

MODELO DE FAVORABILIDADE HIDROGEOLÓGICA EM AQUÍFEROS FISSURAIS – A UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO NO CRISTALINO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

*Ana Beatriz da Cunha Barreto*¹

*André Luiz Mussel Monsores*²

*Jorge Pimentel*³

RESUMO

O Estado do Rio de Janeiro é composto na sua maior parte por rochas cristalinas metamórficas e ígneas, que se estendem por mais de 80% da sua área. A caracterização hidrogeológica da porção cristalina do Estado consistiu na identificação de áreas de bom potencial aquífero utilizando parâmetros como declividade, densidade de fraturas, densidade de drenagem, pedologia, uso do solo, cobertura vegetal e litologia. Os diferentes parâmetros foram combinados através de uma análise multi-critério, utilizando técnicas de GIS, tendo como resultado um mapa de favorabilidade hidrogeológica em escala 1:500.000.

Ana Beatriz da Cunha Barreto (CPRM-DIHEXP), André Luiz Mussel Monsores (CPRM-DIHEXP) e Jorge Pimentel (CPRM-DIGEOP)

INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta uma primeira avaliação do Estado do Rio de Janeiro segundo as suas características hidrogeológicas e propõe uma alternativa para o mapeamento de sistemas aquíferos cristalinos usando técnicas de GIS. A metodologia consistiu em reunir diversos temas, determinantes para a ocorrência de água subterrânea em rochas cristalinas, e combiná-los através de uma análise multi-critério utilizando o Sistema de Informação Geográfica SPANS-GIS. Os temas utilizados foram todos gerados no âmbito do Projeto Rio de Janeiro (CPRM/2000), com exceção do Mapa de Solos do Estado do Rio de Janeiro executado pela EMBRAPA, sendo eles: declividade do terreno, densidade de fraturas, tipo de solo, uso e cobertura do solo, densidade de drenagem e litologia. Como resultado foi gerado um mapa de favorabilidade hidrogeológica onde a área cristalina do Estado é hierarquizada segundo onze classes de favorabilidade para a ocorrência de água subterrânea.

1) CPRM/DIHEXP- Av. Pasteur 404, Urca, CEP 22290-240 Rio de Janeiro, RJ - (21)546-0428,
Fax (21)275-9344-anabia@cprm.gov.br

2) CPRM/DIHEXP- Av. Pasteur 404, Urca, CEP 22290-240 Rio de Janeiro, RJ - (21)546-0428,
Fax (21)275-9344 – monsores@cprm.gov.br

3) CPRM/DIGEOP- Av. Pasteur 404, Urca, CEP 2290-240 Rio de Janeiro, RJ – (21)546-0251,
Fax (21)295-6347 jop@cprm.gov.br

APLICAÇÃO DE GIS EM ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS

Os Sistemas de Informação Geográfica têm se mostrado uma poderosa ferramenta na pesquisa de água subterrânea. A possibilidade de se combinar diversos temas, organizados sob a forma de base de dados, permite que se sobreponha e se trabalhe os aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos condicionantes do movimento e da acumulação de água subterrânea nas rochas e solos. Esta habilidade no caso particular dos sistemas aquíferos cristalinos possibilita a delimitação de áreas e regiões favoráveis levando em consideração todos os aspectos relevantes para estes sistemas o que não seria possível através das metodologias convencionais. As áreas cristalinas nos mapas hidrogeológicos são de uma maneira geral representadas como um único sistema, sendo os dados relativos a poços tubulares a única informação disponível sobre a sua produtividade.

A metodologia empregada na caracterização hidrogeológica dos terrenos cristalinos do Estado do Rio de Janeiro se baseou em alguns trabalhos anteriores. Merece destaque o estudo hidrogeológico do maciço granítico de Huelgoat, de 98 km², na região de Finistère, França (Langevin, C., et al., 1991). Neste trabalho foram utilizados os temas geologia, lineamentos estruturais, hipsometria, declividade do terreno, estado de alteração da rocha e densidade de drenagem, que foram trabalhados através de análise booleana, utilizando o software SYNERGIS. Como resultado foi gerado um mapa de zonas de recarga e outro de zonas de permeabilidade do granito. A combinação destes dois temas resultou no mapa final de potencialidade aquífera do maciço.

