

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFERO
LIVRE: SUBSÍDIOS PARA A GESTÃO DOS RECURSOS
HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS**

Ciomara de Souza Miranda

CAMPO GRANDE - MS
2013

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFERO
LIVRE: SUBSÍDIOS PARA A GESTÃO DOS RECURSOS
HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS**

Ciomara de Souza Miranda

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, como requisito à obtenção do título de Mestre em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Dr. Giancarlo Lastoria

Aprovada em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio C. Paranhos Filho
Coorientador - UFMS

Prof. Dr. Vitor Matheus Bacani
UFMS/CPAQ

Prof. Dr. Sandra Garcia Gabas
UFMS

CAMPO GRANDE – MS
2013

Miranda, Ciomara de Souza

Avaliação da vulnerabilidade de Aquíferos Livres: Subsídio para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos / Ciomara de Souza Miranda. - Campo Grande, 2013.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2012.

Orientador: Prof. Dr. Giancarlo Lastoria.

1. Vulnerabilidade de Aquífero. 2. Geoestatística. 3. SIG

*A Deus pelo amor incondicional.
A minha família pelo apoio e incentivo.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus por Sua graça e misericórdia e por ter me enlaçado em Seu amor.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de mestrado, que permitiu a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Nery e Lilia pelo apoio e paciência. E pelo incentivo de minha irmã Jéssica.

Ao meu esposo Henrique, pelo carinho, companheirismo e por sempre acreditar em meus sonhos.

Ao prof. Toni, pelos conselhos, entusiasmo, disposição e amizade compartilhada.

Ao meu orientador Giancarlo, pela sua compreensão e apoio à pesquisa.

A prof.^a Sandra pelas contribuições deste do início da pesquisa.

A todos os pesquisadores do Laboratório de Geoprocessamento para Aplicações Ambientais da UFMS.

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria. Provérbios 1:7^a

“No dia da prosperidade goza do bem, mas no dia da adversidade considera; porque também Deus fez a este em oposição àquele, para que o homem nada descubra do que há de vir depois dele.”

“O fim das coisas é melhor do que o seu início, e o paciente é melhor que o orgulhoso.” Eclesiastes 7:14 e 8.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	6
INTRODUÇÃO GERAL	7
CAPÍTULO 1	8
USO DO SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS NA MODELAGEM DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFERO LIVRE	
1. INTRODUÇÃO	9
2. MATERIAIS E MÉTODOS	10
2.1. Caracterização da Área.....	11
2.2. Litologia, Solos e Hidrogeologia.....	12
2.4. Modelo EKv	14
2.5. Álgebra de Mapas.....	15
2.6. Interpolação Espacial e a construção do mapa da profundidade até nível freático	15
3. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES	16
3.1. Avaliação entre a vulnerabilidade e as políticas públicas	20
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	22
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
CAPÍTULO 2	26
ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA PIEZOMETRIA DE AQUÍFERO	
1. INTRODUÇÃO	27
2. MATERIAIS E MÉTODOS	28
2.1 Área de Estudo	28
2.2. Obtenção dos Dados de Piezometria	29
2.3. Análise Estatística	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	35
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
CONCLUSÃO GERAL	40

RESUMO GERAL

A avaliação da vulnerabilidade à poluição e o reconhecimento das piezometria no aquífero livre são ferramentas imprescindíveis para garantir uma gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, além de serem dados relevantes no gerenciamento de bacia hidrográfica. O presente trabalho busca contribuir à gestão das águas subterrâneas, com o objetivo de mapear a vulnerabilidade das características intrínsecas do aquífero livre da sub-bacia do Rio Coxim, localizado no Município de São Gabriel do Oeste em Mato Grosso do Sul. Realizou-se o processamento em Sistema de Informações Geográficas (SIG), tanto das informações inerente a modelagem da vulnerabilidade quanto às informações de piezometria, a fim de obter um modelo digital do nível estático do aquífero. A análise da vulnerabilidade baseou-se em duas metodologias: GOD, proposto por Foster e Hirata (1988) e EKV pelo Auge (2004). Na realização da interpolação dos dados de piezometria, avaliou-se a dependência espacial desses, através dos métodos geoestatísticos, isto é, estudo sobre o semivariograma. Com base na análise do semivariograma, conclui-se que para um raio de 16,5 km existe dependência espacial, contudo a validação cruzada apontou uma superestimação de 10% na interpolação por krigagem, considera-se um erro aceitável. Os resultados, referentes ao estudo da vulnerabilidade do aquífero, mostraram que 6% da área de estudo encontra-se com alta vulnerabilidade, 76% média e 18% baixa conforme o modelo GOD em contrapartida 38% qualifica-se como alta e 62% como média de acordo com o modelo EKV. O emprego do SIG permitiu a otimização nas modelagens que quantificam o índice de proteção natural do aquífero e a geração da superfície piezométrica. O estudo vai ao encontro das diretrizes das políticas ambientais e, ainda, aponta a necessidade de ações que prezem pela conservação da sub-bacia, uma vez que essa é caracterizada como suscetível a contaminação nas águas subterrâneas.

Palavras-chave: Vulnerabilidade de Aquífero; Geoestatística; SIG

INTRODUÇÃO GERAL

Diferentes instrumentos podem auxiliar na gestão dos recursos hídricos, um deles é a análise da vulnerabilidade do aquífero a alterações adversas, por indicar as áreas de fragilidade potencial à contaminação, e o outro é reconhecer a direção do fluxo da água por meio da piezometria, estas ferramentas são úteis na proteção da qualidade das águas subterrâneas, uma vez que o gerenciamento desse recurso apresenta limitações técnicas e principalmente econômicas quando se trata de remediação de contaminação.

O levantamento bibliográfico sobre o tema proposto foi realizado em bases de dados digitais, como páginas web de revistas internacionais disponibilizados pelo portal da Capes. A base de dados consultada foi a *Web of Science*, além de bibliotecas digitais de tese e dissertação de universidades, como Universidade de São Paulo, Universidade Estadual de Campinas, Universidade Federal do Paraná, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul entre outras. Os temas que nortearam a pesquisados foram: Emprego da Geoestatística, Vulnerabilidade de Aquíferos, Álgebra de Mapas e Sistema de Informações Geográficas aplicado aos Recursos Hídricos.

Nota-se que existem vários modelos para determinar o grau de proteção natural do aquífero frente à poluição, cada um deles com diferentes parâmetros e pesos na integração dos seus índices. O objetivo deste trabalho é utilizar dois modelos para avaliar a vulnerabilidade de acordo com as características intrínsecas do aquífero livre através do Sistema de Informações Geográficas (SIG), apresentando os resultados por meio de mapas que facilitam a interpretação dos dados.

A avaliação da vulnerabilidade é um método que deve ser inserido nas pautas de políticas públicas, pois é um procedimento não estrutural, o qual visa à conciliação entre o desenvolvimento sustentável e a manutenção da qualidade dos recursos hídricos, a partir da observância da capacidade de suporte do meio ambiente.

O presente trabalho é dividido em dois capítulos. O primeiro trata do mapeamento por meio do SIG da vulnerabilidade de aquíferos livres, utilizando e comparando dois modelos diferentes, indicados devido à simplicidade do método e por serem de baixo custo, além de serem amplamente empregados. O segundo capítulo trata da elaboração do modelo digital do aquífero, a fim de conhecer o fluxo subterrâneo.

CAPÍTULO 1

USO DO SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS NA MODELAGEM DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFERO LIVRE

RESUMO: O conhecimento das áreas mais ou menos vulneráveis à poluição nos aquíferos é de extrema importância para a gestão eficiente e sustentável das águas subterrâneas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade do aquífero livre na sub-bacia do Rio Coxim, em São Gabriel do Oeste, MS. Foram adotados os modelos GOD (Foster e Hirata, 1988) e o EKv (Auge, 2004), aplicados por meio do Sistema de Informações Geográficas (SIG), aplicando técnicas de interpolação, sobreposição e operações numéricas. Em ambiente de SIG os resultados alcançados mostram que o modelo GOD classifica como 6% como alta, 76% média e 18% baixa vulnerabilidade na área de estudo. Já o modelo EKv resultou em apenas duas classes, as quais 38% qualificam-se como alta e 62% como média vulnerabilidade. Assim, observou-se que o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero é um instrumento de apoio a conservação dos recursos hídricos subterrâneos.

PALAVRA-CHAVE: Vulnerabilidade águas subterrâneas, SIG, Aquífero livre.

THE USE OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS TO MODEL THE VULNERABILITY OF PHREATIC AQUIFERS

ABSTRACT: The knowledge of the vulnerability to pollution of areas is needed in order to manage underground waters in a sustainable and efficient way. This study applies two models to evaluate, in terms of quality, the vulnerability of the phreatic aquifer in a watershed of Coxim River, in São Gabriel do Oeste, MS. The used models were GOD (Foster e Hirata, 1988) and EKv (Auge, 2004). The first one presented 6% as high, 76% as medium and 18% as low, in terms of vulnerability in the study area. The second model showed only two classes of vulnerability, 38% as high and 62% as medium. The integration between the spatial information and the input parameters of the models were done using Geographic Information System (GIS), applying interpolations, combinations and numeric operations. The results of this work will be used as instruments to support the conservation of the Groundwater resources the on territorial planning.

Key-words: Groundwater vulnerability, GIS, phreatic aquifer.

1. INTRODUÇÃO

A ameaça de contaminação dos aquíferos é cada vez maior em todo o mundo. A urbanização, o desenvolvimento industrial e das atividades agrícolas aliados à falta de planejamento territorial desencadeiam o uso menos eficiente dos recursos hídricos, afetando tanto a esfera ambiental quanto a econômica.

O tema ganha crescente relevância na gestão dos recursos hídricos devido principalmente ao aumento da demanda das águas subterrâneas para o consumo humano. Na América Latina, a maioria de suas cidades utiliza as águas subterrâneas como principal, ou mesmo única, fonte de abastecimento municipal (WHO, 2006).

O conceito de vulnerabilidade das águas subterrâneas foi inicialmente estudado por Le Grand (1964) e Margat (1968). A partir de então, o interesse pelo tema cresceu na comunidade científica, sendo aplicado em diversos estudos em todo o mundo, destacando-se os realizados por Albinet e Margat (1970) na França; Aller *et al.* (1997) nos EUA; IG/CETESB/DAEE (1997) no Brasil; Lobo-Ferreira (1998) em Portugal; Auge (2003) na Argentina.

Várias são as definições de vulnerabilidade de aquífero. De acordo com Auge (2004), interessam dois conceitos – a vulnerabilidade intrínseca e a vulnerabilidade específica. A primeira trata da fragilidade natural do aquífero, e a segunda se refere ao perigo de contaminação com relação à presença de uma carga contaminante. Já Foster e Hirata (1988), a definem como a sensibilidade, frente às características intrínsecas do aquífero, a ser afetada adversamente na possível presença de uma fonte de poluição.

Portanto, diferencia-se a vulnerabilidade intrínseca da específica por a primeira trabalhar exclusivamente as características do aquífero. Enquanto a segunda acrescenta a análise das atividades antrópicas presentes, isto é, leva em consideração o uso e a ocupação do solo na possibilidade de contaminação das águas frente às condições do aquífero. No presente estudo, adotou-se a definição de Auge (2004), onde se avalia a natureza intrínseca do aquífero a respeito de sua vulnerabilidade.

