

DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DE ROCHAS CRISTALINAS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO

Marcos Alexandre de Freitas¹

Resumo - Técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento são utilizadas com o objetivo de mapear o potencial hidrogeológico de rochas cristalinas, não se limitando somente à análise de lineamentos. São integrados em um SIG parâmetros como uso do solo, unidades litológicas, lineamentos morfo-estruturais, declividade do terreno e espessura do manto de alteração. Na análise dos lineamentos é criado um índice de fraturamento, que leva em consideração o comprimento, a frequência e a intersecção de traços de fratura, extraídos de imagens LANDSAT-TM5 e fotografias aéreas na escala 1:110.000 e 1:60.000 . A área de estudo de caso é a região de Porto Alegre-RS, onde predominam rochas graníticas do escudo sul-rio-grandense. É testada a lógica booleana, utilizando operadores de soma ponderada dos parâmetros envolvidos. O mapa de potencial hidrogeológico obtido é confrontado com os dados de produtividade de 80 poços construídos na área. Os resultados demonstram que a técnica adotada fornece subsídios, que servem de suporte para estudos localizados de maior detalhe de locação de poços, tornando a pesquisa direcionada, proporcionando economia de tempo e de recursos.

Palavras-chave - rochas cristalinas; sensoriamento remoto; geoprocessamento

INTRODUÇÃO

Uma das mais difíceis tarefas em hidrogeologia é a correta locação de pontos para a perfuração de poços d' água em rochas ígneas e metamórficas. Muitos insucessos têm ocorrido na tentativa de obter poços produtivos, mesmo onde as locações foram feitas

¹ Geólogo MSc Sensoriamento Remoto - CPRM -Serviço Geológico do Brasil - Superintendência Regional de Porto Alegre. Rua Banco da Província, 105. Santa Teresa. CEP: 90840-030. Fone:(051) 233 7311.Porto Alegre-RS. e-mail: maf@cpovo.net

por experientes hidrogeólogos. Considerando os prejuízos e frustrações na perfuração de poços secos, principalmente em comunidades carentes como no nordeste do Brasil, é possível perceber o quanto é importante desenvolver e aprimorar metodologias para o mapeamento de áreas favoráveis à ocorrência de água subterrânea em tais rochas.

Nesse sentido inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas na tentativa de definir o potencial hidrogeológico das rochas “duras”, com o objetivo de reduzir o índice de insucesso. O principal tipo de abordagem adotado é o mapeamento das zonas fraturadas (lineamentos), utilizando mapas topográficos, fotografias aéreas e imagens de satélite. Porém, a correlação entre os lineamentos mapeados e os dados de produtividade dos poços, têm se mostrado ambíguos, sugerindo que somente o estudo de lineamentos não pode ser usado para a determinação das áreas potenciais e para locação de poços. A pequena precisão nos dados de entrada d’água, a incerteza na interpretação de lineamentos, o pequeno número de dados de poços estatisticamente significativos e a desconsideração de outros parâmetros naturais envolvidos no problema, podem ser citados para explicar tal fato.

O crescente e rápido desenvolvimento da tecnologia de informação espacial vem promovendo o uso de dados georeferenciados nas mais diversas áreas científicas e tecnológicas. As informações são organizadas sob a forma de imagens, mapas, tabelas e relatórios estatísticos, combinados com uma base de dados unificada. Com os sistemas de informações geográficas é possível gerar novos mapas a partir da interação de outras bases cartográficas, bem como a integração com as técnicas de sensoriamento remoto. A tecnologia dos sistemas de informações geográficas permite manipular as funções representantes dos processos naturais, em diversas regiões de uma maneira simples, eficiente, economizando tempo e recursos.

Assim considerando a problemática em relação à água subterrânea no meio fraturado e seu complexo comportamento, torna-se necessário mapear com melhor precisão as áreas potencialmente favoráveis à prospecção hidrogeológica, integrando os diversos planos de informação para o estudo do problema.

Pretende-se, não se limitando somente à análise de lineamentos mas integrando parâmetros como uso do solo, geologia, fraturamento, declividade do terreno e espessura do manto de alteração, definir um critério de mapeamento de áreas potencialmente favoráveis à ocorrência de água subterrânea em meios fraturados, integrando as várias técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto integradas através de lógica de conjuntos booleanos(ou binária).

LOCALIZAÇÃO E CLIMA DA ÁREA

A área de estudo compreende o município de Porto Alegre e porções de Alvorada e Viamão. Situa-se na porção leste do estado do Rio Grande do Sul, à margem esquerda do Lago Guaíba (figura 1).

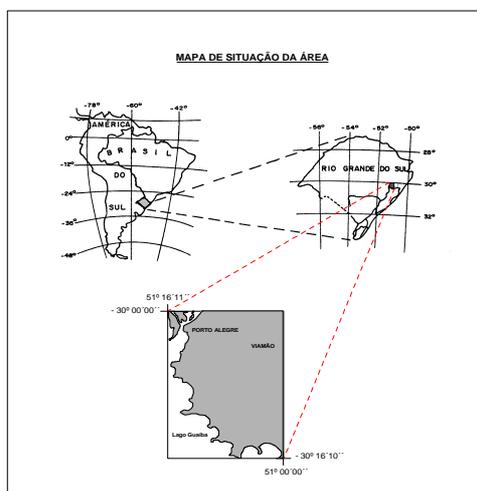


Figura 1. Localização da área de estudo de caso.

A região apresenta um clima subtropical úmido sem estiagens; com temperatura média do mês mais quente superior a 22° C e a do mês mais frio oscilando entre 3° C e 18° C. A precipitação média anual na região é de aproximadamente 1277 mm, com valores mensais mínimo de 76 mm e máximo de 136 mm. As chuvas caem regularmente durante o ano todo com as maiores precipitações ocorrendo nos meses de inverno e início da primavera.

Estas características climáticas, além da influência direta na recarga dos aquíferos, vêm desempenhando um importante papel, ao longo dos tempos, no intemperismo das rochas, gerando um espesso manto de alteração, que além de constituir um aquífero superior, na maioria das vezes, favorece a recarga do aquífero fraturado subjacente.

USO DO SOLO

A classificação supervisionada da imagem digital LANDSAT-TM 5, de novembro de 1995, revelou quatro classes, que influem no comportamento hidrogeológico da região. As classes ilustradas na figura 2 são: área urbana, mata nativa, campo e solo exposto.

A primeira classe, a área urbana, ocupa 180,04 km² representando 28,24 % da área total estudada, distribuída preferencialmente na porção norte e noroeste da área, também

apresenta algumas concentrações esparsas. Esta classe tem influência negativa sobre o comportamento do aquífero fraturado, pois as construções, o asfalto e o concreto causam a impermeabilização do solo, prejudicando a recarga dos aquíferos.