Outro trabalho semelhante se refere à bacia do rio Marudaiyar no distrito de Tiruchirappalli, Índia (Krishnamurthy, J. et al., 1995), que possui uma área de 780 km², e cuja geologia consiste de rochas cristalinas e sedimentares. A escala de trabalho foi de 1:50.000, utilizando os temas litologia, geomorfologia, lineamentos estruturais e corpos d'água superficiais, densidade de drenagem, declividade e tipos de solos. Os temas foram classificados de acordo com o seu potencial e importância para a ocorrência de água subterrânea, e integrados através do software ARC/INFO GIS usando o método de agregação ponderada.

No Brasil as cidades de Curitiba e Porto Alegre foram alvo de estudos hidrogeológicos que utilizaram técnicas de geoprocessamento. Na cidade de Curitiba (Nogueira F, J e Soares, P.C., 1996) aonde o terreno é composto por rochas cristalinas e sedimentares, foi realizado um tratamento geoestatístico dos dados de vazões de poços tubulares profundos, através de análise variográfica e krigagem, resultando em curvas de isovalores para tendências de vazões que foram confrontadas com o MDT (Modelo Digital de Terreno) e com o mapa de contornos gravimétricos para anomalias Bouguer. As faixas de distribuição de vazões foram também confrontadas com alinhamentos morfo-estruturais de relevo, gravimétricos e de drenagem. Na região de Porto Alegre os temas uso do solo, geologia, fraturamento, declividade do terreno e espessura do manto de alteração foram integrados através de soma ponderada para definição do potencial hidrogeológico do cristalino (Freitas, M. A., 2000). Cada tema foi previamente classificado de acordo com o seu potencial para água subterrânea tendo sido definidas 4 categorias, desfavorável, pouco favorável, favorável e muito favorável, às quais foram atribuídas notas. Os pesos correspondentes a cada tema bem como a importância de cada parâmetro foram determinados a partir da experiência e conhecimento do autor na área. O estudo resultou em um mapa com classes de potencial relativo variando de 0 a 5.

METODOLOGIA

As bases de dados utilizadas para a modelagem foram, em sua maioria, geradas no âmbito dos diversos temas do Projeto Rio de Janeiro (CPRM/2000). A escala de trabalho foi de 1:250.000 e a dE apresentação do projeto 1:500.000.

A metodologia empregada na modelagem do cristalino foi a de uma análise multi-critério, utilizando-se o Sistema de Informação Geográfica SPANS-GIS. Essa metodologia permite que cada tema selecionado seja quantificado atribuindo-se notas às suas classes, de acordo com a potencialidade de cada uma para acumulação de água subterrânea. Posteriormente os temas são combinados atribuindo-se pesos de acordo com a sua importância relativa. Assim os temas utilizados em ordem decrescente de importância foram: declividade, densidade de fraturas, tipos de solos, uso e cobertura do solo, litologia e densidade de drenagem. Cada um destes foi trabalhado no sentido de melhor reproduzir a sua influência nos processos de infiltração e acumulação de água subterrânea nas rochas. A seguir uma breve descrição da importância de cada tema para a modelagem.

DECLIVIDADE

A declividade foi considerada o fator preponderante para os processos de infiltração das águas meteóricas, uma vez que a inclinação dos terrenos controla o processo de escoamento superficial e portanto a disponibilidade de água para infiltração na sua superfície.

O mapa de declividade foi executado a partir do modelo digital de terreno do Estado do Rio de Janeiro, gerado nos softwares ENVI e Easi Pace-PCI, utilizando a altimetria vetorizada das bases topográficas 1:250.000 do IBGE. Para a modelagem foram definidas cinco classes de declividade: 0° a 2°; 2° a 5°; 5° a 10°; 10° a 20° e >20° (figura 1).

