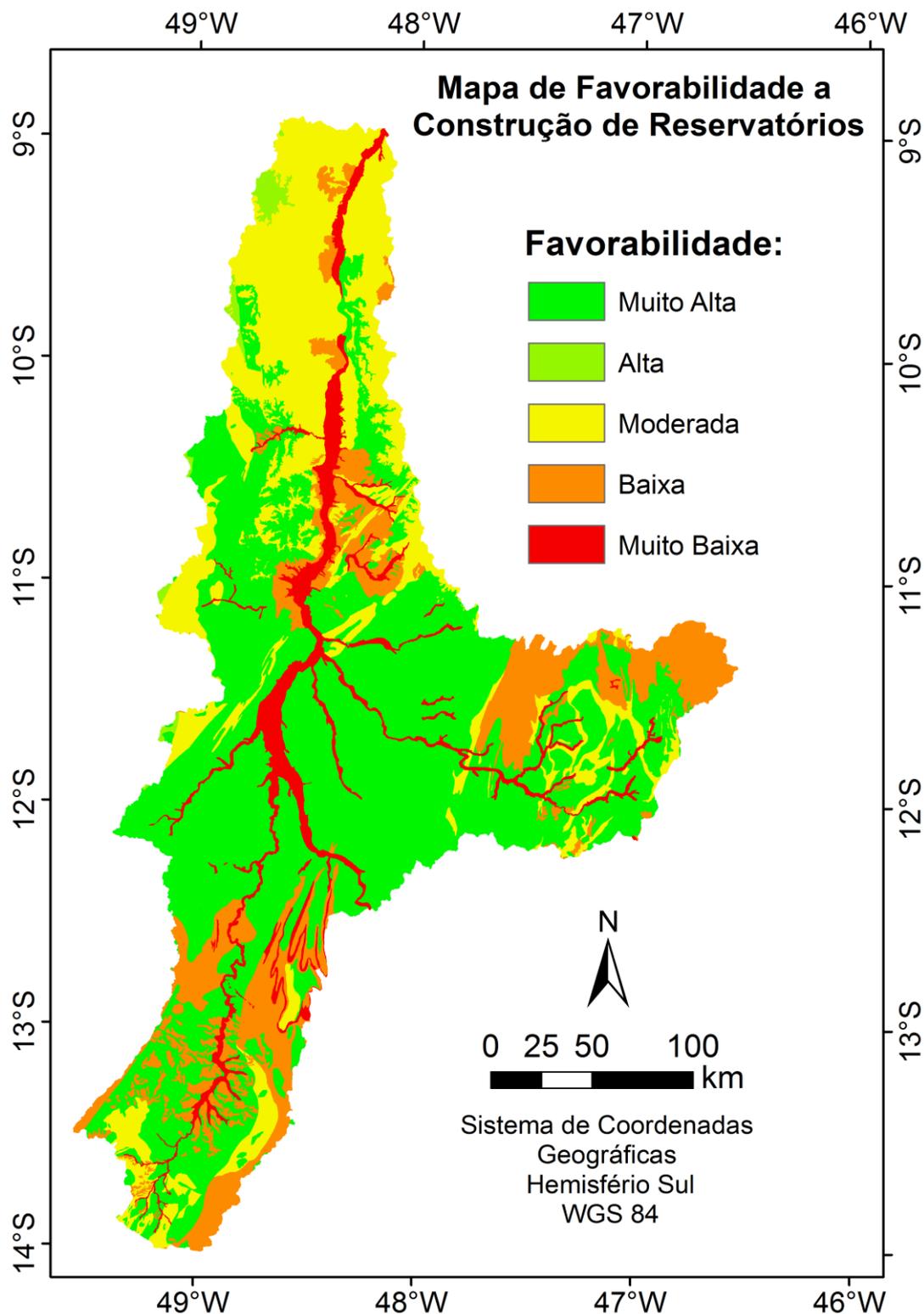


Figura 18. Mapa de favorabilidade a construção de reservatórios com base em variáveis geológicas.

Para efeito de comparação, a metodologia e os pesos determinados, foram executadas para uma porção menor da área, onde se tem dados geológicos em escala maior, também disponibilizados pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM.

