

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**PROTEÇÃO DAS ÁREAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA  
SUBTERRÂNEA NO ESTADO DE SÃO PAULO**

**ANA MACIEL DE CARVALHO**

**Orientador: Prof. Dr. Ricardo Hirata**

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF/2007 - 03)**

**SÃO PAULO  
2007**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024325

**PROTEÇÃO DAS ÁREAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA  
SUBTERRÂNEA NO ESTADO DE SÃO PAULO**

ANA MACIEL DE CARVALHO



Orientador: Prof. Dr. Ricardo Hirata

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF/2007 - 03)**

SÃO PAULO

2007

TF  
C 332  
AM · P

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROTÓCOLO DAS ÁREAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA  
SUBTERRÂNEA NO ESTADO DE SÃO PAULO



ANA MARCIEL DE CARVALHO

Obração: Prot. Dr. Ricardo Hora

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMAÇÃO  
(TF15003 - 03)

SÃO PAULO

SOUS

**A meus pais**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente este trabalho não teria sido concretizado se não houvesse o grande incentivo, apoio, compreensão, vontade e carinho dos meus pais. Eu agradeço então, ao Renato Muniz Barretto de Carvalho e à Mara Santina Maciel de Oliveira.

Agradeço também, com profundo reconhecimento, ao Bruno Pirilo Conicelli pelo incentivo, paciência, amor e pelas diversas discussões, não só para a finalização deste trabalho, mas para a realização de um trabalho pensando em uma vida melhor.

Ao prof. Dr. Ricardo Hirata pela oportunidade, orientação e conselhos que recebi durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq pelo fornecimento da bolsa de estudo.

Ao Raul Maciel de Carvalho por ajudar nos cálculos, nas correções e criação do programa de cálculo da área.

Ao Hugo Maciel de Carvalho por ajudar nas correções gramaticais.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pela infra-estrutura fornecida.

Ao Laboratório de Modelos Físicos (LAMO) pela estrutura cedida.

Ao geólogo Luiz Ferrari pela ajuda com o programa *Visual MODFLOW*.

Aos meus amigos que me acompanharam durante o curso.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	II
<b>ABSTRACT .....</b>	III
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	1
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	3
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS HIDROGEOLÓGICOS TÍPICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO.....</b>	3
3.1 SISTEMA AQUÍFERO BAURU .....	5
3.2 SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (BOTUCATU / PIRAMBÓIA).....	6
3.3 SISTEMA AQUÍFERO TUBARÃO.....	6
3.4 AQUÍFERO FURNAS .....	7
3.5 AQUÍFERO TAUBATÉ .....	7
3.6 SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL.....	7
3.7 AQUÍFERO CRISTALINO .....	7
3.8 AQUITARDE PASSA DOIS .....	8
3.9 AQUÍFERO LITORÂNEO.....	8
3.10 AQUÍFERO SÃO PAULO .....	9
<b>4. PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇO (PPP).....</b>	9
<b>5. HISTÓRICO DE IMPLEMENTAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇO EM PAÍSES DESENVOLVIDOS.....</b>	14
5.1 EXPERIÊNCIA EUROPEIA.....	14
5.2. EXPERIÊNCIA NORTE AMERICANA.....	19
<b>6. IMPLANTAÇÃO DE PROGRAMAS BASEADOS EM PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇO NO ESTADO DE SÃO PAULO .....</b>	22
<b>7. ESTABELECIMENTO DO NÚMERO DE ZONAS DE CAPTURA DE POÇOS PARA O ESTADO DE SÃO PAULO.....</b>	25
<b>8. TRAÇADO DO PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇO PARA AQUÍFEROS FRATURADOS, CONFINADOS E CÁRSTICOS .....</b>	26
<b>9. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	28
9.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO RAIO FIXO CALCULADO (RFC) .....	29
9.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO ANALÍTICO (MA) .....	29
9.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO NUMÉRICO (MN) .....	31
<b>10. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	34
<b>11. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	41
<b>12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	43
<b>ANEXO A.....</b>	46
<b>ANEXO B.....</b>	48
<b>ANEXO C.....</b>	74
<b>ANEXO D.....</b>	77

## **Resumo**

Este trabalho objetivou dimensionar as áreas que seriam necessárias para a aplicação de perímetros de proteção de poços (PPP) em aquíferos do Estado de São Paulo. Assim, utilizando-se de três diferentes metodologias, definiram-se as dimensões e formatos das zonas de contribuição (ZOCs), ou seja, a área em superfície onde toda a recarga do aquífero é captada para a fonte de abastecimento, incluindo: a) Raio Fixo Calculado (RFC), através de método cilíndrico que usa equação de fluxo volumétrico; b) Modelo Analítico (MA), com uso da aplicação da equação de fluxo uniforme, e c) Modelo Numérico (MN), através de modelos matemáticos de simulação de fluxo, *Visual MODFLOW*.

Os dados hidrogeológicos obtidos dos 'Relatórios Zeros', 'Planos de Bacia Hidrográfica' e outros estudos regionais do Estado de São Paulo, permitiram estabelecer um modelo conceitual de circulação de água subterrâneas para os principais aquíferos.

A análise das estratégias de implementação dos PPPs em países europeus e nos EUA, bem como a avaliação dos planos das bacias hidrográficas paulistas, ajudaram a entender as dificuldades encontradas pelos governos para manter a qualidade das águas subterrâneas.

Para cada método realizado, gerou-se uma área diferente. Os resultados mostraram que o RFC estabeleceu uma ZOC em média 1000% maiores que o MA e este 500% maior que o MN, para as mesmas condições hidrogeológicas. Pelos resultados, se depreende que a utilização do MA é viável numa primeira aproximação, pois os dados para tal já se encontram disponíveis para quase todos os poços públicos do Estado, e sua acurácia é superior ao MRFC. Já numa fase posterior, onde a definição da ZOC seja mais sensível, o MN seria a alternativa natural.

## **Abstract**

This work aims to calculate the area that is necessary for the implementation of Wellhead Protection Areas (WHPA) at municipal well for different aquifers in the state of São Paulo. Three different methodologies were used to define the zone of contribution (ZOCs), which is the area within which all aquifer recharge will be captured in the water supply under consideration, including: a) Calculated Fixed Radius (CFR), following the cylindrical method that uses a volumetric flow equation; b) Analytical Model (AM), with application of the uniform flow equation and the Numeric Model (NM), following the mathematical models of flow simulation, Visual MODFLOW.

The hydrogeological data obtained from 'Reports Zeros', Hydrographical Basin Plans' and other regional studies the state of São Paulo, enabled establish a conceptual model of groundwater movement for the main aquifers.

The analysis of the strategies for WHPA implementation in Europe and the USA, as well as the evaluation of the hydrographical basin plans the state of São Paulo, helped understand the difficulties founded by governments to maintain the groundwater quality.

For each method realized, generated there one different area. The results showed that the CFR established one ZOC with an average 1000% greater than the AM and this 500% greater than the NM, for the same hydrogeological conditions. Through the results, it deduces that the use of AM is feasible in a first approximation, because the data for this are already available for almost all public wells of the state, and its accuracy is superior to CFR method. Already at a later stage, where the definition of the ZOC is more sensitive, NM would be the natural alternative.

## 1. Introdução

Os altos índices verificados na atualidade de uso da água subterrânea e o alarmante descaso com a proteção dos aquíferos fazem aumentar a preocupação com a qualidade desse recurso.

No Estado de São Paulo o uso da água subterrânea para abastecimento público vem crescendo, principalmente na última década. Nos próximos anos, esse aumento será ainda mais acentuado devido ao avanço no desenvolvimento do país, às necessidades para ocorrer tal avanço decorrente do aumento da concentração demográfica e da expansão econômica e às conhecidas vantagens da água subterrânea em relação aos recursos hídricos de superfície.

Segundo o Governo do Estado, 74% dos municípios são, total ou parcialmente, abastecidos por fontes subterrâneas. Esse número se eleva na medida em que se analisam as bacias hidrográficas do oeste paulista, onde esta proporção pode atingir mais de 90% (Rocha 2005).

Embora esses números indiquem a grande dependência das cidades e suas populações dos recursos hídricos subterrâneos, pouco se tem feito para a sua proteção e manejo adequados que, em diferentes áreas do território estadual, estão sujeitos a impactos que põe em risco a qualidade das águas, como:

- a extração descontrolada;
- a ocupação indisciplinada do solo;
- o aumento e a diversificação de produtos químicos, potencialmente poluidores da água subterrânea;
- o lançamento *in natura* de esgotos, em larga escala e efluentes industriais;
- o aumento de aplicações de fertilizantes e pesticidas na agricultura;
- explorações minerais sem o correto controle;
- a execução de poços sem critérios técnicos;
- a dificuldade e a impraticabilidade de se efetuar a remoção de poluentes em um grande número de fontes pontuais de captação.

Devido ao preocupante descaso, torna-se urgente a proteção desse importante recurso, pois se sabe que a descontaminação é muito mais custosa que a adoção de medidas preventivas. Assim, faz-se necessária a implementação de medidas de proteção para todos os poços e mananciais cuja função é de prover água potável e com qualidade.

Para eliminar completamente o risco de contaminação, todas as atividades potencialmente contaminantes deveriam ser proibidas (ou completamente controladas)

dentro de toda a área de recarga do aquífero. Porém, isso se torna impossível ou economicamente inviável. (Foster et al. 2002).

Pensando numa forma, então, de proteger as fontes de abastecimento de água subterrânea, o governo americano estabeleceu, em 1987, o *Wellhead Protection Program* (WPP), a exemplo de programas similares europeus para a delineação de Wellhead Protection Areas (WHPA), para todos os poços municipais. Mais tarde, o governo do Estado de São Paulo estabeleceu um programa de proteção aos recursos hídricos, cujo objetivo é a prevenção dos aquíferos contra uma possível contaminação. Vigente na Lei nº 6.134/88, Lei das Águas Subterrâneas, regulamentada pelo Decreto nº 32.955/91, esse programa estabelece o perímetro de proteção de poço (PPP).

Os PPPs são áreas juridicamente definidas ao longo de uma ZOC (zona de captura de poço). A ZOC é o perímetro onde toda a recarga do aquífero é captada para a fonte de abastecimento. Sendo assim, as áreas definidas pelos PPPs são áreas onde se restringe a ocupação por atividades potencialmente contaminantes.

Essas áreas são delimitadas de acordo com a degradação do contaminante com o tempo, e também conforme a diluição do contaminante não degradável, levando em conta, entre outros fatores, as características do aquífero. Assim, as restrições ao uso da área seriam mais rígidas quanto mais próximas do poço de abastecimento.

No entanto, em sua história recente, os órgãos de governo paulistas têm dirigido as suas estratégias de proteção ambiental à identificação, caracterização e remediação de áreas e atividades contaminadas. A discussão da importância de proteger os recursos hídricos como um todo ou os poços de abastecimento público ainda não entrou na pauta dos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos.

Dessa forma, os poços de abastecimento público paulista apresentam deficiência na restrição de ocupação no entorno de sua área. Dessa forma, 74% dos núcleos urbanos paulistas estão colocando em risco a população abastecida.

Com a intenção de aperfeiçoar os estudos realizados e melhorar a situação dos recursos hídricos subterrâneos, este trabalho faz uma avaliação do tamanho das áreas geradas pelos métodos mais utilizados para este fim: Raio Fixo Calculado (RFC), Modelo Analítico (MA) e Modelo Numérico (MN) e, assim, mede a factibilidade de sua aplicação.

## **2. Objetivos**

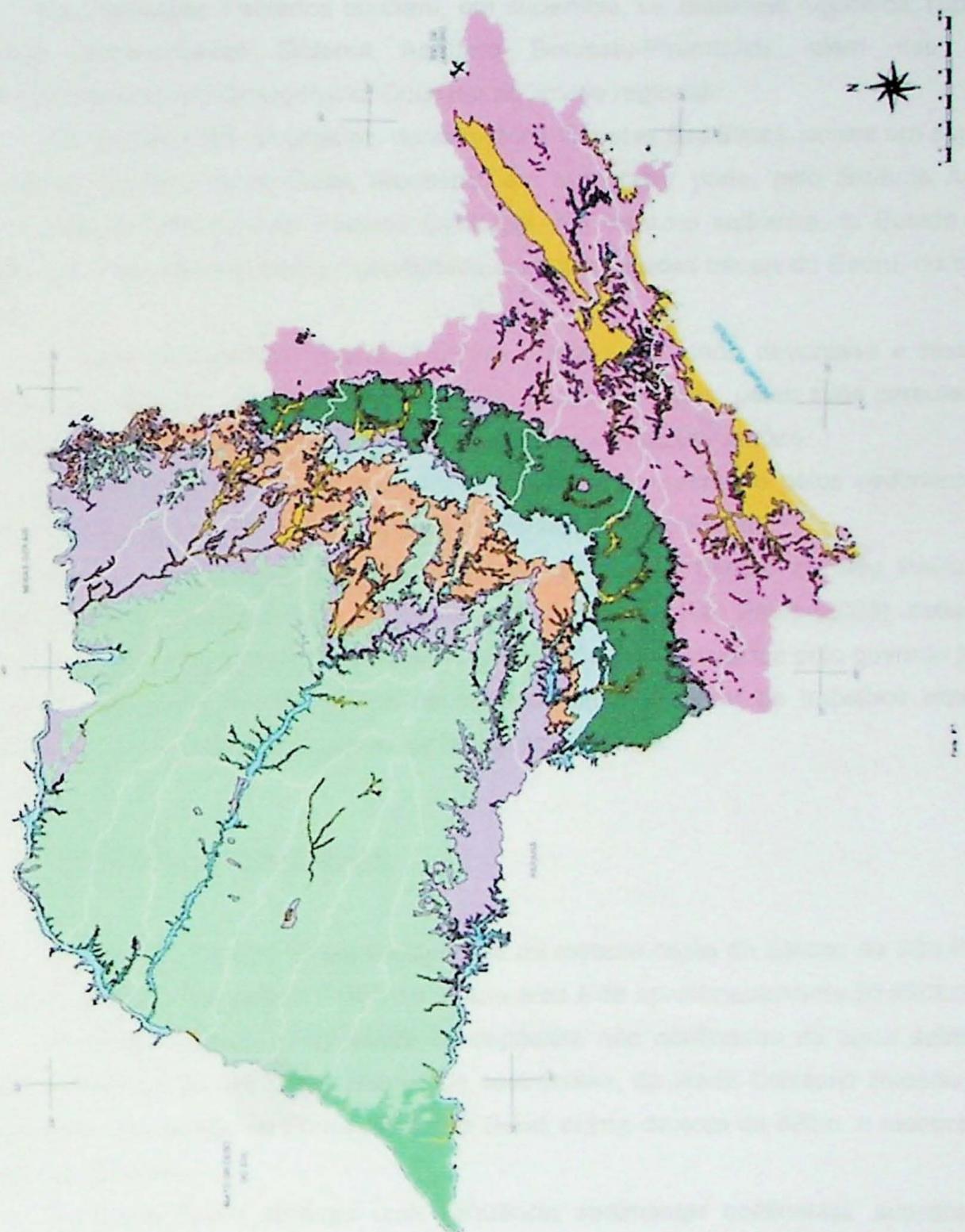
Os objetivos deste trabalho foram:

- Estudar a possibilidade técnica de implementação de perímetros de proteção de poços nos diversos aquíferos paulistas, visando a manutenção da qualidade da água subterrânea;
- Avaliar, para os diversos aquíferos paulistas, a resolução e as exigências técnicas para o traçado das ZOCs;
- Dimensionar a área da ZOC para os diversos aquíferos paulistas usando diferentes métodos existentes, incluindo o do RFC, MA e o MN.

## **3. Caracterização dos cenários hidrogeológicos típicos do Estado de São Paulo**

O Estado de São Paulo, segundo o IBGE (2005), ocupa uma área de 248.209,426km<sup>2</sup>, cujo relevo foi fortemente influenciado pela geologia e clima da região.

O arcabouço geológico será representado através das unidades hidrogeológicas classificadas em sistemas aquíferos conforme é mostrado na **Figura 1**.



**Figura 1 - Sistemas Aqüíferos do Estado de São Paulo (Governo de São Paulo 1999).**

O Sistema Aqüífero Pré-Cambriano (Aqüífero Cristalino) ocorre no Planalto Atlântico. Nele encaixam-se duas bacias sedimentares de idade terciária, que ocupam pequenas extensões do território paulista: a de São Paulo, contida inteiramente na metrópole, e a de Taubaté.

Já os sistemas aqüíferos sedimentares do Mesozóico e do Paleozóico ocupam mais da metade da área do Estado e pertencem à Bacia Sedimentar do Paraná, constituindo seu flanco nordeste.

Na Depressão Periférica ocorrem, em superfície, os Sistemas Aqüíferos Tubarão e Guarani (anteriormente Sistema Aqüífero Botucatu-Pirambóia), além das rochas sedimentares finas do Grupo Passa Dois, um aqüiclude regional.

Em regiões mais rebaixadas, denominadas *Cuestas Basálticas*, ocorre em superfície o Sistema Aqüífero Serra Geral, recoberto, em sua maior parte, pelo Sistema Aqüífero Bauru, que se estende pelo Planalto Ocidental. No extremo sudoeste do Estado ocorre ainda a unidade aqüífera Caiuá, interdigitada com as unidades basais do Bauru, do qual faz parte.

O Sistema Aqüífero Paraná (Aqüífero Furnas), de idade devoniana e restrito ao centro-sul do Estado, é bem pouco conhecido e utilizado, mas, pelas suas características litológicas, surge como uma alternativa para pequenas e médias vazões.

De idade quaternária há o aqüífero Litorâneo representado pelos sedimentos das planícies costeiras existentes, principalmente, no litoral sul do Estado.

Para a caracterização de cada Sistema Aqüífero do Estado de São Paulo foram coletados dados, principalmente, do Governo do Estado de São Paulo (2005), cadastro de poços do DAEE, dos relatórios de situação (Relatórios Zero), exigidos pelo governo paulista às bacias hidrográficas, dos planos de recursos hídricos, além de trabalhos anteriores. Esses dados encontram-se em forma de tabela no **Anexo A**.

### **3.1 Sistema Aqüífero Bauru**

O Sistema Aqüífero Bauru encontra-se na metade oeste do Estado de São Paulo, e aflora ao longo da Depressão Periférica. A sua área é de aproximadamente 96.880km<sup>2</sup>.

O Sistema Bauru comprehende os depósitos não confinados de água subterrânea associados a rochas do Grupo Bauru. Os sedimentos, de idade Cretáceo Superior, estão sobrepostos ao basalto da Formação Serra Geral, acima da cota de 880m, e recobrem toda a área de chapada.

O Grupo Bauru abrange uma seqüência sedimentar continental, suprabasáltica, subdividida estratigraficamente em quatro Formações: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília (Soares *et al.* 1980 e Almeida *et al.* 1980 apud Lima, A. A. 2004). Os ambientes

depositacionais das unidades são, respectivamente, eólico, fluvial meandrante a entrelaçado, depósitos arenosos acanalados e deposicional em leque aluvial (Silva *et al.* 2003).

Ambas as unidades ocorrem de forma livre e em alguns pontos semi-confinada ou confinada e apresentam porosidade granular.

### **3.2 Sistema Aqüífero Guarani (Botucatu / Pirambóia)**

O Aqüífero Guarani é um dos maiores mananciais transfronteiriços de água doce subterrânea da América Latina, estendendo-se desde a Bacia Sedimentar do Paraná até a Bacia do Chaco-Paraná.

No Estado de São Paulo o aqüífero ocorre na porção oeste. Ocorre a leste uma faixa aflorante, com área de 16.000km<sup>2</sup>, inserida na Depressão Periférica e apresenta largura irregular que se amplia ao longo das grandes drenagens. Para oeste o aqüífero encontra-se confinado pelos basaltos da Formação Serra Geral.

As formações geológicas do Guarani, no Estado de São Paulo, congregam sedimentos flúvio-lacustres do período triássico (245 – 208 milhões de anos): Formação Pirambóia; e os sedimentos eólicos desérticos do período jurássico (208 – 144 milhões de anos), a Formações Botucatu (Araújo *et al.* 1995).

Ambas as unidades ocorrem de forma livre e em alguns pontos confinada e apresentam porosidade granular.

### **3.3 Sistema Aqüífero Tubarão**

O Sistema Aqüífero Tubarão localiza-se no centro-sudeste do Estado ao longo da Depressão Periférica Paulista e ocupa uma área de 20.700km<sup>2</sup>.

Este Sistema subdivide-se em Grupo Itararé e Formação Aquidauana (Permo-Carbonífero), depositados em ambiente glacial continental com ingressões marinhas; e Grupo Guatá (Permiano), que contém as Formações Tatuí, Rio Bonito e Palermo, depositados em ambiente marinho-raso (Diogo *et al.* 1981).

O Grupo Itararé é a unidade mais espessa do aqüífero Tubarão no Estado de São Paulo, as camadas destas rochas sedimentares podem alcançar várias dezenas de metros de espessura. Na sua porção aflorante podem chegar a 800m.

Ambas as unidades ocorrem de forma livre e em alguns pontos confinada e apresentam porosidade granular (localmente fraturado).

### **3.4 Aqüífero Furnas**

O Aqüífero Furnas se expõe apenas na porção sudoeste do Estado, ocupando uma área de 530km<sup>2</sup>.

O Aqüífero Furnas é a unidade basal da Bacia Sedimentar do Paraná, constituída pela Formação Furnas, depositada durante a transgressão marinha do Devoniano, sobre relevo suave em águas rasas (Rocha 2005).

Ambas as unidades ocorrem de forma livre e em alguns pontos confinada e apresentam porosidade granular.

### **3.5 Aqüífero Taubaté**

O Aqüífero Taubaté, localizado no vale do rio Paraíba do Sul, corresponde a uma das principais fontes de exploração de água do Estado de São Paulo, pois se destaca pelo elevado potencial hídrico e marcante heterogeneidade química de suas águas subterrâneas.

O aqüífero ocupa uma área com extensão aproximada de 2.340km<sup>2</sup> e ocorre de forma livre ou pouco confinada. É representado por sedimentos terciários da Bacia de Taubaté, de origem lacustre e fluvial. O Grupo Taubaté (Paleógeno) é subdividido nas Formações Resende, Tremembé e São Paulo (Riccomini 1989).

### **3.6 Sistema Aqüífero Serra Geral**

O Sistema Aqüífero Serra Geral abrange a porção oeste do Estado e possui área de afloramento de 32.000km<sup>2</sup>. Caracteriza-se por ser do tipo fraturado e ocorre tanto livre como confinado na Formação Serra Geral. Conforme Rebouças (1978), o Serra Geral está sob condições hidrogeológicas heterogêneas e anisotrópicas, nas quais o armazenamento de água subterrânea está condicionado ao maior ou menor desenvolvimento das fraturas ou sistemas de fraturas que afetaram essas rochas.

A Formação Serra Geral é constituída, essencialmente, por basaltos toleíticos e andesitos basálticos, com riolitos e riodacitos subordinados. A espessura máxima desta cobertura atinge 900m (Portela Filho *et al.* 2005). Já a espessura do aqüífero atinge 150m.

### **3.7 Aqüífero Cristalino**

O Aqüífero Cristalino, que se localiza na porção leste do Estado, possui área de afloramento de 53.400km<sup>2</sup> e compreende as rochas gnáissico-migmatíticas do

Embasamento Cristalino do Pré-Cambriano, nas quais o armazenamento de água subterrânea está condicionado ao maior ou menor desenvolvimento das fraturas ou sistemas de fraturas que afetaram essas rochas.

O aquífero sotopõe-se aos sedimentos das Bacias de São Paulo e Taubaté, sendo que o topo do embasamento cristalino mergulha em sentido ao centro destas duas bacias sedimentares.

O aquífero cristalino fraturado, heterogêneo e descontínuo com espessuras que variam de 100 a 150m, encontra-se coberto por um manto de intemperismo que lhe confere, localmente, características confinantes ou semi-confinantes, onde a circulação da água subterrânea se faz pela porosidade fissural e, secundariamente, pela porosidade granular existente no manto de alteração.

### **3.8 Aquitarde Passa Dois**

Aflorante na parte central do Estado, com área de 6.900km<sup>2</sup>, ao longo da Depressão Periférica, o aquitarde Passa Dois corresponde a sedimentos que compõem o Grupo Passa Dois, de idade Paleozóica, formado pelas formações Rio do Rasto, Teresina, Serra Alta e Irati.

O ambiente deposicional das formações corresponde, respectivamente, à planície costeira; possivelmente marinho a pró-deltáico; essencialmente marinho e marinho.

Esses sedimentos possuem características hidráulicas que o classificam regionalmente como um aquitarde. Seu caráter de aquífero está associado às unidades calcárias e eventuais bancos de arenitos e zonas fissuradas junto a lineamentos estruturais. Pode ser considerado, portanto, como um aquífero de caráter eventual, livre, descontínuo, heterogêneo e anisotrópico.

### **3.9 Aquífero Litorâneo**

O Aquífero Litorâneo, com área de aproximadamente 4.600km<sup>2</sup>, distribui-se irregularmente ao longo da costa, segmentado pelas rochas do embasamento pré-Cambriano. É constituído por depósitos sedimentares da Planície Litorânea, a qual chega a 70km de largura reduzindo-se em direção ao norte do estado.

A planície litorânea é caracterizada por baixas altitudes que variam de 0 a 20m.

O Aquífero possui características como porosidade granular, livre, de extensão limitada, e apresenta uma produtividade relativamente baixa.

A proximidade com o oceano é marcada pela presença de canais de maré que causam a intrusão salina (DAEE 1979).

### **3.10 Aqüífero São Paulo**

O Aqüífero São Paulo é constituído por rochas sedimentares que preenchem a bacia de São Paulo pertencente ao Planalto Paulistano. Esses sedimentos, que ocupam uma área aproximada de 3.600km<sup>2</sup>, estão distribuídos irregularmente na porção central da bacia hidrográfica do alto curso do rio Tietê.

As rochas da Bacia de São Paulo pertencem às seguintes unidades: Grupo Taubaté (Paleógeno), constituído pelas formações Resende, Tremembé e São Paulo; Formação Itaquaquecetuba (Neógeno); e coberturas aluvionares (Quaternário) (Riccomini e Coimbra 1992). A sedimentação da bacia desenvolveu-se em ambientes de leques aluviais, sistemas fluviais entrelaçados e meandrantes e flúvio-lacustre.

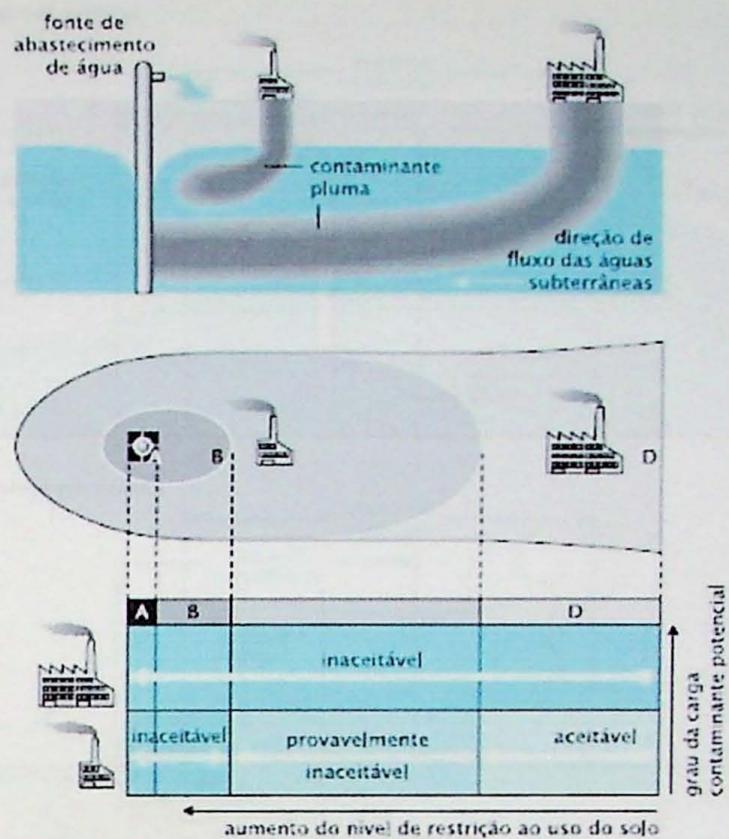
O aqüífero possui características como porosidade granular, livre, heterogêneo anisotrópico.

### **4. Perímetro de proteção de poço (PPP)**

A qualidade da água subterrânea só é mantida se houver um controle e restrição ao uso do terreno que circunda uma fonte de captação de água subterrânea de interesse.

Sendo assim, as áreas definidas pelos PPPs são áreas onde se restringe a ocupação de atividades potencialmente contaminantes (**Figura 2**). Portanto, podem ser definidas como termos administrativos, em oposição à ZOC, que é a área relacionada à recarga da fonte de água.

Os PPPs devem ser protegidos contra contaminantes que se degradam com o tempo, considerando o tempo de residência no subsolo; e contaminantes não degradáveis, considerando a diluição associada ao fluxo principal.



**Figura 2 – Conceito de áreas de proteção das fontes de água subterrânea com restrições no uso de território.**  
**(Foster et al. 2002)**

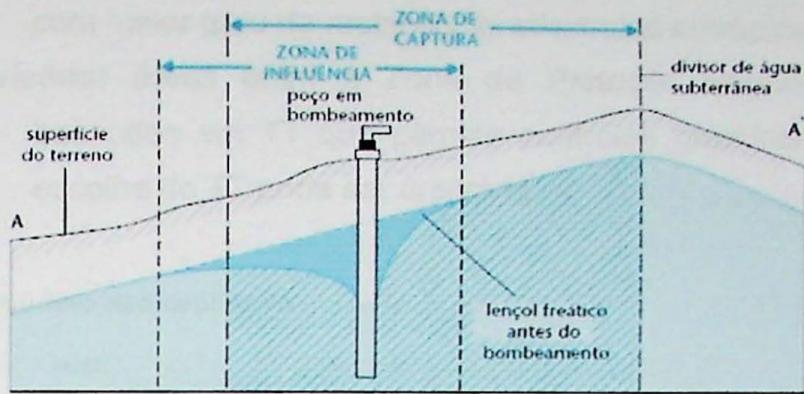
A *United States Environmental Protection Agency* (USEPA 1987) estabelece, para uma ZOC, três diferentes zonas segundo suas características hidráulicas. A Zona de Influência (ZI), Zona de Contribuição (ZOC) e Zona de Transporte (ZT) (**Figura 3**).

A ZI está relacionada ao rebaixamento da superfície potenciométrica ao redor de um poço em bombeamento, criando uma área denominada de Cone de Depressão.

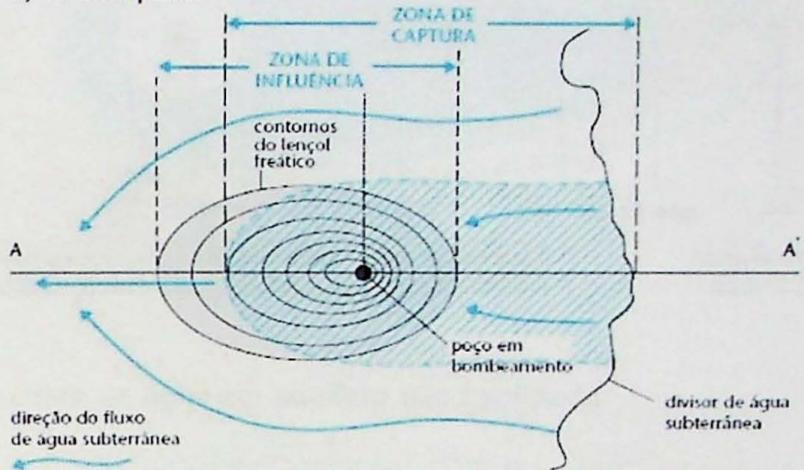
A ZOC é área de recarga de um poço. Qualquer substância móvel e persistente que se encontre na área de recarga e eventualmente atinja o poço, se poluída, pode contaminar o aquífero. Por esta razão, a ZOC é a zona que os programas de proteção de poço devem procurar proteger.

