

APLICAÇÃO DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E MODELO MATEMÁTICO NA PROTEÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CENTRE WELLINGTON, ONTÁRIO, CANADÁ

Michael Wolfgang Kohnke¹; Nilson Guiguer¹ & Paul Martin¹

Resumo – Neste estudo foi desenvolvido um modelo hidrogeológico e um modelo matemático de fluxo para o Município de Centre Wellington para compreender melhor as interações entre fluxos locais e regionais e sua influência sobre as zonas de captura e respectivos perímetros de proteção de poços. A metodologia empregada neste estudo reconhece a importância da geologia e estrutura dos aquíferos para a determinação do fluxo das águas subterrâneas e dos caminhos de transporte de contaminantes. Os resultados das simulações demonstram que o sistema aquífero permite no mínimo uma duplicação do volume atualmente bombeado na área. O estudo de vulnerabilidade de aquíferos e dos perímetros de proteção de poços fornece às autoridades um mapa que permite proteger de maneira mais eficiente os recursos hídricos subterrâneos da região. As simulações de cenários de contaminação indicam que nitratos e cloretos injetados à superfície atingem principalmente o aquífero superior. O aquífero inferior possui concentrações muito baixas de cloretos e nitratos devido à proteção fornecida pelo aquitarde que separa os dois aquíferos.

Abstract – A regional model of the hydrogeologic setting and a numerical groundwater flow model has been developed for Centre Wellington Township to better understand interactions of local and regional flow systems, and its potential impact on wellhead capture zone delineation. The approach followed in this study recognizes the importance of geologic structure on determining groundwater flow and contaminant transport pathways. Simulations for capture zone delineation and additional water taking show that it is possible to at least double current pumping rates. An assessment of aquifer vulnerability was also completed. Overlaying capture zones and aquifer vulnerability maps provided a basis for future municipal planning efforts to ensure groundwater protection. Other predictive scenarios included contamination through agricultural practices (nitrate) and de-icing measures (chloride). It was shown that only the Bedrock Contact Aquifer receives significant amounts of nitrate and chloride. The Deep Bedrock Aquifer remains free from these contaminants.

Palavras-chave – perímetros de proteção de poços, SIG, modelos numéricos

¹ Waterloo Hydrogeologic Inc.; 101-460 Phillip Str., N2L5J2; Waterloo; Ontario; Canadá; (519) 746-1798; (519) 885-5262; nguiguer@flowpath.com; mkohnke@flowpath.com

1. INTRODUÇÃO

O estudo apresentado nesta publicação (*Centre Wellington Groundwater Study*) foi financiado pelo fundo de proteção aos recursos hídricos de Ontario, Canada (*Ontario Provincial Water Protection Fund*). Este fundo foi criado para garantir a longo prazo a proteção e o uso sustentável dos recursos hídricos do estado de Ontário, através do desenvolvimento de um plano de gestão dos recursos hídricos.

1.1. Aspectos Gerais

Quase toda população (21000 habitantes) do Município de Centre Wellington depende das águas subterrâneas como fonte de água potável. A previsão é que esta população irá crescer bastante nos próximos 25 anos, principalmente nas áreas limítrofes às cidades de Fergus e Elora. Ambas são cortadas pelo rio Grand River, que é o maior rio da região. O *Grand River* encravou-se em rochas dolomíticas, formando um vale escarpado, atravessando a região de norte a sul. Na região foi identificado um paleovale do Grand River, que encontra-se preenchido por tilitos, areias e cascalhos. As autoridades tem verificado a viabilidade de se instalar poços de extração no seu trajeto devido à sua grande capacidade hídrica.

As populações de Elora e Fergus são abastecidas atualmente respectivamente por 2 poços (1734 m³/dia) e 5 poços (4974 m³/dia) municipais, além de poços particulares, cujo número tem aumentado constantemente. O aumento desta exploração de água subterrânea têm causado concorrência na exploração dos recursos hídricos.

Fergus e seus arredores abrigam algumas indústrias antigas e tem sido reportados casos de contaminação das águas subterrâneas. Além destas fontes pontuais de contaminação ainda existem na área fontes difusas, sendo a agricultura (nitrato) e a utilização de sal para derreter o gelo (cloreto) as duas principais atividades responsáveis por esta contaminação.

1.2. Objetivos

Os principais objetivos deste estudo podem ser resumidos como sendo a investigação dos recursos hídricos subterrâneos da área, o entendimento de sua distribuição e dos processos de interação existentes, a identificação de ameaças à sua integridade e a orientação quanto a sua utilização futura. O modelo matemático desenvolvido permitiu:

- Caracterizar regionalmente os aquíferos e aquitardes.
- Definir e quantificar os componentes do balanço hídrico determinando áreas de recarga e descarga.
- Delinear zonas de captura e perímetros de proteção de poços em Fergus e Elora.
- Definir áreas propícias à instalação de novos poços para incrementar a exploração.

- Determinar áreas mais vulneráveis à contaminação superficial.
- Entender o impacto causado aos aquíferos por fontes difusas (nitrato e cloreto).
- Caracterizar a recarga do *Grand River* por águas subterrâneas.

1.3. Metodologia

A principal fonte de informações para a execução deste estudo foi o banco de dados de poços do Ministério do Meio Ambiente de Ontário (*Ontario Ministry of the Environment MOE*). O banco de dados foi consultado para avaliar a geologia, construir perfis geológicos, obter dados de níveis d'água e estimar condutividades hidráulicas.

Com base nestas informações foram criados mapas potênciométricos dos aquíferos para se avaliar as direções de fluxo e determinar condições de contorno para o modelo matemático de fluxo. As seções geológicas foram utilizadas para se avaliar a litologia e geometria dos aquíferos e para a criação de mapas exibindo a distribuição das condutividades hidráulicas do modelo.

Os valores de recarga foram determinados através da utilização de mapas da geologia superficial e da metodologia HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*) da EPA (órgão ambiental dos EUA) [1].

O modelo matemático de fluxo das águas subterrâneas utilizado foi o MODFLOW [2], modelo baseado na metodologia de diferenças finitas. O programa utilizado como pré- e pós-processador foi o VISUAL MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic Inc.) [3]. Para a calibração do modelo matemático foram utilizados tanto valores de nível d'água como vazões de rios.

2. MODELO CONCEITUAL

A topografia da área é caracterizada por um relevo relativamente plano, levemente enrugado, tendo no geral um leve caimento de norte a sul (1-5%). O mapa da área de estudo é apresentado na **Figura 1**. A figura mostra a distribuição das principais vias e corpos d'água da região. O *Grand River* é a principal feição, cortando a área de norte a sul. A recarga estimada aos aquíferos da região varia de 150 a 300 mm/ano.

