

AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS GEOLÓGICAS NA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE SINTACS EM UMA ÁREA DO AQUÍFERO CARSTE EM ALMIRANTE TAMANDARÉ.

Cristiano Bernardo Milek¹, Regina Tiemy Kishi², Júlio Gomes³

RESUMO. A avaliação da vulnerabilidade dos reservatórios subterrâneos às ações antrópicas auxilia no planejamento territorial e nas tomadas de decisão com finalidade de proteção da qualidade desses mananciais. Dentre os métodos desenvolvidos para avaliação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos, este estudo aborda a aplicação do índice do método SINTACS, composto por sete indicadores, sendo um deles a condutividade hidráulica. Devido as incertezas apresentadas sobre a determinação da condutividade hidráulica, foi realizado uma análise mais apurada dos valores encontrados, variando-se o logaritmo da condutividade em $\pm 10\%$ e verificando este efeito nas classificações dos índices de vulnerabilidade. Como objeto de estudo tomou-se a área delimitada pela Bacia Hidrográfica do Rio Barigüi no Aquífero Carste em Almirante Tamandaré, PR, Brasil. Rio Barigüi no Aquífero Carste em Almirante Tamandaré.

ABSTRACT. The assessment of groundwater reservoirs vulnerability to human actions helps optimizing land use planning and protecting water quality of springs. Between the available methods to asses such vulnerability, we present a study that uses the SINTACS method, composed by seven parameters, among which is hydraulic conductivity. A more detailed analysis of hydraulic conductivity was performed, because of uncertainties related to the practical determination of this parameter. The study varies the value of the logarithm of the conductivity ($\pm 10\%$) and evaluates the impact on the results of the vulnerability index.. The object of study comprised the Karst aquifer area bounded by the Barigui River Basin in Almirante Tamandaré city, Paraná State, Brazil.

Palavras - chave: Aquífero Carste, Vulnerabilidade de aquífero, SINTACS.

-
- (1) Aluno UFPR –Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – Departamento de Hidráulica e Saneamento Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210, 81531-970, Brasil, Curitiba – PR. Telefone: +55 (41)99031084 – e-mail: cristianomilek@msn.com
 - (2) Professor Adjunto UFPR –Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – Departamento de Hidráulica e Saneamento Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210, 81531-970, Brasil, Curitiba – PR. Telefone: +55 (41)33613212– e-mail: rtkishi@gmail.com
 - (3) Professor Adjunto UFPR –Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – Departamento de Hidráulica e Saneamento Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210, 81531-970, Brasil, Curitiba – PR. Telefone: +55 (41)33613212– e-mail: jgomes.dhs@ufpr.br

1 - INTRODUÇÃO

O planejamento territorial pode utilizar-se de ferramentas para gestão, onde o foco está na preservação dos recursos hídricos. Em face da crescente degradação dos corpos hídricos superficiais, as alternativas de abastecimento encontram lugar na exploração dos mananciais subterrâneos.

O aquífero Carste na região metropolitana de Curitiba (RMC) atende a aproximadamente 185 mil pessoas, dentre as quais, 80 mil são do município de Curitiba. Todavia, o aquífero Carste tem um potencial de exploração de até 15,35 m³/s, o que seria suficiente para o abastecimento sustentável de aproximadamente sete milhões de pessoas. A exploração neste nível representaria apenas 30% do potencial total, sendo o restante para a manutenção da vazão ambiental (Rosa Filho *et al.*, 2002).

É cada dia maior a prioridade em manter as fontes de água potável seguras e sustentavelmente limpas, protegendo-as dos efeitos da poluição (Davies e Mazumder, 2003) e a importância da preservação dos sistemas hidrogeológicos toma lugar de destaque no contexto de sustentabilidade urbana. A água subterrânea requer uma política que identifique, documente e reduza riscos na bacia. Esses riscos são definidos como a superposição do perigo de contaminação, representado por potenciais fontes de contaminação, e das características intrínsecas do aquífero (vulnerabilidade), o que resulta no risco do recurso hídrico tornar-se contaminado a um nível inaceitável, sendo a minimização de riscos uma parte imprescindível das políticas para a manutenção dos recursos hídricos subterrâneos.

A vulnerabilidade de um aquífero, ou seja, a sensibilidade à poluição superficial está embasada na ocorrência do processo de atenuação natural da poluição no solo. O grau de atenuação é definido pelas características hidrogeológicas e geológicas intrínsecas de um sistema aquífero e do meio sobrejacente (Doerfliger *et al.*, 1999; Leitão *et al.*, 2003; Sinan e Razack, 2009). Quanto ao perigo de poluição, este é definido como fonte potencial de contaminação, resultado de atividades antrópicas na superfície do solo (Mimi e Assi, 2009). Risco à poluição, portanto, pode ser estimado por uma interação entre a carga de contaminante e a vulnerabilidade à poluição. Com o conhecimento do comportamento da qualidade da água associada aos fatores vulnerabilidade e uso, podem-se gerar cenários de desenvolvimento que direcionam para a proteção do sistema aquífero.

As características intrínsecas de um aquífero e do meio sobrejacente condicionam a susceptibilidade das suas águas à poluição, isto é a sua vulnerabilidade à poluição (Leitão *et al.*, 2003).

O presente trabalho pretende abordar a influência de incertezas geológicas na determinação do índice SINTACS (Civita e De Maio, 2000), método utilizado para a determinação da

vulnerabilidade intrínseca de sistemas aquíferos. Tem-se como objetivo aplicar esta metodologia para a área do Aquífero Carste no Município de Almirante Tamandaré, delimitada pela Bacia Hidrográfica do Rio Barigüi, Paraná, Brasil.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de “carstificação” refere-se à formação de cavidades na rocha matriz que compõem o sistema aquífero. Assim aquíferos cársticos são aqueles que contêm cavidades geradas pela solubilização de rochas carbonáticas, o que permite transporte rápido das águas subterrâneas, muitas vezes em fluxo turbulento e freqüentemente transportando uma carga sedimentar. Na maior parte dos aquíferos, a ordem de grandeza da vazão da água subterrânea apresenta uma grande diferença com os fluxos superficiais. Em aquíferos cársticos, freqüentemente ocorre uma descontinuidade de vazão de tal forma que o sistema de águas subterrâneas em aquíferos desta natureza pode apresentar características de escoamentos superficiais e subterrâneos (Delleur, 1998).

O desenvolvimento dos fenômenos cársticos também é condicionado pelo clima, pois enquanto existir circulação hídrica, que depende diretamente do clima, ocorrerá a dissolução da rocha carbonática (Bonacim, 1996). Os elementos fisioclimáticos influenciam diretamente no funcionamento do sistema hidrogeológico cárstico, controlando a principal entrada no sistema, a precipitação. A parcela de água precipitada que efetivamente se infiltra e se transforma em recarga do aquífero cárstico depende do processo de interceptação vegetal e dos solos, que provocam diferentes índices de infiltração e, conseqüentemente, variações no volume armazenado (Lisboa, 1997).

Em aquíferos de formação cárstica, ocorre, muitas vezes, a presença de canais subterrâneos que aumentam muito a mobilidade do fluxo de água no interior do sistema. Os processos de transporte da água da superfície até o lençol freático sofrem o efeito direto das condições de formação deste trajeto. Aquíferos cársticos são particularmente vulneráveis à contaminação, devido à espessura dos solos, concentração de fluxo no epicarste (região mais exposta do aquífero, muitas vezes fraturado e com pouca proteção) e existência de pontos de recargas diretos através de sumidouros. Os contaminantes podem atingir facilmente as águas subterrâneas, podendo ser transportados rapidamente pela rede de condutos do sistema aquífero, atingindo grandes distâncias (Mimi e Assi, 2009).

