



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL - RECURSOS HÍDRICOS

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: PROBLEMA
INVERSO UTILIZANDO O MÉTODO ITERATIVO DE GRADIENTE HIDRÁULICO
E SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

ERLANDSON DE VASCONCELOS QUEIROZ

FORTALEZA-CE

2016

ERLANDSON DE VASCONCELOS QUEIROZ

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: PROBLEMA
INVERSO UTILIZANDO O MÉTODO ITERATIVO DE GRADIENTE HIDRÁULICO
E SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

Dissertação submetida ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil na Área de Concentração de Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro.

**Fortaleza-CE
2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- Q43m Queiroz, Erlandson de Vasconcelos.
Modelagem computacional de águas subterrâneas: problema inverso utilizando o método iterativo de gradiente hidráulico e sistemas de informações geográficas / Erlandson de Vasconcelos Queiroz. – 2016.
64 f. : il. color. , enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2016.
Área de Concentração: Recursos Hídricos.
Orientação: Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro.
1. Recursos hídricos. 2. Calibração. 3. Simulação por computador. I. Título.

ERLANDSON DE VASCONCELOS QUEIROZ

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: PROBLEMA
INVERSO UTILIZANDO O MÉTODO ITERATIVO DE GRADIENTE HIDRÁULICO
E SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

Dissertação submetida ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil na Área de Concentração de Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro (orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Horst Frischkorn
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Dr. Rubens Sonsol Gondim
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

Agradecimentos

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos na graduação e durante o mestrado.

Ao FINEP pelo financiamento do projeto Hidrontec que teve grande influência no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Marco Aurélio pelos cinco anos em que me orientou e por todo o conhecimento que me passou durante este tempo.

Aos membros da banca, o professor Horst e o engenheiro Rubens pela disposição em avaliar e sugerir melhorias neste trabalho.

Aos corpo de professores do POSDEHA, em especial aos professores Nilson, Ticiania e Kenedy.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental pela ajuda com diversos problemas e dúvidas ao longo do mestrado, em especial ao Erivelton, Shirley e Edineuza.

Aos colegas do Laboratório de Hidráulica Computacional: Marcelo, Valmir, Gilnário, Marcos, Renan, Graciano, Jean, Israel, Arthur, Alana e Adrya.

Aos meus pais, Enilson e Lucilda, que me ensinaram que o conhecimento é a única coisa que ninguém nos tira.

Ao amigo José Joca, não menos que um pai.

A minha namorada Livia, pelo companheirismo, carinho e compreensão.

Aos meus irmãos e cunhados pela torcida.

À parte a matemática, não conhecemos nada com certeza. Mas ainda temos que viver, e viver é agir. Todas as ações tem de basear em suposições sobre a realidade.

David Hume

RESUMO

O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH) é um processo computacional de calibração da condutividade hidráulica, desenvolvido recentemente como um método alternativo à abordagem convencional. O método tradicional utiliza a diferença entre cargas hidráulicas calculadas e observadas. A função objetivo do MIGH é desenvolvida a partir das diferenças entre os gradientes hidráulicos. Alguns trabalhos recentes têm adotado o MIGH e comprovado sua eficiência computacional na busca de solução para o problema inverso. Neste trabalho, será desenvolvido um plugin associado ao Sistema de Informações Geográficas gvSIG para a simulação e calibração de condutividade hidráulica horizontal de fluxo subterrâneo. As ferramentas serão desenvolvidas em linguagem computacional Java. O problema de fluxo será simulado com o auxílio do software MODFLOW e, para a calibração, será utilizado o método MIGH. A eficiência do MIGH será medida com base nas funções de erro: Root Mean Square Error of Heads (RMSEH), Root Mean Square Error of Gradient (RMSEG) e pela média dos ângulos entre o modelo calculado e o observado.

Palavras-chave: Modelagem computacional; Sistemas de Informações Geográficas; Fluxo Subterrâneo; Problema Inverso; Método Iterativo de Gradiente Hidráulico.

ABSTRACT

The Hydraulic Gradient Comparison Method (HGCM) is a computational process used to calibrate the hydraulic conductivity. It was recently developed as an alternative method to the conventional approach. The traditional method uses the differences between calculated and observed heads. The HGCM objective function is developed based on the differences between the hydraulic gradients. Some recent studies have adopted HGCM, proving its computational efficiency in the search for solutions to the inverse problem. In this work, it will be developed a plugin to the Geographic Information System gvSIG for the simulation and calibration of the hydraulic conductivity in groundwater flow. The programming language used in this development will be Java. The software MODFLOW will be used to simulate the groundwater flow and for the calibration process the HGCM will be used. The method efficiency will be evaluated based on the error functions: Root Mean Square Error of Heads (RMSEH), Root Mean Square Error of Gradient (RMSEG) and by the mean angle between the calculated and observed models.

Keywords: Computational Modeling; Geographic Information Systems; Groundwater Flow; Inverse Problem; Hydraulic Gradient Comparison Method.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Permeâmetro utilizado nos experimentos de Darcy	15
Figura 2 – Volume de controle para desenvolvimento da equação da continuidade em meio poroso.	16
Figura 3 – Subsistemas e ferramentas relacionados ao <i>SIG</i>	29
Figura 4 – <i>Layer</i> vetorial representando a malha do modelo	39
Figura 5 – <i>Table of Contents</i> da <i>Layer</i> na figura 4	39
Figura 6 – Malha com poço de bombeamento (em vermelho) e poços de observação (em verde)	40
Figura 7 – Malha com Poços de Observação para teste de sensibilidade do modelo	41
Figura 8 – Malhas do Modelo Fixo (esquerda) e Não Fixo (direita)	42
Figura 9 – Ângulo entre os gradientes hiráulicos dos modelos simulado e observado	43
Figura 10 – Fluxograma da Calibração pelo MIGH no UFC Flow	44
Figura 11 – Modelo simulado com condutividade constante	45
Figura 12 – Barra de Ferramentas do Sistema UFC Flow	46
Figura 13 – Explicação das Ferramentas	46
Figura 14 – Guias de Interface de Usuário para criar Malha	47
Figura 15 – Guia de Interface de Usuário - BCF	48
Figura 16 – Guia de Interface de Usuário - StressPeriods	48
Figura 17 – Guia de Interface de Usuário - Modificar Parâmetros	49
Figura 18 – Guia de Interface de Usuário - Modo Tabela	49
Figura 19 – Gráfico 3DPlot de cargas hidráulicas: vista superior	50
Figura 20 – Gráfico 3DPlot de cargas hidráulicas: vista inferior	51
Figura 21 – RMSEH	52
Figura 22 – RMSEG	52
Figura 23 – Média dos Ângulos	53
Figura 24 – Histogramas de condutividades hidráulicas na 10 ^a iteração do MIGH	54
Figura 25 – Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 10m/s$)	55
Figura 26 – Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 1m/s$)	55
Figura 27 – Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 0.1m/s$)	56
Figura 28 – Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 0.01m/s$)	56
Figura 29 – Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 0.001m/s$)	57
Figura 30 – Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 0.0001m/s$)	57

Lista de Símbolos

η	Porosidade do meio [L^3/L^3]
η_{ef}	Porosidade efetiva do meio [L^3/L^3]
ρ	Massa específica de um material [$M \cdot L^{-3}$]
V	Volume total de uma região [L^3]
V_v	Volume de vazios de uma região num meio poroso [L^3]
V_{vi}	Volume de vazios interconectados de uma região num meio poroso [L^3]
S_s	Armazenamento específico de um meio poroso [L^{-1}]
S	Coefficiente de armazenamento de um meio poroso
K	Condutividade hidráulica de um meio poroso [L/T]
T	Transmissividade hidráulica de um meio poroso confinado [L^2/T]
ϕ	Carga hidráulica em um ponto do escoamento [L]
Q	Vazão de escoamento [L^3/T]
q	Fluxo específico (ou velocidade de darcy) [L/T]
V	Velocidade de um elemento de fluxo [L/T]
A	Área de seção arbitrária [L^2]
W	Fluxo por unidade de volume que entra ou sai de uma região [T^{-1}]
b	Espessura de uma camada em um aquífero [L]
L	Distância em linha reta entre dois pontos de observação [L]
δf	Varição de pequena magnitude de uma função f
\int_{SC}	Integral em uma superfície de controle
\int_{VC}	Integral em um volume de controle
∇	Operador gradiente de uma função escalar
$\nabla \cdot$	Operador divergente de uma função vetorial
$\frac{\partial f}{\partial n}$	Derivada parcial de uma função f em relação à variável n
f_x, f_y, f_z	Valor da coordenada x , y ou z de uma função f

Sumário

	Lista de ilustrações	vii
	Lista de Símbolos	viii
1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos Gerais	12
1.2	Objetivos Específicos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Fluxo de Águas Subterrâneas	13
2.1.1	Porosidade	13
2.1.2	Coefficientes de Armazenamento	13
2.1.3	Condutividade Hidráulica	14
2.1.4	Equação do Fluxo em Meio Saturado	15
2.2	Soluções das equações de fluxo	17
2.2.1	Modelos Analíticos	17
2.2.2	Modelos Numéricos	18
2.3	Estimativa de Parâmetros	19
2.3.1	Método Iterativo do Gradiente Hidráulico	21
2.3.1.1	Função Objetivo em Aquífero Confinado	21
2.3.1.2	Função Objetivo em Aquífero Não Confinado	23
2.3.1.3	Procedimento Numérico	24
2.4	Linguagem JAVA	24
2.4.1	Programação Orientada a Objetos	25
2.4.2	Outras características da linguagem Java	25
2.4.3	Ambiente Integrado de Desenvolvimento	26
2.4.4	Ant	27
2.5	Sistemas de Informações Geográficas	27
2.5.1	O gvSIG	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	Classes Base do Sistema	33
3.1.1	Extensões	34
3.1.2	Guias de Interface Gráficas	34
3.1.3	Gerenciadores de Camadas	34
3.1.4	Ouvintes de Mapa	34

3.2	MODFLOW	35
3.2.1	Basic	35
3.2.2	Discretization	35
3.2.3	Ground Water Flow	35
3.2.4	Solver	35
3.2.5	Boundary Condition	36
3.2.6	Outros Arquivos	36
3.3	HidroGeologicModel	36
3.3.1	Mesh Package	36
3.3.2	Math Package	37
3.4	Bibliotecas e outras API's	38
3.5	Layers do Sistema	38
3.5.1	Layers da Malha	38
3.5.2	Layers Condições de contorno específicas	39
3.6	MIGH	40
3.6.1	Erro e Convergência	42
3.6.2	Análise de Sensibilidade do MIGH	44
4	RESULTADOS	46
4.1	O UFC Flow	46
4.1.1	Abrir/Salvar Malha	46
4.1.2	Criar Malha	47
4.1.3	Configurar BCF/Tempo	47
4.1.4	Modificar Parâmetros/Tabela	48
4.1.5	Poços de Bombeamento/Observação	49
4.1.6	Simulação/Calibração/Geração de Gráficos	50
4.2	Análise de Sensibilidade do MIGH	51
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	58
5.1	Conclusões	58
5.2	Recomendações	59
	REFERÊNCIAS	61

1 Introdução

O processo de calibração de um modelo criado é uma etapa crucial na análise de um problema de engenharia. A partir de informações coletadas em campo, o modelador é capaz de tirar conclusões e tomar decisões acerca de um determinado assunto. É necessário, no entanto, um trabalho inverso para o ajuste das características reais do meio.

Segundo Guo e Zhang (2000), a calibração de parâmetros é uma etapa extremamente importante na modelagem e consome o maior tempo no procedimento de simulação numérica (SCHUSTER; ARAUJO, 2004). Diversos trabalhos discursam sobre o problema inverso em fluxo de águas subterrâneas dentre os quais podem ser citados: Carrera et al. (2005); Carrera e Neuman (1986a); Carrera e Neuman (1986b); McLaughlin e Townley (1996); Yeh (1986).

Uma abordagem recente do processo de calibração é o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH), desenvolvido por Guo e Zhang (2000). Em um trabalho simultâneo, sem o conhecimento do desenvolvimento do método, Schuster e Araujo (2004) trabalharam numa abordagem semelhante a partir de uma formulação empírica mais simples.

A partir da formulação proposta por Schuster e Araújo, alguns trabalhos de calibração utilizando o MIGH foram desenvolvidos, especialmente no nordeste brasileiro. Souza (2007) aplicou o MIGH em comparação como o PEST na calibração de aquífero na região do Cariri cearense.

De forma similar, e trabalhando na mesma região, Tavares (2010) desenvolveu uma rotina em Delphi e aplicou o método em conjunto com um software de geoprocessamento para análise dos dados. Mais recentemente, Costa (2014) aplicou o método em conjunto com um software de geoprocessamento para calibração na região do Vale do Gurugéia no Piauí.

Em sua tese de doutorado, Tavares (2014), propôs um método análogo ao MIGH para a calibração do coeficiente de dispersividade longitudinal. Este método foi chamado de Método Iterativo do Gradiente de Concentrações (MIGC), calculado a partir dos gradientes das concentrações de um determinado poluente que se transporta no fluxo subterrâneo.

Nestes últimos trabalhos, o Método Iterativo do Gradiente foi utilizado em conjunto com algum software de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Isto se faz necessário pois a calibração dos parâmetros não é um fim em si mesma, mas sim uma etapa de um problema de tomada de decisão. Um problema modelado e calibrado fornece informações para a gestão dos recursos naturais, neste caso, das águas subterrâneas.

Nesta dissertação, tem-se a intenção de modelar o problema inverso em águas subterrâneas com relação ao parâmetro hidrológico da condutividade hidráulica. Para tal, será desenvolvido um modelo programado em Java utilizando a interface em SIG do software gvSIG. As equações de fluxo subterrâneo serão desenvolvidas com auxílio do software MODFLOW (MCDONALD; HARBAUGH, 1988). Como resultado final, deve ser produzido um software integrado ao gvSIG para simulação de fluxo subterrâneo e calibração da condutividade hidráulica utilizando o MIGH.

1.1 Objetivos Gerais

Desenvolvimento de um software integrado a um Sistema de Informações Geográficas capaz de simular o fluxo de águas subterrâneas e de calibrar a condutividade hidráulica, o **UFC Flow**. O sistema será desenvolvido com enfoque no processo de calibração sendo, a priori, desenvolvido para problemas com apenas uma camada e simulação de fluxo em regime estacionário.

1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos podem ser citados:

- Desenvolvimento das interfaces gráficas do sistema, integrando as funcionalidades do SIG com os mecanismos de simulação de calibração do fluxo subterrâneo.
- Modelagem em Java dos arquivos necessários para a simulação de fluxo hídrico em meio poroso saturado utilizando o software MODFLOW.
- Desenvolvimento de interface gráfica e rotinas de cálculo para o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico.
- Desenvolvimento de ferramentas de análise dos dados em forma de gráficos, mapas e curvas de nível utilizando bibliotecas *open-source* em Java.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fluxo de Águas Subterrâneas

No estudo do fluxo hídrico em meio poroso saturado, alguns parâmetros são extremamente importantes. É através destes parâmetros que se pode justificar, conceitualmente, ou matematicamente os processos que regem este fluxo subterrâneo. Os mais relevantes na determinação das equações do fluxo serão tratados adiante.

Porosidade

A porosidade (η) é dada, segundo Fetter (2001) como a porcentagem de rocha ou solo que é vazia de material e expresso por:

$$\eta = \frac{V_v}{V} (\times 100\%) \quad (2.1)$$

Com: η = Volume de vazios (%);

V_v = Volume de vazios [L^3];

V = Volume [L^3].

Durante a drenagem de um corpo por gravidade, nem toda a água é extraída, pois parte fica retida por forças moleculares e de superfície. Neste caso, faz-se necessário definir o conceito de porosidade efetiva (η_{ef}) que, segundo Kresic (1997) é dado pelo volume de vazios interconectados que permitem o fluxo livre (V_{vi}) dividido pelo volume total.

$$\eta_{ef} = \frac{V_{vi}}{V} \quad (2.2)$$

Coefficientes de Armazenamento

Os eventos de recarga e descarga no aquífero apresentam mudanças no volume de água armazenado. A capacidade de um aquífero armazenar e transmitir água depende das propriedades da água e do meio poroso e podem ser traduzidas pelo coeficiente de armazenamento e pelo armazenamento específico.

O armazenamento específico de um aquífero saturado é definido segundo Cabral (1997) como o volume de água liberado por um volume unitário do aquífero submetido a um decréscimo unitário de carga hidráulica, sendo expresso por:

$$S_s = \frac{\delta V_{\text{liberado}}}{V \delta h} \quad (2.3)$$

Para um aquífero de espessura constante pode ser útil definir o coeficiente de armazenamento S como sendo a multiplicação do armazenamento específico pela espessura: $S = S_s b$.

Nas definições anteriores, δ representa uma pequena variação, S é adimensional e S_s tem dimensão $[L^{-1}]$

Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica $K [L/T^2]$ de um meio poroso, é o parâmetro que caracteriza a velocidade desenvolvida pela água ao atravessar este meio, quando submetida à uma diferença de carga hidráulica (h) unitária. Este parâmetro é a base da equação que estabelece o fluxo de água em um meio poroso conhecida como *lei de Darcy*. Desenvolvida pelo engenheiro francês Henry Darcy (1856), no Apêndice D de um projeto de ampliação do sistema de abastecimento de água da cidade de Dijon sob o título “Determinação das Leis de Fluxo de Água através da Areia” (FREEZE, 1994).

Os experimentos de Darcy foram feitos analisando a vazão de água através de uma coluna de solo como ilustrado na figura 1. Darcy teria notado que os resultados “Demonstravam que a descarga de cada filtro aumentava proporcionalmente com a carga”. Denotando por Q “descarga por segundo por metro quadrado” e I como a “carga por metro de espessura do filtro” percebeu que para cada série, uma relação estritamente linear existia entre Q e I (SIMMONS, 2008).