Os depósitos superficiais da área de estudo consistem principalmene de sedimentos glacio-lacustrinos silto-argilosos a arenosos, podendo conter porções preenchidas por cascalho, tilitos e silitos. Abaixo destas litologias encontram-se do topo para a base os seguintes tilitos: Port Stanley Till (silto-arenoso), Tavistock Till (argilo-siltoso), Mary Hill Till (argiloso) e Catfish Till (arenosiltoso) [4].

Abaixo destes depósitos superficiais existem diversos tipos de rochas dolomíticas que formam os principais aquíferos da área. A duas principais unidades são representadas pelas formações Guelph e Amabel, sobrepostas à formação Cabot Head, folhelho siltoso que forma a base do

modelo. A formação Guelph é composta principalmente por dolomitos cristalinos, porosos, de granulação fina a média. A base desta formação é formada pelo membro Eramosa (intercalações de dolomitos e folhelhos), que forma um aquitarde. Abaixo desta unidade ocorre a formação Amabel, composta por dolomitos cristalinos de granulação média.

O principal aquífero da área é formado pelas partes mais fraturadas das formações Guelph e Amabel. As águas subterrâneas destas unidades são duras, com concentrações de sulfato e ferro as vezes maiores que as recomendadas para águas naturais potáveis. Ensaio de bombeamento executados no passado indicam complicadas interrelações entre as camadas devido ao fraturamento existente. Muitos poços particulares obtêm água da zona de contato entre os depósitos superficiais e as rochas dolomíticas. Esta região de condutividade hidráulica muito alta, $7,0 \times 10^{-4}$ m/s, forma o chamado *Bedrock Contact Aquifer* (aquífero superior). O aquífero inferior é formado pelos dolomitos da formação Amabel e possui uma condutividade hidráulica média de $5,0 \times 10^{-5}$ m/s .

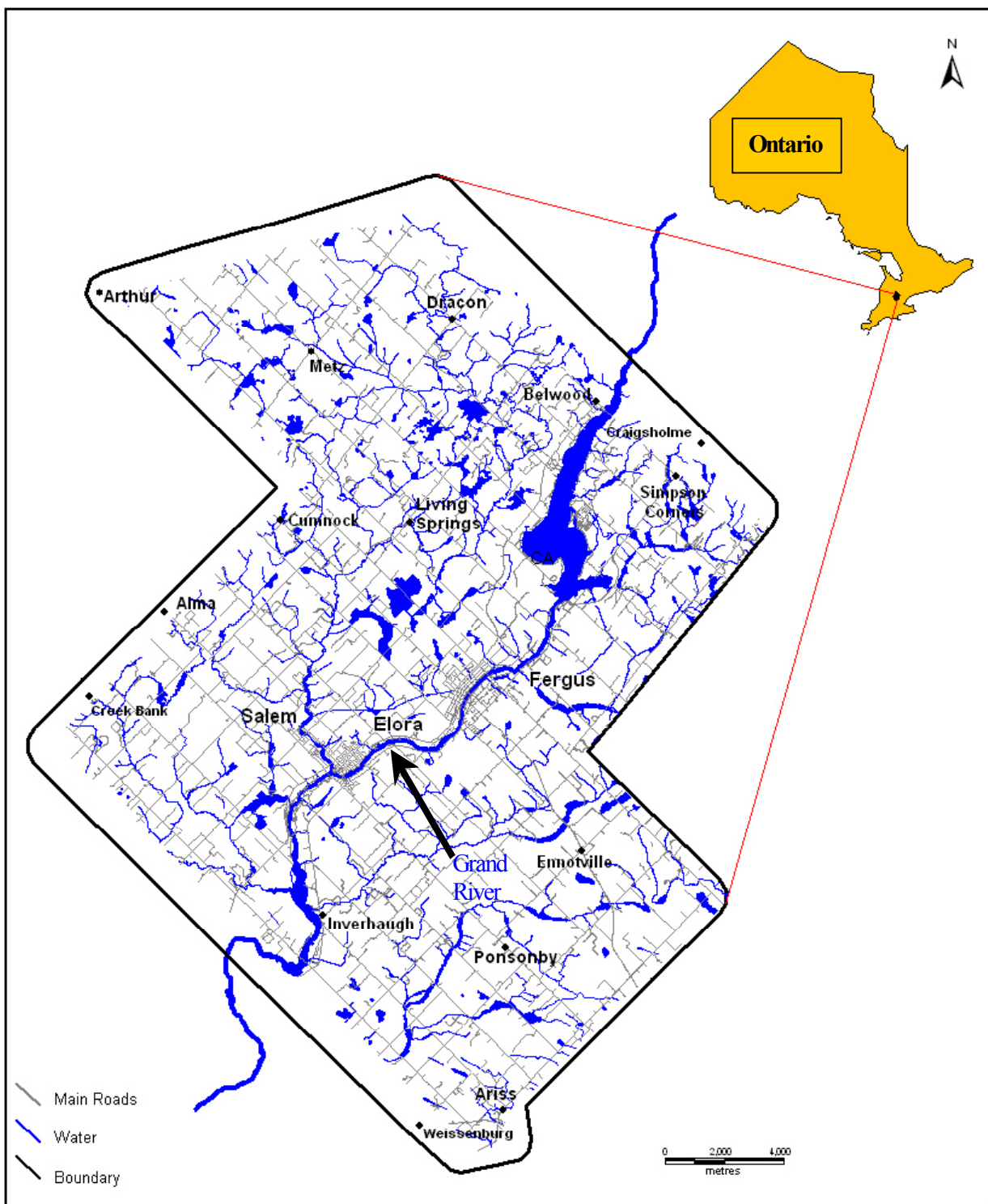


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo com rios e vias principais.

Na área de estudo existem duas feições muito importantes que influenciam o fluxo das águas subterrâneas (**Figura 2**). A primeira é o paleovale do *Grand River* e a segunda é o vale escavado pelo *Grand River*. O *Grand River* é a principal área de descarga de águas subterrâneas e superficiais

da região. Na base do paleovale ocorrem muitas areias e cascalhos, áreas propícias à instalação de poços de bombeamento.

Para a avaliação da distribuição dos aquíferos foram elaboradas 53 seções geológicas, nas quais foram incorporadas informações de aproximadamente 2500 poços. Os resultados das interpretações indicam que para a área deve ser considerado o seguinte sistema aquífero. A primeira unidade, que não é contínua, é composta por areias e cascalhos interdigitados com siltes e argilas. Segue uma unidade mais argilosa, o primeiro aquitarde. Areias e cascalhos da base dos depósitos superficiais e os cinco primeiros metros alterados de rochas dolomíticas (formação Guelph) formam o aquífero superior. Segue uma unidade dolomítica mais compacta, não muito fraturada, que foi considerada o segundo aquitarde. Seguem os dolomitos mais fraturados da formação Amabel, que é considerado o aquífero inferior.