Segundo Delleur (1998), o sistema cárstico pode ser dividido em três principais grupos, com características próprias de permeabilidade e escoamento. As principais formas de escoamento ocorrem na matriz porosa granular, fraturas e por meio de condutos. Assim o escoamento no Carste

pode ser descrito por uma mescla de leis que se referem ao escoamento laminar, fluxo fissural e de conduto.

Para a matriz permeável do sistema, onde ocorre o fluxo em regime laminar no meio poroso granular, assume-se que são válidas as Leis de Darcy. Generalizando, a lei de Darcy para fluxos unidimensionais pode ser escrita por (Freeze e Cherry, 1979):

$$v = -k \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1)$$

onde: k = condutividade hidráulica [LT^{-1}];

H = carga hidráulica [L];

x = a distância percorrida pelo fluxo [L];

v = velocidade de Darcy [LT^{-1}].

Para a determinação *in situ* da condutividade hidráulica, pode ser feitos testes de bombeamento em poços. Ao se perfurar os poços, alguns dados são coletados, entre eles os níveis dinâmico e estático, litologia, diâmetro do poço e vazão. Em casos especiais, esses poços continuam sendo monitorados constantemente, onde se observa o nível dinâmico e a vazão que eles fornecem (Maximiano, 2005).

A partir da Equação 1, Tood (1959) descreve a equação do fluxo radial permanente em aquíferos não confinados, utilizada para a estimativa da condutividade hidráulica através de testes de bombeamento .

$$k = \frac{Q \ln\left(\frac{r_0}{r_w}\right)}{\pi (h_0^2 - h_w^2)} \quad (2)$$

onde: h_0 = nível freático [L];

h_w = altura do nível dinâmico do poço até a base do aquífero [L];

r_w = raio do poço [L];

r_0 = raio de influência do poço [L];

Q = vazão [L^3T^{-1}].

Caso se desconheça o valor de r_0 , Tood (1959) propõe usar um valor arbitrário entre 150 m e 300 m, uma vez que a vazão tem pequena variação para uma grande mudança no valor de r_0 .

A rede de condutos em rochas carbonáticas usualmente é constituída de três tipos de estruturas: meios porosos, fissuras e espaços vazios (características do processo de carstificação). Desta forma em sistemas cársticos, a porosidade pode assumir dois ou três valores distintos, devido à peculiaridade do seu sistema de condutos e estruturas.

Existem vários métodos desenvolvidos para avaliar vulnerabilidade de sistemas aquíferos (Masetti, 2009; Mimi e Assi, 2009). Eles podem ser divididos em 3 categorias principais (Masetti, 2009): métodos baseados em processos (simulação matemática); métodos estatísticos e métodos de índices. Métodos baseados em processos são modelos numéricos que simulam o transporte de poluente numa determinada área e, normalmente, requerem grande quantidade de dados. Métodos estatísticos utilizam dados observados e, na opinião de especialistas, também requerem grandes quantidades de dados para uma adequada análise estatística. Para maiores detalhes desta categoria, pode ser consultado Masetti (2009). Os métodos de índices combinam vários atributos físicos, cada qual com pesos de importância na vulnerabilidade do aquífero, de acordo com opinião de especialistas. Assim, os métodos de avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas variam de sofisticados modelos numéricos, simulando os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no subsolo, ao uso de técnicas de ponderação de fatores que afetam a vulnerabilidade e também ao uso de dados estatísticos (Gogu e Dassarguers, 2000).

Na escala de planejamento territorial, Mimi e Assi (2009) propõem que estas estruturas possam ser consideradas relativamente homogêneas, principalmente no que se refere à determinação do coeficiente de condutividade hidráulica do sistema aquífero, obtendo-se resultados compatíveis com o objetivo esperado. Esta hipótese simplificadora deve ser adotada em modelos de vulnerabilidade baseados em índices, uma vez que a determinação diferencial de cada elemento seria de difícil obtenção, não sendo o objetivo a precisão da condutividade nesses modelos.

Dentre os métodos desenvolvidos para avaliação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos, destacam-se os métodos: EPIK (Doerfliger *et al.*, 1999), EPPNA (Portugal, 1998), GOD (Foster (1987) *apud* Foster e Skinner, 1995), AVI (Von Stempvoort *apud* Leitão *et al.*, 1992), PI (Goldsheider *et al.* 2000), DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) e SINTACS (Civita e De Maio, 2000).

Para Auge (2004), a escolha do método para avaliar a vulnerabilidade da água subterrânea de uma região depende de fatores tais como o conhecimento e difusão da metodologia, informações disponíveis e a escala de avaliação. Para tanto, mostram-se práticos os métodos que requerem menos valores paramétricos, como o GOD. Para os estudos de semi-detallhes (escala 1:25.000 a

1:100.00) e de detalhe (maiores de 1:25.000), tem-se melhores definições usando-se métodos com maiores quantidades de parâmetros, como o DRASTIC e o SINTACS.

O método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) foi desenvolvido pela *National Water Well Association*, Worthington, Ohio, como um sistema padronizado para a avaliação do potencial de poluição da água subterrânea. Embora tenha sido desenvolvido para os Estados Unidos, o modelo pode ser adaptado para utilização em aquíferos no Brasil.

O método SINTACS (CIVITA e DE MAIO, 2000) baseia-se no modelo DRASTIC, utilizando também sete parâmetros para a obtenção do índice de vulnerabilidade, sendo definido pela somatória de fatores de significância (P_j) de cada parâmetro j , ponderados por um peso (W_j) associado à significância de cada parâmetro na vulnerabilidade do aquífero:

$$I_{SINTACS} = \sum_{j=1}^7 P_j W_j \quad (3)$$

A relação entre a classe de vulnerabilidade e o índice SINTACS é apresentada na Tabela 1, onde altos valores do índice indicam uma maior vulnerabilidade que os aquíferos estão sujeitos.

Tabela 1 - Classes de vulnerabilidade do índice SINTACS

Índice	Vulnerabilidade
> 210	Muito Alta
186 – 210	Alta
140 – 186	Moderadamente Alta
105 – 140	Média
80 – 105	Baixa
< 80	Muito Baixa

Fonte: Civita e De Maio (2000)

Os pesos (W_j) estão relacionados aos seguintes parâmetros: (1) S – Profundidade do aquífero; (2) I - Recarga, (3) N – Impacto da zona vadosa, (4) T – Tipo de solo, (5) A – Litologia do aquífero, (6) C – Condutividade hidráulica do aquífero e (7) S – Declividade, sendo associado um peso diferenciado a cada um dos parâmetros em função da vulnerabilidade analisada, tal como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Pesos (W_j) em função de parâmetros e vulnerabilidade

Parâmetro	Normal	Rigorouso	Infiltração	Carste	Fissurado	Nitratos
S	5	5	4	2	3	5
I	4	5	4	5	3	5
N	5	4	4	1	3	4
T	3	5	2	3	4	5
A	3	3	5	5	4	2
C	3	2	5	5	5	2
S	3	2	2	5	4	3

Fonte: Civita e De Maio (2000)

3 - ÁREA DE ESTUDO

O aquífero Carste na Região Metropolitana de Curitiba compreende parte dos municípios de Curitiba, Campo Magro, Campo Largo, Almirante Tamandaré, Itaperuçu, Rio Branco do Sul, Colombo e Bocaiúva do Sul. Segundo Lisboa e Bonacim (1995, *apud* COMEC, 2003), a localização do aquífero Carste é definida como: “Ao longo do limite norte da bacia do Iguazu estende-se a faixa de rochas carbonáticas designada por Carste, orientada SW-NE, origem de consideráveis mananciais subterrâneos que alimentam as nascentes de vários afluentes do rio Iguazu e do rio Ribeira”.

