



## Aplicação do Interpolador IDW para Elaboração de Mapas Hidrogeológicos Paramétricos na Região da Serra Gaúcha

Manuela Gasparetto Gomes<sup>1</sup>, Tiago De Vargas<sup>2</sup>,  
Rossano Belladonna<sup>3</sup>, Marcio Vicente Duarte Adami<sup>4</sup>

<sup>1</sup> SAMAE (mgomes@samaecaxias.com.br), <sup>2</sup> SAMAE (tvargas@samaecaxias.com.br),  
<sup>3</sup> SAMAE (rbelladonna@samaecaxias.com.br), <sup>4</sup> SAMAE (mvadami@samaecaxias.com.br)

### Resumo

As águas subterrâneas são objeto de estudo em todo o mundo por representarem grandes reservas de água potável. Este estudo foi realizado para fomentar a investigação da hidrologia subterrânea na região da cidade de Caxias do Sul e possui como objetivo aplicar um interpolador geoespacial aos parâmetros hidráulicos de nível estático, nível dinâmico e vazão para reconhecer algumas condições de contorno do aquífero e setores de maior exploração. O tratamento de dados foi desenvolvido no software ArcGIS 10.4.1, aplicando o interpolador *Inverse Distance Weighted* (IDW) e o método de *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) para verificar a eficiência do interpolador aplicado. O mapa de vazões mostrou uma distribuição anisotrópica e algumas regiões mais favoráveis a exploração. Já os mapas de superfície potenciométrica e nível dinâmico demonstraram a existência de diferentes sentidos de fluxo da água subterrânea na região. A avaliação de eficiência do interpolador, em ambos os mapas, apresentou índices aceitáveis a ótimos, confirmando um bom desempenho do método IDW. Portanto, o método NSE mostrou ser coerente para validar interpolações, enquanto a metodologia IDW demonstrou boa competência na modelagem dos parâmetros hidráulicos hidrogeológicos e que, aliado a uma base SIG, pode ser uma poderosa ferramenta para gestão da hidrologia subterrânea.

Palavras-chave: IDW. NSE. Hidrogeologia.

Área Temática: Recursos Hídricos.

## Hydrogeological Parametric Maps in the Serra Gaúcha Region With the Use of IDW Technique

### Abstract

*For being a major reserve of drinkable water, groundwater is being studied across the Planet. This study was carried out to instigate further groundwater hydrology investigation in the surrounding region of Caxias do Sul. Its objective is to use a geospatial interpolation technique over the static, dynamic and discharge parameters so to make acquainted to some aquifer boundary conditions and areas of higher exploitation possibilities. The data was analyzed with the help of ArcGIS 10.4.1, applying the Inverse Distance Weighted (IDW) technique and the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) method in order to verify the efficiency of the IDW. The discharge map showed an anisotropic distribution and some favorable exploitation regions. The potentiometric surface and dynamic level maps indicated different groundwater flow directions. The efficiency of the interpolation technique presented acceptable to excellent index in both maps. Therefore, the NSE method was considered adequate to validate the interpolation and the IDW technique was judged competent to represent the hydrogeological and hydraulics parameters. Allied to a Geographic Information System (GIS) the IDW technique can be a powerful tool for groundwater management.*

*Key words: IDW. NSE. Hydrogeology.*

*Theme Area: Water Resources.*



## 1 Introdução

As águas subterrâneas estão sendo estudadas, ao longo dos séculos, por diversos pesquisadores de diferentes regiões do globo terrestre. Isso decorre pela relevância de conhecer e compreender o comportamento dos diversos sistemas aquíferos e a disponibilidade hídrica dos mesmos. O interesse pela hidrologia subterrânea iniciou na primeira metade do século XIX, com destaque para Henry Darcy, passando pelo conhecimento hidrodinâmico dos sistemas de fluxo até a previsão de comportamento dos aquíferos, através do campo da hidrogeologia física (FILHO, 2008).