A classe mata nativa representada por florestas de médio porte bastante densas, que se distribuem principalmente nas encostas dos morros, especialmente na zona centro-sul, ocupa uma área de 134,59 km², ou seja, 21,11 %. Esta classe desempenha importante papel na recarga dos aquíferos, isto é, além de proteger o solo dos impactos das gotas de chuva, retém a umidade permitindo uma melhor condição de infiltração.

A terceira classe, os campos cobertos por vegetação de gramíneas e arbustos, ocorrem principalmente no topo dos morros e possuem a maior cobertura em área das classes analisadas: 204,29 km² (32,04%). À exemplo da classe anterior, também favorece a infiltração de água no solo, porém em menor magnitude.

O solo exposto, formado por áreas degradadas e áreas de lavoura, ocupa 18,43 km² o que equivale a 2,9 % da área. Tais áreas são problemáticas em relação à recarga dos aquíferos, pois a superfície descoberta do solo está sujeita ao impacto dos pingos de chuva, o que causa uma compactação do meio. Além disto pode ocorrer erosão do solo diminuindo sua espessura e expondo diretamente a rocha, causando também a diminuição da capacidade de infiltração.

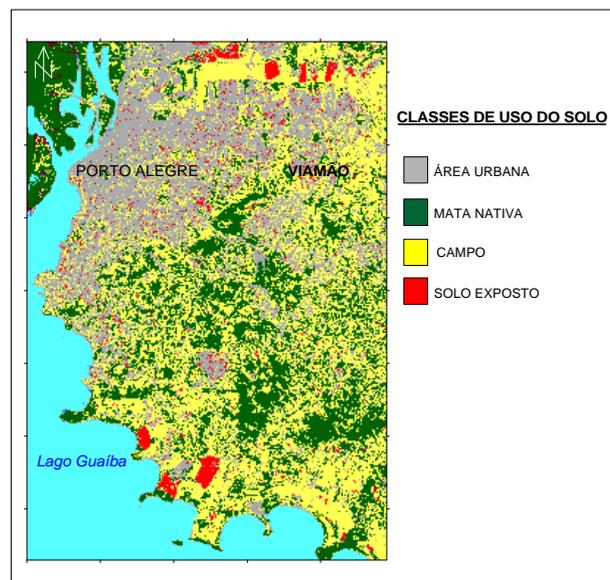


Figura 2. Mapa de uso do solo obtido a partir da classificação digital da imagem LANDSAT TM5.

GEOLOGIA

A Geologia da Região de Porto Alegre é apresentada a seguir de uma forma resumida e bastante objetiva, com ênfase voltada para fornecer subsídios à definição do comportamento hidrogeológico da região. A figura 3, modificada de Schneider et al. (1974), ilustra as várias unidades litológicas que ocorrem na área.

As rochas graníticas da região de Porto Alegre representam a continuidade da parte central do Cinturão Dom Feliciano no setor oriental do Escudo Sul-Rio-Grandense.

A unidade litológica mais antiga está representada por ortognaisses granodioríticos a tonalíticos, que em conjunto com os biotita-monzogranitos porfiríticos representam o Complexo Granito-Gnássico Pinheiro Machado (Ramgrab e Wildner, 1996). Os granitóides pertencentes ao Domínio Dom Feliciano são representados, em ordem decrescente de idade, por, biotita-sienogranitos, sienogranitos róseos e feldspato-alcalino-granito.

Os ortognaisses são compostos por gnaisses granodioríticos a monzoníticos, de cores negras com bandamentos finos descontínuos e polideformados. Por vezes, encontram-se recortados por diques e apófises de sienogranitos esbranquiçados. Em geral apresentam intenso grau de alteração com solos bem desenvolvidos, criando uma boa expectativa para ocorrência de água subterrânea, desde que esteja fraturado.

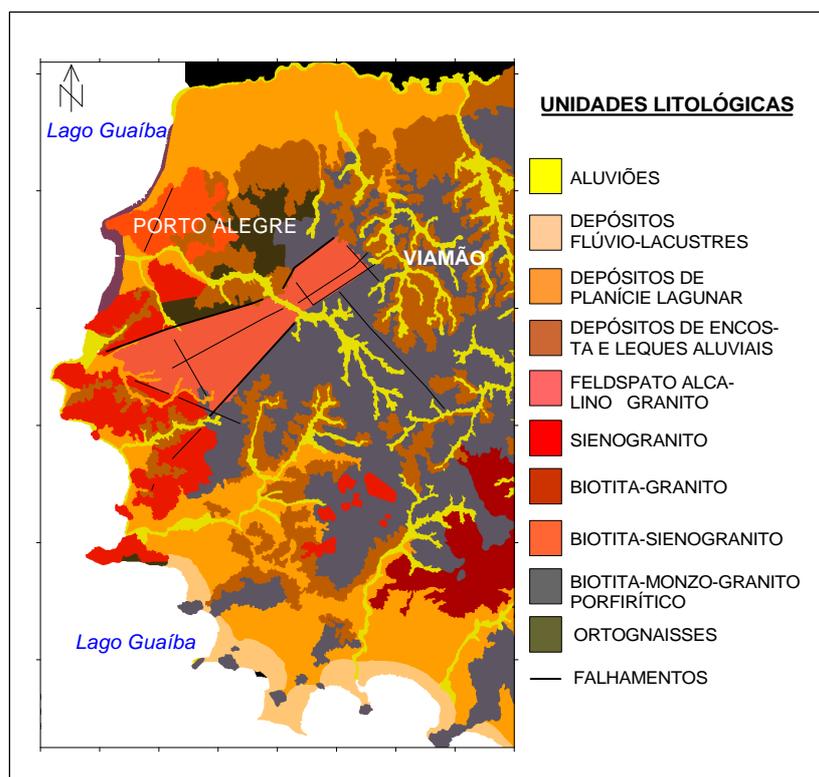


Figura 3. Unidades litológicas (modificado de Schneider et al., 1974).

Os biotita-monzogranitos porfiríticos ocupam a maior parte da área e são caracterizados por apresentarem megacristais de ortoclásio e microclínio rosados (2 a 10 cm) em matriz hipidiomórfica cinzenta, de composição granodiorítica rica em biotita. Em certos locais, principalmente nos vales encaixados em grandes zonas de fraturamento, desenvolvem espessos mantos de alteração, podendo desempenhar influência positiva no comportamento hidrogeológico.

