

3 Ferramentas

Neste capítulo são apresentadas as ferramentas necessárias para o desenvolvimento desta dissertação, divididas em três itens: metodologia, equipamentos e *softwares*.

No primeiro item, metodologia, são explicitados todos os procedimentos necessários a fim de se colocar em prática a ciência aplicada em cada um dos dois trabalhos desenvolvidos. No segundo, equipamentos, são apresentados todos os equipamentos utilizados para a coleta dos dados em campo. E no terceiro e último item, *softwares*, os programas computacionais usados para o tratamento e processamento desses dados coletados.

3.1. Metodologia

Para o desenvolvimento desta dissertação foi adotada uma metodologia análoga para os dois trabalhos desenvolvidos simultaneamente, o Modelo Batimétrico e o Modelo Geológico. Essa metodologia consiste em uma sequência de ações, que começa pela aquisição e tratamento de dados pontuais da área de estudo, seguida pelo desenvolvimento de modelos computacionais em 2 ou 3 dimensões a partir de processamentos geoestatísticos, e finalizada com comparações dos modelos com sondagens geofísicas, a fim de complementar a interpretação do modelo.

Esta sequência de ações utilizada na dissertação pode ser relacionada com a Figura 3.1, que apresenta a progressão do conhecimento das geociências, da coleta de dados à tomada de decisão, na forma de uma pirâmide.

Segundo Turner (2006), no nível amplo da base, os dados coletados são transformados em informações, com a inserção de contexto, julgamento científico e experiência. Interpretações adicionais de especialistas transformam esta informação em conhecimento, permitindo-se começar as análises de decisão. A última transformação requer a combinação de gestão de fluxo de trabalho cuidadoso e conceitos de tecnologia avançada de informação, para que sejam tomadas essas decisões.

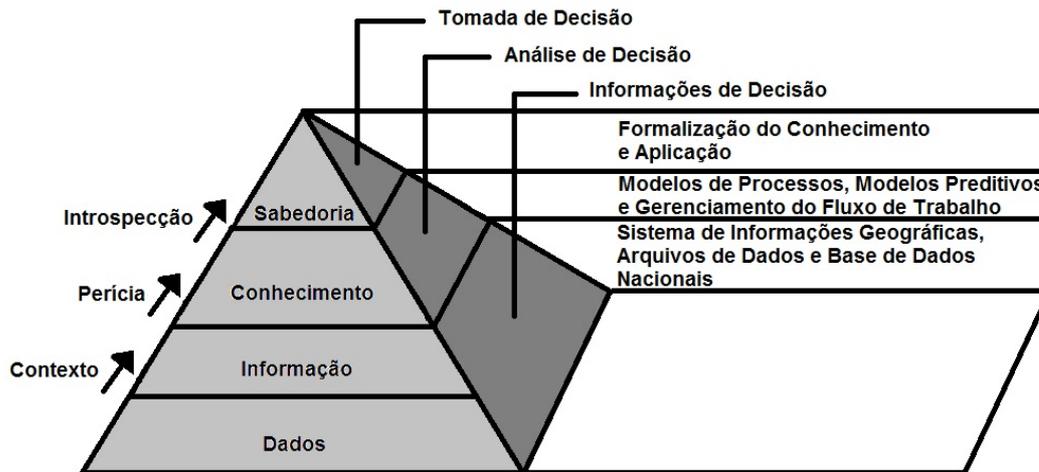


Figura 3.1 – A progressão do conhecimento geocientífico (adaptado de *Netherlands Institute Geoscience TNO – National Geological Survey, 2000 apud Turner, 2006*).

Neste contexto de sequência de ações, todos os procedimentos correspondentes a execução dos dois trabalhos, Modelo Geológico e Modelo Batimétrico, são apresentados nos subitens a seguir. No entanto, inicialmente será abordado o conceito de geoestatística, utilizado em toda a dissertação.

Segundo Olea (1991), a geoestatística pode ser definida como o “estudo de fenômenos que variam no espaço”.

Enquanto que a geoestatística relaciona a distribuição das amostras quanto à sua disposição espacial, utilizando o conceito de variáveis aleatórias aliado à dependência espacial entre elas, chamada também de teoria das variáveis regionalizadas, a estatística utiliza apenas teorias de probabilidade para explicar a frequência da ocorrência de eventos (Wikipédia, 2010 e Matheron, 1963 *apud* Vieira, 1997).

Segundo Matheron (1963) *apud* Vieira (1997), variável regionalizada é uma função espacial numérica, que varia de um local para outro com uma continuidade aparente, não podendo ser representada por uma função matemática simples.

A geoestatística, por associar a distribuição estatística dos dados no espaço, se torna um ótimo instrumento para o tratamento de dados geotécnicos, já que a natureza não disponibiliza variáveis com um padrão de distribuição da estatística clássica (Alessi, 2011).

A partir destes conceitos apresentados e a utilização de pontos georeferenciados, com propriedades distintas, é possível estimar valores destas propriedades, e de outras correlacionáveis, em qualquer posição dentro do campo em estudo. É necessário a utilização de pacotes computacionais para este tipo de análise. Neste trabalho o *software* utilizado foi o *Rockworks 14*, que será apresentado em detalhes no item 3.3.2.

A Figura 3.2 apresenta o fluxograma de processos realizados em um projeto de modelagem típico. Dados brutos são coletados de várias fontes e podem ser considerados como dois tipos: dados espaciais e dados de propriedades. Para cada tipo existe um tratamento a ser feito de forma que gere uma forma de visualização única capaz de permitir a interpretação do cenário modelado.

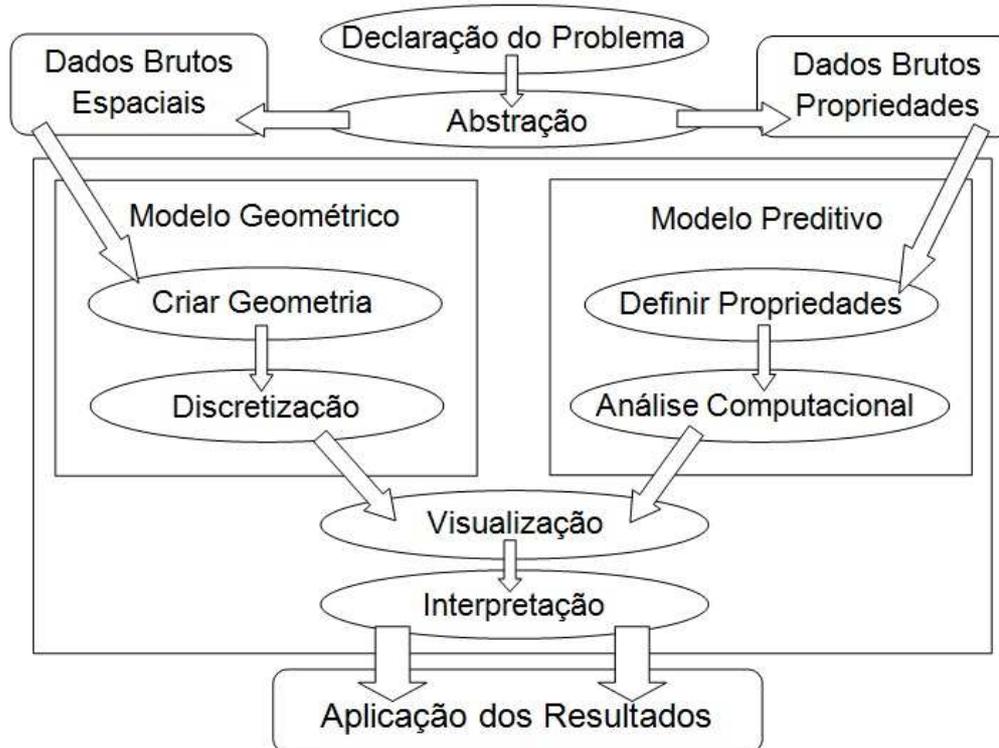


Figura 3.2 – Fluxograma dos processos de modelagem geológica (adaptado de Turner, 2006).

3.1.1. Modelo Batimétrico

Para o Modelo Batimétrico, os dados de entrada foram adquiridos a partir de um levantamento batimétrico realizado na Lagoa de Jacarepaguá.

Este levantamento batimétrico realizado em campo consistiu na aquisição de pontos com os seguintes atributos: profundidades e coordenadas. Estas profundidades georreferenciadas foram obtidas através do equipamento de navegação comercializado pela *Raymarine*, um Sonar com receptor GPS, instalado no veículo anfíbio (*Argo 8x8 Tractor EFI*) utilizado como transporte na Lagoa de Jacarepaguá.

O emprego dos dados de entrada da batimetria (profundidades georreferenciadas) para a elaboração do Modelo Batimétrico, foi realizado com a discriminação de duas camadas: a lâmina d'água e o fundo da lagoa. Com isso

foram criados modelos em 2 e 3 dimensões do relevo de fundo da lagoa utilizando-se o mesmo *software*.

A partir do mapa hipsométrico da Lagoa de Jacarepaguá, modelo 2D gerado, foi escolhido um local em que existisse a maior variação de profundidades, ou seja, que possuísse um relevo de fundo acidentado, para que fossem feitos testes com o equipamento de *Ground Penetration Radar* (GPR), que identifica diferenças entre propriedades elétricas nos materiais em subsuperfície, a fim de se comparar os resultados obtidos e validá-los.