O manancial subterrâneo é importante para o consumo doméstico no meio urbano, em indústrias e condomínios, por fornecer água mais barata e as obras não serem tão fotogênicas quanto as barragens construídas para as águas superficiais (REBOUÇAS, 2008). Na época atual, já é consenso a necessidade de gestão do uso e proteção das reservas de água subterrânea no tocante da quantidade e qualidade (REBOUÇAS, 2006). O município de Caxias do Sul - RS, área de estudo deste artigo, possui um cadastro municipal de poços tubulares profundos, regado pela Lei Municipal Nº 8.558/2002 e Decreto Municipal Nº 11.334/2003. As informações deste cadastrado estão armazenadas no banco de dados geoespacial do Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE) e são utilizadas na gestão hídrica subterrânea do município.

O planejamento e a gestão eficiente das águas subterrâneas dependem do grau de ciência obtida sobre o aquífero explotável, que poderá ser enriquecida através das redes de monitoramento. A potencialidade do aquífero pode ser estimada aplicando métodos geostatísticos, tais como, a interpolação geoespacial. Os interpoladores são ferramentas matemáticas que atribuem valores relativos a alguma variável, para pontos inseridos em um campo de valores, transformando dados discretos em contínuos (CASTRO et al., 2010). A qualidade de uma interpolação varia, dependendo diretamente do conhecimento dos pontos amostrados e modelo de interpolação utilizado (ARANOFF, 1989 *apud* CASTRO et al., 2010).

O município de Caxias do Sul utilizada, em maior parte, o recurso hídrico superficial para garantir o abastecimento público de água potável. No entanto, as águas subterrâneas são explotadas por empresas do setor industrial, na área urbana, e para o abastecimento das comunidades rurais, no uso agrícola e doméstico. Diante deste cenário, torna-se pertinente o avanço do conhecimento sobre a hidrologia subterrânea inerente a região da cidade de Caxias do Sul. O objetivo deste estudo é aplicar o interpolador geoespacial *Inverse Distance Weighted* (IDW) aos parâmetros hidráulicos de nível estático, nível dinâmico e vazão estabilizada para reconhecer algumas condições de contorno do aquífero e setores de maior explotação, gerando mapas hidrogeológicos paramétricos representativos.

## 2 Localização da Área de Estudo e o Contexto Hidrogeológico

O estudo foi desenvolvido no município de Caxias do Sul - RS, que possui uma população de 435.482 habitantes, sendo 419.321 urbana e 16.161 rural (IBGE, 2010). O posicionamento geográfico da cidade está entre as coordenadas geográficas longitude  $51^{\circ}18'00''W - 50^{\circ}42'00''W$  e latitude  $29^{\circ}20'00''S - 28^{\circ}48'00''S$  (Figura 1).

O Estado do Rio Grande do Sul dispõem de uma geologia diversificada, contemplando Eras geológicas desde o Neo-arqueano ao recente Cenozóico. A área de estudo está inserida na bacia intracratônica da Província Paraná que detém o Grupo São Bento, este composto pelas Formações Guará, Botucatu e Serra Geral, provenientes de ambientes continentais e derrames vulcânicos relacionados à abertura do Atlântico Sul. Na região do Município de Caxias do Sul existe predominância dos afloramentos de derrames do tipo ácido da Formação Serra Geral, enquanto que de forma subordinada observam-se exposições de derrames básicos e a Formação Botucatu (VARGAS, 2013). Segundo Bressani et al. (2004), os derrames ácidos observados no município são rochas dacíticas classificadas da base para o topo da sequência nas seguintes