A ZT, ou zona de captura para determinado tempo de trânsito (TT), é estabelecida com relação ao TT que certa pluma contaminante leva para atingir o poço.

a) perfil vertical



b) vista em planta



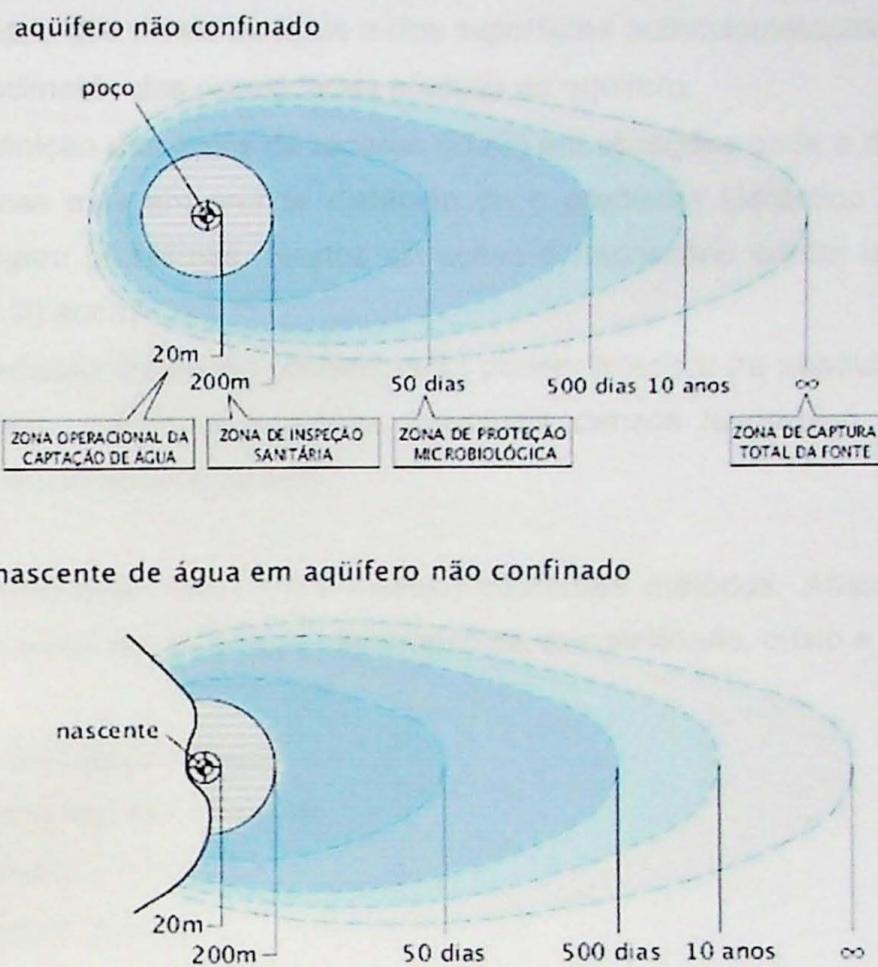
**Figura 3 – Nomenclatura das diferentes zonas dentro de um PPP, baseadas em sua hidráulica.**  
(USEPA 1994)

Em virtude das pressões sócio-econômicas para o desenvolvimento, é economicamente inviável restringir a ocupação de atividades potencialmente contaminantes dentro de toda a ZOC. Assim, é necessário encontrar um equilíbrio entre a proteção adequada e suficiente do recurso com a atividade sócio-econômica circundante.

Foster et al. (2002) propôs uma divisão desta zona em áreas com diferentes graus de restrições, sendo as áreas mais próximas da captação de água com grau mais elevado de restrição. Essas áreas podem ser subdivididas em (Figura 4):

- **Zona de Captura (ZOC):** é a zona de recarga, ou seja, é aquela onde cedo ou tarde a contaminação potencialmente atingirá a captação de água subterrânea;
- **Zona de Proteção Microbiológica:** área de proteção contra vírus, bactérias e parasitas patógenos, baseada na distância equivalente a um TT horizontal médio da zona saturada. Após estudos realizados ficou confirmado que 50 dias é um tempo razoável para se definir a zona. Este valor é padronizado para muitos países;

- **Zona Operacional da Captação de água:** área mais interna para proteção e, portanto, com maior grau de restrição de atividades antrópicas;
- **Outras subdivisões:** áreas entre a Zona de Proteção Microbiológica e a ZOC, baseadas em TT que permite controles graduais do uso do solo. A escolha do TT pode ser arbitrária.



**Figura 4 - Esquema das ZOCs de água subterrânea e dos perímetros do TT ao redor de um poço e uma nascente.**  
**(Foster et al. 2002)**

Neste conceito de PPP podem ser encontradas algumas complicações, devido a uma série de situações hidrogeológicas e de exploração do aquífero, como:

- Complexidade (transiência) da exploração de poços. Em aquíferos onde as extrações são prolongadas e excedem consideravelmente sua recarga a longo prazo, pode ocorrer o rebaixamento dos níveis de água subterrânea e consequentemente a instabilidade do PPP;
- Complexidade hidrogeológica. Por exemplo, em aquíferos fissurados a água passará com mais facilidade, portanto com maior velocidade;
- Falta de informação (que se relaciona aos dois primeiros) e recursos financeiros;

- Influências do rebaixamento de outros poços de bombeamento na região. A interferência entre poços de bombeamento produz zonas de proteção complexas e instáveis. A solução seria recorrer à vulnerabilidade do aquífero com critério para a proteção do recurso;
- Geometria do aquífero, presença de barreiras positivas e negativas, condições de contorno;
- Sazonalidade dos níveis de água e das superfícies potenciométricas;
- Desconhecimento das porosidades efetivas do aquífero.
- Com a definição das áreas de recarga (ZOC) em situações onde a divisória de águas subterrâneas está em grande distância ou o gradiente hidráulico regional é muito baixo, surgem problemas. Nestas situações é necessário adotar uma "isócrona de corte" (de 10 anos);
- As propriedades físicas do contaminante podem interferir na penetração no subsolo. Por exemplo, solventes orgânicos imiscíveis densos favorecem uma penetração mais rápida que a água no solo.

Para a delimitação das ZOCs existem diferentes métodos. Abaixo estão citados alguns desses métodos em ordem de incremento de complexidade, custo e confiabilidade:

- Raio Fixo Calculado (RFC);
- Formas variáveis simplificadas;
- Modelo Analítico (MA);
- Mapa Hidrogeológico;
- Modelo Numérico de fluxo (MN).

O processo de delimitação depende em grande parte da confiabilidade do método adotado para representar o sistema aquífero, assim como a quantidade e exatidão dos dados disponíveis.

A escolha do método dependerá da experiência do usuário, recursos e informações do local disponível, assim como o grau de confiança desejado.

Apesar dos estudos, conceitos e cálculos, qualquer modelo estará sujeito a incertezas, pois é fisicamente impossível verificar em campo todos os parâmetros representados na situação. As variáveis mais críticas que afetam a geometria na zona de proteção são a taxa de recarga do aquífero, a condutividade hidráulica e a porosidade efetiva. Para cada uma dessas variáveis determinam-se as melhores estimativas e limite de validade dos valores a partir dos dados disponíveis.

## **5. Histórico de implementação dos programas de perímetro de proteção de poço em países desenvolvidos**

Neste trabalho foram analisados os programas de PPP nos países europeus e nos EUA. A finalidade foi de entender as dificuldades encontradas pelos governos e as formas adotadas de superação destes problemas.

### **5.1 Experiência européia**

As primeiras experiências do uso de programas de aplicação dos métodos de PPP ocorreram na década de 30 nos países europeus, embora as Leis e regulamentações mais importantes datem dos anos 50.

O Estado da Baviera (Alemanha) tem como conhecimento que o uso da água subterrânea é, principalmente, para atender o consumo humano, por acreditarem ser de boa qualidade. Por esta razão a maior parte da água de abastecimento público provém de fonte subterrânea.

Preocupados com a qualidade desse recurso, a Alemanha possui uma legislação, elaborada em 1953 e revisada em 1975 e 1995 (DVGW 1995) que estabelece a implantação das áreas de proteção promovendo controle, restrição e fiscalização das atividades antrópicas e do uso do solo. A área de proteção abrange as áreas de contribuição e das captações de água para consumo humano.

Assim, são definidas três zonas de proteção com o de objetivo de restringir o uso do solo e atividades antrópicas:

- **Zona 1:** objetiva proteger a captação de água contra qualquer tipo de poluição no entorno;
- **Zona 2:** objetiva proteger contra constituintes microbiológicos patogênicos. O perímetro é delimitado por um TT de 50 dias;
- **Zona 3:** área mais externa que se estende até a ZOC. Tem como objetivo proteger a água subterrânea contra contaminantes que percorrem até grandes distâncias. Essa zona é subdividida em **Zona 3A**, mais próxima da captação, que inclui áreas mais vulneráveis à contaminação e, portanto as restrições adotadas são mais rígidas; e **Zona 3B**, a qual abrange o restante da ZOC.

O órgão gestor, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW), no caso do Estado da Baviera, define restrições a serem aplicadas nas áreas de proteção em cada região, conforme suas especificidades.

A instalação de novas fontes de captação é antecedida por vários estudos detalhados, incluindo monitoramento sistemático. Caso o resultado de estudos da área seja negativo para instalação de novas fontes, procura-se outro local mais apropriado. Este planejamento na fase inicial minimiza dificuldades e custos, além de promover proteção da qualidade da água subterrânea.

Van Waegeningh (1985) estabeleceu um quadro (**Tabela 1**) preliminar que compara a diversidade nas experiências européias para delimitar os PPPs, apresentando proibições aplicadas em diferentes zonas.

Na Zona I, somente atividades de suprimento de água são permitidas, as dimensões variam de 10 a 50m; na Zona II, também conhecida como zona de proteção bacteriológica, restringe as construções e as atividades agrícolas, suas dimensões variam de 50 a 60 dias de TT ou em alguns países, dimensões maiores que 100m; na Zona III e um pouco além desta, objetiva proteger contra contaminantes mais persistentes, portanto há restrições sobre certos tipos de indústrias e, sobre a disposição, armazenamento e o transporte de produtos químicos. Para muitos países essa zona representa a área de recarga da captação de água subterrânea, e as dimensões variam de 2km ou a partir de TT para 5, 10, 25 ou 100 anos.

Outro exemplo de restrição às atividades potencialmente contaminantes pode ser observado em Foster et. al (2002) (**Tabela 2**).

PAÍS	PERIMETROS DE PROTEÇÃO DE CAPTAÇÕES			
	zona I	zona II	zona IIIA	zona IIIB
Ex-Alemanha Ocidental	10m	50 dias	2km	
Ex-Alemanha Oriental	zona I	zona II	zona IIIA	zona IIIB
	5 a 10m	60 dias	10 anos	25 anos
Suíça	zona I	zona II	zona IIIA	zona IIIB
	10 a 20m	10 dias ou 100m	200m	
Holanda	área de captação	Zona de proteção	zona de proteção	
	50 a 60 dias ou 30 a 150m	10 anos ou 800m	25 anos ou 1200m	
França	perímetro de proteção imediato	Perímetro de prot. intermediária	perímetro de proteção afastado	
	10 a 20m	100 dias ou 200 a 500m	1 a 2km	
Austria	área de proteção imediata	Área de proteção	área de proteção parcial	
		50 dias		
Bélgica	área de proteção imediata	Área de proteção intermediária	área de proteção remota	
	24h ou 100m	50 dias ou 300 a 1000m		
Finlândia	área imediata	zona de proteção interna	zona de proteção extrema	
		60 dias		
Ex-Tchecoslováquia	zona primária de proteção sanitária	zona secundária interna de proteção sanitária	zona secundária externa de proteção sanitária	
	10 a 50m			
Suécia	área do poço	área de proteção interna	área de proteção extrema	
		60 dias ou 100m		
Hungria	zona de proteção	Área de proteção hidrogeológica		
	50 dias	25 a 100 anos		
Grã-Bretanha	área de proteção imediata			
	10 a 50m			

**Tabela 1 – Resumo dos PPPs em vários países europeus.**  
**(Van Waegeningh 1985)**

ATIVIDADE POTENCIALMENTE CONTAMINANTE QUE REQUER MEDIDAS DE CONTROLE	(B) POR ÁREA DE PROTEÇÃO DA FONTE			
	I	II	III	IV
Tanque Septico, Fossas Sanitárias e Latrinas				
propriedades individuais	N	N	A	A
propriedades comunitárias, públicas	N	N	PA	A
postos de gasolina	N	N	PN	PA
Instalações para Despejo de Resíduos Sólidos				
domésticos municipais	N	N	N	PN
de construção/inertes	N	N	PA	PA
industriais perigosos	N	N	N	N
industriais (tipo I)	N	N	N	PN
industriais (tipos II e III)	N	N	N	N
cemiterios	N	N	PN	A
incineradores	N	N	N	PN
Extração Mineral e de Petróleo				
materiais de construção (inertes)	N	N	PN	PA
outros, incluindo petróleo e gás	N	N	N	N
linhas de combustível	N	N	N	PN
Industriais				
tipo I	N	N	PN	PA
tipos II e III	N	N	N	N
Instalações Militares	N	N	N	N
Lagoas de Infiltração				
efluentes municipais/água de resfriamento	N	N	PA	A
efluentes industriais	N	N	N	N
Drenagem por Valas				
teto de edifícios	PA	A	A	A
estradas principais	N	N	N	PN
estradas secundárias	N	PN	PA	PA
áreas de lazer	N	PA	PA	A
estacionamentos	N	N	PN	PA
áreas industriais	N	N	N	PN
aeroportos/estações de trem	N	N	N	PN

N = não aceitável em quase todos os casos; PN = provavelmente não aceitável, exceto em alguns casos sujeitos a investigação detalhada e projeto específico; PA = provavelmente aceitável, sujeito a investigação e projeto específicos; A = aceitável, sujeito a projeto segundo as normas.

I = zona operacional; II = zona microbiológica; III = zona intermediária; IV = toda a área de captura.

**Tabela 2 – Matriz de aceitabilidade de instalações e atividades comuns potencialmente contaminantes conforme as zonas em superfície do solo para a proteção da água subterrânea (Foster et al 2002).**

Na Espanha, além da importância em selecionar a metodologia utilizada para delimitar as diferentes zonas de proteção do poço é necessária uma regulamentação para dimensão e atividades proibidas para cada uma das áreas demarcadas. O Instituto Tecnológico Geomineiro da Espanha (ITGE) propõe uma divisão do entorno das captações em três zonas, em graus de maior e menor risco. Essas zonas se classificam em:

- Zona imediata de restrição absoluta;
- Zona próxima ou de restrição máxima;
- Zona remota ou de restrições moderadas

Atualmente, o ITGE está desenvolvendo um novo guia metodológico sob a necessidade de implementar e melhorar a metodologia anterior.

A Inglaterra, por sua vez, desenvolveu um documento "Práticas e Políticas para a Proteção de Água Subterrânea" (GPP) e considera as seguintes áreas de proteção:

- **Zona 1:** se relaciona com o decaimento da contaminação por bactérias. É definida por um tempo de viagem de 50 dias com distância mínima de 50m. Esta zona geralmente não se define para aquíferos confinados;
- **Zona 2:** baseada na retardação, diluição e atenuação de contaminantes de degradação lenta. Inclui a área ao redor do poço determinada por um tempo de viagem de 400 dias ou área 25% da Zona 3. Esta zona geralmente não se define para aquíferos confinados;
- **Zona 3:** Definida como a área necessária para assegurar certa produção de recarga subterrânea a longo prazo. Nos aquíferos confinados esta zona está localizada a certa distância da extração real.

Na Dinamarca, por outro lado, apesar do abastecimento de água potável ser quase que exclusivamente por fontes subterrâneas, as zonas são mal detalhadas e pouco restritas, além de não contar com áreas mais extensas. Através da Lei de Proteção Ambiental foi estabelecida uma área de proteção física com 10m de raio em torno do poço, onde a única atividade permitida está relacionada com a fonte; e uma área de proteção higiênica de 300m de raio, onde não se permite descargas de águas residuais.

Analizando-se as várias experiências para o traçado dos PPPs, constata-se que os métodos analíticos, baseados em mapas hidrogeológicos e equações de fluxo homogêneo, são os mais amplamente utilizados.

Os modelos matemáticos atuais tiveram um grande avanço nos últimos anos, aperfeiçoando o estabelecimento dos PPPs.

No entanto, alguns problemas ainda persistem ao localizar uma área de proteção, tais como:

- A geração de uma área muito grande e de difícil operacionalidade, sobretudo quando esta área é densamente povoada e industrializada;
- Reutilização inadequada de uma solução anteriormente bem sucedida.

## 5.2. Experiência norte americana

Na década de 80, num país industrializado como os EUA, inexistia uma lei que tratasse diretamente da proteção da água de poços que abasteciam as cidades. Havia leis como o *Clean Water Act* (CWA) de 1972 para o estabelecimento, pelo USEPA (*United States Environmental Protection Agency*), de métodos de controle e análises de substâncias tóxicas em água de rejeitos.

O CWA autoriza o EPA, responsável por atividades federais em relação à qualidade das águas subterrâneas, com a capacidade de concessão de verbas aos estados para o desenvolvimento de estratégias para proteção da água subterrânea e também autoriza outros programas que previnem a contaminação da água.

Em 1976 com a aprovação do *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA) estabeleceu-se uma legislação para proteção do solo. O RCRA regula o armazenamento, transporte, tratamento e a eliminação de resíduos perigosos para impedir a lixiviação de contaminantes nas águas subterrâneas.

Em 1980 o Congresso Americano aprovou o *Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act* (CERCLA), também conhecido como *Superfund*, com a finalidade de remediar áreas contaminadas incluídas no *National Priority List* (NPL).

Em 1986, o presidente Reagan assinou uma nova legislação do *Superfund*, o *Superfund Amendments and Reauthorization Act* (SARA), estendendo o programa. Na gestão do presidente Bush o programa foi novamente renovado, mostrando sua importância.

O *Superfund* responsabiliza o governo de retirar a contaminação causada por derrames químicos ou componentes residuais perigosos que armazenam no meio ambiente. Suas emendas de 1986 incluem metas que permitem o cidadão o direito de manifestarem contra os que infringem a lei, e estabelecer programas de “direito da comunidade para estar informada”.

Com incentivo do programa europeu, os EUA criaram um programa de proteção de poços. No mesmo ano de 1986, o Congresso Americano aprovou uma emenda ao *Safe Drinking Water Act* (SDWA) de 1974, estabelecendo um programa nacional de prevenção da contaminação das águas subterrâneas de abastecimento público, o *Wellhead Protection Program* (WPP), e o *Sole Source Aquifer Demonstration Program* (SSADP).

A USEPA foi requerida para subsidiar tecnicamente os diferentes órgãos do poder público municipal e estadual para a definição de tais programas. Em 1987, a USEPA publicou o *Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas*, estabelecendo as bases técnicas e os métodos disponíveis para a aplicação de PPPs.

O SDWA autoriza o EPA a estabelecer normas para níveis máximos de contaminantes na água potável, regular a eliminação de resíduos em poços profundos.

O WPP definiu zonas diferentes, valores e parâmetros limites a serem respeitados (**Tabela 3**) e exigiu para cada Estado que apresentassem seus próprios programas de proteção de poços de abastecimento de água para assegurar a saúde pública, a serem submetidos à avaliação e, se aprovados, os implementarem.

Em estudos realizados pela EPA sabe-se que a maioria dos estados tem aprovado algum tipo de leis para proteger as águas subterrâneas.

O Estado da Califórnia teve maiores dificuldades para apresentar um programa de proteção, pois enfrenta problemas como um ambiente geológico muito complexo e muitas agências para tratar de problemas de poluição da água, o que dificultou chegar a um consenso. Outros Estados encontraram maior facilidade, por exemplo, Massachusetts (Hirata 1992 *apud* Cleary 1992).

CRITÉRIO	LIMITE DE CRITÉRIO
Distância	3m a mais de 3km
Rebaixamento	3 a 30cm
Tempo de trânsito (TT)	5-50 anos (dentro do aquífero); <5 anos em situação de fluxo rápido, como em terreno cárstico.
Contornos de fluxo	Físico e hidrológico
Capacidade assimilativa	Padrões de água potável para substâncias específicas

**Tabela 3 - Critérios limites para o traçado de PPPs nos EUA.**  
**(Cleary & Cleary 1990)**

Em USEPA (1994) encontram-se alguns estudos de caso informando, entre outras coisas, os métodos de delineação e o planejamento para elaboração do PPP.

O Departamento de Regulamentação Ambiental da Flórida utiliza a equação de fluxo volumétrico (RFC) e o critério de TT de 5 anos para definir a Zona II do PPP.

Em Rockford, Illinois, a principal fonte de abastecimento de água é por água subterrânea. Algumas áreas dessa região foram citadas em NPL do EPA para remediar a contaminação. O método de delineação usado para proteger a fonte de abastecimento foi o MN (PLASM e GWPATH) para delinear ZOCs e avaliar a interação do poço e operação na ZOC.

Em Palm Beach, Flórida, aproximadamente 80% de abastecimento de água potável vem por água subterrânea. O MN, MODFLOW, da U.S. Geological Survey foi usado para delinear quatro zonas, periodicamente revisadas, em torno de cada captação de água:

- **Zona 1:** utilizando um TT de 30 dias;
- **Zona 2:** utilizando um TT de 120 dias;
- **Zona 3:** área entre a isócrona de 210 dias e 500 dias de TT;
- **Zona 4:** área mais externa.

Em Nova Jersey, no ano de 2003, o Serviço Geológico de Nova Jersey desenvolveu pautas para delimitação de áreas de proteção de poço. O documento identifica três zonas de proteção para os poços com base no tempo de viagem para o poço:

- **Zona 1:** 2 anos;
- **Zona 2:** 5 anos;
- **Zona 3:** 12 anos.

Em Clinton, New Jersey, o método de delineação para proteger a fonte de abastecimento são realizações de detalhados mapas geológicos. O principal método de planejamento é informar a população sobre a importância em proteger águas subterrâneas.

Em Nantucket Island, Massachusetts, o método de delineação para proteger a fonte de abastecimento é a equação de não-equilíbrio de Theis e Raio Fixo Arbitrário. Mapas de nível d'água são usados para identificar áreas de recarga na ilha.

Na Bacia de Tucson, Arizona, o Pima Association of Governments (PAG) avaliou várias estratégias de WHPA baseada na informação hidrogeológica e de uso do solo e concluiu que as estratégias que focaram no estabelecimento de PPP em torno de poços individuais, onde são baseados no Raio Fixo Arbitrário ou critério de Tempo de Viagem foram ineficientes e impraticáveis. Assim, o PAG desenvolveu uma estratégia de delineação regional para PPP, um sistema para mapeamento de vulnerabilidade baseado em fatores hidrogeológicos.

Nos EUA as leis federais foram criadas com a finalidade de controlar a contaminação de águas subterrâneas por todo o país. A proteção de água subterrânea geralmente envolve restrições específicas sobre o uso de terreno.

A participação de todos os níveis de governo é necessária para que os programas de proteção tenham sucesso. O governo federal tem a obrigação de aprovar os programas estatais e dar apoio técnico aos governos estaduais e locais. Os governos estaduais têm a obrigação de desenvolver e por em prática programas de proteção de poços que obedeçam a SDWA. Os governos locais frequentemente realizam o controle sobre o uso do terreno de acordo com as leis estatais (USEPA 1987).

## **6. Implantação de Programas baseados em perímetros de proteção de poço no Estado de São Paulo**

Com base na avaliação dos planos das bacias hidrográficas, inseridos nos Comitês de Bacia do Estado de São Paulo, será possível verificar a adequação à implantação de programas baseadas em PPP, conforme exigido em leis.

Os Comitês de Bacia têm como responsabilidade discutir o uso, a recuperação e a preservação dos recursos hídricos, além de aprovar o plano de bacia e acompanhar sua execução, entre outras atribuições.

A Lei nº. 7.663, de 30 de dezembro de 1991, no Capítulo III e Artigo 17, define os planos de bacias hidrográficas. Assim, o Plano da Bacia Hidrográfica tem início com a elaboração do Termo de Referência que, entre outras atribuições, solicita a produção de um diagnóstico para identificar potencialidades e necessidades da bacia. Este estudo traz informações como a qualidade de água da bacia, um balanço entre a demanda e a disponibilidade de água, recomendações para uso e ocupação do solo, entre outros aspectos. Seu principal objetivo, portanto, é fundamentar e orientar a gestão de recursos hídricos da bacia.

Além disso, descreve sobre a importância de proteger áreas em torno do poço visando uma qualidade da água, restringindo a ocupação antrópica, conforme exigido em Lei.

As principais leis paulistas referente ao caso em estudo são:

- Decreto Paulista das águas subterrâneas nº. 32.955/91, que regulamenta a Lei das Águas Subterrâneas nº. 6.134/88 visam, especificamente, a proteção da qualidade das águas subterrâneas;
- Lei estadual nº. 6.134/88: dispõe sobre a preservação e conservação das águas subterrâneas no Estado de São Paulo, fiscalização de sua exploração, medidas de prevenção e controle de sua poluição e manutenção do seu equilíbrio físico, químico e biológico, além de estabelecer o instrumento “áreas de proteção”, que é a delimitação de áreas onde é possível um controle das atividades antrópicas de forma a promover a proteção da águas subterrânea no Estado.
- Decreto nº. 32.955/91 classifica, no Capítulo III, as áreas de proteção, que podem ser implantadas para a proteção dos aquíferos, em três níveis:

- **Área de proteção máxima:** compreendendo zonas de recarga de aquíferos altamente vulneráveis à poluição e que se constituam em depósitos de águas essenciais para o abastecimento público;
- **Área de restrição e controle:** controle máximo das fontes poluidoras já implantadas e restrição a novas atividades potencialmente poluidoras;
- **Área de proteção de poços e outras captações:** incluindo a distância mínima entre poços e outras captações e o respectivo perímetro de proteção.

Neste último é instituído o PPP em:

- **Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS):** abrangendo raio de 10m, a partir do ponto de captação, cercado e protegido com telas;
- **Perímetro de Alerta Contra Poluição (PAP):** estabelecido através da simulação de uma zona de captura de partículas com até 50 dias de trânsito.
  - Resolução do CNRH nº. 15/01: estabelece que os planos de recursos hídricos devem propor a criação de áreas de proteção dos recursos hídricos. Assim, visa o estímulo à proteção de áreas de recarga;
  - Deliberação CRH nº. 52/05: define procedimentos para a delimitação da "Área de Restrição e Controle da Captação e Uso da Água Subterrânea", incluindo a possibilidade de delimitação de uma área que engloba a ZOC de abastecimento público;
  - Resolução Conjunta SMA/ SERHS/ nº. 03/06: define procedimentos integrados para controle e vigilância de poços de abastecimento particulares.

Na Resolução nº. 52/05, a delimitação das Áreas de Restrição e Controle será estabelecida com o apoio de estudos hidrogeológicos e levará em consideração os Planos de Bacias Hidrográficas, os Relatórios de Situação dos Recursos Hídricos, os Programas Estaduais de Monitoramento de Qualidade e Atendimento à Potabilidade, que evidenciem os efeitos negativos da exploração e contaminação, apontando a necessidade da aplicação de ações preventivas e corretivas.

Para delimitar essas áreas de controle e restrição cabem aos órgãos gestores, Câmara Técnica, Agência de Bacias, além de também ser responsabilidade do Plano de Bacias do respectivo Comitê de Bacias Hidrográficas. Os resultados são submetidos aos comitês de bacias hidrográficas correspondentes e ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos, que será responsável pela sua inclusão como área de restrição e controle.

Como já mencionado, os planos de bacias hidrográficas são elaborados conforme exigências incluídas na legislação. No entanto, a legislação é falha em alguns aspectos, em consequência, existem problemas relacionados com a elaboração desses planos.

No Decreto paulista de águas subterrâneas nº 32.955/91 define no Capítulo III, na seção I, artigo 19, que a extração de águas subterrâneas poderá ser condicionada à recarga natural ou artificial dos aquíferos. No entanto, segundo Domenico e Schwartz (1990) o limite da quantidade de água que pode ser explorada regularmente e permanentemente sem grandes riscos está relacionado com o armazenamento do reservatório. Assim, a definição do limite de extração da água subterrânea deve considerar além da recarga do aquífero também o seu poder de armazenamento.

Ainda neste Decreto, não há diferenciação entre tipos de captação (poços ou nascentes) ou de aquíferos (sedimentar, cárstico ou fraturado).

Além disso, apenas a Área de Proteção de Poços e outras Captações, a qual inclui o “Perímetro Imediato de Proteção Sanitária” (raio de 10m) e o “Perímetro de Alerta” (TT de 50 dias), é direcionada à proteção da captação. Não há menção específica sobre a delimitação de uma área de proteção englobando toda a ZOC.

Com isso, apesar de serem apresentadas leis, decretos e resoluções que zelam pelo uso e qualidade da água, existem problemas graves e ainda sem soluções, como:

- Falta de fiscalização por aplicar essas normas de modo rigoroso e correto;
- Ocorrências da exploração do recurso hídrico de forma desenfreada, principalmente devido ao acúmulo de captações em um mesmo local. Essa exploração exagerada exige um bombeamento maior, encarecendo-o;
- Falta de cadastro dos poços construídos;
- Falta de integração dos diversos instrumentos que possam resultar na melhoria da qualidade e quantidade dos recursos hídricos, como é o caso de planos de ações de gestão territorial;
- Conflitos entre os órgãos responsáveis;
- Falta de verba para implementar os planos criados. No final do ano de 2005, a Assembléia Legislativa paulista aprovou o Projeto de Lei nº. 676/00, que estabelece a cobrança pelo uso da água feito por empresas de abastecimento, indústrias e setor agrícola. Essa cobrança ainda não é feita em todas as bacias hidrográficas, além de ser amplamente discutida.
- Desconhecimento do usuário quanto ao valor social e econômico da água.

Além dos problemas acima citados, pode-se dizer que o Estado de São Paulo tem instrumentos jurídicos para implementar as áreas de proteção mas, até o momento, não foi estabelecido um programa executivo e participativo de proteção de poços.

## 7. Estabelecimento do número de Zonas de Captura de Poços para o Estado de São Paulo

Para atender as exigências do Estado de São Paulo e definir as dimensões de ZOCs é necessário conhecer a geologia e hidrogeologia, obter dados confiáveis de hidráulica do aquífero como do poço de captação de água, assim como a quantidade de poços públicos existentes e suas localizações. Existe um cadastro de poços elaborado pelo DAEE, no entanto, este não está atualizado. Além disso, sabe-se que existem poços de abastecimento que não são outorgados e, portanto, não cadastrados, o que dificulta e compromete o controle e qualidade das águas subterrâneas.

Segundo o DAEE, o Banco de Dados em 2007, tinha 3.198 poços de usuários públicos e, em torno de 10.139 poços profundos de usuários públicos e privados (**Tabela 4**).

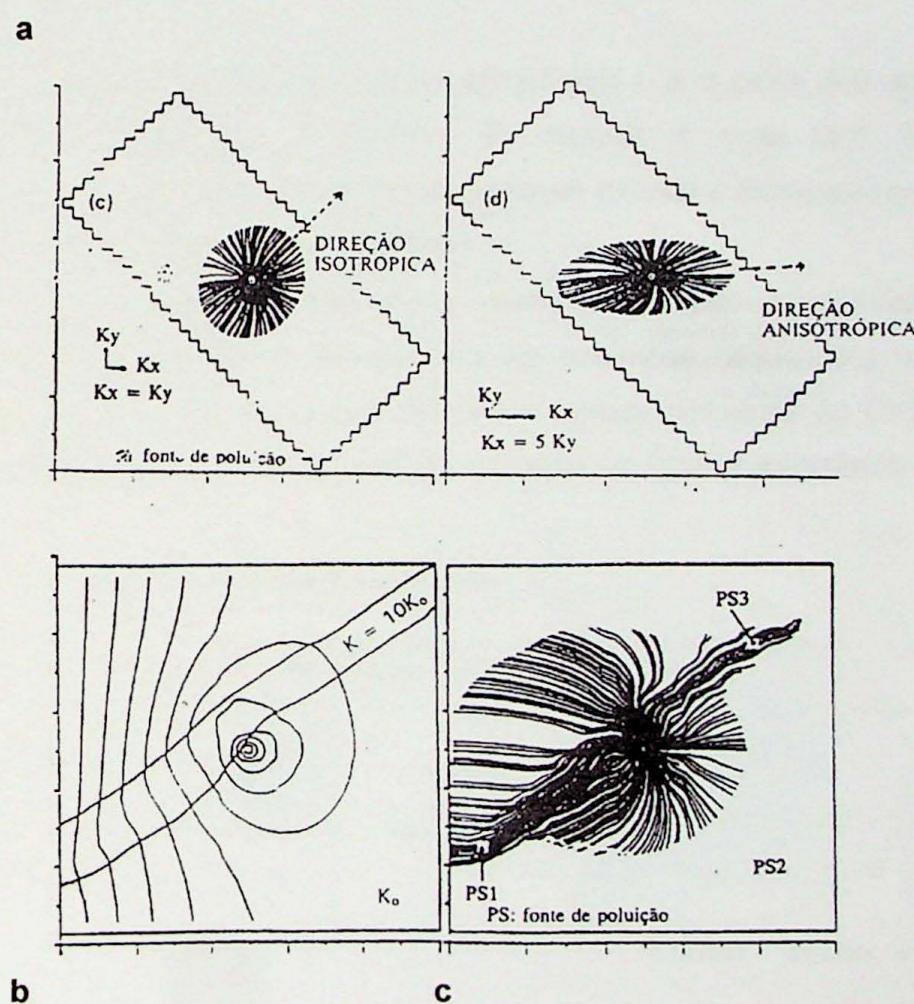
UGRHI	Poços Cadastrados Profundos	Q (m <sup>3</sup> /h) média
1- Mantiqueira	15	3
2- Paraíba do sul	550	17
3- Litoral Norte	10	2
4- Pardo	445	13
5- Piracicaba-Capivari-Jundiaí	1973	6
6- Alto Tietê	2102	8
7-Baixada Santista	5	4
8- Sapucaí- Grande	168	22
9-Mogi Guaçu	383	32
10- Tietê- Sorocaba	149	11
11-Ribeira do Iguape-Litoral Sul	4	17
12-Baixo Pardo-Grande	204	43
13-Tietê-Jacaré	759	37
14-Alto Paranapanema	63	9
15-Turvo-Grande	1145	19
16-Tietê-Batalha	288	18
17-Médio Paranapanema	131	0
18-São José dos Dourados	144	8
19-Baixo Tietê	179	37
20-Aguapeí	146	13
21-Peixe	108	22
22-Pontal do Paranapanema	524	11
Total	9495	16

**Tabela 4 – Cadastro de poços, usos e média da vazão das Unidades de Gerenciamento Hídrico (UGRHI) (DAEE Junho, 2007).**

## 8. Traçado do Perímetro de Proteção de Poço para Aqüíferos Fraturados, Confinados e Cárticos

O uso dos métodos para delinear um PPP ainda é discutido para alguns sistemas aqüíferos. Isso se deve a suas características excepcionais.