A terceira unidade granítica, o biotita sienogranito, é constituída por granitóides esbranquiçados de textura média a grossa composta por ortoclásio-microclínio, plagioclásio, quartzo, muscovita e biotita. Nas zonas de falha costumam apresentar forte “graisenização”. Em geral, possuem espessura de solo e alteração de rocha moderado. Seu potencial hidrogeológico está praticamente restrito à zonas de fraturamento cobertas por manto de alteração.

Os sienogranitos são rochas rosadas a avermelhadas, médias a grossas, isotrópicas em geral (exceção à pequenas faixas miloníticas), muitas vezes diferenciando-se das anteriores pelo menor teor de biotita, normalmente apresentam fluorita e apatita. De modo geral seu grau de alteração é incipiente com solos médios a rasos. Seu potencial hidrogeológico está restrito a grandes fraturamentos

A última unidade granítica Pré-Cambriana é o feldspato-alcálico-granito, o qual ocorre sob a forma alongada de direção nordeste (Morros Santana e da Polícia) controlada por falhamentos e disposta em uma zona de cisalhamento de idade Brasiliana, o que confere à rocha uma textura milonítica (Philipp et al, 1994.). Há ocorrências de fluorita e molibdenita. Esta unidade é a que apresenta as piores condições para a ocorrência de água subterrânea, pois além de estar em uma zona elevada, não possui quase solo e suas fraturas encontram-se na maioria das vezes preenchidas por sílica.

Localmente, interceptando as unidades anteriores, ocorrem os diques de riolitos e dacitos porfiríticos de espessura métrica, com direção predominante NW, atingindo por vezes extensões quilométricas.

O Cenozóico está representado por depósitos de encosta e leques aluviais, de planície lagunar, flúvio-lacustre, e depósitos aluvionares atuais. Entre estes, os depósitos gravitacionais de encosta (elúvios e colúvios) são os únicos a apresentarem nítida relação com o potencial aquífero do cristalino. São constituídos por conglomerados,

diamictitos, arenitos conglomeráticos imaturos, arenitos e lamitos, maciços ou com estruturas acanaladas, com cores entre o vermelho e amarelo, gradando para sistemas de leques aluviais e canais anastomosados nas porções mais distais. Ocorrem muitas vezes sobre zonas de fratura, e devido à sua composição e granulometria, possibilitam a recarga do meio fraturado. Quando bem espessos podem constituir bons aquíferos granulares, principalmente no contato com a rocha sã (Hausman, 1975).

ÍNDICE DE FRATURAMENTO

A análise da estruturação geológica é fundamental no estudo de aquíferos de meio fraturado. Esta pesquisa limita-se à descrição de feições de meso e mega-escala, principalmente àquelas decorrentes de tectônica rúptil, extraídas através de técnicas de sensoriamento remoto em imagem digital e fotografias aéreas (escala 1:110.000 e 1:60.000), adotando o princípio da não inferência (Schuck et al, 1986).

A extração na imagem digital de agosto de 1988 determina a tendência estrutural regional da área ilustrada pela figura 4. Foram traçados visualmente 474 lineamentos no monitor de vídeo usando técnicas de realce como composição colorida e análise em várias bandas. Há uma predominância da direção NW-SE, fato que se deve ao azimute e a baixa elevação solar que, nesta latitude e época do ano, favorece o sombreamento das estruturas noroeste perpendiculares à direção de iluminação.

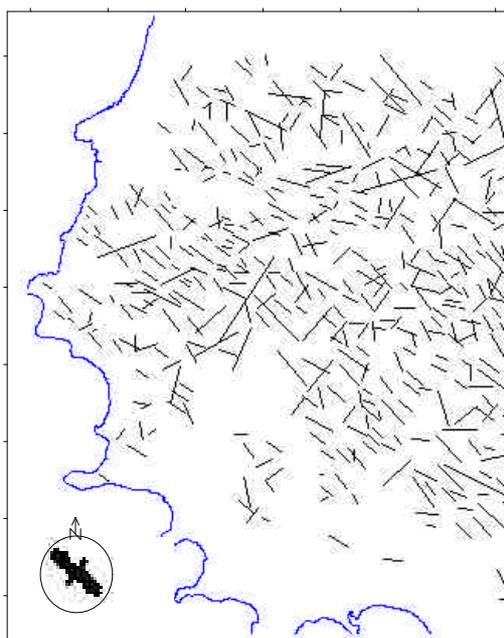


Figura 4. Lineamentos morfo-estruturais extraídos da imagem digital LANDSAT-TM5.

As fotografias aéreas na escala 1:110.000 permitiram o traçado de 761 lineamentos (figura 5). As direções noroeste predominam, com sistemas que variam de N-20-W a N-60-W, porém, ao contrário da imagem digital de satélite, ocorrem também duas evidentes direções nordeste (N30-40E e N60-70E)

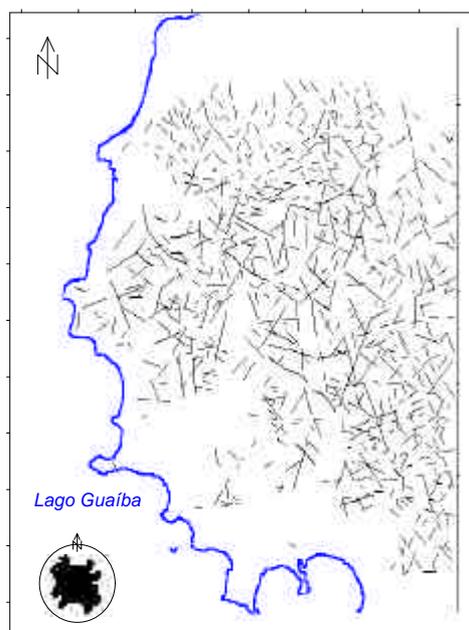


Figura 5. Fotolineamentos obtidos em escala 1:110.000.

As aerofotos 1:60.000 permitiram a extração mais detalhada, gerando um mapa de 3004 lineamentos (figura 6). Tal como a aerofoto 1:110.000, este produto registrou muito bem as direções N-E, já que a fotografia aérea, ao contrário da imagem de satélite, não sofre tanta influência da posição solar, além de se utilizar a estereoscopia. Os principais sistemas têm as direções N20-30E e N30-50W, associados a sistemas secundários N-S e E-W.

Os lineamentos morfo-estruturais extraídos dos três produtos de sensoriamento remoto descritos acima foram digitalizados e transformados em formato vetorial. Tais dados vetoriais, representados pelas coordenadas UTM de seus pontos extremos $\{(x_1, y_1); (x_2, y_2)\}$, foram exportados para o formato ASCII, dando suporte para a etapa de geração de grades usadas para determinação do índice de fraturamento (Freitas,1998).