Estudos de identificação das áreas sensíveis a contaminação do aquífero livre é uma chave para melhorar o planejamento e auxiliar a tomada de decisão dos atores envolvidos na gestão dos recursos hídricos. O mapa de vulnerabilidade é uma ferramenta básica de proteção ambiental a fim de se evitar a contaminação das águas subterrâneas.

Segundo Auge (2004), na escolha dos modelos empregados para a avaliação da vulnerabilidade, os fatores que mais influenciam são: o conhecimento e difusão da metodologia empregada, as informações disponíveis e a validação dos resultados. Frente a estes fatores, o autor destaca ainda que o fator determinante, geralmente, é a disponibilização dos dados ambientais.

O mapeamento da vulnerabilidade do aquífero na Planície Izeh no Irã obtido através da utilização do índice DRASTIC, modificado por meio de um Sistema de Informações Geográfica - SIG e de ferramentas de sensoriamento remoto, resultou em excelentes resultados (Farjad *et al.*, 2012). Wang *et al.* (2012) e Al Hallaq *et al.* (2012) destacam que o uso do SIG foi essencial para a conclusão do trabalho de avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas utilizando diferentes metodologias.

Com o uso de um SIG, objetiva-se com o presente trabalho avaliar a vulnerabilidade do aquífero livre na Sub-Bacia do Rio Coxim por meio de dois modelos, o GOD, (Foster e Hirata, 1988) e o EKV, (Auge, 2004), e discutir os resultados frente aos instrumentos das Políticas Públicas. A nomenclatura de ambos está relacionada à letra inicial dos parâmetros utilizados na integração do modelo.

A pesquisa ganha importância considerável, pois a área de estudo, no caso, a Sub-Bacia do Rio Coxim, MS, é utilizada como fonte de água para o abastecimento público do Município de São Gabriel do Oeste e do assentamento Campanário, o qual abriga famílias dependentes diretamente da qualidade da água dos poços para o abastecimento e o desenvolvimento da região. Além de ser apontada como área de recarga do Sistema Aquífero Guarani, por estar localizada na borda noroeste da Bacia Sedimentar do Paraná (Gastmans, 2007).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem dos índices foi realizada através de um Sistema de Informações Geográficas, sendo utilizadas técnicas de processamento de dados como a modelagem da topografia, álgebra de mapas e campanha de campo. As principais informações avaliadas foram: a geologia, solos fornecidas pela Embrapa (2003), a profundidade do lençol freático e a condutividade hidráulica levantadas por meio de trabalho de campo. Neste estudo, foram utilizados os softwares Geomatica Focus (PCI, 2003) e o ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006).

2.1. Caracterização da Área

A área de estudo compreende a Sub-Bacia do Rio Coxim, localizada em zona rural, e que contém apenas uma pequena parcela da malha urbana do Município de São Gabriel do Oeste, Mato Grosso do Sul. Essa região caracteriza-se por ser uma das regiões mais submetidas à expansão agrícola, além de abrigar o assentamento rural Campanário, o qual possui aproximadamente 130 famílias. Na Figura 1, tem-se a localização da área de estudo, destacando-se o assentamento e as vias de acesso sobre imagem Google Earth (2010).

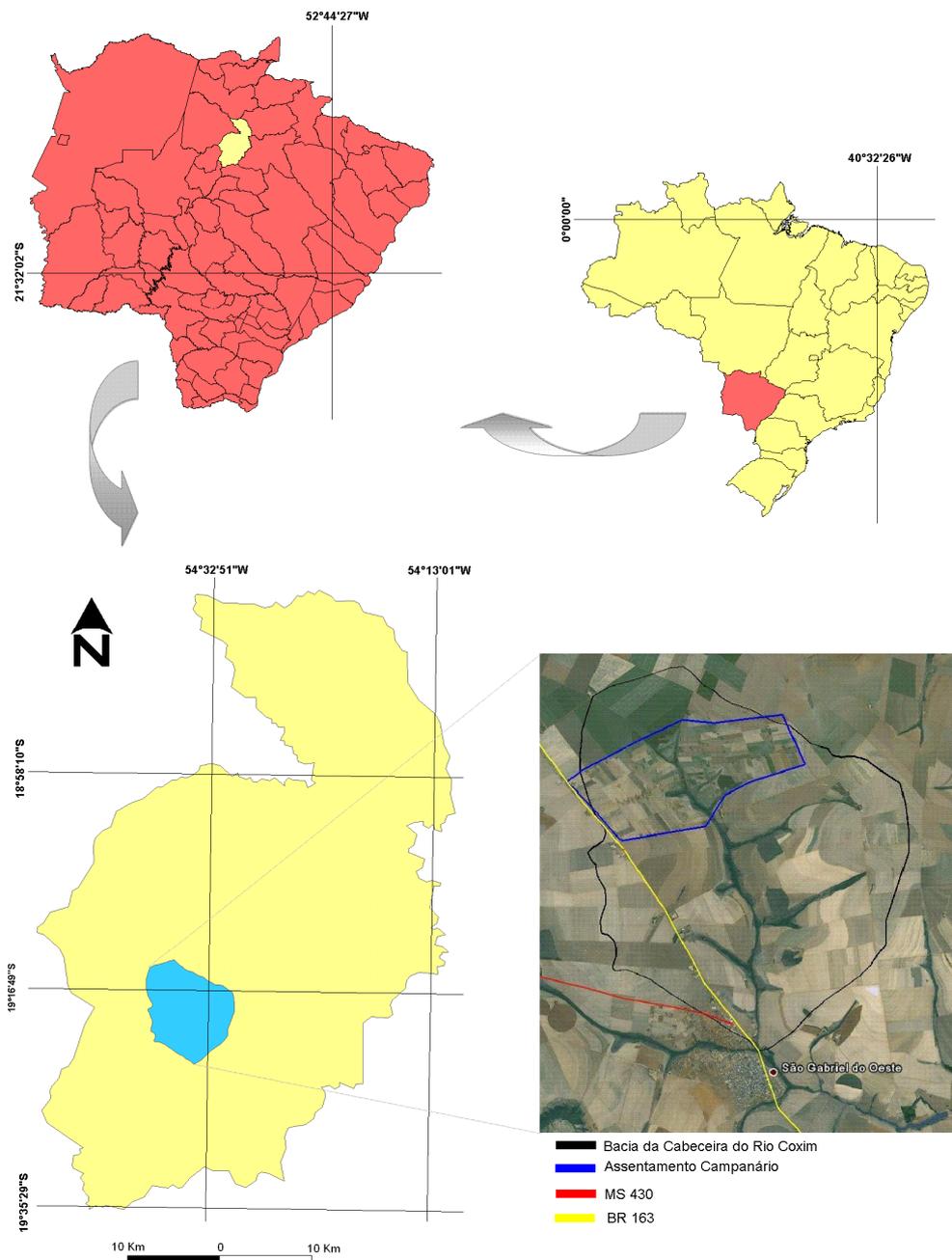


Figura 1. Localização geográfica da Sub-Bacia da Cabeceira do Rio Coxim. Sobre a imagem verifica-se o limite da bacia (em preto), o assentamento Campanário (em azul) e as vias de acesso (em amarelo e vermelho).

A sub-bacia de estudo é drenada pelo Córrego da Cabeceira do Rio Coxim, o qual é tributário de segunda ordem do Rio Coxim, possuindo aproximadamente 15km de comprimento. A expansão rede de drenagem é controlada estruturalmente, conforme o relato do Zoneamento Agroecológico do Município (EMBRAPA, 2003, p.36).

2.2. Litologia, Solos e Hidrogeologia

As coberturas detrito-lateríticas que recobrem a área de estudo caracterizam-se por ser de resistência moderada, mantendo-se mais estáveis em função da presença de níveis lateríticos e concrecionários de alta resistência à erosão (EMBRAPA, 2003,p.35).

A Figura 2 apresenta a geologia da área. De acordo com o zoneamento Agroecológico (Embrapa, 2003, p.36), nota-se a distinção da cobertura detrito-laterítica entre as de idade Terciária-Quaternária (distinguida pelos sedimentos areno-siltosos e conglomeráticos, cones de dejeção coalescentes, aluviões e eluviões – TQd), e as de cobertura Terciária Superior, que originam os solos argilo-arenosos com concreções ferruginosas e blocos de laterita (Tdl2). As coberturas Terciárias Inferiores, diferenciam-se através das argilas de cores variegadas, concreções limonícas, laterítos ferruginosos (Tdl1). Próximos à drenagem, encontram-se os aluviões holocênicos formados por areia fina a média (Ha).

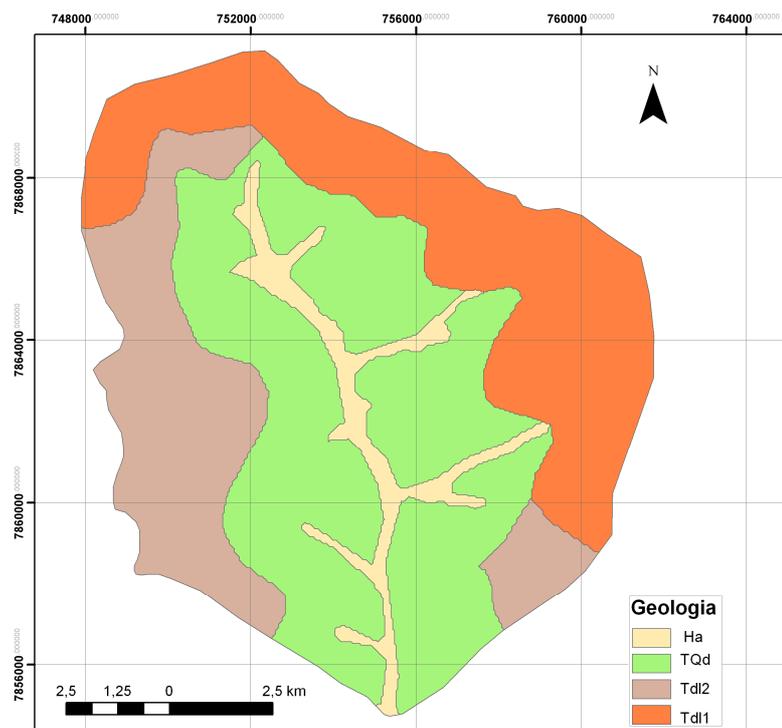


Figura 2. Geologia da sub-bacia do Rio Coxim (dados do Zoneamento Agroecológico do Município, EMBRAPA, 2003).

A sub-bacia está inserida na unidade geomorfológica denominada de Chapadão, distinta por níveis concrecionários lateríticos e relevo plano, prevalecendo os Latossolos Vermelhos distróficos com textura argilosa e muito-argilosa. Entorno da rede de drenagem apresentam-se os Gleissolo Háptico em área de várzeas, sendo mal drenado e de coloração acinzentada.

O aquífero alvo de investigação é caracterizado como livre, com porosidade intergranular, compreendido pelos sedimentos da cobertura detrito-laterítica, de idade Terciária-Quaternária, acima do aquífero Guarani (Lastoria *et al*, 2011b)

2.3. Modelo GOD

O índice GOD é calculado baseando-se em três parâmetros de confinamento do aquífero: a ocorrência do aquífero (G), a natureza litológica do aquífero (O) e a profundidade até o nível freático (D) (Foster e Hirata, 1988). Seus pesos são visualizados na Tabela 1. O produto dos pesos de cada parâmetro resulta no índice final, o qual varia de 0,0 (desprezível) até 1,0 (extrema), estimando-se, assim, a vulnerabilidade do aquífero.