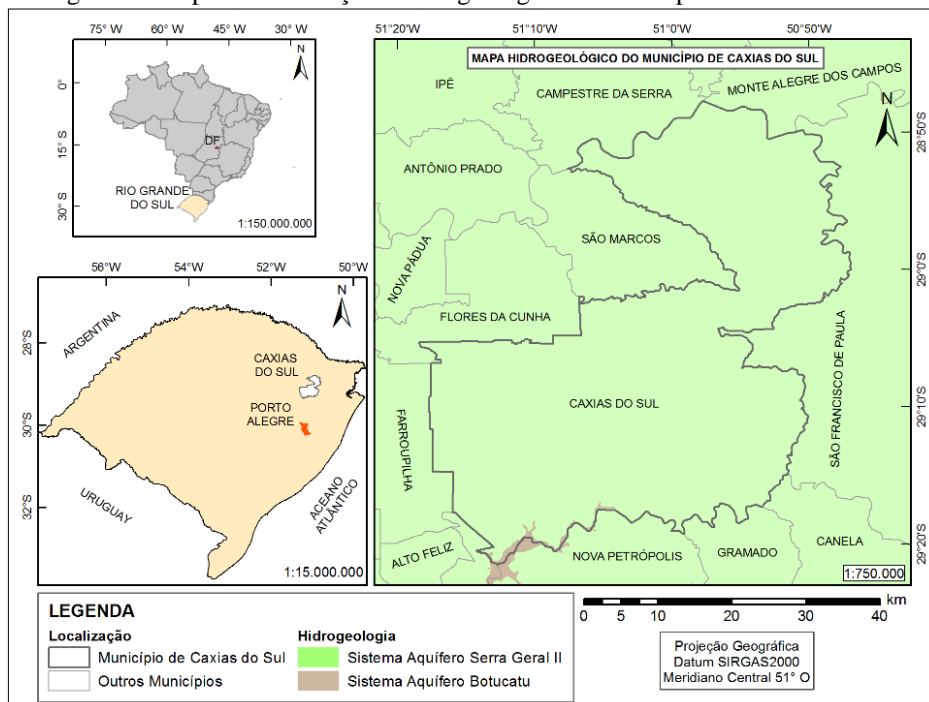
unidades: Dacito Galópolis, Dacito Canyon, Dacito Carijó e Dacito Ana Rech.

No contexto regional, a área de estudo localiza-se na divisão hidrogeológica denominada Bacia do Paraná, cujos principais sistemas aquíferos estão dispostos na Formação Pirambóia, Formação Botucatu e Formação Serra Geral, onde o volume de água é estimado em 50.000 km<sup>3</sup> (REBOUÇAS, 1988). A Formação Serra Geral é caracterizada pela presença de aquíferos fraturados, cuja circulação da água ocorre em estruturas tectônicas (fraturas e zonas de fraturas), que podem apresentar ou não influência das estruturas primárias. Segundo Reginato (2003), a variabilidade dessa circulação está condicionada pela existência de estruturas, preenchimento das fraturas, largura, extensão, cruzamento e conexão dos lineamentos, envergadura da zona fraturada e grau de dissecação do relevo. Esse aquífero pode ser considerado confinado ou semi-confinado e apresenta forte anisotropia, sendo observadas grandes variações no volume das vazões e baixa capacidade específica. Na maioria das vazões analisadas (72,1%), por Reginato (2003), os valores estão abaixo de 10 m<sup>3</sup>/h, enquanto que 18,6% estão entre 10 e 20 m<sup>3</sup>/h e somente 9,3% apresentaram valores acima de 20 m<sup>3</sup>/h. Além disso, este autor observou que 66,4% do poços tubulares possuem nível estático até 10 metros de profundidade, enquanto que 16,4% apresentam profundidades entre 10 e 20 metros.

Em termos da caracterização hidrogeológica da área de interesse, o Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul define o aquífero ocorrente na porção nordeste do Planalto como Sistema Aquífero Serra Geral II (SASG II), onde predominam rochas vulcânicas de composição ácida a intermediária (MACHADO, 2005), (Figura 1). Ainda, pode-se destacar que o controle da circulação de água subterrânea no SASG II, pelos sistemas de fraturas, permite a interconexão deste com o Sistema Aquífero Guarani (SAG), que está sotoposto aos derrames vulcânicos pertencentes à Bacia do Paraná (MACHADO, 2005).

A cidade de Caxias do Sul está inserida na Região Hidrográfica do Guaíba, notadamente nas Bacias Hidrográficas Taquari-Antas (G040) e Caí (G030). Estas bacias abrangem parte das unidades geomorfológicas Planalto dos Campos Gerais e Serra Geral. A hidrografia de ambas as bacias acompanham o declínio geral do relevo S – SW e o interflúvio entre elas perpassa a área central urbana do Município de Caxias do Sul.

Figura 1 - Mapa de localização e hidrogeológico do município de Caxias do Sul.





### 3 Material e Métodos

As informações de nível estático, nível dinâmico e vazão estabilizada são provenientes do cadastro municipal de poços tubulares profundos e do banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS-CPRM). Os valores dos níveis estáticos selecionados foram subtraídos da cota altimétrica da boca do poço tubular, desta forma estabelecendo as cotas potenciométricas correspondentes. O tratamento de dados foi desenvolvido no *software* ArcGIS 10.4.1, que possui ferramentas geoestatísticas com o interpolador escolhido para este estudo, *Inverse Distance Weighted* (IDW).