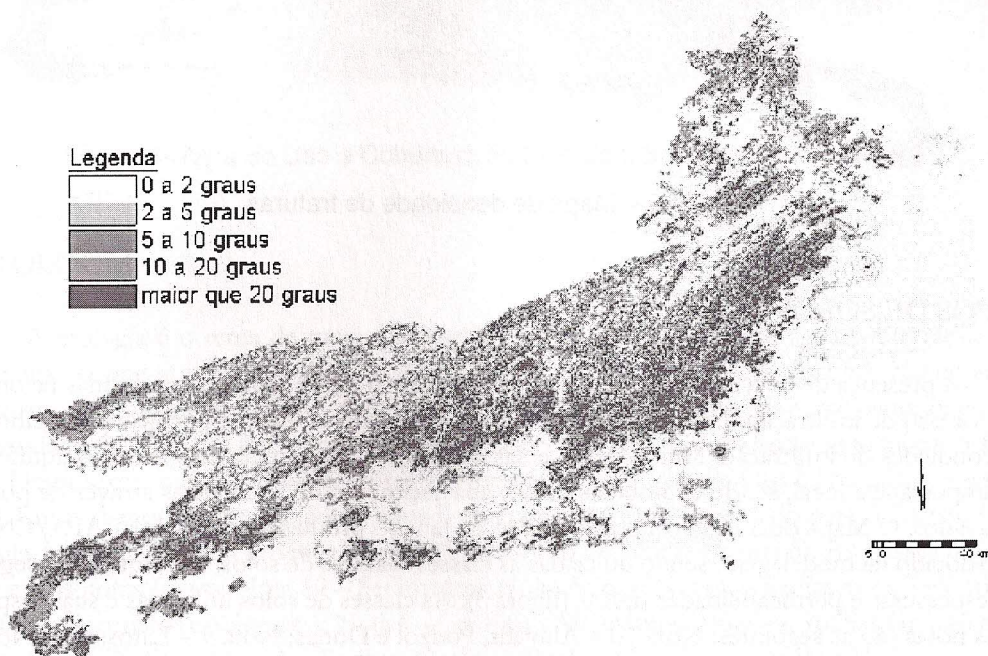


Figura 1-Mapa de Declividade do Estado do Rio de Janeiro

DENSIDADE DE FRATURAS

A água subterrânea circula nas rochas cristalinas através de suas fraturas e fissuras, portanto quanto mais intensamente fraturada uma rocha maior a sua capacidade de armazenar água subterrânea. A densidade de fraturas é uma razão que expressa a intensidade de fraturamento de um terreno.

Os lineamentos estruturais e fraturas foram extraídos de imagens LANDSAT através do software ENVI, para o estudo morfo-estrutural do Estado do Rio de Janeiro/Projeto Rio de Janeiro. A metodologia utilizou todos os sistemas de fraturas existentes, sem levar em consideração suas características compressoriais ou extensionais. A densidade de fraturas foi posteriormente calculada para a caracterização hidrogeológica através do SPANS GIS, utilizando-se um grid de 4km^2 . Como resultado foi gerado um mapa de densidade de fraturas (figura 2) compreendendo cinco classes de densidade, que correspondem a intervalos iguais entre o menor e o maior valor. São elas (em km/km^2): 0 a 0,36; 0,36 a 0,72; 0,72 a 1,08; 1,08 a 1,44 e $> 1,44$.