Aqüíferos fraturados, constituídos de rochas cristalinas, ígneas ou metamórficas, apresentam permeabilidade e porosidade secundárias desenvolvida após a consolidação da rocha. Estes são altamente heterogêneos e anisotrópicos, além de não possuírem continuidade das fraturas e falhas geológicas (Figura 5). Estas características dificultam a delinearção de PPPs. A Tabela 5 mostra as diferenças da circulação da água nestes aqüíferos e em aqüíferos porosos.



**Figura 5 – (a) Desenvolvimento de PPP nas direções isotrópica e anisotrópica. (b) Área de heterogeneidade criada por Zona de falhamento. (c) Forma irregular de um PPP devido ao efeito de falhamento.**  
**(Cleray & Cleary 1990)**

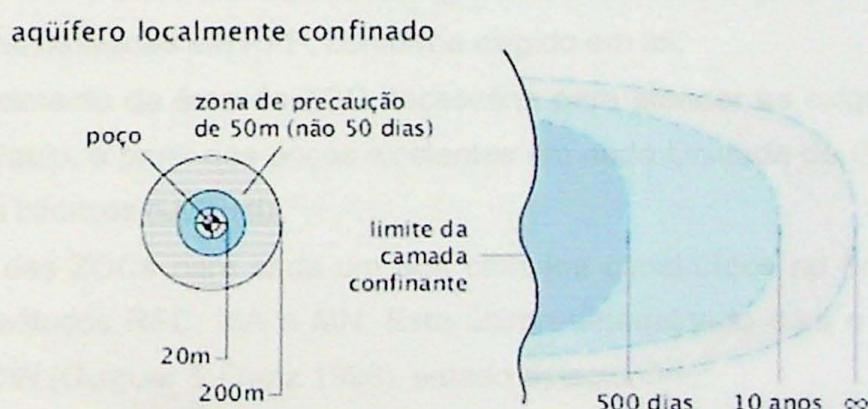
Características do Aqüífero	Meio poroso	Meio fraturado
Porosidade	Predominantemente primário	Predominantemente secundário
Fluxo	Vagaroso, laminar	Possivelmente rápido e turbulento
Isotropia	Mais isotrópico	Menos isotrópico
Homogeneidade fluxo	Mais homogêneo	Menos homogêneo
	Lei de Darcy aplicável	Lei de Darcy pode ser aplicável

**Tabela 5 – Diferenças hidráulicas entre aqüíferos fraturados e de porosidade primária.**  
(Hirata 1994)

Através de estudos é necessário verificar como se comporta o aqüífero fraturado. Em qualquer situação, quer em aqüíferos fraturados ou em aqüíferos fraturados com comportamento de meio poroso, é importante definir ZOCs e ZTs para o estabelecimento de PPPs (Hirata 1994).

Quando este se comporta como meio poroso – é o caso dos aqüíferos fraturados estudados nesse trabalho – a escolha do método é mais fácil. No entanto, suas características diferenciais fazem com que qualquer estudo seja desenvolvido com métodos mais detalhados e sofisticados (Hirata 1994).

Em relação a aqüíferos confinados, estes são menos vulneráveis à contaminação antrópica devido à camada confinante que se sobrepõe (aqüitarde) e ao seu grau de confinamento, difícil de definir, o que dificulta o estabelecimento do PPP. Sabe-se que a ZOC será localizada longe do ponto real de extração da água subterrânea (**Figura 6**).



**Figura 6 - Esquema das zonas de captura de água subterrânea e dos perímetros do TT ao redor de um poço e uma nascente.**  
(Foster et al. 2002)

Segundo USEPA (1991b), para definir a ZOC, neste caso, é recomendável o uso dos métodos que utilizam critérios de TT, uma vez que a distância lateral não caracteriza bem a área de recarga (Hirata 1994).

Em aquíferos cársticos o padrão de fluxo é extremamente irregular devido à presença de feições de dissolução (como cavernas, canais e dolinas), assim, a velocidade atingida nos condutos de fluxo é muito variável e alta. O poço bombeando nessas condições estabelece uma ZOC altamente irregular e difícil de ser inferida a partir da superfície (USEPA 1987b). Neste trabalho não se considerou este tipo de aquífero.

## 9. Materiais e Métodos

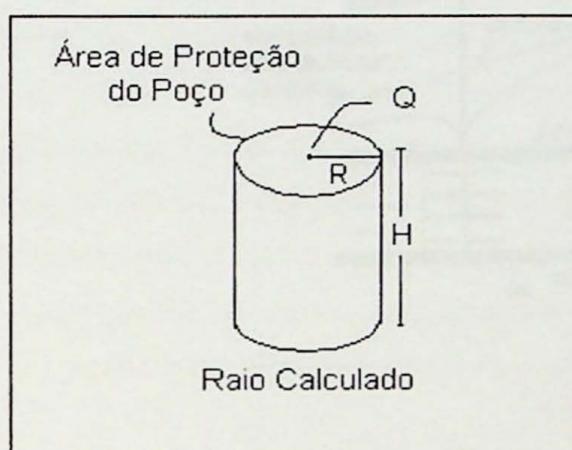
Ao longo do ano de 2007, este trabalho alcançou seus objetivos através das atividades que se encontram destacadas nos tópicos a seguir:

- Caracterização dos cenários hidrogeológicos típicos do Estado de São Paulo: a partir da avaliação de diversos estudos, sobretudo os relatórios de situação (Relatórios Zero), exigidos pelo governo paulista às bacias hidrográficas, foram obtidos os dados gerais de hidráulica e de geometria dos aquíferos mais importantes (**Anexo A**). Tais dados, juntamente com as cartografias geológicas, hidrogeológicas e geomorfológicas, permitiram estabelecer os modelos conceituais simplificados de circulação geral dos aquíferos paulistas;
- Avaliação do histórico de implementação dos programas de PPP em vários países: a análise das estratégias de implementação dos PPPs em países europeus e nos EUA ajudaram a entender as dificuldades encontradas pelos governos para manter a qualidade das águas;
- Avaliação dos planos das bacias hidrográficas e a sua adequação à implantação de programas baseadas em PPP, conforme exigido em lei;
- Estabelecimento da área da ZOC necessária para atender as exigências do Estado de São Paulo, a partir dos poços existentes em cada Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI);
- Traçado das ZOCs para cada um dos cenários construídos no primeiro item, com uso de métodos RFC, MA e MN. Este último determinado com o programa *Visual MODFLOW* (Guiguer & Franz 1996), estado estacionário;
- Determinação das extensões de cada ZOC para cada método e avaliação das áreas restritas no Estado de São Paulo. Avaliação da exequibilidade destas áreas para a realidade paulista;

## 9.1 Aplicação do Método Raio Fixo Calculado (RFC)

Este método se baseia em uma abordagem geométrica e consiste em definir uma área circular ao redor do poço, cujo raio é definido utilizando-se uma equação analítica de fluxo volumétrico. Este raio é calculado com base no TT, escolhido como limite de critério, em função das taxas diárias de bombeamento, porosidade total e espessura saturada do aquífero (Cleary 1992) (Figura 7).

Apesar das vantagens como: simplicidade e facilidade na aplicação, além do baixo custo necessário; não considera condições de heterogeneidade, anisotropia, recarga, gradiente do aquífero e particularidades de contornos de fluxo. Define uma área que pouco corresponde à realidade, com dimensões superestimadas, o que compromete sua eficácia, pois pode deixar de proteger áreas importantes que contribuem para a captação.



$$R = \sqrt{\frac{Qt}{\pi H n}}, \text{ onde:}$$

R = Raio (m)

T = Tempo de Trânsito (h)

n = Porosidade

H = Espessura da Zona Saturada (m)

Q = Taxa de Bombeamento ( $m^3/h$ )

**Figura 7 – Delineação da PPP utilizando-se o método do RFC.  
(como em Cleary 1989)**

## 9.2 Aplicação do Método Analítico (MA)

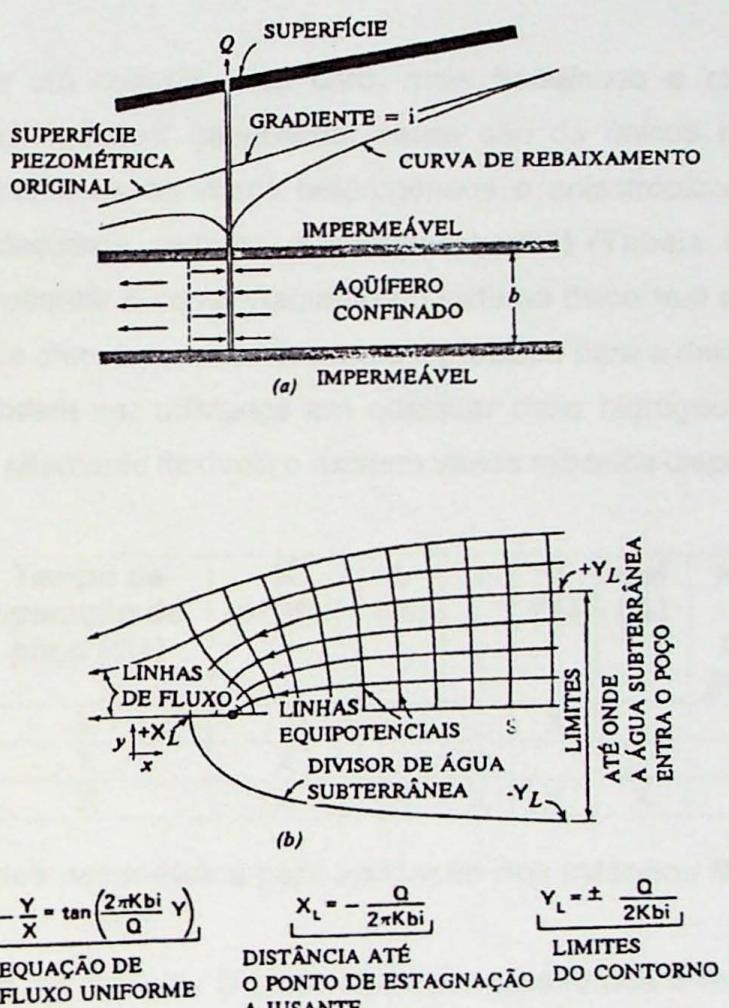
Dentre os métodos analíticos a equação de Fluxo Uniforme é a mais usada devido a sua facilidade de aplicação, além de definir a ZOC de um poço bombeando em condições de superfície potenciométrica inclinada (Cleary 1992).

Neste método, a distância é definida na direção x (direção do fluxo de água subterrânea), a jusante do poço, onde se encontra o ponto nulo ou de estagnação (divisor de águas formado pelo cone de depressão) e também, na direção y, a largura máxima da ZOC a montante da captação (Iritani 1998) (Figura 8).

Para estabelecer os limites a montante é necessário usar equações de TT ou por limites naturais, como divisores de drenagens ou barreiras positivas ou negativas (Hirata 1994).

O método permite o delineamento da ZOC sem, no entanto, definir o cone de depressão (ZI) e considera tanto aqüíferos confinados como livres. Além disso, é simples, requer poucas informações, porém um maior conhecimento do comportamento e parâmetros hidráulicos do aqüífero e pessoal com limitadas informações técnicas.

Esse método, portanto, é mais confiável que o anterior, no entanto, assim como o anterior, considera em suas equações, aqüíferos homogêneos e isotrópicos, comprometendo sua viabilidade.



#### LEGENDA

- poço bombeando

Onde:

$Q$  = taxa de bombeamento do poço

$K$  = condutividade hidráulica

$b$  = espessura saturada

$i$  = gradiente hidráulico

$\pi = 3,1416$

FORA DE ESCALA

Figura 8 – Delineação de PPP usando o método analítico, através do modelo analítico de fluxo uniforme (USEPA 1994).

### 9.3 Aplicação do Método Numérico (MN)

Neste método são utilizadas soluções numéricas que faz uso de equações de fluxo e/ou transporte de massa e consiste de modelos matemáticos de simulação processados em microcomputadores. Os programas mais utilizados para a delimitação das ZOCs e ZTs, que são de interesse para o traçado de PPP, são de fluxo de água subterrânea, pois permite, segundo Iritani (1998):

- entender, tridimensionalmente, a dinâmica de sistemas complexos de fluxo de água subterrânea;
- avaliar as direções preferenciais do caminhamento de contaminantes.

Apesar de ser um método mais caro, mais trabalhoso e requerer uma grande quantidade de dados e pessoal capacitado, esses são os únicos modelos que podem descrever adequadamente os aquíferos heterogêneos e anisotrópicos com contornos de fluxo (rio, zonas de descarga, recarga, evapotranspiração) (**Tabela 6**). Assim, o modelo matemático tenta representar o comportamento do sistema físico real da água subterrânea, gerando resultados que oferecem maior acuidade e precisão para a delimitação da ZOC.

Além disso, podem ser utilizados em qualquer meio hidrogeológico, inclusive nos meios fraturados, são altamente flexíveis e existem vários modelos disponíveis no mercado.

Método	Q do poço (m <sup>3</sup> /dia)	Tempo de operação do poço (dia)	K (m <sup>2</sup> /dia)	b (m)	i	n (%)	nef (%)	Recarga e Evapot. (mm/ano)	Condição de Contorno
RFC	X	X				X			
MA	X	X	X	X	X				
MN	X	X	X	X	X	X	X	X	X

**Tabela 6 – Dados necessários para aplicação dos métodos RFC, MA e MN**

Neste Trabalho, os modelos (**Anexo B**) foram construídos e executados através do software *Visual MODFLOW* (Guiguer & Franz 1996) na versão 2.8.2. Este programa resolve a equação de fluxo da água subterrânea através do método de diferenças finitas.

As ZOCs, para os aquíferos do Estado de São Paulo, foram definidas a partir do seguimento de partícula (*particle tracking*), que localiza os caminhos que a água/contaminante seguem para atingir o poço. Através do cálculo do TT é possível estabelecer ZTs específicas.

## **Entrada de Dados**

A malha inicial dos modelos representativos compreende a área de cada aquífero do Estado de São Paulo com uma malha de 8000m x 8000m, 80 colunas, 80 linhas e 6 camadas. A superfície do terreno foi elaborada conforme cota de poços perfurados nos respectivos aquíferos modelados, porém prevalecendo um relevo alto a oeste com diminuição para leste, onde há uma condição de contorno de fluxo – rio – representativo de cada sistema.

O rio, em todos os modelos, tem fluxo de norte para sul e sua condutância foi definida por equação com uma variação de espessura do rio e foi adotada, através de tentativa e erro, aquela que obteve uma melhor calibração.

Outras condições de contorno usadas foram recarga e evapotranspiração, que são dadas por um fluxo constante em toda a área de interesse.

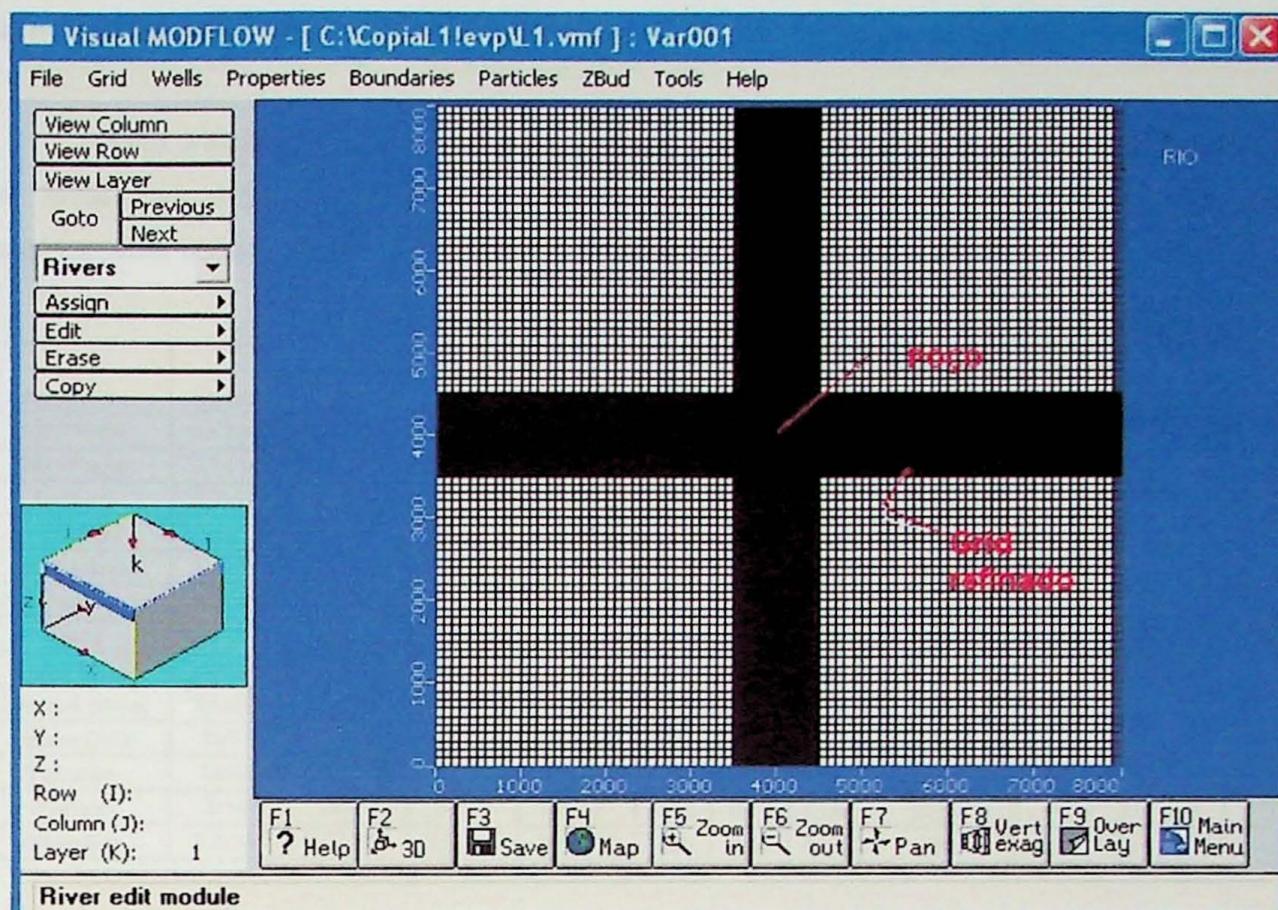
As propriedades utilizadas no modelo foram baseadas nos dados coletados e encontram-se no **Anexo A** inserido neste trabalho.

Os poços de bombeamento, com filtro em todo o aquífero, foram inseridos no centro da área e a vazão utilizada foi uma média de todos os poços representativos dos aquíferos.

Para detalhar a área nas localizações de bombeamento do poço, esta foi refinada. O espaçamento geral caracteriza-se por 100m cada coluna e cada linha. No refinamento, ambas as linha e colunas, entre 3500m a 4500m, passaram a ter um espaçamento de 20m e entre 3900m e 4100m, um espaçamento de 10m.

As linhas de trajetórias de partículas foram utilizadas para definir as ZOCs dos poços e para obter o prognóstico do “traço” de um possível contaminante infiltrado no aquífero. Foram adotados TT de 50 dias, 1 ano, 5 anos e 10 anos. As partículas foram inseridas em círculo ao redor do poço, para tempo regresso, com um raio de 10m.

A **Figura 9** mostra o modelo, semelhante para todos os aquíferos do Estado de São Paulo, criado no programa *Visual MODFLOW*.



**Figura 9 – modelo semelhante para todos os aquíferos do Estado de São Paulo.**

Para a solução numérica analítica foi utilizado o WHS Solver e, em alguns aquíferos, o PCG2. O PCG2 é baseado no método de gradiente pré-conjugado para resolver a equação de simulação produzida pelo modelo. Já o WHS Solver é baseado no método de gradiente pré-conjugado para inversão das matrizes necessárias à solução do problema. Esta é uma solução mais nova, mais rápida e mais estável (Guiguer & Franz 1996).

Enfim, para a finalização e obtenção dos resultados, o modelo foi calibrado por tentativa e erro de acordo com os dados fornecidos. O resultado obtido foi aquele que obteve melhor calibração.

O processo de calibração consiste no ajuste do modelo matemático simulado ao sistema hidrogeológico observado. O processo mais comumente utilizado é o de “tentativa e erro”, onde os parâmetros são ajustados manualmente através de simulações sucessivas e comparação entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas (ANDERSON e WOESSNER, 1992)

A partir do resultado gerado pelo programa *Visual MODFLOW*, as áreas da ZOC dos aquíferos paulistas foram calculadas em um programa desenvolvido em “linguagem C” para esta pesquisa (**Anexo C**). Este programa calcula a área pelo método de determinantes de triângulos, extrapolados do modelo. O software usado para desenvolvê-lo foi o *Dev-C++* (Laplace *et al.* 1989).

## 10. Resultados e Discussões

Neste trabalho os dados considerados na equação para o uso dos métodos RFC e MA foram as médias de cada aquífero estudado (**Anexo A**). Para o MN os dados considerados foram os que obtiveram melhor calibração (**Tabela 7**).

Aquíferos	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	Ss (1/m)	Sy [-]	nef	n	Condutância (m <sup>2</sup> /d)	Recarga (mm/a)	Evapot.	Q (m <sup>3</sup> /d)
Litorâneo	5,4 x10 <sup>-5</sup>	5,4 x10 <sup>-5</sup>	5,4 x10 <sup>-6</sup>	8,3 x10 <sup>-4</sup>	0,05	0,05	0,15	155.333	40	0	270
São Paulo	3,5x 10 <sup>-5</sup>	3,5 x 10 <sup>-5</sup>	3,5 x 10 <sup>-6</sup>	5,9x10 <sup>-4</sup>	0,05	0,05	0,1	750	60	0	288
Taubaté	2,7x10 <sup>-5</sup>	2,7x10 <sup>-5</sup>	2,7x10 <sup>-6</sup>	1,04x10 <sup>-3</sup>	0,05	0,05	0,15	600	120	0	1200
Marília	3x10 <sup>-5</sup>	3x10 <sup>-5</sup>	3x10 <sup>-6</sup>	2,8x10 <sup>-5</sup>	0,075	0,075	0,15	500	140	0	180
Adamantina	1,7x10 <sup>-6</sup>	1,7x10 <sup>-5</sup>	1,7x10 <sup>-7</sup>	2,66x10 <sup>-5</sup>	0,075	0,075	0,5	375	150	0	450
Sto Anastácio	7,2x10 <sup>-6</sup>	7,2x10 <sup>-6</sup>	7,2x10 <sup>-7</sup>	5,6x10 <sup>-6</sup>	0,1	0,1	0,25	820	100	0	840
Caluá	3x10 <sup>-5</sup>	3x10 <sup>-5</sup>	3x10 <sup>-6</sup>	3,7x10 <sup>-4</sup>	0,125	0,125	0,2	1700	150	0	2000
Serra Geral	5x10 <sup>-5</sup>	5x10 <sup>-5</sup>	5x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	0,01	0,01	0,05	500	80	0	800
Guarani (livre)	3,5x10 <sup>-5</sup>	3,5x10 <sup>-5</sup>	3,5x10 <sup>-6</sup>	4x10 <sup>-4</sup>	0,16	0,16	0,2	7500	100	0	1320
Passa Dols	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-7</sup>	8,34x10 <sup>-5</sup>	0,01	0,01	0,1	1000	4	0	120
Tubarão	5x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-7</sup>	2,5x10 <sup>-2</sup>	0,025	0,025	0,15	300	80	0	390
Furnas	3x10 <sup>-5</sup>	3x10 <sup>-5</sup>	3x10 <sup>-6</sup>	1,5x10 <sup>-3</sup>	0,15	0,15	0,25	2000	150	30	500
Cristalino	2,3x10 <sup>-6</sup>	2,3x10 <sup>-6</sup>	2,3x10 <sup>-7</sup>	1,5x10 <sup>-4</sup>	0,05	0,05	0,15	200	250	20	420

**Tabela 7 – Dados de entrada considerados no uso do método MN para os aquíferos do Estado de São Paulo.**

Para cada método realizado, com uso das mesmas condições hidrogeológicas, gerou-se um valor de área diferente. Para o método RFC as áreas foram extremamente grandes, com resultados em média 1000% maiores que para o MA.

A **Tabela 8** mostra o resultado, usando este método, da área da ZOC para os aquíferos do Estado de São Paulo.

Aqüíferos	50 dias (m <sup>2</sup> )	1 ano (m <sup>2</sup> )	5 anos (m <sup>2</sup> )	10 anos (m <sup>2</sup> )
<b>Coberturas Cenozóicas</b>	$551 \times 10^3$	$11 \times 10^6$	$121 \times 10^6$	$343 \times 10^6$
<b>Litorâneo</b>	$31 \times 10^3$	$621 \times 10^3$	$7 \times 10^6$	$19 \times 10^6$
<b>São Paulo</b>	$12 \times 10^3$	$234 \times 10^3$	$2 \times 10^6$	$7 \times 10^6$
<b>Taubaté</b>	$285 \times 10^3$	$5,6 \times 10^6$	$63 \times 10^6$	$178 \times 10^6$
<b>Marília</b>	$9 \times 10^3$	$178 \times 10^3$	$2 \times 10^6$	$5 \times 10^6$
<b>Adamantina</b>	$61 \times 10^3$	$1 \times 10^6$	$13 \times 10^6$	$37 \times 10^6$
<b>Santo Anastácio</b>	$109 \times 10^3$	$2 \times 10^6$	$24 \times 10^6$	$23 \times 10^6$
<b>Caiuá</b>	$285 \times 10^3$	$5 \times 10^6$	$63 \times 10^6$	$178 \times 10^6$
<b>Serra Geral</b>	$964 \times 10^3$	$19 \times 10^6$	$212 \times 10^6$	$601 \times 10^6$
<b>Guarani (livre)</b>	$63 \times 10^3$	$1 \times 10^6$	$14 \times 10^6$	$39 \times 10^6$
<b>Guarani (confinado)</b>	$115 \times 10^3$	$2 \times 10^6$	$25 \times 10^6$	$72 \times 10^6$
<b>Passa Dois</b>	$19 \times 10^3$	$369 \times 10^3$	$4 \times 10^6$	$11 \times 10^6$
<b>Tubarão</b>	$2,3 \times 10^3$	$47 \times 10^3$	$527 \times 10^3$	$1 \times 10^6$
<b>Furnas</b>	$30 \times 10^3$	$601 \times 10^3$	$7 \times 10^6$	$19 \times 10^6$
<b>Cristalino</b>	$21 \times 10^3$	$412 \times 10^3$	$4 \times 10^6$	$13 \times 10^6$

**Tabela 8 – Área da ZOC usando o método RFC nos aqüíferos do Estado de São Paulo.**

Para o método MA, as áreas obtidas como resultado foram menores que as áreas obtidas pelo RFC e são em média 500% maiores que para o resultado do MN.

A Tabela 9 mostra o resultado, usando este método, do cálculo da ZOC para os aqüíferos do Estado de São Paulo.

Aqüíferos	50 dias (m <sup>2</sup> )	1 ano (m <sup>2</sup> )	5 anos (m <sup>2</sup> )	10 anos (m <sup>2</sup> )
<b>Coberturas cenozóicas</b>	$179 \times 10^3$	$256 \times 10^3$	$614 \times 10^3$	$1 \times 10^6$
<b>Litorâneo</b>	$21 \times 10^3$	$39 \times 10^3$	$119 \times 10^3$	$220 \times 10^3$
<b>São Paulo</b>	$2 \times 10^3$	$8 \times 10^3$	$36 \times 10^3$	$70 \times 10^3$
<b>Taubaté</b>	$34 \times 10^3$	$66 \times 10^3$	$215 \times 10^3$	$401 \times 10^3$
<b>Marília</b>	$2 \times 10^3$	$6 \times 10^3$	$26 \times 10^3$	$50 \times 10^3$
<b>Adamantina</b>	$3 \times 10^3$	$13 \times 10^3$	$59 \times 10^3$	$117 \times 10^3$
<b>Santo Anastácio</b>	$112 \times 10^3$	$131 \times 10^3$	$218 \times 10^3$	$328 \times 10^3$
<b>Caiuá</b>	$543 \times 10^3$	$558 \times 10^3$	$628 \times 10^3$	$715 \times 10^3$
<b>Serra Geral</b>	$55 \times 10^3$	$118 \times 10^3$	$410 \times 10^3$	$775 \times 10^3$
<b>Guarani (confinado)</b>	$7 \times 10^3$	$18 \times 10^3$	$69 \times 10^3$	$134 \times 10^3$
<b>Guarani (livre)</b>	$182 \times 10^3$	$191 \times 10^3$	$232 \times 10^3$	$284 \times 10^3$
<b>Passa Dois</b>	$27 \times 10^3$	$68 \times 10^3$	$257 \times 10^3$	$495 \times 10^3$
<b>Tubarão</b>	$2 \times 10^3$	$8 \times 10^3$	$37 \times 10^3$	$73 \times 10^3$
<b>Furnas</b>	$103 \times 10^3$	$109 \times 10^3$	$135 \times 10^3$	$168 \times 10^3$
<b>Cristalino</b>	$113 \times 10^3$	$123 \times 10^3$	$143 \times 10^3$	$143 \times 10^3$

**Tabela 9 – Área da ZOC definida com base no MA de Fluxo Uniforme nos aqüíferos do Estado de São Paulo.**

A Tabela 10 mostra o resultado, usando o MN, do cálculo da ZOC para os aqüíferos do Estado de São Paulo, essas áreas foram ainda menores.

Aqüíferos	50 dias (m <sup>2</sup> )	1 ano (m <sup>2</sup> )	5 anos (m <sup>2</sup> )	10 anos (m <sup>2</sup> )
Litorâneo	5 x10 <sup>3</sup>	33 x10 <sup>3</sup>	142 x10 <sup>3</sup>	297 x10 <sup>3</sup>
São Paulo	5 x10 <sup>3</sup>	25 x10 <sup>3</sup>	113 x10 <sup>3</sup>	234 x10 <sup>3</sup>
Taubaté	4 x10 <sup>3</sup>	22 x10 <sup>3</sup>	95 x10 <sup>3</sup>	158 x10 <sup>3</sup>
Marília	2 x10 <sup>3</sup>	6 x10 <sup>3</sup>	28 x10 <sup>3</sup>	54 x10 <sup>3</sup>
Adamantina	3 x10 <sup>3</sup>	13 x10 <sup>3</sup>	62 x10 <sup>3</sup>	124 x10 <sup>3</sup>
Santo Anastácio	7 x10 <sup>3</sup>	42 x10 <sup>3</sup>	181 x10 <sup>3</sup>	364 x10 <sup>3</sup>
Caiuá	6 x10 <sup>3</sup>	33 x10 <sup>3</sup>	162 x10 <sup>3</sup>	288 x10 <sup>3</sup>
Serra Geral	32 x10 <sup>3</sup>	203 x10 <sup>3</sup>	880 x10 <sup>3</sup>	1 x10 <sup>6</sup>
Guarani (livre)	4 x10 <sup>3</sup>	15 x10 <sup>3</sup>	74 x10 <sup>3</sup>	139 x10 <sup>3</sup>
Passa Dois	7 x10 <sup>3</sup>	42 x10 <sup>3</sup>	188 x10 <sup>3</sup>	351 x10 <sup>3</sup>
Tubarão	1,9 x10 <sup>3</sup>	11 x10 <sup>3</sup>	32 x10 <sup>3</sup>	61 x10 <sup>3</sup>
Furnas	2 x10 <sup>3</sup>	7 x10 <sup>3</sup>	33 x10 <sup>3</sup>	63 x10 <sup>3</sup>
Cristalino	3 x10 <sup>3</sup>	17 x10 <sup>3</sup>	77 x10 <sup>3</sup>	151 x10 <sup>3</sup>

**Tabela 10 – Área da ZOC definida com base no MN para os aqüíferos do Estado de São Paulo.**

As Tabelas 11, 12, 13 e 14 e Figuras 10, 11, 12 e 13 comparam as áreas calculadas pelos métodos utilizados neste trabalho para TT de 50 dias, 1 ano, 5 anos e 10 anos, respectivamente, pode-se observar que, de forma geral, as áreas fornecidas pelo MN são menores que para os outros dois métodos. E as áreas fornecidas pelo método RFC são as maiores.