#### 3.1 Interpolador *Inverse Distance Weighted* (IDW)

O método *Inverse Distance Weighted* (IDW) prediz um valor para algum local não medido utilizando-se os valores amostrados à sua volta, que terão um maior peso do que os valores mais distantes, ou seja, cada ponto possui uma influência no novo ponto, que diminui na medida em que a distância aumenta (JAKOB & YOUNG, 2006). Desta forma, a influência de cada ponto é proporcional ao inverso da distância do nó da malha.

O sistema IDW pode ser caracterizado como um interpolador tanto suavizante quanto exato, do tipo global, razoavelmente fiel aos dados amostrados, com rápida velocidade de processamento e que não estima valores do ponto vizinho amostrado maiores ou menores que os quantitativos máximos e mínimos dos dados informados (LANDIM, 2000).

Para aplicação do método IDW, alguns parâmetros de interpolação devem ser inseridos. Os números mínimos e máximos de vizinhos na interpolação determinam, respectivamente, a quantidade mínima e máxima de pontos que influenciam na estimativa dos valores. Foi definido um intervalo de no mínimo 5 vizinhos e no máximo 10 vizinhos. O valor do expoente permite controlar o significado dos pontos conhecidos nos valores interpolados com base na distância do ponto de saída. Foi definido o valor 2, indicado por Landim (2000) como o padrão. O estimador IDW é dado pela Equação 1.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (1)$$

Sendo:

Z: valor interpolado para o nó do reticulado,  $Z_i$ : valor do ponto amostrado vizinho ao nó,  $h_{ij}$ : distância entre o nó da grade e  $Z_i$ ,  $\beta$ : expoente de ponderação, n: número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó.

#### 3.2 Avaliação de *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE)

O método de Nash-Sutcliffe promove uma estimativa de eficiência do interpolador aplicado. Segundo Moriasi et al. (2007), este método relaciona a diferença entre os valores estimados com os valores observados (Equação 2). Com a utilização do método IDW, aplicou-se a Validação Cruzada “*Leave-One-Out*”, momento em que um valor observado é removido da modelagem obtendo-se, para o ponto observado, um valor estimado proveniente da própria interpolação. Este processo é repetido para cada valor observado.

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O-E)^2}{\sum_{i=1}^n (O-M_{obs})^2} \right] \quad (2)$$

Sendo:

O: valor observado, E: valor estimado,  $M_{obs}$ : média aritmética dos valores observados.



O valor de NSE possui variação compreendida entre  $-\infty$  e 1, sendo que valores entre 0 e 1 são estimativas de desempenho aceitáveis, enquanto valores menores que 0 representam um desempenho inaceitável (MORIASI et al., 2007).

#### 4 Resultados e Discussões

Na realização deste estudo foi utilizado um grupo amostral de 885 poços tubulares, onde aplicou-se uma triagem nas informações obtidas. A malha amostral analisada possui maior densidade de dados nos quadrantes 3 e 4 da região estudada (Figura 2). Para a interpolação dos valores de vazão selecionaram-se 654 poços, enquanto que para os níveis estáticos e dinâmicos foram analisados 885 e 660, respectivamente. Os quantitativos de vazão demonstraram 71% abaixo de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , 18% entre 10 e  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  e 11 % superior a  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ . Os níveis estáticos analisados mostraram profundidades de 0 à 10 metros para 36% dos poços observados, enquanto que 25% demonstraram intervalo entre 10 e 20 metros, e por fim, 39% apresentaram profundidades maiores de 20 metros. A análise das vazões revelou grande similaridade com os valores observados por Reginato (2003), no entanto os níveis estáticos são bastante diferenciados.

O mapa de vazões apresenta uma distribuição dispersa, porém com tendência de aumento da disponibilidade de exploração no setor noroeste da região (Figura 3). Essa grande variação no volume das vazões e representativa anisotropia corroboram com os valores observados na região da Serra Gaúcha (REGINATO, 2003). O gráfico dos quantitativos amostrais analisados (Figura 3) indica fraca correlação entre os dados medidos e os estimados, denotando a complexidade do comportamento da hidrologia subterrânea do SASG II. A eficiência do interpolador IDW para o mapa de vazões indicou o valor de NSE de 0,5382, demonstrando um desempenho aceitável.