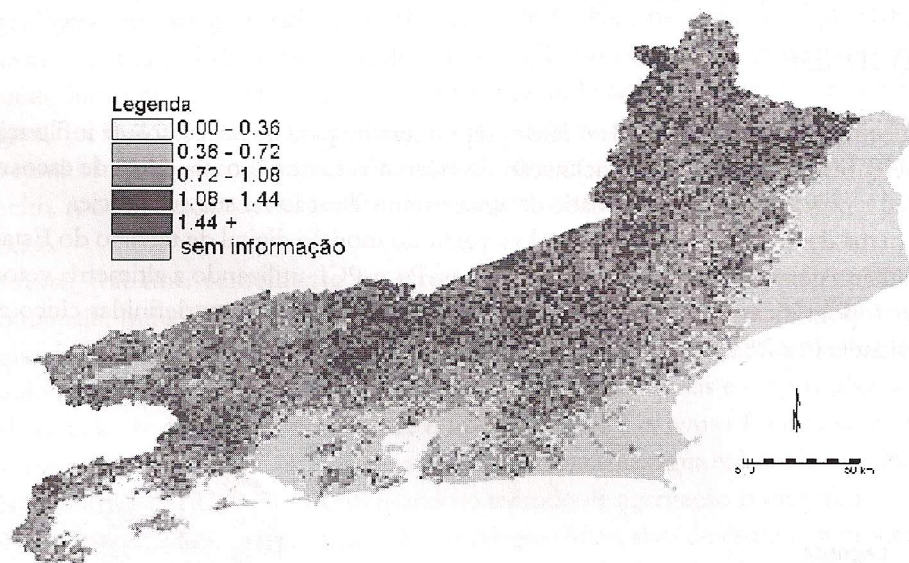


Figura 2 – Mapa de densidade de fraturas

TIPOS DE SOLOS

A presença de uma cobertura de solos ou sedimentar sobre as rochas cristalinas favorece o processo de infiltração das águas meteóricas. Quanto mais espessas e permeáveis, melhores as condições de infiltração. Muitas vezes essas coberturas constituem elas mesmas aquíferos de importância local, sendo exploradas para o abastecimento de residências através de poços escavados. O Mapa de Solos do Estado do Rio de Janeiro produzido pela EMBRAPA/CNPQ foi adotado na modelagem, sendo utilizadas as classes maiores de solos, hierarquizadas segundo espessuras e permeabilidades típicas (figura 3). As classes de solos utilizadas e suas respectivas notas são as seguintes: Nota 10 – Aluviais, Podzol e Dunas; Nota 9 – Latossolos; Nota 7 – Cambissolos; Nota 6 – Podzólicos; Nota 5 – Planossolos; Nota 4 – Gleis e Brunizem; Nota 0 – Litólicos, Afloramento de Rocha, Salinas, Mangues, Aterro e Urbano.

USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL

A presença de cobertura vegetal é outro fator determinante para o processo de infiltração. O Mapa de Uso e Cobertura do Solo do Estado do Rio de Janeiro produzido pela CPRM/Projeto Rio de Janeiro (figura 4), foi utilizado na modelagem sendo as classes hierarquizadas segundo a sua influência no favorecimento desse processo. As classes utilizadas estão descritas a seguir: Nota 10 – Extração de Areia, Cobertura Arenosa, Mata e Restinga; Nota 9 – Áreas Inundáveis; Nota 8 – Pastagem; Nota 6 – Áreas Agrícolas; Nota 2 – Solo Exposto; Nota 0 – Urbano, Mangue, Salinas e Afloramento de Rochas.