3. DETERMINAÇÃO DO PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇOS

Para a determinação do perímetro de proteção de poços foi desenvolvido um modelo numérico do fluxo das águas subterrâneas para a área de estudo e utilizado o programa MODPATH para a definição do andamento de partículas [5].

O modelo numérico implementado, composto por sete camadas, possui 242 linhas e 186 colunas, ou seja 45012 células por camada. Nas áreas de interesse, onde ocorre bombeamento, as células possuem arestas de 60 metros de comprimento. A primeira e a segunda camada são compostas por depósitos superficiais. A terceira camada inclui a base mais arenosa dos depósitos glacio-fluviais e os primeiros cinco metros de dolomitos alterados. As camadas 4, 5 e 6 correspondem a dolomitos intercalados com folhelhos, consistindo de um sistema transicional de aquíferos e aquitardes. A camada 6 é a camada mais impermeável das três, formando o principal aquitarde do sistema. A camada 7 corresponde à formação Amabel, o principal aquífero profundo.

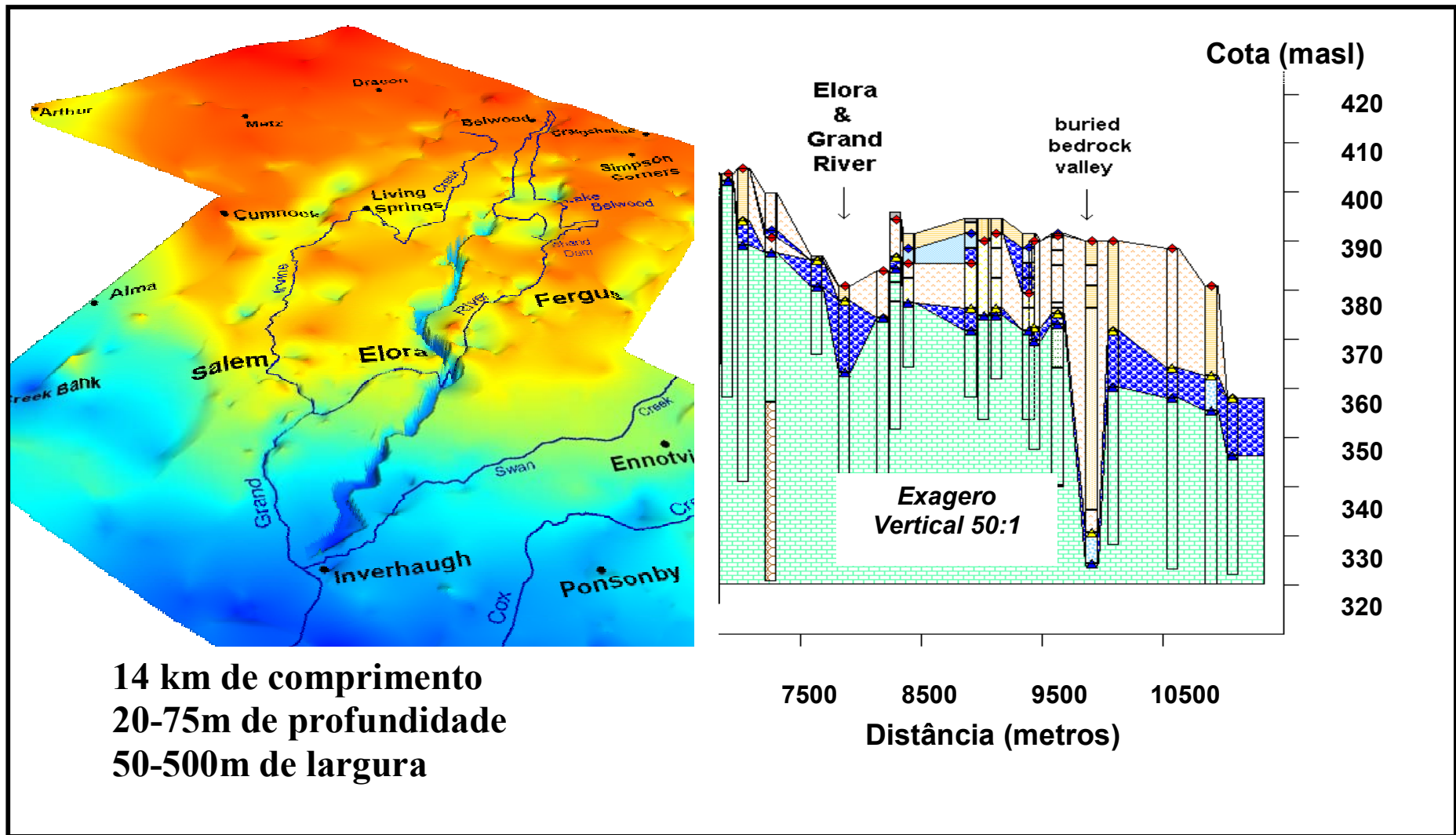


Figura 2: Localização do paleovale, suas medidas e perfil geológico W-E passando pelo *Grand River* e paleovale. Cores azuis representam areias e cascalhos, verdes dolomitos e amarelas partes mais argilosas.

As condições de contorno selecionadas para o modelo incluem: limites de fluxo zero em todas camadas, condição tipo rio para as camadas 1, 2 e 3 (*Grand River*), condição carga constante para as camadas 3, 4, 5, 6 e 7, drenos para a região do vale escarpado do *Grand River* nas camadas 1 e 2, e, poços de bombeamento em todos aquíferos explorados.

Foram incorporadas duas áreas distintas de recarga. Para os chamados *wetlands* (áreas alagadas) foi atribuída uma recarga de 170 mm/ano e para as outras área uma recarga de 250 mm/ano.

As condutividades hidráulicas verticais foram consideradas 1/10 das horizontais. As condutividades hidráulicas horizontais baseiam-se nos resultados de interpretação dos perfis geológicos e foram modificadas durante a calibração do modelo. A condutividade hidráulica do *Bedrock Contact Aquifer* (aquífero superior) ficou em média na ordem de $5,0 \times 10^{-4}$ m/s. O aquífero inferior, formado pelos dolomitos da formação Amabel, possui uma condutividade hidráulica média de $5,0 \times 10^{-5}$ m/s. As condutividades hidráulicas dos aquíferos variam entre $6,0 \times 10^{-9}$ m/s a $3,0 \times 10^{-6}$ m/s.