A área de interesse deste estudo encontra-se na formação Capiru, distribuindo-se em uma faixa de largura variável, segundo a direção SW-NE ao Norte de Curitiba. A Formação Capiru é composta predominantemente por metadolomitos, filítos e quartzitos, e secundariamente, por filítos grafitosos, metassiltitos e metamargas (Bonacim, 1996). Entrecortando as rochas de Formação Capiru, há rochas juro-cretáceas, intrusivas e posteriores à tectônica pré-cambriana, que se apresentam como diques de diabásio, dolerito, diorito pórfiro e quartzo, na forma de enxame de representantes, cuja largura varia de metros a dezenas ou centenas de metros, gerados no Evento Sul Atlântico e centrado no Domínio do Arco de Ponta Grossa (Fassbinder, 1996, *apud* COMEC, 2003).

O presente estudo limita-se à área da Bacia do Rio Barigüi que abrange o Aquífero Carste no município de Almirante Tamandaré e proximidades, conforme pode ser observado na Figura 1. A escolha desta área deveu-se principalmente à disponibilidade de dados. Esta área de estudo corresponde a um total aproximado de 83 km², dos quais 96% correspondem ao município de Almirante Tamandaré, 3,5% ao município de Colombo e 0,5% ao município de Itaperuçu, aproximadamente.

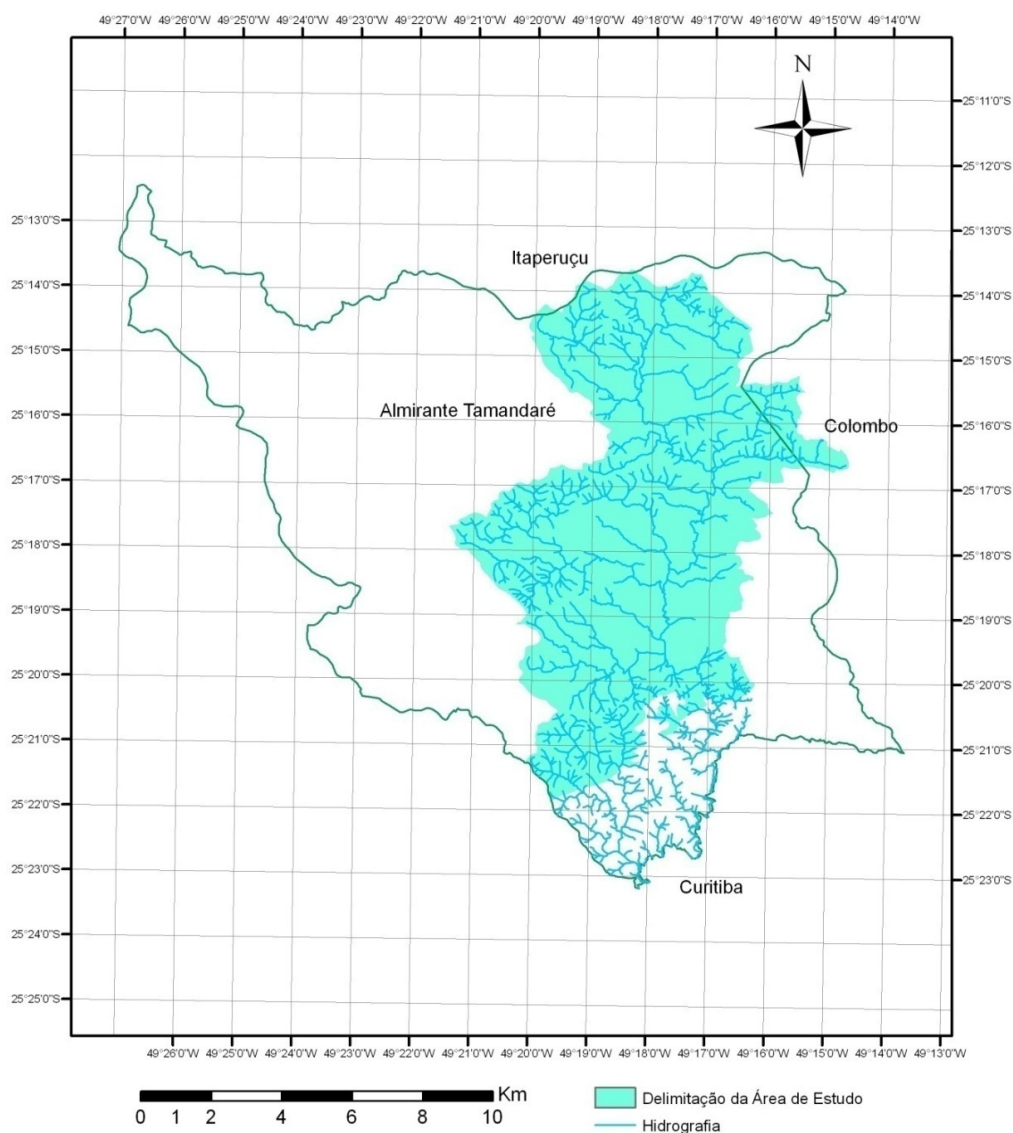


Figura 1 - Localização geográfica da área de estudo

Segundo o Instituto das Águas do Paraná (2010), as águas do aquífero Carste são de ótima qualidade para o consumo humano. As águas são classificadas como bicarbonatadas cálcio-magnesianas, com teor médio de cálcio de 27 mg/L; de magnésio, 14 mg/L; de sódio, 1 mg/L; e de potássio, 1 mg/L. Entre os ânions, o teor médio de bicarbonato é de 181 mg/L, de sulfato, 3,8 mg/L, e de cloreto, 1,7 mg/L. A dureza total varia de 104 mg a 262 mg de CaCO_3/L (águas moderadamente a muito duras). O pH varia 7,1 a 8,6 (média: 8,2). Entretanto, de acordo com dados georreferenciados do Instituto das Águas do Paraná, fornecidos digitalmente para esta pesquisa, foi observada alteração da qualidade da água ao longo do tempo em alguns poços.

No aspecto hidrológico, a área de estudo insere-se na bacia do Rio Barigüi e, segundo os estudos de Fill *et al.* (2005), apresentou pouca variabilidade do ponto de vista do armazenamento ao longo de 15 anos de estudos (1985 - 2000). A precipitação média anual foi de 1492,5 mm, dos quais

758,9 mm produziram vazão superficial, 679,3 mm representaram as perdas por evapotranspiração real e 189,0 mm resultaram em recarga e armazenamento no lençol freático.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

A vulnerabilidade do aquífero, avaliada através dos métodos SINTACS, é determinada por sete parâmetros associados com transporte de contaminantes no meio geológico, sendo eles: Profundidade do aquífero, Recarga, Zona Não Saturada, Tipo de Solo, Litologia do Aquífero, Condutividade Hidráulica do Aquífero e Declividade do terreno. A base das informações utilizadas para a obtenção dos parâmetros está resumida no Quadro 1, com respectiva fonte dos dados.