A área em questão compreende duas folhas geológicas de escala 1:250.000, são as folhas Alvorada e Gurupi. Essas folhas apresentaram os mesmos problemas topológicos e também foi necessário a sua correção. Sendo a metodologia aplicada para as suas correções e processamento final, a mesma da executada anteriormente para os dados geológicos 1:1.000.000.

A área dentro da Ottobacia nível 3 deste trabalho, que possui os dados geológicos em escala 1:250.000 é mostrada na figura 19.

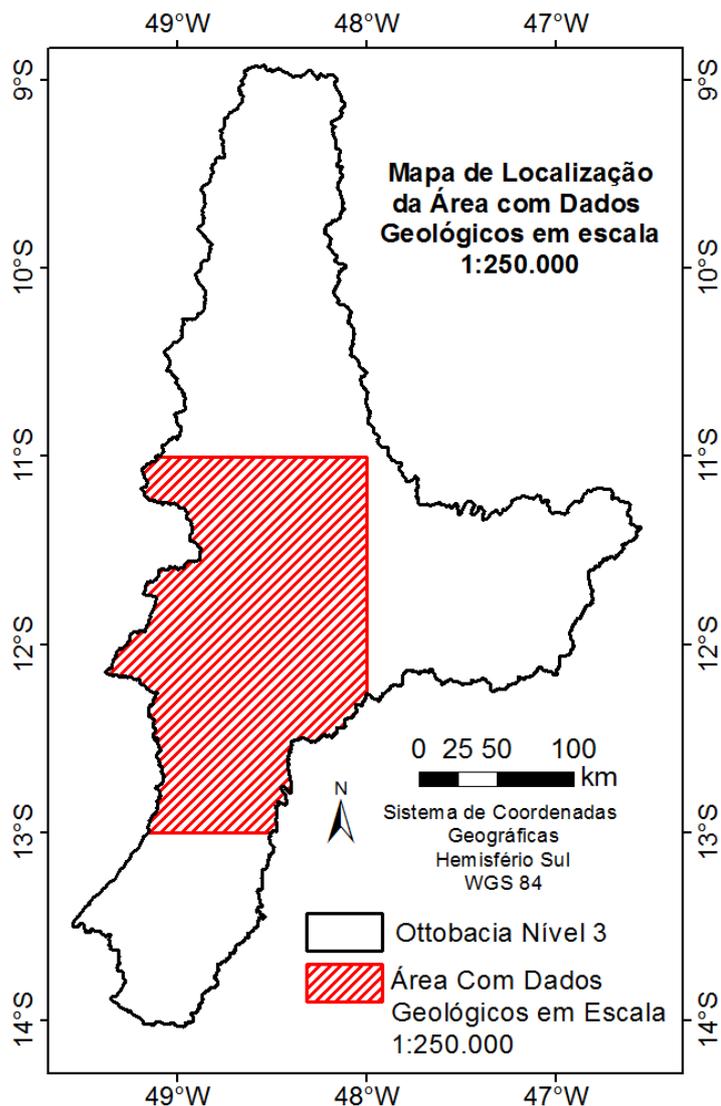


Figura 19. Mapa de localização da área com dados geológicos em escala 1:250.000, em relação a Ottobacia nível 3 (área de estudo).

Os mapas de favorabilidade para construções de barragens e reservatório, utilizando as bases de dados geológicos em escala 1:250.000 se encontram a seguir nas figuras 20 e 21.

Verifica-se que a metodologia pode ser aplicada a diversas escalas, onde quanto melhor a qualidade e maior a escala dos dados de entrada, melhor será o resultado final do mapa de favorabilidade.