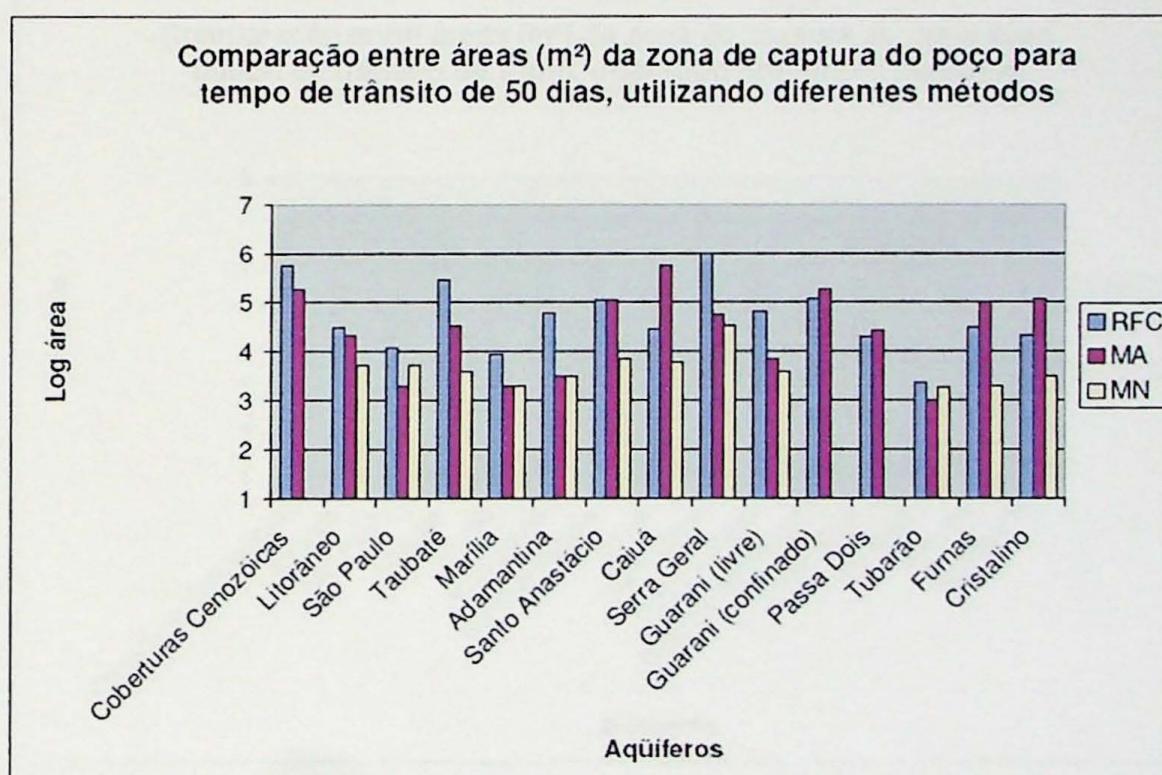
Sendo assim, torna-se pouco viável a aplicação do método RFC nos aqüíferos paulistas, pois, define uma área que pouco corresponde à realidade.

A utilização do MA é viável numa primeira aproximação, pois apresenta uma precisão maior que o método RFC, além dos dados já se encontram disponíveis para quase todos os poços públicos do Estado de São Paulo.

Já numa fase posterior, o MN seria a alternativa natural, por estabelecer uma potenciometria mais detalhada e considerar meios heterogêneos e anisotrópicos, gera resultados mais precisos. Sua viabilidade só é garantida se há fidelidade entre o mapa de superfícies potenciométricas gerado e o observado em campo.

Aqüíferos	50 dias ( $m^2$ )		
	RFC	MA	MN
Coberturas Cenozóicas	551 $\times 10^3$	179 $\times 10^3$	
Litorâneo	31 $\times 10^3$	21 $\times 10^3$	5 $\times 10^3$
São Paulo	12 $\times 10^3$	2 $\times 10^3$	5 $\times 10^3$
Taubaté	285 $\times 10^3$	34 $\times 10^3$	4 $\times 10^3$
Marília	9 $\times 10^3$	2 $\times 10^3$	2 $\times 10^3$
Adamantina	61 $\times 10^3$	3 $\times 10^3$	3 $\times 10^3$
Santo Anastácio	109 $\times 10^3$	112 $\times 10^3$	7 $\times 10^3$
Caiuá	285 $\times 10^3$	543 $\times 10^3$	6 $\times 10^3$
Serra Geral	964 $\times 10^3$	55 $\times 10^3$	32 $\times 10^3$
Guarani (livre)	63 $\times 10^3$	7 $\times 10^3$	4 $\times 10^3$
Guarani (confinado)	115 $\times 10^3$	182 $\times 10^3$	
Passa Dois	19 $\times 10^3$	27 $\times 10^3$	7 $\times 10^3$
Tubarão	2,3 $\times 10^3$	2 $\times 10^3$	1,9 $\times 10^3$
Furnas	30 $\times 10^3$	103 $\times 10^3$	2 $\times 10^3$
Cristalino	21 $\times 10^3$	113 $\times 10^3$	3 $\times 10^3$

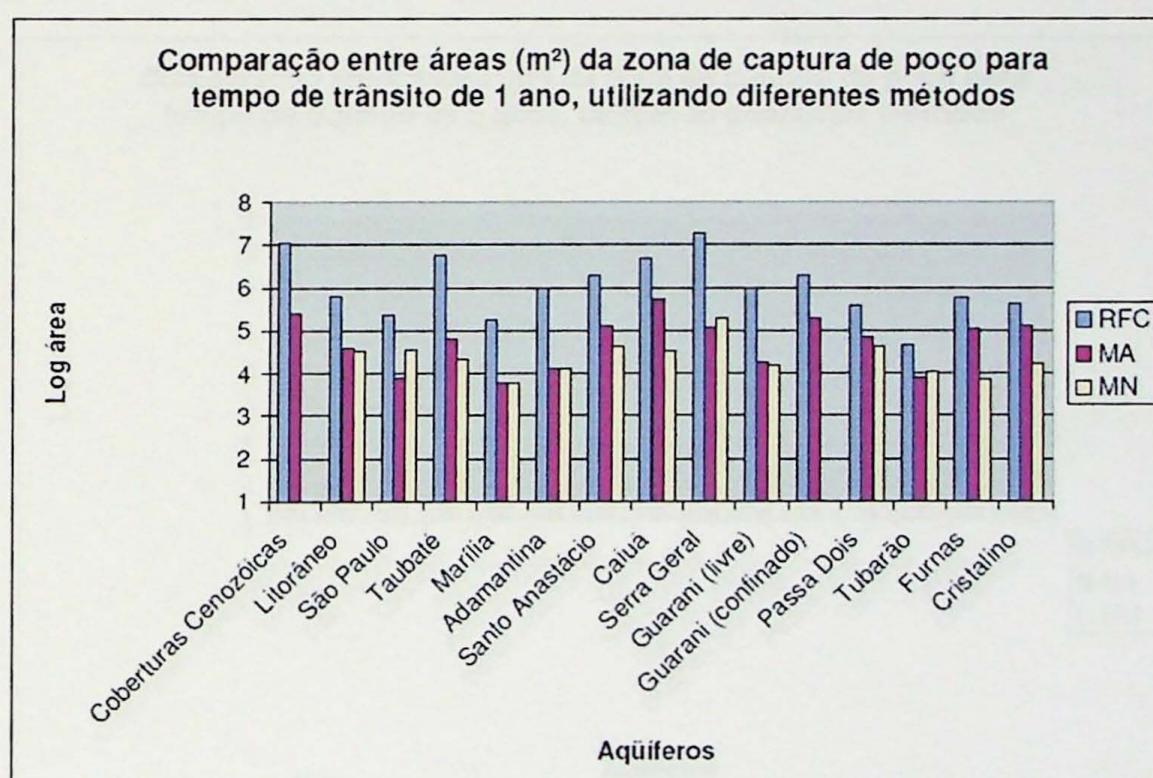
**Tabela 11 – Comparação entre áreas de ZOC para TT de 50 dias, utilizando-se diferentes métodos: RFC, MA, MN, nos aqüíferos do Estado de São Paulo.**



**Figura 10- Comparação entre áreas de ZOC para TT de 50 dias, utilizando-se diferentes métodos: RFC, MA, MN, nos aqüíferos do Estado de São Paulo.**

Aqüíferos	1 ano ( $m^2$ )		
	RFC	MA	MN
Coberturas Cenozóicas	$11 \times 10^6$	$256 \times 10^3$	----
Litorâneo	$621 \times 10^3$	$39 \times 10^3$	$33 \times 10^3$
São Paulo	$234 \times 10^3$	$8 \times 10^3$	$25 \times 10^3$
Taubaté	$5,6 \times 10^6$	$66 \times 10^3$	$22 \times 10^3$
Marília	$178 \times 10^3$	$6 \times 10^3$	$6 \times 10^3$
Adamantina	$1 \times 10^6$	$13 \times 10^3$	$13 \times 10^3$
Santo Anastácio	$2 \times 10^6$	$131 \times 10^3$	$42 \times 10^3$
Caiuá	$5 \times 10^6$	$558 \times 10^3$	$33 \times 10^3$
Serra Geral	$19 \times 10^6$	$118 \times 10^3$	$203 \times 10^3$
Guarani (livre)	$1 \times 10^6$	$18 \times 10^3$	$15 \times 10^3$
Guarani (confinado)	$2 \times 10^6$	$191 \times 10^3$	----
Passa Dois	$369 \times 10^3$	$68 \times 10^3$	$42 \times 10^3$
Tubarão	$47 \times 10^3$	$8 \times 10^3$	$11 \times 10^3$
Furnas	$601 \times 10^3$	$109 \times 10^3$	$7 \times 10^3$
Cristalino	$412 \times 10^3$	$123 \times 10^3$	$17 \times 10^3$

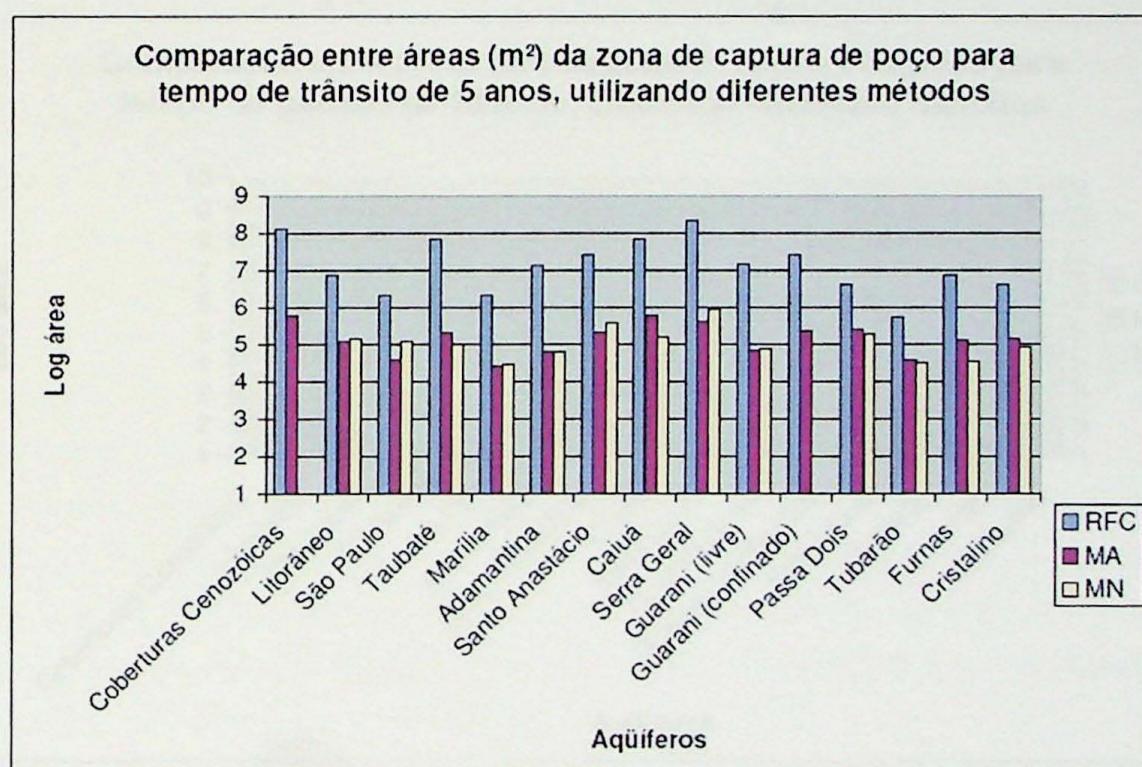
**Tabela 12 – Comparação entre áreas de ZOC para TT de 1 ano, utilizando-se diferentes métodos: RFC, MA, MN, nos aqüíferos do Estado de São Paulo.**



**Figura 11 – Comparação entre áreas de ZOC para TT de 1 ano, utilizando-se diferentes métodos: RFC, MA, MN, nos aqüíferos do Estado de São Paulo.**

	5 anos ( $m^2$ )		
	RFC	MA	MN
Aqüíferos Cenozóicas	121 $\times 10^6$	614 $\times 10^3$	----
Litorâneo	7 $\times 10^6$	119 $\times 10^3$	142 $\times 10^3$
São Paulo	2 $\times 10^6$	36 $\times 10^3$	113 $\times 10^3$
Taubaté	63 $\times 10^6$	215 $\times 10^3$	95 $\times 10^3$
Marília	2 $\times 10^6$	26 $\times 10^3$	28 $\times 10^3$
Adamantina	13 $\times 10^6$	59 $\times 10^3$	62 $\times 10^3$
Santo Anastácio	24 $\times 10^6$	218 $\times 10^3$	181 $\times 10^3$
Caiuá	63 $\times 10^6$	628 $\times 10^3$	162 $\times 10^3$
Serra Geral	212 $\times 10^6$	410 $\times 10^3$	880 $\times 10^3$
Guarani (livre)	14 $\times 10^6$	69 $\times 10^3$	74 $\times 10^3$
Guarani (confinado)	25 $\times 10^6$	232 $\times 10^3$	----
Passa Dois	4 $\times 10^6$	257 $\times 10^3$	188 $\times 10^3$
Tubarão	527 $\times 10^3$	37 $\times 10^3$	32 $\times 10^3$
Furnas	7 $\times 10^6$	135 $\times 10^3$	33 $\times 10^3$
Cristalino	4 $\times 10^6$	143 $\times 10^3$	77 $\times 10^3$

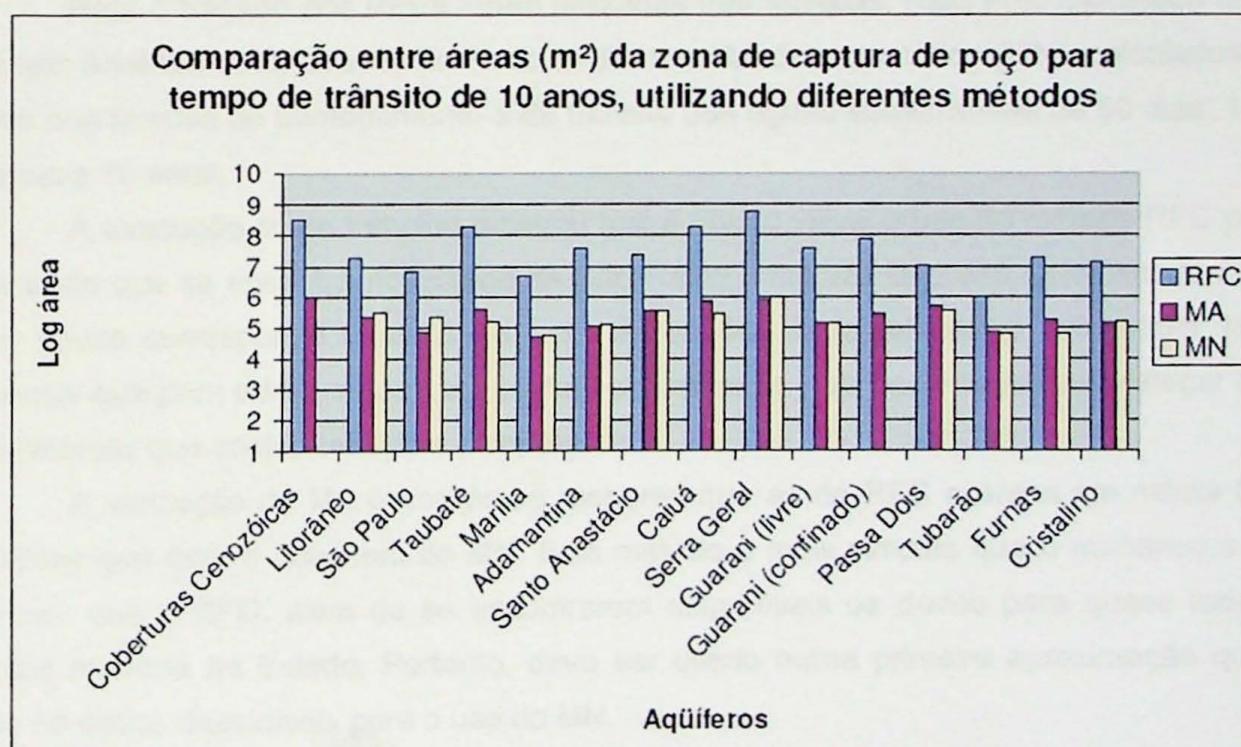
**Tabela 13 – Comparação entre áreas de ZOC para TT de 5 anos, utilizando-se diferentes métodos: RFC, MA, MN, nos aqüíferos do Estado de São Paulo.**



**Figura 12 – Comparação entre áreas de ZOC para TT de 5 anos, utilizando-se diferentes métodos: RFC, MA, MN, nos aqüíferos do Estado de São Paulo.**

Aqüíferos	10 anos (m <sup>2</sup> )		
	RFC	MA	MN
<b>Coberturas Cenozóicas</b>	$343 \times 10^6$	$1 \times 10^6$	
<b>Litorâneo</b>	$19 \times 10^6$	$220 \times 10^3$	$297 \times 10^3$
<b>São Paulo</b>	$7 \times 10^6$	$70 \times 10^3$	$234 \times 10^3$
<b>Taubaté</b>	$178 \times 10^6$	$401 \times 10^3$	$158 \times 10^3$
<b>Marília</b>	$5 \times 10^6$	$50 \times 10^3$	$54 \times 10^3$
<b>Adamantina</b>	$37 \times 10^6$	$117 \times 10^3$	$124 \times 10^3$
<b>Santo Anastácio</b>	$23 \times 10^6$	$328 \times 10^3$	$364 \times 10^3$
<b>Caiuá</b>	$178 \times 10^6$	$715 \times 10^3$	$288 \times 10^3$
<b>Serra Geral</b>	$601 \times 10^6$	$775 \times 10^3$	$1 \times 10^6$
<b>Guarani (livre)</b>	$39 \times 10^6$	$134 \times 10^3$	$139 \times 10^3$
<b>Guarani (confinado)</b>	$72 \times 10^6$	$284 \times 10^3$	
<b>Passa Dois</b>	$11 \times 10^6$	$495 \times 10^3$	$351 \times 10^3$
<b>Tubarão</b>	$1 \times 10^6$	$73 \times 10^3$	$61 \times 10^3$
<b>Furnas</b>	$19 \times 10^6$	$168 \times 10^3$	$63 \times 10^3$
<b>Cristalino</b>	$13 \times 10^6$	$143 \times 10^3$	$151 \times 10^3$

**Tabela 14 – Comparação entre áreas de ZOC para TT de 10 anos, utilizando-se diferentes métodos: RFC, MA, MN, nos aqüíferos do Estado de São Paulo.**



**Figura 13 – Comparação entre áreas de ZOC para TT de 10 anos, utilizando-se diferentes métodos: RFC, MA, MN, nos aqüíferos do Estado de São Paulo.**

Com o uso do MN pode-se, ainda, comparar o resultado das áreas de ZOCs a medida que muda os valores de Vazão (Q), Transmissividade (T) e Recarga (**Anexo D**).

Os resultados mostraram que a medida que aumenta a taxa de bombeamento em um determinado aquífero, aumentando seu cone de rebaixamento (ZI), a ZOC deve ser maior para protegê-lo.

A ZOC também deve ser cada vez maior se a Transmissividade do aquífero aumenta, devido a sua maior permeabilidade.

Sendo a ZOC a zona de recarga do aquífero, é a zona que fornece a produção protegida em um longo período. Assim, sabe-se que sua área é determinada com base na taxa de recarga média a longo prazo. Se essa taxa diminuir, a ZOC efetiva será maior do que a protegida.

## 11. Conclusões e Recomendações

O aumento da demanda do uso de água subterrânea levou à preocupação com a qualidade desse recurso. Entre outros métodos necessários e imprescindíveis para manter essa qualidade encontra-se a definição do perímetro de proteção de poço (PPP), gerado a partir de critérios hidrogeológicos.

Para o traçado dos PPPs foram utilizadas três técnicas: Raio Fixo Calculado (RFC), Modelo Analítico (MA) através do Fluxo Uniforme e Modelo Numérico (MN), calculados com base nos tempos de bombeamento e de trânsito das águas subterrâneas de 50 dias, 1 ano, 5 anos e 10 anos.

A execução deste trabalho mostrou que é pouco viável o uso do método RFC para a realidade que se encontra no Estado de São Paulo, uma vez que são determinadas áreas que pouco corresponde à realidade, com dimensões superestimadas, em média 1000% maiores que para o MA, o que compromete sua eficácia, pois pode deixar de proteger áreas importantes que contribuem para a captação.

A utilização do MA gerou áreas menores que as do RFC e áreas em média 500% maiores que para o resultado do MN. Este método é mais simples que o numérico e mais preciso que o RFC, além de se encontrarem disponíveis os dados para quase todos os poços públicos do Estado. Portanto, deve ser usado numa primeira aproximação quando não há dados disponíveis para o uso do MN.

Já numa fase posterior, onde a definição da ZOC seja mais sensível, o MN seria a alternativa natural. Apesar de ser um método mais trabalhoso, de levar mais tempo para se chegar a um resultado e necessitar de grande quantidade de dados confiáveis, é viável e mais preciso por considerar características hidrogeológicas de heterogeneidade, anisotropia e condições de contorno, situação que ocorre com maior freqüência nos aquíferos em geral. As áreas geradas por esse método foram as menores.

Além disso, com o uso deste método, e com o programa escolhido, será possível desenvolver estudos futuros para o gerenciamento de recursos hídricos, envolvendo transporte de contaminantes na área a partir dos resultados apresentados.

A implementação de PPPs no Estado de São Paulo é viável, porém complicada, uma vez que o estado possui alta densidade populacional, alta taxa de ocupação do solo, crescimento desordenado e falta de iniciativa do poder público, tanto na esfera estadual quanto na esfera municipal.

Recomenda-se em locais de PPP em que ocorram fontes de contaminação a necessidade de exigir medidas para impedir o risco de contaminação dos aquíferos, como manutenção preventiva dos equipamentos e instalações, além do monitoramento periódico do aquífero. Em locais de área de proteção intacta, deve-se verificar e controlar os empreendimentos a serem instalados a fim de não comprometer a qualidade da água subterrânea.

## 12. Referências Bibliográficas

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. 2005. Caderno de Recursos Hídricos. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. São Paulo, 74 p.
- ANDERSON, M.P e WOESSNER, W.W. 1992. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic Press. San Diego, EUA, 381 p.
- ARAÚJO, L.M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. 1995b. Arcabouço hidrogeológico do aquífero gigante do mercosul (Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai): Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Missiones e Taquarembó. In: 1º MERCOSUL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Curitiba, 1995b. Anais... Curitiba, ABAS, p. 110-120.
- CLEARY, 1989. Águas Subterrâneas. In: RAMOS et al. 1989. *Engenharia Hidrológica*. Coleção de ABRH e ed. UFRJ. Rio de Janeiro. v. 2, p. 291 - 404.
- CLEARY, M.T.C.B.F. & CLEARY, R. W. 1990. Delineation of wellhead protection areas: theory and practice. In: International Seminar of Pollution, Protection and Control of Ground Water. Porto Alegre, 1990. Porto Alegre, ABAS. p 140-151.
- CLEARY, M.T.C.B.F. 1992. Investigação através de modelos matemáticos em microcomputadores dos efeitos dos principais parâmetros hidrogeológicos e dos processos atenuantes de transporte na delinearção de áreas de proteção de poços (APPs) e na remediação de aquíferos contaminados. (Dissertação de mestrado, IGc-USP, inédita). 169 p.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1977. Estudo de Águas Subterrâneas – Região Administrativa 3 – São José dos Campos. DAEE, São Paulo, v.1 e 3.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1981. Estudo de Águas Subterrâneas – Região Administrativa 5 – Campinas. DAEE, São Paulo, 2 v.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1979b. Estudo de Águas Subterrâneas – Regiões Administrativas 10 e 11 – Presidente Prudente e Marília. DAEE, São Paulo, v.1 e 2.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 2005. CONSÓRCIO JMR-ENGECORPS. Síntese dos Planos de Bacia – Plano Estadual de Recursos Hídricos. São Paulo: DAEE/Consórcio JMR- ENGECORPS, 2005. (Relatório nº.1/2005).
- DIOGO, A.; BERTACHINI, A.C.; CAMPOS, H.C.N.S.; ROSA, R.B.G.S. 1981. Estudo preliminar das características hidráulicas e hidroquímicas do Grupo Tubarão no Estado de São Paulo. In: 3º SIMP. REG. GEOL. Curitiba, 1981. Atas... Curitiba, SBG. p 359-368.
- DOMENICO, P. A. & SCHWARTZ, F. W. 1990. Ground Water as a Resource. In: Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley and Sons, pp.: 199-236.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. 2002. Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Mundial, Washington, 115 p.

- GUIGUER, N. & FRANZ, T. 1996. *Visual MODFLOW. User's manual.* Waterloo Hidrogeologic Inc., Waterloo, Canadá. 176 p.
- HIRATA, R. 1994. Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas: estudo de casos no estado de São Paulo. (Tese de Doutoramento, IGc-USP, inédita). 195 p.
- HIRATA, R.; BASTOS, C.; ROCHA, G. (Coord). 1997. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo: IG-SMA/ CETESB/ DAEE. 2 v.
- HIRATA, R., & FERREIRA, L. M. R. 2001. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, SP, nº. 31, v. 1, p. 43-50.
- HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; FERNANDES, A. J. 2007. Groundwater resources in the state of São Paulo (Brazil): the application of indicators. In: Academia Brasileira de Ciências. Rio de Janeiro, 2007. Anais... Rio de Janeiro, AABC. v. 79, n.1, p. 141 – 152.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2005. Base de informações do censo demográfico. IBGE, Rio de Janeiro.
- IRITANI, M. 1998. Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea. (Tese de Doutoramento, IGc-USP, inédita). 193p.
- LAPLACE, C.; BERG, M.; LAI, H.; MANDRAVELLOS, Y. 1989. *Free software Foundation, Inc.* Cambrige, 1989.
- LIMA, A. A. 2004. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Bauru no município de São José do Rio Preto (SP). (Dissertação de mestrado, IgcUNESP, inédita). 82 p.
- ODA, G. H. 1998. Contribuição à hidrogeologia da região entre Salto de Pirapora e Itu (SP): análise da produtividade, ocorrência e circulação das águas subterrâneas dos Sistemas Aquíferos Tubarão e Cristalino. (Dissertação de mestrado, IgcUSP, inédita). 100 p.
- OLIVEIRA, L.M. & CAMPOS, J.E. 2004. Parâmetros Hidrogeológicos do Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari / MG: Fundamentos para a gestão do sistema de abastecimento de água. RBG. v. 34, p. 213-218.
- PORTELA FILHO, C.V.; FERREIRA, F.J.F.; ROSA FILHO, E.F.; ROSTIROLLA, S.P. 2005. Compartimentação magnética-estrutural do Sistema Aquífero Serra Geral e sua conectividade com o Sistema Aquífero Guarani na região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná). RBG. v. 35. p. 396-381.
- REBOUÇAS, A.C. 1978. Potencialidade hidrogeológica dos basaltos da bacia do Paraná no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geociências, 30. Recife, 1978. Anais... Recife, SBG. v.6, p. 2963-2976.
- RICCOMINI, C. 1989. O Rift continental do Sudeste do Brasil. (Tese de Doutorado, IgcUSP, inédita). 256 p.
- RICCOMINI, C. & COIMBRA, A. M. 1992. Geologia da Bacia Sedimentar de São Paulo. In: FERREIRA, A. A.; ALONSO, U. R.; LUZ, P. L. (Ed.). Solos da cidade de São Paulo. São Paulo: ABMS/ ABEF, p. 37-94.

ROCHA, G. A. 1982. Tentativa de zoneamento das características hidráulicas e hidroquímicas do aquífero Bauru. O grupo Bauru no Estado de São Paulo. In: ENCONTRO DE GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA,1. São Paulo, 1982. Publicação Especial...São Paulo, SBG/ABAS.

ROCHA, G., (Coord.) 2005. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo - Escala 1:1.000.000. São Paulo: CRH/DAEE/ IG/IPT/CPRM. 119 p.

SÃO PAULO. CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CRH). 1999. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. Comitê Coordenador do Plano Estadual dos Recursos Hídricos. SRHSO/DAEE/SMA/CETESB. São Paulo. 128 p.

SRHSO - SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS, SANEAMENTO E OBRAS. DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA 2002. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo – Plano Estadual de Recursos Hídricos. São Paulo: DAEE,2002. 119 p. il.

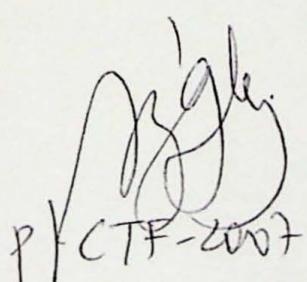
SILVA, F.P.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M.R. 2003. Perfis de Referência do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. RBG. v. 22. N. Especial. p. 21-31.

USEPA - U.S.ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1987. Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas. USEPA, Office of Groundwater Protection, Washington, EUA. EPA-440/5-93-001. 204 p.

USEPA - U.S.ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1994. Ground water and wellhead protection. Handbook. USEPA, Office of Research and Development, Washington, EUA, EPA/625/R-94/001. 269 p.

VAN WAEGENINGH, H.G.1985. Protection of the Groundwater Quality in Porous Permeable Rocks. In Theoretical Background, Hydrogeology and Practice of Groundwater Protection zones. UNESCO. International Contributions of Hydrogeology. v. 6, p. 111-121.

VIDAL, A., 2002. Estudo Hidrogeológico do Aquífero Tubarão na área de floramento da porção central do Estado de São Paulo. (Tese de Doutoramento, Igce-UNESP, inédita). 121 p.