Quadro 1 - Base de dados para os índices SINTACS

Parâmetro	Base de dados/informação	Fonte
Profundidade do Aquífero	Piezometria de poços de exploração, planos de informações no formato vetor: hidrografia, compartimentação geológica e elevação digital do terreno	Instituto das Águas do Paraná, antiga SUDERHSA.
Recarga	Balanço Hídrico	Fill <i>et al.</i> (2005).
Zona Não Saturada	Mapas geológico e de geotecnia, escala 1:20.000, formato imagem	Instituto das Águas do Paraná.
Tipo de Solo	Mapa de geotecnia, escala 1:20.000, formato imagem	Instituto das Águas do Paraná.
Aquífero	Mapas geológico e de hidrogeologia, escala 1:20.000, formato imagem	Instituto das Águas do Paraná e COMEC.
Condutividade Hidráulica	Dados de poços em exploração, mapa de hidrogeologia e dados estatísticos	Instituto das Águas do Paraná, COMEC e DELLEUR (ano?).
Declividade Topográfica	Plano de informação: Hipsometria, escala 1:20.000, formato vetor.	Instituto das Águas do Paraná.

Todas as informações foram processadas no ambiente ArcGis 9.3 para discretização espacial de cada parâmetro do índice, totalizando sete planos de informação (PI) para o cálculo do índice. Os planos de informação (PI) fornecidos em formato vetor foram convertidos para o formato raster, com pixels de dimensões regulares de 1m. Posteriormente, estes planos foram classificados segundo o método SINTACS.

A seguir são descritos os procedimentos adotados para a obtenção dos planos de informação (PI), que são a base para a aplicação dos métodos de vulnerabilidade. Todos os planos de informação relativos aos sete parâmetros do método SINTACS são representados em cores que vão

do vermelho ao verde, sendo vermelho para a situação mais crítica e verde para a situação mais favorável.

4.1 - Profundidade do aquífero

A profundidade do aquífero foi obtida pela subtração da cota topográfica pela cota piezométrica em cada ponto. A superfície piezométrica foi reconstruída através do nível de corpos hídricos e do nível estático do lençol freático de 17 poços na área de estudo, similarmente a Civita e De Maio (2000) e Cusimano *et al.* (2004), considerando adicionalmente o efeito das condições de contorno impostas pelos diques de diabásio e cristas de filitos e quartzitos, que segundo Bonacim (1996), Lisboa (1997) e COMEC (2003) formam unidades que não se comunicam hidraulicamente.

O processamento no ambiente ArcGis 9.3 ocorreu em duas fases distintas. A primeira fase correspondeu à obtenção da superfície piezométrica, sendo constituída por:

- a) Processamento dos dados hidrológicos:
 - atribuição do valor da cota altimétrica aos corpos de água;
 - $PI-Cota = PI-Hidro \times PI-Topografia$;
 - PI-Hidro é um PI onde os cursos de água possuem valor 1 e os pixels restantes valor zero;
- b) Adição da cota altimétrica dos níveis estáticos dos poços de exploração ao PI-Cota;
- c) Interpolação linear, obtendo a superfície piezométrica para toda a área, gerando um PI da superfície piezométrica.

A segunda fase consistiu na obtenção da profundidade da superfície piezométrica (PI-PROF) como resultado da subtração do PI-topografia pelo PI-Piezometria.

4.2 - Recarga (PI-REC)

Os dados do balanço hídrico da bacia do rio Barigüi foram obtidos através de dados coletados por quinze anos e em diferentes épocas do ano (Fill, *et al.*, 2005). A infiltração foi estimada pela multiplicação da precipitação média por um coeficiente de infiltração para solos argilo-arenosos e argilo-siltosos. Para as áreas sujeitas a alagamentos e corpos hídricos, o valor da infiltração é resultado da precipitação menos a evapotranspiração, multiplicada pelo coeficiente de infiltração. Os valores adotados para precipitação média anual foi de 1492,5 mm e a evapotranspiração de 679,3 mm, segundo estudos de Fill *et al.*(2005) para a área de estudo.

4.3 - Zona não saturada (PI-ZV)

Para a composição do PI referente à atenuação natural da zona vadosa, ou zona não saturada, foram utilizadas as informações dos mapas de geologia da COMEC e geotecnia do Instituto da Águas do Paraná, ambos na escala 1:20.000. (está correto?)

Na área de estudo, foram encontrados cinco ocorrências de materiais na zona não saturada. Para a classificação dos materiais, segundo a designação de cada método, foram utilizadas as informações de suas características, procurando compatibilizar estes dados com a respectiva designação.

4.4 - Tipo de solo (PI-SOLO)

O parâmetro correspondente a atenuação do solo foi obtido através do PI de geotecnia, fornecido pelo Instituto das Águas do Paraná na escala 1:20.000, compatibilizando-se a nomenclatura ao método SINTACS.

4.5 - Aquífero (PI-AQ)

O sistema aquífero correspondente foi obtido do mapa hidrogeológico da área de estudo, em escala 1:20.000, fornecido pela COMEC em formato de imagem. A imagem passou por processo de vetorização e georreferenciamento no ambiente ArcGis 9.3. Posteriormente, efetuou-se a transformação dos polígonos vetoriais para formato raster compatível ao ArcGis .

4.6 - Condutividade hidráulica (PI-CONDU)

A obtenção da condutividade hidráulica em meios heterogêneos é uma tarefa que por si só justificaria uma pesquisa específica. No entanto, para fins de aplicação de índices para gestão, foi adotado um valor único da condutividade nos poços em exploração, observando-se o sistema hidrogeológico, conforme já realizado por outros pesquisadores, como por exemplo, Mimi e Assi, 2009.

Devido a inexistência de dados ou poços em exploração nas áreas com sistemas aquíferos de diques de diabásio ou diorito pórfiro, foram adotados os procedimentos seguidos por Civita e De Maio (2000), onde foram utilizados valores estatísticos mundiais para a estimativa deste parâmetro. Os valores estatísticos mundiais estudados estão apresentados na Tabela 3, apresentados em Delleur (1998).

Nas áreas constituídas por aquíferos granulares ou com fissuras com pouco significado hidrodinâmico, onde são válidas as Leis de Darcy, considerou-se o aquífero como sendo livre e utilizou-se a Equação 2 para a estimativa da condutividade hidráulica. Nas áreas carstificadas, onde as Leis de Darcy não são completamente válidas, adotou-se também a Equação 2 para a obtenção da

condutividade hidráulica, como uma hipótese simplificadora. Embora, conceitualmente este procedimento seja inapropriado, tal hipótese pode ser justificada pelos objetivos desta pesquisa, uma vez que, segundo Mimi e Assi (2009), para a escala de planejamento, a condutividade hidráulica pode ser considerada relativamente homogênea.

Tabela 3 - Valores típicos de condutividade hidráulica

Litologia	Mínimo (cm/s)	Máximo (cm/s)
Cascalho	10^{-2}	10^2
Areia	10^{-4}	1
Silte	10^{-7}	10^{-3}
Argila	10^{-10}	10^{-7}
Basalto Fraturado	10^{-5}	1
Carste Calcário	10^{-4}	10
Arenito	10^{-8}	10^{-4}
Calcário, Dolomita	10^{-7}	10^{-4}
Xisto	10^{-11}	10^{-7}
Cristalino Fraturado	10^{-7}	10^{-2}
Cristalino Denso	10^{-12}	10^{-8}

FONTE: adaptado de DELLEUR (1998).