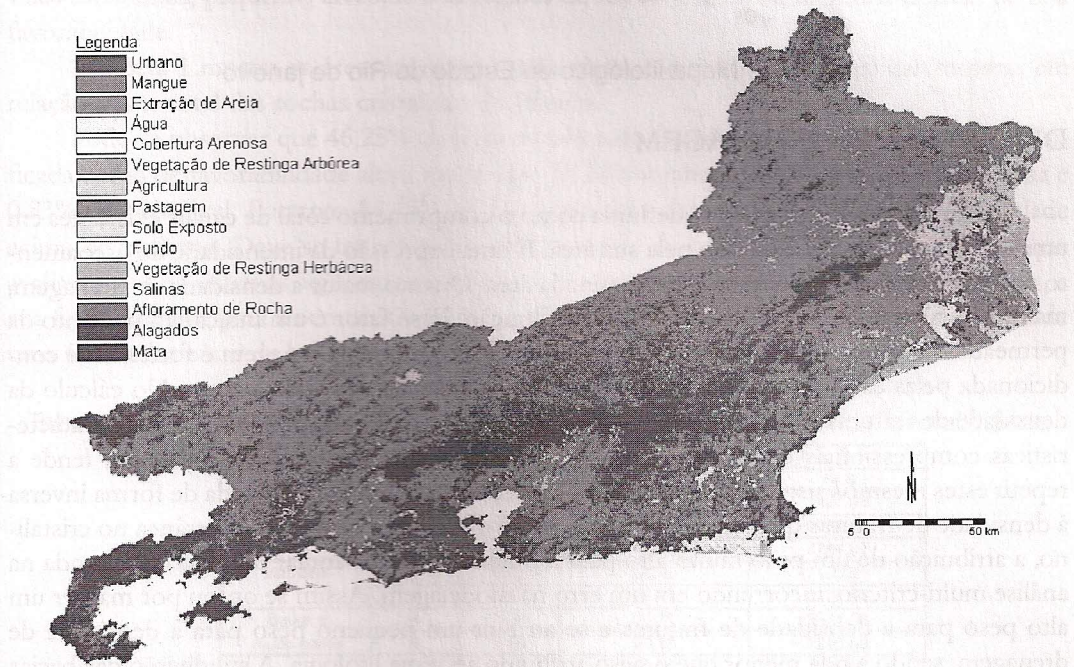


Figura 4-Mapa de Uso e Cobertura do Solo do Estado do Rio de Janeiro

LITOLOGIA

A litologia é o tema de menor importância para a ocorrência de água subterrânea no cristalino já que a existência de água nas rochas é condicionada pelas fraturas. No entanto existe uma hierarquia que leva em conta a presença de discontinuidades tais como bandejamento/xistosidade, facilidade de intemperização, maior suscetibilidade a fraturamento, grau metamórfico etc. Desta forma quartzitos e mármore são mais favoráveis que granitos e granulitos, e assim por diante. A modelagem utilizou o tema litologia simplificada, executado para o Projeto Geologia Aplicada ao Planejamento Urbano/Projeto Rio de Janeiro (figura 5). As classes utilizadas e suas notas foram: Nota 10 – Sedimentos Holocênicos; Nota 9 – Sedimentos Terciários; Nota 8 – Quartzitos e Mármore; Nota 6 – Gnaisses e Migmatitos; Nota 4 – Rochas Granitóides; Nota 3 – Granulitos; Nota 1 – Rochas Alcalinas, Rochas Graníticas e Rochas Básicas.

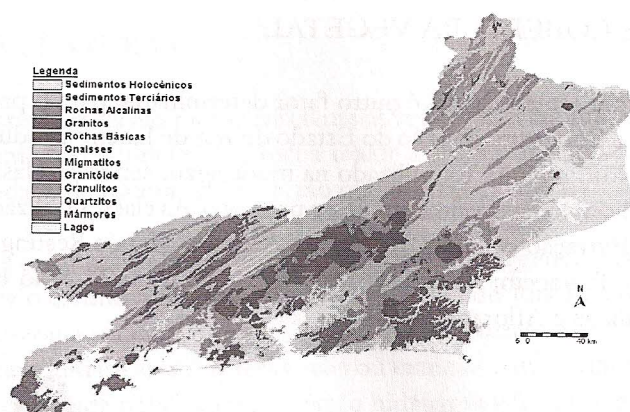


Figura 5- Mapa litológico do Estado do Rio de Janeiro

DENSIDADE DE DRENAGEM

A densidade de drenagem é definida como o comprimento total de canais existentes em uma determinada bacia, dividido pela sua área. É uma expressão da intensidade do escoamento superficial que ocorre em uma determinada área. Quanto maior a densidade de drenagem, maior o escoamento superficial e menor a infiltração. Esse fator é um indicativo portanto da permeabilidade dos terrenos. No caso do Estado do Rio onde a drenagem é fortemente condicionada pelas estruturas, deve-se ter cuidado na utilização desse parâmetro. No cálculo da densidade de fraturas foram utilizados todos os sistemas, independentemente de suas características compressoriais ou extensionais, e o forte controle estrutural da drenagem tende a repetir estes mesmos sistemas. Como a densidade de drenagem é classificada de forma inversa à densidade de fraturas quanto ao favorecimento à ocorrência de água subterrânea no cristalino, a atribuição de um peso muito alto para a primeira tende a anular o efeito da segunda na análise multi-critério, incorrendo em um erro na modelagem. Assim se optou por manter um alto peso para a densidade de fraturas e se atribuir um pequeno peso para a densidade de drenagem, sendo ainda menor que o peso atribuído ao tema litologia. A subdivisão das bacias hidrográficas utilizada foi a mesma do estudo de disponibilidade hídrica superficial do Projeto Rio de Janeiro, onde as áreas das bacias foram delimitadas em função das áreas de contribuição das estações fluviométricas existentes no Estado. Ao todo foram individualizadas 53 bacias, subdivididas em 20 classes de densidade de drenagem (figura 6)