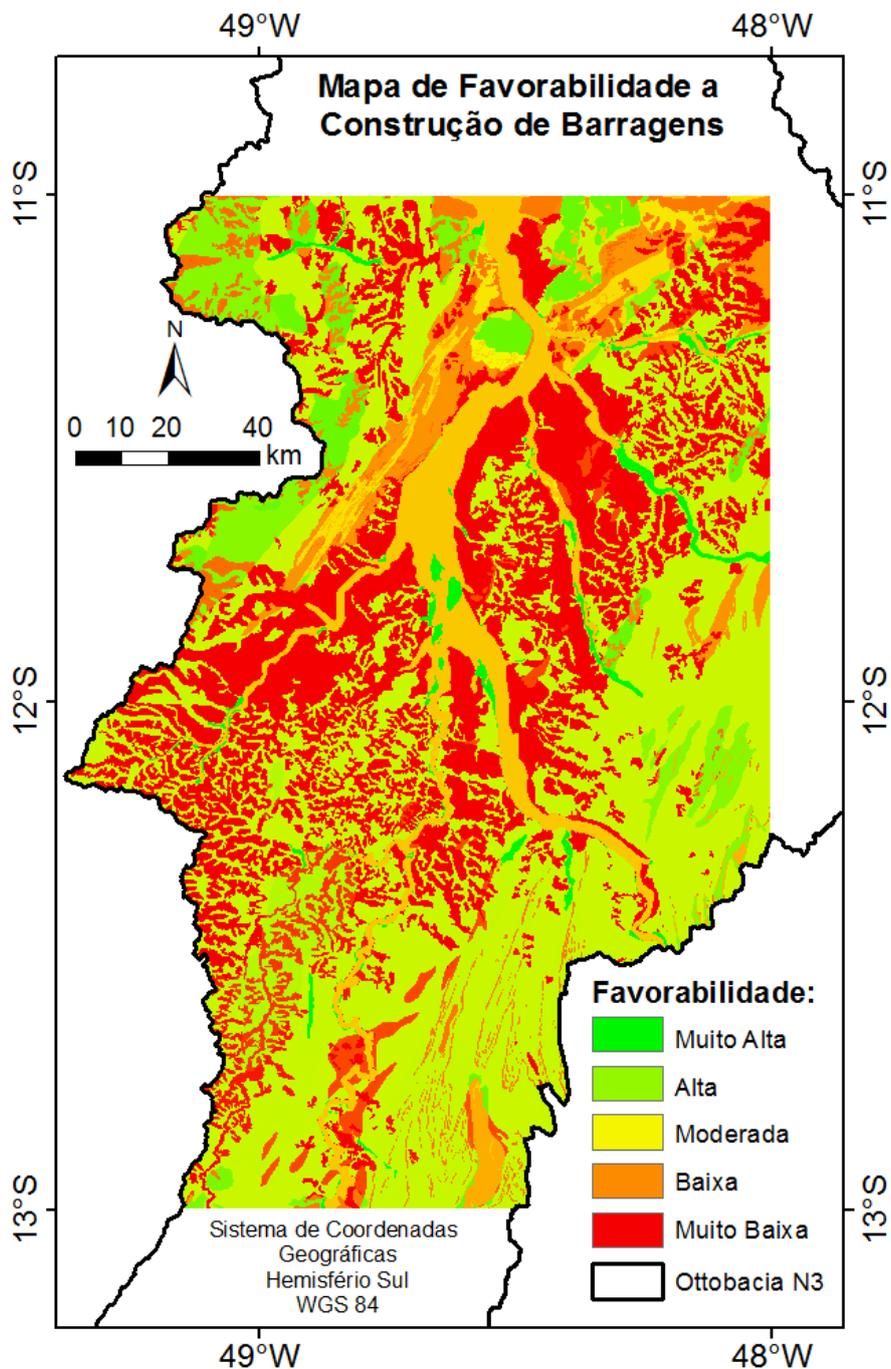


Figura 20. Mapa de favorabilidade a construção de barragens com base em variáveis geológicas com resolução de 30 metros.