Para esta validação foi utilizado um bote inflável de 10' ao invés do veículo anfíbio, pois com este o sinal das antenas sofreria interferências devido aos eixos do veículo e no caso do bote, o piso é de fibra de carbono, que não interferiria tanto no sinal das antenas por ser um meio menos condutivo.

Artigos da própria empresa fabricante do GPR, *Måla Geoscience*, apresentam um exemplo para utilização deste equipamento em um lago, como pode ser observado nas Figura 3.3 e Figura 3.4 abaixo.

A Figura 3.3 apresenta o resultado do radargrama, gerado após tratamento, de um traçado realizado no lago. Nele pode-se observar a lâmina d'água, a camada de sedimento e a superfície do embasamento da região. Já a Figura 3.4 apresenta o mapa do lago com os traçados realizados com o GPR e os mapas em 2D das profundidades da superfície do embasamento e do sedimento.

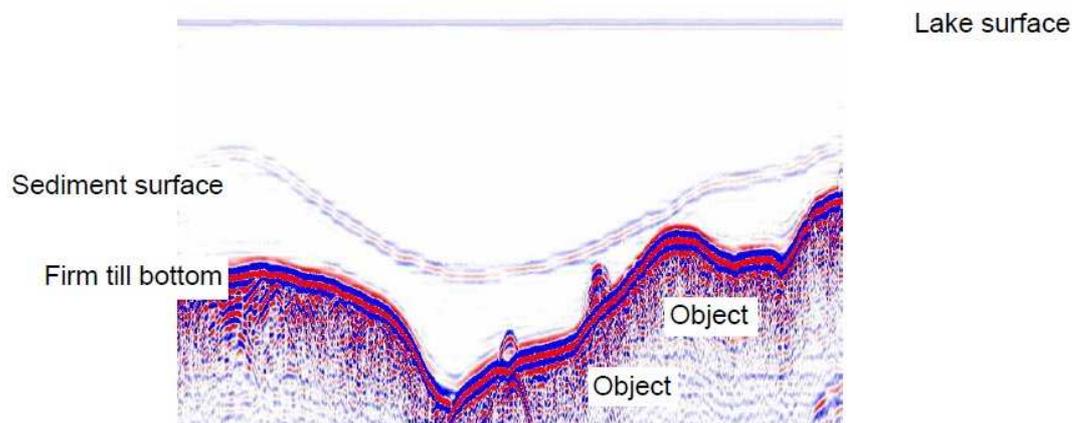


Figura 3.3 – Radargrama em lâmina d'água (adaptado de *MALA GeoScience, 2010*).

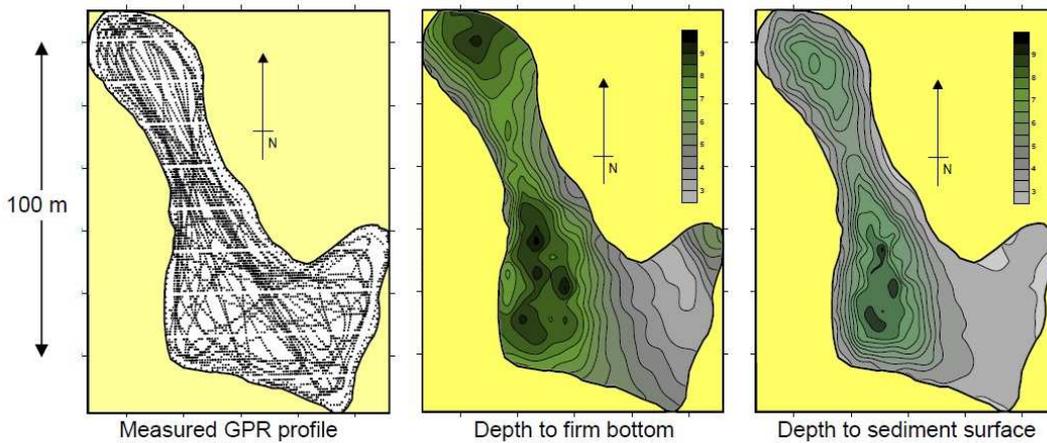


Figura 3.4 – Batimetria realizada com o GPR e superfícies do sedimento e do embasamento (adaptado de *MALA GeoScience, 2010*).

3.1.2. Modelo Geológico

No caso de uma modelagem geológica, informações de furos de sondagens representam tipicamente os dados básicos fundamentais, produzidos por observações diretas e amostragens da subsuperfície (Turner, 2006).

Os dados de entrada, utilizados para a elaboração do Modelo Geológico desta dissertação, foram obtidos em boletins de sondagem de diversos projetos localizados no entorno da Lagoa de Jacarepaguá. Alguns exemplos destes boletins utilizados podem ser visualizados no Apêndice.

A partir destes dados de entrada obtidos nas sondagens (coordenadas, cotas, profundidades, níveis d'água e descrições litológicas) foram criados modelos em 3 dimensões e seções destes modelos, com o intuito de se obter uma visualização espacial da geologia local.

Para que os dados específicos das descrições litológicas fossem utilizados, foi necessário realizar uma categorização e posterior adequação das descrições obtidas nas sondagens nestas categorias. Este procedimento foi necessário para enquadrar descrições litológicas semelhantes em uma única descrição padrão, uma vez que foram encontradas diversas descrições para o mesmo tipo de solo, pois estas foram executadas por empresas diferentes e, conseqüentemente, técnicos diferentes.

Os materiais encontrados nos boletins foram classificados primeiramente em dois sistemas de categorização distintos, Litologia e Estratigrafia, que serão descritos mais detalhadamente no item 4.1.1 do Capítulo 4.

Após esta classificação, cada categoria foi dividida em novas categorias para o estabelecimento dos tipos de camadas padrões, tanto litológicas como estratigráficas. Com isso, foi possível realizar a avaliação das sondagens

individuais de cada projeto quanto a Litologia e Estratigrafia, e uma consequente padronização das camadas de forma a se tornar possível a utilização do programa computacional para o processamento geoestatístico destes dados, criando assim, os Modelos Geológicos em 3 dimensões.

Foram gerados então dois modelos geológicos, um para a Litologia e o outro para a Estratigrafia. O programa utilizado para as modelagens foi o *Rockworks 14*, conforme já informado, que será explicado em detalhes no item 3.3.2.

De forma a validar e para um efeito comparativo entre os modelos gerados, foram feitas sondagens geofísicas no entorno do Autódromo de Jacarepaguá, por ser um local com grande quantidade de sondagens, com antenas do GPR, da mesma forma que para o Modelo Batimétrico. Esta validação visa atestar a veracidade dos modelos, ou ainda, identificar erros decorridos do método de interpolação geoestatístico adotado nas modelagens,

A comparação entre as sondagens geofísicas realizadas com as seções dos modelos geológicos gerados foi feita apenas para com o Modelo Litológico, a fim de conferir e confirmar a identificação dos diferentes tipos de material, uma vez que a Estratigrafia depende de uma análise mais complexa, indicando e agrupando camadas deposicionais, e não apenas indicar tipos litológicos.

3.2.Equipamentos

Neste item são apresentados os equipamentos utilizados nos trabalhos de campo realizados com a ajuda da equipe do Laboratório de Avaliação, Monitoramento e Mitigação Ambiental da PUC-Rio (LAMMA). Os trabalhos realizados foram divididos em 2 etapas, de acordo com a sua natureza.

- 1ª Etapa: Levantamento batimétrico da Lagoa de Jacarepaguá, utilizando o veículo anfíbio *Argo 8x8 Tractor EFI* como transporte, o Sonar com receptor GPS da *Raymarine Inc.* modelo *A50D 5" Chartplotter/ Fishfinder* para obtenção das profundidades georreferenciadas e o GPS *Garmin* para navegação;
- 2ª Etapa: Realização de sondagens geofísicas GPR no entorno do Autódromo de Jacarepaguá com duas antenas RTA, de 50 e 100 MHz, e no interior da Lagoa de Jacarepaguá com outras duas antenas, não-blindada de 100 MHz e blindada de 250 MHz. Foram utilizados também o GPS geodésico *ASHTEC* acoplado às antenas, o bote inflável de 10' para o transporte e o GPS *Garmin* para navegação.

Todos os equipamentos mencionados acima pertencem ao LAMMA e serão apresentados nos itens subsequentes.

3.2.1. Veículo Anfíbio

O *Argo 8x8 Tractor EFI* foi utilizado para a realização do levantamento batimétrico na Lagoa de Jacarepaguá por ser um veículo anfíbio, ou seja, dotado da capacidade de transitar em qualquer tipo de terreno, seja lamoso, arenoso ou uma lagoa assoreada. A Figura 3.5 apresenta o veículo com a capota (a) fechada e (b) aberta.



(a) capota fechada.

(b) capota aberta.

Figura 3.5 – Veículo Anfíbio com a (a) capota fechada e a (b) capota aberta.

Para a utilização do veículo nos trabalhos de campo com os equipamentos mencionados foram feitas algumas adaptações no mesmo. Para a tela do Sonar com receptor GPS foi projetada uma base para que este ficasse fixado no painel frontal do veículo, de forma que todos os presentes tivessem visualização, e foi feita uma adaptação no conector de energia para que fosse utilizada a saída de 12 volts existente no painel do veículo. Já o transmissor de ondas do Sonar foi adaptado ao engate de reboque que havia no veículo. A seguir, na Figura 3.6, visualiza-se lateralmente o veículo anfíbio com estas adaptações descritas acima.