Tabela 1. Parâmetros e pesos do modelo GOD (Foster *et al*, 2002)

GOD			
Ocorrência do Aquífero G	Peso	Litologia O	Peso
Ausência	0	Argilas	0,3
Confinante Artesiano	0	Solos residuais	0,4
Confinante	0,2	Siltos Aluvial, folhelhos	0,5
Semiconfinado	0,4	Depósito flúvio glacial, siltitos tufo vulcânicos, formações magmáticas, metamórficas e vulcânicas antigas	0,6
Não Confinado (coberto)	0,6		
Não Confinado	1		
Profundidade D (m)	Peso	Areia cascalho, arenitos vulcânicos	0,7
> 50	0,4	Areia eólica, carbonatitos e calcários, lava vulcânica recente	0,8
20 a 50	0,6	Cascalho coluvial	0,9
5 a 20	0,8	Calcrete + Calcário cárstico	1
<5	1		

Os pesos para cada parâmetro foram atribuídos de acordo com as características da área de estudo, levando-se em consideração que o aquífero tratado é não confinado. Para avaliação do grau de consolidação, diferenciou-se entre as litologias de areias finas e médias, localizadas próximas a rede hidrográfica atribuiu-se o peso de 0,7. As coberturas detrítico-laterítica foram distinguidas em: sedimentos areno-siltosos, atribuindo-se o peso de 0,5 e em argilo-arenosos de peso de 0,4.

A profundidade da água no aquífero corresponde à distância que o contaminante terá de percorrer para alcançar a zona saturada do aquífero. Esse parâmetro foi analisado segundo os dados levantados por meio de sonda elétrica nos 22 poços encontrados nas propriedades rurais no período de seca (mês de setembro). Esse equipamento, ao entrar em contato com a lâmina d'água, emite um sinal, identificando o nível estático.

2.4. Modelo EKv

Auge (2004) desenvolveu um índice de avaliação para aquífero livre, o qual leva em consideração o grau de proteção natural ou defesa natural. O índice EKv é baseado em dois parâmetros: a profundidade da superfície freática (E) e a condutividade vertical da zona não saturada (Kv). Para ambos, os índices variam de 1 a 5, de menos a mais vulnerável, respectivamente (Tabela 2). O resultado da somatória dos valores resulta entre 1 (muito baixa) até 10 (alta), quantificando, assim, a vulnerabilidade intrínseca.

Tabela 2. Parâmetros e pesos do modelo EKv (Auge, 2004).

EKv			
Espessura E (m)	Peso	Condutividade Hidráulica Kv (m/d)	Peso
>30	1	$< 1,10^{-3}$	1
De 10 a 30	2	$>1,10^{-3}$ a 0,01	2
De 5 a 10	3	$> 0,01$ a 1	3
De 2 a 5	4	>1 a 50	4
< 2	5	50 a 500	5

A profundidade da superfície freática foi obtida, como já mencionado, na elaboração do índice GOD. A diferença foi, apenas, o enquadramento dos pesos proposto pelo EKv Auge (2004). A condutividade vertical da zona não saturada foi obtida por meio do método do poço acima do lençol freático (poço invertido), conforme Canduro e Dorfman (1996).

O procedimento do método do poço invertido consiste em fazer uma abertura de cerca de 1m de altura e 0,075m de diâmetro no solo, e completá-la com água. Com o aparelho de

medição das mudanças de nível de água é realizada a leitura dos diferentes níveis registrados em determinados intervalos de tempo, determinando assim a profundidade. Em seguida, realizou-se o cálculo da velocidade de percolação da água no solo.

Nos diferentes tipos de solos verificados na bacia de estudo foram realizados 8 ensaios para a obtenção da condutividade vertical (Kv). Todos resultaram na mesma faixa de classificação para o modelo EKv (entre 1 a 50 m/d de condutividade), portanto, atribuiu-se o peso 4 para o parâmetro Kv.

2.5. Álgebra de Mapas

O mapeamento da vulnerabilidade do aquífero pelos modelos GOD e EKv foram realizados através do cruzamento dos parâmetros avaliados por meio da técnica de álgebra de mapas em um SIG.

Segundo Bonham-Carter (1996), o SIG é projetado para coletar diversos dados espaciais a fim de representar variáveis através da aplicação de uma série de análises, realizando técnicas como a sobreposição de camadas de informações registradas geograficamente.

A álgebra de mapas são os operadores que manipulam campos cartográficos geométricos. Os mapas temáticos compõem uma linguagem especializada para realizar operações de sentido matemático e cartográfico.

Ribeiro *et al.* (2001) realizaram a modelagem da vulnerabilidade do aquífero da Sub-Bacia do Rio Siriri em Sergipe em SIG. Para tanto, empregaram a álgebra de mapas dos planos de informações, reclassificados com os valores aplicados aos índices GOD.

No presente estudo, foram atribuídos pesos para cada nível de informação requisitada em cada um dos modelos trabalhados. Com o uso de operadores específicos (adição e multiplicação), realizou-se a álgebra de mapas para a confecção das cartas temáticas.

2.6. Interpolação Espacial e a construção do mapa da profundidade até nível freático

Na campanha de campo, realizada no final do período de seca, foram obtidas informações do nível estático dos 22 poços e das cotas da superfície do terreno com suas coordenadas geográficas. Em laboratório, através do método da krigagem, interpolaram-se os

dados através do software *Geomatica Focus* (PCI, 2003), o que resultou em dois modelos digitais em formato raster, sendo um da topografia e o outro de piezometria.

Com o uso da ferramenta “*raster calculator*” disponível no software *Geomatica Focus* (PCI, 2003), realizou-se a subtração dos modelos da topografia e da piezometria do aquífero, gerando o modelo da espessura da zona não saturada, isto é, a profundidade até o nível freático no aquífero não confinado.

A partir da aplicação do algoritmo “*contour*”, algoritmo genérico de extração de curvas de nível do software *Geomatica Focus* (PCI, 2003), foram extraídas as curvas de nível do modelo da espessura da zona não saturada. O resultado é um arquivo em formato vetorial das linhas equipotenciais de profundidade. A Figura 3 demonstra, em forma gráfica, o processamento para a obtenção do mapa da profundidade até o nível estático do aquífero.

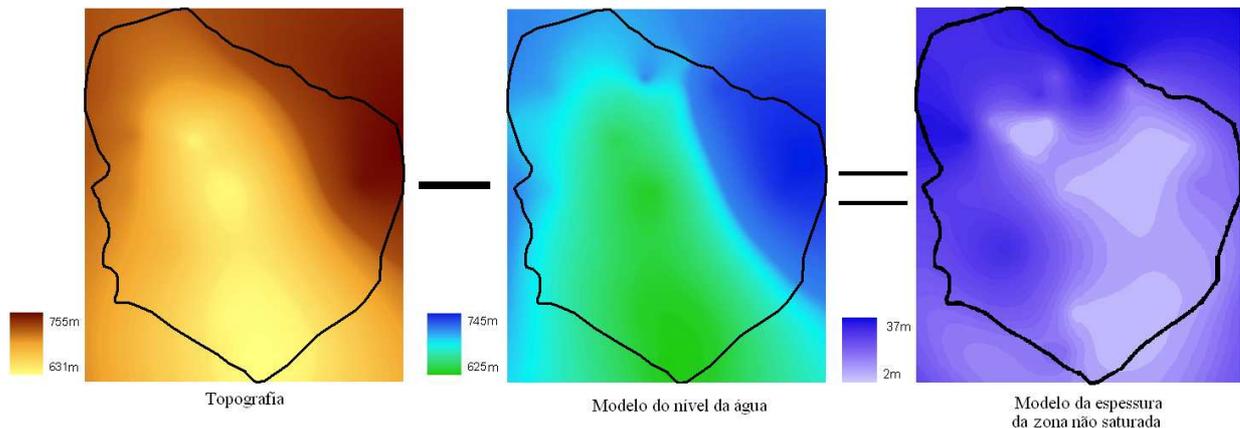


Figura 3. Apresentação gráfica da metodologia na obtenção do modelo da espessura da zona não saturada (profundidade até o nível estático).

3. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

Os resultados do levantamento de campo sobre o nível estático dos 22 poços são apresentados na tabela 3. Vale destacar que os parâmetros dos modelos GOD e EKv, referente a espessura da camada não saturada corresponde (E) e profundidade até o nível freático (D) são correspondentes.

Tabela 3. Localização geográfica (x, y) dos poços levantados e os respectivos níveis estáticos (NE).

Poços	X (m)	Y (m)	NE (m)	Poços	X (m)	Y (m)	NE (m)
1	756981,4	7867654	8,15	12	751965,7	7865164	6,93
2	755743,8	7868803	38	13	751895,1	7865319	5,77
3	755071,5	7867182	22	14	752537,7	7865388	0,79
4	753871,6	7868060	12,52	15	753807,7	7864887	6,86
5	753156	7867366	20,14	16	759600,6	7865142	4,91
6	753522,8	7866156	4,21	17	759950,6	7863404	8,44
7	751046,9	7866147	7,33	18	755185,1	7855711	5,5
8	749964,6	7865559	26	19	754155,2	7856092	10
9	748307,1	7866114	26,32	20	754745,7	7857757	4,14
10	749845,3	7867586	20,65	21	751785,8	7860653	22
11	751848,2	7865089	8,33	22	749762,7	7863157	16,75

A tabela 4 apresenta os resultados obtidos para a condutividade hidráulica vertical. Percebe-se, que para o índice EKV este parâmetro enquadra-se em uma mesma classe de peso 4, contribuindo, assim na elevação do índice de vulnerabilidade.

Tabela 4. Localização geográfica (x, y) e valores da condutividade hidráulica vertical (Kv).

X (m)	Y (m)	Kv (m/dia)
752636,1	7859995,6	3,14
750135,9	7862662,3	1,2
749535,9	7868095,9	10,20
755069,5	7858162,2	2,94
760903,1	7862895,7	3,48
757269,6	7867829,3	14,13
754536,1	7866495,9	11,3
752436,1	7865562,5	4,33

As Figuras 4 e 5 apresentam os pesos de cada parâmetro e o resultado do mapeamento da vulnerabilidade por meio dos modelos GOD e EKV, respectivamente. Para o modelo GOD obtiveram-se três classes de vulnerabilidade: baixa, média e alta. O modelo EKV discriminou apenas duas classes: média e alta.