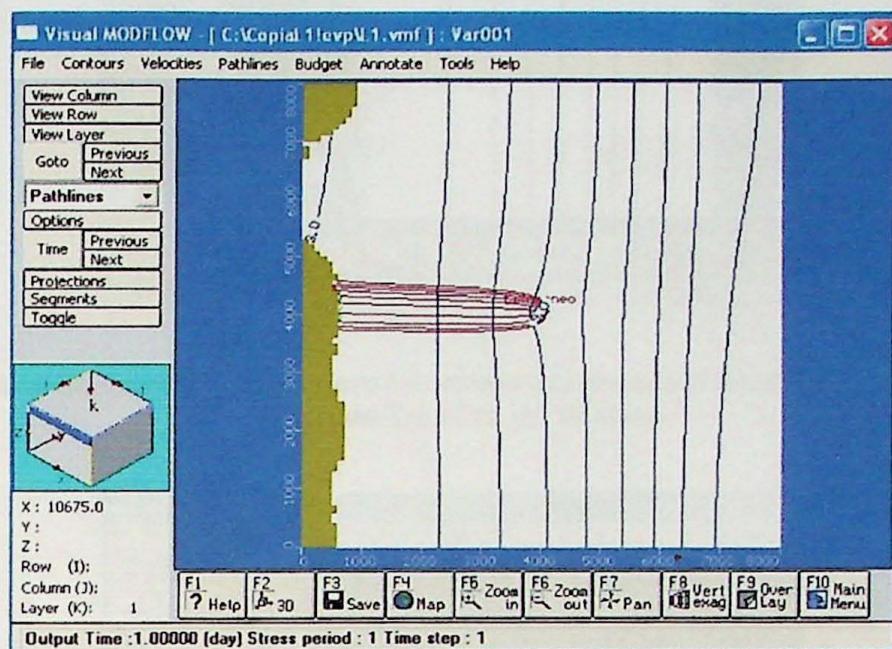
p / CTF-2007

Ana Lucia de Lacerda

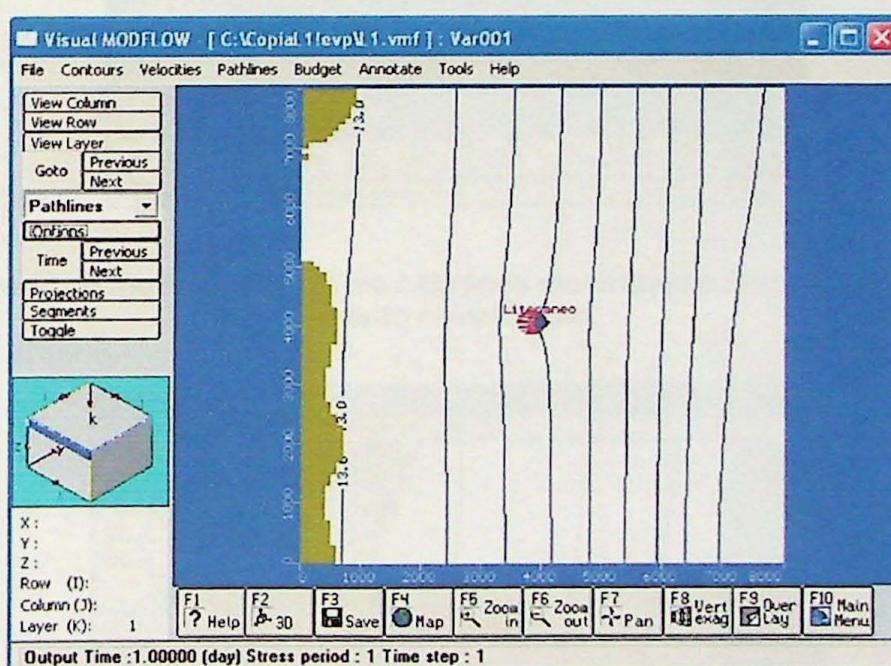
## **ANEXO A**

## **ANEXO B**

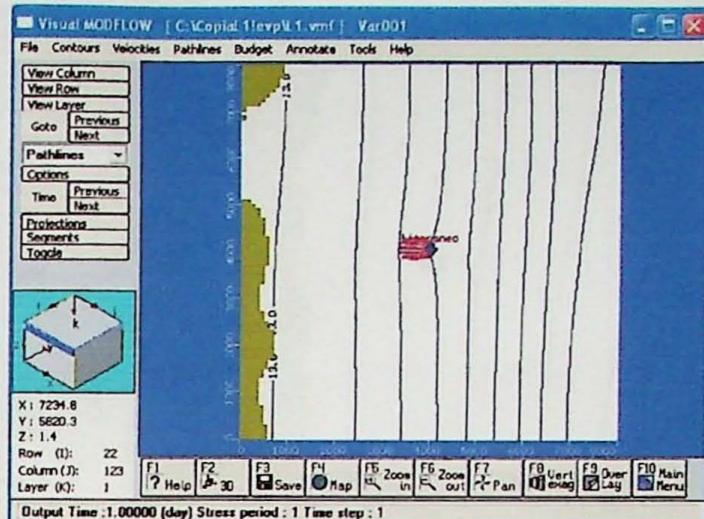
Figuras dos modelos gerados pelo Visual MODFLOW (Guiguer & Franz 1996) destacando as áreas das Zonas de Contribuição para os Sistemas Aqüíferos do Estado de São Paulo.



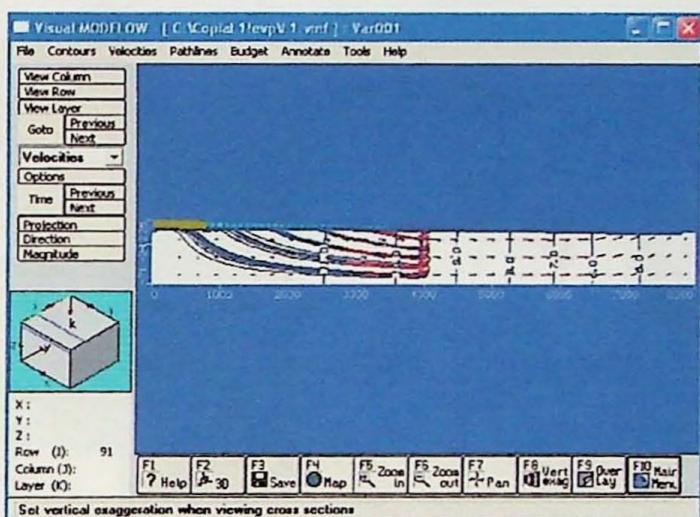
**Figura 1 - Planta do modelo do Aqüífero Litorâneo mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



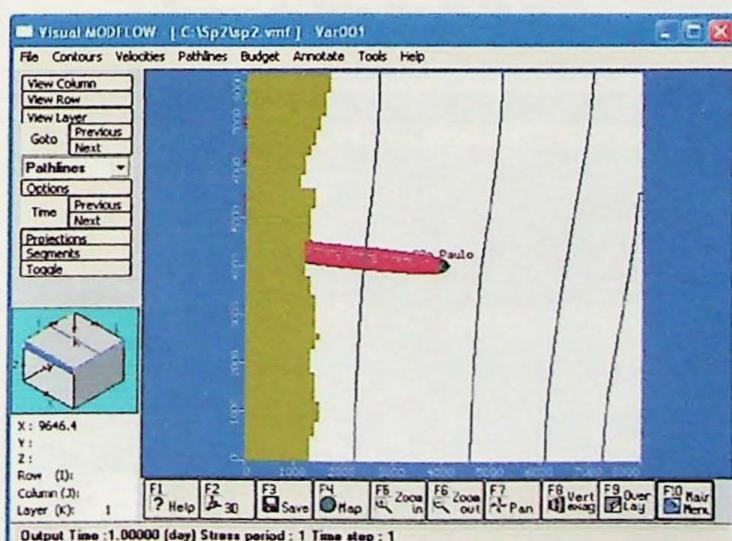
**Figura 2 - Planta do modelo do Aqüífero Litorâneo mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



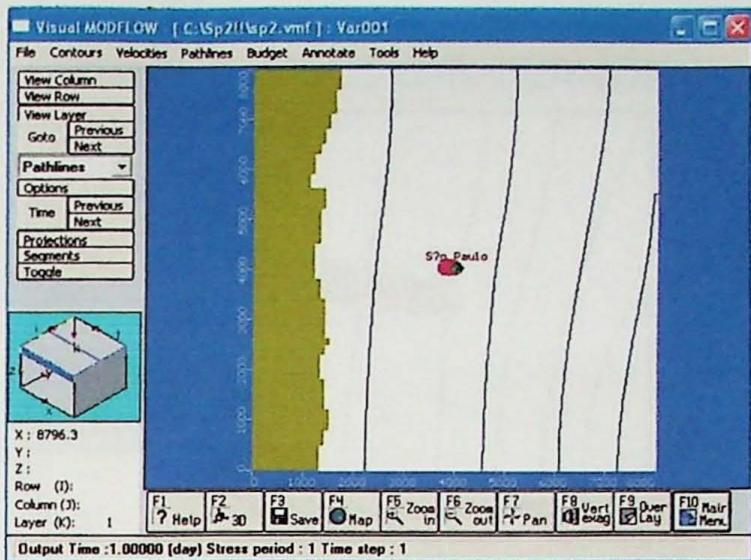
**Figura 3 - Planta do modelo do Aqüífero Litorâneo mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



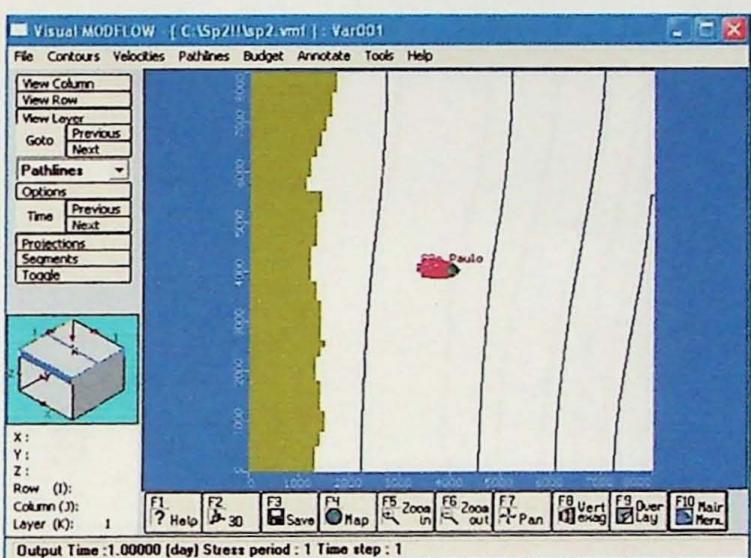
**Figura 4 – Perfil do modelo do Aqüífero Litorâneo mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



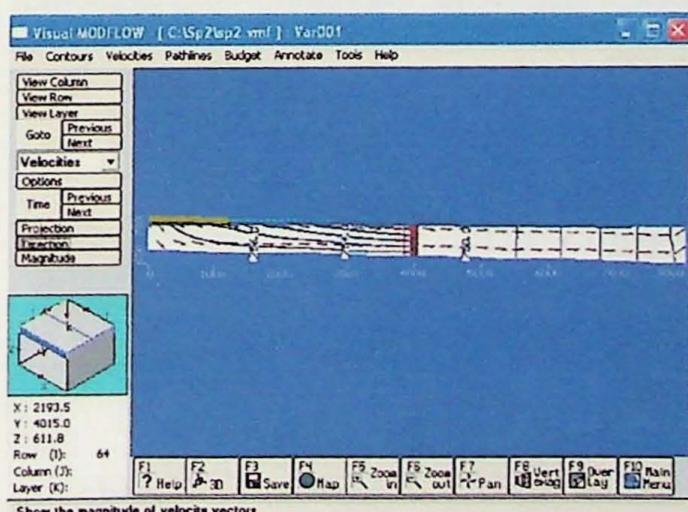
**Figura 5 - Planta do modelo do Aqüífero São Paulo mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



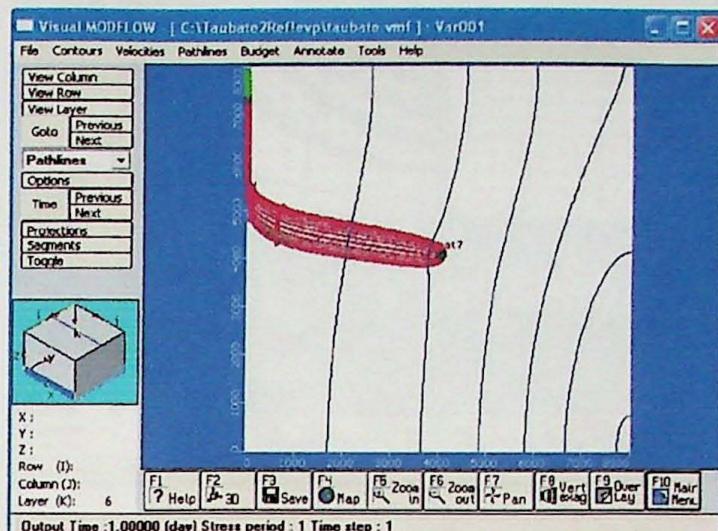
**Figura 6 - Planta do modelo do Aqüífero São Paulo mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



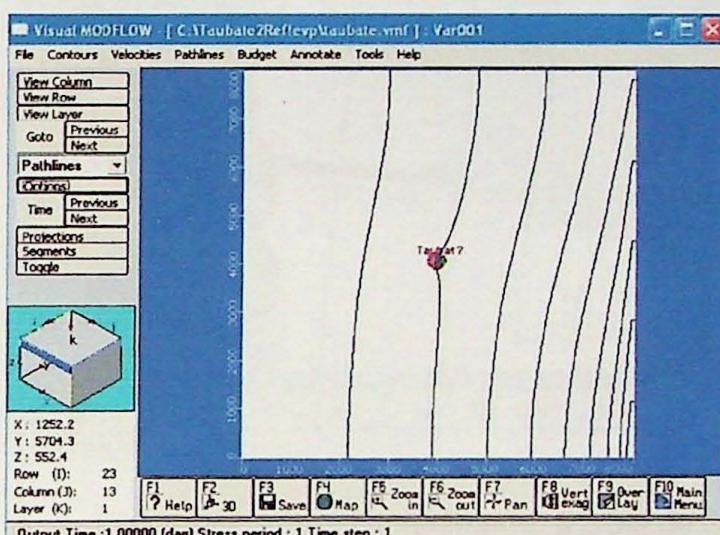
**Figura 7 - Planta do modelo do Aqüífero São Paulo mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



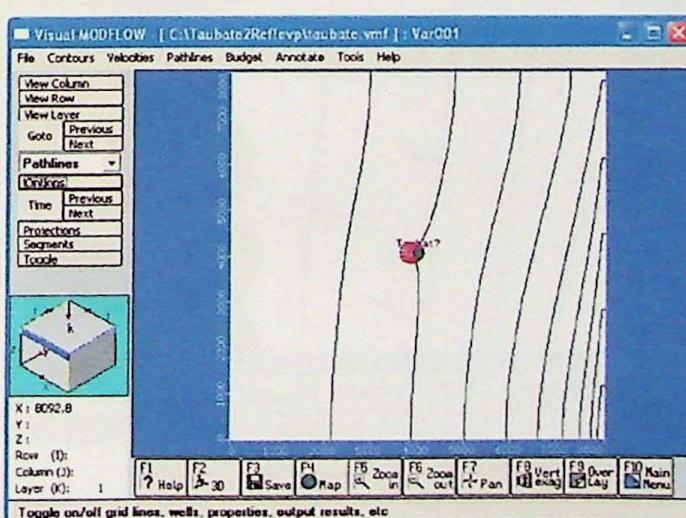
**Figura 8 – Perfil do modelo do Aqüífero São Paulo mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



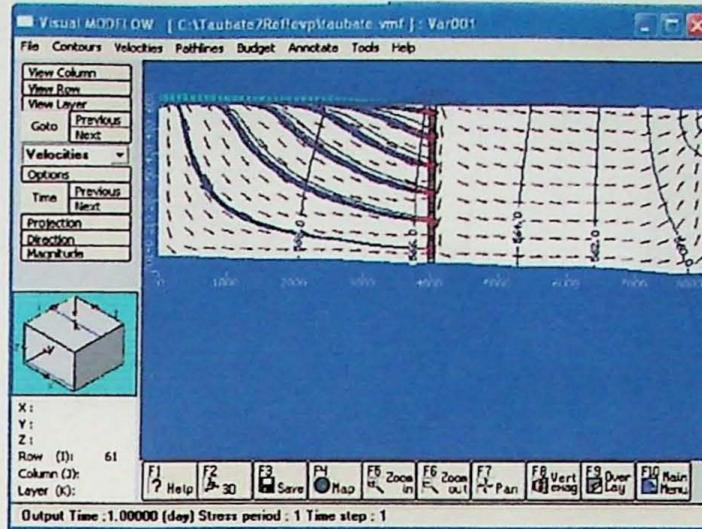
**Figura 9 - Planta do modelo do Aqüífero Taubaté mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



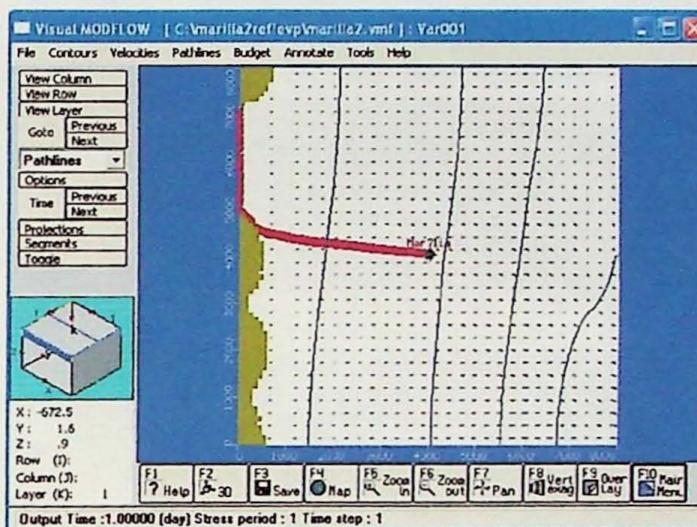
**Figura 10 - Planta do modelo do Aqüífero Taubaté mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



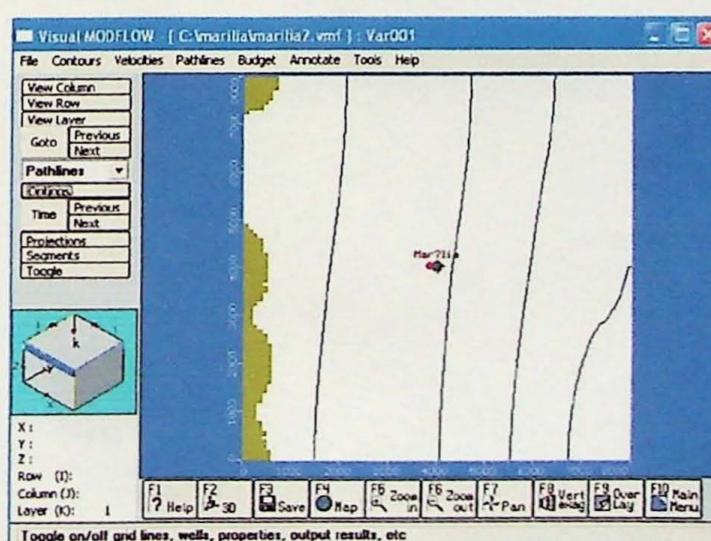
**Figura 11 - Planta do modelo do Aqüífero Taubaté mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



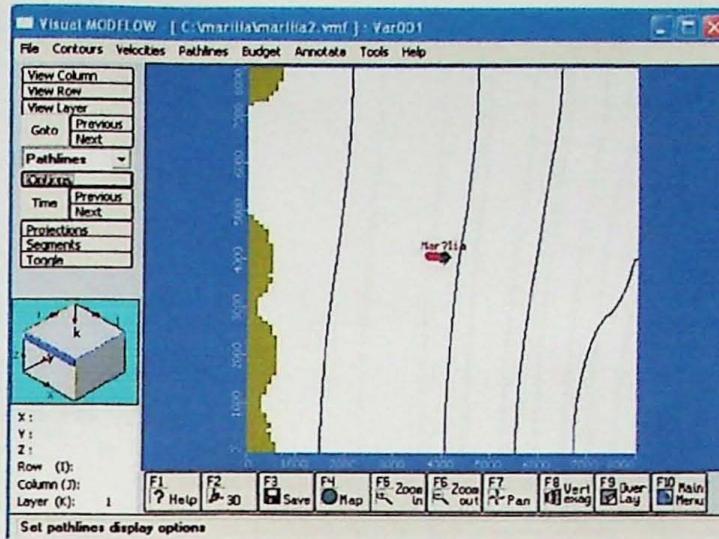
**Figura 12 – Perfil do modelo do Aqüífero Taubaté mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



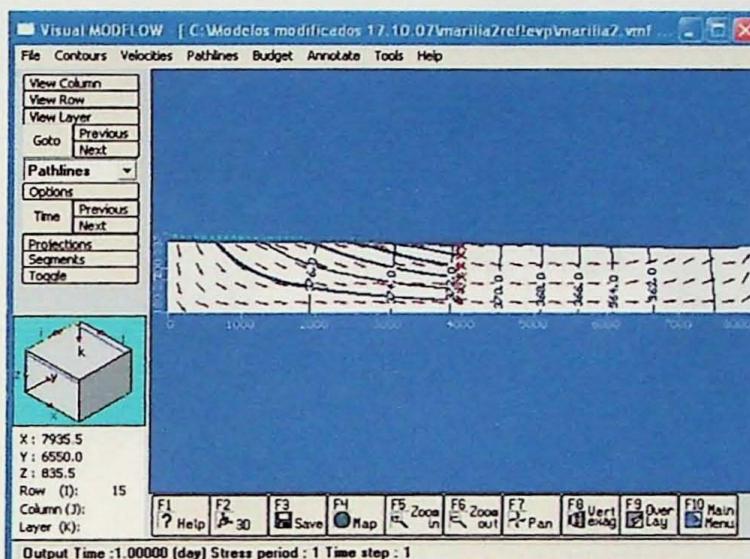
**Figura 13 - Planta do modelo do Aqüífero Marília mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



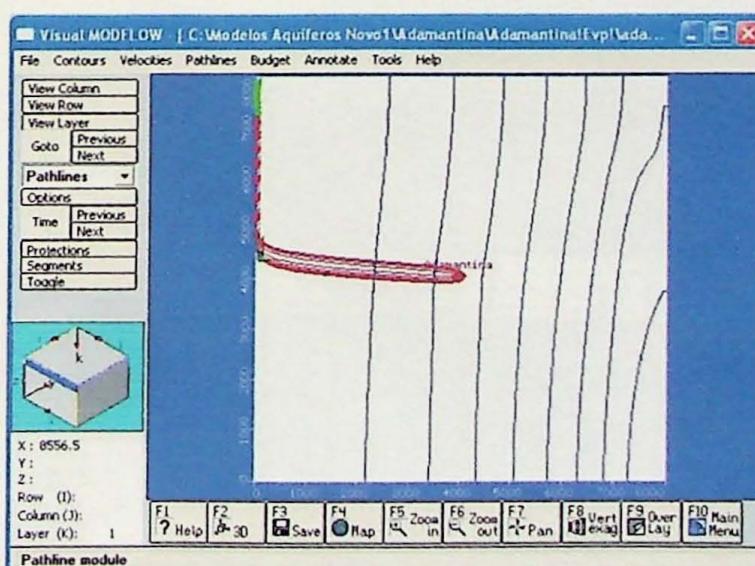
**Figura 14 - Planta do modelo do Aqüífero Marília mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



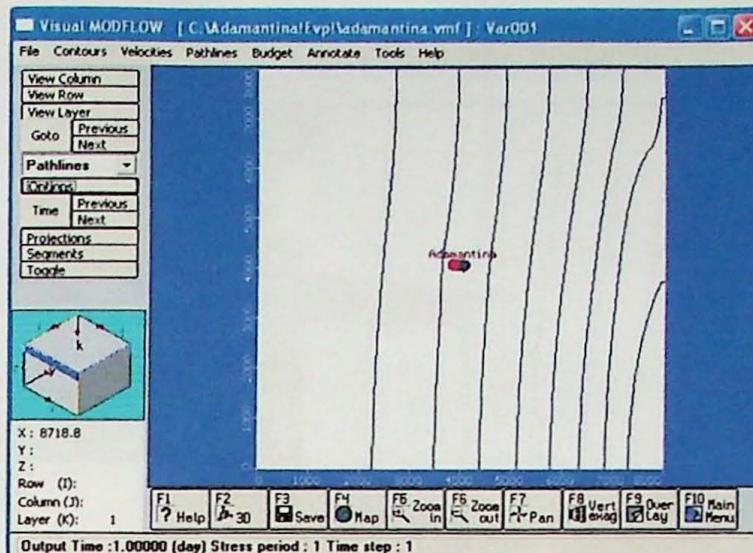
**Figura 15 - Planta do modelo do Aqüífero Marília mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



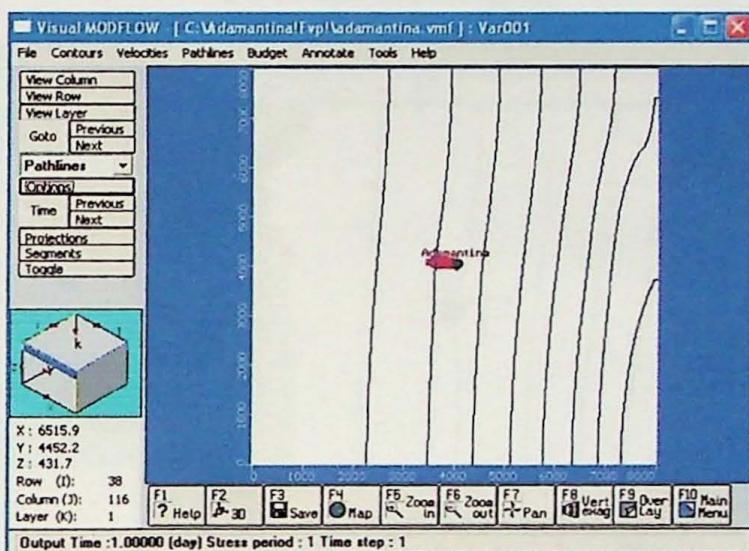
**Figura 16 – Perfil do modelo do Aqüífero Marília mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



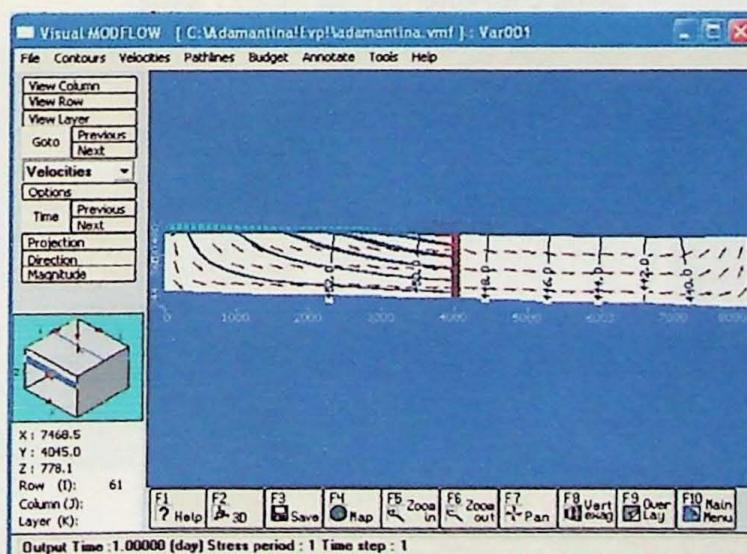
**Figura 17 - Planta do modelo do Aqüífero Adamantina mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



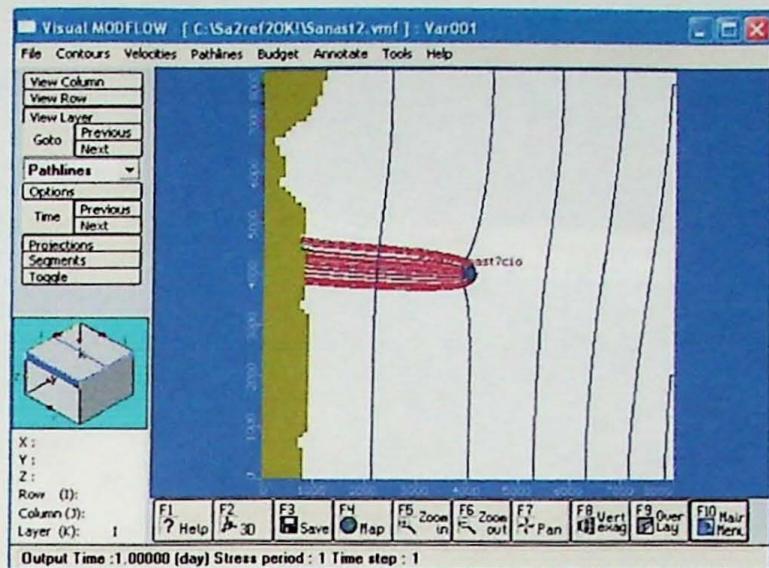
**Figura 18 - Planta do modelo do Aqüífero Adamantina mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



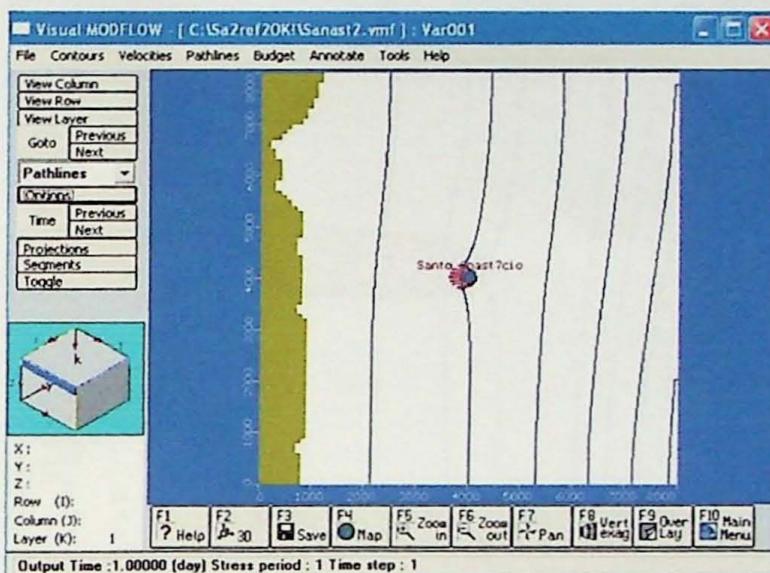
**Figura 19 - Planta do modelo do Aqüífero Adamantina mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



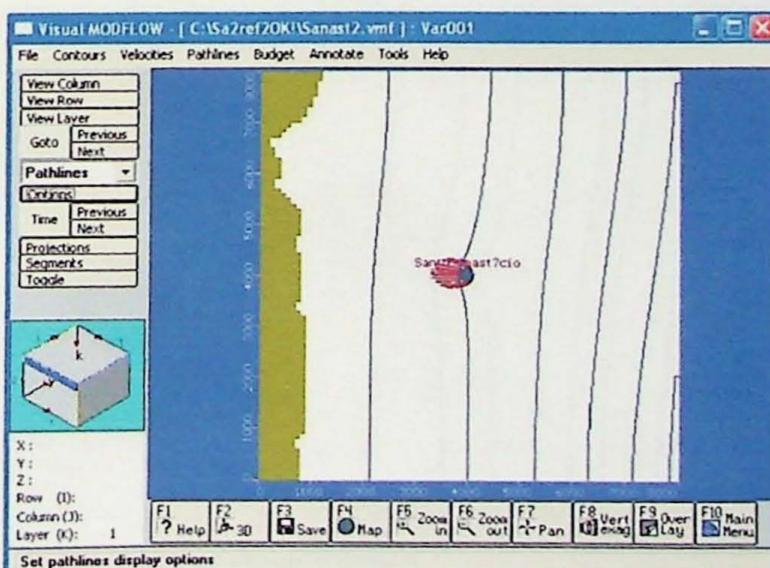
**Figura 20 – Perfil do modelo do Aqüífero Adamantina mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



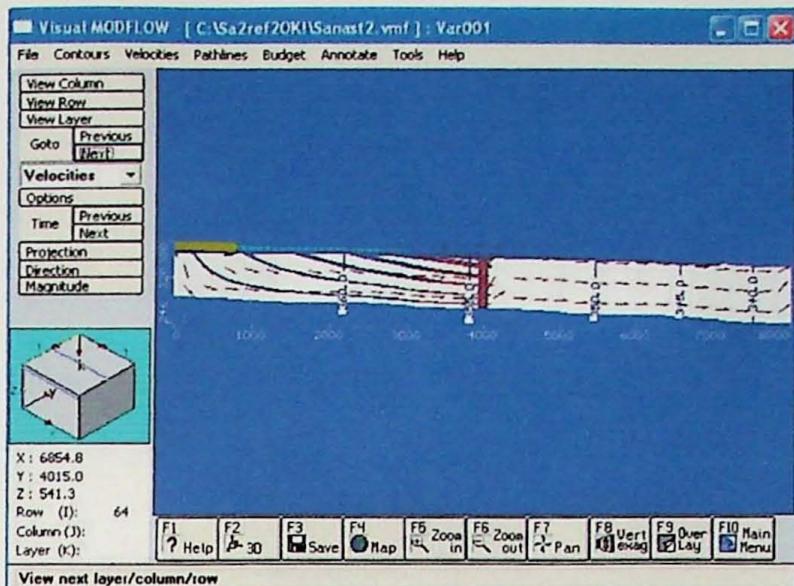
**Figura 21 – Planta do modelo do Aqüífero Santo Anastácio mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