A partir dos arquivos ASCII foram gerados grades, com células de 100 metros quadrados. Três parâmetros foram envolvidos na geração das grades: comprimento, frequência e intersecção de lineamentos. Um grande comprimento sugere que os lineamentos têm maior probabilidade de serem interceptados por outros, além de

representar a magnitude da deformação. A presença de numerosos lineamentos indicam que tais feições têm uma forte expressão e aumentam a probabilidade de ocorrência de água subterrânea. O parâmetro intersecção representa a interligação dos lineamentos, também sendo diretamente proporcional à possibilidade de ocorrência de água subterrânea.

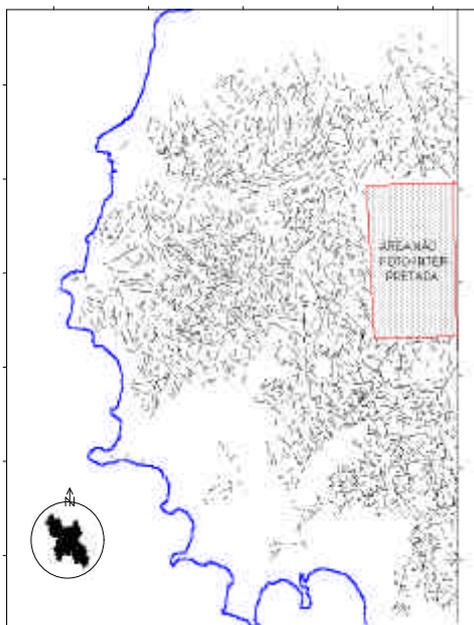


Figura 6. Fotolocalização obtidos na escala 1:60.000 .

As três grades relativas aos parâmetros componentes do índice foram geradas individualmente, normalizadas e somadas, a fim de se obter uma grade final representativa do grau de fraturamento. A grade relativa ao comprimento acumulado dos lineamentos por célula, apresenta valores entre 0 e 479,47 m, com valor médio de 90,03 m e desvio padrão de 55,03 m. A frequência, que fornece uma visão da densidade de fraturas, ou seja, o número de lineamentos que ocorrem dentro de cada célula, apresenta extremos entre 0 e 5, com média de 1,2 lineamentos e desvio padrão de 0,49. O número de intersecções dos lineamentos, que permite avaliar a conexão entre as fraturas, apresenta valores entre 0 e 9, com média de 1,18 e desvio padrão de 0,56. O índice de fraturamento (figura 7) calculado e normalizado entre valores de 0 a 100 tem um valor médio de 18,24 para as áreas com presença de rochas cristalinas.

RELEVO E DECLIVIDADE DO TERRENO

A área encontra-se inserida na transição de dois compartimentos morfo-estruturais: o relacionado ao Escudo-Sul-Riograndense e à Planície Costeira. A figura 8,

representada pelo modelo numérico do terreno e a rede de drenagem até a 4ª ordem, exibe o panorama geral do relevo da área de estudo e o escoamento regional das águas superficiais.

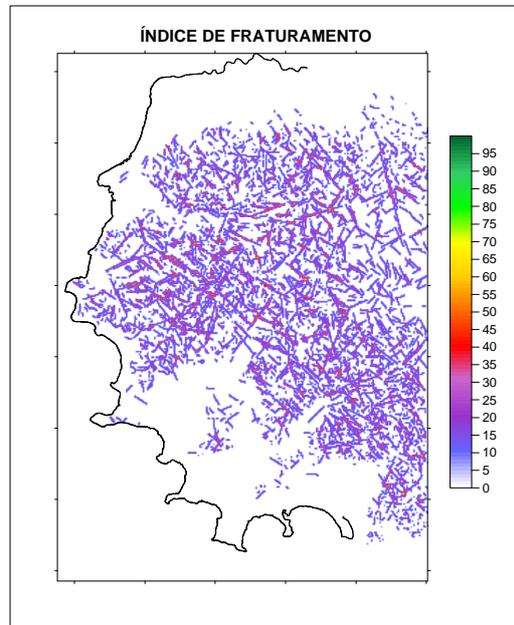


Figura 7. Índice de fraturamento obtido a partir da integração das grades de comprimento, frequência e intersecção de lineamentos morfo-estruturais (Freitas, 1998).

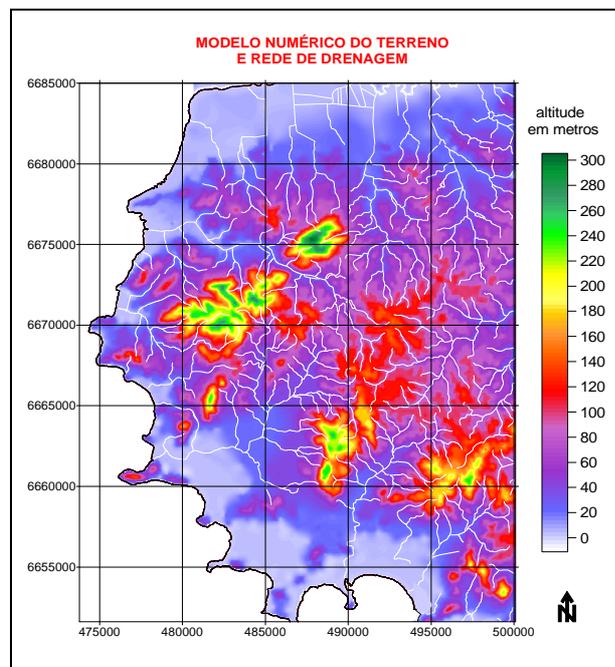


Figura 8. Modelo numérico do terreno e rede de drenagem exibindo as diferentes formas de relevo da área (Freitas, 1998).

O primeiro compartimento, relacionado às rochas graníticas do embasamento cristalino, apresenta formas de relevo acidentadas, com predomínio de colinas baixas a moderadamente altas com altitudes em torno de 180 metros. As vertentes são convexas, determinando vales em “V” geralmente amplos. Na sua região centro-oeste, a topografia é dominada por morros altos e salientes na paisagem orientados segundo a direção nordeste, formados por rochas graníticas mais silicificadas, e conseqüentemente mais resistentes à erosão, atingindo altitudes de até 311,00 metros. O padrão de drenagem predominante é dendrítico a retangular em algumas regiões, onde se verifica uma subordinação às estruturas tectônicas, ocorrendo de maneira localizada um padrão radial centrífugo. O compartimento relacionado à Planície Costeira, corresponde aos depósitos recentes, configurando uma zona plana de terras baixas e monótonas, com colinas de vertentes muito suaves, que em geral não ultrapassam os 30 metros. O padrão de drenagem predominante é meandrante de baixa densidade, muitas vezes com afloramento do nível freático (banhados).