A equação que expressa esta lei matematicamente é dada como:

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{\phi_2 - \phi_1}{L} \quad (2.4)$$

Onde: Q = Vazão que escoou pelo permeâmetro $[L^3/T]$;

A = Área da seção do permeâmetro $[L^2]$;

ϕ = Carga hidráulica em um piezômetro $[L]$;

L = Distância entre os piezômetros $[L]$;

Em sua forma generalizada em termos da velocidade do fluido, a equação 2.4 fica:

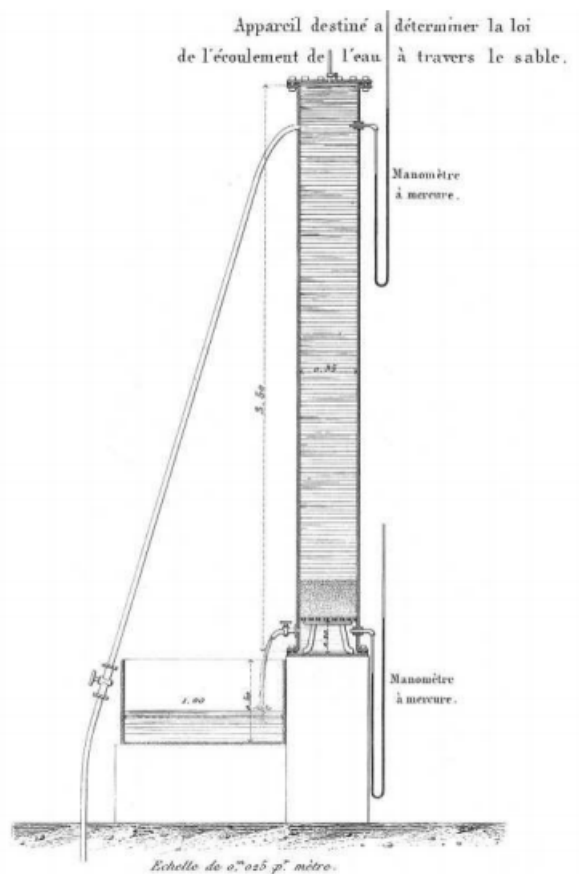
$$\vec{q} = -K\nabla\phi \quad (2.5)$$

Em que: \vec{q} = vetor do fluxo específico [L/T];

K = Tensor da condutividade hidráulica ($K_{3 \times 3}$) [L/T];

ϕ = Carga hidráulica como função do espaço e tempo $\{\phi(x, y, z, t)\}$ [L];

Figura 1: Permeâmetro utilizado nos experimentos de Darcy



Fonte: Alencar (2008, p. 48)

Equação do Fluxo em Meio Saturado

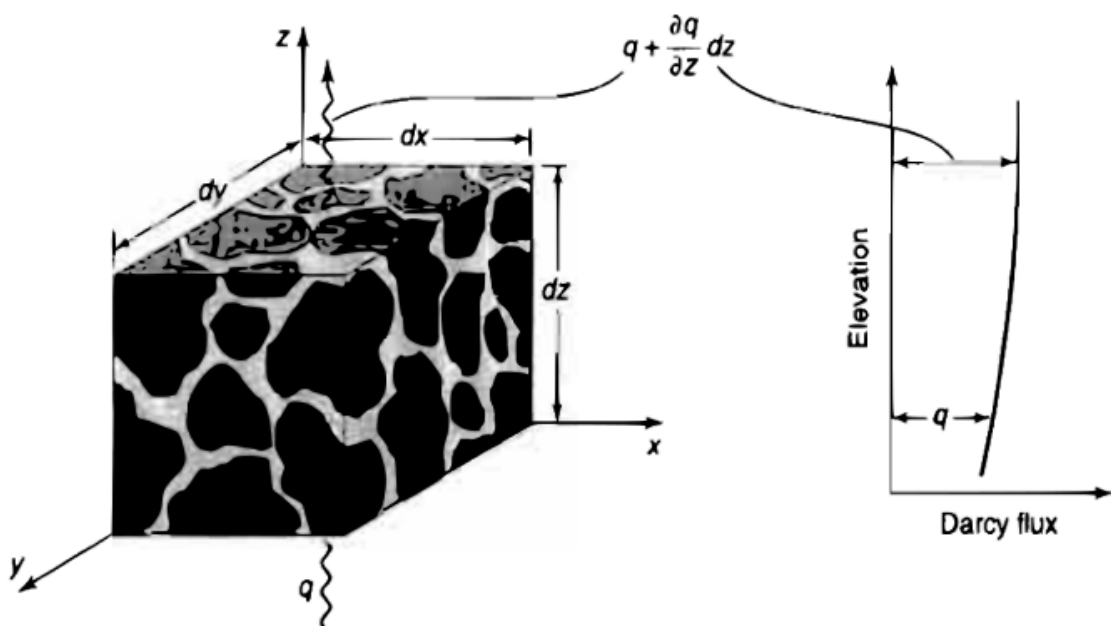
Para o desenvolvimento da equação geral do fluxo em meio saturado, são utilizadas as equações de continuidade e conservação de massa que atuam sobre um volume de controle ($\forall C$) limitado lateralmente por uma superfície de controle (SC) como mostra a figura 2.

O desenvolvimento da equação da continuidade foge do escopo deste trabalho, é vastamente conhecido, podendo ser encontrado diversos trabalhos de mecânica dos fluidos, hidráulica, hidrologia ou hidrogeologia. A dedução por volume de controle pode ser encontrada em Fox e McDonald (2001). Esta equação para um corpo poroso e saturado toma a forma:

$$\int_{SC} \rho V \cdot dA = -\frac{d}{dt} \int_{\forall C} \rho \cdot d\forall \quad (2.6)$$

Sendo: ρ = A massa específica do fluido [$M \cdot L^{-3}$];
 V = A velocidade do fluxo [L/T];
 $d\forall$ = Elemento infinitesimal de volume [L^3];
 dA = Elemento infinitesimal de área [L^2];

Figura 2: Volume de controle para desenvolvimento da equação da continuidade em meio poroso.



Fonte: Todd e Mays (2005, p 123)

O desenvolvimento da equação 2.6 é detalhado nas obras de Freeze e Cherry (1979), Fetter (2001), (TODD; MAYS, 2005) e Bear (2007).

Considerando que coincidem os eixos cartesianos com as direções principais do tensor de condutividade hidráulica K do meio poroso, a equação de fluxo subterrâneo desenvolvida a partir da equação 2.6 torna-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (2.7)$$

K_i = Elementos da diagonal principal do tensor de condutividade [L/T];

h = Carga hidráulica como função do espaço e tempo $h(x, y, z, t)$ [L];

S_s = Armazenamento específico [L^{-1}];

W = Fluxo por unidade de volume que entra ou sai do Volume de controle [T^{-1}];

Esta equação representa o caso geral para o fluxo tridimensional através de um meio poroso saturado, heterogêneo e anisotrópico. Alguns casos particulares podem ser extraídos desta equação. Para o caso sob regime estacionário ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) a equação pode ser expressa somente por:

$$\nabla \cdot (K \nabla h) = W \quad (2.8)$$

Para um aquífero confinado de espessura b e transmissividade $T = Kb$, e considerando $q = Wb$ como sendo o fluxo por unidade de área, tem-se:

$$\nabla \cdot (T \nabla h) = q \quad (2.9)$$

Nestes últimos casos, K e T são tensores.

2.2 Soluções das equações de fluxo

A equação 2.7 descrita anteriormente, é não linear e não homogênea, e, em geral, não apresenta soluções simples. A seguir, serão descritos alguns métodos utilizados para a resolução desta equação ou de alguns casos particulares.

Modelos Analíticos

Os modelos analíticos produzem uma função ou conjunto de funções que representam as soluções da equação de fluxo para cada parâmetro dentro do domínio analisado.

Utilizam procedimentos e técnicas matemáticas como Separação de Variáveis, Transformadas de Laplace, Transformadas de Fourier, entre outros procedimentos.

Para Kresic (1997), o que facilmente estabelece uma solução como analítica é que quando se deseja calcular o seu valor para um dado conjunto de parâmetros, resolve-se uma equação para este conjunto. Caso se deseje calcular para um conjunto diferente, resolve-se a mesma equação, mudando apenas os parâmetros. A solução analítica mais conhecida do fluxo subterrâneo, é provavelmente a equação de Theis (1935) que descreve o rebaixamento do lençol para o bombeamento por um poço.

Existem alguns métodos semi-analíticos, que utilizam soluções analíticas a partir de alguma aproximação numérica, ou expansão finita de uma série infinita ou por superposição de efeitos. Exemplos do primeiro caso encontram-se nos trabalhos de Costa (2005), Costa e Castro (2007) e Menescal (2008). O segundo caso, baseia-se na técnica desenvolvida por Liao (1992) em sua tese de doutorado no qual apresentou o método de análise por homotopia para resolução de sistemas de equações não lineares e com aplicação no problema de águas subterrâneas no trabalho de Atangana e Botha (2012).

O terceiro caso caracteriza a formulação do Método dos Elementos Analíticos (MEA), desenvolvido por Strack e Haitjema (1981a), Strack e Haitjema (1981b). Esta formulação é discutida nos trabalhos de Gomes (2002) e Alencar (2008). A aplicação do método na modelagem de aquíferos no Brasil é encontrada no trabalho de Gomes e Castro (2005).

Modelos Numéricos

Para os casos em que não se podem ser obtidas soluções analíticas, o domínio do problema é discretizado e a solução do problema é dividida em soluções aproximadas locais. Esta obtenção de soluções locais aproximadas é o que caracteriza a solução numérica. Um método numérico é considerado eficiente para a resolução de um sistema de equações diferenciais quando apresenta consistência, convergência e estabilidade (RIGHETTO, 1998). A consistência e a convergência se mostram quando, ao refinar as regiões do domínio, há aproximação das equações com a equação original e das soluções locais com as soluções reais. E a estabilidade existindo quando não há ampliação do erro numérico ao longo dos passos de tempo.

Os principais métodos numéricos utilizados para a resolução das equações de fluxo subterrâneos são: o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Elementos de Contorno (MEC). Não há intenção de se intensificar os estudos do MEF e MEC neste trabalho. A conceituação e aplicação do MEF na equação de fluxo subterrâneo pode ser encontrada na obra de Segerlind (1984) e a conceituação do MEC é encontrado em Banerjee (1994).

O MDF, que será o método mais abordado neste trabalho, nasce a partir do conceito de derivada. Considerando uma função $f(x)$, sua derivada $f'(x)$ dada pela expressão:

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (2.10)$$

A expressão anterior é válida para $\Delta x \rightarrow 0$. Para o MDF, em vez de se utilizar Δx como um intervalo infinitesimal, faz-se dele um valor finito, porém suficientemente pequeno em relação à área de estudo da função.

Utilizando este conceito, Cabral e Demetrio (1997) descrevem as expressões que podem ser utilizadas para cada dimensão do problema de águas subterrâneas. Os tipos podem ser:

- Diferença Progressiva (Derivada calculada a partir de um ponto posterior):

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_i \approx \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta x} \quad (2.11)$$

- Diferença Regressiva (Derivada calculada a partir de um ponto anterior):

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_i \approx \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta x} \quad (2.12)$$

- Diferença Central (Derivada calculada com metade de um intervalo à frente e metade de um intervalo para trás):

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_i \approx \frac{h_{i+1/2} - h_{i-1/2}}{\Delta x} \quad (2.13)$$

Para a derivada segunda, a expressão normalmente utilizada é:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \approx \frac{h_{i-1,j} - 2h_{i,j} + h_{i+1,j}}{(\Delta x)^2} \quad (2.14)$$

2.3 Estimativa de Parâmetros

A calibração em águas subterrâneas, de acordo com Kresic (1997) é o processo que consiste em encontrar as condições de contorno, períodos de estresse e parâmetros hidrogeológicos que produzem resultados que mais se aproximam das observações feitas em campo das cargas hidráulicas e fluxos. A partir desta definição, são estabelecidos dois tipos de calibração:

- Calibração Manual ("Tentativa e erro") e
- Calibração Automatizada

A *Calibração Manual* foi a primeira técnica aplicada na estimativa de parâmetros hidrogeológicos e ainda é muito utilizada por muitos usuários. Apresenta um tempo de processamento consideravelmente maior que o processo automatizado e é fortemente influenciada pela experiência do usuário. Apesar de suas claras desvantagens, Kresic (1997) recomenda a utilização da calibração manual em qualquer processo mesmo que apenas em parte, defendendo que, ao variar os parâmetros e analisar os resultados obtidos, o usuário desenvolve um análise de sensibilidade do modelo apresentado.

A *Calibração Automatizada* foi desenvolvida no intuito de reduzir o tempo e o número de operações necessárias bem como as incertezas associadas à subjetividade do usuário. Ganhou força a partir da década de 90, especialmente com o desenvolvimento do modelo de calibração PEST (DOHERTY; BREBBER; WHITE, 1994). As principais críticas relacionadas à estes tipos de calibração baseiam-se na instabilidade dos métodos e na não-unicidade das soluções (ANDERSON; WOESSNER, 1992).

Dentre os métodos de calibração automática utilizados duas formulações distintas se caracterizam, a primeira formulação, tratada por Tavares (2010) como "abordagem clássica" trabalha na tentativa de minimizar uma função objetivo composta pela diferença entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas. Segundo Kresic (1997), a maior parte dos problemas inversos nesta área utilizam esta metodologia. Dentre os programas que aplicam esta metodologia, destacam-se: PEST (*Parameter Estimation*) desenvolvido em FORTRAN (DOHERTY, 2005) e, recentemente adaptado para C++ (WELTER et al., 2015) e o UCODE (POETER; HILL, 1998).

Para esta abordagem clássica, transforma-se o problema inverso em um problema de otimização, onde deseja-se minimizar a função do erro médio quadrático, ou RMSE (*Root Mean Square Error*). É utilizada, também a expressão RMSEH (*Root Mean Square Error of Heads*) neste contexto. A função a ser minimizada por este método toma, então, a forma da equação 2.15, a seguir.

$$\text{RMSEH} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (h_i^{\text{obs}} - h_i^{\text{calc}})^2} \quad (2.15)$$

Onde: N = Número de cargas observadas;
 h_i^{obs} = i -ésima carga hidráulica observada [L];
 h_i^{calc} = i -ésima carga hidráulica calculada [L].

Uma outra abordagem, desta vez baseada na minimização de uma função composta pela diferença dos gradientes hidráulicos das cargas entre os modelos observados e calculados, foi desenvolvido nos trabalhos de Guo e Zhang (2000) e posteriormente um trabalho similar desenvolvido por Schuster e Araujo (2004). Essa abordagem ficou conhecida como *Hydraulic Gradient Comparison Method*, sendo chamada em português de Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH).

Método Iterativo do Gradiente Hidráulico

Diferente das abordagens convencionais, que tentam minimizar o *RMSEH* entre cargas hidráulicas observadas e calculadas, o Método Iterativo do Gradiente visa minimizar as diferenças entre os gradientes calculados e observados. Guo e Zhang (2000) definem a função de otimização do MIGH como sendo uma do tipo:

$$F_{\text{obj}} = \int_R (\nabla h^{\text{calc}} - \nabla h^{\text{obs}}) \cdot (\nabla h^{\text{calc}} - \nabla h^{\text{obs}}) dx dy \quad (2.16)$$

Sendo ∇h^{calc} e ∇h^{obs} os gradientes hidráulicos das cargas calculadas e observadas respectivamente e R é o domínio do fluxo.

2.3.1.1 Função Objetivo em Aquífero Confinado

O estudo da otimização matemática como estratégia para encontrar máximos e mínimos de uma função sujeita a restrições de igualdade é encontrado na obra de Bryson e Ho (1975). Para minimizar uma função objetivo do tipo $f(x,y)$ sujeita à equação $g(x,y) = 0$, analisa-se a função Lagrangeana definida na equação 2.17:

$$\mathcal{L}(x,y,\lambda) = f(x,y) + \lambda \cdot g(x,y) \quad (2.17)$$

No problema analisado, a função $f(x,y)$ é a o erro quadrático entre os gradientes definido na função 2.16 e $g(x,y) = 0$ é a função do fluxo subterrâneo confinado em regime estacionário (Equação 2.9). A Lagrangeana toma, então, a forma da equação 2.18.

$$\mathcal{L} = (\nabla h^{\text{calc}} - \nabla h^{\text{obs}})^2 + \lambda [-\nabla \cdot (T \cdot \nabla h) - q] \quad (2.18)$$

A nova função objetivo $L(x, y, \lambda)$ da calibração pelo MIGH toma então a forma da integral da equação 2.18 como mostra-se a seguir:

$$L = \int_R \left\{ (\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs})^2 + \lambda [-\nabla \cdot (T \cdot \nabla h) - q] \right\} dx dy \quad (2.19)$$

Utilizando a identidade de Green, tem-se:

$$\int_R \lambda [-\nabla \cdot (T \cdot \nabla h^{calc})] dx dy = - \int_R T \cdot \nabla h^{calc} \cdot \nabla \lambda dx dy + \int_B \lambda T \cdot \nabla h^{calc} \cdot ds \quad (2.20)$$

Sendo B a região que descreve as condições de contorno do problema. Considerando o problema sujeito a uma condição do primeiro tipo: $h = h_1$ numa região B_1 , e uma condição do segundo tipo: $-T \cdot \nabla h \eta = q_1$ numa região B_2 e substituindo a equação 2.20 em 2.19, tem-se:

$$L = \int_R [(\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs})^2 - T \cdot \nabla h^{calc} \cdot \nabla \lambda + \lambda q] dx dy + \int_B \lambda T \cdot \nabla h^{calc} \cdot ds \quad (2.21)$$

Aplicando pequenas perturbações δT na transmissividade utilizando cálculo variacional para derivar a função 2.21, e considerando $\delta \nabla h^{calc}$ e δL as variações de primeira ordem de ∇h^{calc} e L , respectivamente, tem-se:

$$\delta L = \int_R \left\{ 2\delta \nabla h^{calc} \cdot [\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs}] - \delta T \cdot \nabla h^{calc} \nabla \lambda - T \delta \nabla h^{calc} \cdot \nabla \lambda \right\} dx dy + \int_{B_1} \lambda \delta T \cdot \nabla h^{calc} \cdot ds \quad (2.22)$$

Vale notar que o último termo é integrado apenas em B_1 pois a expressão $\delta(T \cdot \nabla h^{calc})$ é zero em B_2 . Para eliminar os termos $\delta \nabla h^{calc}$, a função λ pode ser definida de forma que:

$$\nabla \lambda = \frac{2}{T} (\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs}) \quad (2.23)$$

É válida para todo o domínio R e de sorte que $\lambda = 0$ em B_1 . Substituindo na equação 2.22:

$$\delta L = - \int_R \frac{2}{T} \nabla h^{calc} \cdot (\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs}) \cdot \delta T dx dy \quad (2.24)$$

Aplicando a equação 2.24 em todos os subdomínios discretos de R em que a transmissividade varia, a função δL pode ser escrita como o somatório:

$$\delta L = - \sum_1^N \int_{r_i} \frac{2}{T_i} \nabla h_i^{calc} \cdot (\nabla h_i^{calc} - \nabla h_i^{obs}) \cdot \delta T_i dx dy \quad (2.25)$$

Onde: r_i = Pequeno subdomínio em R ;

T_i = Transmissividade média no subdomínio r_i ;

N = Número de subdomínios de R .