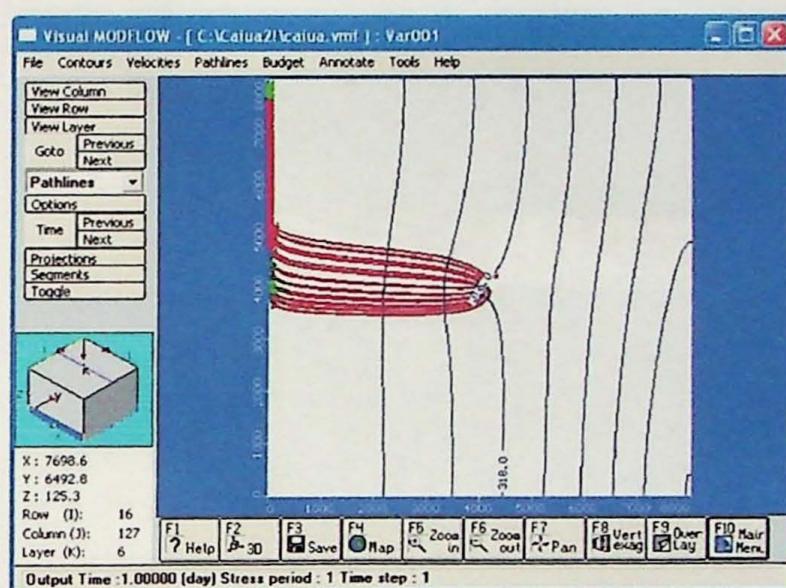
**Figura 22 – Planta do modelo do Aqüífero Santo Anastácio mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



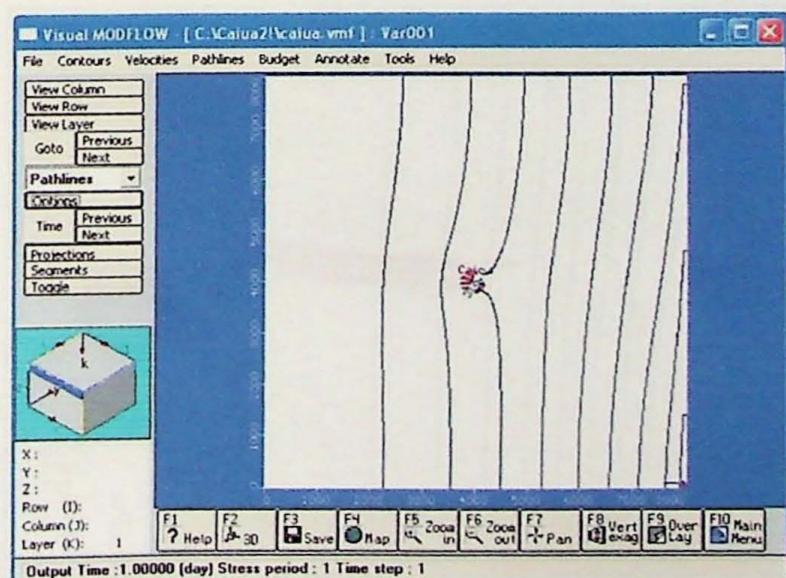
**Figura 23 – Planta do modelo do Aqüífero Santo Anastácio mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



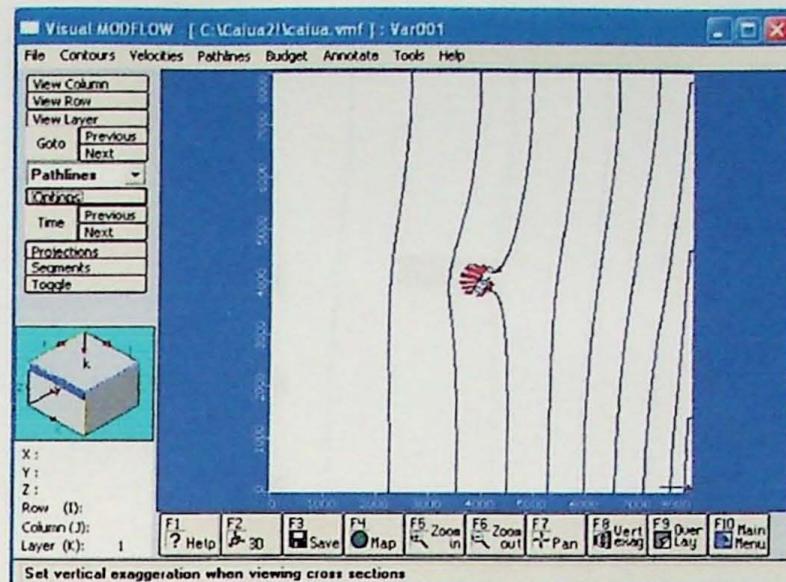
**Figura 24 – Perfil do modelo do Aqüífero Santo Anastácio mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



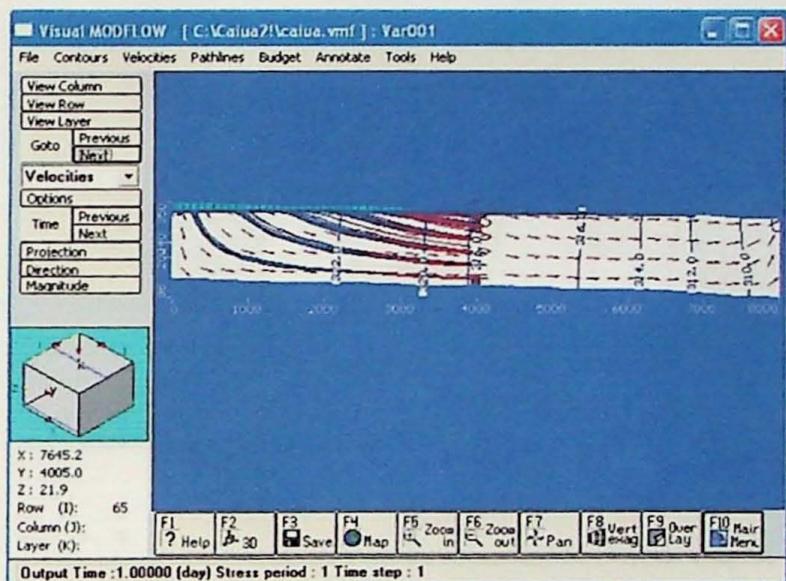
**Figura 25 – Planta do modelo do Aqüífero Caiuá mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



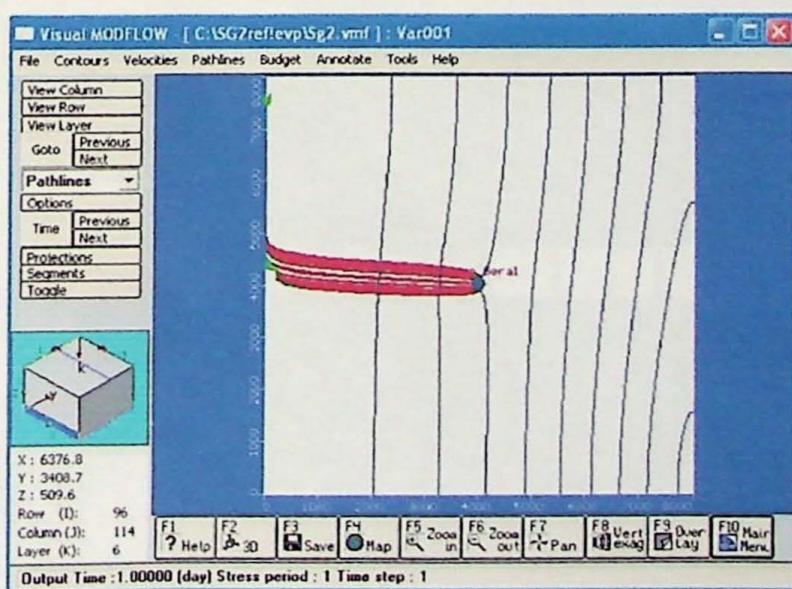
**Figura 26 – Planta do modelo do Aqüífero Caiuá mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



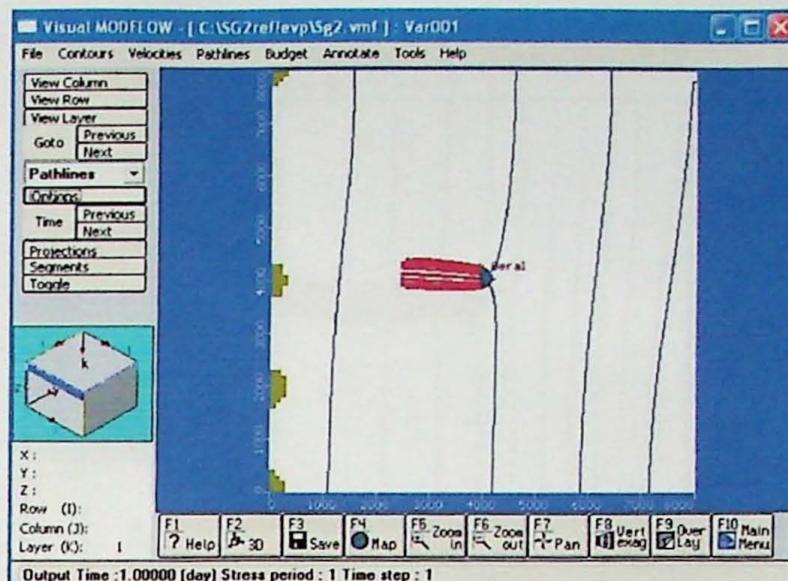
**Figura 27 – Planta do modelo do Aqüífero Caiuá mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



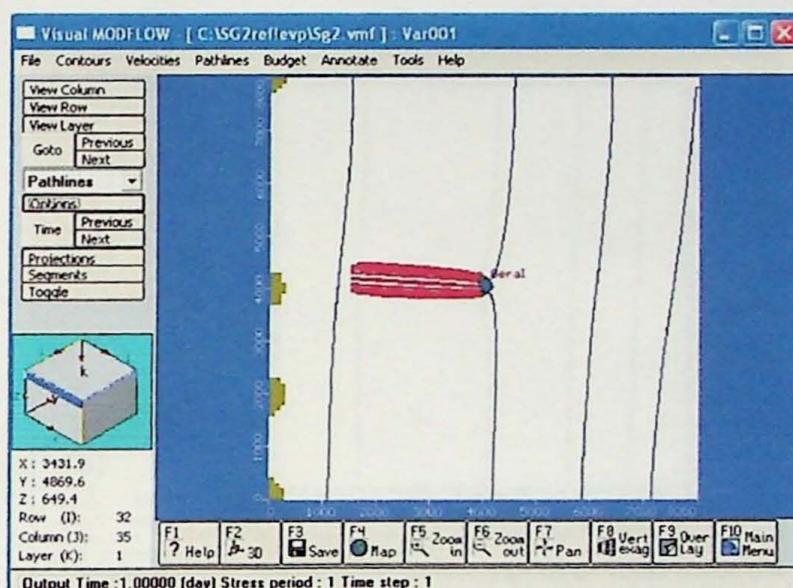
**Figura 28 – Perfil do modelo do Aqüífero Caiuá mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



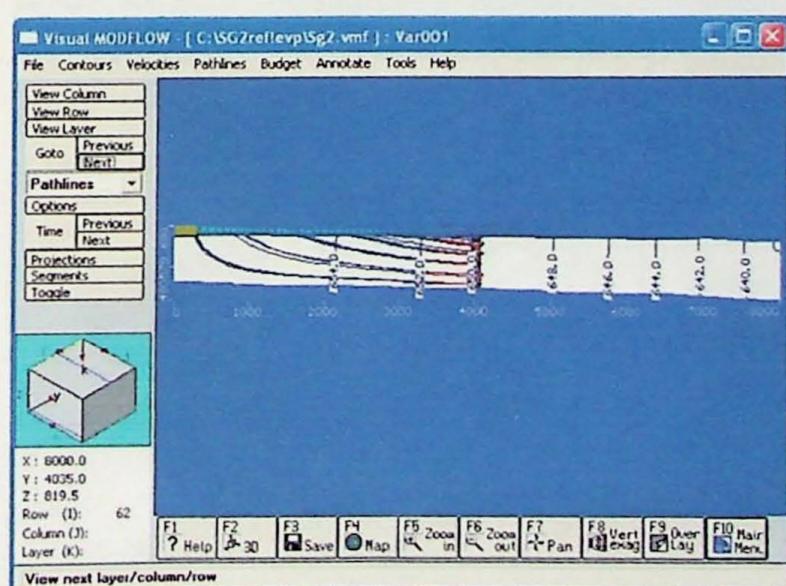
**Figura 29 – Planta do modelo do Aqüífero Serra Geral mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



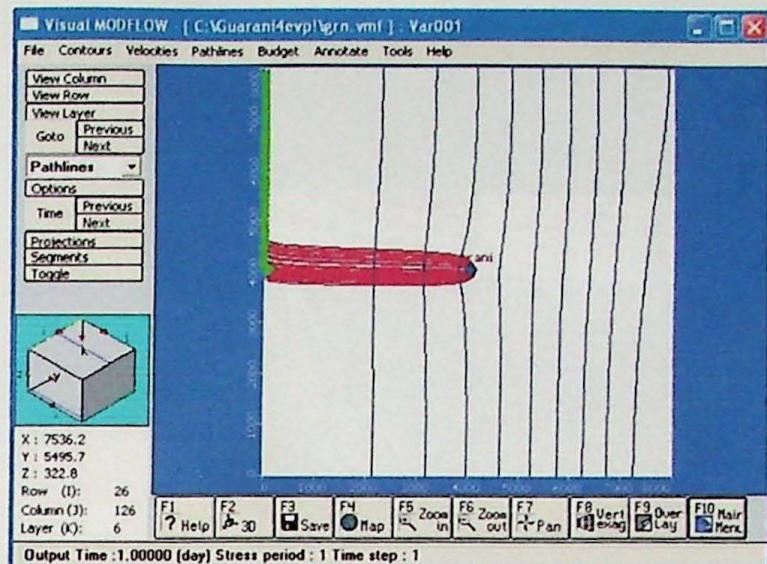
**Figura 30 – Planta do modelo do Aqüífero Serra Geral mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



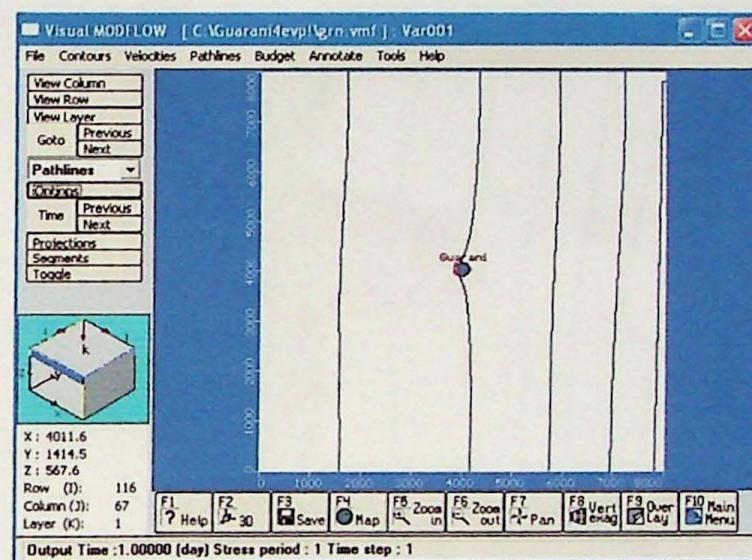
**Figura 31 – Planta do modelo do Aqüífero Serra Geral mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



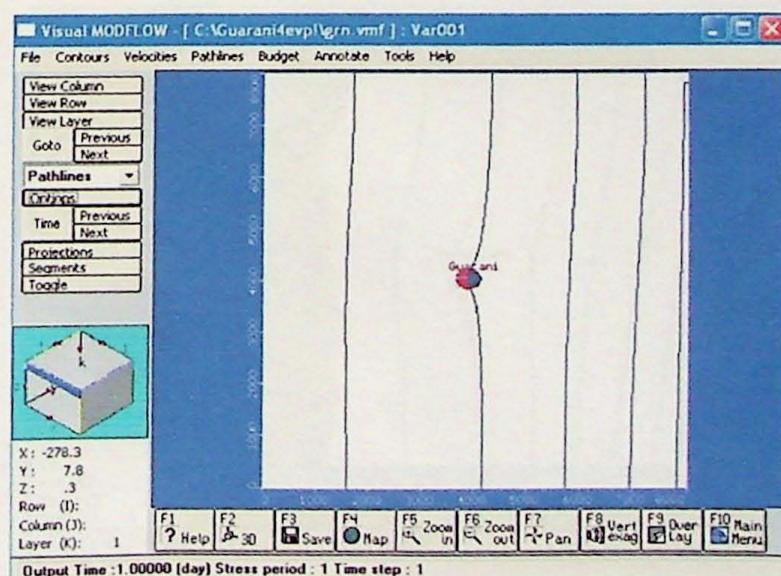
**Figura 32 – Perfil do modelo do Aqüífero Serra Geral mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



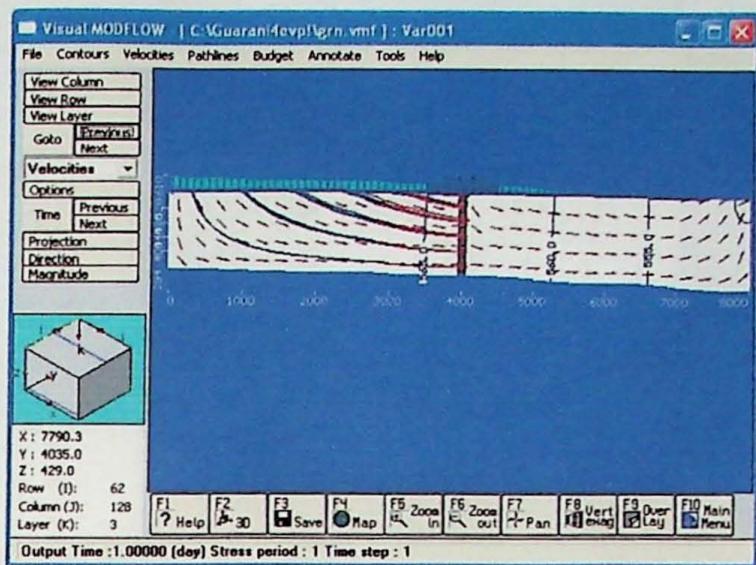
**Figura 33 – Planta do modelo do Aqüífero Guarani (porção livre) mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



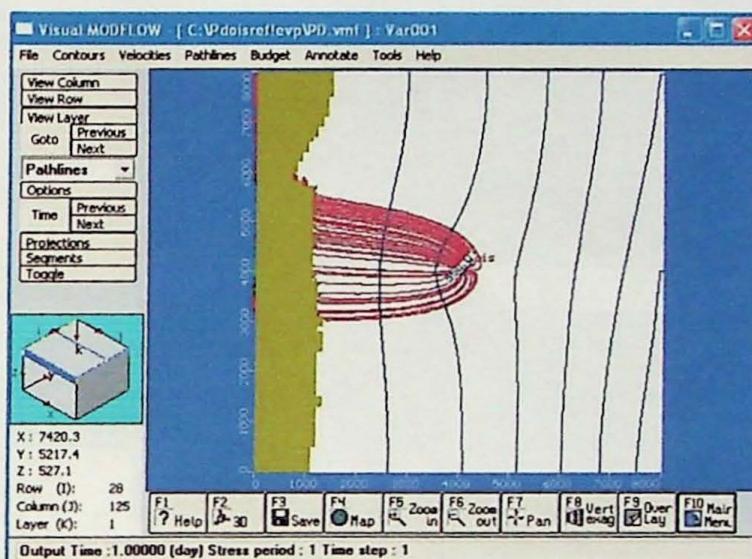
**Figura 34 – Planta do modelo do Sistema Aqüífero Guarani (porção livre) mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



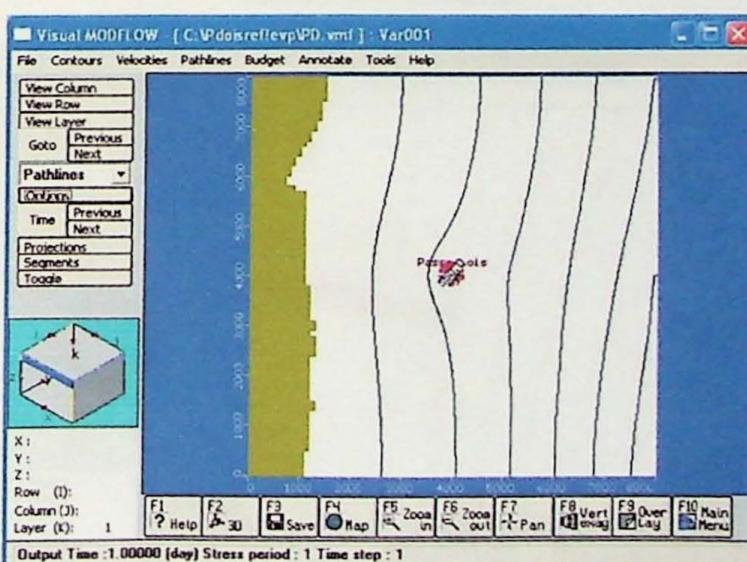
**Figura 35 – Planta do modelo do Sistema Aqüífero Guarani (porção livre) mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



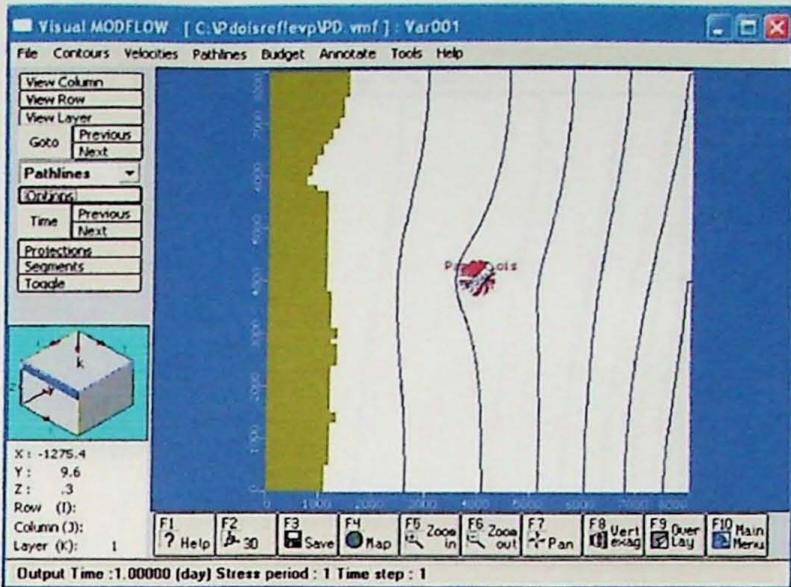
**Figura 36 – Perfil do modelo do Sistema Aqüífero Guarani (porção livre) mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



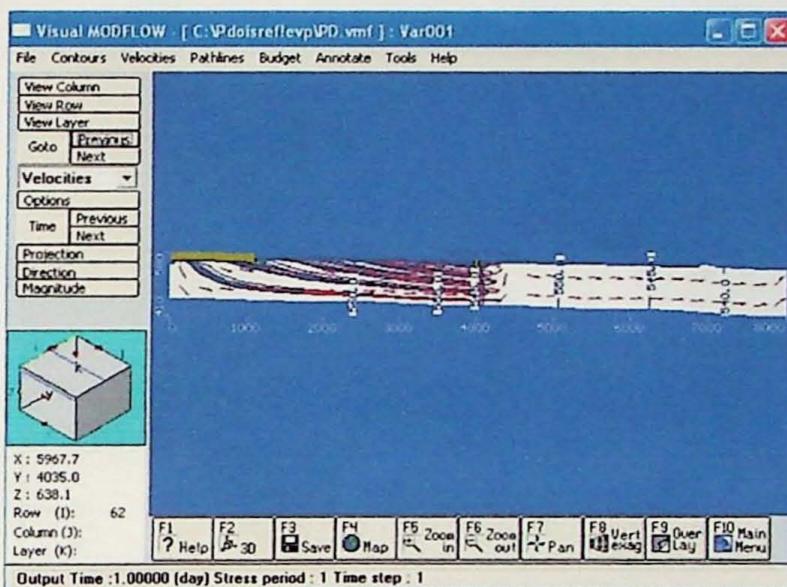
**Figura 37 – Planta do modelo do Aqüitarde Passa Dois mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



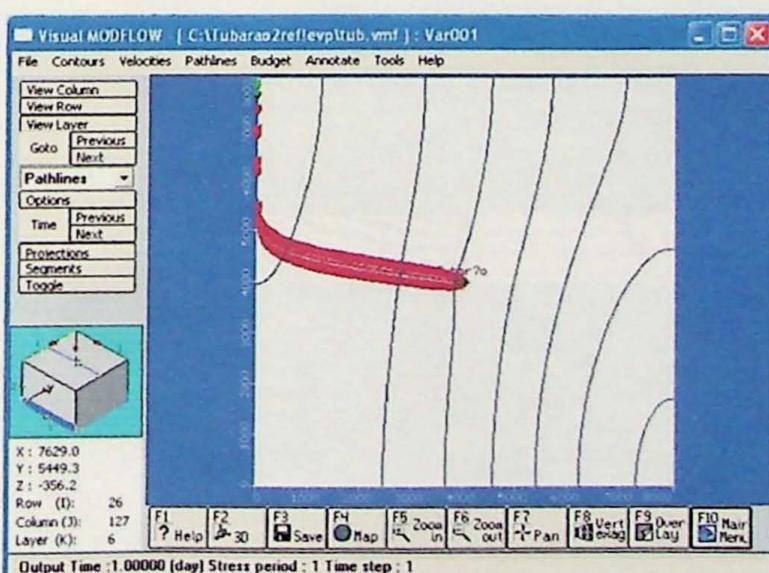
**Figura 38 – Planta do modelo do Aqüitarde Passa Dois mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



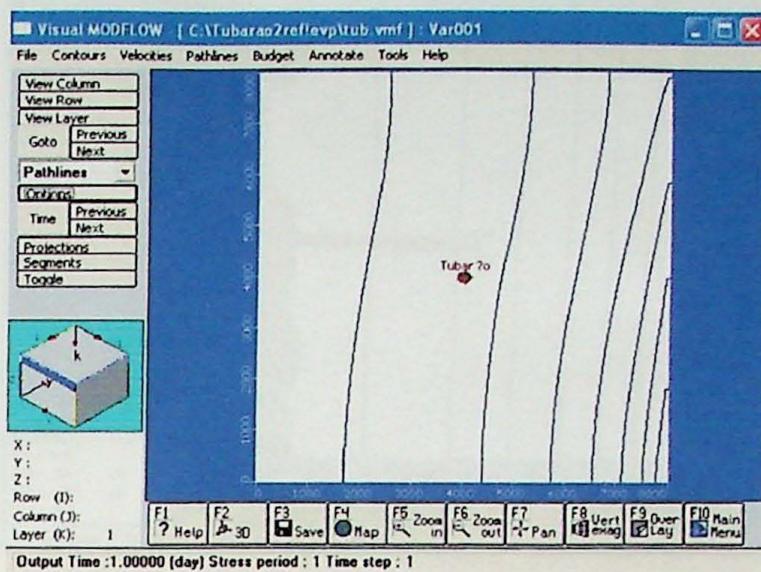
**Figura 39 – Planta do modelo do Aqüitarde Passa Dois mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



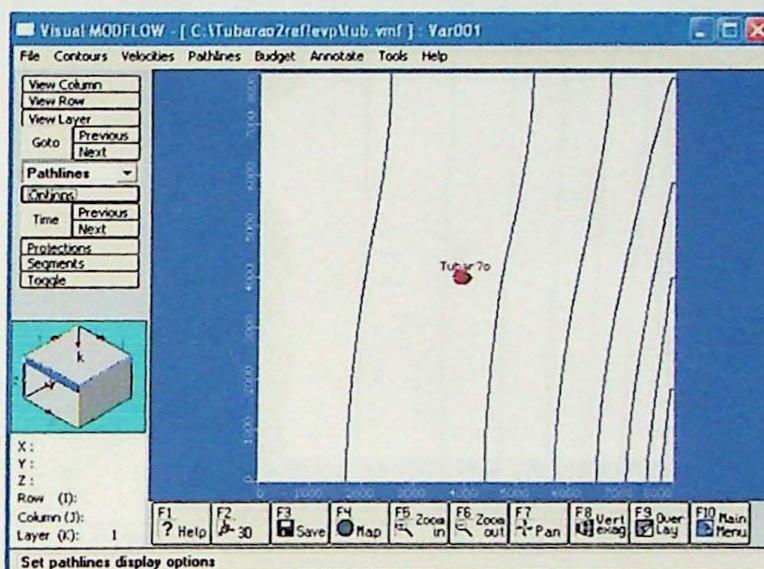
**Figura 40 – Perfil do modelo do Aqüitarde Passa Dois mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



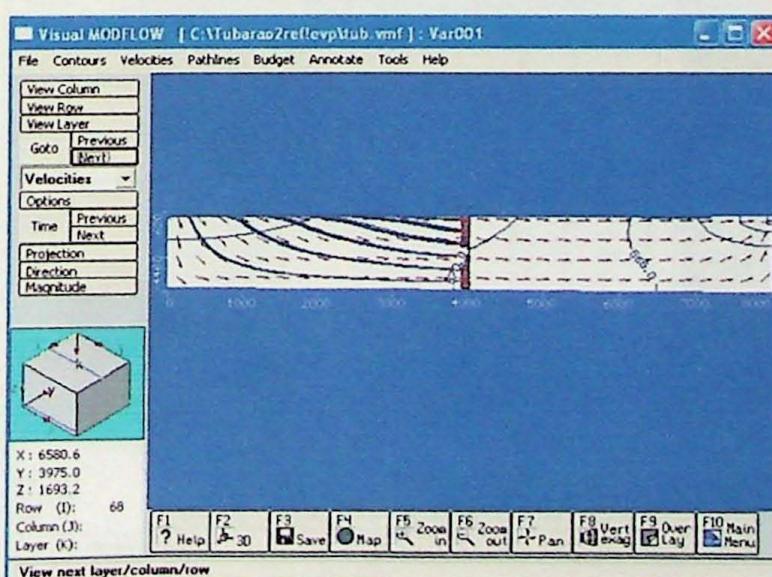
**Figura 41 – Planta do modelo do Sistema Aqüífero Tubarão mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



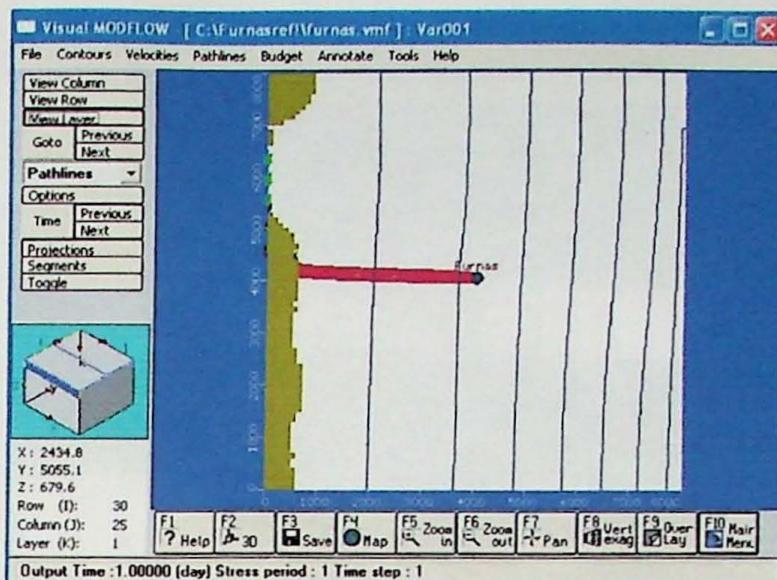
**Figura 42 – Planta do modelo do Sistema Aqüífero Tubarão mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