Com os valores da condutividade hidráulica nos poços em exploração e com os valores médios estatísticos mundiais, das áreas onde não se obteve o valor da condutividade *in situ*, realizou-se uma interpolação do logaritmo dos valores da condutividade hidráulica para toda a área de estudo. Devido à descontinuidade na ordem de grandeza da condutividade hidráulica nas áreas de diques diabásio e diorito, convencionou-se por não utilizar este dado na interpolação, acrescentando-se esta informação após a interpolação.

Devido às incertezas apresentadas sobre a condutividade hidráulica, foi realizada uma análise de sensibilidade, variando-se o logaritmo da condutividade hidráulica em $\pm 10\%$ e verificando este efeito nas classificações dos índices de vulnerabilidade.

4.7 - Declividade topográfica (PI-DECL)

Para a criação do PI-DECL, correspondente a declividade topográfica, utilizou-se a hipsometria da região na escala 1:20.000, fornecida pelo Instituto das Águas do Paraná (antiga SUDERHSA). Inicialmente criou-se a superfície altimétrica para formato TIN (*Triangulated Irregular Network*) e depois se efetuou o processamento da declividade do local em porcentagem, através da opção *TIN to Raster* do ArcGis 9.3.

4.8 - Mapa de vulnerabilidade

O mapa de vulnerabilidade do método SINTACS foi obtido pelo processamento de todos os PI's. No método SINTACS, a soma ponderada dos sete PI's, relativos ao método, foi realizada conforme a Equação 3, considerando a devida ponderação de pesos para o sistema Carste.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os planos de informações S, I, N, T, A e S, já classificados. Para a determinação da condutividade hidráulica, adotaram-se os procedimentos anteriormente citados. Os valores dos parâmetros geométricos, dados de bombeamento, níveis estático e dinâmico de cada ponto, assim como o valor da condutividade calculada estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados dos poços em exploração

Código do Poço	Profundidade do Poço (m)	Nível Estático (m)	Diâmetro do Poço (m)	Nível Dinâmico (m)	Q (m³/s)	k (m/s)
624	100,00	2,00	0,30	9,00	1,39E-02	1,95E-05
728	79,00	17,65	1,10	27,00	2,22E-02	1,68E-05
739	30,00	12,92	0,21	16,00	1,25E-03	1,06E-05
983	42,00	12,93	0,07	21,00	3,06E-02	1,11E-04
985	54,00	15,73	0,07	26,00	3,06E-02	6,57E-05
986	35,80	2,78	0,07	3,50	4,31E-02	5,56E-04
987	29,00	1,48	0,07	9,00	5,56E-02	3,79E-04
988	36,00	5,92	0,09	18,00	4,17E-02	1,51E-04
989	73,00	14,98	0,07	25,00	2,86E-02	3,55E-05
990	49,00	7,70	0,09	24,00	2,00E-02	3,90E-05
1018	102,00	3,70	1,00	9,00	1,67E-02	1,95E-05
1019	100,00	3,70	0,07	15,70	1,39E-02	1,41E-05
1020	50,20	2,45	0,07	13,00	4,65E-02	1,23E-04
1021	45,00	3,20	0,07	12,70	3,96E-02	1,24E-04
15058	162,00	34,05	0,07	38,00	2,50E-02	8,53E-06
20920	70,00	21,40	1,00	24,37	8,33E-03	9,29E-06
23729	100,00	6,44	0,07	12,00	1,11E-02	1,49E-05

Fonte: Instituto das Águas do Paraná

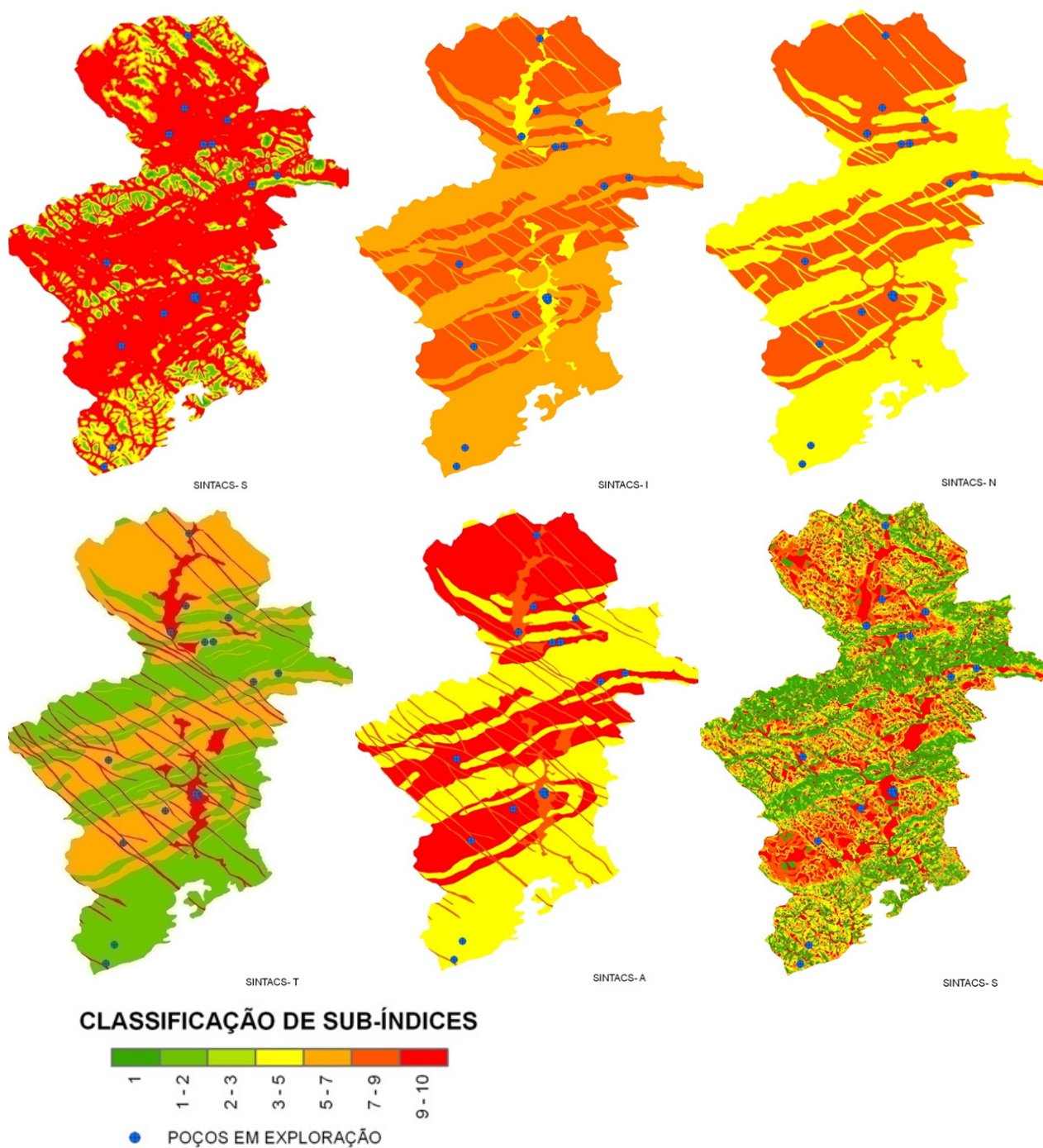


Figura 2 - Planos de Informação S, I, N, T, A e S

Conforme descrito na metodologia, para os sistemas onde a condutividade hidráulica é menor (diques de diabásio e diorito pórfiro), e considerando que não são conhecidos parâmetros para a determinação deste valor, adotou-se o valor médio estatístico mundial, apresentado em Delleur (1998). Assim a condutividade hidráulica foi interpolada de forma logarítmica entre os sistemas aquíferos que apresentaram valores dentro da mesma ordem de grandeza. Com a interpolação, gerou-se a condutividade para toda área de estudo, cujo plano de informação encontra-se na Figura

3. O valor da condutividade hidráulica na área de estudo variou de $8,53 \times 10^{-6}$ m/s a $5,56 \times 10^{-4}$ m/s.