O problema de otimização, a partir deste ponto se resume a encontrar o mínimo da função L . Isto é feito derivando a função com relação ao parâmetro que se deseja calibrar. Neste caso, interessam as derivadas parciais em relação aos N valores de transmissividade do domínio:

$$\frac{\partial L}{\partial T_j} = - \frac{2}{T_j} \int_{r_j} (\nabla h_j^{calc} - \nabla h_j^{obs}) \cdot \nabla h_j^{calc} dx dy \quad (2.26)$$

2.3.1.2 Função Objetivo em Aquífero Não Confinado

Utilizando a equação 2.9 para desenvolver a equação em aquífero não confinado (equação 2.27), considera-se $T = Kb$, onde a espessura b do aquífero é igual a carga hidráulica h no ponto analisado, tomando como referência o fundo da camada do aquífero. A expressão então fica:

$$\nabla \cdot (Kh \nabla h) = q \quad (2.27)$$

Para desenvolver a função lagrangeana da equação 2.17, sujeita à equação governante do fluxo não confinado como estabelecido na equação 2.27, é necessário eliminar a não linearidade da equação governante. Para isto, faz-se $\phi = \frac{1}{2}h^2$, que substituindo na equação 2.27 fornece:

$$\nabla (K \nabla \phi) = q \quad (2.28)$$

Resolvendo de forma análoga ao caso confinado, substituindo apenas a equação governante do fluxo, a função objetivo para o caso não confinado toma a seguinte forma:

$$\frac{\partial L}{\partial K_j} = -\frac{1}{2K_j} \int_{r_j} [(\nabla h_j^{calc})^2 - (\nabla h_j^{obs})^2] \cdot (\nabla h_j^{calc})^2 dx dy \quad (2.29)$$

2.3.1.3 Procedimento Numérico

O procedimento numérico da calibração dos parâmetros pelo MIGH consiste em expressar a equação 2.29 em diferenças finitas com a dimensão de cada célula e realizar um processo iterativo que tem início com a estimativa inicial do parâmetro hidrodinâmico e, após cada iteração, o valor do parâmetro é ajustado até que os critérios de convergência sejam atingidos (TAVARES, 2010).

Para o ajuste da condutividade hidráulica nas iterações do MIGH, Guo e Zhang (2000) propuseram a seguinte expressão:

$$K_i^{j+1} = K_i^j - \lambda \left(\frac{\partial L}{\partial K_i} \right)^j \quad (2.30)$$

Sem conhecimento do desenvolvimento do trabalho de Guo e Zhang (2000), e defendendo que o método dos mínimos quadrados produz resultados insatisfatórios quando se desconhece o zoneamento do campo de distribuição da condutividade hidráulica, Schuster e Araujo (2004) propuseram a equação 2.31 a seguir:

$$K_i^{j+1} = K_i^j \cdot \frac{|\nabla h_i^j{}^{calc}|}{|\nabla h_i^j{}^{obs}|} \quad (2.31)$$

Onde: K Condutividade Hidráulica;

λ Fator de comprimento da iteração;

i Índice da célula;

j Índice da iteração;

2.4 Linguagem JAVA

Em 1991 a *Sun Microsystems* fundou um projeto corporativo interno de codinome *Green*, o que resultaria na criação de uma linguagem baseada em *C++* que o projetista James

Gosling chamaria de *Oak*. Foi posteriormente descoberto que já havia uma linguagem computacional com este nome. O nome *Java* foi sugerido quando um grupo de pesquisadores da *Sun* visitou um café local em homenagem ao café originário da ilha (DEITEL; DEITEL, 2007).

A linguagem *Java* foi lançada em 1995. Embora muitas de suas funções fossem ainda primitivas em relação ao C++ (e ao *Java* atual), os programas em *Java* (*applets*) poderiam rodar como parte de páginas web no *browser* Netscape Navigator (CADENHEAD; LEMAY, 2007).

Java é orientada à objetos que se assemelha à seu predecessor C++, excluindo alguns recursos que seus criadores não consideravam absolutamente necessários. Alguns exemplos de recursos não utilizados em *Java*: sobrecarga de operadores, heranças múltiplas e aritmética de ponteiros.

Programação Orientada a Objetos

A Programação Orientada a Objetos (POO) permite a organização dos códigos em objetos, os quais são portadores de um conjunto de informações e responsáveis por uma série de operações. Este tipo de organização auxilia na resolução de problemas complexos, tornando os problemas mais claros pois se tornam mais próximos do problema real que um simples conjunto de rotinas. Os programas desenvolvidos nesta filosofia têm alto potencial de reaproveitamento, visto que os objetos já estão definidos e não precisam de uma reescrita do código.

Uma linguagem orientada à objetos tem por características segundo Wegner (1990) *apud* (ALENCAR, 2008, p 202):

- Ser baseada em objetos (encapsulamento de dados);
- Ser baseada em classes (cada objeto pertence a uma classe);
- Permite herança (organização de hierarquias em superclasses e subclasses).

Outras características da linguagem Java

Em *Java*, cada classe contém um conjunto de métodos que estabelecem o comportamento do objeto. Não há heranças múltiplas, logo, uma classe só poderá herdar o comportamento de uma superclasse. No topo da hierarquia de classes encontra-se a classe *Object*. Com exceção dos tipos primitivos, todos os elementos da linguagem são *Object*'s. Para estes tipos, existe uma classe *Object* equivalente para trata-lo como objeto quando necessário como por exemplo para o tipo primitivo *int* que representa valores inteiros tem-se o objeto equivalente *Integer*.

Embora não haja a possibilidade de heranças múltiplas, é possível criar classes abstratas que estabelecem os métodos existentes na classe mas que podem ou não implementá-los. De forma semelhante, as interfaces possuem apenas a definição dos métodos sem a implementação de nenhum deles. As classes abstratas são utilizadas como superclasses para outras que possuem os mesmos métodos, mas que operam e os implementam de forma diferente. As classes podem, no entanto, importar múltiplas interfaces, o que permite trabalhar de forma semelhante as heranças múltiplas sem suas desvantagens.

O *Java* também conta com um sistema de coleta de lixo (*garbage collection*) que varre periodicamente a memória, liberando espaços não utilizados. Este sistema associado com a ausência de aritmética de ponteiros faz com que o desenvolvedor praticamente não precise se preocupar com o gerenciamento de memória.

Outras duas funções existentes que merecem destaque são o tratamento de exceções (*Exception Handling*) e a programação multitarefa (*Multi-Threading*). O *Exception Handling* permite que o desenvolvedor controle como se deve proceder quando durante a execução de um código, houver um acesso inadequado de informação. O suporte *Multi-Thread* permite que múltiplas linhas de código sejam executadas simultaneamente quando há mais de um processador e o sistema operacional permitir.

Ambiente Integrado de Desenvolvimento

O Ambiente Integrado de Desenvolvimento - IDE (*Integrated Development Environment*) é um aplicativo que oferece um conjunto de recursos e ferramentas auxiliares para o desenvolvimento de códigos em uma linguagem computacional. Minimamente, uma IDE possui os recursos:

- Editor de Texto: Espaço para redigir os códigos na linguagem em que se desenvolve o *software*.
- Compilador: Ferramenta responsável por traduzir o código fonte para uma linguagem de mais baixo nível para que a máquina seja capaz de executá-lo.
- Depurador: Dispositivo que localiza e auxilia na correção de erros no código.

Atendendo a essas descrições, e escrito em *Java* com código aberto, a IDE Eclipse pode ser utilizada para desenvolver códigos em *Java*, *C*, *C++*, *COBOL*, *Python*, *Perl*, *PHP* entre outras. Distribuído sob a licença da Eclipse Public License, este pode ser estendido para trabalhar com aplicações de rede, sistemas de gerenciamento de bancos de dados, aplicações móveis, Web Services, dentre outras opções devido aos inúmeros *plug-ins* existentes. Com

a exceção do seu pequeno *kernel*, tudo no Eclipse é um *plug-in* ou um conjunto de *plug-ins*, isso o torna totalmente extensível, pois novas funcionalidades podem ser facilmente adicionadas (GALLARDO; BURNETTE; MCGOVERN, 2003).

Ant

O *Ant* é uma ferramenta de código aberto, desenvolvido em *Java* e mantido pela Apache Software Foundation para auxiliar na automatização do processo de construção de aplicativos. Desenvolvido por James Duncan Davidson no projeto *Tomcat* para compilar seu projeto em diversas plataformas é atualmente uma das ferramentas mais utilizadas para a construção de aplicativos em *Java* (LOUGHRAN; HATCHER, 2007).

O *Ant* utiliza arquivos XML chamados *build* que descrevem como o projeto deve ser construído, sendo, neste arquivo, declaradas todas as tarefas a serem executadas no processo. Com o *Ant* é possível acelerar o desenvolvimento na execução de tarefas automatizadas como construção do projeto, implantação, execução de programas *Java*, criação do banco de dados, execução de testes, dentre outros.

2.5 Sistemas de Informações Geográficas

Estudos relacionados aos recursos e fenômenos naturais, usualmente, exigem o estudo e a manipulação de uma grande quantidade de dados. A capacidade de agrupar estes dados e de examiná-los temporal e espacialmente fornece uma perspectiva crucial no processo de tomada de decisão em problemas sociais e ambientais.

Acompanhando o avanço tecnológico computacional e o aumento na necessidade por dados espaciais, surgem ferramentas computacionais responsáveis pela gestão destes dados, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) - *Geographic Information System* (GIS).

Da forma mais abrangente possível, Sistemas de Informações Geográficas são ferramentas que permitem o processamento de dados espaciais em informação, informação essa geralmente, explicitamente associada, e usada para tomar decisões sobre, alguma porção da superfície terrestre (DEMERS, 1997).

Um SIG é constituído pelos seguintes componentes (FITZ, 2008, p. 79):

- *hardware*, isto é, a plataforma computacional utilizada;
- *software*, ou seja, os programas, módulos e sistemas vinculados;
- *dados*, a saber, os registros de informação resultantes de uma investigação; e

- *peopleware*, ou seja, os profissionais e/ou usuários envolvidos

Estas definições imprecisas e de difícil compreensão são reflexos da vasta quantidade de conceitos e tecnologias que se agregam em um *SIG* bem como da variedade de formas que pode ser utilizado. A respeito das definições de *SIG*, Camara et al. (1996, p. 22) estabelece que:

Cada tipo de definição prioriza um aspecto distinto. O enfoque de *banco de dados* define *SIG* como um *SGBD*¹ não convencional, geográfico, que garante o gerenciamento de dados geográficos. A abordagem “*toolbox*” considera *SIG* como sendo um conjunto de ferramentas e algoritmos para manipulação de dados geográficos, tal como a produção de mapas. O enfoque *orientado a processos* utiliza o fato de que *SIG*'s são coleções de subsistemas integrados, onde dados espaciais passam por uma sequência de processos de conversão-coleta, armazenamento e manipulação. Finalmente, diferentes definições priorizam a *aplicação*, caracterizando o sistema segundo o tipo de dado manuseado, ou a *utilização*, tais como sistemas espaciais para apoio à tomada de decisões ou sistemas para análise de dados geográficos.

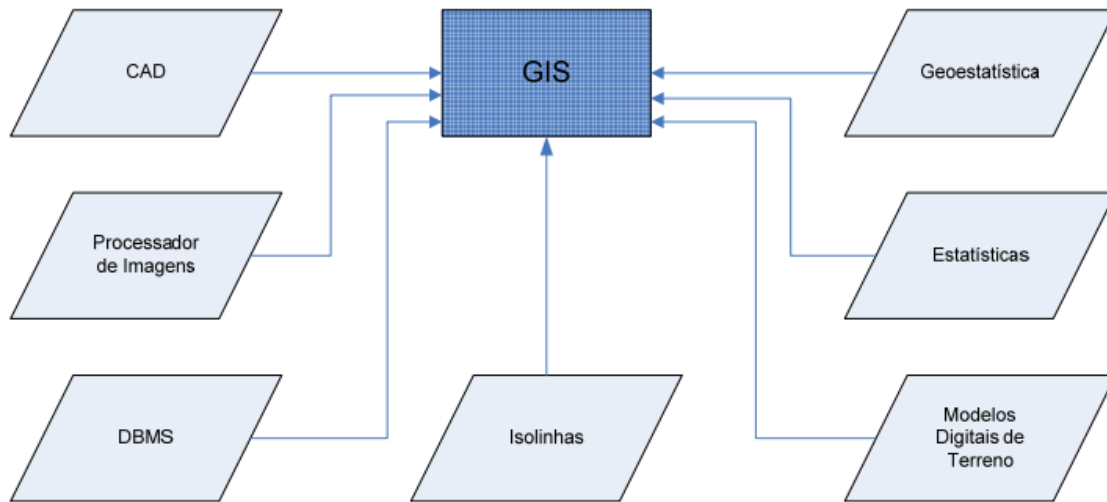
Devido a essa complexidade conceitual, neste contexto, algumas tecnologias são, por vezes confundidas. Alguns conceitos que se misturam comumente com o *SIG* são os de *Computer Assisted Cartography (CAC)* e *Computer Aided Design (CAD)*. Os *CAC* são sistemas computacionais desenvolvidos para criar mapas de objetos gráficos com atributos que os descrevem. Estes não possuem, no entanto, ferramentas de análise dos dados expostos. Já os sistemas *CAD* são voltados para o desenvolvimento de desenhos, não sendo recomendado para a produção de mapas, tampouco para a análise de dados geográficos.

Outro conceito notório no mesmo contexto é o de Sistema de Gerenciamento de Bancos de Dados (*DBMS - Data Base Management System*). Este pode ser estabelecido como uma aplicação computacional responsável pela interação entre usuários, outros programas e um banco de dados para captura e análise de informações. De acordo com Goodchild (1985 apud COWEN, 1988), "Um *SIG* é melhor definido como um sistema que utiliza um banco de dados espaciais para prover respostas à buscas de natureza geográficas". As definições e relações entre os conceitos de *SIG*, *CAD* e *DBMS* podem ser encontradas no trabalho de Cowen (1988).

De fato, considerando a quantidade e a variedade de tipos dos dados que são trabalhados nos *SIG*, é comum (e esperado) que este disponha de uma série de ferramentas para trabalhar com tecnologias *CAD*, *CAC*, *DBMS* e ainda outras não mencionadas como modelos digitais de terreno (*DTM - Digital Terrain Model*), Geoestatística e Processamento de Imagens. A figura 3 mostra como alguns subsistemas e ferramentas se relacionam com o *SIG*.

¹ *SGBD* - Sistema de Gerenciamento de Bancos de Dados

Figura 3: Subsistemas e ferramentas relacionados ao SIG



Fonte: Alencar (2008, p. 220)

O gvSIG

O projeto do gvSIG teve início em 2002 quando o Ministério Regional de Infraestrutura e Transportes (CIT - *Conselleria d'Infraestructures i Transports*) da cidade de Valência, na Espanha, decidiu migrar todo o seu sistema de organização computacional para um sistema livre (código aberto). Ao avaliar as opções em SIG utilizadas pelo CIT, foi concluído que não havia alternativa desenvolvida em código aberto para este tipo de tecnologia, sendo a maioria dos programas oriundos das empresas ESRI e Autodesk. Haviam, no entanto, diversos projetos em desenvolvimento sob licença livre que poderiam ser utilizados no desenvolvimento de um SIG livre com grandes chances de sucesso (ANGUIX; DIAZ, 2008).

Desenvolvido pelas instituições espanholas *Generalitat Valenciana* e *Iber Tecnologias de la Información S.A.*, e contando com diversos colaboradores e co-financiadores, o gvSIG foi lançado formalmente em 2005. É caracterizado como *software livre* e é distribuído sob a licença GNU GPL (*General Public License*) (REOLON, 2008).