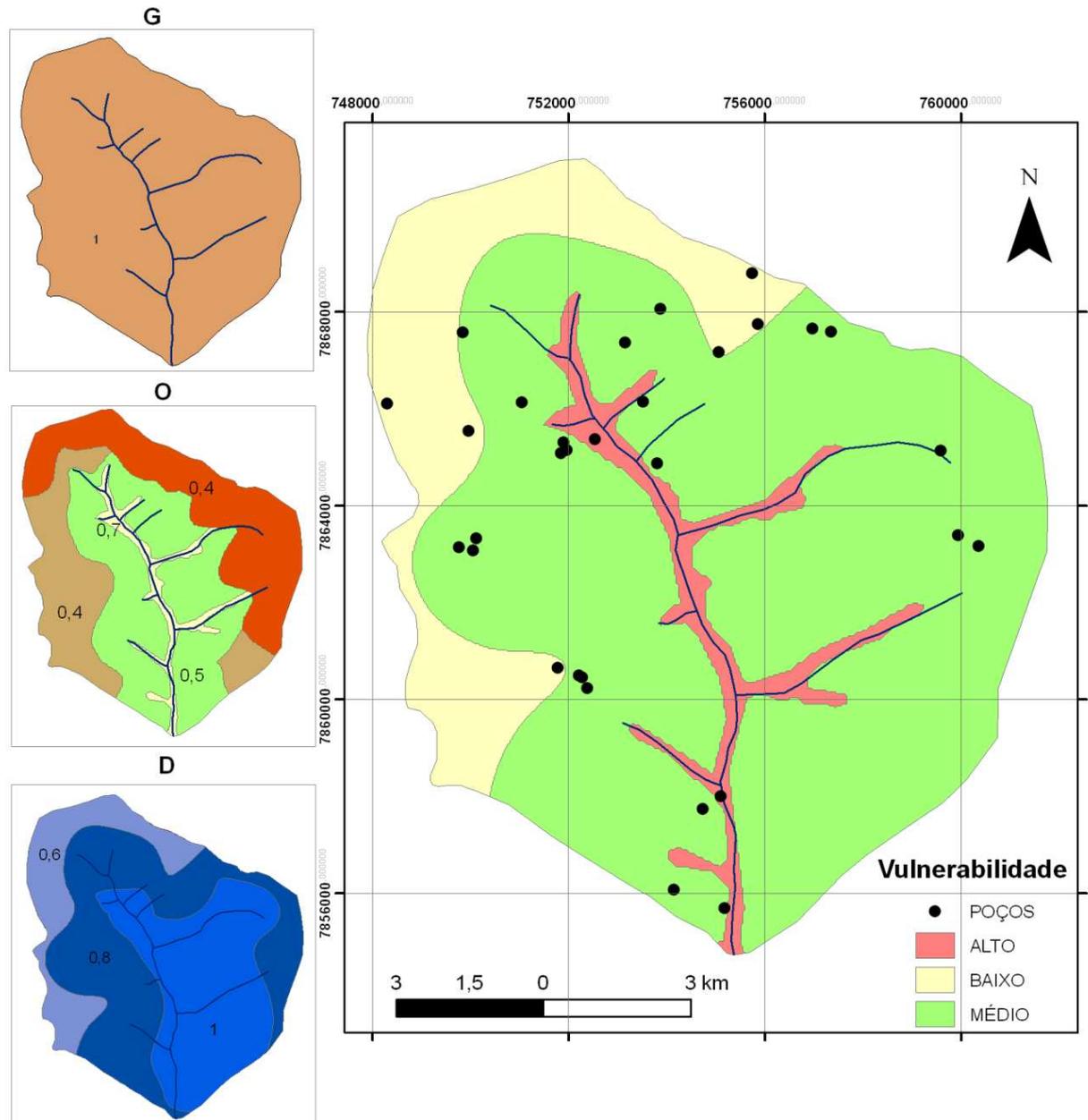


Figura 4. Mapa de vulnerabilidade intrínseca pelo modelo GOD, onde G é ocorrência do aquífero, O representa a litologia e D a distância da profundidade do lençol freático.

O modelo GOD aponta as áreas mais vulneráveis como aquelas que caracterizam as áreas úmidas. Estas áreas ocorrem onde o lençol freático é superficial, especialmente em áreas de nascentes, nas encostas e nos fundos dos vales, envolvendo as matas de galeria, e em solos hidromórficos, gleis e orgânicos turfosos (Ribeiro e Walter, 1998). Portanto, as áreas de veredas se desenvolvem em regiões nas quais o lençol freático é raso. Por esse motivo, serão distinguidas como mais vulneráveis devido à menor profundidade do nível freático.

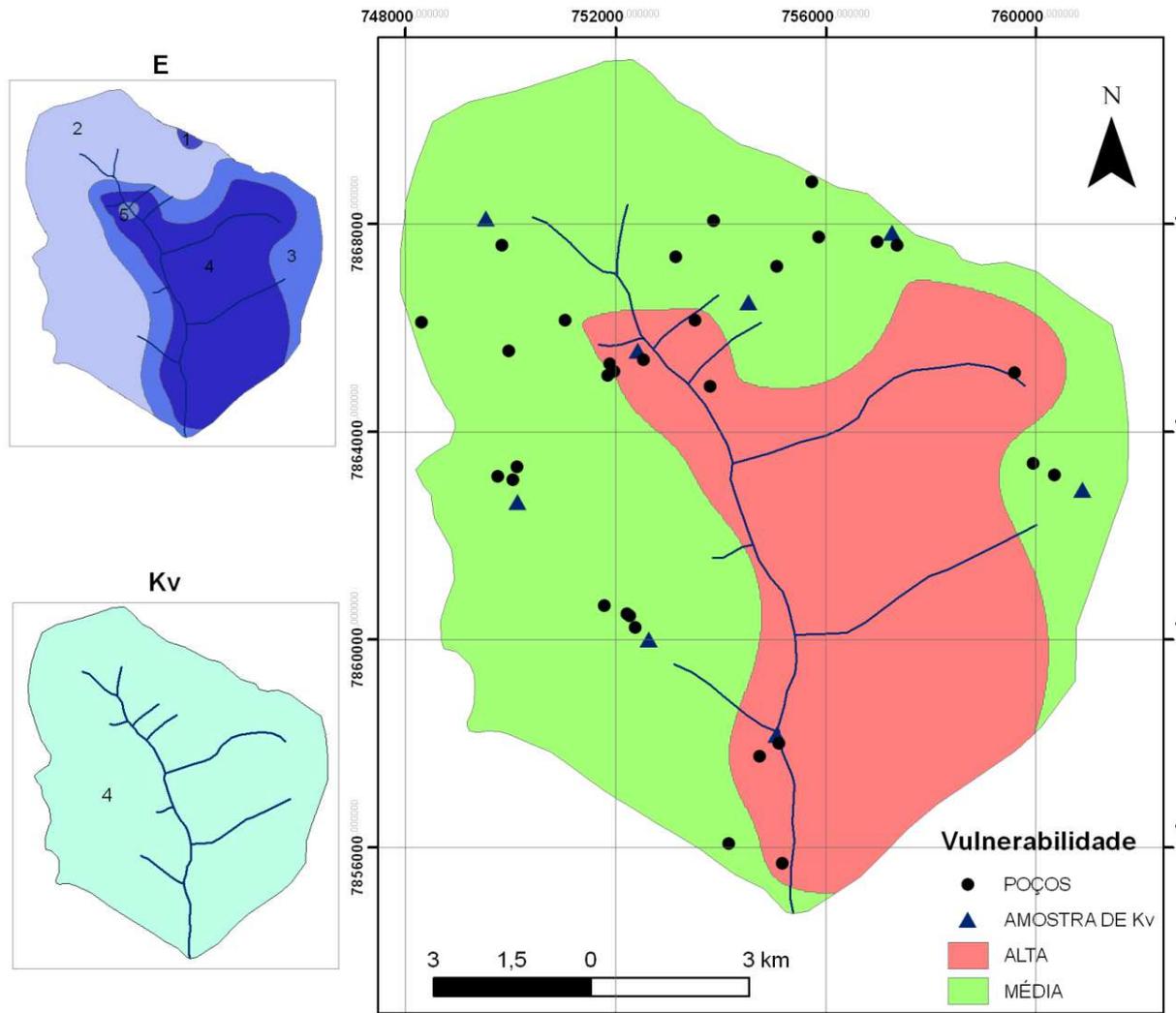


Figura 5. Mapa de Vulnerabilidade intrínseca pelo modelo EKv, onde E é a espessura da zona não saturada e Kv a condutividade vertical.

Já o modelo EKv indica como mais vulnerável as áreas que apresentaram a menor profundidade freática, essas não caracterizaram apenas na porção da rede hidrográfica e sim na parte centro – leste da bacia hidrográfica, proposto pelo modelo. A comparação entre o percentual de área vulnerável é demonstrado na figura 6.

O aquífero, em toda Sub-Bacia do Rio Coxim, é considerado livre, portanto, o grau de confinamento integrante do modelo GOD é homogêneo para toda área de investigação. Conseqüentemente, a modelagem da vulnerabilidade é determinada pelos parâmetros da espessura da camada não saturada e a Litologia. Entre esses, a profundidade ganha maior significância nos resultados devido à pequena variação do outro atributo (Pontes *et al.*, 2009). Já para o modelo EKv, a condutividade hidráulica vertical é a mesma para toda a área de estudo como observado, portanto, a espessura da camada não saturada é o parâmetro decisivo para a vulnerabilidade.

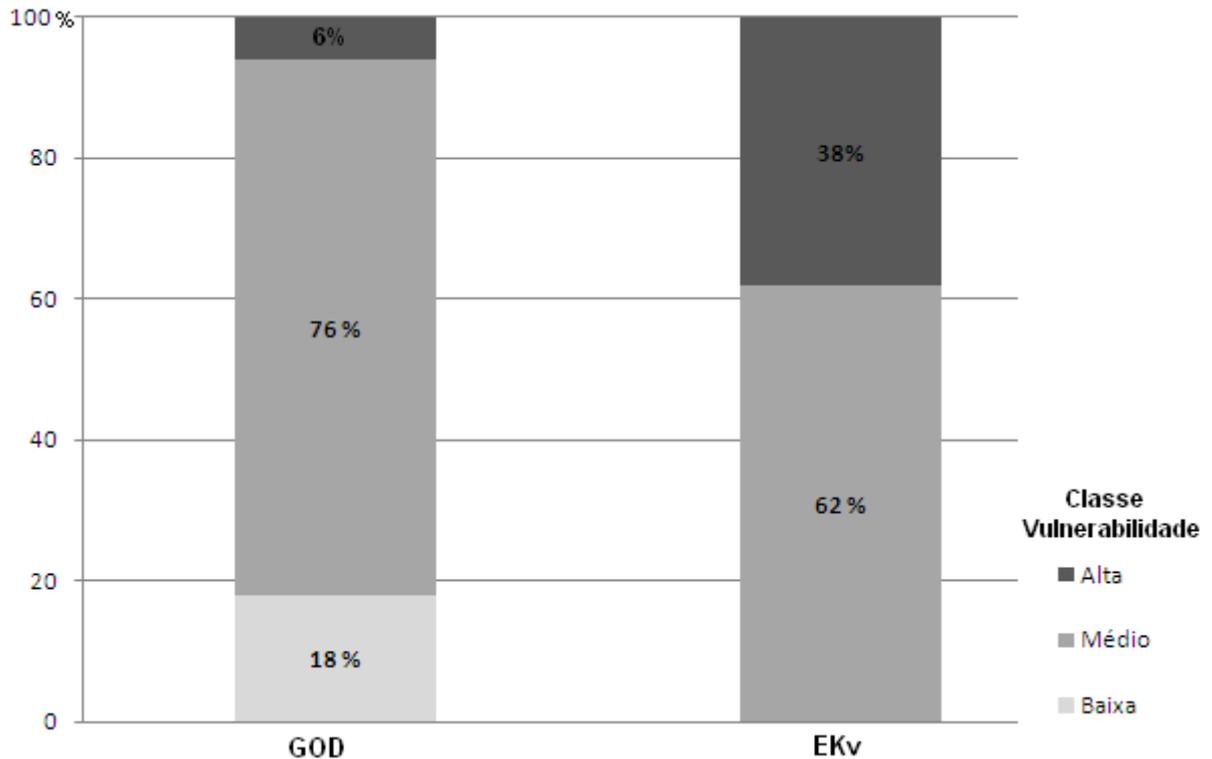


Figura 6. Gráfico de comparação das classes de vulnerabilidade entre GOD e EKv.