Figura 3.6 – Veículo Anfíbio adaptado para os equipamentos. (a) Tela do Sonar com receptor GPS, (b) Sonar e (c) Suporte para o motor de popa.

Conforme informado pelo fabricante, a velocidade do anfíbio em terra firme chega a cerca de 20 km/h, mas em água a velocidade é muito reduzida, ficando em torno de 1 km/h. Com isso, foi acoplado em sua traseira um suporte para um motor de popa de 8 HP (Figura 3.7), de forma que a velocidade em água atingisse uma média de 3 km/h, para que o anfíbio alcançasse locais de difícil acesso em ambientes aquáticos com mais mobilidade.



Figura 3.7 – Motor de popa de 8 HP utilizado nos trabalhos de campo na Lagoa.

3.2.2. Bote Inflável

Com a finalização dos trabalhos de campo para o levantamento batimétrico utilizando o veículo anfíbio, e a criação do modelo a partir dos *softwares* que serão apresentados a seguir, foram realizadas sondagens geofísicas GPR na Lagoa com a utilização do bote inflável de 10' (Figura 3.8) como mencionado anteriormente.

Esta mudança no meio de transporte se dá pelo fato de que o bote não interfere na emissão e recepção das ondas eletromagnéticas das antenas do georadar, pois seu piso é de fibra. O veículo anfíbio por possuir os eixos das rodas, atenua o sinal devido à condutividade deste material.



Figura 3.8 – Bote inflável utilizado na realização das sondagens geofísicas GPR na Lagoa.

3.2.3.GPS

Global Positioning System (GPS), ou Sistema de Posicionamento Global, é o nome dado tanto ao aparelho receptor de sinais GPS, quanto ao próprio sistema NAVSTAR GPS, *Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*.

O princípio de funcionamento do sistema GPS está apresentado na Figura 3.9 de acordo com ICPD (2011). E consiste nos segmentos descritos por Friedmann (2009) a seguir:

- Um **segmento espacial** formado por uma constelação de 24 satélites distribuídos em 6 órbitas planas distintas, cada órbita com 4 satélites, aproximadamente equidistantes entre si, inclinadas cerca de 55° em relação ao plano equatorial e a uma altitude em torno de 20.200 km;
- Um **segmento de controle** formado por uma rede de estações de controle baseadas em terra e estrategicamente distribuídas ao longo do planeta, com a estação de controle central localizada na *Falcon Air Force Base*, no Colorado, nos Estados Unidos e as outras quatro localizadas em ilhas relativamente próximas à linha do Equador: *Ascension Island* no Oceano Atlântico, *Diego Garcia* no Oceano Índico e *Hawaii* e *Kwajalein* no Oceano Pacífico;
- E pelo **segmento do usuário** que consiste no conjunto de todos os receptores GPS que recebem e processam os sinais recebidos pelo segmento espacial com a finalidade básica de calcular posições.

Segundo Friedmann (2009), cada um dos satélites do segmento espacial, transmite as informações necessárias ao uso de qualquer receptor GPS. As estações de controle monitoram os sinais dos satélites visíveis e transmitem estes dados para a estação de controle central, que processa estes dados, computando informações orbitais e as correções de tempo de cada satélite, e os reenvia de forma atualizada e precisa aos satélites. O segmento do usuário apenas recebe e processa os dados do segmento espacial a fim de obter a sua localização.

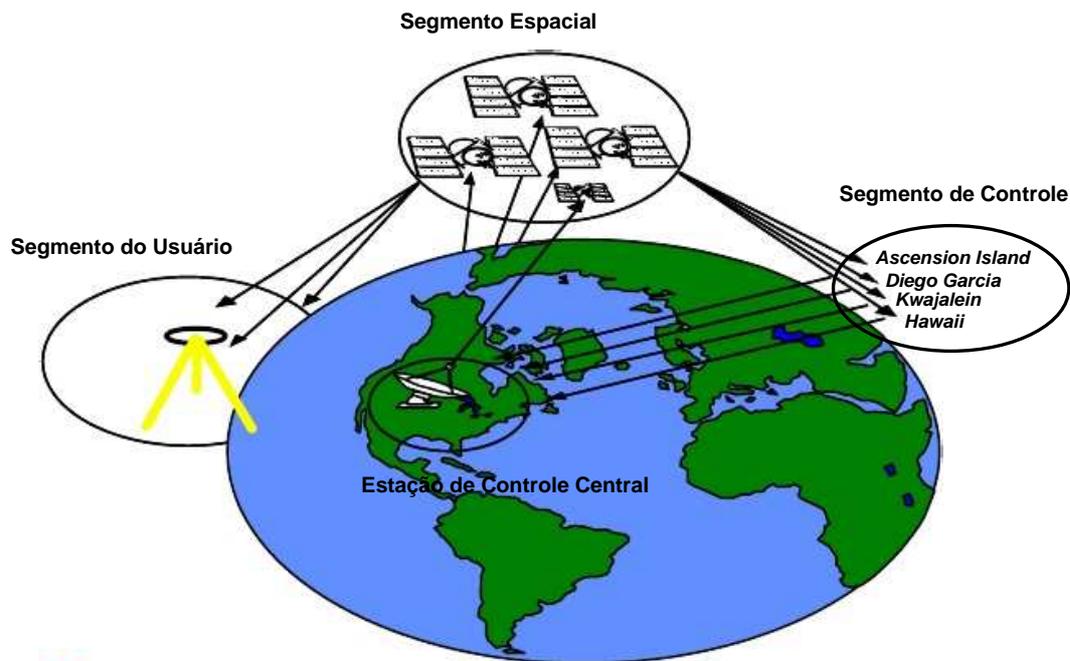


Figura 3.9 – Segmentos do Sistema NAVSTAR GPS (adaptado de ICPD, 2011).

A seguir é explicado porque é preciso visualizar no mínimo 3 satélites para obter a localização do receptor GPS com uma precisão de 10 a 15 metros para uma posição 2D, e 4 satélites para uma posição 3D, utilizando sempre um satélite a mais para corrigir a leitura dos demais.

Este problema será explicado em 2 dimensões para facilitar a visualização e a compreensão. A partir de 3 pontos (P1, P2 e P3) que são centros de círculos (C1, C2 e C3) de raios (r_1 , r_2 e r_3) semelhantes às distâncias (d_1 , d_2 e d_3) de um ponto P, acha-se a localização exata deste ponto P na interseção dos três círculos (esquema do lado esquerdo). No entanto não é possível medir a localização exata do ponto P, pois as distâncias dos centros dos círculos ao ponto P não são iguais aos raios (esquema do lado direito), como pode ser visualizado na Figura 3.10 a seguir. Com os avanços da tecnologia e com equipamentos caros e robustos é capaz de diminuir a inexactidão, como é o caso de receptores GPS geodésico com precisões de poucos centímetros.

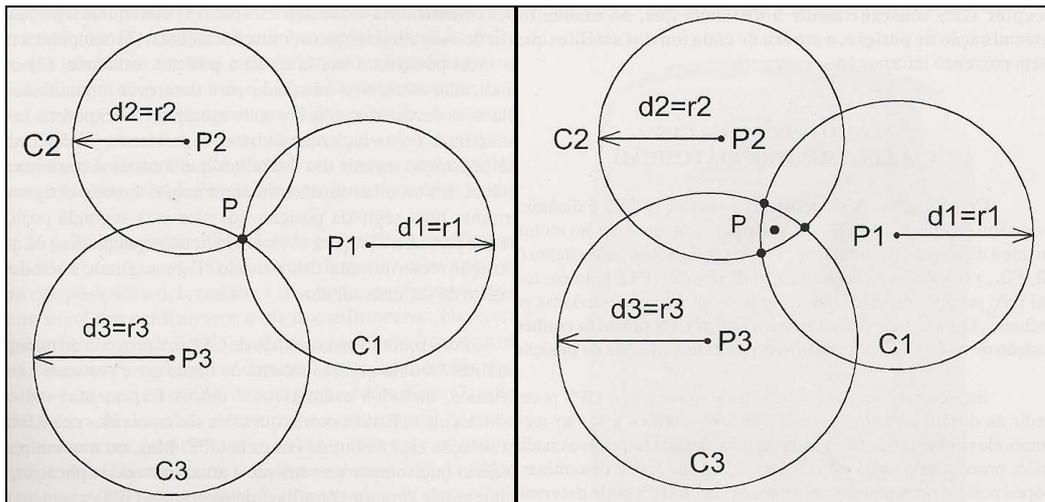


Figura 3.10 – Determinação de posição de um ponto através de distâncias de pontos conhecidos (Friedmann, 2009).

Com a posição na superfície do planeta medida, se faz necessário um sistema de coordenadas para determinar, ou identificar, esta posição. Existem basicamente dois sistemas de coordenadas que são mais utilizados: as coordenadas geográficas, onde a latitude e a longitude são medidas de ângulos de coordenadas esféricas, e coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator), que são medidas de distâncias de coordenadas cartesianas (Friedmann, 2009).

Ainda para determinar a posição, além do sistema de coordenadas, é indispensável utilizar um *datum*, ou sistema geodésico de referência, para confirmar a posição das coordenadas, já que a superfície da Terra é irregular e o formato da superfície de referência de cada região é calculado de uma maneira diferente. Os *data* (plural de *datum*) utilizados neste trabalho foram SAD69 (*South American Datum 1969*) por ser o sistema usualmente utilizado no Brasil e o WGS84 (*World Geodetic System 1984*), sistema de referência do *Google Earth*.