Por se tratar de um software livre, independente de plataforma (roda em diferentes sistemas operacionais) e compatível com JAVA e C++, o gvSIG têm se tornado uma alternativa bastante aceita pelos profissionais da área de geotecnologias. A possibilidade de desenvolvimento de ferramentas dentro do programa a partir das bibliotecas disponíveis e do código fonte o tornam particularmente atrativo no meio acadêmico.

Diversas bibliotecas e bancos de dados geoespaciais têm sido utilizados nos projetos do gvSIG. Uma ferramenta particularmente importante que foi incorporada ao gvSIG é o con-

junto de *plug-ins* da SEXTANTE (disponível em <http://www.sextantegis.com/>). Estes *plug-ins* fornecem poderosas ferramentas de edição e análise de dados espaciais em formato vetorial ou raster. Ferramentas de análises estatísticas, correlação de dados agrupados (*nearest neighbors*, *kriging*, *IDW*, etc), triangulação de Delaunay, tesselação de Voronoi (polígonos de Thiessen) entre outras muitas ferramentas encontram-se disponíveis na SEXTANTE para o gvSIG.

3 Metodologia

O sistema UFC Flow foi desenvolvido em linguagem JAVA utilizando a IDE Eclipse. Foi utilizada a versão JAVA SDK 8 para o desenvolvimento dos plugins para o software gvSIG 1.12. Como houve uma mudança grande na forma de desenvolvimento dos plugins entre as versões do gvSIG 1.12 e 2.0, optou-se por manter a versão antiga, versão na qual já existiam algumas rotinas desenvolvidas para o sistema UFC.

A preparação do workspace para a integração dos plugins do sistema UFC com o gvSIG foi feita utilizando o banco de dados do repositório Subversion que foi integrado ao Eclipse com o *plug-in* Subclipse. A partir deste banco, é possível baixar diversos projetos do repositório gvSIG com diferentes funcionalidades. Para o workspace do UFC Flow, foram utilizados os seguintes projetos gvSIG: **_fwAndami**, **apppvSIG**, **libExceptions**, **libFMap**, **libProjection**

Onde os dois primeiros projetos são responsáveis pelo controle dos *plug-ins* e interfaces gráficas básicas do gvSIG. A partir destas que é possível controlar a classe `PluginServices` que possui os dados do `MainFrame` do gvSIG. O terceiro projeto possui as classes para tratamento de erros e exceções do gvSIG. O quarto projeto permite o controle da maior parte das funcionalidades do gvSIG que foram utilizadas no projeto, como controle de mapas, layers, drivers, tabelas e shapes. O último foi utilizado para controlar as projeções utilizadas nos mapas.

A construção do workspace UFC Flow e integração deste com o gvSIG foi feita por meio de um processo *Ant* pelo arquivo (*build.xml*) que é responsável pela extração das classes, bibliotecas e arquivos base do workspace para a pasta do gvSIG 1.12. O Código 3.1, a seguir, apresenta um arquivo de configuração ANT Build básico para o UFC Flow

Código 3.1: Arquivo de construção ANT *build.xml*

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<project name="Generar extension en Andami" default="generate-without-source" basedir=
  ".">
  <description>
    Instala o plugin no gvSIG.
  </description>
  <property name="src" location="src"/>
  <property name="build" location="bin"/>
  <property name="dist" location="dist"/>
  <property name="plugin" value="com.iver.cit.gvsig.UFC_FLOW"/>
  <property name="extension-dir" location="C:\Program Files (x86)\gvSIG desktop 1.12.0\
    gvSIG\extensiones"/>

  <target name="init">
    <tstamp/>
    <mkdir dir="${build}"/>
    <mkdir dir="${dist}"/>
    <buildnumber/>
  </target>
  <target name="generate-without-source" description="generate the distribution without
    the source file" >
    <mkdir dir="${dist}"/>
    <jar jarfile="${dist}/${plugin}.jar" basedir="${build}"/>
    <copy file="config/config.xml" todir="${dist}"/>
    <copy todir="${dist}">
      <fileset dir="." includes="text*.properties"/>
    </copy>
    <copy todir="${dist}/images">
      <fileset dir="images/" includes="*/"/>
    </copy>
    <copy todir="${dist}/data">
      <fileset dir="data/" includes="*/"/>
    </copy>
    <copy todir="${dist}">
      <fileset dir="lib/" includes="*/"/>
    </copy>
    <move todir="${extension-dir}/${plugin}"/>
      <fileset dir="${dist}" includes="**/**"/>
    </move>
  </target>
</project>

```

A inicialização das extensões do UFC Flow no gvSIG é feita a partir da leitura de um arquivo *.xml* que é definido no *ANT build.xml*. O arquivo *config.xml* estabelece as relações

das classes definidas no workspace, com as listas de extensões disponíveis no *PluginServices* do gvSIG.

Com as classes construídas e carregadas no gvSIG, o Sistema UFC passa a funcionar como uma barra de ferramentas interna do programa. As funcionalidades ficam associadas aos botões da barra que ativam as classes de extensões como foram configuradas no arquivo XML *config.xml*. Um exemplo de código de configuração em *xml* com uma extensão é mostrado a seguir no código 3.2:

Código 3.2: Arquivo de configuração das extensões: *config.xml*

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<plugin-config>
<depends plugin-name="com.iver.cit.gvsig" />
<resourceBundle name="text"/>
<libraries library-dir="."/>
<extensions>
<extension
  class-name="com.iver.cit.gvsig.flow.extensions.ExtensionMalha"
  description = "Nova malha"
  active = "true" >
  <tool-bar name = "Flow">
    <action-tool
      icon = "images/default.png"
      action-command = "NovaMalha"
      tooltip = "Criar nova malha de fluxo subterraneo"
      position = "1" />
    </tool-bar>
  </extension>
</extensions>
</plugin-config>
```

3.1 Classes Base do Sistema

A seguir, serão explicados os principais tipos de classes que foram utilizados para o desenvolvimento do UFC Flow dentro do gvSIG. Fora os tipos que serão mencionados aqui, também foi desenvolvido uma biblioteca em formato Java *.jar* para a criação dos arquivos do MODFLOW e execução do sistema, incluindo uma GUI separada que permite a criação da malha sem a utilização do gvSIG. As funções do UFC Flow utilizam esta biblioteca para a geração dos mesmos arquivos. Seguem os tipos de classes:

Extensões

As extensões são as classes que configuram os botões da barra de ferramentas do UFC Flow no gvSIG. Estas ferramentas são chamadas pelo programa a partir do arquivo *config.xml* e devem estender a classe *Extension* do Andami Plugin. Consistem basicamente de quatro métodos: *initialize*, *execute*, *isVisible* e *isEnabled* que configuram, respectivamente, o código que é executado na abertura do gvSIG; o código que é executado quando o botão é pressionado; quando o botão deve ser visível nas barras de ferramentas; e quando o botão está disponível e passível de ser utilizado.

Guias de Interface Gráficas

As GUI's (Guias de Interface Gráficas) são classes que apresentam o contato do usuário com o programa. O gvSIG possui uma interface específica para classes GUI's internamente, a *IWindow*. A interface deve ser implementada estendendo uma classe *container* do *javawing* como *JPanel* ou *JFrame*. Esta interface contém somente dois métodos: *getWindowInfo* que retorna um objeto da classe *WindowInfo* com informações de inicialização da janela e *getWindowProfile* que retorna o próprio objeto. As janelas são chamadas internamente no gvSIG com o auxílio da classe *PluginServices* com o gerenciador MDI.

Gerenciadores de Camadas

Os gerenciadores de camadas trabalham criando e configurando as layers e os drivers do gvSIG. Basicamente, as classes deste tipo possuem um ou mais objetos do tipo *FLyrVect* e a mesma quantidade de *ConcreteMemoryDriver* em conjunto com métodos para instanciar os drivers, criar os shapes, criar as tabelas de atributos e configurar as layers. Em algumas classes desse tipo, há também métodos para ler os dados das tabelas de conteúdo e criar objetos do sistema UFC Flow a partir destes dados.

Ouvintes de Mapa

Os ouvintes de mapa resumem-se às ferramentas de controle de cliques e botões de teclado. São assim chamados por que esperam a ação do usuário e executam um código após receber esta ação. Um exemplo claro disto é a ferramenta para a criação de camadas que controla o ponto onde será inserida a camada, a ferramenta espera o clique do usuário e chama a janela de criação de camada. Estes ouvintes de mapa devem implementar a interface *ToolListener* ou uma de suas interfaces implementadas. Em conjunto com o *listener*, deve ser criado um objeto que implementa a interface *IBehavior* que passa o comportamento ao *listener*.

3.2 MODFLOW

Para a execução do MODFLOW, vários arquivos devem ser criados em formato de texto e lidos a partir do executável base do programa. O sistema UFC Flow deve automatizar a criação destes arquivos a partir do modelo da malha que será gerada no gvSIG. Para a simulação do problema de águas subterrâneas os tipos de arquivos utilizados são:

Basic

Os arquivos do tipo **Basic** (*.bas*) controlam as condições de contorno fixas das células, as cargas hidráulicas nos pontos de contorno e carga inicial. É neste arquivo que são definidas as células ativas, inativas e de carga constante para malha. Este arquivo é obrigatório em qualquer simulação no MODFLOW.

Discretization

O arquivo **Discretization** (*.dis*) também é um arquivo obrigatório e controla as condições geométricas da malha, bem como as configurações de tempo de simulação, períodos de estresse e tamanho dos intervalos nos passos da simulação. Contém os números de linhas, colunas e camadas, assim como as dimensões de cada linha e cada coluna e elevações do topo da malha e do fundo de cada camada.

Ground Water Flow

Os arquivos do tipo **Ground Water Flow** controlam as condições de fluxo entre células da malha. Um único arquivo deste tipo deve ser obrigatoriamente utilizado na simulação. Para o UFC Flow, apenas o *package* **Block Centered Flow** *.bcf* foi implementado. Os dados que são armazenados neste arquivo são informações do aquífero como: condutividade hidráulica, transmissividade, armazenamento específico, coeficiente de anisotropia entre linhas e colunas.

Solver

O arquivo do **Solver** é responsável pelo condicionamento matricial e resolução dos sistemas de equações. Existe mais de um tipo de solver no MODFLOW, mas apenas o *package* **Preconditioned Conjugate-Gradient** *.pcg* foi implementado para o sistema UFC Flow. Este arquivo controla o tipo de condicionamento matricial que será utilizado na simulação (Cholesky

ou Polinomial), o número máximo de iterações e o critério de convergência em termos dos resíduos de fluxo e carga.

Boundary Condition

Os arquivos **Boundary Condition** estabelecem condições de contorno específicas do problema de fluxo de águas subterrâneas. Esses contornos podem ser de carga hidráulica (contorno de primeiro tipo ou de Dirichlet), de fluxo (contorno de segundo tipo ou de Neumann) e de fluxo em função da carga (contorno misto ou de Robin). Para aplicar a metodologia do MIGH, será implementado apenas o caso específico para condição de contorno de fluxo constante, que simulará um poço bombeando. Para tal, foi implementado o *package Well .wel*.

Outros Arquivos

Além dos arquivos explicitados nesta seção, foi implementado o arquivo **Output-Control .oc** para controlar os arquivos que serão salvos após a simulação e seu formato de saída. Existem outros packages opcionais para o MODFLOW que não foram utilizados no UFC Flow como: **Multiplier** que calculam os dados das camadas a partir de outros parâmetros; **Zone** que define zonas no aquífero cujas células se relacionam com um parâmetro específico; **Subsidence**, como o nome sugere, é utilizado para analisar a subsidência em aquíferos.

3.3 HidroGeologicModel

O projeto **HidroGeologicModel** foi criado para diminuir o trabalho necessário para reaplicar o UFC Flow, sem a necessidade do gvSIG. Este projeto contém todos os modelos de águas subterrâneas desenvolvidos para o projeto UFC Flow, malhas de aquífero modelados para diferenças finitas, modelo dos tempos de estresse na simulação, poços de bombeamento e pontos de observação.

Mesh Package

O *package .mesh* contém as classes modelos para o sistema UFC Flow. O modelo base do aquífero foi estabelecido com a classe **MalhaAquifero**. Esta classe contém, basicamente, dados geométricos da malha (alturas das linhas e largura das colunas), elevação do topo do sistema em cada célula, poços de bombeamento, postos de observação e as camadas propriamente ditas (classe **MalhaCamada**).

A classe **MalhaCamada** por sua vez, contém todos os demais parâmetros dentro da camada. Dados como tipo de contorno das células, modelo da camada (confinada ou livre por exemplo) e fator de anisotropia da camada. Os parâmetros da camada possuem tamanho variável (a depender do número de parâmetros do modelo). Isto foi feito para deixar o modelo pronto para receber os dados do modelo para transporte de poluentes em meio poroso. Com o vetor de parâmetros variáveis, não será necessário criar um novo modelo de camada para introduzir o MT3D no sistema, apenas será utilizado um vetor maior.

A classe **Poco** foi feita para criar um modelo de poço para o aquífero que se assemelha ao package **Well** do MODFLOW, contendo basicamente as mesmas informações. Já a classe **Observacao** (nome sem caracteres especiais), apresenta um modelo novo que não tem relação com o MODFLOW. Os pontos estabelecidos como de observação, são pontos de controle da malha, com dados conhecidos (de elevação, carga ou outros parâmetros). São estes pontos que são utilizados na formulação do MIGH como cargas conhecidas. Estes pontos também serão utilizados no algoritmo de interpolação para calcular o valor de um parâmetro em células da malha a partir de valores conhecidos.

Math Package

Este package contém as classes que executam os processos de calibração da malha de fluxo subterrâneo. As classes geradas até então neste pacote são: **GradienteMalha**, **MeshGA**, **MeshMath** e **MIGH**. Todos os algoritmos de cálculo que independem da interface utilizada estarão localizados neste pacote.

GradienteMalha contém os métodos para o cálculo do gradiente de uma parâmetro nas direções x e y . Esta classe é utilizada pelo **MIGH** para calcular os gradientes nos modelos fixo e não fixo. Também esta classe será utilizada para desenhar os mapas de fluxo no sistema UFC Flow.

A classe **MeshMath** foi desenvolvida para armazenar métodos estáticos para cálculos de erros, resíduos e outros parâmetros utilizados pelo MIGH. Um exemplo de cálculo feito por esta classe é erro médio quadrático **RMSE** (*Root Mean Square Error*) que compara um vetor de resultados esperados e um vetor de resultados calculados. O **MeshGA** está sendo desenvolvido para preparar a calibração de parâmetros hidrogeológicos a partir de algoritmos evolucionários. Esta última ferramenta ainda não foi implementada no UFC Flow.

3.4 Bibliotecas e outras API's

Além do **HidroGeologicModel** (*LAHC-HGM.jar*) que foi desenvolvido para o sistema UFC Flow, várias outras bibliotecas foram utilizadas para configurar o workspace do projeto. Entre estas, três foram puxadas diretamente dos projetos do gvSIG: *iver-utiles.jar*, *driver-manager-1.1.jar* e *gdbms-0.8-SNAPSHOT.jar*.

Ainda foram utilizadas duas bibliotecas do projeto **JFreeChart** para controle e desenho de imagens, gráficos, planilhas e algumas configurações de GUI's. Estas bibliotecas foram: *jcommon-1.0.17.jar* e *JFreeChart_1.14.jar*.

Para controlar e criar scripts de imagens no formato SVG, foi utilizada a biblioteca **batik** da **The Apache™**. Para construir curvas de nível, modelos 3D e outros gráficos foi utilizado o software **GNUPlot** através da biblioteca **JavaPlot**.

3.5 Layers do Sistema

O gvSIG funciona de forma similar a outros programas **SIG**, trabalhando com elementos dispostos em camadas e representados por pontos, linhas ou polígonos. O gvSIG também trabalha com imagens *raster* mas nenhuma deste tipo é utilizada no sistema UFC Flow. Cada uma das camadas vetoriais é representada pela classe **FLyrVect** e as formas geométricas são representadas pela interface **FShape**.

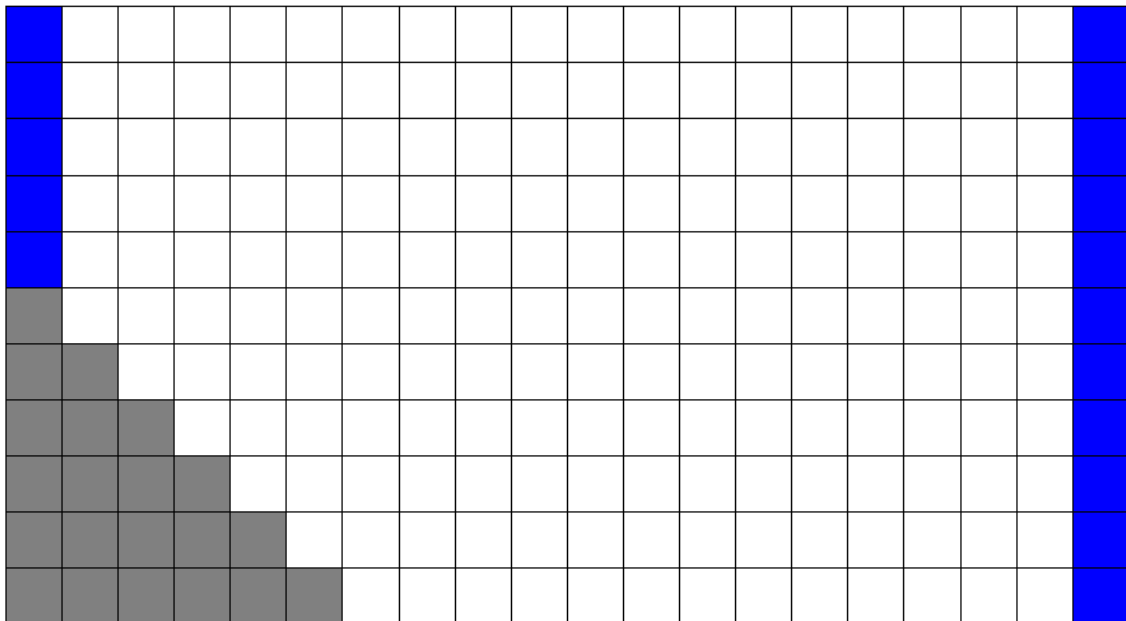
A cada uma das camadas também é associada uma tabela de conteúdo, contendo as informações de cada objeto dentro desta. Os dados da tabela e as formas geométricas são guardados em um driver representado pela classe **ConcreteMemoryDriver** que determina as informações desta tabela, bem como o tipo de forma (**FShape**) da camada (Polilinhas, Pontos ou Polígonos).