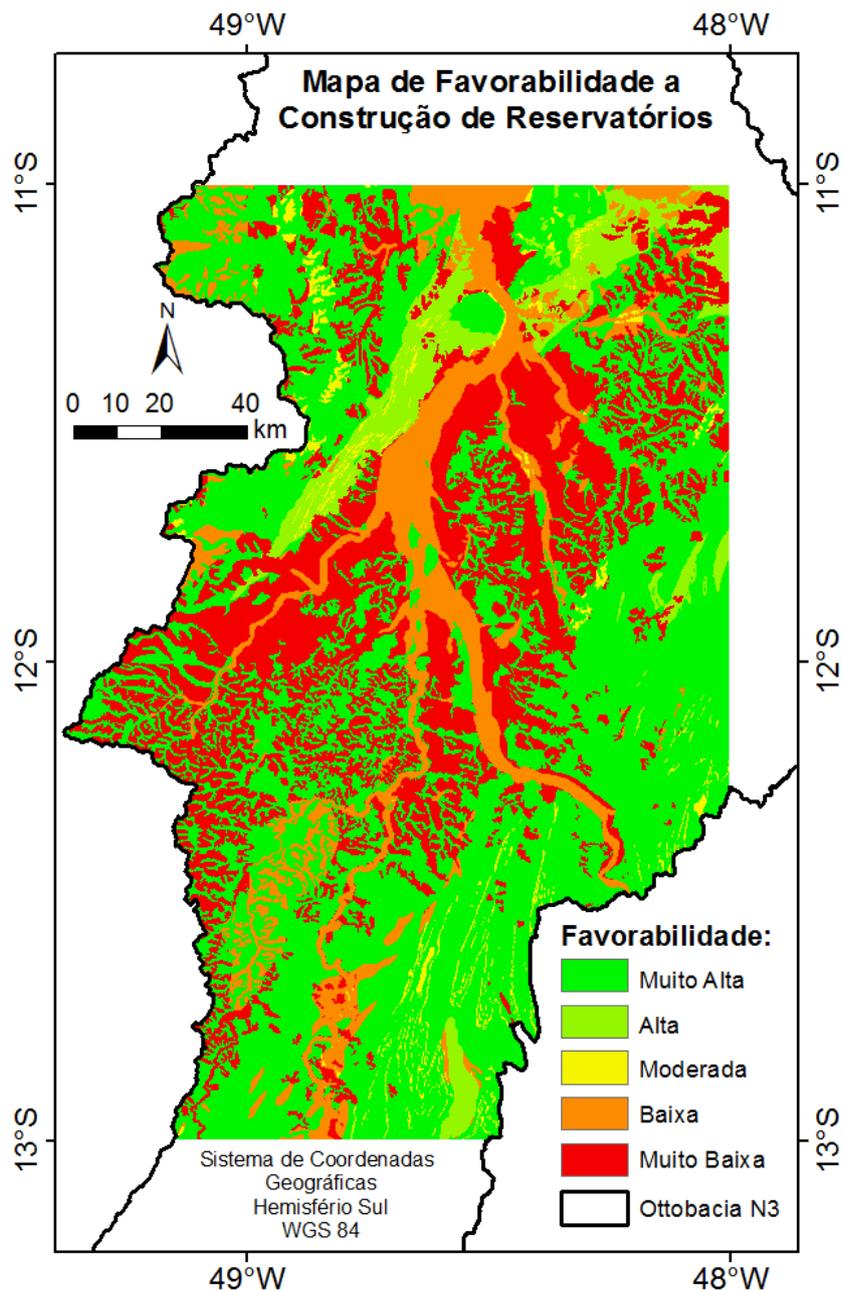


Figura 21. Mapa de favorabilidade a construção de reservatórios com base em variáveis geológicas com resolução de 30 metros.

Os mapas de favorabilidade indicam que os locais mais favoráveis à construção de barragens e de reservatórios são os locais onde ocorrem rochas graníticas e complexos granito gnáissicos, as quais possuem maior resistência, baixa porosidade e baixo grau de fraturamento.

Já os locais menos favoráveis são onde ocorrem rochas carbonáticas e materiais inconsolidados, como as coberturas detríticas e os depósitos coluvionares. Porém apesar dos mapas mostrarem baixa favorabilidade nos depósitos aluvionares e coluvionares, o gestor de um projeto de implementação de barragens pode desconsiderar esse fato, pois

para grandes barragens esse material é retirado para a construção do barramento e totalmente saturado pelo reservatório.