Nos itens a seguir são apresentados os receptores GPS utilizados durante as atividades em campo, sendo o *Garmin 76CSx* utilizado para navegação em coordenadas UTM (SAD69), o Sonar com receptor GPS utilizado para aquisição dos dados de profundidade da lagoa em coordenadas de latitude e longitude em ggg mmm.mmm (SAD69) e o Geodésico *Ashtech* utilizado em conjunto com as antenas GPR.

- **Garmin**

O GPS *Garmin 76CSx*, apresentado na Figura 3.11, foi utilizado apenas para auxiliar na navegação durante o levantamento batimétrico, pois ele possui o mapa da cidade do Rio de Janeiro, com a delimitação da Lagoa de Jacarepaguá. Isso

possibilitou realizar o levantamento das profundidades georreferenciadas em um formato espiral concêntrico, tipo caracol, em cada subárea separadamente, evitando que a linha do traçado ficasse muito próxima da vizinha ou a cruzasse.

Com o auxílio desse mapa com o traçado dos pontos obtidos, pode-se também determinar locais onde havia a necessidade de refinar os dados e realizar mais caminhamentos, de forma a se obter uma malha de pontos mais rica.



Figura 3.11 – GPS *Garmin 76CSx*.

- **Geodésico**

As coordenadas dos traçados executados com o GPR para as investigações geofísicas foram obtidas com o sistema GPS geodésico da marca *ASHTEC*, modelo *PROMARK II*. Este sistema apresenta exatidão máxima de 0,5 cm na horizontal e 1 cm na vertical, no entanto, tais magnitudes normalmente não são alcançadas em função de interferências como presença de postes, árvores, muros e telhados (Souza, 2005).

A Figura 3.12 apresenta o sistema GPS geodésico com seus acessórios, e a Figura 3.13 demonstra como o receptor GPS foi utilizado acoplado ao georadar durante o levantamento geofísico realizado nesta dissertação.



Figura 3.12 – Sistema GPS geodésico com seus acessórios (Souza, 2005).



Figura 3.13 – Receptor do GPS geodésico acoplado ao GPR.

3.2.4. Sonar

O Sonar com receptor GPS modelo *A50D 5" Chartplotter/ Fishfinder*, comercializado pela empresa *Raymarine Inc.* (Figura 3.14), conforme já informado, foi utilizado no levantamento batimétrico realizado no interior da Lagoa de Jacarepaguá. Os dados de profundidade georreferenciadas, coletados pelo equipamento foram utilizados para a construção do Modelo Batimétrico.



Figura 3.14 – Sonar integrado ao GPS da *Raymarine Inc.*

A Figura 3.15 apresenta duas telas do Sonar em dois momentos durante os trabalhos de campo. Observa-se que além das coordenadas e da profundidade, o equipamento indicava a velocidade do anfíbio, a temperatura da água, data e hora locais e apresentava um gráfico do relevo de fundo da Lagoa do percurso executado em tempo real.

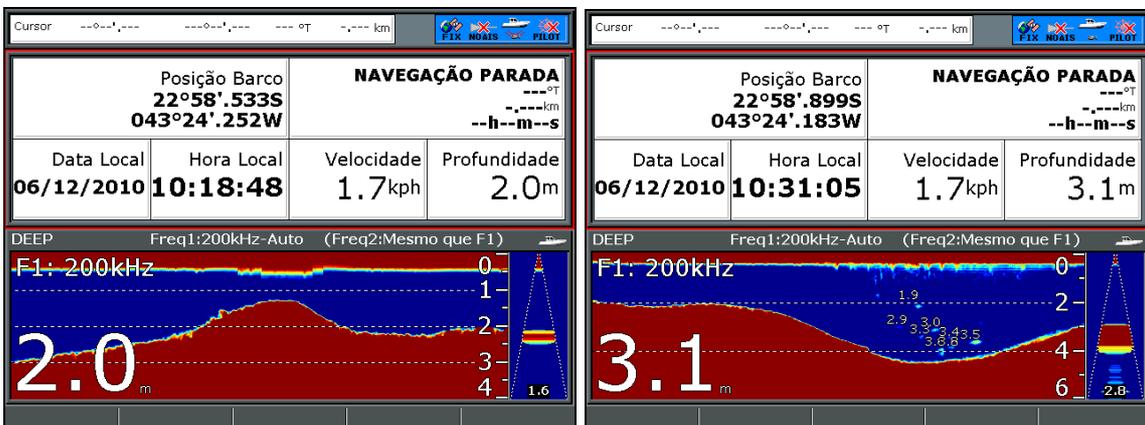


Figura 3.15 – Imagens da tela do Sonar com receptor GPS.

De forma a validar as leituras das profundidades obtidas pelo Sonar, realizou-se uma calibração do mesmo, que consistiu em realizar leituras manuais com uma trena acoplada a um peso circular de concreto e compará-las as indicadas pelo equipamento.

A Tabela 3.1 apresenta as leituras manuais realizadas e as do Sonar para esta calibração, e a Figura 3.16 estes dados plotados em um gráfico (Benedetti, 2011).

Tabela 3.1 – Profundidades obtidas pelas leituras manuais e pelo Sonar.

Leituras da Profundidade (m)		Leituras da Profundidade (m)	
Sonar	Manual	Sonar	Manual
0,8	0,75	5,0	5,10
0,9	0,87	6,0	5,90
1,0	0,98	7,0	7,00
1,3	1,28	8,0	8,00
1,5	1,50	9,1	9,00
2,0	2,10	10,2	10,15
2,5	2,50	11,0	11,00
3,0	3,00	12,0	12,00
3,5	3,50	13,2	13,15
4,0	4,00		

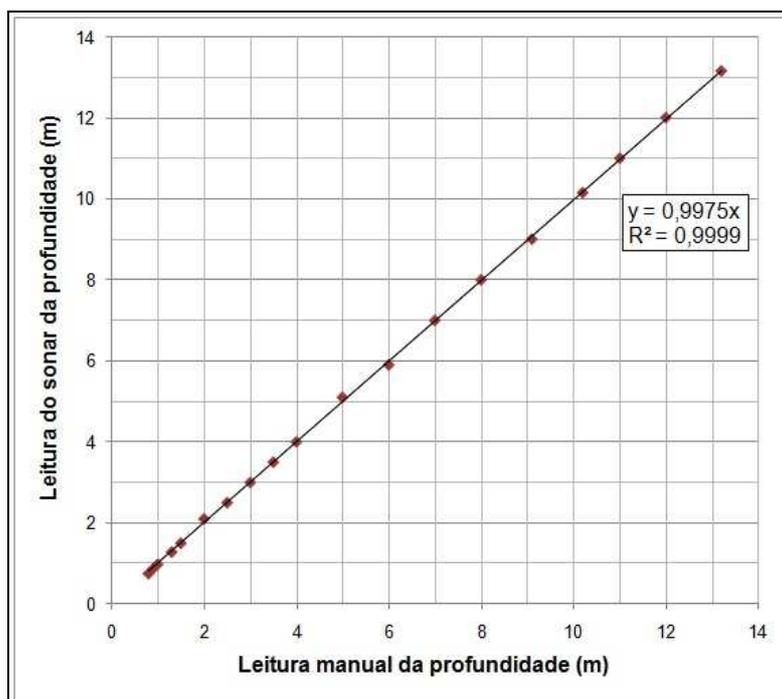


Figura 3.16 – Leitura manual em função da leitura do sonar em profundidade.

De acordo com a tabela e o gráfico apresentados, observam-se poucas e irrelevantes variações entre as leituras. Dessa forma, pode-se validar as leituras realizadas pelo sonar e utilizá-las para o Modelo Batimétrico.

3.2.5.GPR

O GPR (*Ground Penetrating Radar*), Radar de Penetração em Solo, ou ainda georadar, é um método de investigação geofísica que tem funcionamento análogo aos levantamentos sísmicos.

Pulsos eletromagnéticos de alta frequência (10 a 1.000 MHz) são emitidos no solo, por meio de uma antena transmissora, percorrem e refletem nas interfaces e descontinuidades do meio, e são captados por antenas receptoras (Neal, 2004 e ICPD, 2011). Estas 2 antenas estão conectadas a uma unidade de controle que, por sua vez, está conectada a um computador (*notebook*) em campo, que controla os parâmetros de aquisição, como velocidade da onda, empilhamento dos traços e tipo e intervalo de amostragem, e armazena os dados coletados.

O esquema de funcionamento do sistema GPR pode ser observado no diagrama abaixo, Figura 3.17.