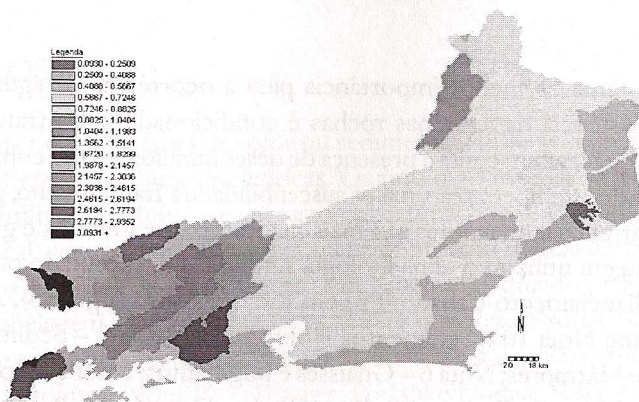


Figura 6 – Mapa de densidade de drenagem do Estado do Rio de Janeiro

ÍNDICES DE FAVORABILIDADE À OCORRÊNCIA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A modelagem por análise multi-critério resultou em 11 classes de favorabilidade para a ocorrência de água subterrânea no cristalino (de 0 a 11), subdivididas em quatro classes : desfavorável (índices de 0 a 2); baixa a muito baixa (índices 3 e 4); mediana (índices 5 e 6) e alta a muito alta (índices 7 a 10). Na figura 7 apenas a porção cristalina do Estado foi representada. Pode-se observar o forte controle do relevo, coerente com o grande peso atribuído ao tema declividade onde as áreas de escarpas coincidem com os índices de menor favorabilidade, e os vales estruturais, pequenos alvéolos e as regiões de relevo mais arrasado com as áreas de boa favorabilidade.

A tabela 1 mostra as áreas relativas à cada classe e o valor percentual das mesmas em relação à área total das rochas cristalinas do Estado.

Pode-se observar que 46,25% da área cristalina do Estado do Rio de Janeiro está classificada como de favorabilidade alta a muito alta, 38,22% mediana, 14,7% baixa a muito baixa e 0,83% desfavorável. Portanto 84,47% do cristalino está classificado como de favorabilidade acima de mediana. Deve-se ter em mente que o índice de favorabilidade é um atributo que avalia apenas os sistemas aquíferos cristalinos e que por melhor que seja uma área cristalina, a sua favorabilidade para a ocorrência de água subterrânea é comparativamente menor que a de uma área sedimentar de boa potencialidade.

Tabela 1 - Distribuição percentual de áreas do cristalino nas classes de favorabilidade

Favorabilidade	Índice	Área (%)	Área acumulada	Área (km ²)
Alta a muito alta	10	0.04	0.04	14.8
	9	4.06	4.1	1427.96
	8	22.85	26.95	8031.63
	7	19.3	46.24	6784.07
Mediana	6	20.21	66.46	7105.91
	5	18.01	84.47	6332.59
Baixa a muito baixa	4	11.24	95.71	3951.08
	3	3.46	99.16	1215.68
Desfavorável	2	0.75	99.92	264.46
	1	0.07	99.99	26.3
	0	0.01	100	2.1
	Total	100		35156.6

As áreas de favorabilidade foram confrontadas com os dados dos poços tubulares cadastrados, que foram classificados por faixas de vazão (Q) em m³: 0<Q<5; 5<Q<10; 10<Q<20; 20<Q<50; 50<Q<100 e Q>100. Os resultados se encontram na tabela 2.