Na calibração do modelo foram utilizadas informações referentes aos níveis de água observados em poços, valores de vazão em rios (balanço hídrico), gradientes e direção do fluxo observados nas águas subterrâneas. Tanto os valores observados dos níveis d'água como os de vazões puderam ser verificados com o modelo. O erro médio obtido foi de 5,2 %, que pode ser considerado muito bom. O fluxo de base para o *Grand River* calculado pelo modelo foi 76% do valor mediano observado. Ambos resultados permitem utilizar o modelo para simular cenários prognósticos.

Além da calibração foi efetuado uma verificação do modelo através da simulação transiente de um ensaio de bombeamento, que pode ser reproduzido com o modelo. A análise de sensibilidade efetuada neste estudo mostrou também que os parâmetros que mais influenciam os resultados são as condutividades hidráulicas do aquífero superior (*Bedrock Contact Aquifer*).

A **Figura 3** exibe as linhas equipotenciométricas determinadas pelo modelo de fluxo para o aquífero inferior. Os poços 1, 5 e 6 apresentam os maiores cones de depressão. Apesar da influência dos poços de bombeamento, pode-se observar o fluxo principal de direção norte-sul das águas subterrâneas deste aquífero.

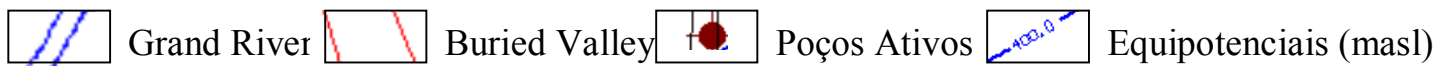
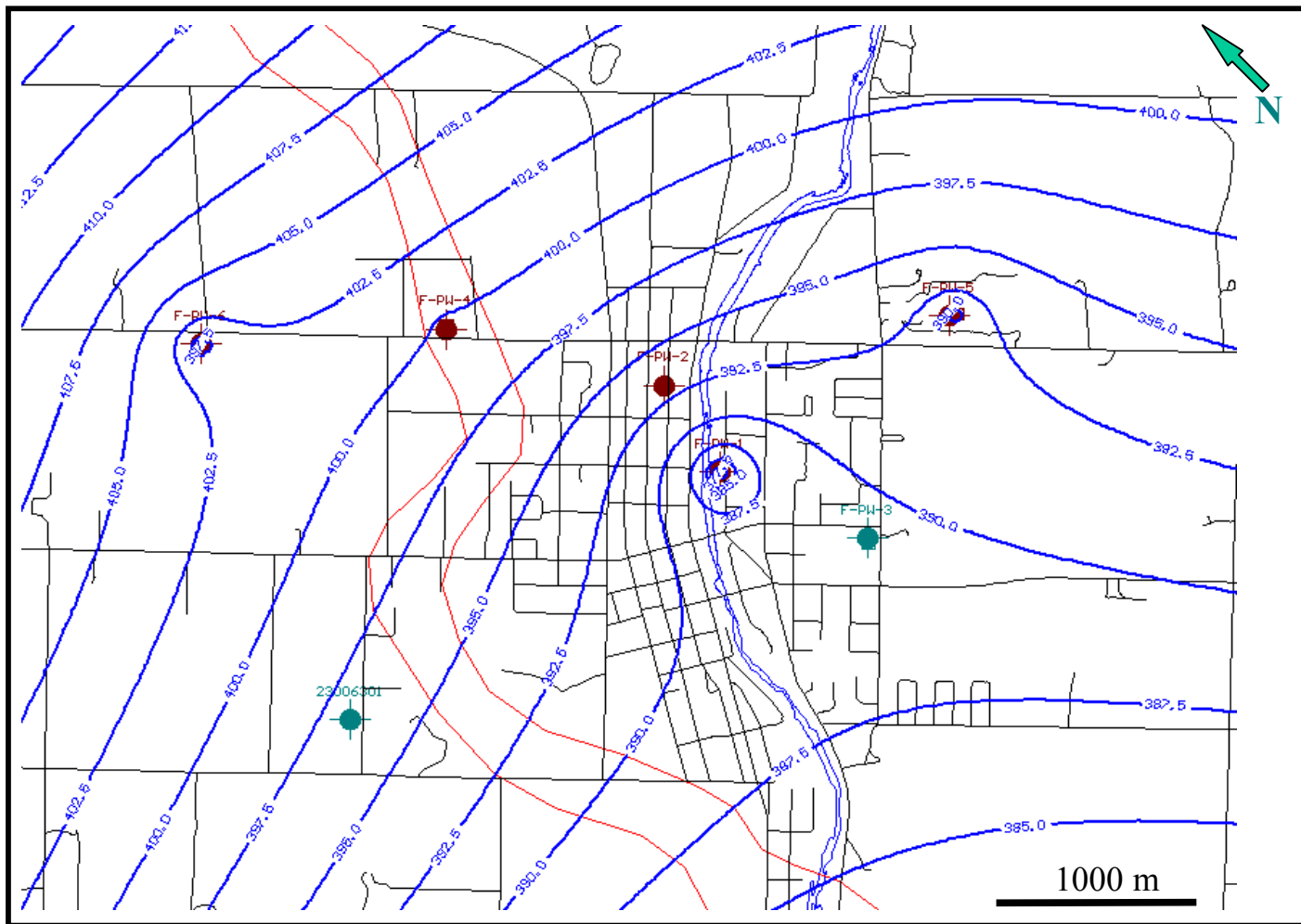


Figura 3: Linhas de fluxo e cones de depressão para os poços de Fergus.

Para se determinar as áreas de captura e os perímetros de proteção de poços, foram utilizadas partículas do tipo *backward*, ou seja, as partículas saem dos filtros dos poços de bombeamento até o ponto em que abandonam a área do modelo. A **Figura 4** mostra o perímetro de proteção de poços calculado para os poços da cidade de Fergus.

4. VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO

Neste estudo foi utilizada a metodologia AVI (*Aquifer Vulnerability Index*) para a determinação da vulnerabilidade do aquífero superior (*Bedrock Contact Aquifer*). Nesta metodologia são utilizados para o cálculo do índice de vulnerabilidade os fatores hidrogeológicos potencial de recarga ao aquífero (que considera a condutividade hidráulica do meio, o gradiente hidráulico e a porosidade) e a profundidade do nível d'água [6]. Fatores como a capacidade de atenuação natural do solo não são considerados. Divide-se a profundidade do nível d'água pelo potencial de recarga, obtendo-se como resultado o tempo de percurso vertical. Este é um valor estimado de quanto tempo um contaminante dissolvido levará para atingir o aquífero. Estes tempos de percurso são divididos em 5 classes. A **Tabela 1** mostra as características das classes. A **Figura 5** mostra a mapa de vulnerabilidade para a área estudada.