Ao confrontar os resultados dos modelos GOD e EKv, a vulnerabilidade média é de 76% e 62%, respectivamente. A espessura da zona não saturada é inversamente proporcional ao volume de chuva e a condutividade é diretamente proporcional ao volume infiltrado de chuva. Estas condições ressaltam que a modelagem do aquífero livre foi realizada no cenário de menor vulnerabilidade, pois as análises dos dados foram da estação seca do ano.

Constata-se que a modelagem da vulnerabilidade pelos dois modelos com o emprego do SIG, proporcionou um espaço eficiente para análise. De acordo com Margat *et al.* (2006), esta tecnologia é fundamental para o planejamento e a forma de gestão dos recursos naturais, em particular os recursos hídricos.

3.1. Avaliação entre a vulnerabilidade e as políticas públicas

O Município de São Gabriel do Oeste apresenta o Zoneamento Agroecológico (EMBRAPA, 2003) como um dos instrumentos para o planejamento ambiental. Diante disso, a Sub-Bacia do Rio Coxim encontra-se na zona denominada Chapadão de São Gabriel do Oeste, uma região representada pelo seu elevado potencial de uso agrícola. Os níveis de aplicação de insumos da agricultura mecanizada praticada nesse local viabilizam a redução dos desvios pela deficiência de nutrientes dessas terras. Logo, deve-se ter o cuidado no

emprego dos fertilizantes, pois a área em sua maior parte encontra-se na classe de média vulnerabilidade, conforme obtido pelos modelos utilizados, indicando a necessidade de atenção para a gestão do aquífero.

O Zoneamento do Município descreve o diagnóstico do meio físico apenas no enfoque da vulnerabilidade ambiental, a qual leva em consideração a estabilidade do meio através da aferição do balanço entre morfogênese e pedogênese, sendo possível qualificar a ecodinâmica das paisagens, conforme o princípio preconizado por Tricart (1977). Em nenhum momento o Zoneamento trata da vulnerabilidade do recurso hídrico subterrâneo, portanto aponta a necessidade de levar em consideração os aspectos intrínsecos do aquífero.

A Lei Federal nº 10.257, conhecida como o Estatuto das Cidades, (BRASIL, 2001) prevê o Plano Diretor como instrumento básico para orientar a política de desenvolvimento e de ordenamento da expansão urbana do município, portanto esses planos são norteadores para o desenvolvimento na esfera municipal atesta Fonseca e Matias (2013).

São Gabriel do Oeste, em seu Plano Diretor (2006), apresenta como objetivos da política de saneamento básico, a garantia do abastecimento de água potável. Sua política municipal de recursos naturais visa promover a conservação, proteção, recuperação e o uso racional do meio ambiente através de normas de incentivos e restrições ao uso e ocupação. Visando a sustentabilidade, como mecanismo de implementação desta política tem-se como uma das estratégias a criação do programa de estudo e proteção do lençol freático, considerando como destaque o Aquífero Guarani.

Além disso, a política de gestão municipal especifica que o planejamento deve ser dado através do Sistema de Informações Geográficas, por oferecer um ambiente com a integração e o tratamento dos vários dados espaciais de controle do Município, prevendo mapas de informações urbanas e rurais (Plano Diretor, 2006).

Entre as várias estruturas apresentadas no Plano Diretor, observa-se que o presente estudo vai ao encontro delas, uma vez que o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero interage com o gerenciamento no fornecimento de água potável, pois os poços são as principais fontes de abastecimento à cidade.

Outro quesito atendido, de forma direta, é o intercâmbio com o programa de estudo e proteção do lençol freático. Além disso, a análise da vulnerabilidade do aquífero foi implementada em SIG, onde os mapas de informações gerados no presente estudo serão disponibilizados para o Município de São Gabriel do Oeste, visando agregar a base de dados geoespacial municipal.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A modelagem da vulnerabilidade da Sub-Bacia do Rio Coxim por meio dos modelos propostos GOD e EKv utilizando um Sistema de Informação Geográfica, proporcionou um espaço eficiente na análise das características intrínseca do aquífero, desta forma o objetivo da pesquisa foi atingido.

O uso do SIG como ferramenta no desenvolvimento da metodologia é de grande importância e comprovou o que já se esperava a elevada capacidade de lidar com os dados espaciais. Observou-se para a área de estudo que o modelo EKv apresenta diferenciação apenas no parâmetro espessura da zona não saturada (E). Em contrapeso, o GOD apresenta distinção na litologia (O) e profundidade do lençol freático (D), resultando nas variações de peso que contribui para o resultado do índice final.

Os resultados obtidos revelam que para os dois modelos empregados a maior parte da área da sub-bacia enquadra-se como vulnerabilidade média. Logo, aponta a necessidade do desenvolvimento de políticas e ações públicas de gestão e proteção da água subterrânea, assim como, estudos de monitoramento dos riscos de contaminação e de qualidade das águas.

O mapeamento da vulnerabilidade das águas subterrâneas vai ao encontro das Políticas Públicas Ambientais, pois provoca de maneira concreta e direta o alcance de vários objetivos propostos no Plano Diretor, instrumento fundamental no alcance do desenvolvimento sustentável.

Faz-se a ressalva de que o diagnóstico do meio físico no Zoneamento Agroecológico do Município de São Gabriel do Oeste não aborda o tema. Portanto, sugere-se que a avaliação da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos deve ser tratada no Zoneamento a fim de se obter um planejamento de forma integral dos recursos naturais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBINET, M.; MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eausouterraine. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Series 3(4), p. 13-22, 1970.

Al HALLAQ, A. H.; ABUU ELAISH, B. S. Assessment of aquifer vulnerability to contamination in Khanyounis Governorate, Gaza Strip-Palestine, using the DRASTIC model within GIS environment. Arabian. Journal of Geosciences, v.5, p. 833-847, 2012.

ALLER, L. *et al.* Drastic: A standardized system for evaluating groundwater pollution potencial using hydrogeologic setting. United States: EPA, 1997.

AUGE M.; HIRATA R. Y. F.; LÓPEZ V. Vulnerabilidad a La contaminación con nitratos del Acuífero Puelche en la Plata – Argentina. CEAL. v. Inéd, 1 -201p., Madrid, 2003.

AUGE, M. Vulnerabilidad de Acuíferos. Revista Latino Americana de Hidrogeologia, n 4, p. 81-84, 2004.

BONHAM-CARTER G.F. Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS. Computer Methods in the Geosciences, v.13, p 98-116, 1996.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de Julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. DOU de 11/07/2001.

CAUDURO, F.A.; DORFMAN, R. Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem. Porto Alegre: PRONI/ IPH-UFRGS, 1986. 216p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Zoneamento agroecológico do município de São Gabriel do Oeste, MS: referencial para o planejamento, gestão e monitoramento ambiental. Rio de Janeiro, 2003.

ESRI – Environmental Systems Research Institute, Inc. ArcGIS Professional GIS for the desktop, version 9.2. Software, 2006.

FARJAD B., PIRASTEH, SHAFRI S., MOHD H. Z. B, WIJESKARA, MOHAMED N., AHMED T. Groundwater intrinsic vulnerability and risk mapping. Water Management, v.165, p 441-450, 2012.

FERREIRA, J. P. C. Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal. IV Congresso da Água. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, 1998.

FOSTER S, HIRATA R. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO-CEPIS, Lima, 1988.

FOSTER S, HIRATA R, GÓMEZ D, D'ELIA M, PARIS M. Ground water quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. The World Bank, Washington, DC, 104 p., 2002.

GASTMANS, D. Hidrogeologia e hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na porção ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP-Rio Claro, 238p., 2007.

IG/CETESB/DAEE. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. IG; CETESB, 129p., 1997.

LASTORIA, G.; GABAS, S. G.; BERGIER, I.; MIRANDA, C. de S.; de SOUZA, A.; SANTOS, T. H. L.; MACHADO, C. D. A gestão do SAG na borda oeste da bacia sedimentar do Paraná no Estado de Mato Grosso do Sul. Conferência Internacional Gestão do Sistema Aquífero Guarani. USP: São Paulo, SP. 2011b.

LE GRAND, H. System for evaluating contamination potential for some waste sites. American Water Work Association Journal. v.56 (8):p. 959-974, 1964.

MADAN KJ, CHOWDHURY A, CHOWDARY VM, PEIFFER S. Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints. Water Resour Manag , v. 21, p. 427–467, 2006.

MADAN K.J., CHOWDHURY A., CHOWDARY V.M., PEIFFER S. Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints. Water Resour Manag , v. 21:, p. 27–467, 2006.

MARGAT, J. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution [Contamination vulnerability mapping of groundwater]. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, p. 68, Orleans, 1968.

PCI GEOMATICS. Geomatica version 9.1. Ontário – Canadá. 2003. CD-ROM.

PONTES C. H. C, LASTORIA G., PARANHOS, A. C. F, GABAS, S. G, OLIVEIRA, P. T. S. Determinação da Vulnérabilidade do Aquífero Basáltico no Campus da UFMS, em Campo Grande – MS, *Águas Subterrâneas*, v.23, n.01, p.105-120, 2009.

RIBEIRO, M. D., ROCHA, W. F., GARCIA, A. J. V. Vulnérabilidade Natural à Contaminação dos Aquíferos da Sub-bacia Do Rio Siriri, Sergipe. *Águas Subterrâneas*, v.25, n.1, p.91-102, 2011.

RIBEIRO, J. F. & WALTER, B.M.T. Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: S.M. Sano & S.P. de Almeida (eds.). *Cerrado: Ambiente e Flora*. Planaltina, EMBRAPA-CPAC, p. 98-166, 1998.

TRICART, J. *Ecodinâmica*, Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, 91p, 1977.

WANG, J. HE, J. CHEN H. Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China. *Science of the Total Environment*, v. 432, p. 216-22, 2012.

WHO – World Health Organization. *Protecting groundwater for health – Managing the quality of drinkingwater sources*. 155p., 2006.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA PIEZOMETRIA DE AQUÍFERO

RESUMO: A informação sobre a superfície piezométrica das águas subterrâneas é necessária para a exploração de forma otimizada e sustentável. Este estudo tem por objetivo analisar a variabilidade espacial da piezometria em um sistema de aquíferos livres. A área de estudo compreende Sub-Bacia do Rio Coxim, localizada na porção central do Município de São Gabriel do Oeste e caracterizada pelo uso agrícola intensivo. Foram analisados dados da piezometria de 22 poços e o semivariograma teórico foi ajustado pelo modelo esférico. A validação cruzada foi usada para apurar a exatidão do modelo esférico proposto. Averiguou-se a existência de uma forte dependência espacial, um alcance de 16,5 km e uma superestimação da superfície da água subterrânea de 10% na krigagem, considerado um erro aceitável para a interpolação dos dados.