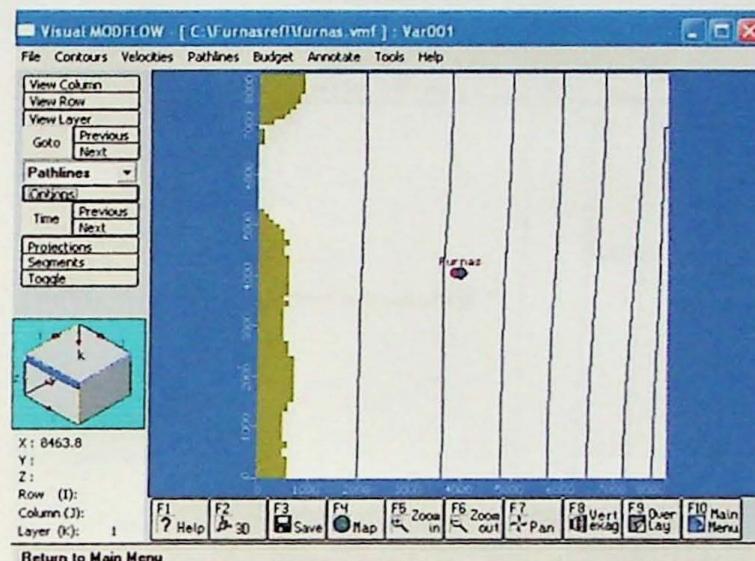
**Figura 43 – Planta do modelo do Sistema Aqüífero Tubarão mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



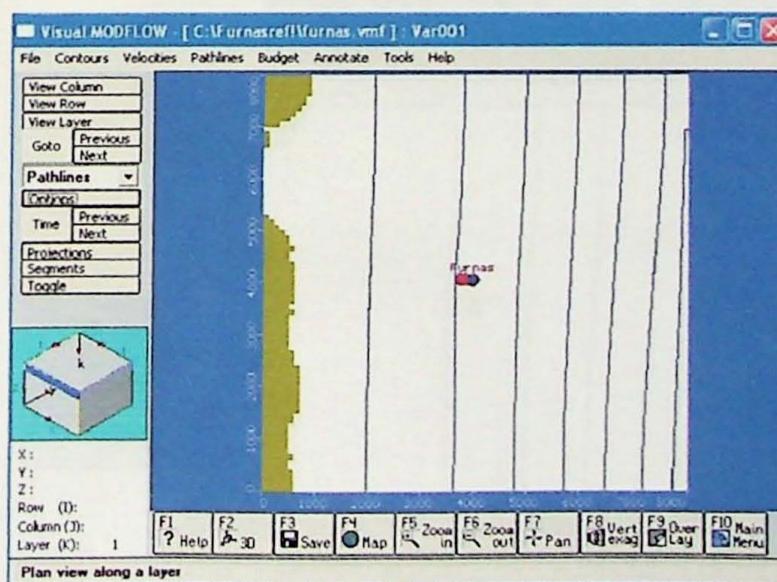
**Figura 44 – Perfil do modelo do Sistema Aqüífero Tubarão mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



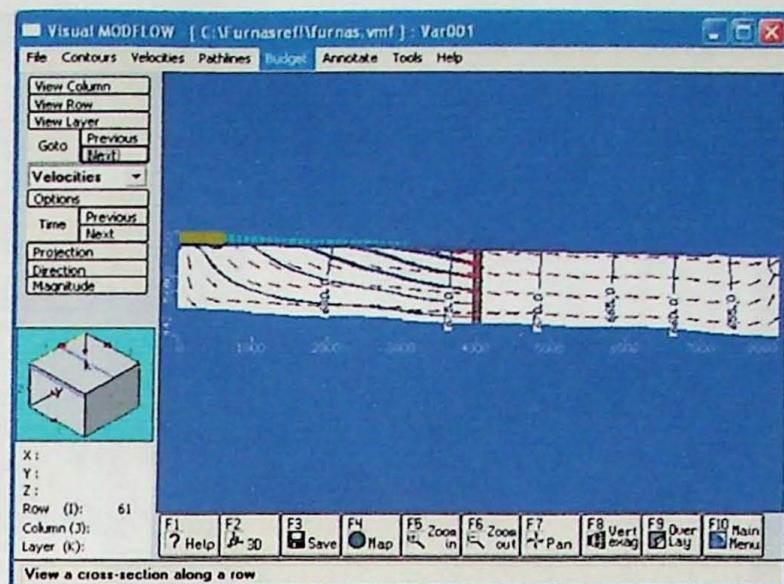
**Figura 45 – Planta do modelo do Aqüífero Furnas mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



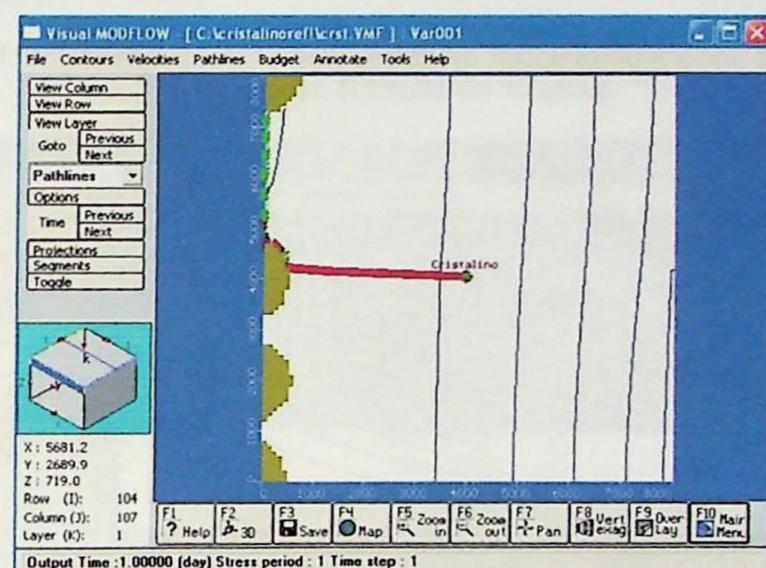
**Figura 46 – Planta do modelo do Aqüífero Furnas mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



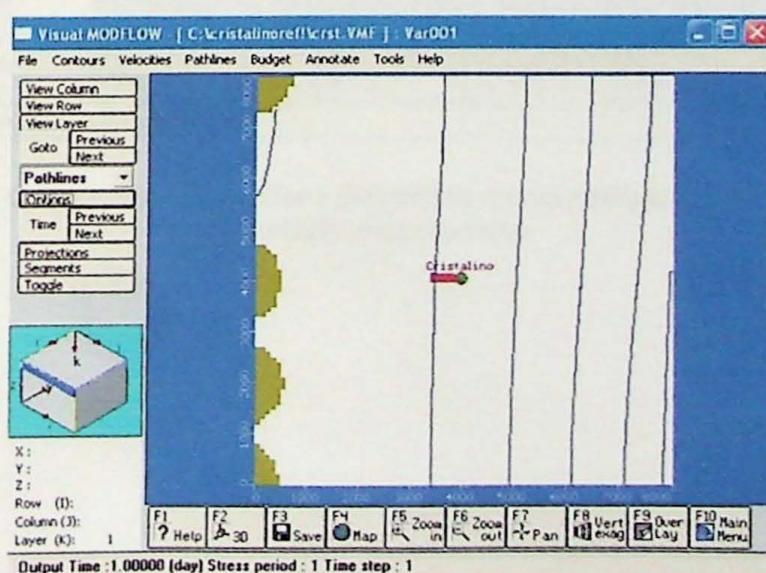
**Figura 47 – Planta do modelo do Aqüífero Furnas mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



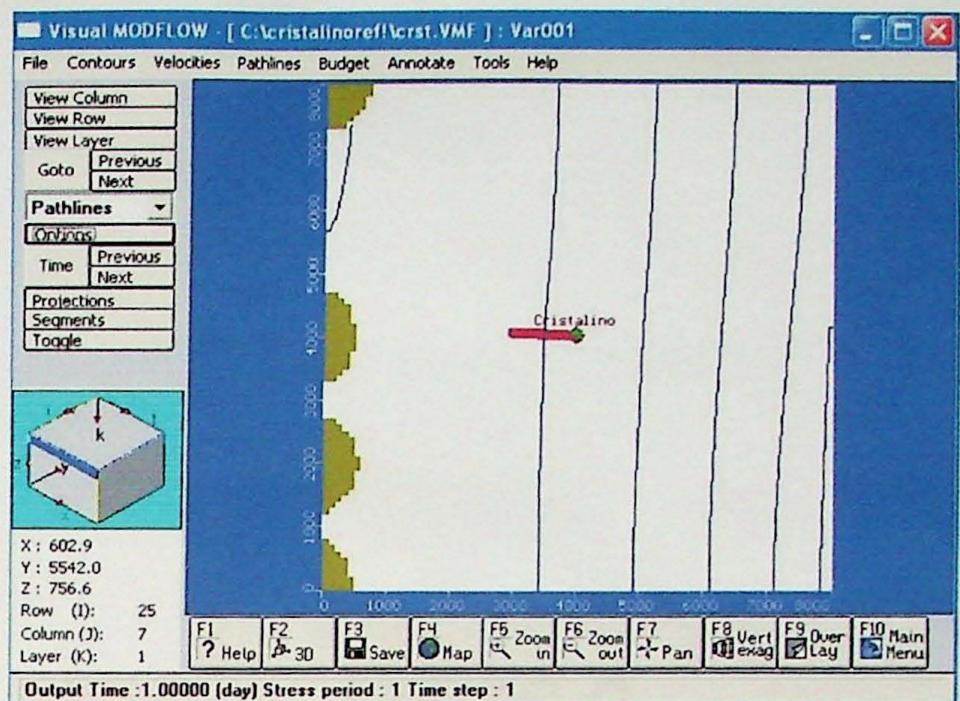
**Figura 48 – Perfil do modelo do Aqüífero Furnas mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



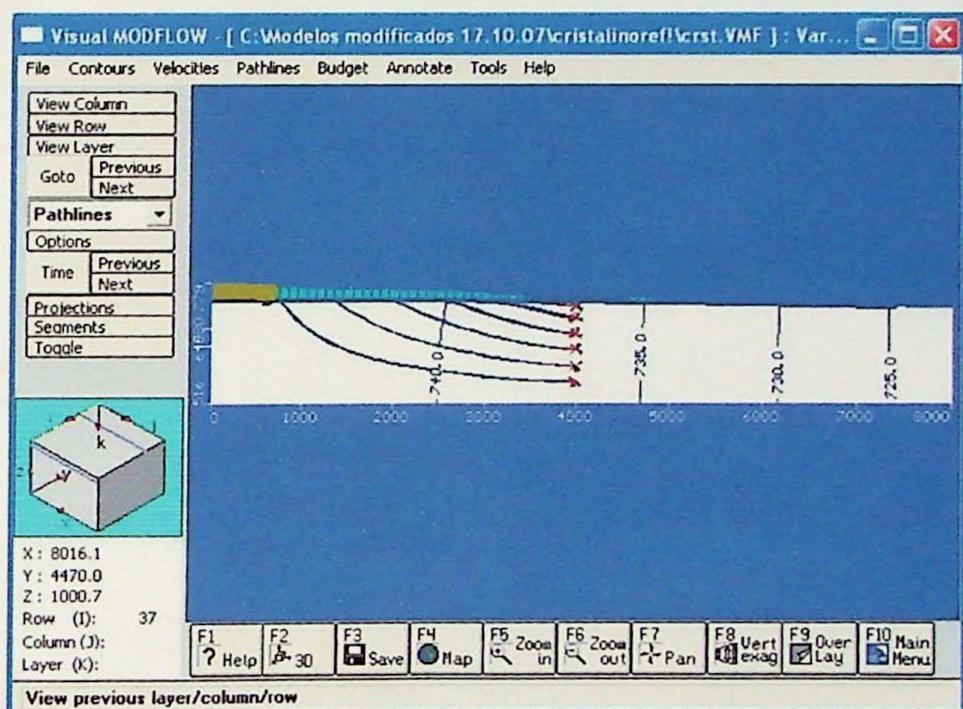
**Figura 49 – Planta do modelo do Aqüífero Cristalino mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**



**Figura 50 – Planta do modelo do Aqüífero Cristalino mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 5 anos.**



**Figura 51 – Planta do modelo do Aqüífero Cristalino mostrando a Zona de Contribuição para Tempo de Trânsito de 10 anos.**



**Figura 52 – Perfil do modelo do Aqüífero Cristalino mostrando a Zona de Contribuição em estado estacionário.**

## **ANEXO C**

Programa desenvolvido em "linguagem C" para calcular a área da Zona de Contribuição pelo método de determinantes de triângulos, extrapolados do modelo. O software usado para desenvolvê-lo foi o Dev-C++ (Laplace et al. 1989).

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>

float area(float x1, float x2, float xc, float y1, float y2, float yc){
    float a, b, c, d, e, f, ag;

    a = x1*y2;
    b = x2*yc;
    c = xc*y1;
    d = y1*x2;
    e = y2*xc;
    f = yc*x1;
    ag = fabs(a+b+c-(d+e+f));
    ag = ag/2;

    return ag;
}

int main(){

    float xc, yc;
    float ka, ag, ar, at;
    float a,b,c,d,e,f;
    float px[50], py[50];
    int n, i, m;

    ka = 34.375;
    ag = 0;
    ar = 0;
    at = 0;

    printf("Qual o ponto central do grafico?:");
    printf("\nxc:");
    scanf("%f", &xc);
    printf("\nyc:");
    scanf("%f", &yc);

    printf("\nQuantos pontos tem o seu grafico?");
    scanf("%d", &n);

    for(i=1;i<=n;i++){

        printf("\nDigite o ponto %d do grafico:\n", i);
        printf("x%d:", i);
        scanf("%f", &px[i]);
    }
}
```

```
printf("y%d:", i);
scanf("%f", &py[i]);
}

for(i=n+1;i<=50;i++){
    px[i] = 0;
    py[i] = 0;
}

for(i=1;i<=n-1;i++){

    m = i+1;
    ag = area(px[i], px[m], xc, py[i], py[m], yc);

    at = at+ag;
}
ag = area(px[m], px[1], xc, py[m], py[1], yc);

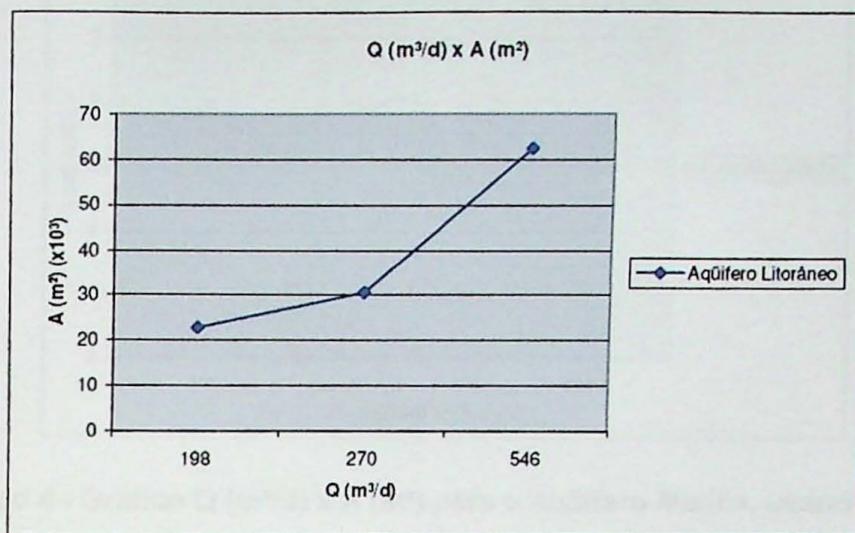
at = at+ag;

printf("\n\nArea real e: %f\n", at);