Tabela 1: Classes de Vulnerabilidade para Aquíferos

Vulnerabilidade Intrínseca	Tempo de percurso vertical	Características da Vulnerabilidade do Aquífero
Classe		
Classe 1	< 5 anos	A água chega muito rápido ao aquífero através de material de alta condutividade hidráulica (areia/cascalho).
Classe 2	5 – 10 anos	A água chega rápido ao aquífero, sendo que ambos, o material e a distância ao aquífero, controlam a taxa de recarga.
Classe 3	10 – 100 anos	A água chega devagar ao aquífero sendo que ambos, o material e a distância ao aquífero, controlam a taxa de recarga.
Classe 4	>100 anos	A água chega muito devagar ao aquífero através de material de baixa condutividade hidráulica (silte/argila).
Classe 5	Não ocorre fluxo descendente	A mais baixa vulnerabilidade, com fluxo ascendente ou gradiente próximo a zero.

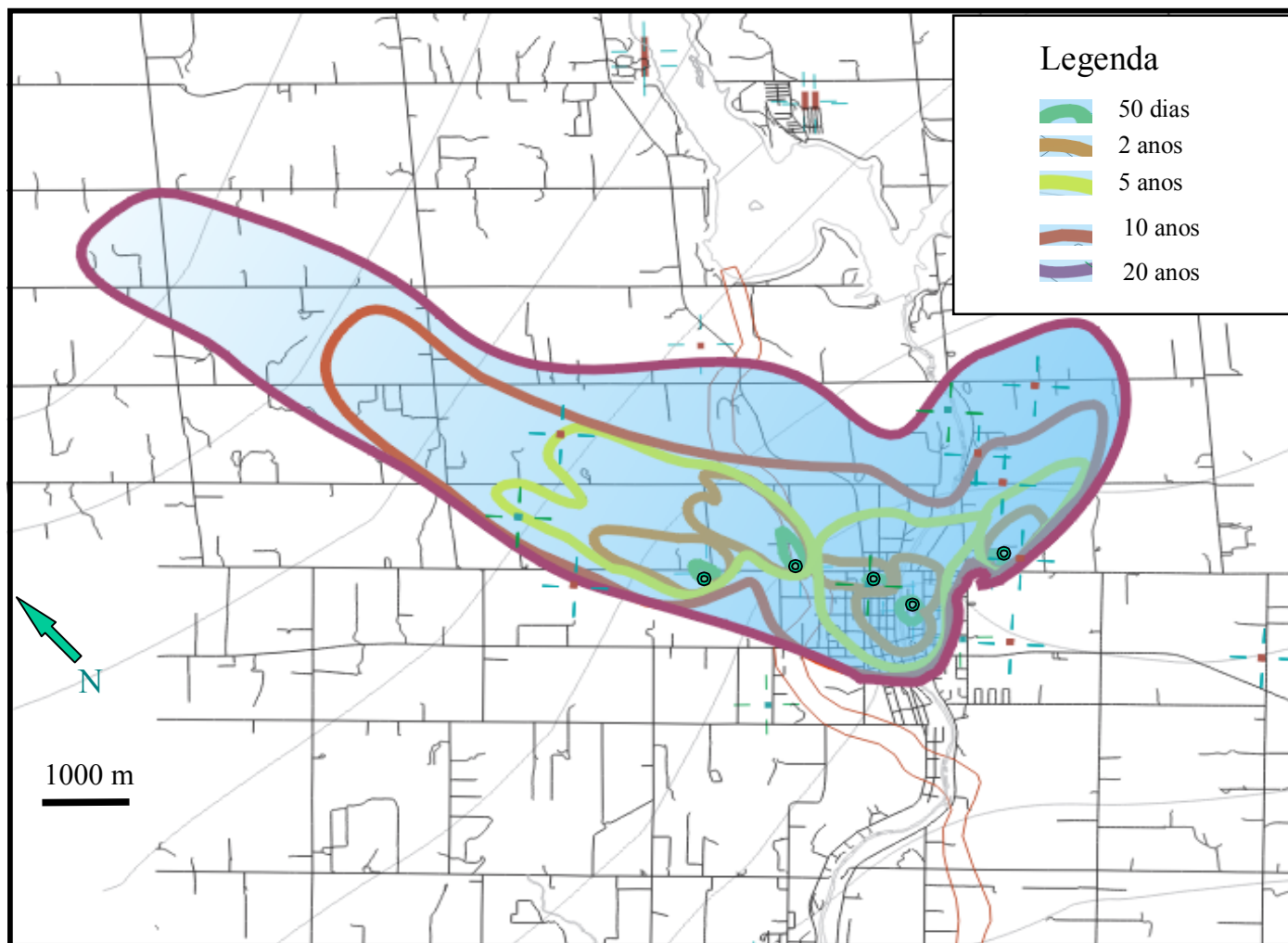


Figura 4: Perímetros de proteção de poços para os poços de abastecimento de Fergus.