Tabela 2 Distribuição de poços nas classes de favorabilidade- totais e percentuais por faixas de vazão (n = n^o de poços; Q = vazão em m³/h)

Índices	n	Total		0<Q<5		5<Q<10		10<Q<20		20<Q<50		50<Q<100		Q>100	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
9	31	5.90		14	5.58	11	7.00	6	5.67						
8	170	32.36		75	30.24	51	33.83	30	29.64	8	38.10	2	50.00		
7	117	22.38		57	23.08	33	22.33	21	20.62	6	30.95	1	25.00	2	100.00
6	119	22.58		58	23.50	33	21.83	23	23.20	5	22.62	1	25.00		
5	61	11.54		27	10.75	17	11.33	18	17.53	1	3.57				
4	22	4.13		14	5.58	3	2.00	3	3.35	1	4.76				
3	4	0.71		2	0.84	2	1.00								
2	2	0.40		1	0.42	1	0.67								
Total	527			248		151		101		21		4		2	

Existe um total de 527 poços cadastrados na área cristalina do Estado. Não estão incluídos nesta contagem os poços secos. Desse total, a grande maioria (94,78%) se concentra nas classes de favorabilidade mediana a muito alta, (34,12, mediana e 60,64%, alta a muito alta). É importante ressaltar que o universo amostral desse trabalho está muito longe da realidade, ou seja, da totalidade de poços existentes. Outro fator a ser levado em consideração é de que o critério de seleção dos poços para georreferenciamento nas visitas de campo era o de que os mesmos dispusessem de um mínimo de qualidade de informação: existência de relatórios das empresas perfuradoras ou pelo menos dos dados de vazão e profundidade. Esse fato acabou por eliminar uma quantidade significativa de poços mal sucedidos, cujos dados muitas vezes se perdem.

Por outro lado, deve-se lembrar que boa parte desses poços foram locados sem nenhuma metodologia ou pesquisa hidrogeológica, o que sugere que se o fossem talvez a incidência de poços nas classes favoráveis fosse ainda maior. Mais uma vez deve-se lembrar do forte controle do relevo na modelagem, e que qualquer perfurador, por mais leigo que seja, tenderá a local seu poço nos fundos de vales ou em áreas rebaixadas.

Pode-se observar que na distribuição por faixas de vazão há uma grande concentração nos índices de favorabilidade de seis a oito para todas as faixas e que os dois poços cadastrados com vazão superior a 100m^3 correspondem ao índice sete.

De qualquer forma a análise da distribuição de poços por faixas de vazão nas diversas classes de favorabilidade mostrou a consistência da modelagem, uma vez que a porcentagem de poços com vazão acima de 5m^3 nas classes baixa a muito baixa e desfavorável é bastante pequena.

CONCLUSÕES

O mapa de Favorabilidade Hidrogeológica do Estado do Rio de Janeiro corresponde a uma primeira tentativa de caracterizar o potencial hidrogeológico do Estado. O uso de geoprocessamento para identificar áreas de favorabilidade à ocorrência de água subterrânea em terrenos cristalinos não constitui propriamente uma novidade, porém a sua aplicação em um estudo de escala regional é pioneira. A modelagem necessita ainda de diversos ajustes e melhoramentos, principalmente no que se refere à entrada de dados primários. Esse é o caso do tema densidade de fraturas, onde foram utilizados indiscriminadamente todos os sistemas de fraturas existentes, ao invés de se utilizar apenas os sistemas distensivos, cujas fraturas abertas constituem o meio propriamente dito de circulação das águas nas rochas cristalinas. Na composição desse tema não entrou também o parâmetro de interseção de juntas, fundamental para se tentar quantificar a interconectividade dos sistemas de fraturas.