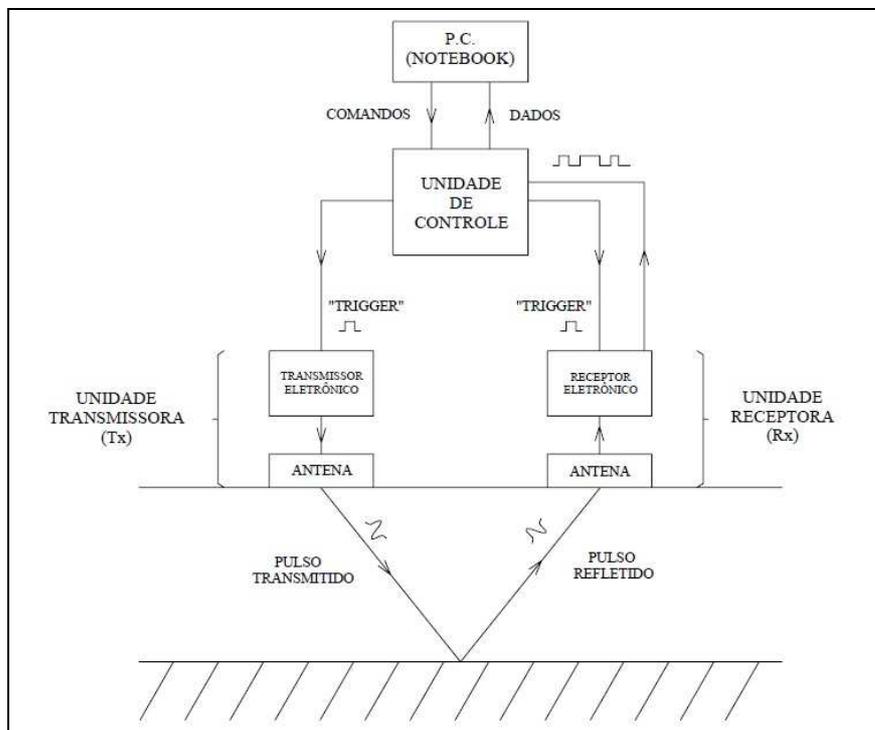


Figura 3.17 – Diagrama esquemático de um sistema GPR (adaptado de Davis e Annan, 1989).

Este método de investigação é bastante utilizado devido à sua versatilidade em campo, pela sua simplicidade de coleta e armazenamento de dados, por ser um método não destrutivo, ou seja, sem realizar uma escavação ou sondagem, e por conseguir bons dados de resposta em campo, uma vez que o seu intuito é o de identificar contrastes das propriedades elétricas para caracterizar as condições geológicas do meio.

As ondas eletromagnéticas emitidas se deslocam com uma velocidade (v) através da permissividade dielétrica de cada meio geológico ($\epsilon = K \cdot \epsilon_0$), com valores distintos de constante dielétrica (K), condutividade elétrica (σ) e atenuação (α) para cada tipo de material, sendo o meio a variável mais importante. Quanto maior for esta variação de propriedades elétricas, melhores serão os resultados deste tipo de investigação. A Tabela 3.2 apresenta valores típicos de propriedades elétricas para alguns materiais geológicos numa faixa de frequência de 80 a 120 MHz (Neal e Roberts, 2000).

Tabela 3.2 – Exemplos de valores de propriedades elétricas para materiais geológicos típicos em uma faixa de frequência de 80 a 120 MHz. (Adaptado de van Heteren *et al.*, 1998; Davis e Annan, 1989; Theimer *et al.*, 1994 e van Overmeeren, 1994 *apud* Neal e Roberts, 2000).

Meio	Constante Dielétrica (K)	Velocidade da Onda (v) [m/ns]	Condutividade [mS/m]	Atenuação [dB/m]
Ar	1	0,3	0	0
Água doce	80	0,033	0,5	0,1
Água do mar	80	0,01	30.000	1.000
Areia não saturada	2,55 - 7,50	0,1 - 0,2	0,01	0,01 - 0,14
Areia saturada	20,0 - 31,6	0,05 - 0,08	0,1 - 1,0	0,03 - 0,50
Areia e cascalho não saturados	3,5 - 6,5	0,09 - 0,13	0,007 - 0,060	0,01 - 0,10
Areia e cascalho saturados	15,5 - 17,5	0,06	0,7 - 9,0	0,03 - 0,50
Silte não saturado	2,5 - 5,0	0,09 - 0,12	1 - 100	1 - 300
Silte saturado	22 - 30	0,05 - 0,07	100	1 - 300
Argila não saturada	2,5 - 5,0	0,09 - 0,12	2 - 20	0,28 - 300
Argila saturada	15 - 40	0,05 - 0,07	20 - 1.000	0,28 - 300
Turfa (água doce)	57 - 80	0,03 - 0,06	<40	0,3
Rocha sã	4 - 6	0,12 - 0,13	10^{-5} - 40	7×10^{-6} - 24
Calcários	4 - 8	0,12	0,5 - 2,0	0,4 - 1,0
Folhelhos	5 - 15	0,09	1 - 100	1 - 100
Granito	4 - 6	0,13	0,01 - 1,00	0,01 - 1,00
Gelo	3 - 4	0,16	0,01	0,01

Para utilização deste método de investigação deve-se escolher o tipo de antena e a frequência central apropriada ao estudo a ser realizado. O tipo de antena determina a sua trabalhabilidade em campo, podendo ser blindada ou não-blindada. E a frequência central delimita a profundidade na qual o sinal eletromagnético penetra no meio e o tamanho físico da antena.

Smith e Jol, (1995) estabeleceram uma relação linear entre a frequência da antena e o tempo duplo de percurso da onda eletromagnética, ou a profundidade de amostragem, de 6 antenas com diferentes frequências (12,5; 25; 50; 100; 200 e 400 MHz). A Figura 3.18 a seguir ilustra essa relação em testes feitos em sedimentos de depósitos quaternários próximos a cidade de Brigham, Utah, nos Estados Unidos da América.

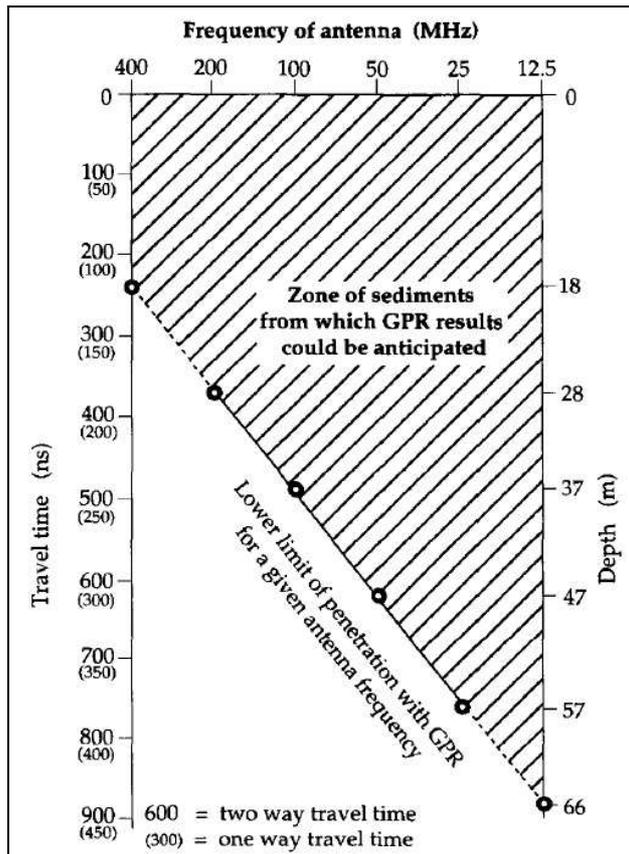


Figura 3.18 – Relação linear entre frequência da antena com a probabilidade máxima de penetração (Smith e Jol, 1995).

Segundo Rodrigues e Porsani (2006), a frequência da antena é inversamente proporcional à profundidade de investigação, ou seja, uma antena de menor frequência possui um comprimento maior de onda, fazendo com que haja maior penetrabilidade do sinal, mas como consequência dessa penetrabilidade há uma diminuição na resolução dos resultados. De maneira inversa, uma antena de maior frequência emite ondas de menor comprimento, resultando em baixa penetrabilidade e maior resolução. Comparativamente, o tamanho físico das antenas aumenta com a diminuição da frequência a ser emitida.

As antenas com frequência de 100 MHz, conforme Davis e Annan (1989), são as mais recomendadas para se obter uma boa relação entre penetração do sinal, resolução do radargrama e aplicação em diferentes materiais geológicos.

Os resultados desse método são apresentados na forma de seções onde cada posição de medida em superfície corresponde a um traço que representa o tempo duplo de percurso do sinal refletindo e difratando nas discontinuidades dos meios geológicos. Esse levantamento possibilita a coleção de um grande número de traços, que produzem uma seção de alta definição denominada de radargrama (Souza, 2005), esquematizado na Figura 3.19 abaixo.