Layers da Malha

Para a malha que representa o modelo do aquífero em diferenças finitas é utilizada uma *Layer* por camada do aquífero. As *Layers* são configuradas para colorir as células baseado no atributo contido na tabela, na coluna "Contorno" da seguinte forma:

- Ativa - Células com fluxo e carga a serem calculados na malha;
- Constante - Células de carga hidráulica conhecida (Contorno do primeiro tipo);
- Inativa - Células sem fluxo na malha.

Figura 4: *Layer* vetorial representando a malha do modelo



Fonte: O Autor.

Réplica do modelo proposto por Tavares (2010).

Figura 5: *Table of Contents* da *Layer* na figura 4

Tabela: Tabela de atributos: Malha Camada 1																	
Linha	Coluna	X	Y	Largura	Altura	Contorno	Elevação de...	Elevação de...	Carga Hidrá...	Condutvida...	Condutvida...	Transmissivi...	Capacidade ...	Porosidade ...	Armazenam...	Retenção E...	
1	1	392.796084...	121.993474...	100.0	100.0	Constante	10.0	9.0	11	0	0	0	0	0	0	0	
1	2	492.796084...	121.993474...	100.0	100.0	Ativa	10.0	9.0	10	0	0	0	0	0	0	0	
1	3	592.796084...	121.993474...	100.0	100.0	Ativa	10.0	9.0	10	0	0	0	0	0	0	0	
1	4	692.796084...	121.993474...	100.0	100.0	Ativa	10.0	9.0	10	0	0	0	0	0	0	0	
1	5	792.796084...	121.993474...	100.0	100.0	Ativa	10.0	9.0	10	0	0	0	0	0	0	0	
1	6	892.796084...	121.993474...	100.0	100.0	Ativa	10.0	9.0	10	0	0	0	0	0	0	0	
1	7	992.796084...	121.993474...	100.0	100.0	Ativa	10.0	9.0	10	0	0	0	0	0	0	0	
1	8	1092.79608...	121.993474...	100.0	100.0	Ativa	10.0	9.0	10	0	0	0	0	0	0	0	
1	9	1192.79608...	121.993474...	100.0	100.0	Ativa	10.0	9.0	10	0	0	0	0	0	0	0	
1	10	1292.79608...	121.993474...	100.0	100.0	Ativa	10.0	9.0	10	0	0	0	0	0	0	0	
1	11	1392.79608...	121.993474...	100.0	100.0	Ativa	10.0	9.0	10	0	0	0	0	0	0	0	

Fonte: O Autor

Layers Condições de contorno específicas

Os objetos modelados para representar condições de contorno de carga constante (Poço de observação), fluxo constante (Poço de bombeamento) e fluxo em função da carga hidráulica (Rio), são apresentados em uma **FLyrVect** e suas formas são poligonais. Funcionam de forma similar às camadas da malha, sendo cada uma configurada com uma cor específica.

As seguintes condições de contorno específicas foram modeladas no UFC Flow.

Poço de Observação - ■

Modelo criado para representar os poços que serão utilizados no MIGH como cargas constantes no modelo fixo. A partir destes poços, o processo de calibração MIGH cria duas

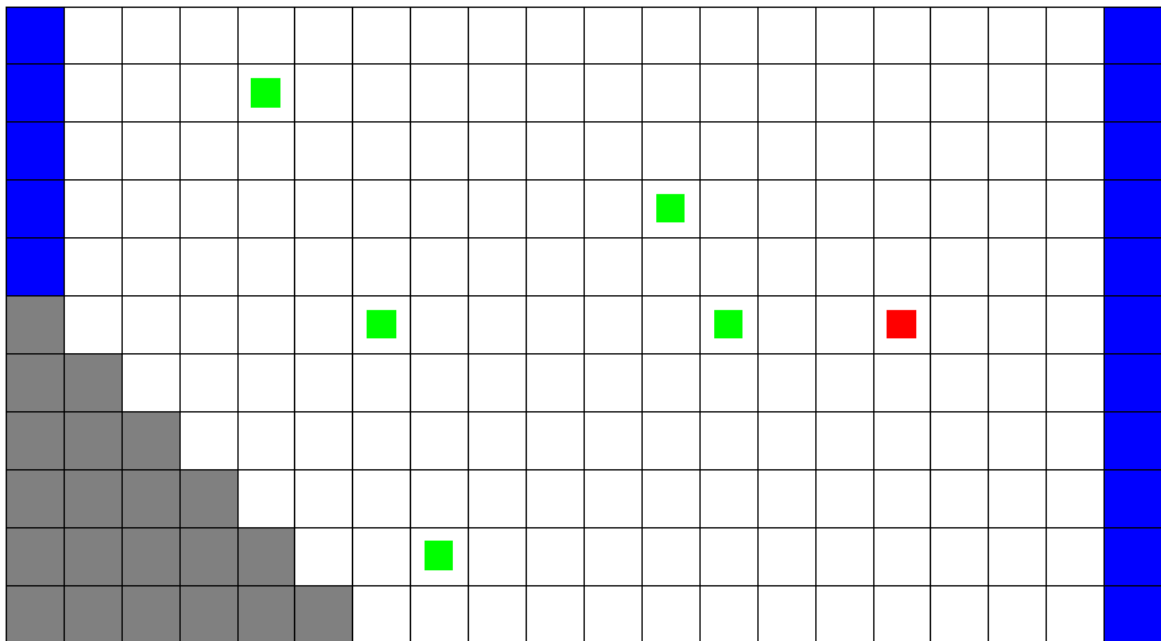
simulações distintas para cada mapa de condutividades: uma considerando o poço de observação como célula "Ativa" e outra considerando-a "Constante". Estas células serão utilizadas também pelo algoritmo de interpolação de dados. Este, utilizará os poços de observação como os pontos da triangulação gerada.

Poço de Bombeamento - ■

Modelo que representa o bombeamento para extração ou injeção de água no lençol subterrâneo. Pode também ser utilizado para simular recarga ou fluxo conhecido nas células. Possui apenas informações de posição do poço e vazão de bombeamento (L^3/T).

A figura 6 mostra o mapa do exemplo proposto por Tavares (2010) com o poço de bombeamento e os poços de observação.

Figura 6: Malha com poço de bombeamento (em vermelho) e poços de observação (em verde)



Fonte: O Autor
Réplica do modelo proposto por Tavares (2010).

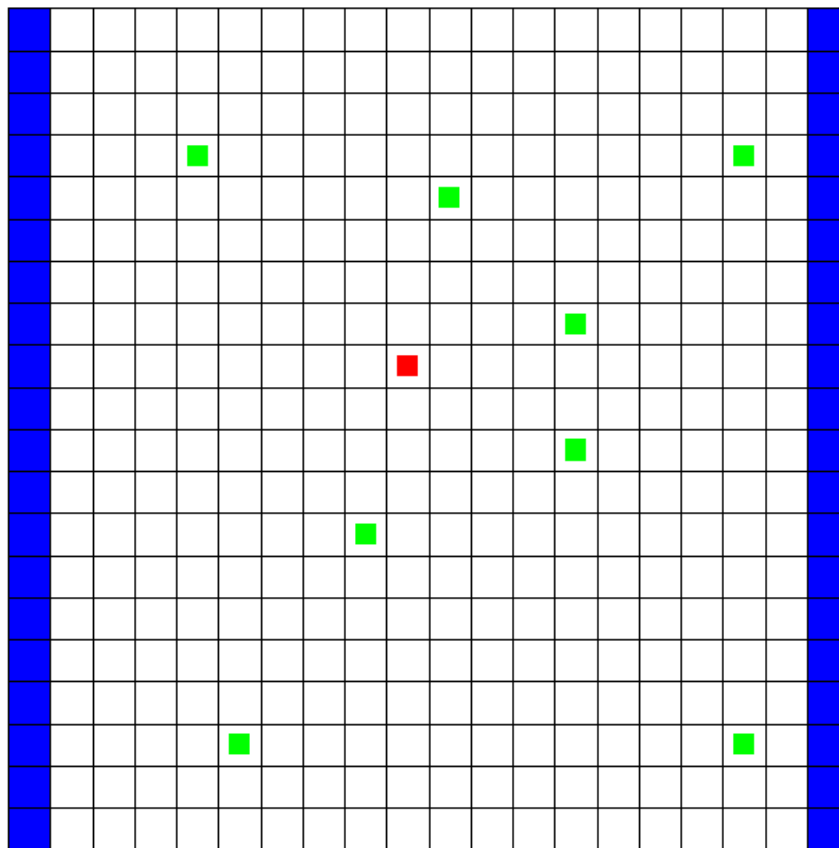
3.6 MIGH

O MIGH, como método de calibração, diferente da abordagem convencional, em vez de tentar minimizar a diferença entre cargas hidráulicas observadas e calculadas, o método minimiza o gradiente hidráulico nos mesmos. A algoritmo base do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico é baseado no algoritmo proposto por Tavares (2010). A expressão matemática utilizada para representar o método do gradiente hidráulico é a equação 2.31 proposta por Schuster e Araujo (2004).

Os modelos fixo e não fixo da calibração do MIGH que se estabelecem a partir dos poços de observação são duas representações do mesmo problema. Para estes modelos, há diferenciação apenas na condição de contorno. No modelo não fixo, os poços de observação são considerados como células ativas simples (com carga calculável) enquanto que no modelo fixo estas células são consideradas como condição de contorno do primeiro tipo (carga conhecida).

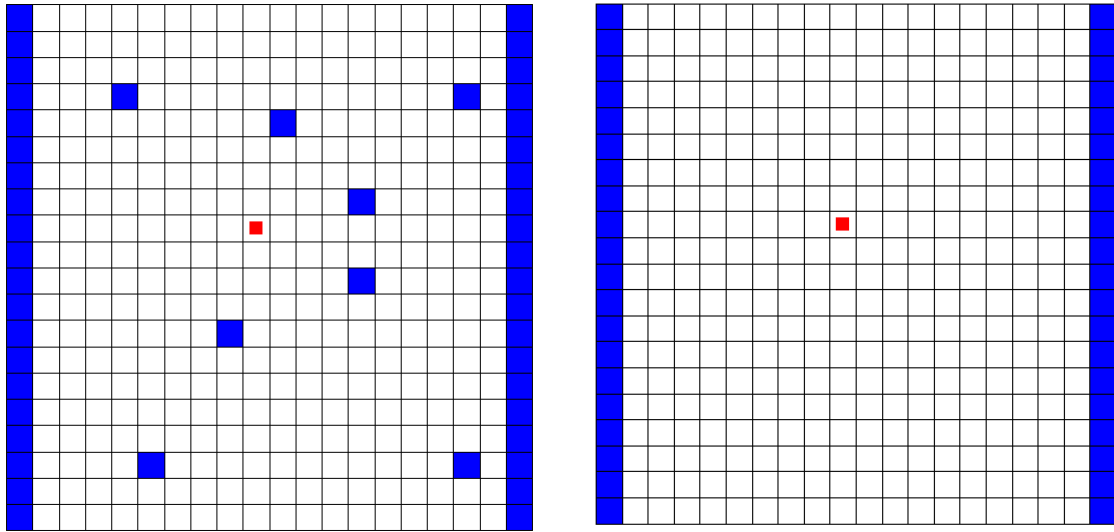
Analisando a malha que será utilizada na análise de sensibilidade do MIGH (mostrada na figura 7), pode-se separar este modelo em duas malhas distintas (para os modelos fixo e não fixo) como mostrado na figura 8.

Figura 7: Malha com Poços de Observação para teste de sensibilidade do modelo



Fonte: O Autor

Figura 8: Malhas do Modelo Fixo (esquerda) e Não Fixo (direita)



Fonte: O Autor

Para o primeiro caso, as células dos poços também são consideradas contorno (células em azul) do problema e não são calculadas. No segundo, as células são calculadas normalmente. O intuito do MIGH é portanto, aproximar os resultados destes dois modelos.

Erro e Convergência

A avaliação da convergência do MIGH para o sistema UFC Flow se dá a partir da análise das funções *RMSEH* (Root Mean Square Error of Heads), *RMSEG* (Root Mean Square Error of Gradients) e da Média dos Ângulos dos gradientes hidráulicos.

O erro médio quadrático das cargas (*RMSEH*) é calculado de acordo com a expressão 2.15 e de maneira similar o erro médio quadrático dos gradientes pode ser dado pela equação 3.1 a seguir.

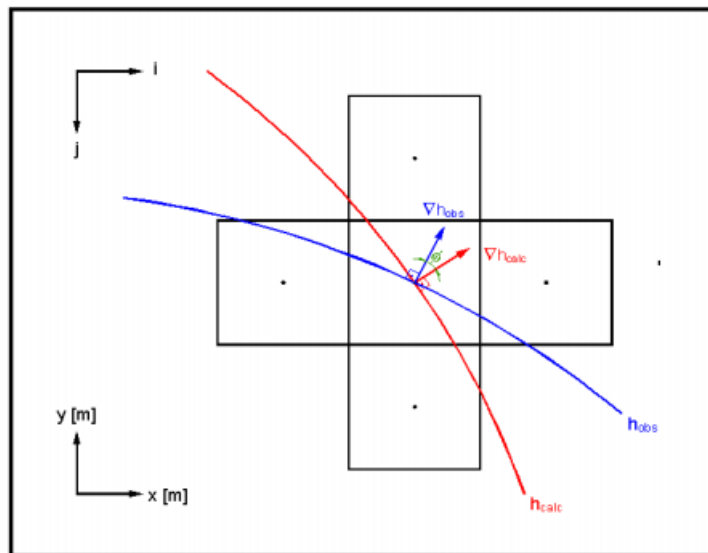
$$\text{RMSEG} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\nabla h^{\text{obs}} - \nabla h^{\text{calc}})_i^2} \quad (3.1)$$

Sendo M o número de células ativas do modelo.

O ângulo entre as cargas nos modelos observado e calculado é dado pela expressão 3.2 a seguir, sendo melhor expresso pela figura 9:

$$\phi_j = \arccos \left(\frac{\nabla h_j^{\text{obs}} \cdot \nabla h_j^{\text{calc}}}{|\nabla h_j^{\text{obs}}| \cdot |\nabla h_j^{\text{calc}}|} \right) \quad (3.2)$$

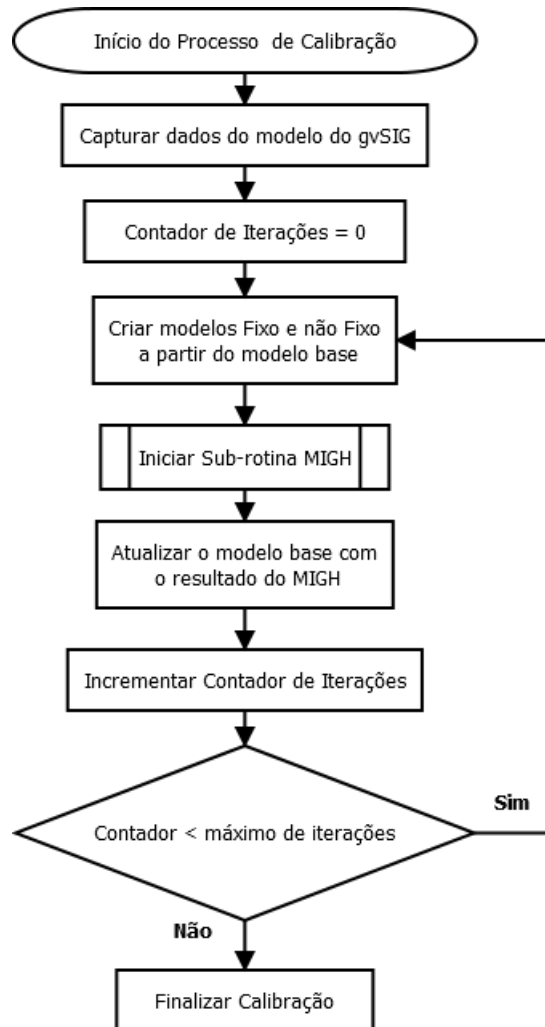
Figura 9: Ângulo entre os gradientes hiraúlicos dos modelos simulado e observado



Fonte: Souza (2007, p. 19)

O funcionamento do algoritmo de calibração do sistema UFC Flow é esquematizado no fluxograma da figura 10, a seguir.