PALAVRAS – CHAVE: Geoestatística, Krigagem, Semivariograma

SPATIAL VARIABILITY ANALYSIS OF THE PIEZOMETRIC LEVELS THE GROUNDWATER

ABSTRACT: Informations about the piezometric surface of groundwater waters is needed in order to make the exploration sustainable and optimized. The aim of this study is to analyze the spatial variability of the piezometric levels of aquifer, being the study area a watershed of Coxim River basin in São Gabriel do Oeste, where the main land use is intensive farming. Piezometric level data from 22 different pits were analyzed and the theoretical semivariogram was observed, adjusted by the spherical model. We noticed that there is a spatial relationship of 16,5 km of range and a superestimation of 10% in the Groundwater surface in the kriging. The cross-validation was used to verify the accuracy of the proposed spherical model.

KEY-WORDS: Geostatistics, kriging, semivariogram

1. INTRODUÇÃO

A compreensão do comportamento da água subterrânea feita através da superfície piezométrica é essencial para se tomar qualquer decisão na gestão de uma dada bacia hidrográfica, pois determina o fluxo da água nos aquíferos (Reghunath *et al.*, 2005). A identificação da piezometria é realizada por parâmetros coletados em campo seguido da modelagem.

A modelagem de variáveis ambientais requer, na maioria das vezes, a estimativa de valores não amostrados, sendo necessário o emprego de métodos de interpolação. O método de Krigagem foi desenvolvido pelo engenheiro de minas sul-africano Daniel G. Krige que, ao trabalhar com dados de concentração de ouro, concluiu que somente a informação dada pela variância seria não seria suficiente para explicar o fenômeno em estudo.

Assim sendo, deve-se levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surge o conceito da geoestatística, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial (Lourenço, 2002).

O princípio da Krigagem é estimar valores não conhecidos obtidos por meio da combinação de valores amostrados adjacentes àquele que se deseja obter, levando-se em consideração, no modelo, a estrutura de variação espacial. Isto pressupõe a existência de correlação entre os dados, exigindo saber até onde espacialmente esta correlação importa (Isaaks e Srivastava, 1989). Através do semivariograma encontram-se os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto (Porto *et al.*, 2011).

A Krigagem apresenta-se como uma ferramenta importante em diversos estudos, como no trabalho de Ribeiro *et al.* (2011) que utilizam a Krigagem para a interpolação dos dados do nível estático na aquisição da distância do nível da água subterrânea, parâmetro do método de avaliação da vulnerabilidade do aquífero GOD (Foster e Hirata, 1988).

Bogaert (1996), Pokrajac *et al.* (2003) relatam a aplicação da Krigagem na avaliação da dependência espacial e temporal de vários parâmetros. Theodossiou e Latinopoulos (2007) interpolaram, por Krigagem, os níveis das águas subterrâneas em uma bacia hidrográfica do norte da Grécia e utilizaram a validação cruzada para estimar a exatidão dos valores interpolados.

Na investigação da dependência espacial é necessário conhecer o semivariograma por este ser o responsável pela representação desta dependência, definida como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores das amostras que estão separadas por

certa distância entre elas (Miranda, 2005). De acordo Landim (2003), a obtenção do semivariograma dos dados reais, ou mesmo dos resíduos, é de fundamental importância nos estudos da geoestatísticos e faz parte da chamada análise estrutural.

A análise espacial pode ser aplicada à compreensão de diversos fenômenos, como agricultura de precisão, imagens de satélite ou digitais, aplicações geofísicas, em agronomia, em mineração e em geologia, hidrogeologia, estudos ecológicos de comunidades de plantas, dentre outros.

No Município de São Gabriel do Oeste a escassez de dados piezométricos é uma realidade, assim como em muitos outros municípios brasileiros. Esses dados são importantes parâmetros de análise para a obtenção de melhorias no uso e aproveitamento dos recursos hídricos.

Desse modo, pretende-se neste trabalho realizar uma análise estrutural para descrever a variabilidade espacial da piezometria baseada na função do semivariograma, com o intuito de efetuar uma estimativa de valores em locais não amostrados. Para o alcance do objetivo proposto foi utilizado a Krigagem sendo uma operação mais complexa que leva em consideração a tendência dos valores conhecidos na vizinhança de cada ponto a ser estimado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a Sub-Bacia do Rio Coxim, a qual possui 15.642 hectares. Localiza-se na porção central do Município de São Gabriel do Oeste, Mato Grosso do Sul, e desempenha atividade socioeconômica relevante para o Município, uma vez que ganha destaque na produção agrícola e por abrigar um assentamento com aproximadamente 130 famílias.

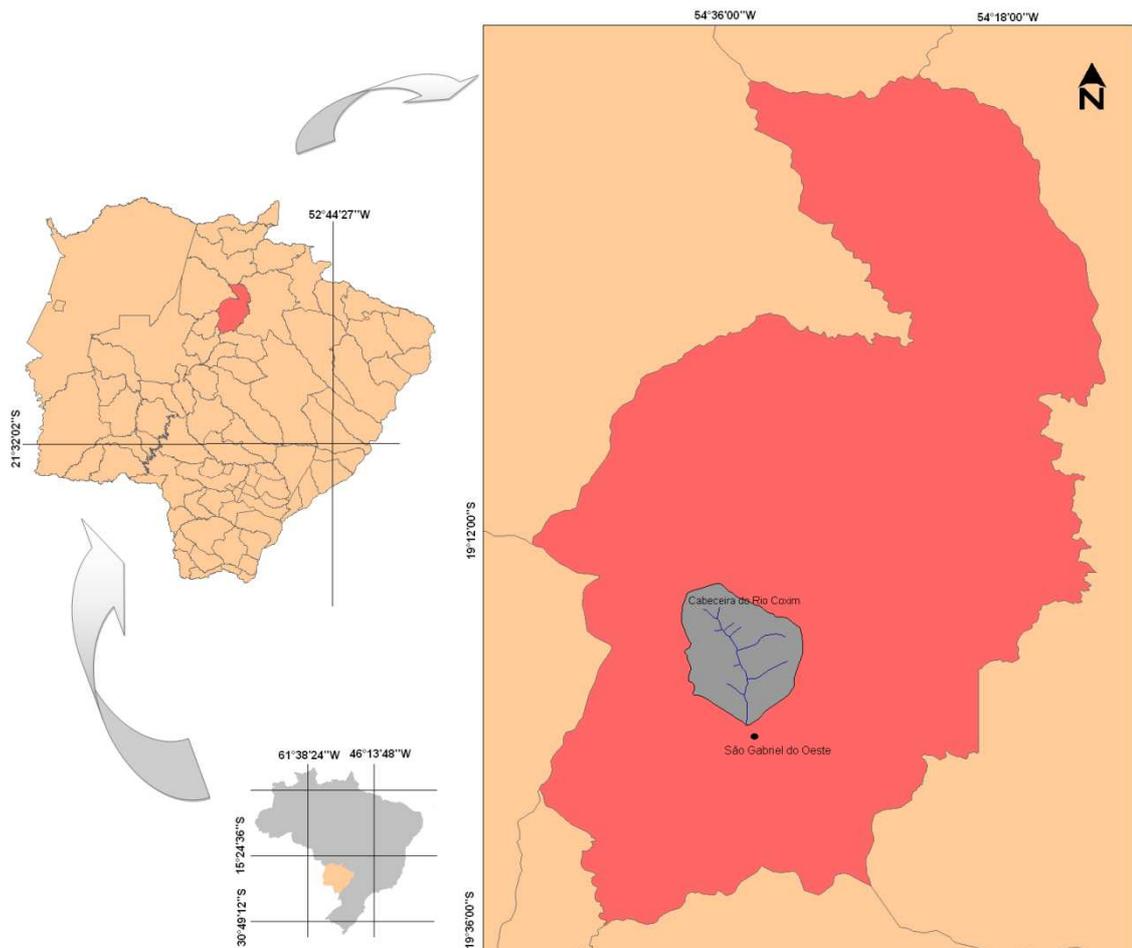


Figura 1: Localização da sub-bacia do Rio Coxim, dentro do Município de São Gabriel do Oeste.

2.2. Obtenção dos Dados de Piezometria

Os dados utilizados na integração da piezometria foram obtidos em campanha de campo, sendo que a amostragem dos 22 poços foi realizada no período de seca (mês de setembro) de maneira aleatória, esses estão localizados no interior das propriedades rurais. Com o auxílio de um GPS diferencial foram aferidas as altitudes geométricas dos poços e levantados os seus dados de posicionamento. Como as altitudes geométricas são referidas ao elipsóide, foi necessário transformá-las para altitudes ortométricas, referidas ao nível médio do mar. Entretanto, para a realização desse processo é indispensável o conhecimento da ondulação geoidal (N).

Assim, após o processamento dos dados coletados em campo no *software* Ashtech Solutions (Thales Navigation, 2002), as altitudes foram então corrigidas para os valores

ortométricos (H) através do modelo de ondulação geoidal (IBGE, 2010), no qual a altura ortométrica (H) é o resultado da subtração entre a altura elipsoidal e a ondulação geoidal (N).

Utilizando uma sonda elétrica identificou-se o nível estático dos poços selecionados. Assim, o resultado da subtração da altitude ortométrica e o nível estático é a piezometria, dado de entrada na Krigagem a fim de se obter o mapeamento.

2.3. Análise Estatística

A geoestatística não se refere a um tipo especial ou mesmo excluído da estatística, mas pode ser considerada uma extensão que trata de cada parâmetro, não apenas pelo seu valor, mas também sua posição espacial, expressa por um sistema de coordenadas, considerando a dependência espacial das observações em pontos referenciados (Lima *et al.*, 2006).

Portanto, é uma técnica de manipulação de dados espacialmente distribuídos, tais como granulometria do solo, distribuição da poluição no ambiente e nível piezométrico das águas subterrâneas (Delgado *et al.*, 2010; Gokalp *et al.*, 2010). Seu uso tem como finalidade a modelagem de certo fenômeno através da utilização de abordagens probabilísticas fundamentadas em métodos estatísticos para mapeamento de dados distribuídos no espaço.

Os dados piezométricos foram analisados em cinco etapas. Primeiramente identificou-se a condição da normalidade dos dados através do teste de Kolmogorov-Smirnov com uso do *software* BioEstat 5.0 (Ayres *et al.*, 2007). Para a verificação da hipótese de normalidade são utilizados testes gráficos e analíticos. O método analítico proposto é o Kolmogorov-Smirnov, o qual consiste na comparação das frequências acumuladas observadas e as calculadas pela distribuição normal.

No segundo passo, avaliou-se a estatística descritiva a fim de se observar algumas características do conjunto de dados, como média aritmética, mediana, desvio padrão, assimetria, mínimos e máximos. A terceira etapa considerou o modelo que melhor se enquadrasse na descrição do semivariograma a fim de se observar a dependência espacial entre as observações vizinhas no *software* GS+ (Robertson, 1998). Em seguida, realizou-se a validação cruzada para verificar a exatidão do modelo. A última etapa foi a interpolação com o uso da Krigagem para estimar a superfície piezométrica do aquífero utilizando o *software* Geomatica Focus (PCI, 2003).