A carta de declividades gerada a partir do mesmo modelo numérico (figura 9), um dos parâmetros utilizados na avaliação do potencial hidrogeológico, apresenta no compartimento relacionado aos terrenos graníticos uma declividade que varia de 2 % até 44 %, predominando declividades em torno de 12 %. As maiores declividades estão nas encostas dos morros graníticos, principalmente do feldspato-alcalino-granito. Nas zonas correspondentes os depósitos quaternários da Planície Costeira oscilam de 0 a 2%.

MANTO DE ALTERAÇÃO

Em climas úmidos as condições de intemperismo químico facilitam a formação de mantos de alteração sobre as rochas graníticas.

As rochas com composição mais ricas em minerais ferromagnesianos (menos diferenciadas) apresentam uma capa de alteração mais espessa constituída por materiais de cores vermelho a amarelo, textura média argilosa a cascalhenta. Próximo à rocha sã (horizonte C) as rochas graníticas e ortognáissicas exibem diversos estágios de alteração, sendo que nas porções inferiores menos intemperizadas, é possível notar a presença de minerais primários como o quartzo, dispersos na massa ou como veios, bem como feldspatos semi-alterados. Micas, biotita e muscovita parcialmente alteradas, têm presença muito comum.

Nas rochas granitóides mais diferenciadas como os biotita-sienogranitos e feldspato-alcalino granitos o manto de alteração desenvolve-se com menor magnitude,

onde podem ocorrer matacões e blocos de rochas alteradas. Possuem uma textura média cascalhenta, com cores em tons de vermelho e ou amarelado. A transição para o horizonte C é abrupta e irregular. Este horizonte apresenta-se por vezes mosqueado com tons amarelo-róseos e avermelhados de textura arenosa e com características estruturais ligadas à rocha mãe. A presença de linhas de seixos de quartzo leitoso é muito comum nestas unidades.

A modelagem da tendência da espessura do manto de alteração na área, baseada na interpolação de dados de sondagens geotécnicas (spt), perfurações para a construção de poços tubulares e dados de campo, forneceu o mapa da figura 10. O resultado obtido representa de maneira muito satisfatória o comportamento do manto de alteração e dos sedimentos quaternários. A tendência geral é de pequenas espessuras nos topos dos morros (no máximo 5 metros) aumentando nas encostas representando os espessos depósitos de tálus. Observa-se também no setor sul e no setor norte da área grandes espessuras (mais de 40 metros) correspondendo aos sedimentos inconsolidados do cenozóico.

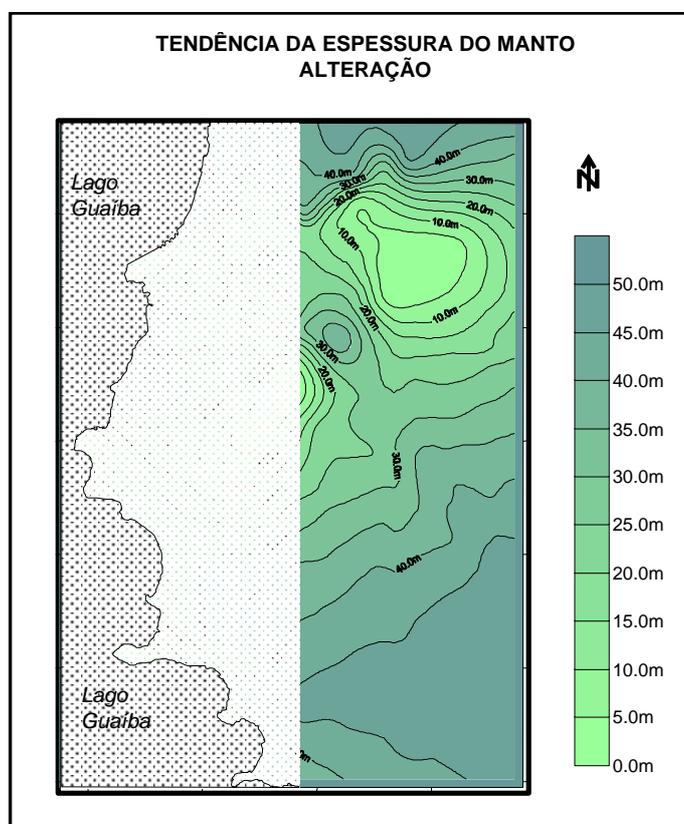


Figura 10. Mapa de tendência da espessura do manto de alteração e depósitos inconsolidados.

SISTEMA Aqüífero FRATURADO NA ÁREA

O sistema aqüífero fraturado, caracterizado por rochas cristalinas com presença ou não de manto de alteração, ocorre na maior parte da área (64,68%), constituindo aqüíferos descontínuos associados a zonas fraturadas. Muitas vezes os espessos mantos de alteração, principalmente sobre os granitóides mais antigos e de composição menos diferenciada, ampliam o potencial aqüífero do fraturado. Seus depósitos de encosta e leques aluviais, quando apresentam espessura considerável, constituem aqüíferos intergranulares extensos livres ou confinados de boa potencialidade, com vazão média de $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e capacidade específica média de $0,2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Também possui grande importância hidrogeológica como área de recarga e circulação de água subterrânea. Quando estes depósitos interdigitam-se com depósitos do tipo lagunar e flúvio-lacustre, podem apresentar águas de má qualidade (excesso de cloretos e ferro).

POÇOS TUBULARES

Em relação aos aspectos construtivos dos poços tubulares existentes na área sobre os aqüíferos fraturados, cabe ressaltar a presença de duas formas básicas de captação; a que utiliza exclusivamente a contribuição de fraturas e a que utiliza, não só as fraturas alimentadoras, como também contribuições do manto de alteração.

O primeiro tipo de captação apresenta poços com revestimento fechado na parte correspondente ao manto de alteração, sendo as entradas d'água restritas às fraturas.

A outra forma de captação dá-se pela construção de poços com filtros, por vezes envoltos por pré-filtros, ao longo do manto de alteração e principalmente no contato deste com a rocha sã. Muitas vezes tais contribuições representam quase que a totalidade das entradas d'água dos poços. Cerca de 60% das entradas d'água registradas ocorrem entre 35 e 80 metros e apenas 10 % ultrapassam a profundidade de 90 metros.