Figura 2 - Localização dos poços tubulares.

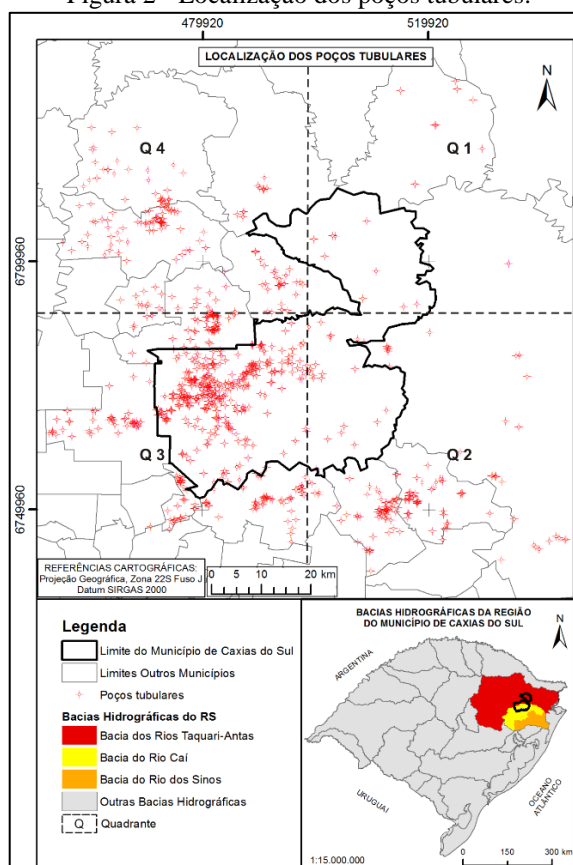
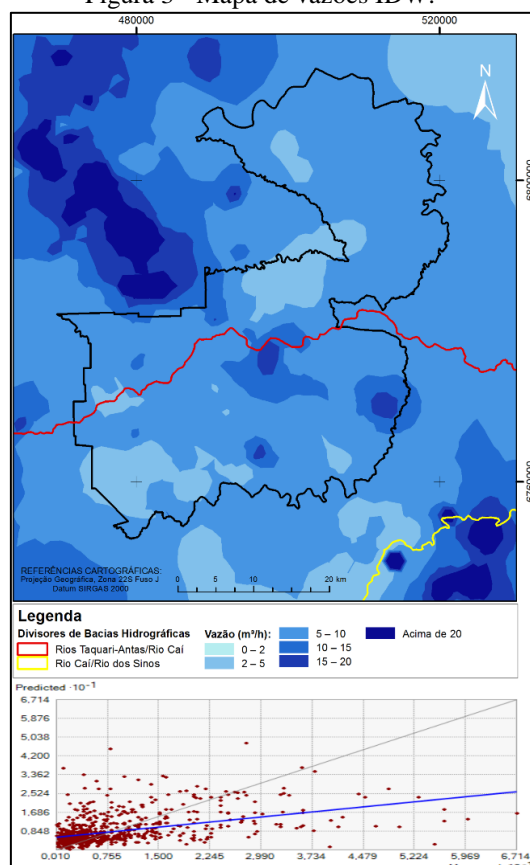


Figura 3 - Mapa de vazões IDW.





O mapa de superfície potenciométrica demonstra valores mais elevados na área Leste e Nordeste, enquanto que as cotas menores estão no setor Sudoeste e Oeste. Este comportamento indica sentidos de fluxo da água subterrânea para Sul – Sudoeste e Oeste, marcados por um divisor que coincide com o interflúvio das bacias hidrográficas Taquari-Antas e Caí (Figura 4). Portanto, o fluxo hidrogeológico na região de Caxias do Sul pode estar influenciado pelo controle geomorfológico, tendo em vista que o declínio geral do relevo está para Sul – Sudoeste. Os quantitativos analisados demonstraram uma boa correlação entre os valores medidos e os estimados, conforme gráfico da figura 4. A interpolação do nível dinâmico apresentou comportamento similar a superfície potenciométrica (Figura 5). A verificação de eficiência do interpolador IDW mostrou o valor de NSE de 0,9999 para o mapa de superfície potenciométrica e 0,9893 para a interpolação do nível dinâmico. Estes valores indicam que os mapas potenciométrico e de nível dinâmico possuem uma ótima eficiência de interpolação.