A área de Estudo possui duas grandes barragens as quais foram construídas com a finalidade de geração de energia elétrica, são elas a Usina Hidrelétrica Luiz Eduardo Magalhães e a Usina Hidrelétrica de Peixes. O posicionamento de seus respectivos barramento foram plotados nos mapas de favorabilidade gerados para efeito de comparação, e se encontram ilustrados nas figuras 22 e 23 a seguir:

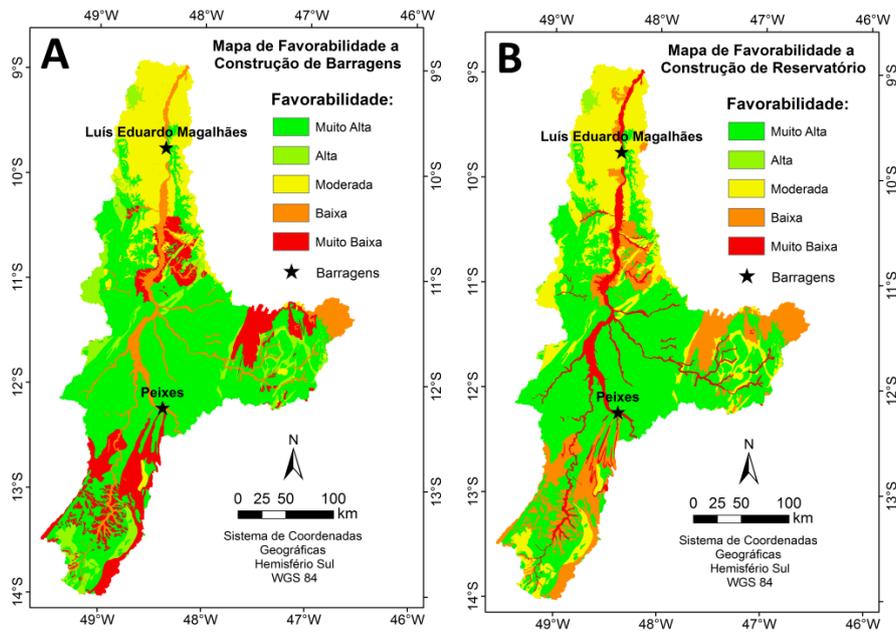


Figura 22. Localização das Usinas Hidrelétricas de Peixes e Luís Eduardo Magalhães, nos mapas de favorabilidade obtidos através das cartas geológicas 1:1.000.000.

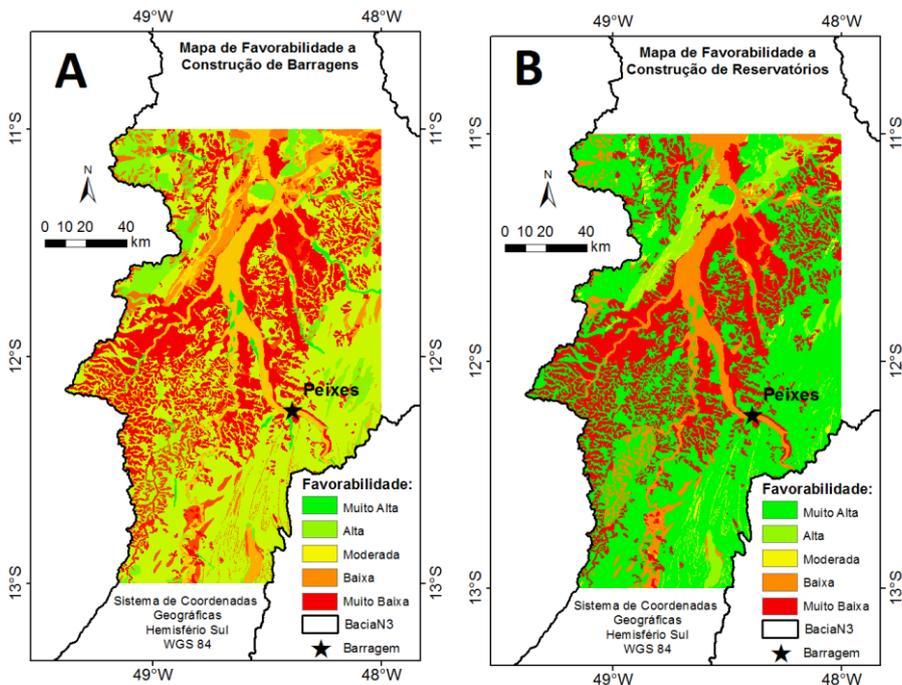


Figura 23. Localização das Usinas Hidrelétricas de Peixes e Luís Eduardo Magalhães, nos mapas de favorabilidade obtidos através das cartas geológicas 1:250.000.