Figura 10: Fluxograma da Calibração pelo MIGH no UFC Flow



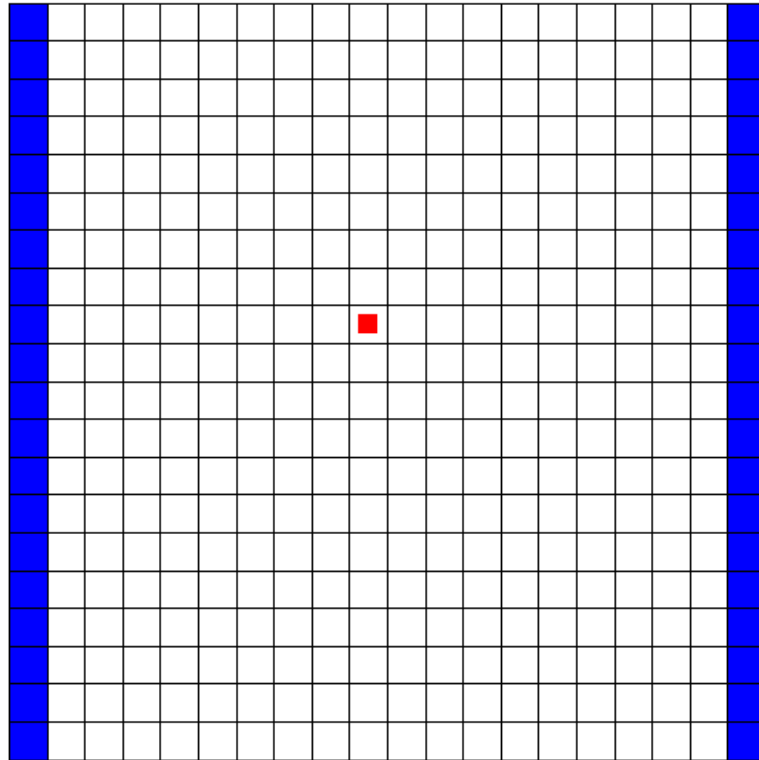
Fonte: O Autor

Análise de Sensibilidade do MIGH

Para a análise de sensibilidade do MIGH, algumas situações foram simuladas e calibradas, variando as condições iniciais do problema, como a condutividade hidráulica e o número e posicionamento dos poços de observação. As cargas de observação de entradas são utilizadas com os próprios valores do modelo simulado.

Inicialmente foi simulada uma região de condutividade hidráulica de $10^{-4}m/s$ situada entre duas fronteiras de cargas constantes e iguais a $10m$. O aquífero é submetido ao bombeamento constante através de um poço que toma uma vazão de $0.012m^3/s$. A região é limitada ao norte e ao sul por fronteiras impermeáveis. O solo possui uma profundidade de $40m$ e não há fluxo no sentido vertical. O modelo foi simulado para se obter o mapa de cargas hidráulicas. A figura 11 mostra o modelo dentro do UFC Flow.

Figura 11: Modelo simulado com condutividade constante



Fonte: O Autor

Para o caso descrito anteriormente, foram fixados arbitrariamente oito poços de observação utilizando as cargas da própria simulação. para este caso, foi feita a calibração utilizando diferentes valores de condutividade hidráulica inicial. O modelo foi calibrado para as situações: $K = 10m/s$, $K = 1m/s$, $K = 10^{-1}m/s$, $K = 10^{-2}m/s$, $K = 10^{-3}m/s$, $K = 10^{-4}m/s$ e $K = 10^{-5}m/s$.

O objetivo deste teste é avaliar se há convergência pelo método analisando as funções de erro: RMSEH, RMSEG e Média dos Ângulos definidas nas funções: 2.15, 3.1, 3.2, respectivamente e também pela análise dos histogramas de condutividades hidráulicas finais.

Por hipótese, deve haver convergência em todos os casos, com uma maior velocidade nos casos com condutividade próxima ao valor real ($K = 10^{-4}$). Por ser o MIGH caracterizado como um método *steepest descent*, espera-se que a convergência se dê mais rapidamente nas primeiras iterações.

4 Resultados

4.1 O UFC Flow

Como foi explanado na metodologia, o *plugin* do sistema UFC Flow no gvSIG consiste em uma barra de ferramentas com diversas funções. A barra pode ser visualizada na figura 12 e suas extensões serão demonstradas a seguir.

Figura 12: Barra de Ferramentas do Sistema UFC Flow



Fonte: O Autor

Cada um dos botões na figura é representado por uma classe do tipo *Extension* (explicada na metodologia), incluindo o botão que ativa e desativa o menu (primeiro botão da barra de ferramentas). Os botões podem ser identificados na figura 13, a seguir.

Figura 13: Explicação das Ferramentas

- Menu UFC Flow (Habilita/Desabilita)
- Salvar Malha
- Abrir Malha
- Criar Malha
- Alterar Parâmetros
- Alterar Configurações do BCF
- Alterar Configurações de Tempo
- Visualizar Modo Tabela
- Adicionar Poço de Bombeamento
- Adicionar Poço de Observação
- Simular no MODFLOW
- Calibrar Parâmetros
- Criar Gráficos

Fonte: O Autor

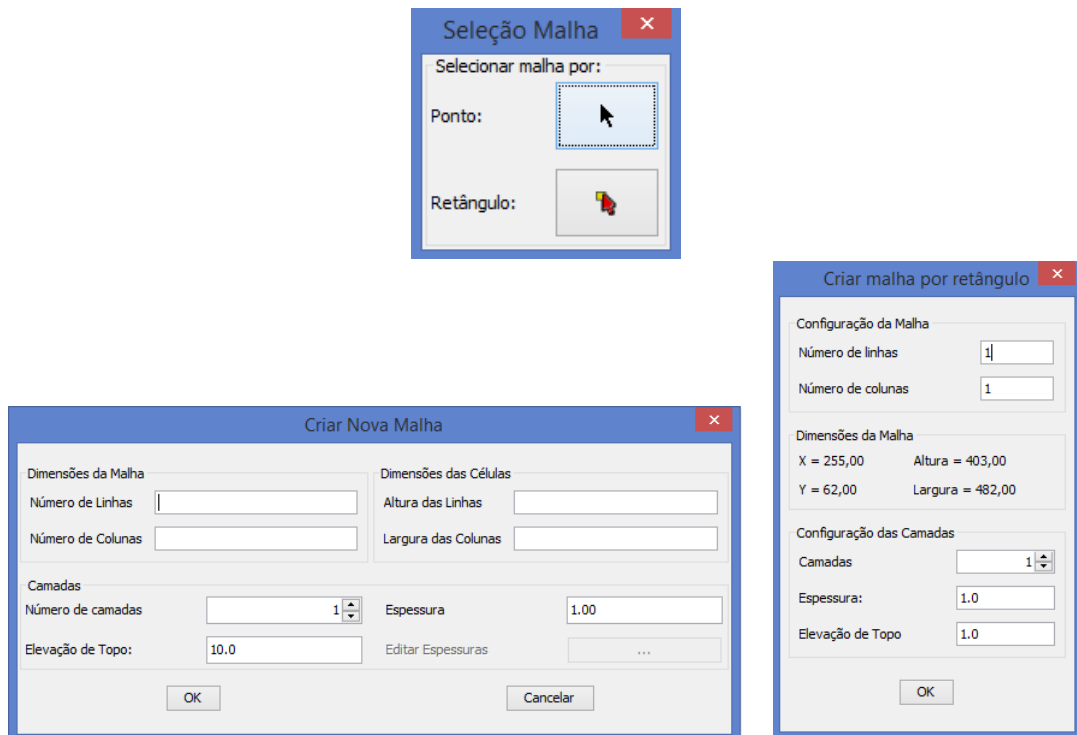
Abrir/Salvar Malha

Os dados de malha utilizados para simular o aquífero no MODFLOW e para calibrar com o MIGH não são compatíveis com os formatos *ESRI* utilizados no gvSIG. Para rodar um modelo previamente desenvolvido é necessário utilizar as ferramentas de salvar e abrir específicas do UFC Flow.

Criar Malha

As interfaces criadas para modelar a malha foram divididas em dois métodos, criar a malha por ponto ou por retângulo. A figura 14 mostra as guias de usuário para criar o modelo da malha.

Figura 14: Guias de Interface de Usuário para criar Malha



Fonte: O Autor

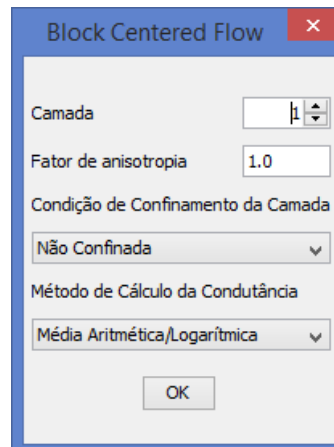
O menu de criação por pontos recebe o ponto de entrada e cria a malha a partir do número de linhas e colunas e das dimensões das células. A criação por retângulo cria a malha internamente ao retângulo selecionado pelo usuário calculando as dimensões a partir do número de linhas e colunas.

Configurar BCF/Tempo

As janelas de configuração do BCF e dos dados de tempo de simulação controlam modelos relacionados diretamente com o MODFLOW. São configurações respectivamente a respeito do **BlockCenteredFlow** e dos **StressPeriods** descritos na metodologia.

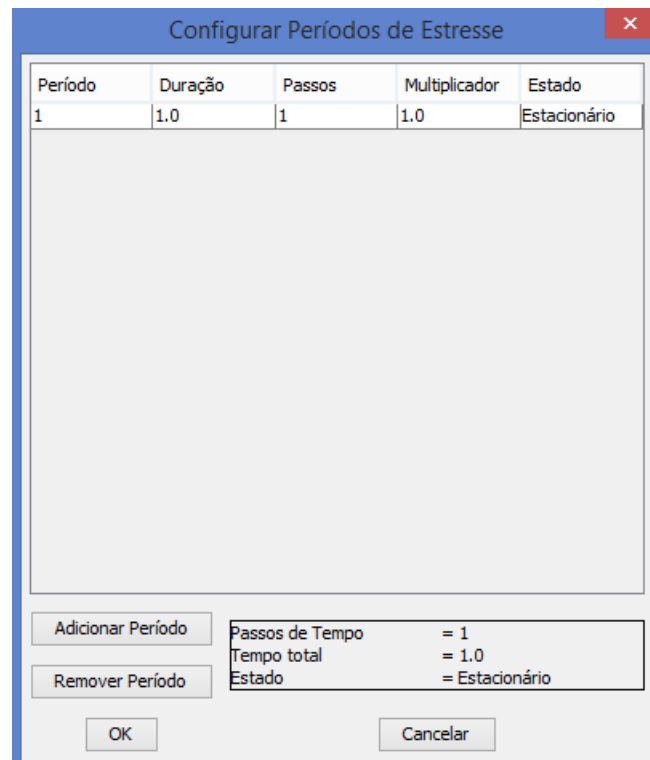
As figuras 15 e 16 mostram as guias de interface do sistema UFC para estes dois modelos que são ativadas quando os seus respectivos botões são acionados.

Figura 15: Guia de Interface de Usuário - BCF



Fonte: O Autor

Figura 16: Guia de Interface de Usuário - StressPeriods

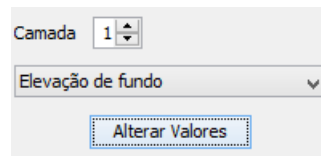


Fonte: O Autor

Modificar Parâmetros/Tabela

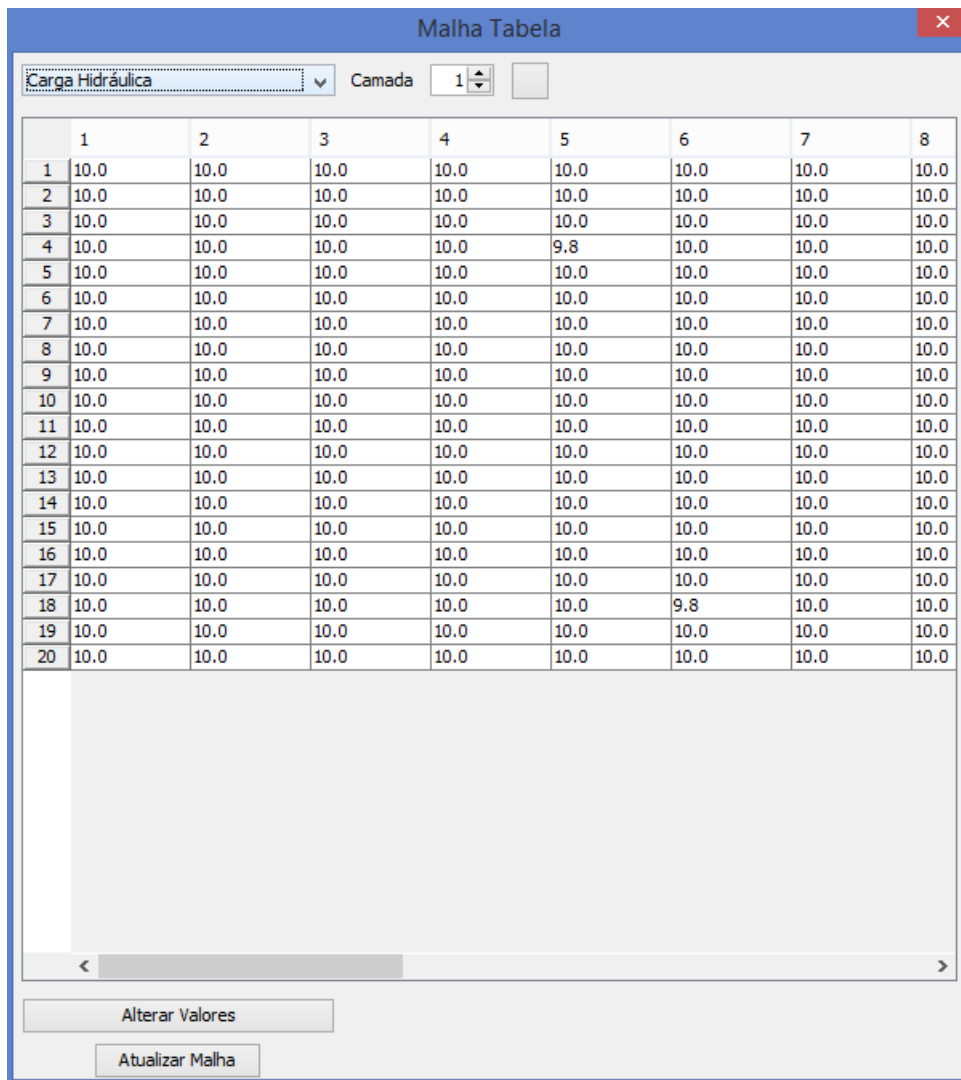
Estas duas ferramentas são responsáveis por modificar os atributos da malha. A diferença é o modo de visualização. Modificar parâmetros modifica os dados diretamente na malha ativando as células que serão modificadas e selecionando o parâmetro desejado. O modo Tabela abre cada parâmetro separadamente de forma tabular. As figuras 17 e 18 mostram as interfaces para cada caso.

Figura 17: Guia de Interface de Usuário - Modificar Parâmetros



Fonte: O Autor

Figura 18: Guia de Interface de Usuário - Modo Tabela



Fonte: O Autor

Poços de Bombeamento/Observação

Os botões de poços de bombeamento e observação são responsáveis por adicionar estes elementos na malha. Uma melhor descrição é feita na **Metodologia** na seção **Layers Condições de contorno específicas** e com exemplo claro pela figura 6.

Simulação/Calibração/Geração de Gráficos

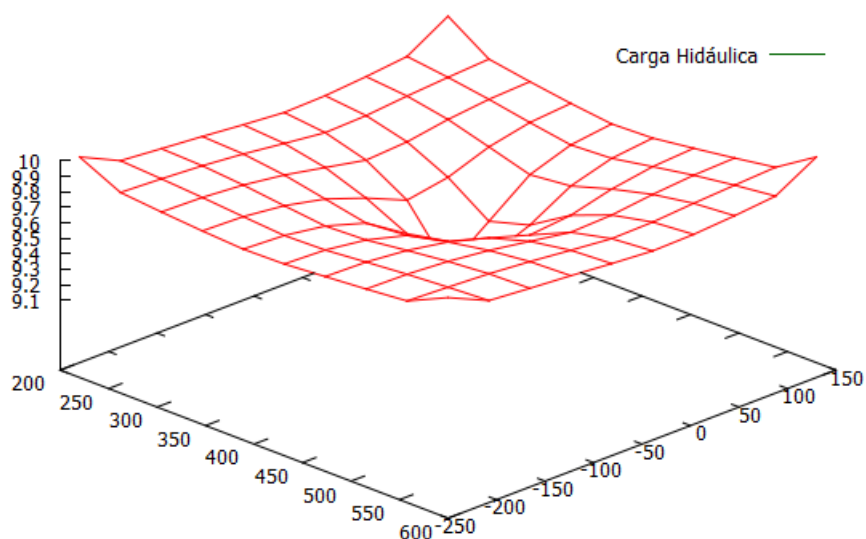
A ferramenta de simulação é utilizada para gerar os arquivos do MODFLOW e simular no executável *mf2005.exe* a partir do arquivo NAM (extensão *.nam*). A simulação é executada e as cargas hidráulicas obtidas podem ser importadas para malha dentro do sistema UFC Flow. O arquivo de saída do MODFLOW, LIST (extensão *.lst*) é gerado normalmente na pasta de projeto e pode ser lido com um leitor de textos comum.

O botão de calibração possui as opções para calibrar a condutividade hidráulica utilizando o MIGH e Algoritmos Genéticos. A opção de calibrar utilizando Algoritmos Genéticos não está concluída e deve ser testada exaustivamente antes de ser lançada. A calibração com o MIGH utiliza a condutividade horizontal estabelecida na malha e pede apenas o número de iterações que se deseja na calibração. São gerados arquivos com o histórico de condutividades do processo, cargas e gradientes calculados e observados e os valores das funções de erro RMSEH, RMSEG e Média dos Ângulos.

A ferramenta de geração de gráficos é utilizada para criar os dispositivos de visualização de resultados. Podem ser gerados gráficos de valores em 3D e curvas de nível utilizando o GNUPlot por exemplo.