A análise estrutural é obtida, em geral, por meio do semivariograma (Guerra, 1988). Os parâmetros observados no semivariograma e utilizados para a integração da krigagem são: o efeito pepita (Co), sendo o valor da função do semivariograma na origem, representando o

valor da descontinuidade; a semivariância estrutural (C), que representa a diferença entre o patamar e o efeito pepita; o patamar (C + Co), que indica o ponto a partir do qual as amostras tornam-se independentes por causa da distância que as separam; e o alcance (a), sendo a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes, refletindo o grau de homogeneização (Isaaks e Srivastava, 1989).

O estimador da função semivariância proposto por Matheron (1963) para variáveis regionalizadas com distribuição normal de probabilidade é apresentado na equação 1:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) + Z(x_i + h)]^2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde: $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ indica a magnitude da variável e são separados por uma distância h e x_i , uma posição espacial da variável Z .

O semivariograma teórico, isto é, o modelo matemático que descreve o semivariograma experimental é ajustado pelo método de mínimos quadrados, entre os modelos exponencial, esférico e gaussiano.

A escolha dos modelos leva em consideração três parâmetros: o coeficiente de determinação (r^2), que indica quantos dos pontos do semivariograma experimental encontram-se na curva do modelo teórico, (Robertson, 1998); a soma dos quadrado dos erros (RSS), a qual determina o ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental, sendo que quanto menor o valor de RSS, melhor o ajuste (Zimmerman e Zimmerman, 1991); e o grau de dependência espacial pelo Índice de Dependência Espacial (IDE) proposto por Zimback (2001).

O IDE utiliza a relação entre a semivariância estrutural e o patamar. Quando seu valor for menor que 25% a correlação é considerada fraca; entre 25 e 75% é moderada; e maior que 75% possui forte correlação (Zimback, 2001)

A veracidade do modelo na interpolação foi testada através da técnica de validação cruzada, a qual se baseia em comparar valores reais com os do resultado de interpolação, o que permite avaliar se o modelo escolhido na interpolação garante previsão precisa (Leuangthong *et al*, 2004). Para Landim (2003), a validação cruzada é uma importante técnica para ponderar o ajuste do semivariograma, porém não comprova que o modelo escolhido é o mais correto nem inteiramente correto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov revelou, ao nível de 95% de probabilidade, que os dados analisados apresentam distribuição normal, havendo simetria uma vez que o coeficiente de assimetria é próximo do zero, implicando valores de média e mediana semelhantes. Atestando o que a técnica de Krigagem supõe que os dados apresentam distribuição normal de frequências, uma vez que a técnica utiliza valores médios para as estimativas (Porto *et al*, 2011).

Destaca-se que, além da normalidade, os dados satisfazem a condição de estacionaridade, havendo a existência da ocorrência do efeito proporcional em que a média e a variância sejam constantes na área de estudo. Para isso, a variável deve apresentar certa homogeneidade em suas características estatísticas e as correlações presentes nela permaneçam para as mesmas distâncias, levando-se em conta a escala (Bettini, 2007).

Os resultados da estatística descritiva são mostrados na Tabela 1. Verifica-se que as medidas de tendência central são próximas entre si e que a diferença entre o valor máximo e mínimo resulta na variação de cota piezométrica de 116 metros.

Tabela 1. Análise estatística dos conjuntos de dados analisados da piezometria.

Média Aritmética	Mediana	Desvio Padrão	Assimetria	Mínimo	Máximo
676.90	674.33	30.20	0.69	626.07	742.16

O modelo de ajuste ao semivariograma é o esférico, obtendo-se valores do efeito pepita (C_0), semivariância estrutural (C), patamar (a) e coeficiente de determinação (r^2) (Figura 2). Por meio do semivariograma é possível descrever, tanto qualitativa como quantitativamente, a variação espacial e obter os parâmetros que determinam a krigagem.

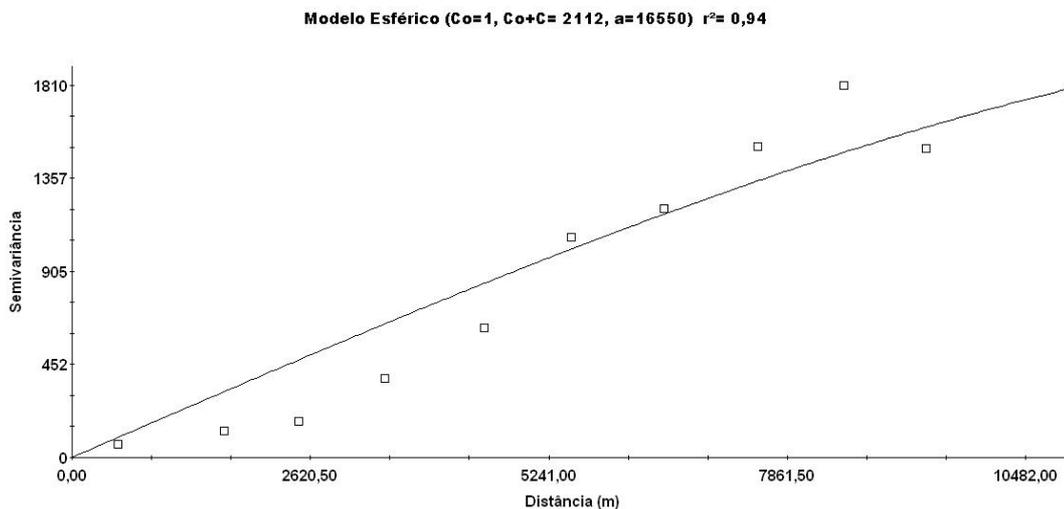


Figura 2. Semivariograma ajustado ao modelo esférico.

Apreciou-se o semivariograma omnidirecional, levando em consideração, assim, o caso de isotropia na medição da superfície do nível do lençol freático do aquífero (Ahmadi e Sedghamiz, 2007). Na elaboração do semivariograma levou-se em consideração um ângulo de 0° e tolerância angular de 90° , e adotou-se um espaçamento de 80% em relação à máxima distância de separação entre os dados, com tolerância de 9.5%, cerca de 1.0 km.

A garantia da estacionaridade é verificada com a existência do patamar (Vieira e Lombardi Neto, 1995). O efeito pepita obtido, demonstra boa continuidade entre valores vizinhos. O alcance de aproximadamente 16.5 km indica que todos os vizinhos, localizados dentro de um círculo com este raio, são semelhantes uns aos outros e podem ser utilizados na estimativa de valores para qualquer ponto entre eles.

A dependência espacial é classificada como forte por atingir um IDE de 100%, o que se justifica o uso da técnica de interpolação empregada. Os valores obtidos, com o uso da krigagem são não tendenciosos e com a mínima variância na categoria dos estimadores lineares (Montebeller *et al.*, 2007). Ainda segundo Bettini (2007), nos pontos observados a Krigagem é exata.

A visualização do produto final sob a forma de mapa melhora a compreensão dos resultados estatísticos. Do mesmo modo, a Krigagem apresenta-se como ferramenta vantajosa e capaz de gerar a superfície do piezômetro em forma de mapa (Figura 3).

Ao se avaliar o modelo digital da superfície piezométrica, percebe-se que a direção do fluxo da água subterrânea é preferencialmente na direção norte para o sul, seguindo tendência central. Outra observação é que a água do aquífero cursa toda a área da sub-bacia para abastecer a região sul da mesma, onde se localiza a malha urbana do Município de São Gabriel do Oeste. Portanto, destaca-se a importância de se controlar as atividades potencialmente poluidoras na Sub-Bacia do Rio Coxim, pois, em caso de contaminação, o fluxo do recurso hídrico subterrâneo irá atingir as regiões de captação urbana. Como resultado da validação cruzada, tem-se o coeficiente de regressão (R^2) de 0.85, indicando a proporção de simetria entre a reta de 45° , pontilhada no gráfico, e a obtida pelos valores estimados versus reais da piezometria. Já o coeficiente angular é igual a 1.12, sendo que para um ajuste perfeito esse coeficiente deve ser igual a 1.

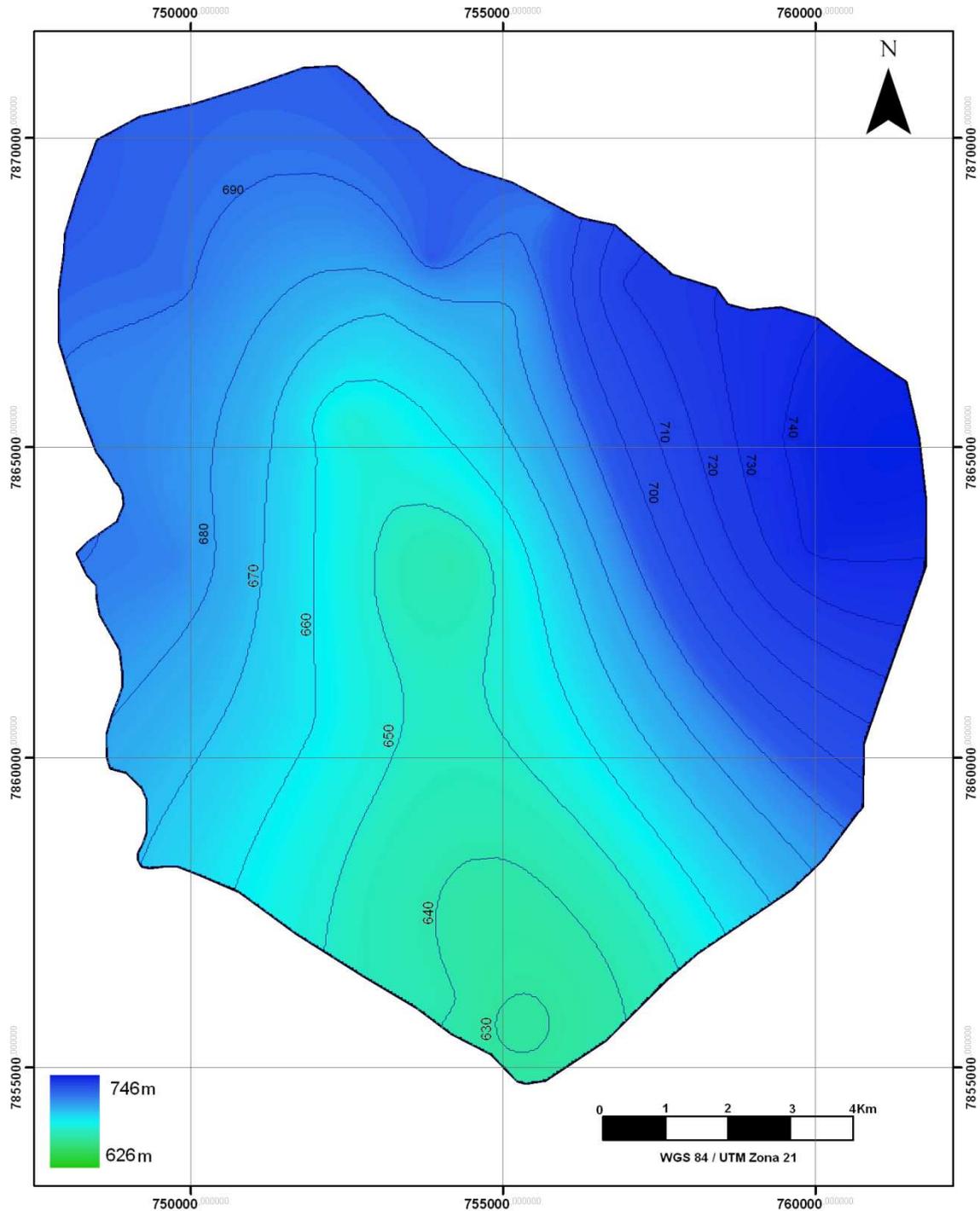


Figura 3. Mapa da piezometria da sub-bacia do rio Coxim, MS.