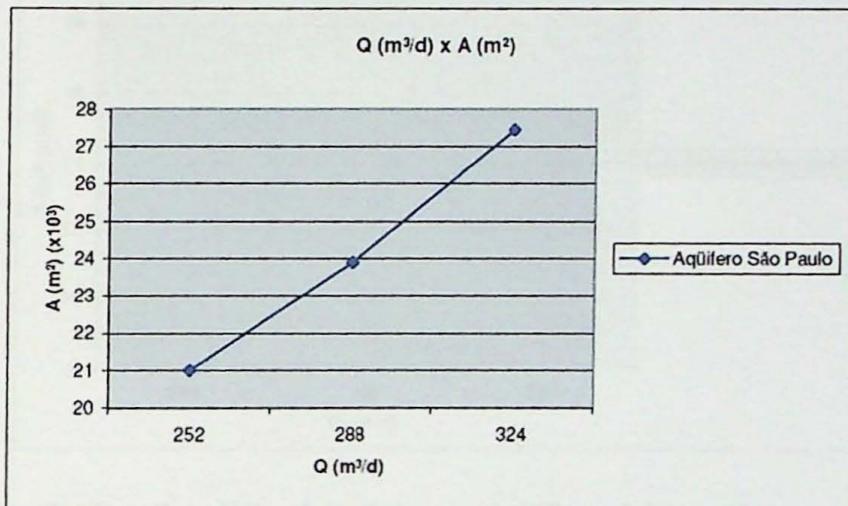
system("pause");
return 0;
}
```

## **ANEXO D**

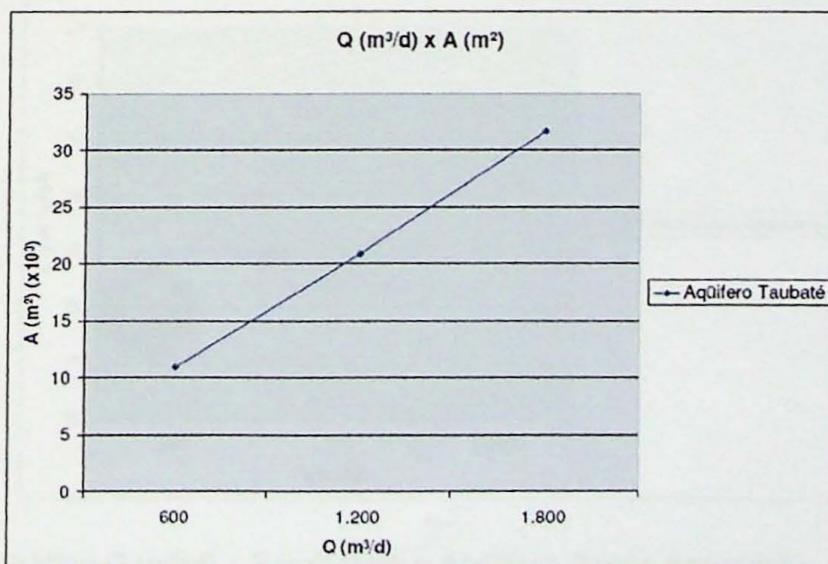
**Gráfico de  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x  $A$  ( $\text{m}^2$ ) para os aquíferos paulistas usando o MN com um TT de 1 ano**



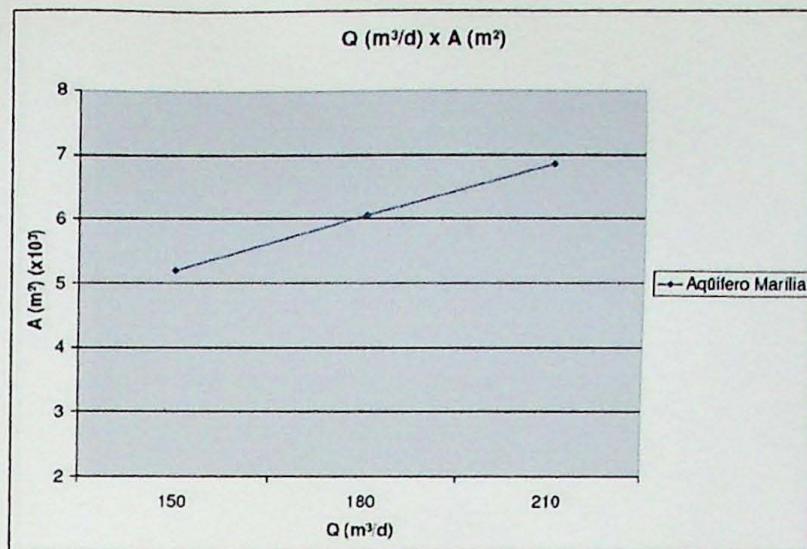
**Gráfico 1 - Gráfico  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x  $A$  ( $\text{m}^2$ ) para o Aquífero Litorâneo, usando o MN.**



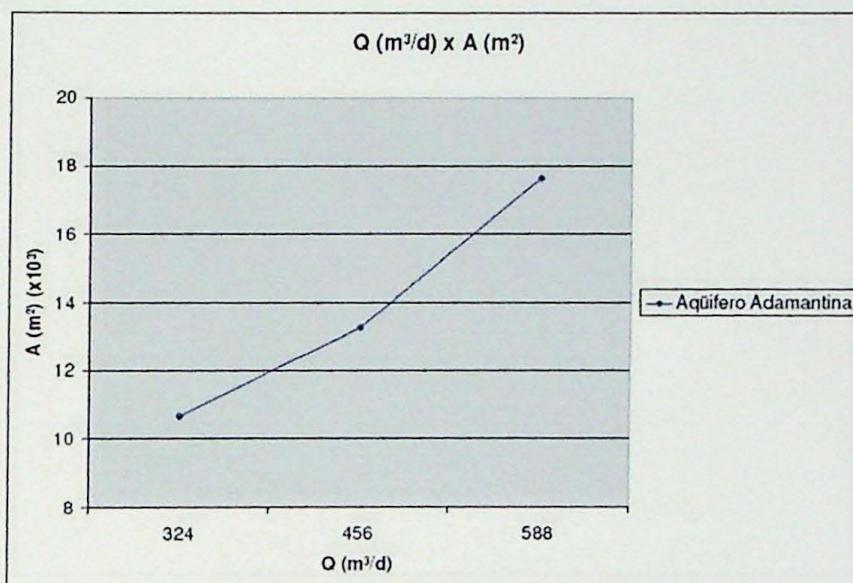
**Gráfico 2 - Gráfico  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x  $A$  ( $\text{m}^2$ ) para o Aquífero São Paulo, usando o MN.**



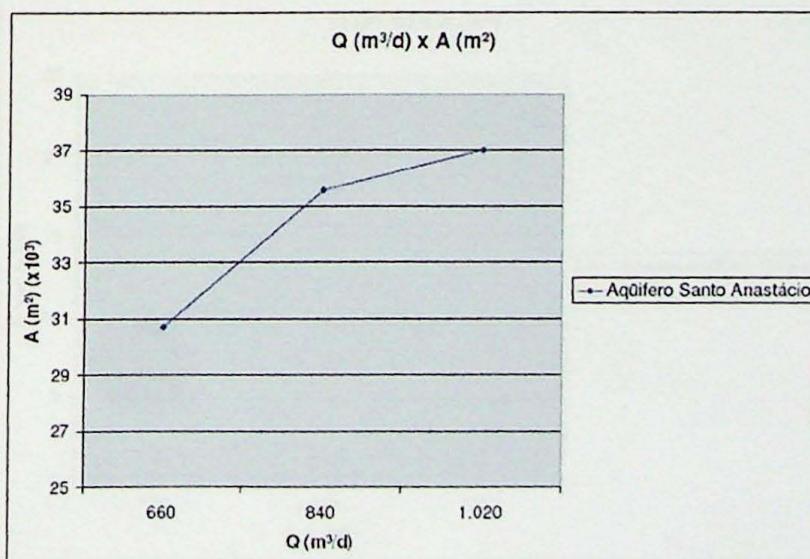
**Gráfico 3 - Gráfico  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x  $A$  ( $\text{m}^2$ ) para o Aquífero Taubaté, usando o MN.**



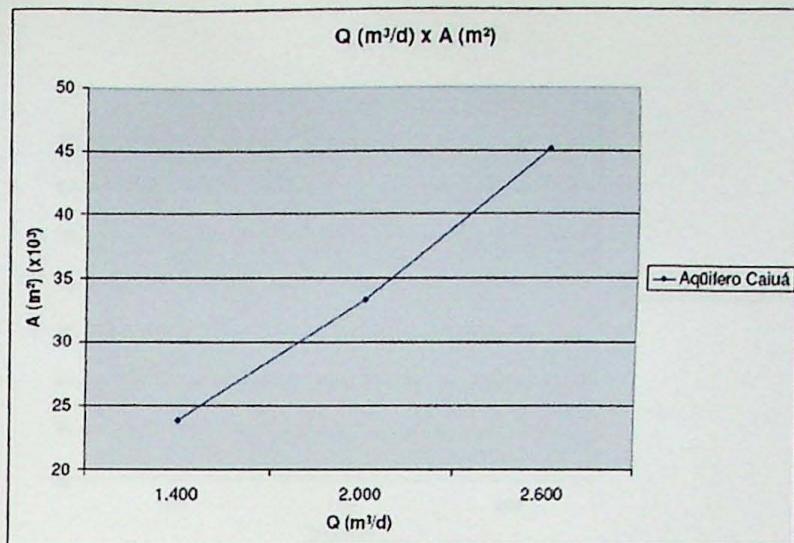
**Gráfico 4 - Gráfico Q ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x A ( $\text{m}^2$ ) para o Aqüífero Marília, usando o MN.**



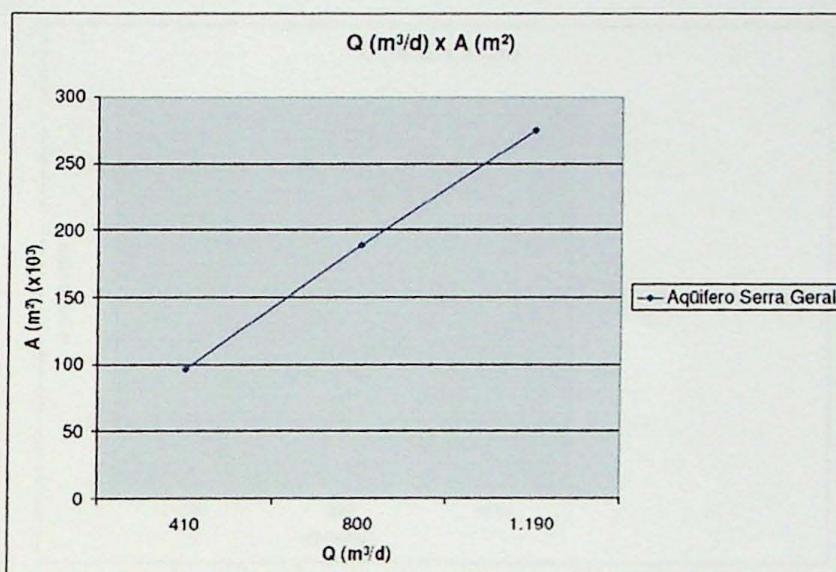
**Gráfico 5 - Gráfico Q ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x A ( $\text{m}^2$ ) para o Aqüífero Adamantina, usando o MN.**



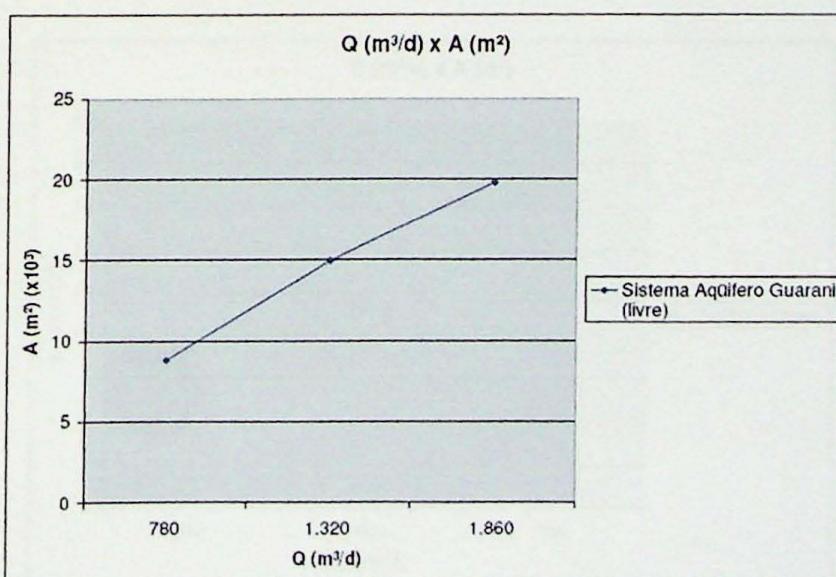
**Gráfico 6 - Gráfico Q ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x A ( $\text{m}^2$ ) para o Aqüífero Santo Anastácio, usando o MN.**



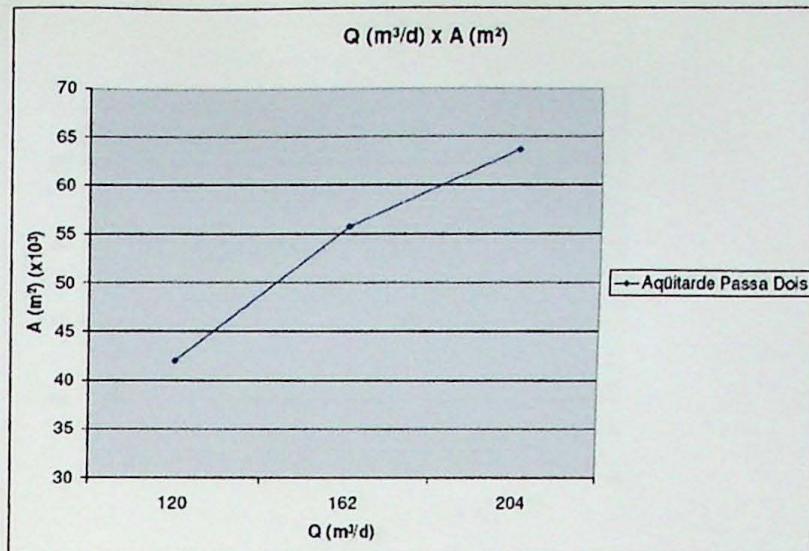
**Gráfico 7 - Gráfico Q ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x A ( $\text{m}^2$ ) para o Aqüífero Caiuá, usando o MN.**



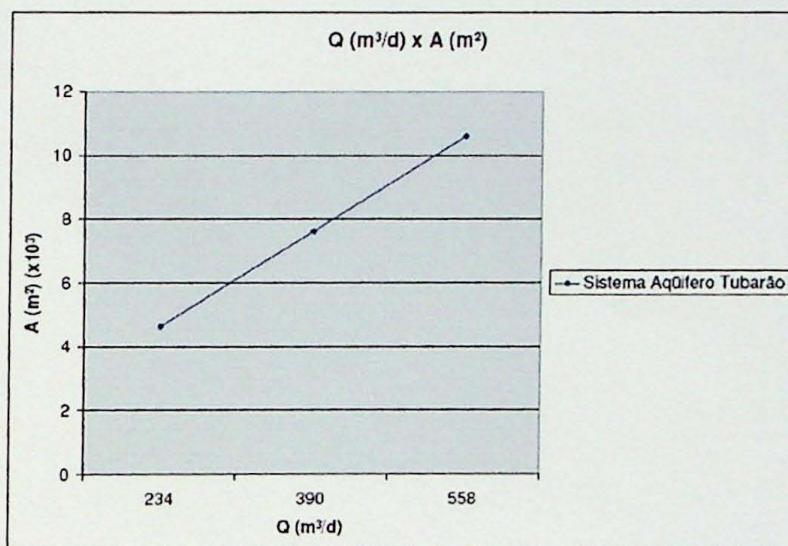
**Gráfico 8 - Gráfico Q ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x A ( $\text{m}^2$ ) para o Aqüífero Serra Geral, usando o MN.**



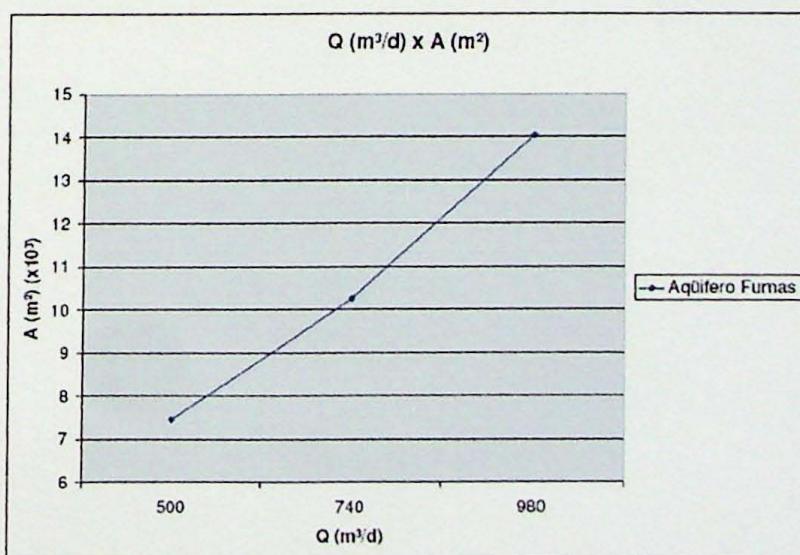
**Gráfico 9 - Gráfico Q ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x A ( $\text{m}^2$ ) para o Sistema Aqüífero Guarani, usando o MN.**



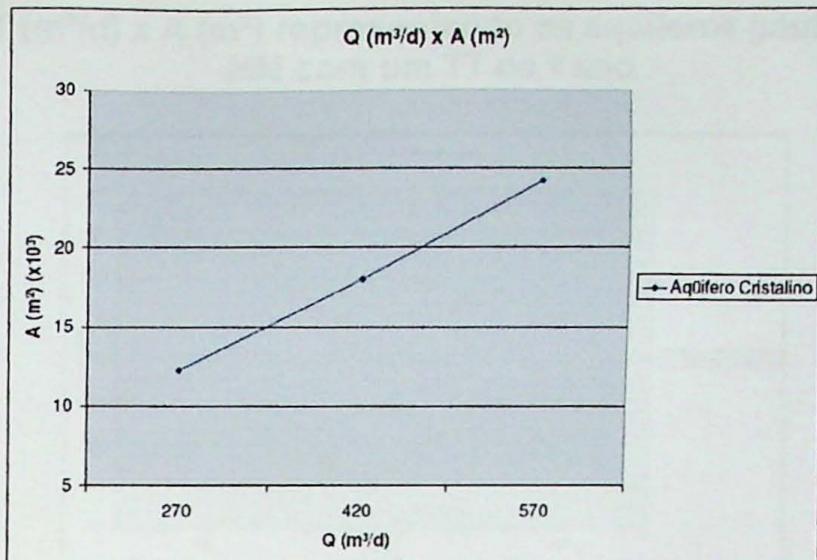
**Gráfico 10 - Gráfico Q ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x A ( $\text{m}^2$ ) para o Aqüitarde Passa Dois, usando o MN.**



**Gráfico 11- Gráfico Q ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x A ( $\text{m}^2$ ) para o Sistema Aqüífero Tubarão, usando o MN.**

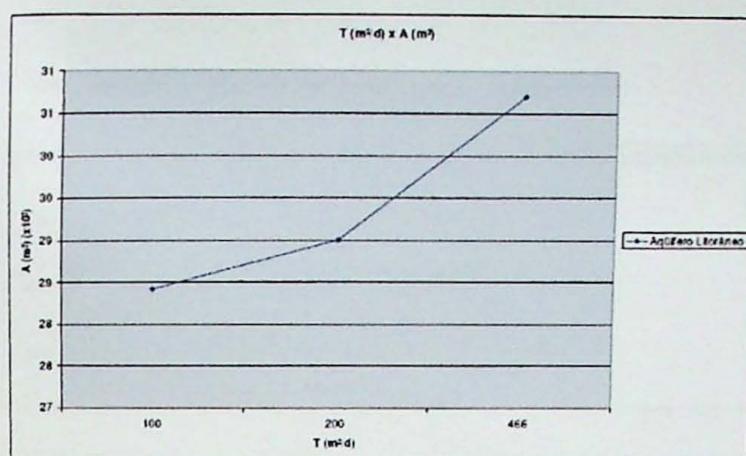


**Gráfico 12 - Gráfico Q ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) x A ( $\text{m}^2$ ) para o Aqüífero Furnas, usando o MN.**

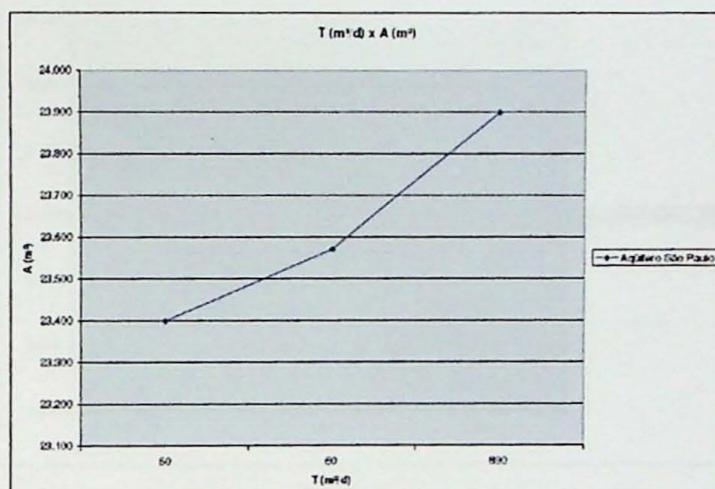


**Gráfico 13 - Gráfico  $Q \text{ (m}^3\text{/d)} \times A \text{ (m}^2\text{)}$  para o Aqüífero Cristalino, usando o MN.**

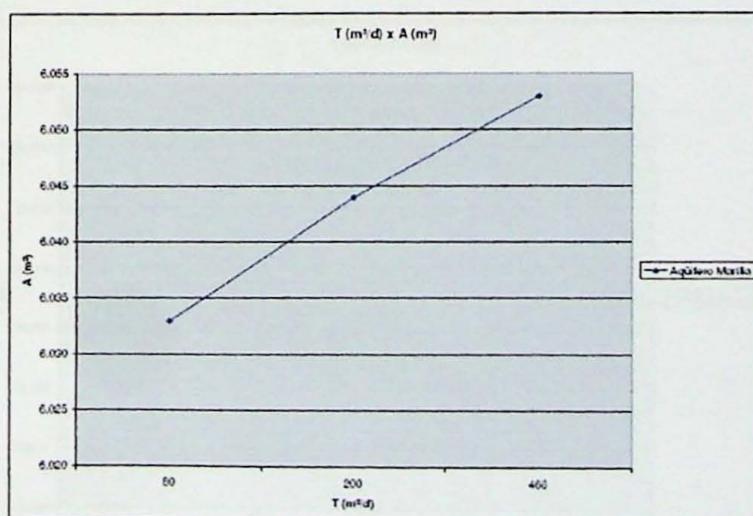
**Gráficos de  $T$  ( $m^3/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando os aquíferos paulistas usando o MN com um TT de 1 ano**



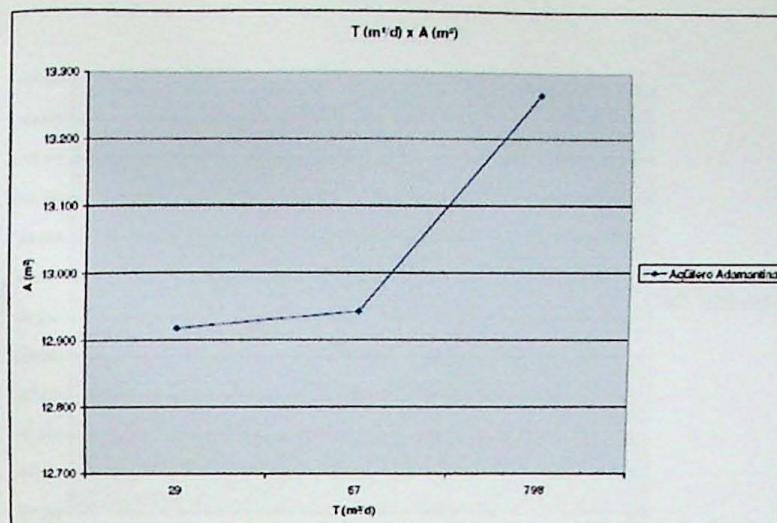
**Gráfico 14 - Gráfico  $T$  ( $m^3/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Aquífero Litorâneo usando o MN com um TT de 1 ano.**



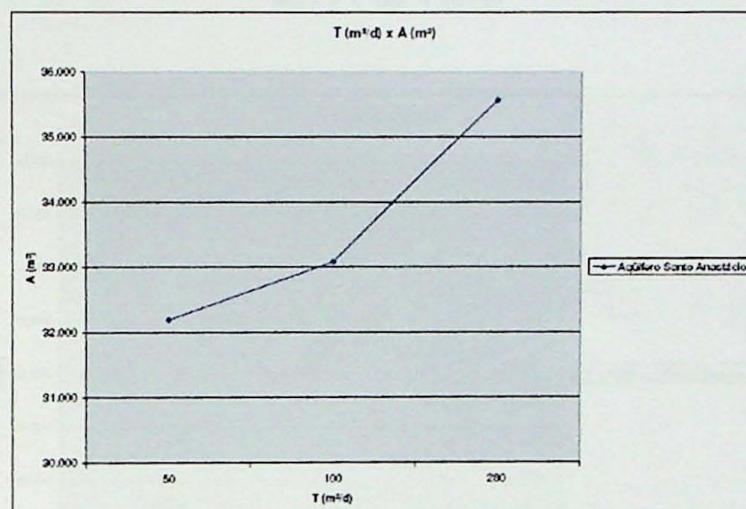
**Gráfico 15 - Gráfico  $T$  ( $m^3/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Aquífero São Paulo usando o MN com um TT de 1 ano.**



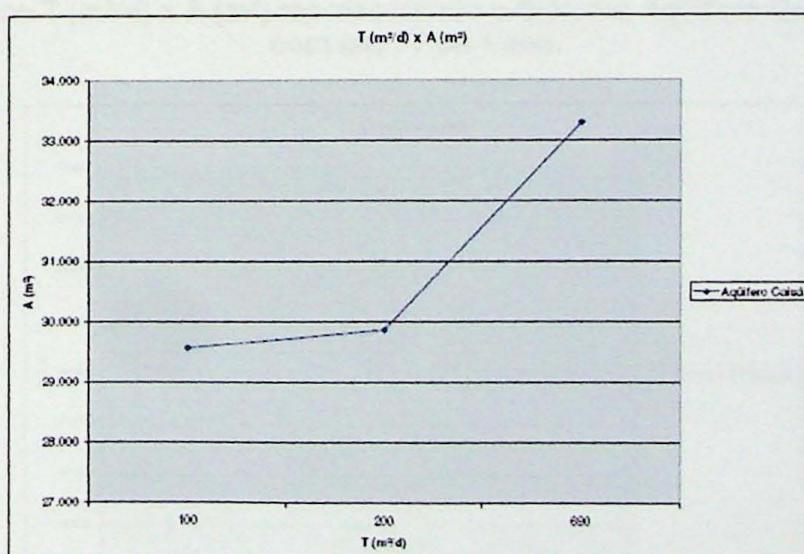
**Gráfico 16 - Gráfico  $T$  ( $m^3/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Aquífero Marília usando o MN com um TT de 1 ano.**



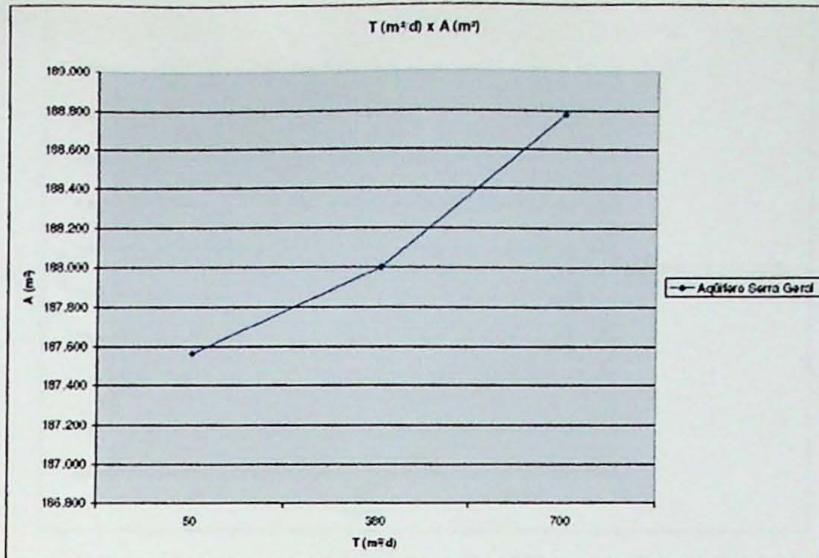
**Gráfico 17 - Gráfico  $T$  ( $m^3/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Aqüífero Adamantina usando o MN com um TT de 1 ano.**



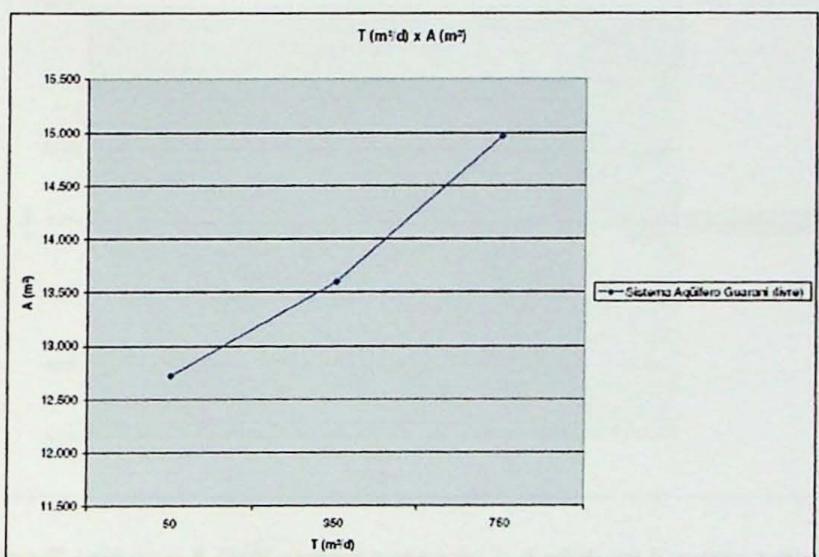
**Gráfico 18 - Gráfico  $T$  ( $m^3/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Aqüífero Santo Anastácio usando o MN com um TT de 1 ano.**



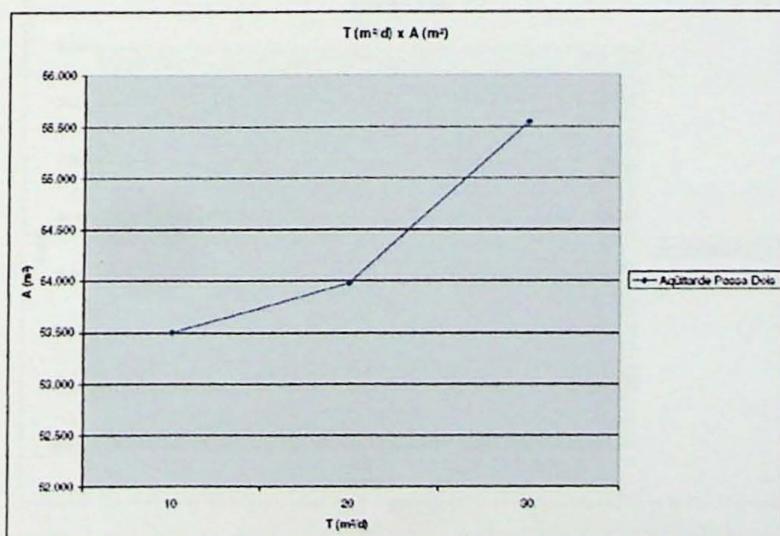
**Gráfico 19 - Gráfico  $T$  ( $m^3/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Aqüífero Caiuá usando o MN com um TT de 1 ano.**



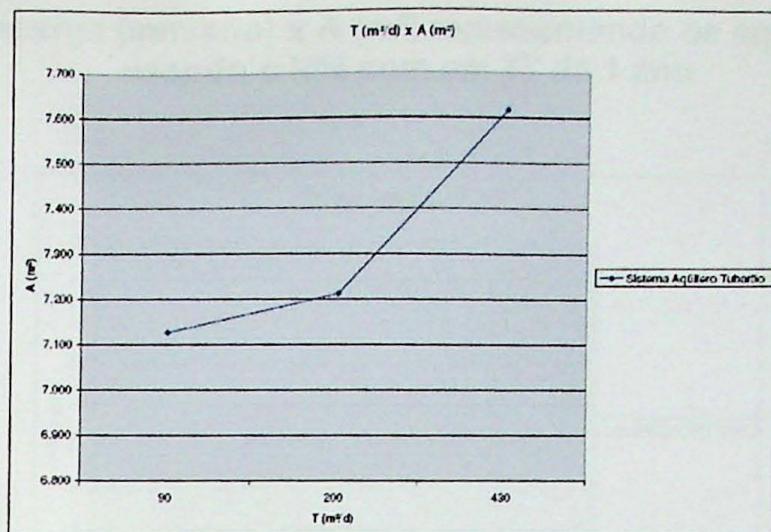
**Gráfico 20 - Gráfico  $T$  ( $m^2/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Aquífero Serra Geral usando o MN com um TT de 1 ano.**



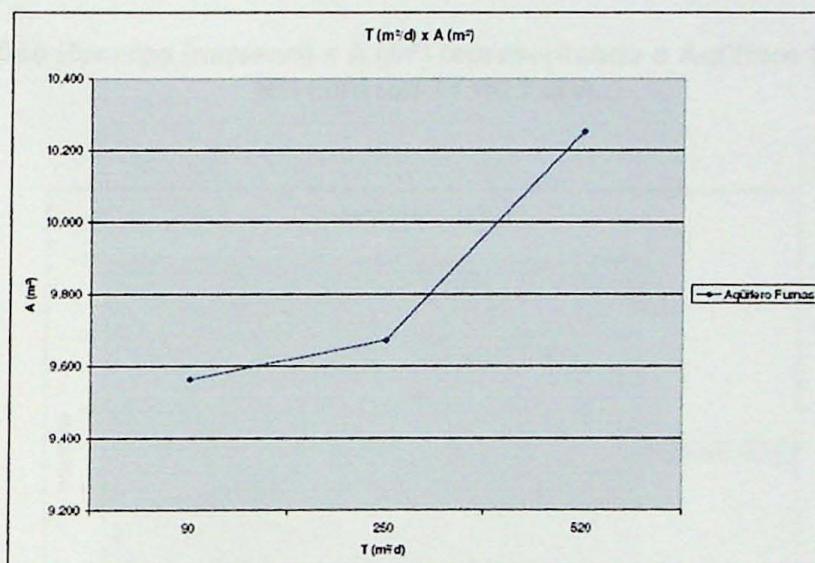
**Gráfico 21 - Gráfico  $T$  ( $m^2/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Sistema Aquífero Guarani usando o MN com um TT de 1 ano.**



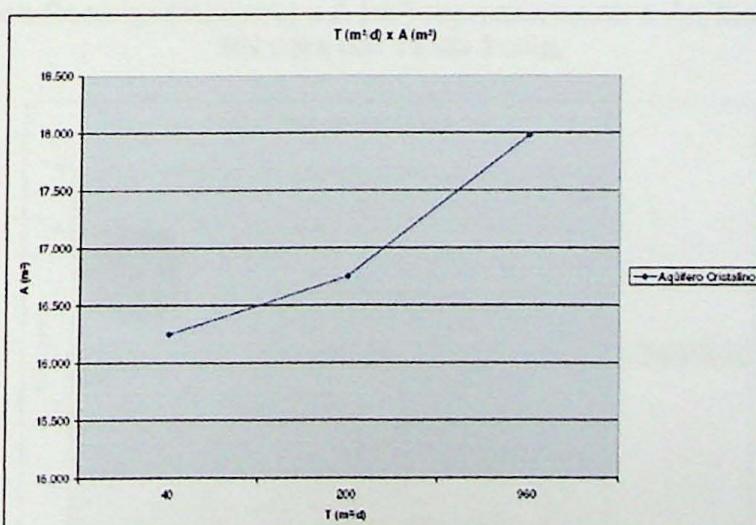
**Gráfico 22 - Gráfico  $T$  ( $m^2/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Aquítarde Passa Dois usando o MN com um TT de 1 ano.**



**Gráfico 23 - Gráfico  $T$  ( $m^2/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Sistema Aqüífero Tubarão usando o MN com um TT de 1 ano.**

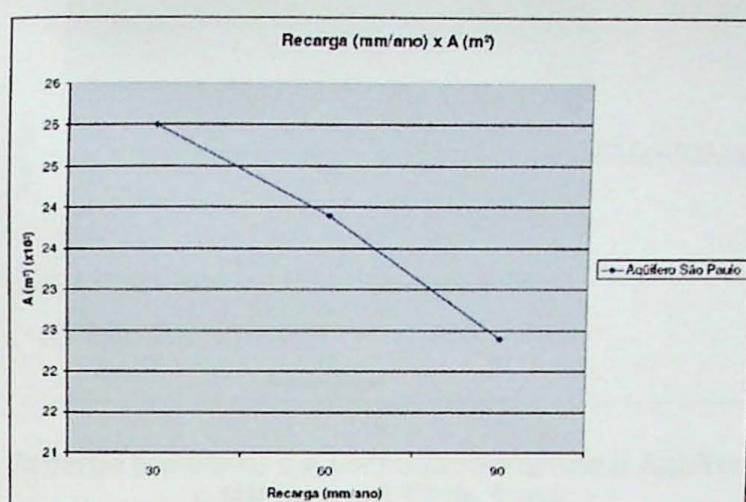


**Gráfico 24 - Gráfico  $T$  ( $m^2/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Aqüífero Furnas usando o MN com um TT de 1 ano.**

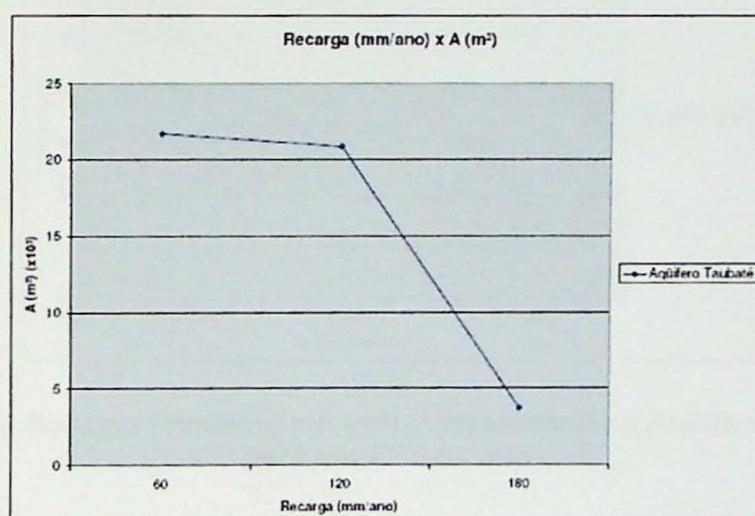


**Gráfico 25 - Gráfico  $T$  ( $m^2/d$ ) x  $A$  ( $m^2$ ) representando o Aqüífero Cristalino usando o MN com um TT de 1 ano.**

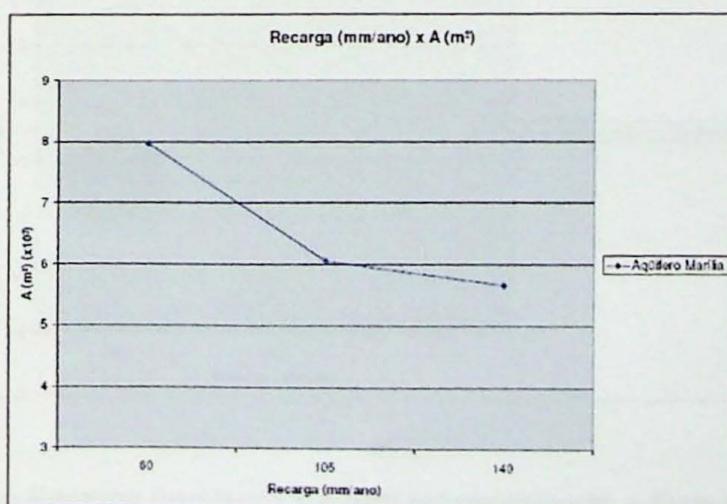
**Gráficos de Recarga (mm/ano) x A ( $m^2$ ) representando os aquíferos paulistas usando o MN com um TT de 1 ano**



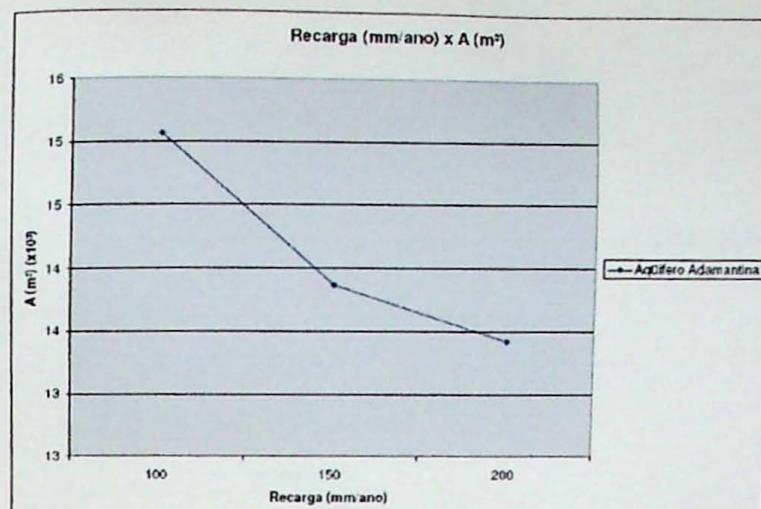
**Gráfico 26 – Gráfico Recarga (mm/ano) x A ( $m^2$ ) representando o Aquífero São Paulo usando o MN para um TT de 1 ano.**



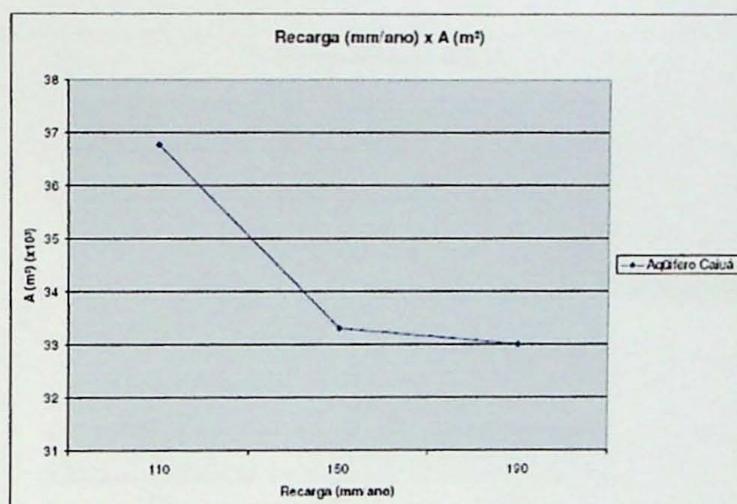
**Gráfico 27 – Gráficos Recarga (mm/ano) x A ( $m^2$ ) representando o Aquífero Taubaté usando o MN para um TT de 1 ano.**



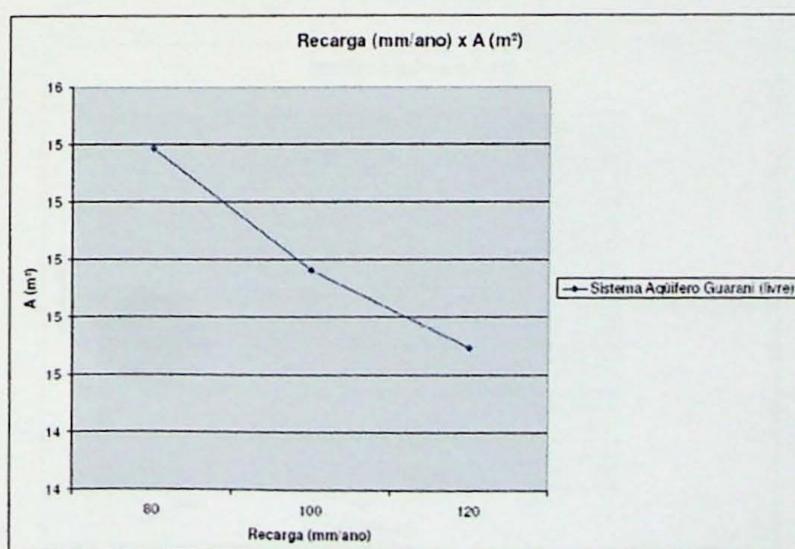
**Gráfico 28 – Gráfico Recarga (mm/ano) x A ( $m^2$ ) representando o Aquífero Marília usando o MN para um TT de 1 ano.**



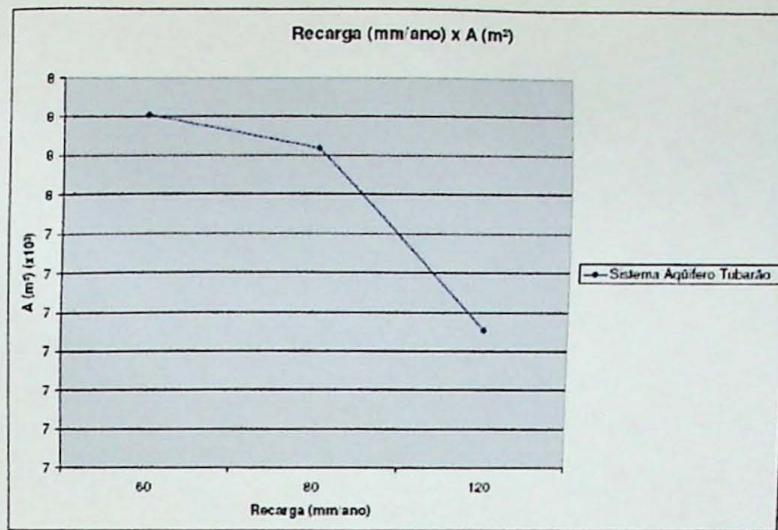
**Gráfico 29 – Gráfico Recarga (mm/ano) x A (m<sup>2</sup>) representando o Aquífero Adamantina usando o MN para um TT de 1 ano.**



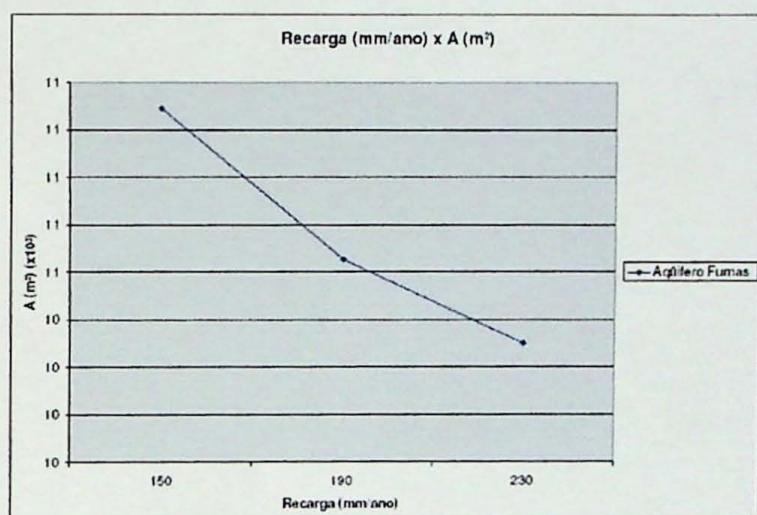
**Gráfico 30 – Gráfico Recarga (mm/ano) x A (m<sup>2</sup>) representando o Aquífero Caiuá usando o MN para um TT de 1 ano.**



**Gráfico 31 – Gráfico Recarga (mm/ano) x A (m<sup>2</sup>) representando o Sistema Aquífero Guarani usando o MN para um TT de 1 ano.**



**Gráfico 32 – Gráfico Recarga (mm/ano) x A ( $m^2$ ) representando o Sistema Aquífero Tubarão usando o MN para um TT de 1 ano.**



**Gráfico 33 – Gráfico Recarga (mm/ano) x A ( $m^2$ ) representando o Aquífero Furnas usando o MN para um TT de 1 ano.**

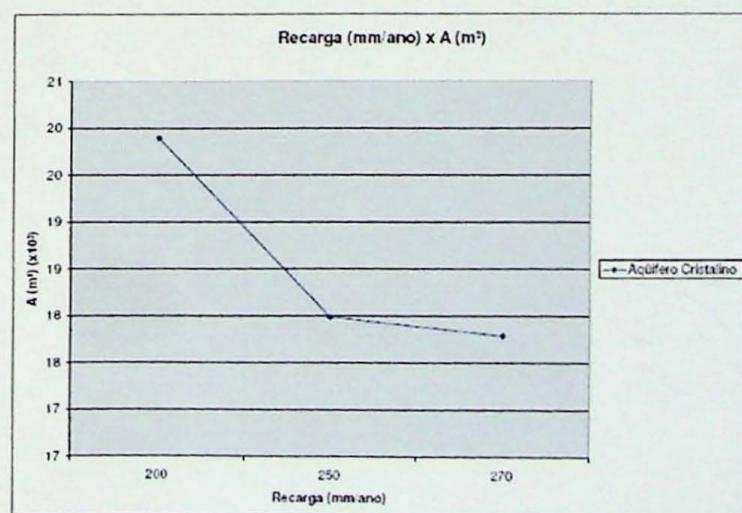


Gráfico 34 – Gráfico Recarga (mm/ano) x A ( $m^2$ ) representando o Aquífero Cristalino usando o MN para um TT de 1 ano.

Gráfico 32 – Glúco Recalda (unidade) x A (m) (representando o sistema Adilene Tavares  
segundo o WM para mT de 1 g/dia)