Figura 4 - Mapa potenciométrico IDW.

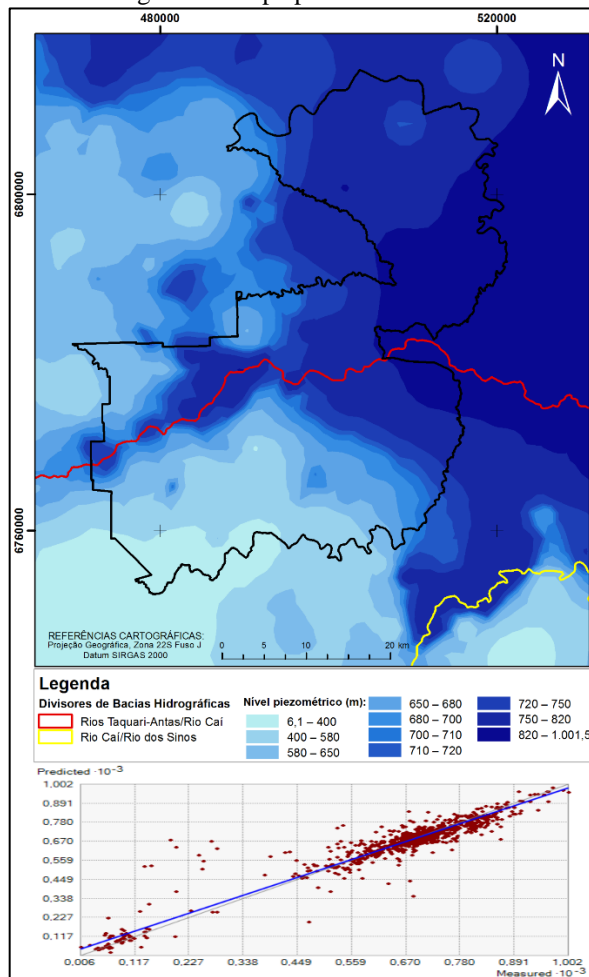
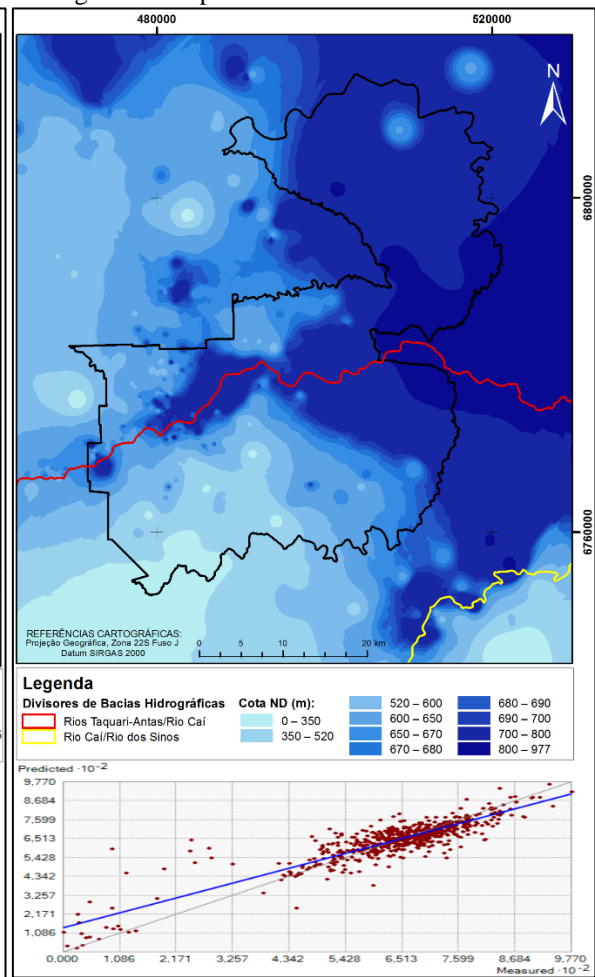


Figura 5 - Mapa de nível dinâmico IDW.