Os dados de poços indicam uma profundidade média de 95,70 metros, predominando a profundidade de 87,00 metros. A menor profundidade é de 17,00 metros em um poço que capta água quase que exclusivamente do manto de alteração, enquanto que a maior atinge 300,00 metros. A maioria das entradas d'água ocorrem entre 40 e 90 metros. As vazões encontradas variam de 0 a $25,54 \text{ m}^3/\text{h}$ com média de $5,49 \text{ m}^3/\text{h}$, no entanto, a moda indica a predominância da vazão de $2,2 \text{ m}^3/\text{h}$, confirmando a baixa produtividade deste sistema aqüífero. A frequência dos intervalos de vazão nos poços, mostra que cerca de 52 % dos poços possuem vazões até $4 \text{ m}^3/\text{h}$ (figura 11). A capacidade específica varia de 0 a $3,92 \text{ m}^2/\text{h}$ com média de $0,36 \text{ m}^2/\text{h}$.

POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO- AJUSTE DAS VARIÁVEIS

O potencial hidrogeológico do cristalino na área de Porto Alegre é avaliado através da integração de todos os parâmetros envolvidos no modelo de caracterização do potencial hidrogeológico, através da lógica booleana, adotando operadores de soma ponderada dos planos de informação: uso do solo (USO), unidades litológicas (LIT), índice de fraturamento (IFR), declividade do terreno (DCL) e espessura do manto de alteração (ALT). Os pesos envolvidos, bem como a importância de cada parâmetro, foram cuidadosamente estudados e determinados a partir da experiência e conhecimento do autor na área.

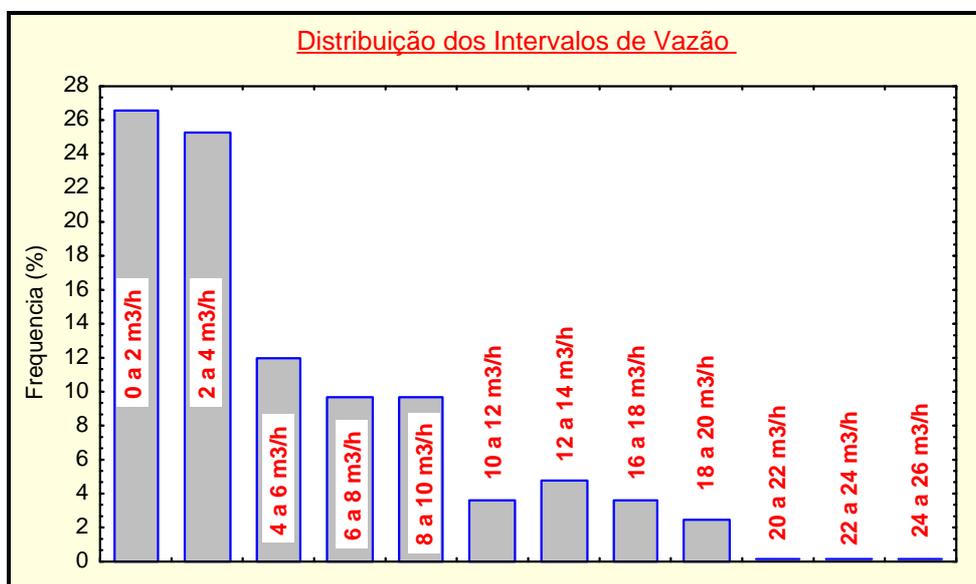


Figura 11. Frequência dos intervalos de vazão para os poços do sistema aquífero fraturado na área de estudo.

O primeiro passo foi a normalização das variáveis quantitativas para valores compreendidos entre 0 e 100, com a finalidade de permitir a comparação e a integração dos parâmetros envolvidos. As variáveis qualitativas (classes litológicas e de uso do solo) foram classificadas segundo a sua influência no potencial hidrogeológico, em notas de 0 a 100.

As cinco classes de uso do solo (tabela 1) podem exercer influência no comportamento hidrogeológico, principalmente no tocante às condições de recarga (permeabilidade da superfície). A classe área urbana apresenta relação desfavorável pois as construções e pavimentações impermeabilizam o solo, dificultando a recarga. As áreas onde ocorrem solo exposto podem apresentar diminuição na permeabilidade do terreno.

Já as classes campo e mata nativa são benéficas à ocorrência de água subterrânea pois protegem o solo e retém parte da água da chuva, contribuindo para a infiltração no solo.

CLASSE	RELAÇÃO	NOTA	MOTIVO
área urbana	desfavorável	20	Impermeabilização
solo exposto	pouco favorável	60	Diminuição da permeabilidade
Campo	favorável	80	Protegem o solo
Mata nativa	muito favorável	100	Proteção do solo e retenção de umidade

Tabela 1. Classes de uso do solo e sua influência no comportamento aquífero.

A vocação para ocorrência e armazenamento de água subterrânea nas unidades lito-estratigráficas analisadas é expressa através de uma nota entre 0 e 100 (tabela 2). Tal nota é baseada na idade, nas características mineralógicas e estruturais das unidades, que de algum modo influem no comportamento hidrogeológico. O feldspato-alcalino-granito é a pior unidade granítica para ocorrência de água subterrânea, porque além de mais jovem, sofreu deformação compressiva em zona de cisalhamento, com intensa silicificação e com solos rasos ou inexistentes. As unidades sieno-granito e biotita-sieno-granito, são rochas isotrópicas quartzo-feldspáticas e exibem pequena a média espessura de solo. O biotita-monzo-granito tem uma maior presença de plagioclásio e filossilicatos e nas zonas deformadas, com maior alteração e espessura de solo, portanto, tornando-se mais susceptível à ocorrência de água que as anteriores. O biotita-monzo-granito-porfirítico tem comportamento semelhante a esta última, porém sendo mais antiga, está mais deformada e favorece mais a condição de aquífero. Os ortognaisses têm a melhor chance de ocorrência de água subterrânea, em função da maior idade e deformação, aliada à composição com muito plagioclásio, biotita e outros minerais ferromagnesianos, desenvolvendo solos bem espessos. A unidade referente aos depósitos de encosta e alteritos também são reclassificadas, por se tratarem de litologias muito permeáveis e espessas, que interferem diretamente no comportamento da água subterrânea do meio fraturado, seja na recarga, seja no seu potencial.

Para o índice de fraturamento, que representa a possibilidade de existir descontinuidades no meio rochoso, são considerados favoráveis à ocorrência de água subterrânea valores entre 20 e 100 e desfavorável valores menores que 20.