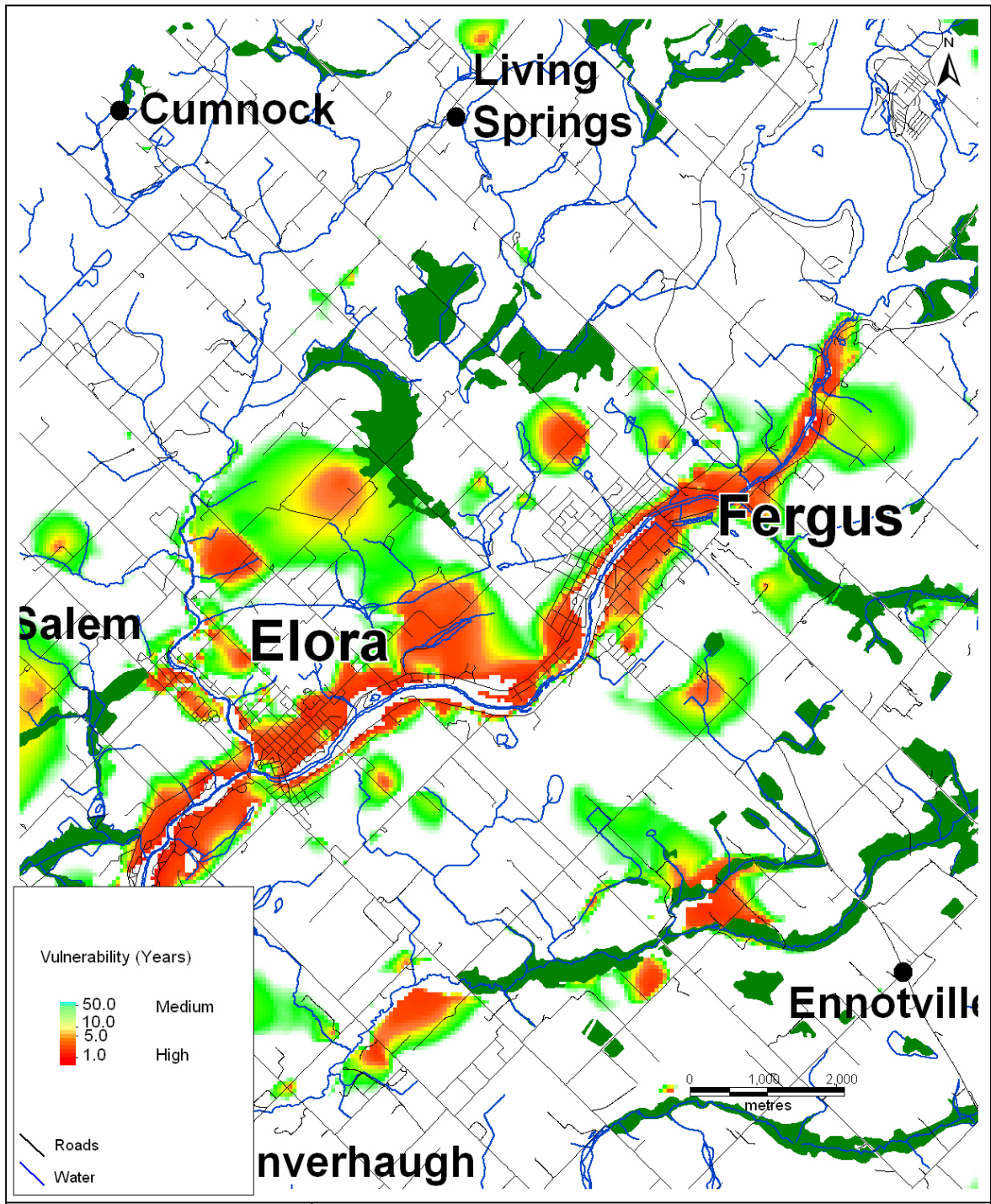


Figure 5: Mapa de vulnerabilidade de aquífero para a região de Fergus e Elora.

Através da sobreposição do mapa de perímetros de proteção de poços e do mapa de vulnerabilidade de aquíferos, traçando-se polígonos de intersecção, foram determinadas as áreas que merecem uma atenção especial das autoridades responsáveis pela gestão dos recursos hídricos subterrâneos (vide **Figura 6**).

5. CONCLUSÃO

Neste estudo foi desenvolvido um modelo regional da hidrogeologia e das águas subterrâneas para o município de Centre Wellington. Os modelos baseiam-se em estudos efetuados anteriormente na região e estão de acordo com o modelo conceitual estabelecido anteriormente. O modelo permite às autoridades uma compreensão melhor da interação de fluxos locais e regionais e do seu impacto sobre o delineamento de zonas de proteção de poços.

Uma boa calibração foi atingida tanto para os dados pontuais de nível d'água como para as vazões medidas no *Grand River*. Com isso, o modelo pode ser utilizado para a simulação de cenários futuros. Com base no balanço hídrico calculado pelo modelo pode-se duplicar a exploração de água subterrânea através da instalação de novos poços de abastecimento municipais em locais definidos pelas simulações efetuadas com o modelo. O balanço hídrico mostra ainda que 53% da recarga ocorre por precipitação, sendo que 46% ocorre pelo fluxo regional.

A sobreposição do mapa de vulnerabilidade de aquíferos com o mapa de perímetros de proteção de poços define quais áreas merecem um cuidado maior por parte das autoridades no que se refere à proteção dos recursos hídricos subterrâneos. Com base no mapa resultante as autoridades poderão planejar o desenvolvimento da região, considerando melhor a proteção dos aquíferos.

As áreas propícias para a futura exploração foram definidas através do modelamento e análises efetuadas neste estudo (vide **Figura 7**).

Os cenários de contaminação simulados mostram que o aquífero superior corre risco de ser contaminado por fontes difusas, ao passo que o aquífero inferior encontra-se mais protegido devido à existência de um aquitarde relativamente impermeável que os separa (vide **Figura 8**).