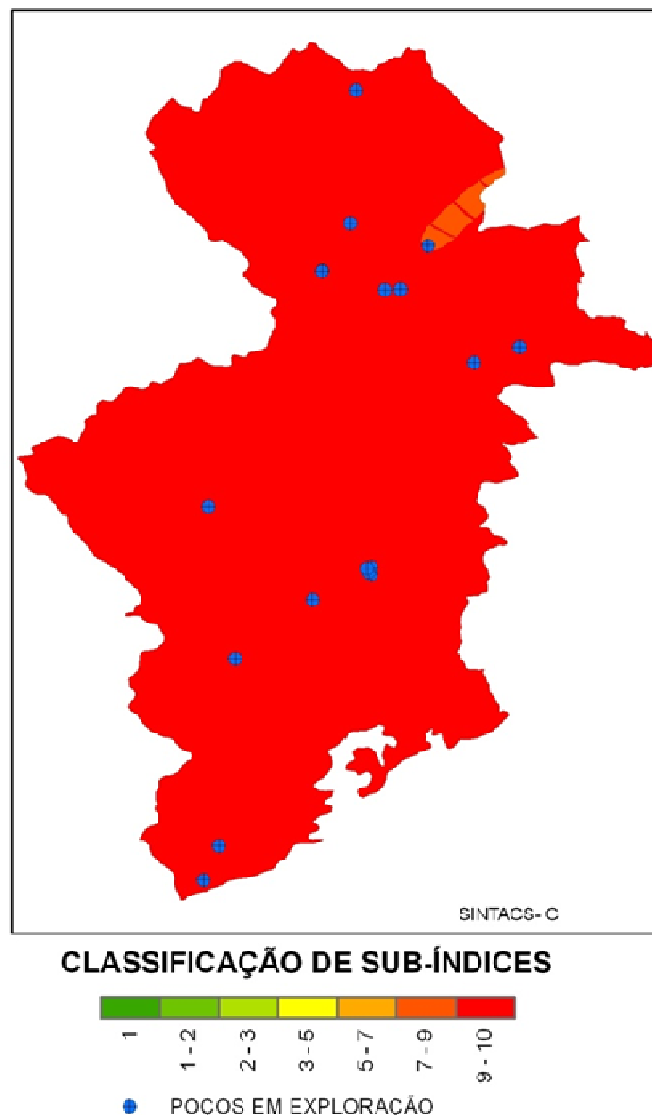


Figura 3 - Plano de Informação C (Condutividade Hidráulica)

Observou-se que os valores de condutividade hidráulica encontrados nas áreas carstificadas estão dentro da faixa de validade apresentados na Tabela 3, o que indica concordância entre dados estatísticos e o valor encontrado através das simplificações aplicadas.

A Figura 4 apresenta o plano de informação do sub-índice condutividade hidráulica já classificado para as variações de -10% e +10% do logaritmo de k para a análise de sensibilidade da classificação em relação aos valores de k .

Observa-se, visivelmente, que não ocorreram grandes alterações nos mapas classificados. Todavia, o acréscimo de 10% (\log de k) no valor da condutividade calculada resultou na classificação da área como sendo 100% crítica na avaliação deste sub-índice. Os demais resultados relativos às alterações nos índices finais de vulnerabilidade estão detalhados posteriormente.

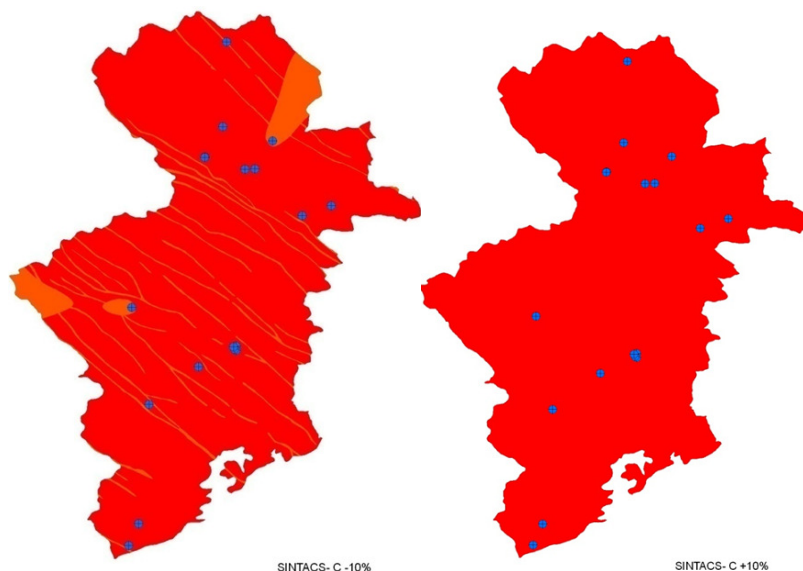


Figura 4 - Plano de Informação C (Condutividade Hidráulica). Análise de sensibilidade.

O mapa de vulnerabilidade resultante da aplicação do método SINTACS é apresentado na Figura 5. Cerca de 27% da área de estudo apresentou classificação no índice de vulnerabilidade como Muito Alta; 20% como Alta; 24% como Moderadamente Alta e 29% como Média. Não ocorreram regiões classificadas como Baixa ou Muito Baixa Vulnerabilidade na área de estudo.

O efeito da incerteza do valor da condutividade hidráulica sobre o índice SINTACS é apresentado na Figura 6.