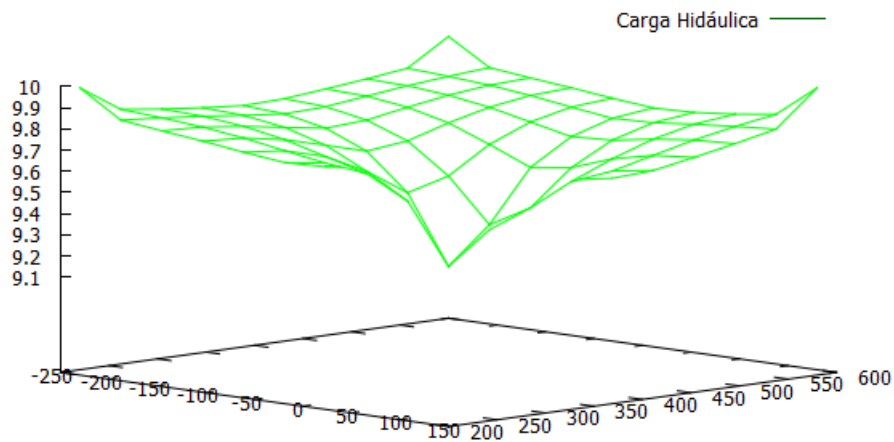
Nas figuras 19 e 20 são mostrados os gráficos para as cargas hidráulicas do modelo apresentado na análise de sensibilidade, quando simulado sob condutividade constante $k = 10^{-4} m/s$. Os gráficos apresentados foram gerados no gnuPlot através da biblioteca Java-Plot.

Figura 19: Gráfico 3DPlot de cargas hidráulicas: vista superior



Fonte: O Autor

Figura 20: Gráfico 3DPlot de cargas hidráulicas: vista inferior



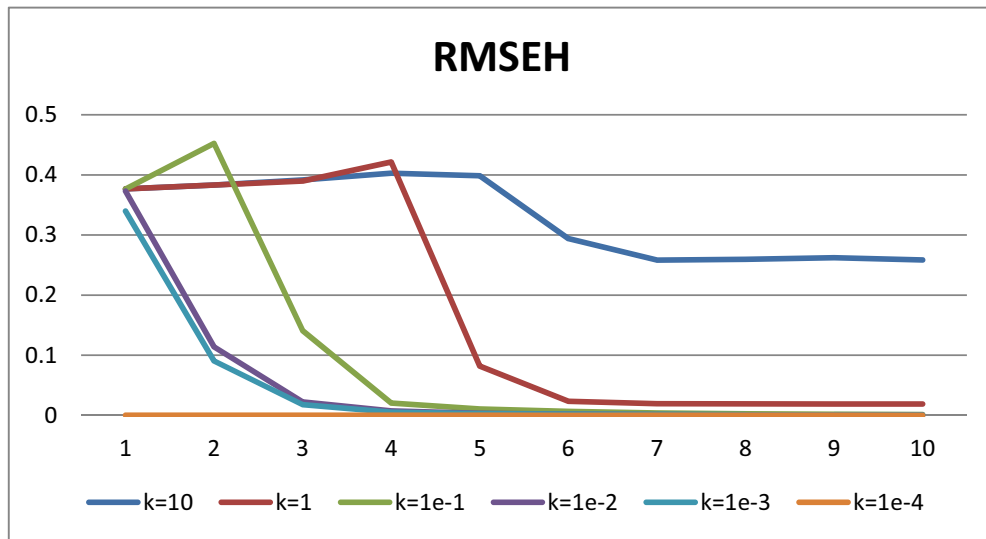
Fonte: O Autor

4.2 Análise de Sensibilidade do MIGH

Os resultados para a análise de sensibilidade do MIGH variando a condutividade hidráulica inicial podem ser analisados a partir dos gráficos de erros: RMSEH, RMSEG e Média dos Ângulos nas figuras 21, 22 e 23, respectivamente.

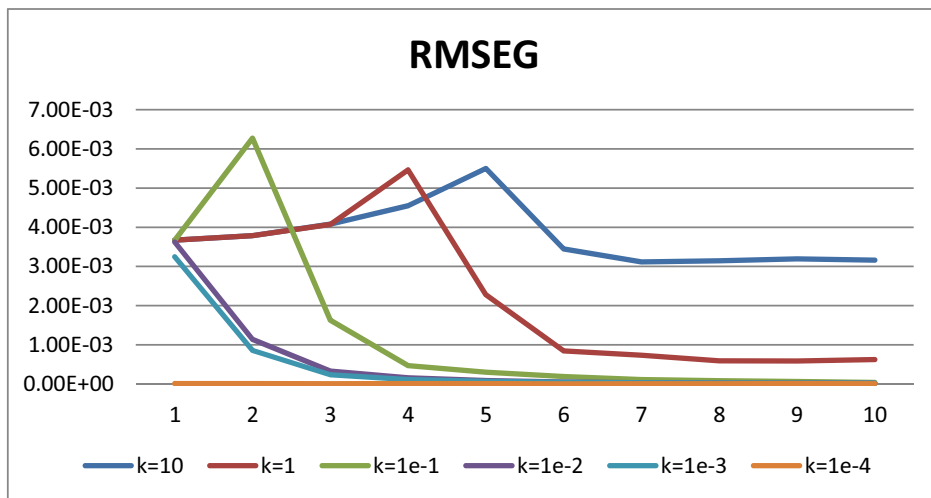
Não foi possível calibrar o modelo para a condutividade hidráulica inicial de $k = 10^{-5} m/s$. Durante a calibração, a célula do poço atinge o estado seco. Isto não configura um problema, pois o estado seco indica que o bombeamento para a vazão estabelecida é impossível com a condutividade utilizada.

Figura 21: RMSEH



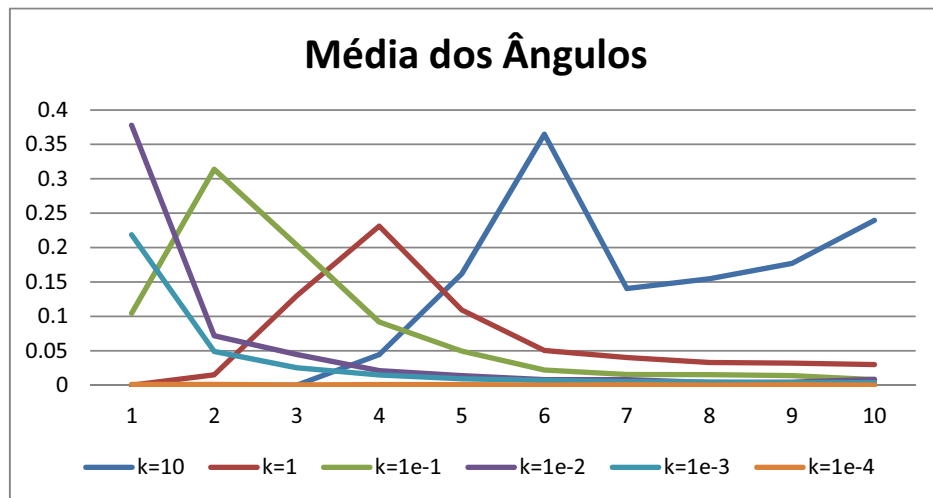
Fonte: O Autor.

Figura 22: RMSEG



Fonte: O Autor.

Figura 23: Média dos Ângulos



Fonte: O Autor.

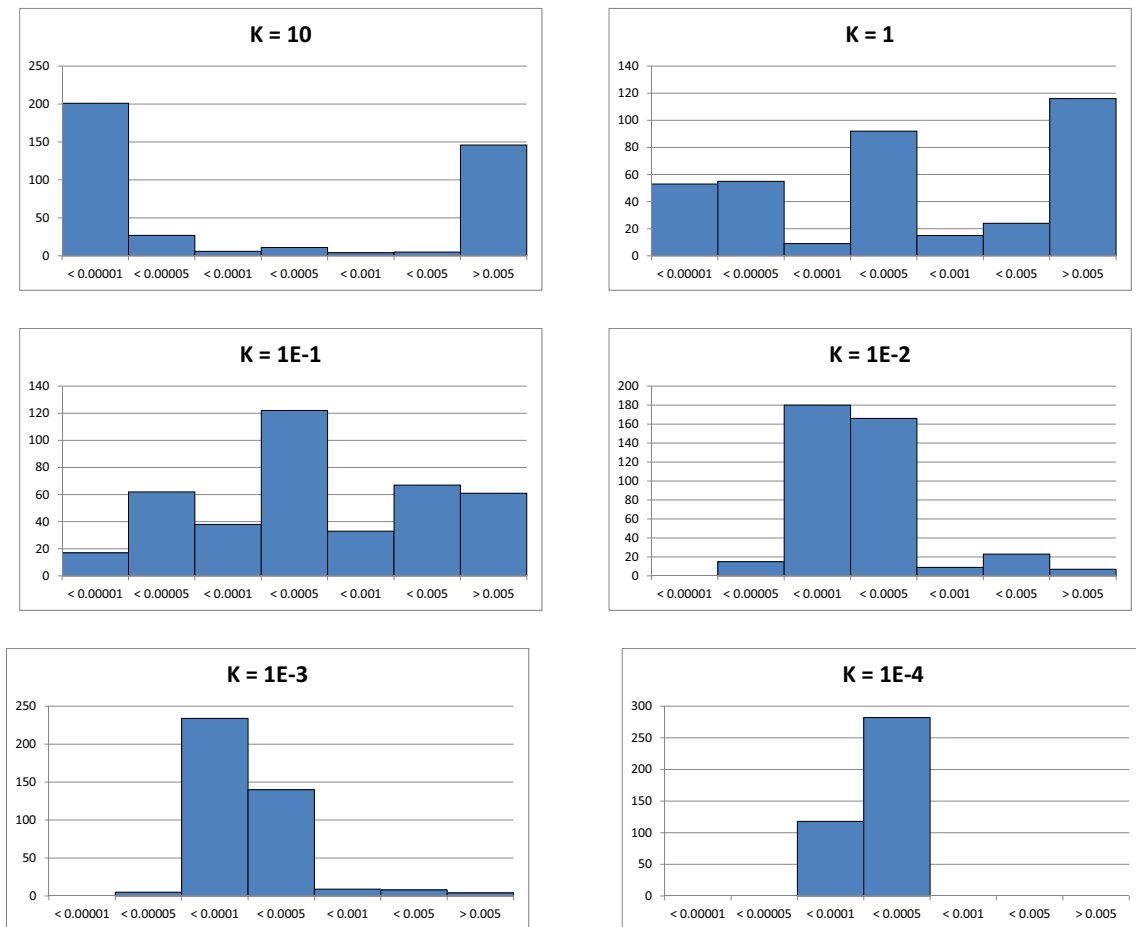
Os valores de condutividade hidráulica estão em m/s .

Como pode ser observado, todos os gráficos possuem forma bem estabelecida e são semelhantes entre si. Podem inicialmente apresentar uma subida leve, seguida por uma descida íngreme e tendendo a convergir em uma assíntota horizontal. Em todos os casos, os gráficos apresentam uma clara convergência, no entanto, para os casos com condutividade horizontal muito distante do valor real, o erro não tende à zero.

Pode se estabelecer que o método é convergente e busca uma solução a partir dos resultados anteriores. Devido à não unicidade de soluções, deve-se avaliar também como ficam os valores finais de condutividades hidráulicas nestes casos. Os histogramas de condutividades das 400 células são apresentados na figura 24 para a 10ª iteração de cada calibração.

Nas figuras 25 a 30 encontram-se os resultados das condutividades hidráulicas de cada caso anterior na 10ª iteração em mapas de cores. Este resultado foi obtido utilizando ferramentas de análise de dados provenientes do próprio gvSIG.

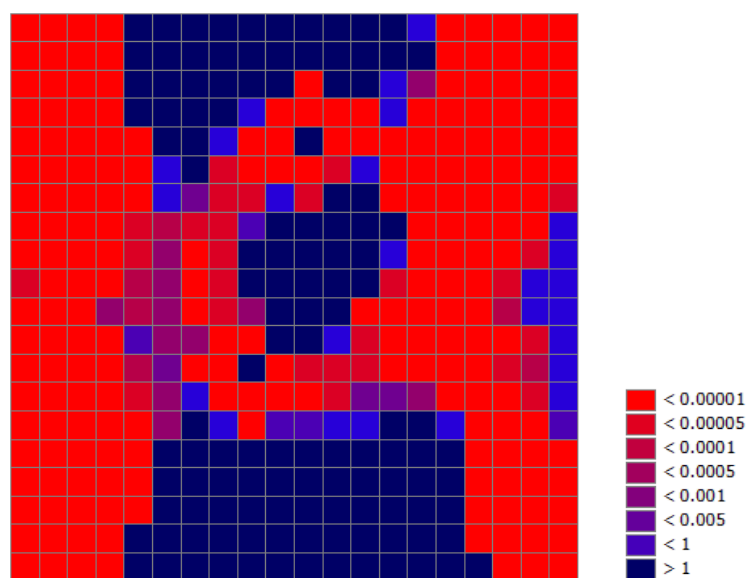
Figura 24: Histogramas de condutividades hidráulicas na 10ª iteração do MIGH



Fonte: O Autor

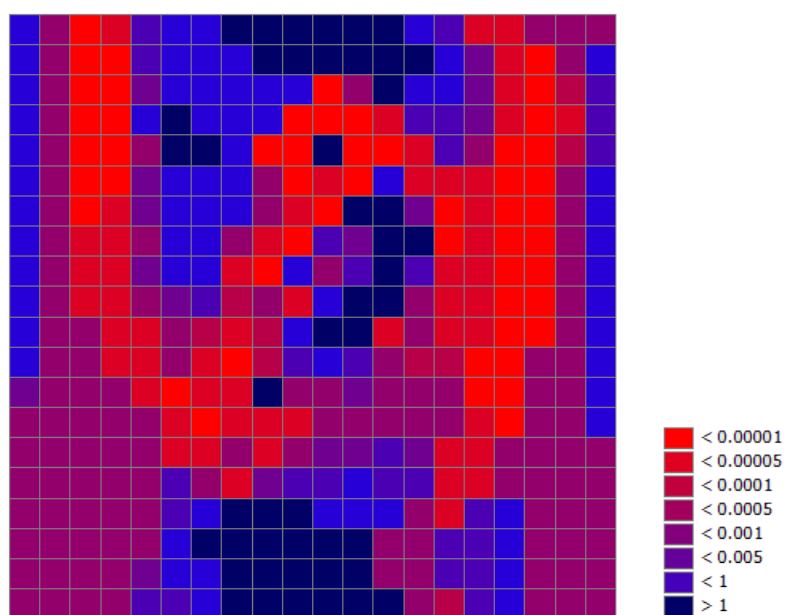
Os intervalos no eixo das abscissas representam as condutividades hidráulicas em m/s e os valores nas ordenadas, as frequências observadas.

Figura 25: Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 10m/s$)



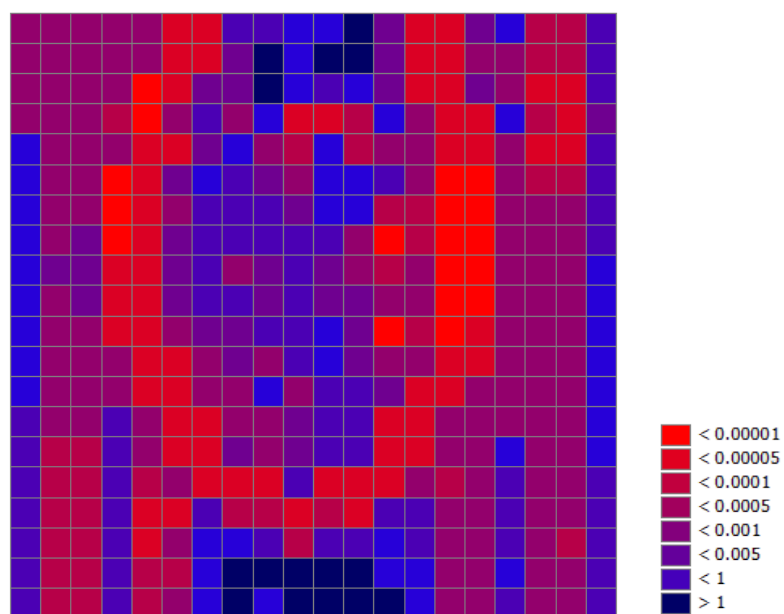
Fonte: O Autor

Figura 26: Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 1m/s$)



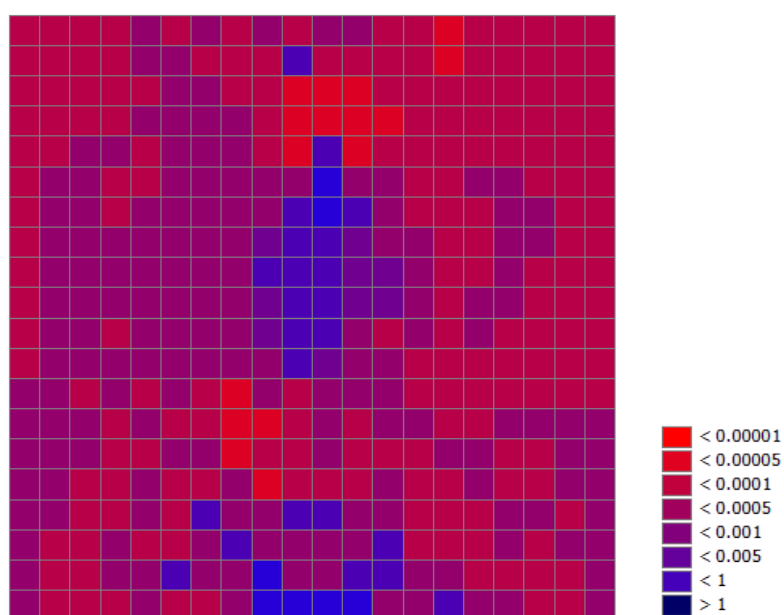
Fonte: O Autor

Figura 27: Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 0.1m/s$)