Com o resultado alcançado enfatiza-se o papel da geostatística na gestão e sustentabilidade dos recursos hídricos regionais (Demir *et al*, 2009; Zhou *et al*, 2011). A verificação do ajuste adequado do modelo para a interpolação por meio da validação cruzada é visualizada na Figura 4.

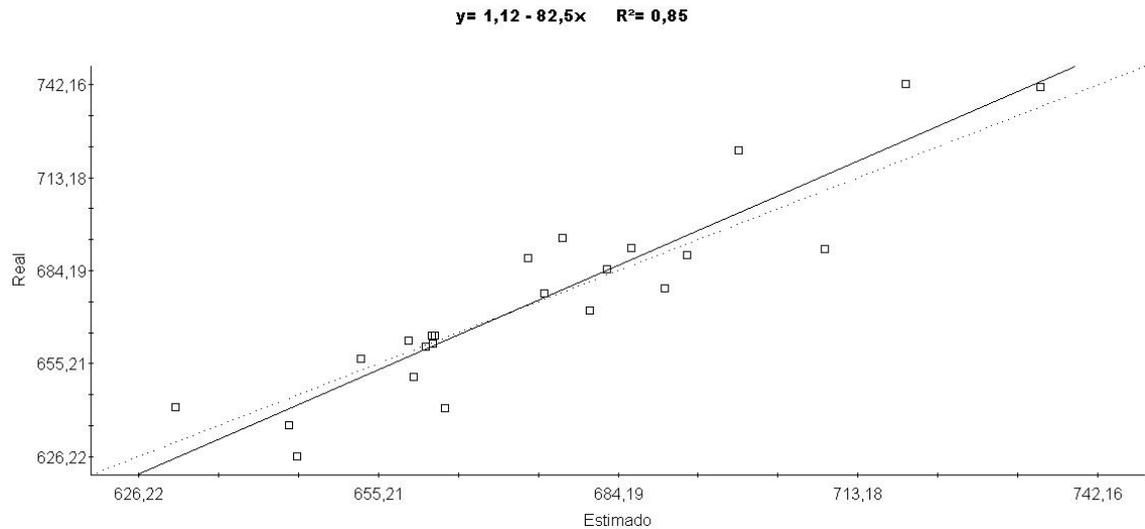


Figura 4. Gráfico de validação cruzada referente ao modelo esférico proposto.

Verifica-se que para os 22 pontos de controle o erro médio quadrático é de 12 metros e uma superestimação da superfície da água subterrânea em 10%, sendo esses erros aceitáveis para o Padrão de Exatidão Cartográfica na escala trabalhada de 1:100.00 (Brasil, 1984).

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Verificou-se, por meio da análise do semivariograma, que é viável a aplicação da Krigagem na elaboração do modelo da piezometria. Através da interpretação do mapa de piezometria pode-se concluir que, o fluxo da água subterrânea percorre toda a sub-bacia e tem direção de N-S com tendência central, e a variação de cota piezométrica de 116 metros. Portanto na área de estudo são necessárias práticas de conservação para garantir a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

A avaliação do semivariograma é a base para o estudo de variabilidade espacial. A dependência espacial foi classificada como forte, validando a aplicação da krigagem na interpolação dos dados que foi superestimado em 10%, erro aceitável, o que convalida a aplicação da krigagem na interpolação dos dados e destaca a importância da modelagem do semivariograma na utilização da interpolação por meio dos programas computacionais específicos.

O trabalho demonstra a importância da integração de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) com procedimentos geoestatísticos na interpolação de dados espacialmente distribuídos, consolidando-se como uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, S. H. SEDGHAMIZ, A. Geostatistical Analysis of Spatial and Temporal Variations of Groundwater Level. *Environ Monit Assess*, v. 129, p. 277–294, 2007.

AYRES, M.; AYRES JUNIOR, M.; AYRES, D.L.; SANTOS, A.S. *BioEstat 5.0: Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas*. Belém: Sociedade Civil Mamiraua/CNPq, 380p. 2007.

BETTINI, C. Conceitos básicos de Geoestatística. In: MEIRELLES, M. S. P.; CÂMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Ed.). *Geomática: modelos e aplicações ambientais*. Brasília: Embrapa, cap. 4, p. 193-234, 2007.

BOGAERT, P. Comparison of kriging techniques in a space-time context. *Mathematical Geology*, v. 28, p. 73–86, 1996.

BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de Junho de 1984. Estabelece as Instruções Regulamentadoras das Normas Técnicas da Cartográfica Nacional. *Diário Oficial da União* de 27 de Jul de 1984.

DELGADO, C., PACHECO, J., CABREA, A., BALTLORI, E., ORELLANA, R., BAUSTISTA, F. Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment; the case of Yucatan, Mexico. *Agricultural Water Management*, v. 97, p. 1423–1433, 2010.

DEMIR, Y., ERS, AHIN, S., GULER, M., CEMEK, B., GUNAL, H., ARSLAN, H. Spatial variability of depth and salinity of groundwater under irrigated ustifluvents in the Middle Black Sea Region of Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, v.158, p.279–294, 2009.

GOKALP, Z., BASARAN, M., UZUN, O., SERIN, Y. Spatial analysis of some physical soil properties in a saline and alkaline grassland soil of Kayseri, Turkey. *African Journal of Agricultural Research*, v.5 (10), p.1127–1137, 2010.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. MAPGEO2010 - Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal, software versão 1.0. Junho, 2010.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press, 561 p., 1989.

LEUANGTHONG, O., MCLENNAN, J. A., & DEUTSCH, C. V. Minimum acceptance criteria for geostatistical realizations. *Natural Resources Research*, v.13, p.131–141, 2004.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Econ. Geol.*, v.58, p.1246-66, 1963.

MIRANDA, J. I. Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 425p., 2005.

MONTEBELLER, C.A.; CEDDIA, M.B.; CARVALHO, D.F.; VIEIRA, S.R.; FRANCO, E.M. Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no Estado do Rio de Janeiro. *Engenharia Agrícola*, v.27, n.2, p.426-435, 2007.

LANDIM, P.M.P. Análise estatística de dados geológicos. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 253 p, 2003.

LIMA, J. S. S; SILVA J. T. O; OLIVEIRA, R. B; ALMEIDA, V. S; VANZO, F.L. Estudo da viabilidade de métodos geoestatísticos na mensuração da variabilidade espacial da dureza da madeira de Paraju (*Manilkara* sp). *Revista Árvore*, Viçosa –MG, v.30, n.4, p.651-657, 2006.

LOURENÇO W. R. Modelagem geoestatística por geoprocessamento em uma área da baixada santista. Rio Claro: Instituto de Geociência e Ciência Exata, 2002, 213p. Tese Doutorado.

POKRAJAC, D., HOSKINSON, R. L., & OBRADOVIĆ, Z. Modeling spatial–temporal data with a short observation history. *Knowledge and Information Systems*, v.86, p.368–386, 2003.

PORTO, A. L.; SOARES, J. A.; MONTEIRO V. E. D. Otimização da malha de amostragem de compostos orgânicos voláteis no solo através de Krigagem. *Águas Subterrâneas*, v.25, n.1, p.57-73, 2011.

REGHUNATH, R., SREEDHARA MURTHY, T. R., & RAGHAVAN, B. R. Time series analysis to monitor and assess water resources: A moving average approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, v.109, p.65–72, 2005.

RIBEIRO, M. D.; ROCHA, W. F; GARCIA, A. J. V. Vulnerabilidade Natural À Contaminação dos Aquíferos a Sub-bacia do Rio Siriri, Sergipe. *Águas Subterrâneas*, v.25, n.1, p.91-102, 2011.

ROBERTSON, G.P. *GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ users guide*. Plainwell, Gamma Design Software, 152p. 1998.

THALES NAVIGATION. *Ashtech Solutions 2.60*. Santa Clara – USA 2002. CD-ROM

THEODOSSIOU, N., LATINOPOULOS, P. Evaluation and optimisation of groundwater observation networks using the Kriging methodology. *Environmental Modelling & Software*, v.21 (7), p.991–1000, 2007.

VIEIRA, S.R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. *Bragantia*, v.54, n.2, p.405-412, 1995.

ZHOU, Z., ZHANG, G., YAN, M., WANG, J.. Spatial variability of the shallow groundwater level and its chemistry characteristics in the low plain around the Bohai Sea, North China. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 184, p. 3697-3710, 2011.

ZIMBACK, C.R.L. *Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. (Livre-Docencia em Levantamento do Solo e Fotopedologia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 114p., 2001.*

ZIMMERMAN, D.L., ZIMMERMAN, M. B. A comparison of spatial semivariogram estimators and corresponding ordinary kriging predictors. *Technometrics*, v. 33, p. 77-91, 1991.

CONCLUSÃO GERAL

Nota-se que o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero livre é ferramenta básica de proteção ambiental, a fim de evitar a contaminação das águas subterrâneas, além de ser imperativo para o desenvolvimento de políticas e ações públicas de gestão recursos hídricas subterrâneos, aliados a um monitoramento da qualidade das águas.

A modelagem da vulnerabilidade, pelos dois modelos propostos, utilizando um Sistema de Informação Geográfica, proporcionou um espaço eficiente para a análise das características naturais do aquífero livre, localizado na sub-bacia do rio Coxim. O fator determinante para a escolha dos modelos empregados foi o acesso às informações necessárias, para integrar os índices dos modelos.

A avaliação do grau de proteção natural do aquífero à contaminação mostra que para o modelo GOD, a área enquadra-se com 6% baixa, 76% média e 18% alta vulnerabilidade. Já para o modelo EKv, foram constatado que a sub-bacia é classificada em apenas duas classe, 62% como média e 38% como baixa vulnerabilidade.

Ainda segundo a classificação obtida pelo modelo GOD, as áreas próximas a drenagem são mais vulneráveis a contaminação, esse fato era de esperar-se, pois são áreas em que há uma menor profundidade do lençol freático e está coberta pela litologia mais suscetível.

O parâmetro que determina a modelagem pelo método EKv, é a distância do lençol freático. Esse determina que a porção sudeste da área de estudo é enquadrada como alta vulnerabilidade. A maior parte da área de estudo é enquadrada pelos dois modelos como média vulnerabilidade, indicando a necessidade da atenção para a proteção da água subterrânea, nessas faixas de menor grau de proteção natural do aquífero.

A avaliação do nível e do fluxo da água subterrânea foi dada pelo mapeamento da piezometria. Para, tanto, aplicou-se a geoestatística, a fim de conhecer o semivariograma, constatando-se uma forte dependência espacial entre as amostras. Assim, evidência a possibilidade da interpolação dos valores usando a krigagem que, junto à validação cruzada, resultou em estimativas aceitáveis da superfície piezométrica.

Conclui-se que os estudos de vulnerabilidade e da superfície piezométrica, são ferramentas de gestão que auxiliam os tomadores de decisão, na busca de uma gestão eficiente, com base na conservação dos recursos hídricos e no desenvolvimento sustentável.