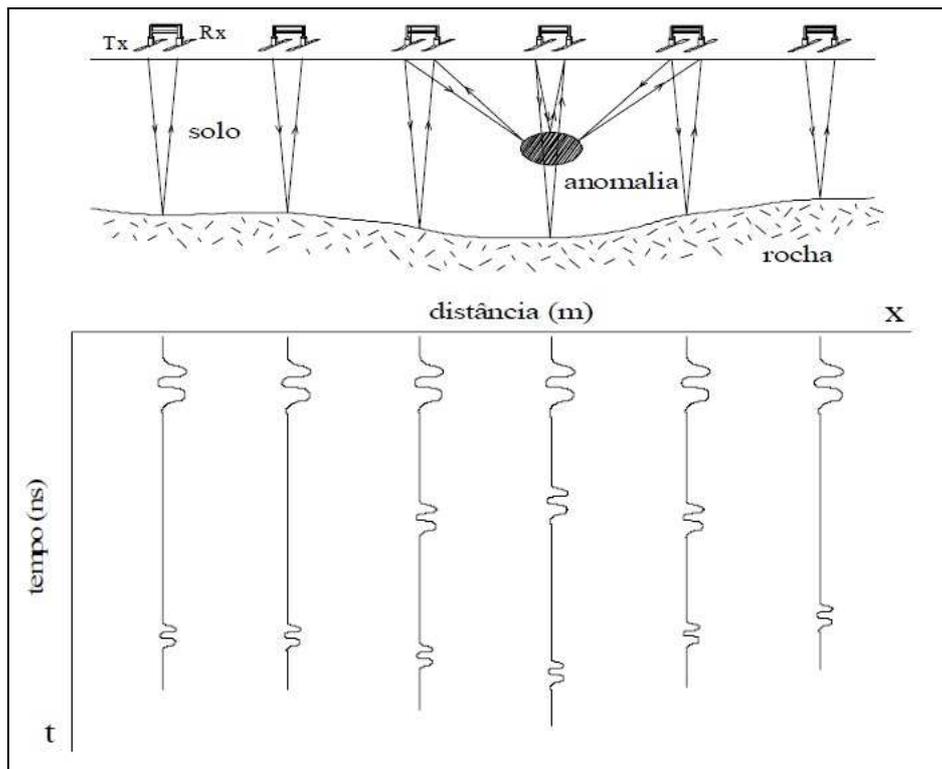


Figura 3.19 – Esquema de levantamento GPR com antenas tipo “esqui” e radargrama obtido (adaptado de Davis e Annan, 1989).

A seguir são apresentadas as antenas utilizadas nos trabalhos de levantamento geofísico, tanto o terrestre no entorno do Autódromo de Jacarepaguá, como o lacustre na Lagoa de Jacarepaguá. Todas as informações referentes às antenas foram baseadas do *site* da própria fabricante, *Mäla Geoscience*.

- **Blindada de 250 MHz**

A antena blindada de 250 MHz demonstrada na Figura 3.20, é de uso geral utilizada para pesquisas de penetração e resolução médias, comparadas com outras frequências de antenas blindadas. A construção deste tipo de antena faz com quem sejam especialmente adequadas para investigações urbanas, ou em locais com muito ruído, uma vez que esta blindagem protege a antena receptora de ruídos externos. Ruídos podem ser entendidos como interferências externas não desejadas, influenciando nas informações coletadas durante o percurso do sinal eletromagnético.

As duas antenas, transmissora e receptora, são dispostas em uma distância fixa dentro de uma carcaça de metal que fica em contato com o solo. Por apresentar esta configuração, não há captação de sinais de outras direções que não do fundo da caixa, sendo este um material mais condutivo que o ar.



Figura 3.20 – Antena blindada de 250 MHz com a unidade controle, computador e as baterias do sistema GPR.

- **Não-blindada de 100 MHz**

A Figura 3.21 apresenta a antena não-blindada de 100 MHz, que pode ser utilizada de maneira geral, com boa relação de profundidade de penetração e resolução. Pode ser usada para aplicações que exigem profundidade de penetração máxima e que ruídos externos não sejam determinantes para o projeto.

São antenas leves e feitas para levantamentos com apenas uma pessoa, permitem flexibilidade na distância entre as unidades, transmissora e receptora, podendo ser utilizada em coletas de dados para cálculos de velocidade da onda no meio.

Alguns exemplos onde elas podem ser empregadas são: estudos de rios e aterros, mapeamento de fundo de um lago ou dutos profundos, ou ainda detecção de embasamentos rochosos.

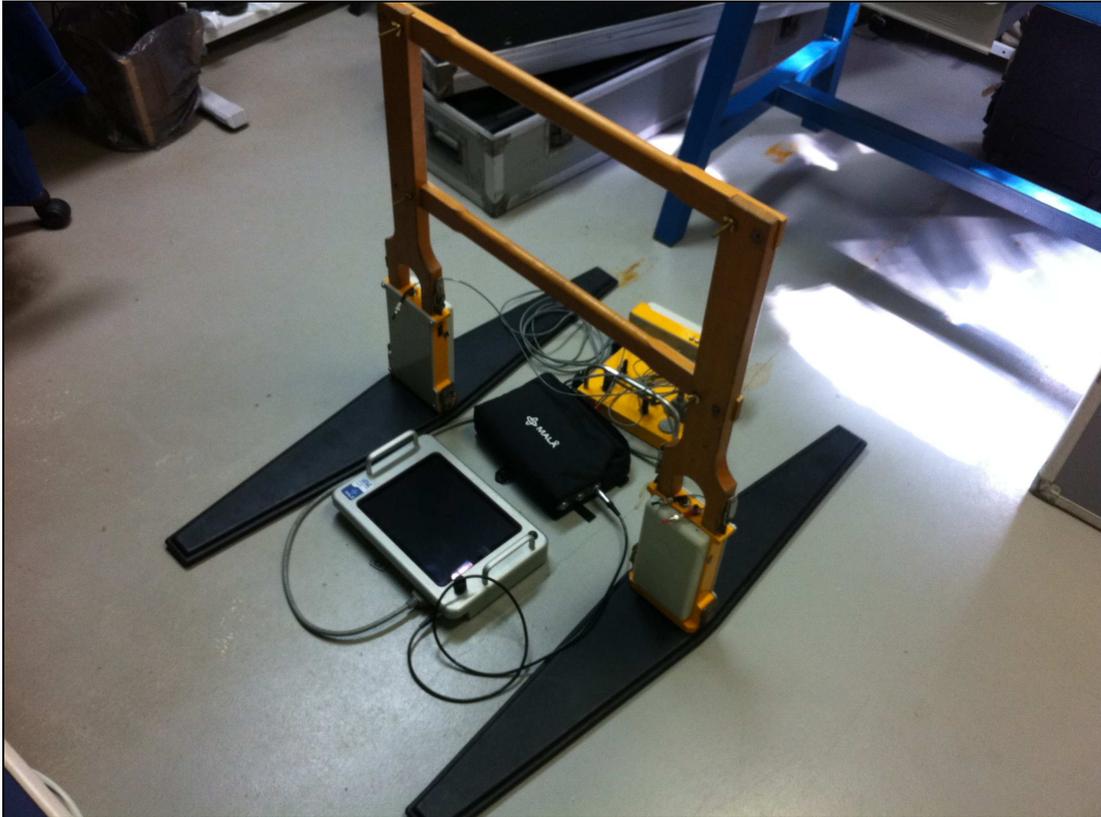


Figura 3.21 – Antena não-blindada de 100 MHz com a unidade controle, computador e as baterias do sistema GPR.

- **RTA de 50 e 100 MHz**

As antenas RTA (*Rough Terrain Antenna*), ou antena para terrenos acidentados, são antenas GPR que permitem levantamentos em qualquer tipo de terreno com boa penetrabilidade, e podem ser visualizadas na Figura 3.22 a seguir.

O design do equipamento completo contém um suporte para o computador adaptado a uma mochila, e esta, portando uma unidade de controle, arrasta as antenas, transmissora e receptora, dispostas em uma linha flexível pelo terreno. Esta configuração facilita muito as manobras feitas em campo, influenciando diretamente na eficiência do equipamento ao se trabalhar em áreas com relevo acidentado, ou vegetação fechada. Um dos maiores benefícios do equipamento é que o operador não necessita “limpar” o caminho antes da realização da sondagem geofísica.

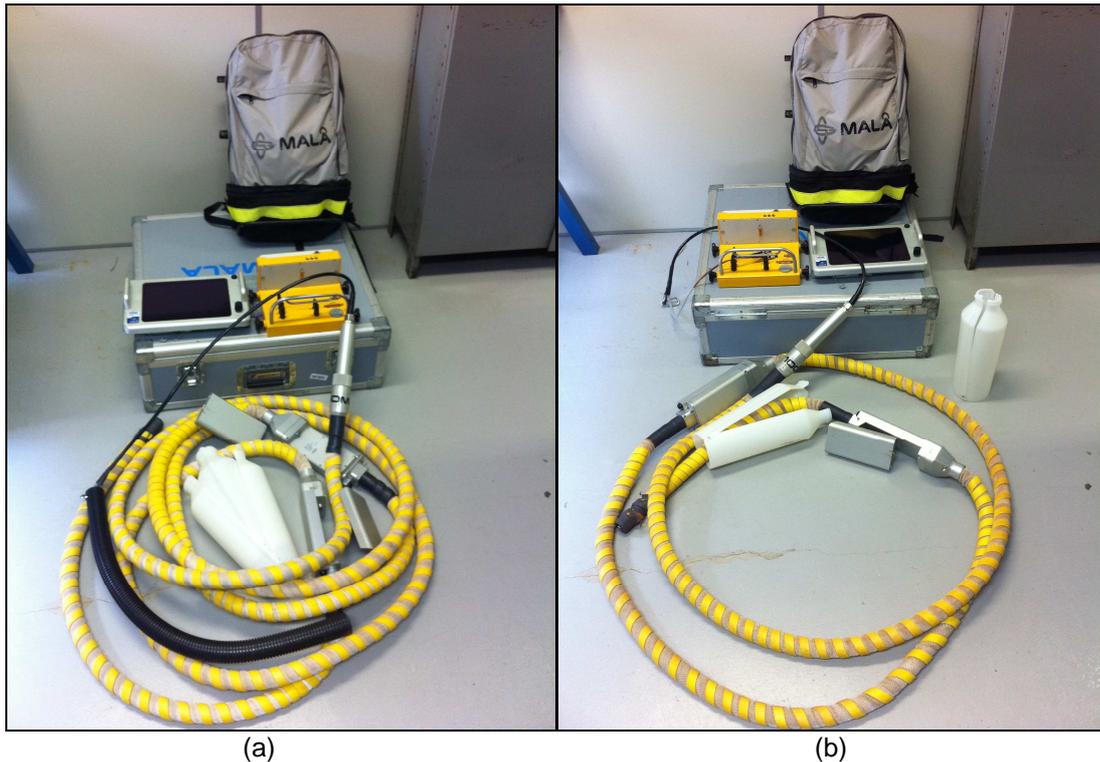


Figura 3.22 – Antenas RTA de (a) 50 MHz e (b) 100 MHz, com a unidade controle, computador, mochila e as baterias do sistema GPR.