UNIDADE	RELAÇÃO	NOTA
Feldspato-alcálico-granito	desfavorável	20
Sieno-granito e biotita-sieno-granito	desfavorável	30
Biotita-monzo-granito	pouco favorável	50
biot.-monzo-granito-porfirítico	favorável	65
Ortognaisses	favorável	75
Depósitos de encosta	muito favorável	90

Tabela 2. Unidades litológicas e sua relação com o potencial hidrogeológico.

Da mesma forma, são atribuídas notas às classes de declividade conforme a sua influência no comportamento do aquífero (tabela 3). O critério baseia-se no pressuposto que quanto maior a declividade do terreno, menor o tempo de residência da água da chuva, favorecendo o escoamento superficial.

DECLIVIDADE	RELAÇÃO	NOTA
0 a 2 %	muito favorável	100
2 a 6 %	favorável	80
6 a 12%	medianamente favorável	60
12 a 18 %	pouco favorável	20
acima de 18%	desfavorável	10

Tabela 3. Classes de declividade e relação com o potencial hidrogeológico.

No parâmetro espessura do manto de alteração são considerados favoráveis à potencialidade aquífera valores acima de 30, o que equivale a 15 metros de espessura.

POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO PELA LÓGICA BOOLEANA

O potencial hidrogeológico determinado pela Lógica Booleana é determinado pela soma ponderada parâmetros conforme sua importância em relação ao potencial hidrogeológico. Para a litologia (LIT) foi considerado um peso 8, 7 para a declividade do terreno (DCL), 5 para o uso do solo (USO), 10 para o índice de fraturamento (IFR) e 5 para a espessura do manto de alteração (ALT). Assim obtém-se a seguinte expressão para o potencial hidrogeológico na área:

$$P = \frac{(5 \times \text{USO} + 8 \times \text{LIT} + 10 \times \text{IFR} + 7 \times \text{DCL} + 5 \times \text{ALT})}{35}$$

35

Os pesos utilizados (tabela 4) são baseados na experiência e conhecimento da área, sendo restritos a esta região. Os parâmetros litologia e declividade do terreno possuem grande importância na avaliação do potencial, sendo superado somente pelo índice de fraturamento, que é fator essencial para o desenvolvimento de um aquífero de meio fraturado. A espessura do manto de alteração e o uso do solo contribuem de forma mediana.

PARÂMETRO	PESO
Índice de fraturamento (IFR)	10
Litologia (LIT)	8
Declividade (DCL)	7
Uso do solo (USO)	5
Manto de alteração (ALT)	5

Tabela 4. Peso de cada parâmetro para lógica binária-soma-ponderada.

O modelo booleano resultou em um mapa (figura 12) com classes de potencial relativo variando de 0 a 5. As melhores áreas (potencial muito alto) estão em zonas fraturadas desenvolvidas sobre a maioria dos granitóides, com exceção do k-feldspato-alcalino-granito, abrangendo 62,89 km² equivalendo a 20,49 % da área do sistema aquífero fraturado. As áreas indicativas de alto potencial estão ligadas a zonas fraturadas em sienogranitos com cobertura de mantos de alteração moderados e em declividades modestas; ocupam uma superfície de 60,38 km² (19,67%). O potencial médio é predominante, abrange 123,3 km² (40,18 %) e está relacionado principalmente aos biotita-monzogranito-porfiríticos. O feldspato-alcalino-granito apresenta um potencial muito baixo a nulo, principalmente ao longo dos morros mais altos, localizados nas porções sudoeste e centro nordeste da área, respectivamente.

VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

O mapa de potencial hidrogeológico obtido através da lógica binária foi comparado com os dados de produtividade dos poços tubulares construídos na área de estudo. O ideal para testar os modelos seria utilizar os dados de capacidade específica, porém a maioria dos poços não dispõe de registro de níveis estático e dinâmico. Assim optou-se

pela plotagem dos dos poços e seus valores de vazão sobre cada mapa de potencial, com a finalidade de verificar a relação entre a produtividade dos poços e os diferentes potenciais hidrogeológicos mapeados. A partir de então foi elaborada uma análise da tendência da distribuição dos pontos em um gráfico onde foram confrontados o valor do pixel (potencial hidrogeológico mapeado) e a vazão do poço., com o intuito de verificar se há uma relação crescente entre as áreas de potencial e a vazão dos poços. Em uma fase anterior os perfis e dados dos poços foram analisados individualmente, e aqueles que apresentaram problemas construtivos como desmoronamentos, má captação, colmatção, etc, foram descartados para não tornar a análise tendenciosa ou incoerente.

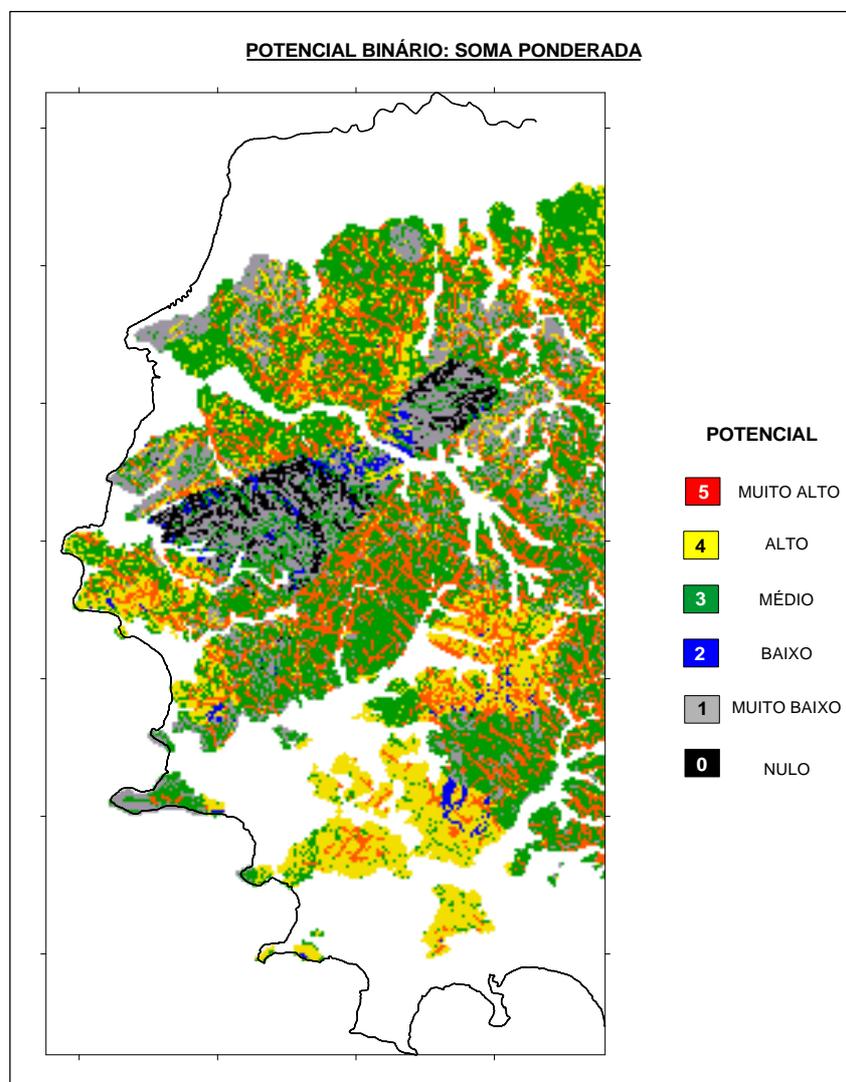


Figura 12. Mapa booleano do potencial hidrogeológico do cristalino, obtido através de operação de soma ponderada dos planos de informação.