Como se observa nas figuras 21 e 22 as usinas hidrelétricas presentes na área estão localizadas em locais pouco favoráveis geologicamente à construção de barragens e reservatórios, esse fato pode ser explicado devido à construção desses empreendimentos não dependerem somente de variáveis geológicas, principalmente barragens destinadas à geração de energia elétrica como é o caso. Além disso, como são grandes barragens pode-se desconsiderar os materiais inconsolidados como depósitos aluviais e coluvionáres, pois durante a fase de construção do barramento esse material é retirado e totalmente saturado em água pelo reservatório.

Sugere-se a modificação da metodologia para determinação de grandes barragens e reservatórios, onde a retirada dos materiais inconsolidados dos dados de entrada é uma solução, ou outra saída é a revisão dos pesos estabelecidos.

6. CONCLUSÕES

A metodologia para análise de favorabilidade a construção de barragens e reservatório, é de grande utilidade para gestores, principalmente durante as fases iniciais de implementação de um projeto, proporcionando um entendimento do comportamento geológico de uma determinada região sem a necessidade de ir a campo para tal.

A metodologia de análise multicritério AHP se mostrou uma importante ferramenta para a determinação dos pesos das classes e dos índices.

A qualidade dos dados de entrada possui caráter determinante para o resultado final, onde a qualidade é diretamente proporcional à escala dos dados, devendo o gestor procurar a fonte de dados na maior escala disponível.

As limitações desta metodologia se resumem na escassez de dados geológicos de qualidade para o território brasileiro e a necessidade de realização das correções topológicas para preparação desses dados.

A metodologia aplicada é bem sucedida para o posicionamento de pequenas barragens, para fins de abastecimento público e controle de cheias, já para a determinação de locais favoráveis a construção de grandes barragens e reservatórios deve-se rever a metodologia e os pesos aqui determinados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F. A. M. Estratigrafia e evolução estrutural do segmento setentrional da Faixa de Dobramentos Paraguai-Araguaia. **Belém, UFPAÍ (Dissertação de Mestrado)**, 1978.

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques. **Origem e evolução da plataforma brasileira**. DNPM, 1967.

ALMEIDA, FFM de. Antefossa do Alto Paraguai. In: **28 Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geociências**. 1974. p. 3-6

ALMEIDA, F. F. M. et al. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1-2, p. 1-29, 1981.

ALMEIDA, FFM et al. Aspectos evolutivos da geossutura Tocantins-Araguaia. In: **SBG, Congresso Brasileiro de Geologia**. 1986. p. 1269-1285.

ARCANJO, S. H. S. **Evolução geológica das seqüências do embasamento na porção sul do Cinturão Araguaia-Região de Paraíso do Tocantins**. 2002. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, 176p.

ARCANJO, Silvia Helena de Souza; ABREU, Francisco de Assis Matos de; MOURA, Candido Augusto Veloso. Evolução geológica das sequências do embasamento do Cinturão Araguaia na região de Paraíso do Tocantins (TO), Brasil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 3, p. 501-514, 2013.

BARREIRA C.F. **Geologia, prospecção geoquímica e geofísica da área de Rio do Coco, Paraíso do Norte-GO**. 1980. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, 143 p.

BERRY, Joseph K. Cartographic modeling: The analytical capabilities of GIS. **Environmental modeling with GIS**, p. 58-74, 1993.

BURROUGH, P. A. Sampling designs for quantifying map unit composition. **Spatial variabilities of soils and landforms**, n. spatialvariabil, p. 89-125, 1991.

CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. Santa Barbara: University of California. 1984. Tese de Doutorado. PhD Thesis, 583 p.

COSTA J.B.S. **Evolução Geológica da Região de Colméia**. 1980. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém, 78p.

COSTA, J. B. S. Aspectos lito-estruturais e evolução crustal da região centro-norte de Goiás. **Universidade Federal do Pará, Tese de Doutorado, Belém, 1985.**

COSTA J.B.S., GORAYEB, P.S.S., BERMEGUY R.L., GAMA Jr. T., KOTSCHOUBEY B., LEMOS R.L. **Projeto Paraíso do Norte**. 1983. Belém, UFPA, Conv. CVRD. 125 p.