3.2.6. Célula de Fluxo e Condutímetro

Para os trabalhos de medição de condutividade elétrica da água em profundidade e do sedimento na Lagoa foram utilizadas uma célula de fluxo e um condutímetro.

Este equipamento consiste em uma célula de fluxo com a entrada conectada a uma bomba submersível de 12 volts, com a mangueira acoplada a uma corda graduada a cada 10 cm, e um condutímetro medindo a condutividade elétrica da água ao passar pela célula de fluxo. Com a corda graduada foi possível escolher as profundidades em que a água seria succionada, e o descarte da água era feito na própria Lagoa. A aquisição das leituras foi feita por meio de um *datalogger*. Na Figura 3.23 pode-se visualizar o equipamento.

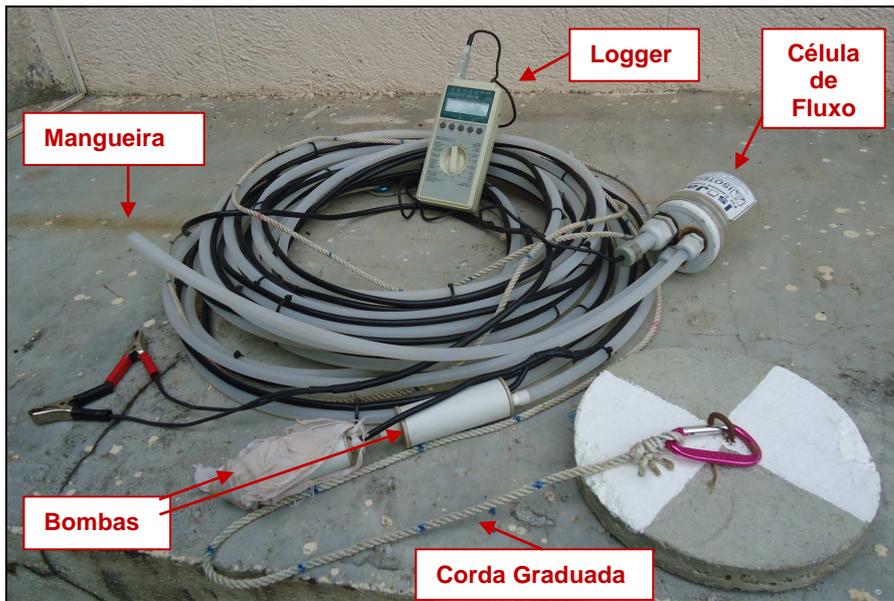
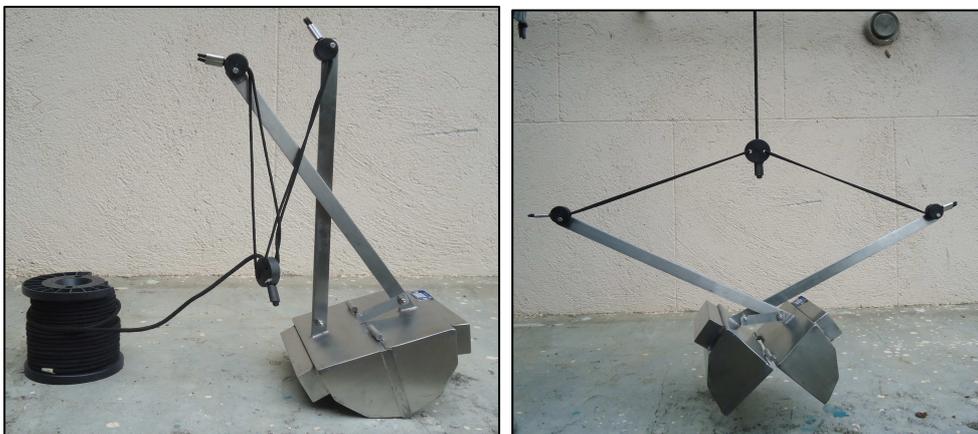


Figura 3.23 – Equipamento com célula de fluxo, condutivímetro e bomba submersível de 12 volts.

3.2.7. Draga

Foi utilizada uma draga modelo *Van Veen* (Figura 3.24) para coletar amostras de sedimento de fundo da Lagoa de Jacarepaguá para medir a condutividade elétrica destas nos pontos que foram realizadas as medidas de condutividade na água em profundidade.



(a) fechada

(b) aberta

Figura 3.24 – Draga Van Veen (a) fechada e (b) aberta.

3.3. Softwares

Neste terceiro e último item do capítulo são apresentados os *softwares* utilizados para gerenciar os dados obtidos, realizar as modelagens, batimétrica e geológica, elaborar um boletim de sondagem modelo, e processar os dados obtidos

no GPS e no GPR em campo. De certa forma são os “equipamentos virtuais” utilizados para a execução do trabalho.

3.3.1. ArcGIS

O *ArcGIS 9.3* é um programa computacional de Sistema de Informações Geográficas (SIG, ou GIS em inglês), que gerencia dados geográficos. Basicamente este software apresenta diferentes interfaces utilizadas para se trabalhar os dados, são elas:

- *ArcMap* – manipula, cria, visualiza e analisa os mapas;
- *ArcCatalog* – gerencia os arquivos existentes e;
- *ArcToolbox* – é um conjunto de ferramentas de conversão de dados.

Este programa foi utilizado para determinar os pontos, em coordenadas UTM com datum SAD69, que delimitam a Lagoa de Jacarepaguá, para auxiliar na manipulação dos dados batimétricos. O procedimento para obtenção destes dados será apresentado no item 4.2.1, que correspondem aos dados de entrada do Modelo Batimétrico no Capítulo 4 (Apresentação e Discussão dos Resultados).

3.3.2. Rockworks

O software *Rockworks14*, comercializado pela *Rockware Incorporated*, é um programa computacional que gerencia, analisa e visualiza dados geológicos de superfície e subsuperfície de uma maneira relativamente simples, trabalhando com uma malha de pontos em sua modelagem, ou um sólido de blocos (volumes constantes ou *voxels*) para casos em 3D, onde pode ser representado na Figura 3.25 a seguir.

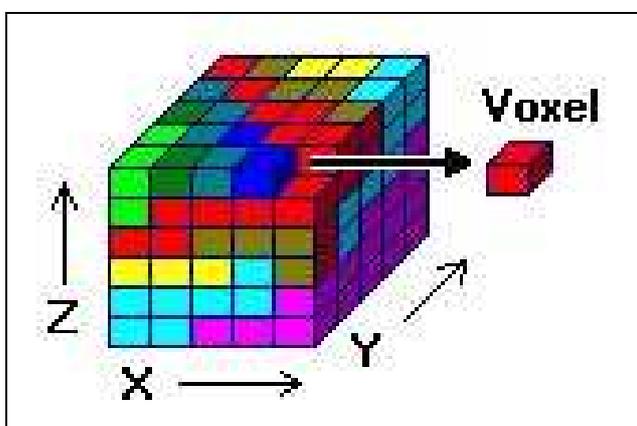


Figura 3.25 – Volume constante utilizado para construção do sólido (*RockWorks*, 2008).

Introduzindo-se os dados de entrada neste pacote computacional é possível ter uma gestão integrada do projeto e, utilizando artifícios do programa, são feitas modelagens e visualizações de diversas maneiras, como mapas de 2 e 3 dimensões, seções transversais e cortes em planta, além de planilhas e gráficos de controle.

A forma de inserção dos dados é simples, pois existe a opção de se catalogar os dados em planilhas tipo Excel. Dessa forma, é criada uma planilha com todos os dados existentes do projeto, como profundidade da sondagem e do nível d'água, materiais encontrados em cada camada, coordenadas, altitude, fraturas, concentrações de contaminantes e coeficientes de diversas propriedades. Esta planilha global é importada para o programa para que os dados possam ser manejados e desenvolvidos no mesmo.

O programa permite realizar modelagens de acordo com o tipo de propriedade (variável) que se deseja estudar. É possível criar superfícies 2D e 3D a partir de litologias, estratigrafias, aquíferos, intervalos de dados (*I-Data*) e dados pontuais (*P-Data*) e dependentes do tempo (*T-Data*).