A análise dos dados de poços tubulares mostra uma relação de crescimento da vazão com aumento das classes de potencial hidrogeológico (figura 13). No entanto, verifica-se que 10 poços com vazões inferiores a 4 m³/h estão relacionados a áreas de potencial maior ou igual a 3. Tal fato pode estar ligado a problemas construtivos dos poços ou a incapacidade do modelo representar perfeitamente a heterogeneidade peculiar dos aquíferos de meio fraturado. Apesar disto considera-se satisfatória a relação, principalmente se for levado em conta que poços com vazão superior a 2 m³/h podem ser considerados produtivos em terrenos cristalinos.

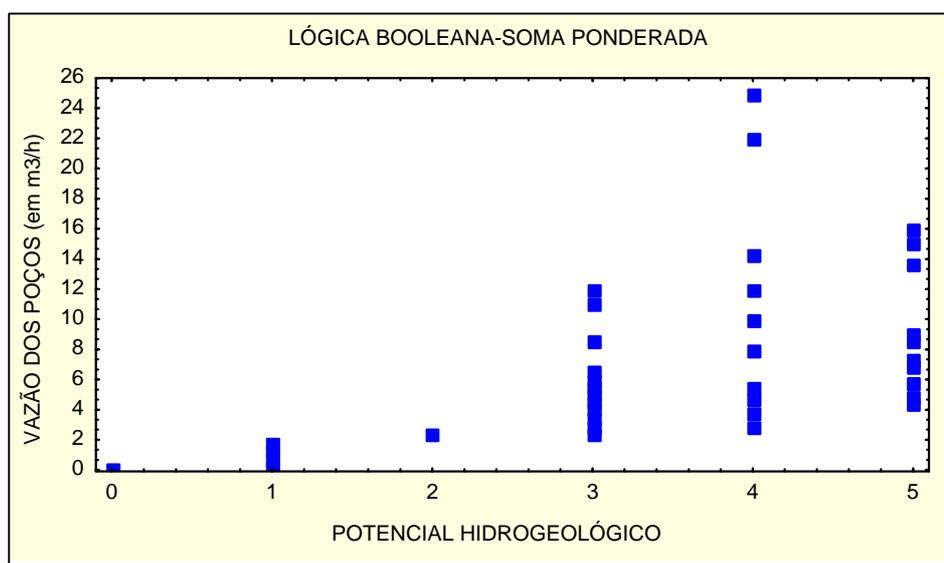


Figura 13. Relação entre o potencial obtido por lógica booleana-soma-ponderada e a vazão dos poços.

CONCLUSÕES

A proposição metodológica de integração de dados de sensoriamento remoto, dados geológicos, geo-estruturais, ambientais e hidrogeológicos, através de geoprocessamento, demonstrou ser bastante útil na separação de áreas potencialmente favoráveis à ocorrência de água subterrânea em terrenos cristalinos. Trata-se de uma abordagem que serve de suporte para estudos localizados de maior detalhe para locação de poços, tornando a pesquisa direcionada o que proporciona uma economia de tempo e de recursos.

As relações entre os diversos tipos litológicos, estruturais e geomorfológicos ficaram evidentes no zoneamento hidrogeológico da região, por exemplo os morros mais altos relacionados ao feldspato alcalino granito mostraram baixo potencial no mapas obtido.

A criação de um índice de fraturamento baseado na integração da frequência, comprimento e intersecção de lineamentos morfo-estruturais extraídos de diversas fontes e escalas, vem a contribuir na análise de lineamentos para estudos hidrogeológicos.

O mapa obtido pela lógica booleana apresentou áreas de potencial para a ocorrência de água subterrânea bem definidas, condizentes com a anisotropia peculiar do meio fraturado. A ponderação e o fornecimento de notas para cada variável baseadas no conhecimento da região, são fundamentais. Na análise é necessário a discussão de especialistas na hora de fornecer pesos e notas aos diversos parâmetros envolvidos.

Esta metodologia apresenta uma performance superior àquelas em que os mapas são gerados de modo tradicional; com uma grande vantagem que é a integração de diversos planos de informações, que de uma maneira ou outra influem no comportamento da água subterrânea, obedecendo a uma lógica definida.

Os dados de produtividade de poços, quando plotados sobre o mapa de potencial hidrogeológico, mostram uma razoável relação com as classes mapeadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FREITAS, M. A. *Avaliação do potencial hidrogeológico de terrenos cristalinos através de técnicas de geoprocessamento*. Porto Alegre: CEPSRM-UFRGS-Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto. 1998. Diss. Mestrado 130 p.
- HAUSMAN, A. Behaviour of the cristaline as an aquifer in greates Porto Alegre. In: International Association of Hydrogelogist, *Memoires*. Porto Alegre-RS 1975. Vol XI p. 45-52.
- PHILIPP, R. P. et al. Geologia das rochas granitóides da região de Porto Alegre-RS. In 38º Congresso Brasileiro de Geologia. Baln. Camboriú-SC. 1994. *Boletim Resumos Expandidos*. p. 98-99.
- RAMGRAB, G. E.; WILDNER, W. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil*. Porto Alegre. Folha SH.22-Y-B. Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1997.
- SCHNEIDER, A. W.; LOSS, E. L.; PINTO, J. F. Mapa geológico da folha de Porto Alegre. UFRGS. Instituto de . Geociências. Porto Alegre, 1974.
- SCHUCK, M. T. O; LISBOA, N.A.; EICK, N.C. Análise e interpretação lito-estrutural de imagens. Uma aplicação do conceito “multi”na faixa metamórfica ao sul de Santana da Boa Vista-RS. In: Simpósio Latino Americano de Sensoriamento Remoto. *Anais*. Gramado-RS. 1986. P.447-452.