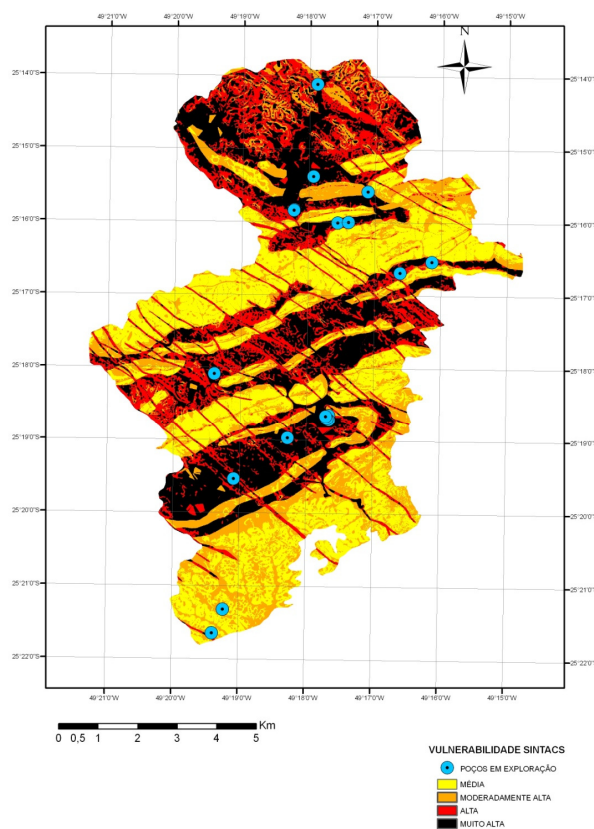


Figura 5 - Mapa de vulnerabilidade do aquífero segundo o método SINTACS

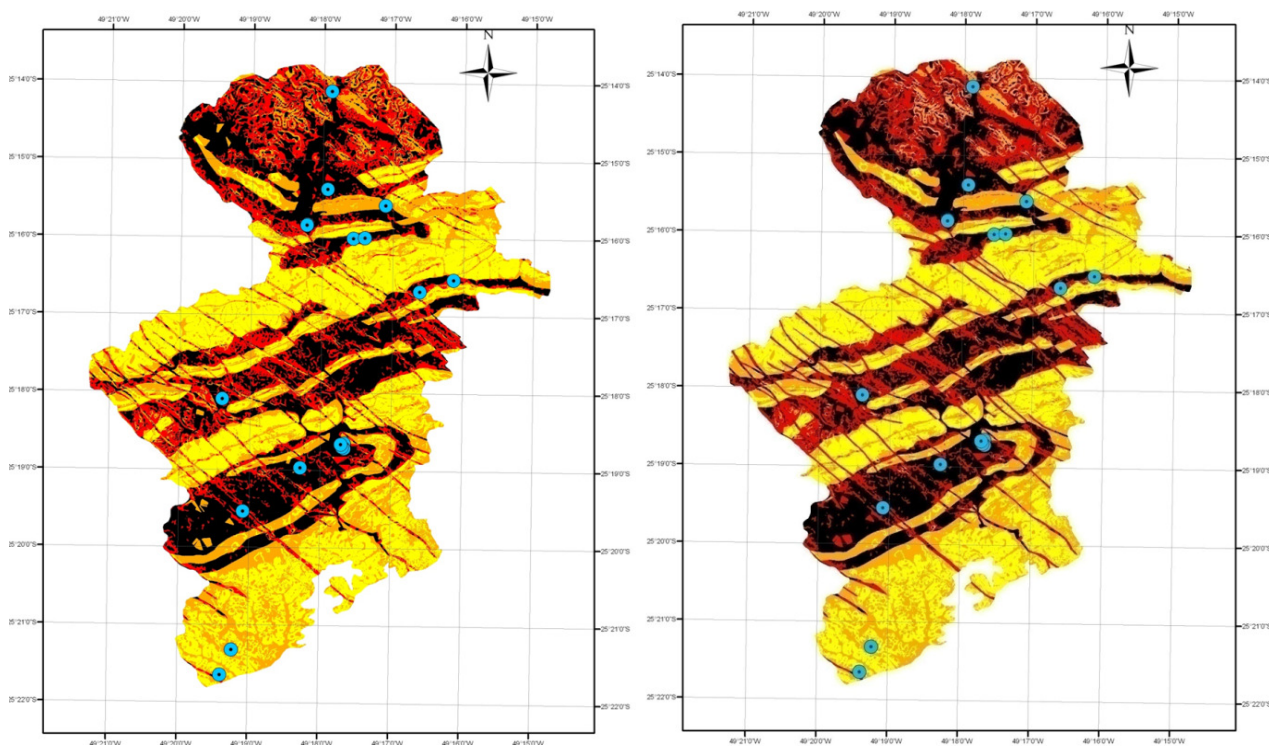


Figura 6 – Análise de sensibilidade do mapa de vulnerabilidade segundo o método SINTACS para variações de -10% e + 10% do logaritmo da condutividade hidráulica

Para o índice SINTACS calculado, considerando uma variação de - 10% do valor do logaritmo da condutividade hidráulica, 29% da área de estudo apresentou classificação Média de vulnerabilidade; 25% Moderadamente Alta; 19% Alta e 27% Muito Alta. Não ocorreram áreas classificadas como Baixa ou Muito Baixa. Ocorreram alterações em aproximadamente 5,7% da área de estudo comparando-se com o índice SINTACS inicial.

Para o índice SINTACS calculado, considerando uma variação de - 10% do valor do logaritmo da condutividade hidráulica, 29% da área de estudo apresentou classificação Média de vulnerabilidade; 24% Moderadamente Alta; 20% Alta e 27% Muito Alta. Não ocorreram áreas classificadas como Baixa ou Muito Baixa. Ocorreram alterações em aproximadamente 3,7% da área de estudo comparando-se com o índice SINTACS inicial.

As áreas em que ocorreram a mudança de classificação do índice SINTACS, considerando a variação do valor da condutividade hidráulica em -10% e +10% (log de k) estão representadas nas Figura 7.

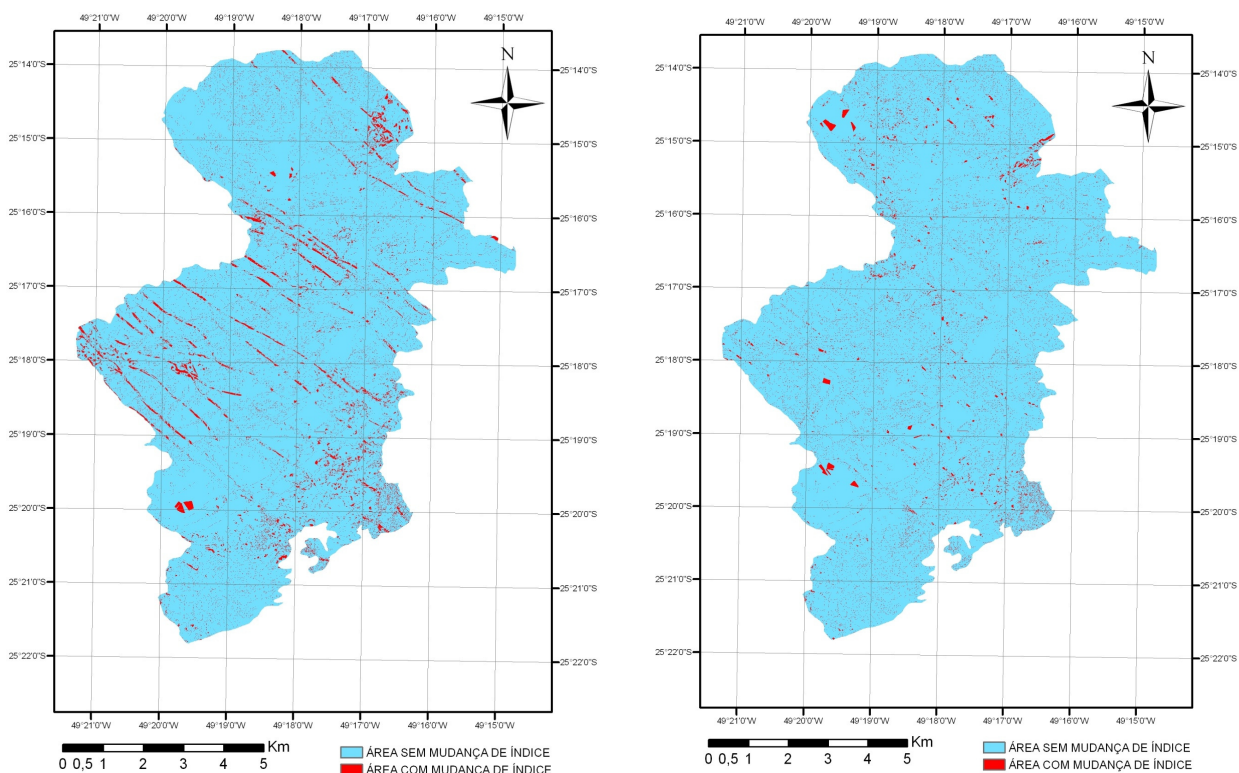


Figura 7 – Alterações na classificação da vulnerabilidade das áreas pelo método SINTACS para variações de -10% e + 10% do logaritmo da condutividade hidráulica