Outro tema que merece uma revisão é o de densidade de drenagem. A delimitação das áreas das bacias foi feita em função das áreas de contribuição de estações fluviométricas existentes, quando o mais correto teria sido tentar individualizar cada microbacia na escala de trabalho (1:250.000). Como existe um forte controle estrutural da drenagem no Estado do Rio de Janeiro, a densidade calculada tende a repetir o dado de densidade de fraturas. Esse fato dificultou a modelagem uma vez que os dois temas pesam de maneira oposta na análise multicritério, ou seja, quanto maior a densidade de fraturas, mais favorável o terreno para a água subterrânea, e inversamente, quanto maior a densidade de drenagem menos favorável o terreno. Assim optou-se por dar um peso maior à densidade de fraturas por ser um dado mais homogêneo, tendo sido gerado a partir de um grid de 2km^2 .

O resultado da modelagem mostrou que 84,5% da área cristalina do Estado do Rio de Janeiro está classificada como de favorabilidade acima de mediana. Esse resultado é consistente com o fato de que o cristalino no Estado do Rio de Janeiro possui as condições ótimas para a ocorrência de água subterrânea, como um alto índice de fraturamento e uma espessa cobertura de solos.

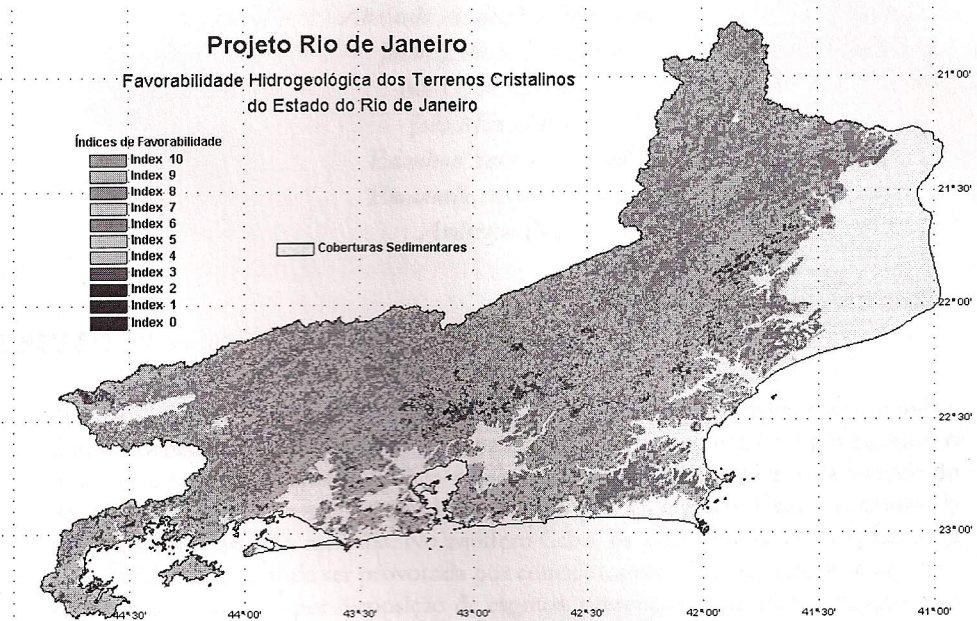


Figura 7- Mapa do Estado do Rio de Janeiro com os terrenos cristalinos classificados segundo a favorabilidade para a ocorrência de água subterrânea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FREITAS, Marcos Alexandre de. Determinação do potencial hidrogeológico de rochas cristalinas através de técnicas de geoprocessamento. In: I Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas –ABAS/ ALHSUD Fortaleza, 2000.
- KRISHNAMURTHY, J.; VENKATESA Kumar, N.; JAYARAMAN, V. & MANIVEL, M. 1996, An approach to demarcate ground water potential zones through remote sensing and a geographical information system. *Journal of Remote Sensing* v. 17, 18 p.
- LANGVIN, C.; PERNEL, F.; POINTET, T. et al. 1991, Aide à la décision en matière de prospection hydrogéologique – L'analyse multicritère au service de l'évaluation du potentiel aquifère, en milieu fissuré (granite de Huelgoat, Finistère, France). *Hydrogéologie*, n°1, 64 p. p. 51 - 64.
- NOGUEIRA F, J. e SOARES, P. C. Análise da distribuição da água subterrânea em Curitiba através de geoprocessamento. In: GIS Brasil, Curitiba, 1996, Anais... 12 p. p.261-272.