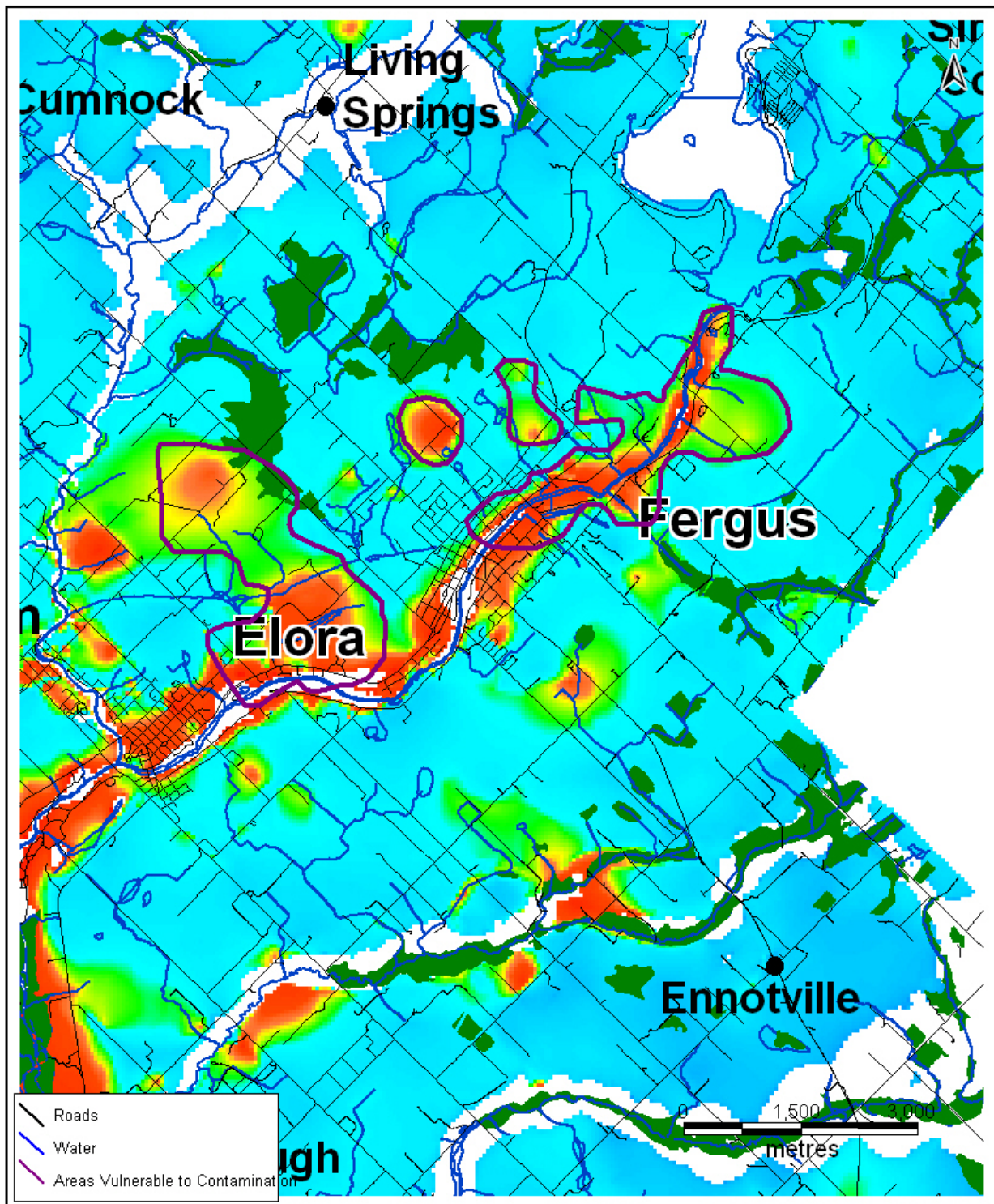


Figura 6: Mapa da sobreposição da vulnerabilidade de aquíferos com perímetros de proteção de poços.

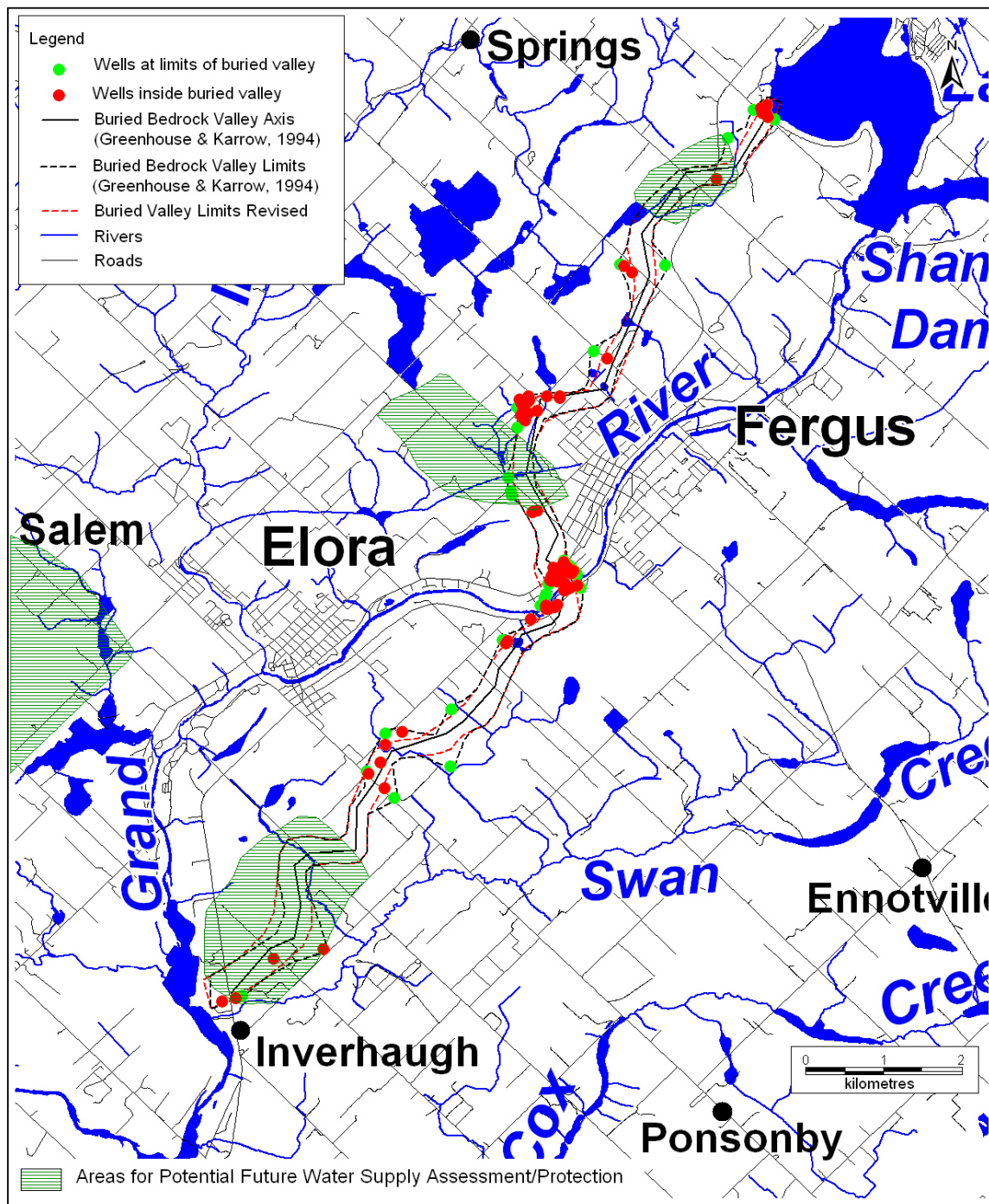
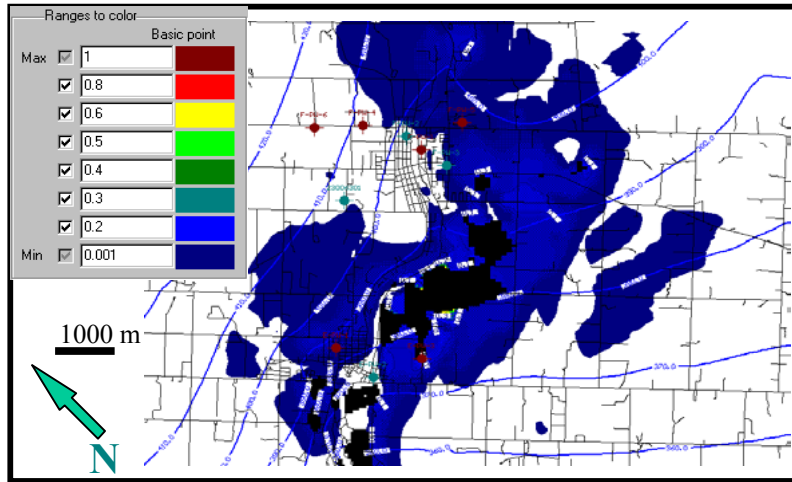
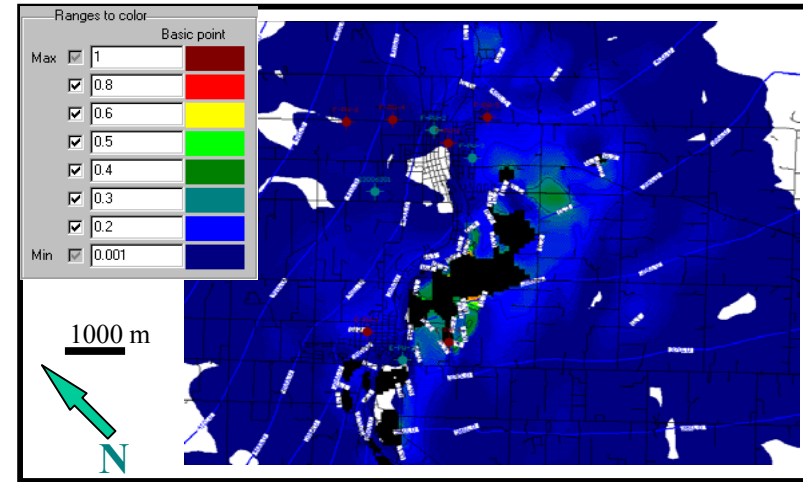