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação à aplicação e validação dos índices estudados, como pode ser constatado no decorrer da pesquisa, houve sempre um desafio na seleção de dados adequados para estimativa dos parâmetros considerados e que estavam disponíveis à aplicação dos índices, com intuito de diminuir incertezas na delimitação espacial das classes de vulnerabilidade e, conseqüentemente, da classificação do risco à poluição. Com relação à condutividade hidráulica, sua determinação através da metodologia proposta, embora não aplicável em casos de uso de modelos matemáticos de simulação, apresentou bons resultados, uma vez que os valores encontrados estão dentro da faixa de variação esperada em função da litologia e, para uma variação de 10% em torno do valor calculado, os resultados foram similares.

Assim, a determinação do índice final de vulnerabilidade SINTACS não apresentou grande variabilidade devido às incertezas do valor da condutividade hidráulica. Embora se tenha realizado uma variação na ordem de 10% no logaritmo da condutividade, o que seria equivalente a 100% do valor da condutividade nominal calculada, o resultado do índice apresentou variação máxima de 5,70%, validando-se assim a hipótese que mesmo uma grande variação do valor da condutividade não altera significativamente o valor da vulnerabilidade calculada pelo método SINTACS.

O método SINTACS aplicado à gestão territorial apresentou resultados similares na classificação das áreas de vulnerabilidade, mesmo com dados de entrada da condutividade hidráulica apresentando incertezas devido as condições hidrogeológicas da área de estudo. _Todavia, o índice SINTACS por ser uma ferramenta de planejamento, apresentou uma resposta satisfatória ao seu objetivo para a tomada de decisão do Gestor.

BIBLIOGRAFIA

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R.J., e HACKETT G. *DRASTIC: "A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings."* NWWA/EPA Series, EPA-600/2-87-035, p. 38-57, 1987.

AUGE, M. "Vulnerabilidad de acuíferos." *Revista Latino-Americana de Hidrogeologia*, n. 4, p. 85 - 103, 2004.

BONACIM, E. A. "Dinâmica do sistema hidrogeológico cárstico na área de Tranqueira – região metropolitana de Curitiba." *Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná*, 1996.

CIVITA, M.; DE MAIO, M. "Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico. SINTACS R5 a new parametric system for the assessment and automatic mapping of groundwater vulnerability to contamination." Pitagora Editrice, Pubbl. n°2200 del GNDCI-CNR, 2000.

COMEC – Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba, "Plano de Zoneamento do Uso e Ocupação do Solo da Região do Karst na Região Metropolitana de Curitiba. Relatórios Finais: RF1 – Leitura do Espaço." 2003, p. 6-1/29 – 6-29/29, 2003.

CUSIMANO G.; DE MAIO M.; GATTO L.; HAUSER S. E.; PISCIOTTA A. "Application of SINTACS method to the aquifers of Piana di Palermo, Sicily, Italy." *Geofísica Internacional* 43, p. 661-670, 2004.

DAVIES, JM e MAZUMDER, A. "Health and environmental policy issues in Canada: the role of watershed management in sustaining clean drinking water quality at surface sources." *Journal of Environmental Management*. Volume: 68 Issue: 3 Jul 2003, p. 273-286, 2003.

DELLEUR, J.W. "The Handbook of Groundwater Engineering." School of Civil Engineering Purdue University West Lafayette, Indiana. p.17 - 18, 473,617 – 652, 1998.

DOERFLIGER, N.; JEANNIN ,P. Y.; ZWAHLEN, F. "Water vulnerability assessment in Karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)." *Environmental Geology* 39, p. 165-176, 1999.

EPPNA. "Informação Cartográfica dos Planos de Bacia. Sistematização das Figuras e Cartas a Imprimir em Papel. Equipe de Projeto do Plano Nacional da Água." Versão de Outubro de 1998, Portugal, p. 29, 1998.

- FILL, H. D.; SANTOS, I.; FERNANDES C.; ANDRÉ TOCZECK A.; OLIVEIRA, M. F. "*Balanço Hídrico Da Bacia Do Rio Barigüi, Pr.*" Universidade Federal do Paraná, p. 59 -67, 2005.
- FREEZE, A. R.; CHERRY, J. A. "*Groundwater.*" Prentice Hall, p. 15-16, 1979.
- FOSTER, S. S. D; SKINNER, A. C. "*Groundwater Protection: the science and practice of land surface zoning.*" Prague Conference, May 1995, IAHS Publ. 225, p. 471 – 482, 1995.
- GOGU, R.; DASSARGUES, A. "*Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overly and index methods.*" Environmental Geology and Water Sciences 39, p. 549–559, 2000.
- GOLDSCHIEDER, N.; KLUTE M.; STURM S.," *The PI method: a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers.*" Z. Angew Geol 463, p.157–166, 2000.
- LEITÃO, T. E.; FERREIRA, J. P. L.; OLIVEIRA, M. M.; MOINANTE, M. J. "*Poluição de águas subterrâneas: Principais Problemas, processo de prevenção e de reabilitação.*" 6º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Cabo Verde, 10 a 13 Novembro de 2003, p. 1-18, 2003.
- LISBOA, A. A. "*Proposta de metodologia para avaliação hidrogeológica do aquífero cárstico, compartimento de São Miguel.*" Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, 1997.
- MASETTI, M.; STERLACCHINI,S.; BALLABIO ,C.; SORICHETTA, A.; POLI, S." *Influence of threshold value in the use of statistical methods for groundwater vulnerability assessment .*" Science of the Total Environment, p. 3836-3846, 2009.
- MIMI, Z. A.; AMJAD ASSI, A." *Intrinsic vulnerability, hazard and risk mapping for karst aquifers: A case study.*" Journal of Hydrology 364, p. 298 – 310, 2009.
- PARANÁ, Instituto das Águas do. "*Plano Estadual de Recurso Hídrico - Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas Subterrâneas.*" Paraná, 2010.
- PECKENHAM, J.M.; SCHMITT, C.V.; MCNELLY, J.L." *Linking water quality to the watershed: Developing tools for source water protection.*" Journal American Water Works Association, Volume: 97, Issue: 9, Sep 2005 p. 62, 2005.
- ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C; LUCENA, L. R. F. "*Os aquíferos que contribuem no abastecimento da Cidade de Curitiba - Paraná.*" Águas Subterrâneas nº 16/ Maio 2002, p. 1-6, 2002.
- SINAN, M.; RAZACK M. "*An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquíferof Marrakech (Morocco).*" Environmental Geology 57, p. 349–363, 2009.
- TOOD, K." *Hidrologia de águas subterrâneas.*" Nova York: Ed. Edgard Blucher Ltda. p. 319, 1959.