COSTA, JOÃO BATISTA SENA et al. Geologia da região de Porto Nacional. **Rev. Bras. Geoc.** v. 14, p. 3-11, 1984.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de barragens**. Oficina de Textos, 2016.

DANTAS, Ícaro Rodrigues; MENESES, Leonardo Figueiredo; ALBUQUERQUE, Erickson Melo. **Técnicas De Geoprocessamento Aplicadas Na Identificação De Barragens Na Bacia Hidrográfica Do Mucatu, Litoral Sul Do Estado Da Paraíba**. 2008.

DELLA FAVERA, Jorge C. Devonian Storm-and Tide-Dominated Shelf Deposits, Parnaíba Basin, Brazil: ABSTRACT. **AAPG Bulletin**, v. 66, n. 5, p. 562-562, 1982.

DELLA FÁVERA, J. C. Tempestitos da Bacia do Parnaíba: um ensaio holístico. **Unpublished PhD Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre**, 1990.

DEUS, L. A. B., NASCIMENTO, J. A. S. **Desafio Da Sustentabilidade Da Mineração Na Amazônia - O Geoprocessamento Como Instrumento De Análise**. CETEM, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 2001.

DYER, James S. Remarks on the analytic hierarchy process. **Management science**, v. 36, n. 3, p. 249-258, 1990.

FREITAS, E. L. Análise Estratigráfica da Sequência Devoniana aflorante na Bacia do Parnaíba entre as cidades de Picos e Oeiras (PI). **Unpublished MS Thesis, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto**, 1990.

GÓES, AM de O.; TRAVASSOS, W. A. S.; NUNES, K. C. Projeto Parnaíba– Reavaliação da bacia e perspectivas exploratórias. **Belém, Petrobrás**, v. 1, 1993.

GORAYEB, P.S.S. 1996. Petrologia e evolução estrutural das rochas de alto grau de Porto nacional - TO. Tese de Doutorado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 258 p.

GORAYEB, P.S.S.; MOURA, C. A. V.; ARCANJO, S. H. S. Granitogenesis events in the Porto Nacional-Palmas-Paraiso do Tocantins region, Tocantins Province, Brazil. In: **SBG, International Geological Congress**. 2000.

GORAYEB, P.S.S.; MOURA, C. A. V.; CALADO, W. M. Suíte Intrusiva Xambica: um magmatismo toleítico neoproterozóico pré-tectônico no Cinturão Araguaia. In: **SBG, Congresso Brasileiro de Geologia**. 2004. p. 35.

HASUI, Yociteru et al. Geologia do Brasil. **São Paulo, SP: Beca**, 2012.

HASUI, Y.; COSTA, J. B. S. O Cinturão Araguaia: um novo enfoque estrutural-estratigráfico. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**. Natal: SBG, 1990. p. 2535-2543.

HASUI, Yociteru; ABREU, Francisco de Assis Matos de; SILVA, José Maurício Rangel da. Estratigrafia da Faixa de Dobramentos Paraguai-Araguaia no centro-norte do Brasil. **Boletim IG-USP**, v. 8, p. 107-117, 1977.

HASUI, Y. et al. Geologia do Pré-Cambriano da região de Paraíso do Norte de Goiás-GO. In: **SBG, Congresso Brasileiro de Geologia**. 1984. p. 2.220-2.230.

JAMEL, Carlos Eduardo Goes et al. **Utilização da técnica de avaliação multi-critério em ambiente SIG como apoio ao zoneamento e manejo de unidades de conservação-o caso do Parque Estadual dos Três Picos-RJ** . 2007.

KOTSCHOUBEY, Basile; HIERONYMUS, Bernard; DE ALBUQUERQUE, Carlos Alberto R. Disrupted peridotites and basalts from the Neoproterozoic Araguaia belt (northern Brazil): Remnants of a poorly evolved oceanic crust?. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 20, n. 3, p. 211-230, 2005.

LAMARÃO C. N., KOTSCHOUBEY B. 1994. Mineralização de berilo e turmalina do corpo pegmatítico do Catingueiro, Suíte Santa Luzia, Região de Paraíso do Tocantins (TO). In: IV Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. **Boletim de Resumos Expandidos**. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 1: 88-90.