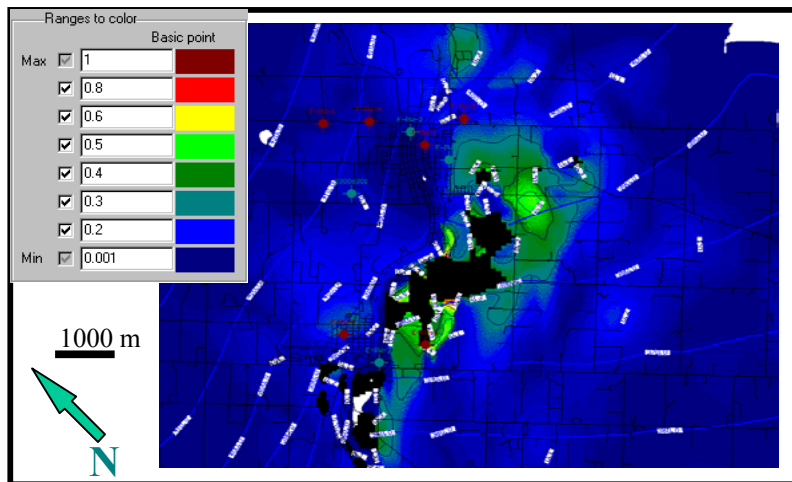
Figure 7: Áreas previstas para futura exploração do sistema aquífero inferior.



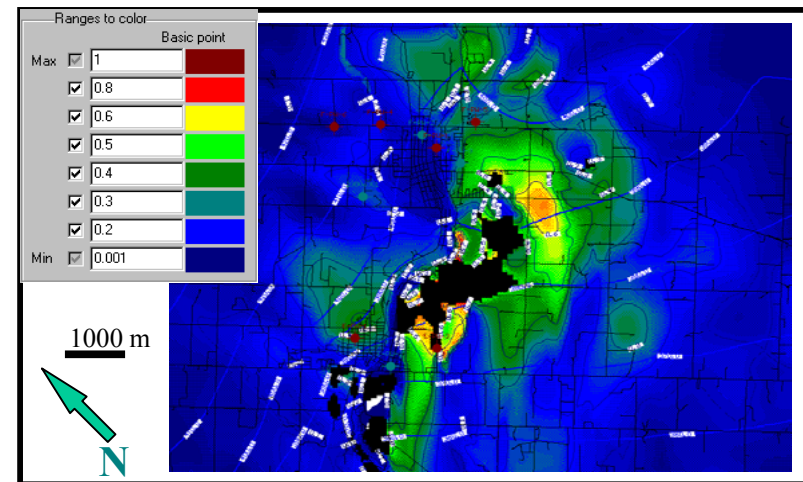
Distribuição de nitrato após 1 ano.



Distribuição de nitrato após 5 anos.



Distribuição de nitrato após 10 anos.



Distribuição de nitrato após 100 anos.

Figura 8: Distribuição de nitrato no aquífero superior através do tempo, considerando-se uma fonte de contaminação contínua de 1 mg/litro.

O modelo matemático desenvolvido neste estudo poderá ser utilizado ainda para diferentes propósitos entre eles:

- Investigação de outros locais para a instalação de novos poços de abastecimento.
- Avaliação do impacto de novos poços sobre o sistema atual de exploração.
- Determinação do volume máximo que pode ser extraído de maneira sustentável do sistema aquífero.
- Avaliação de possíveis riscos de contaminação do sistema de abastecimento por fontes existentes ou futuras.
- Avaliação da interação de corpos d'água superficiais e subterrâneos para proteger áreas sensíveis em Elora e Fergus utilizando o modelo desenvolvido neste estudo.
- Utilização deste modelo para a implementação de modelos de escala local para Fergus e Elora ou outros *sites* de interesse.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Schroeder, P.R.; Dozier, T.S.; Zappi, P.A.; McEnroe, B.M.; Sjostrom, J.W.; Peyton, R.L. Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. in cooperation with Clemson Univ., SC. Dept. of Civil Engineering. 1994, 128p.
- [2] Harbaugh, A.W.; McDonald, M.G., User's Documentation of MODFLOW-96, An Update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model, Open-File Report 96-485, U.S. Geological Survey, (1996), Reston, EUA.
- [3] Waterloo Hydrogeologic Inc., Visual Modflow Users Manual, The Proven Standard for 3-D Groundwater Flow & Contaminant Transport Modeling using MODFLOW, MODPATH, MT3DMS and RT3D, manual não publicado, 2002, Waterloo, Ontario, Canada.
- [4] Karrow, P.F. (1963) "Pleistocene Geology of the Guelph Area". Ontario Department of Mines, Geoscience Report 61.
- [5] Pollock, D.W., User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model: Open-File Report 94-464, 1994, 234 p.
- [6] VA.Vrba, J., Zaporozec, Guidebook on mapping groundwater vulnerability, IAH publication 16, 1994, 131pg, Hannover, Alemanha.