## 5 Conclusões e Recomendações

O método IDW demonstrou boa competência na modelagem dos parâmetros hidráulicos hidrogeológicos e indicou que quanto maior a malha amostral, mais preciso será o resultado estimado. Através da interpolação foi possível observar diferentes direções de fluxo subterrâneo, que são marcadas pelo interflúvio das bacias hidrográficas Taquari-Antas e Caí. Além disso, observou-se maior capacidade de exploração no setor noroeste da área de estudo.

A avaliação de *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) mostrou ser um método coerente para validar a interpolação realizada, apresentando valores mais próximos de 1 para os dados



interpolados que retrataram gráficos de valores medidos e previstos congruentes. Isto foi observado nas interpolações de superfície potenciométrica e nível dinâmico, que demonstraram ótimo índice de NSE e concordância entre os valores medidos e os valores estimados no método IDW, enquanto que na interpolação de vazões foi observado um menor índice de NSE e menor concordância dos valores medidos e estimados no IDW. A menor eficiência e concordância na interpolação das vazões é reflexo da heterogeneidade do sistema hidrogeológico da região SASG II. A aplicação do método IDW, em base SIG, demonstrou ser uma poderosa ferramenta para gestão da hidrologia subterrânea.

O aprimoramento futuro deste estudo, poderá ser desenvolvido através de trabalhos que acrescentem os parâmetros hidrogeológicos de entradas da água e transmissividade. Além disso, poderão ser aplicados diferentes métodos geoestatísticos de interpolação e de avaliação do desempenho destes interpoladores, efetuando um comparativo entre os mesmos.

## Referências

BRESSANI, L.A.; FLORES, J.A.A.; NUNES, L.F. Desenvolvimento de estudos de engenharia geotécnica/geologia com vistas à geração de relatório e mapa geotécnico dos solos e rochas superficiais da área urbana da cidade de Caxias do Sul. Contrato de assessoria técnica especializada UFRGS-PMCS. **Contrato nº 2615.000386-97/2004**. Ministério das Cidades/Caixa. Programa de desenvolvimento institucional, 2004, 48 p.

CASTRO, F.S. et al. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 8, p. 871-880, 2010.

FILHO, J.M. Evolução histórica do conhecimento. **IN: FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro, CPRM:LABHID, 2008. 812p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Rio de Janeiro. **Censo demográfico de 2010**. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/cidadesat/xtras/perfil.php?lang=&codmun=430510&search=rio-grande-do-sul|caxias-do-sul>. Acesso: 26 de dezembro de 2017.

JAKOB, A.A.E.; YOUNG, A.F. O uso do método de interpolação espacial das análises sociodemográficas. **IN: Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, Caxambu-MG: ABEP, 2006, p. 1-22.**

LANDIM, P.M.B. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, **Texto Didático 02**, 20p, 2000. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>

MACHADO, J.L.F.; FREITAS, M.A. Projeto mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul: **Relatório Final**. Porto Alegre: CPRM, 2005.

MORIASI, D.N. et al.. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**. v.50. n.3. p.885-900, 2007.

REBOUÇAS, A.C. Groundwater in Brazil. **Episodes**, v.11, nº.3, p.209-214, 1998.



REBOUÇAS, A.C. Águas subterrâneas. **IN:** GIAMPÁ, C.E.Q.; GONÇALES, V.G. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. São Paulo, 2006. 502 p.

REBOUÇAS, A.C. A importância da água subterrânea. **IN:** FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro, CPRM:LABHID, 2008. 812p.

REGINATO, P.A.R. **Integração de Dados para Prospecção de Aquíferos Fraturados em Trecho da Bacia Hidrográfica Taquari - Antas (RS)**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, UFRGS, 2003, 254 p.

VARGAS, T.; ADAMI, M.V.D.; AVER, E.A.S.; BELLADONA, R.; ZAGO, M.A.; FRIZZO, E.E. Monitoramento hidroquímico dos córregos afluentes da represa Faxinal, Caxias do Sul – RS. **IN:** XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 17 a 22 de novembro de 2013, Bento Gonçalves – RS.