MARANGON, Márcio. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004.

MARQUES FILHO, P. L.; GERALDO, A. Barragens e reservatórios. **OLIVEIRA, AMS; BRITO, SNA Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, p. 397-418, 1998.

MELO, Mauro Santos. **Avaliação de potencial hidroelétrico com aplicação de sistema de informações geográficas**. 2013. Tese de Doutorado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS.

MIOTO, J. A.; RIBOTTA, L. C. Atividade sísmica nas proximidades do reservatório da barragem de Jaguari, Rio Jaguari (SP). In: **4th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**. 1995.

MOURA, Candido AV. **Geochronology and geochemistry of the basement orthogneisses of the Araguaia Belt, Brazil**. 1992.

MOURA, C. A. V.; GAUDETTE, H. E. Geochemistry of the basement orthogneisses of the Araguaia Belt, Tocantins-Brazil. **SBG, Cong. Bras. Geol**, v. 38, p. 240-241, 1994.

PAIXÃO, MAP; OFIOLÍTICO QUATIPURU, Complexo; PARÁ, Brasil. **Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2009. 118 p.** Tese de Doutorado. Tese de Doutorado.

PAIXÃO, M. A. P.; NILSON, A. A.; DANTAS, E. L. The Neoproterozoic Quatipuru ophiolite and the Araguaia fold belt, central-northern Brazil, compared with correlatives in NW Africa. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 294, n. 1, p. 297-318, 2008.

PLUMMER F. B. 1946. Relatório apresentado ao Conselho Nacional de Petróleo. Cons. Nac. do Petróleo: 87 – 134.

REZENDE, N. G. A. M. A zona zeolítica da Formação Corda–Bacia do Parnaíba. **Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém (M. Sc Thesis, 142 pp.)**, 2002.

RODRIGUES A.S. 2001. Revisão dos icnofósseis descritos por Wilhelm Kegel para as formações Cabeças e Longá (Devoniano Médio e Superior da Bacia do Parnaíba). In: *Jornada de Iniciação Científica, 23, Resumos*, Rio de Janeiro, UFRJ, p. 124

SAATY, T. **An Eigenvalue Allocation Model for Prioritization and Planning. Energy Management and Policy Center, University of Pennsylvania**. Working Paper, 1972.

SAATY, Thomas Lorie; GONZÁLEZ, Luis. **Prediction, projection and forecasting: applications of the analytic hierarchy process in economics, finance, politics, games and sports**. 1991.

SCHWALM, Hugo; CRICIÚMA, S. C. **Geoprocessamento aplicado à análise ambiental: estudo de caso da barragem do Rio São Bento, Siderópolis, Santa Catarina**. Criciúma: Ed. do autor, 2008.

SILVA G.G.; LIMA M.I.C.; ANDRADE A.R.F.; Issler R.S.; Guimarães, G. 1974. Geologia. Folha SB.22 - Araguaia e parte da SC.22.- Tocantins. DNPM/Radam. v.4: 1-72. (Relatório técnico).

SOUZA, A. C. C. Geologia e Petrologia do extremo norte da Serra do Estrondogo. **Belém, UFPA (Dissertação de Mestrado)**, 1984.

SOUZA, Mariana Miranda. **Estudo Para O Projeto Geotécnico Da Barragem De Alto Irani**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

TOMLIN, C. Dana. A map algebra. **Harvard Graduate School of Design**, 1990.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; MELLER, Adalberto. Regulação das águas pluviais urbanas. [http://www. capnetbrasil. org/arquivos/Regulacao% 20das% 20aguas% 20plu vias% 20urbanas_TUCCI&MELLER. pdf](http://www.capnetbrasil.org/arquivos/Regulacao%20das%20aguas%20pluviais%20urbanas_TUCCI&MELLER.pdf) em, v. 13, n. 02, p. 2007, 2007.

WANG JA, PARK HD. **Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress–strain process**. 2002, Eng Geol 63:291–300.

ZAMBON, Kátia Livia et al. **Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoelétricas utilizando SIG**. *Pesquisa Operacional*, v. 25, n. 2, p. 183-199, 2005.