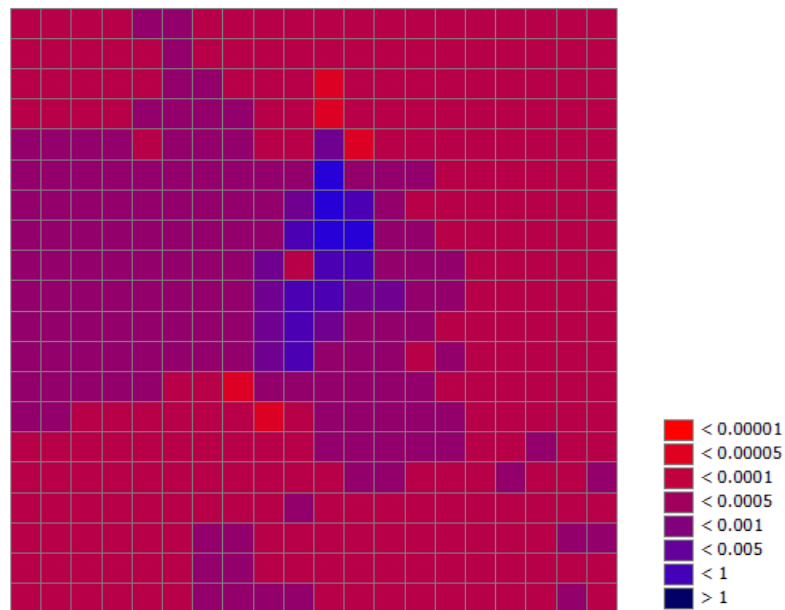


Fonte: O Autor

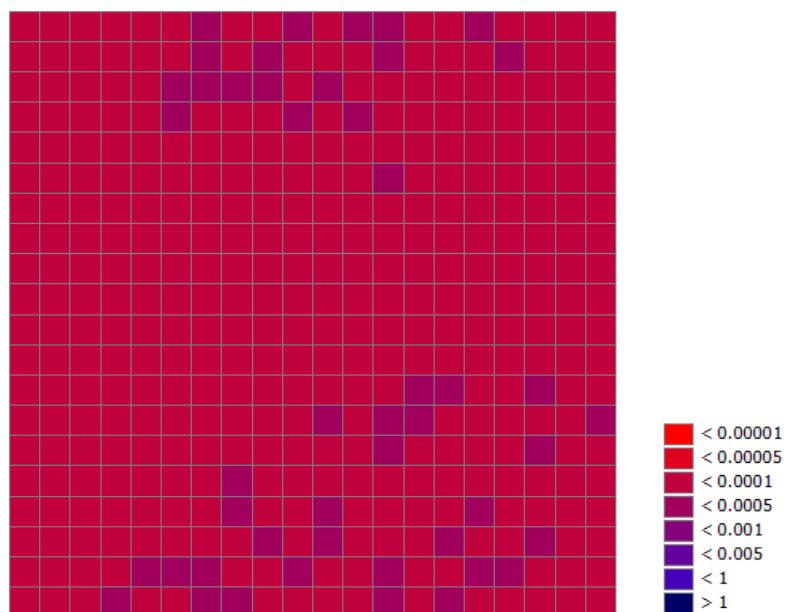
Figura 28: Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 0.01m/s$)



Fonte: O Autor

Figura 29: Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 0.001m/s$)

Fonte: O Autor

Figura 30: Mapa de condutividades hidráulicas ($K = 0.0001m/s$)

Fonte: O Autor

Pelos resultados anteriores é possível perceber que mesmo em alguns casos em que os erros tendem à zero, há várias células que são calibradas com valores bem diferentes do valor real ($K = 10^{-4}$). Isto ocorre, possivelmente, devido ao fato de haver múltiplas soluções para o problema. É provável que o resultado da calibração nestes casos, se aproxime de uma solução, embora esta não seja a solução esperada.

5 Conclusões e Recomendações

5.1 Conclusões

A respeito da modelagem computacional de águas subterrâneas utilizando a linguagem JAVA pode se dizer que não houve nenhuma dificuldade em particular na utilização desta linguagem em relação à qualquer outra que fosse utilizada. Apesar da má fama do JAVA em relação à velocidade de algoritmos matemáticos, esta falta de velocidade não foi verificada no trabalho, mesmo sem a utilização de algoritmos otimizados em relação ao Método Iterativo do Gradiente Hidráulico.

As vantagens da utilização do JAVA durante este trabalho mostraram-se claras. A existência de bibliotecas e projetos desenvolvidos em JAVA que estão disponíveis gratuitamente para utilização e modificação (incluindo o próprio gvSIG) é a sua principal vantagem. Bibliotecas gráficas como o JFreeChart e o JavaPlot, bibliotecas prontas para bancos de dados espaciais, para criação de elementos básicos utilizados em SIG's, para resolução de sistemas lineares estão disponíveis em JAVA e, quando bem documentadas, se tornam poderosas ferramentas de modelagem. A linguagem também apresenta fácil portabilidade, independentemente do sistema operacional utilizado para o seu funcionamento.

O gvSIG como Sistema de Informações Geográficas, por outro lado, não apresenta vantagens aparentes em relação a outros softwares proprietários do mesmo gênero. Em relação às funções básicas de um SIG, pode-se dizer que ele cumpre o seu papel. Possuindo ferramentas para criação de camadas vetoriais e rasters, com possibilidade de aglomeração e associação de informações e de distribuição através de bancos de dados ele apresenta todas as ferramentas básicas necessárias em um SIG, cabendo ao modelador o desenvolvimento de ferramentas de análise mais sofisticadas.

É a possibilidade de utilizar livremente o código fonte do programa que diferencia o gvSIG de outros softwares do ramo. A facilidade de agrupar os projetos desejados utilizando o seu repositório no *Subversion* permitindo o desenvolvimento diretamente sobre o código original ou pela importação de projetos desenvolvidos individualmente demonstram um elevado potencial neste software, especialmente para o meio acadêmico.

Finalmente, em relação ao Método Iterativo do Gradiente Hidráulico, pode se estabelecer que este apresenta-se como um método válido para a calibração da condutividade hidráulica horizontal. Não somente se mostra válido, mas como já foi observado por outros autores, apresenta por vezes, resultados superiores à outros métodos de calibração, a citar-se o

PEST. O MIGH se mostra como uma ferramenta de calibração robusta que com um pequeno tempo de processamento consegue gerar convergência na minimização dos erros analisados.

O MIGH apresenta algumas fragilidades que seriam igualmente apresentadas em outros métodos similares. A não unicidade de soluções para o problema inverso, especialmente em um problema de diferenças finitas em que célula produz uma nova região de estudo com um possível valor de condutividade hidráulica diferente, se torna um grande obstáculo no processo de calibração. Embora possa ser observada a convergência do processo, nada irá garantir que a solução para a qual converge o método é o conjunto inicial de parâmetros que originou o problema.

Na verdade, qualquer outro método que analise os mesmos dados, estará sujeito a esse mesmo problema. Isto é apenas um indicativo de que o processo computacional de calibração serve como uma ferramenta de apoio ao modelador, mas não substitui as análises de campo. As informações sobre o solo na área de estudo, uma alocação apropriada dos poços de observação e conhecimento prévio de zoneamentos locais ainda se fazem necessários nestes estudos.

5.2 Recomendações

A utilização da linguagem JAVA em conjunto com o software gvSIG apresenta a grande vantagem da portabilidade de sistemas operacionais. Esta portabilidade se perde quando se utiliza o MODFLOW como software de cálculo. Recomenda-se, no futuro, o desenvolvimento de uma plataforma de simulação do fluxo subterrâneo em JAVA para permitir que o sistema UFC Flow possa rodar em diferentes sistemas, como o Linux.

Uma possibilidade para o modelo é a implementação do cálculo através do método dos elementos finitos. Não há nenhum desenvolvimento em relação a este modelo, mas uma possibilidade de sua aplicação em JAVA seria através da biblioteca de elementos finitos *Futureye*.

O sistema UFC Flow foi desenvolvido com enfoque principal no Método Iterativo do Gradiente Hidráulico, e embora possa ser utilizado para modelar o fluxo subterrâneo, este ainda não dispõe de vários elementos disponíveis nos sistemas de aquíferos. Recomenda-se a criação de modelos para representar mais fielmente elementos de rios e lagos, zonas de recarga (por chuva), análise transiente do rebaixamento provocado pelos poços de bombeamento, etc.

O próximo passo lógico em um modelo para simulação do fluxo subterrâneo é a criação de um modelo para simulação da dispersão de poluentes. Deve ser desenvolvido ainda no sistema UFC Flow, um modelo para simulação da dispersão de poluentes utilizando o software

MT3D. Propõe-se ainda a avaliação da possibilidade de utilizar o Método Iterativo de Gradiente de Concentrações (MIGC) para a calibração dos coeficientes de dispersividade longitudinal da equação de transporte de massa em meio saturado.

Encontra-se também em desenvolvimento um modelo de calibração da condutividade hidráulica horizontal utilizando metaheurística através de Algoritmos Genéticos. O modelo está sendo desenvolvido utilizando a função de erro RMSEH como função objetivo. Para a aplicação em JAVA, está sendo utilizada a biblioteca *JGAP*.

Referências

- ALENCAR, M. da F. *Interpolação por Splines para a Modelação de Inomogeneidades no Método de Elementos Analíticos - Implementação por Programação Orientada à Objetos*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, SP, 2008.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. 1. ed. San Diego: Academic Press, 1992.
- ANGUIX, A.; DIAZ, L. gvsig: A gis desktop solution for an open sdi. *Journal of Geography and Regional Planning*, v. 1, p. 041–048, Maio 2008.
- ATANGANA, A.; BOTHA, J. F. Analytical solution of the groundwater flow equation obtained via homotopy decomposition method. *Earth Science & Climatic Change*, v. 3, n. 2, Setembro 2012.
- BANERJEE, P. K. *The Boundary Element Methods in Engineering*. Londres: McGraw-Hill, 1994.
- BEAR, J. *Hydraulics of Groundwater*. New York: Dover Publications, 2007.
- BRYSON, J. A. E.; HO, Y.-C. *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation, and Control*. Bristol, Pensilvania: Hemisphere Publishing Corporation, 1975.
- CABRAL, J. Movimento das Águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. (Coord.). *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. cap. 3, p. 35–51.
- CABRAL, J.; DEMETRIO, J. G. A. Aplicação de modelos em hidrogeologia. In: FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. (Coord.). *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. cap. 15, p. 367–389.
- CADENHEAD, R.; LEMAY, L. *Sams Teach Yourself Java 6 in 21 Days*. Indiana: Sams Publishing, 2007.
- CAMARA, G. et al. *Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica*. Divisão de Processamento de Imagens - INPE, 1996. Livro eletrônico. Acessado em 21 de Dezembro de 2015. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/anatomia.pdf>>.
- CARRERA, J. et al. Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, v. 13, n. 1, p. 206–222, Fevereiro 2005.
- CARRERA, J.; NEUMAN, S. P. Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. maximum likelihood method incorporating prior information. *Water Resources Research*, v. 22, n. 2, p. 199–210, 1986.
- CARRERA, J.; NEUMAN, S. P. Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 2. uniqueness, stability, and solution algorithms. *Water Resources Research*, v. 22, n. 2, p. 211–227, 1986.

- COSTA, C. T. F. da. *Modelagem Numérico-Analítica do Fluxo Hídrico e da Contaminação de Água Subterrânea por Derivados de Petróleo*. Tese (Doutorado) — UFC, Fortaleza, 2005.
- COSTA, C. T. F. da; CASTRO, M. A. H. de. Uma metodologia numérico-analítica aplicada a problemas transparentes de transporte de contaminante. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, n. 4, p. 183–197, Outubro-Dezembro 2007.
- COSTA, I. de O. *Calibração da Condutividade Hidráulica Horizontal Utilizando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2014.
- COWEN, D. J. Gis versus cad versus dbms: What are the differences? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 54, n. 11, p. 1551–1555, Novembro 1988.
- DARCY, H. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Paris: Dalmont, 1856.
- DEITEL, P. J.; DEITEL, H. M. *Java: How to Program*. 7. ed. New Jersey: Pearson - Prentice Hall, 2007.
- DEMERS, M. N. *Fundamentals of Geographic Information Systems*. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- DOHERTY, J. *PEST: Model-Independent Parameter Estimation*. 5. ed. Brisbane, Australia, 2005.
- DOHERTY, J.; BREBBER, L.; WHITE, P. *PEST*. Australia, 1994.
- FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. 4. ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2001.
- FITZ, P. R. *Geoprocessamento sem complicação*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 5. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001.
- FREEZE, R. A. Henry darcy and the fontains of dijon. *Ground Water*, v. 32, n. 1, p. 23–30, Janeiro-Fevereiro 1994.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. New York: Prentice Hall, 1979.
- GALLARDO, D.; BURNETTE, E.; MCGOVERN, R. *Eclipse in Action: A Guide for Java Developers*. Greenwich: Manning, 2003.
- GOMES, C. C. *Método de Elementos Analíticos para Modelagem Matemática de Fluxo Hídrico Subterrâneo Regional*. Tese (Doutorado) — UFC, Fortaleza, 2002.
- GOMES, C. C.; CASTRO, M. A. H. de. Método dos elementos analíticos aplicado no aquífero da região do cariri. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 1, p. 25–34, Janeiro-Março 2005.
- GOODCHILD, M. F. Geographic information systems in undergraunder geography: A cntemporary dilemma. *The Operational Geographer*, v. 8, p. 34–38, 1985.
- GUO, X.; ZHANG, C.-M. Hydraulic gradient comparison method to estimate aquifer hydraulic parameters under steady-state conditions. *GROUND WATER*, Vol 38, n. No 6, p. 815–826, Novembro-Dezembro 2000.

- KRESIC, N. *Quantitative Solutions in hydrogeology and groundwater modeling*. [S.l.]: Lewis Publisher, 1997.
- LIAO, S. *The Proposed Homotopy Analysis Technique for the Solution of Nonlinear Problems*. Tese (Doutorado) — Shanghai Jiao Tong University, Xangai, 1992.
- LOUGHRAN, S.; HATCHER, E. *Ant in Action: Java Development with Ant*. Greenwich: Manning, 2007.
- MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. *MODFLOW: A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*. Virginia, USA, 1988.
- MCLAUGHLIN, D.; TOWNLEY, L. R. A reassessment of the groundwater inverse problem. *Water Resources Research*, v. 32, n. 5, p. 1131–1161, Maio 1996.
- MENESCAL, G. C. *Modelagem Numérico-Analítica de Aquífero Utilizando o Método de Colocação RBF Livre de Malha*. Tese (Doutorado) — UFC, Fortaleza, 2008.
- POETER, E. P.; HILL, M. C. *DOCUMENTATION OF UCODE, A Computer Code for Universal Inverse Modeling*. Colorado, USA, 1998.
- REOLON, C. A. *Geotecnologias à Cartografia Temática: gvSIG*. UNIOESTE - Campus de Marechal Cândido Rondon: AGB, 2008.
- RIGHETTO, A. M. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. São Carlos: EESC/USP, 1998.
- SCHUSTER, H. D. M.; ARAUJO, H. D. B. Uma formulação alternativa do método iterativo de gradiente hidráulico no procedimento de calibração dos parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol 9, n. No 2, p. 31–37, Abril/Junho 2004.
- SEGERLIND, L. J. *Applied Finite Element Analysis*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1984.
- SIMMONS, C. T. Henry darcy (1803-1858): Immortalized by his scientific legacy. *Hydrogeology Journal*, v. 16, p. 1023–1038, Julho 2008.
- SOUZA, C. D. de. *Simulação Computacional do Fluxo Hídrico Subterrâneo na Região do Cariri e Calibração Uilitzando Gradiente das Cragas Hidráulicas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2007.
- STRACK, O. D. L.; HAITJEMA, H. M. Modeling double aquifer flow using a comprehensive potential and distributed singularities. 1.solution for homogeneous permeability. *Water Resources Research*, v. 17, p. 1535–1549, Outubro 1981.
- STRACK, O. D. L.; HAITJEMA, H. M. Modeling double aquifer flow using a comprehensive potential and distributed singularities. 2.solution for inhomogeneous permeabilities. *Water Resources Research*, v. 17, p. 1551–1560, Outubro 1981.
- TAVARES, J. L. *Calibração da Dispersividade Longitudinal de Aquíferos Através do Método Iterativo do Gradiente de Concentração*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará, 2014.
- TAVARES, P. R. L. *Modelagem Computacional e Calibração da Condutividade Hidráulica Horizontal em Aqüífero na Bacia Sedimentar do Araripe Utilizando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará, 2010.

THEIS, C. V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Transaction of the American Geophysical Union*, v. 16, p. 519–524, 1935.

TODD, D. K.; MAYS, L. W. *Groundwater Hydrology*. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

WEGNER, P. Concepts and paradigms of object-oriented programming. *ACM SIGPLAN OOPS*, v. 1, n. 1, p. 7–87, 1990.

WELTER, D. E. et al. *Approaches in highly parameterized inversion: PEST++ Version 3, a Parameter ESTimation and uncertainty analysis software suite optimized for large environmental models*. Techniques and methods 7-c12. Virginia, USA, 2015.

YEH, W. W.-G. Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: The inverse problem. *Water Resources Research*, v. 22, n. 2, p. 95–108, 1986.