A modelagem a partir de dados litológicos cria um modelo sólido a partir das descrições encontradas nos boletins de sondagem, permitindo selecionar algumas configurações para sua construção, como:

- Harmonização Aleatória (*Randomize Blending*): este recurso minimiza mudanças abruptas na litologia, resultando em um modelo mais misturado, bem como um geólogo pode desenhar à mão, conforme demonstrado na Figura 3.26. No entanto, por ser um processo aleatório, modelos litológicos criados sucessivamente a partir dos mesmos dados serão um pouco diferentes;

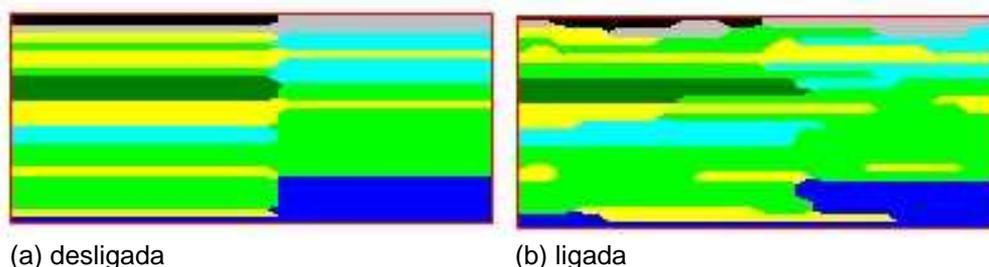
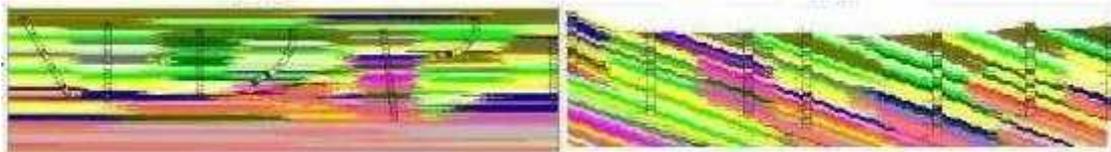


Figura 3.26 – Função *Randomize Blending* (a) desligada e (b) ligada (RockWorks, 2008).

- Interpolação de Pontos Externos (*Interpolate Outliers*): infere valores de G à todos os volumes constantes (*voxels*) do bloco litológico a ser criado. Se este recurso não for selecionado será determinada uma distância de corte

(*cutoff*) para o modelo igual à menor distância existente entre duas sondagens.

- Modelagem Inclinada (*Tilted Modeling*): impõem uma direção de mergulho (azimute de 0° a 360°) e um mergulho (ângulo 0° sen do horizontal e ângulo -90° sendo vertical para baixo) determinados pelo usuário, introduzindo um gradiente regional na interpolação do modelo, como pode ser visualizado Figura 3.27;



(a) normal

(b) inclinada

Figura 3.27 – Função *Tilted Modeling* (a) normal e (b) inclinada (RockWorks, 2008).

- Filtro de Superfície Superior (*Upper Surface Grid Filter*): limita o modelo por uma superfície superior, vide Figura 3.28. O usuário deve identificar qual são a superfície e o tamanho do *buffer*, onde o valor 1 representa a distância de um nó vertical, relativo às dimensões do projeto;

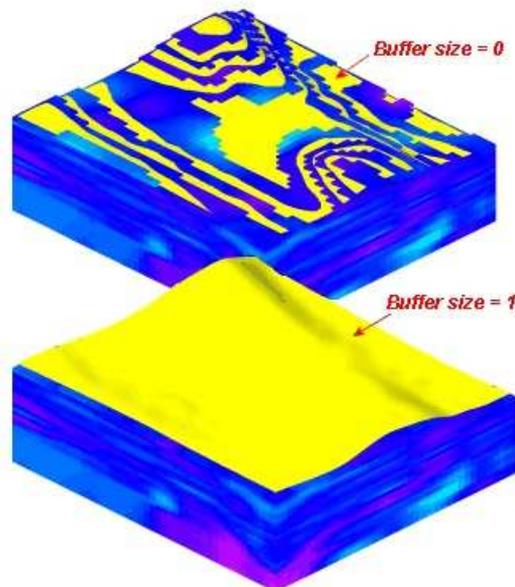


Figura 3.28 – Opção *Buffer Size* da função *Upper Surface Grid Filter* (RockWorks, 2008).

A modelagem estratigráfica permite a utilização de diversos métodos geoestatísticos de interpolação de superfície, como Krigagem, Triangulação,

Inverso da Distância e Superfície de Tendência, dentre outros, assim como demais algoritmos (funções), independente do método de interpolação utilizado.

O método de interpolação por Triangulação utiliza uma cadeia de triângulos, onde os vértices dos triângulos são os dados inseridos no programa, com um fator de ponderação baseado na distância do vértice para o nó a ser estimado da malha. A Triangulação de Delaunay é o processo geralmente mais utilizado por buscar construir uma rede de triângulos equiláteros, diminuindo assim o erro de interpolação deste método. É recomendado utilizar este método quando os dados forem regularmente distribuídos no campo de estudo, quando não for necessária a estimativa de valores fora dessa área e existir grandes diferenças entre os dados, contudo produz superfícies com contornos muito angulares (Landim, 2000).

A interpolação por Inverso da Distância usa uma abordagem de média ponderada, para calcular os valores dos nós da malha. O valor de um nó é determinado através da média dos dados vizinhos, atribuindo-se pesos relativos às distâncias para cada nó, atenuando assim, a influência dos pontos mais distantes. Indicado quando existir uma distribuição uniforme dos dados e para destacar anomalias locais, no entanto não é recomendado quando se deseja estimar exatamente as isolinhas se não contiver o valor exato destas isolinhas, e quando as amostras estiverem dispostas de maneira esparsa (Landim, 2000).

O método de Superfície de Tendência procura encontrar tendências regionais na distribuição dos dados, utilizando polinômios de diversas ordens a fim de ajustar da melhor maneira a superfície de tendência gerada. Gera bons resultados quando usa uma grande quantidade de pontos, regularmente distribuídos, podendo gerar novos dados em áreas com dados esparsos. No entanto, uma distribuição com alta variabilidade de valores, poucos dados e/ou irregularmente dispostos influencia erroneamente os resultados (Landim, 2000).

Segundo Vieira (1997) e Alessi (2011), a interpolação pelo método da Krigagem leva em consideração o número, a disposição e as distâncias das amostras utilizadas, assim como a zona de influência das amostras para calcular o nó e a continuidade espacial da variável (propriedade) em estudo, esta última característica podendo ser estimada através de um semivariograma. O semivariograma é o gráfico de semivariâncias, medida de dependência espacial entre duas amostras, em função da distância a um ponto, ou seja, quanto mais próxima (alcance ou range) a amostra se encontra do ponto a ser estimado, maior é a sua influência, e à medida que a distância aumenta seu valor é dado pela média regional (patamar ou silo). Matematicamente o valor do gráfico para a distância igual a zero deveria ser nulo, no entanto encontra-se um valor não-nulo influenciado

pelo próprio ponto, chamado de efeito pepita (*nugget effect*). A Figura 3.29, logo abaixo, ilustra o exemplo de um semivariograma.

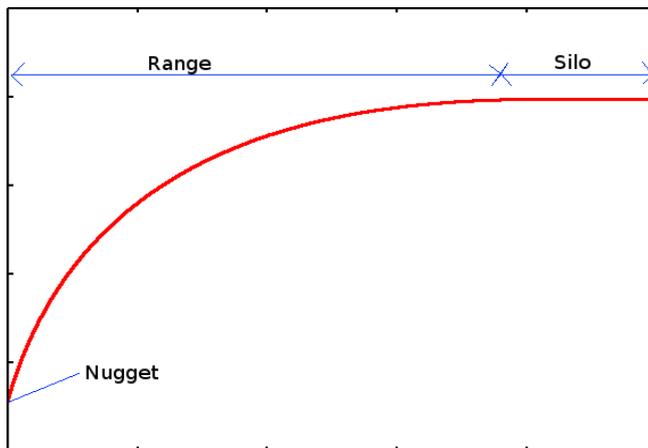


Figura 3.29 – Exemplo de semivariograma. (Wikipedia, 2011b).

Foram descritos os métodos de interpolação comumente mais utilizados, no entanto qualquer método de interpolação tenta aproximar o modelo da realidade, apresentando erros e incertezas devido ao interpolador utilizado. Dependendo da variável que se deseja estudar, a disposição, distância e quantidade de amostras escolhe-se determinado método de interpolação a fim de minimizar a geração de erros. De acordo com Krajewski e Gibbs (1966) *apud* Alessi (2011) pode-se observar na Tabela 3.3 a comparação entre os métodos de interpolação descritos acima.

Tabela 3.3 – Comparação entre os Métodos de Interpolação (Modificado de Krajewski e Gibbs, 1966 *apud* Alessi, 2011).

Método de Interpolação Sendo 1=melhor e 4=pior	Fidelidade aos Dados Originais	Suavidade das Curvas	Velocidade de Computação	Precisão Geral
Triangulação	1	4	1	4
Inverso da Distância	3	3	2	3
Superfície de Tendência	4	1	3	2
Krigagem	2	2	4	1

A Tabela 3.3, acima, e o método geoestatístico utilizado serão abordados no item 4.2.2 (Processamento do Modelo Geológico), onde são apresentadas as modelagens realizadas.

Ainda para a modelagem, mas independente do método de interpolação, existem algumas funções para auxiliar na interpolação dos dados, como por exemplo:

- Alta Fidelidade (*High-Fidelity*): garante a fidelidade do dado durante a interpolação, não calculando outros valores médios durante a interpolação para o ponto já existente, conforme exemplificado na Figura 3.30, onde as linhas azuis são curvas feitas sem a função ativada, as linhas vermelhas com a função *High-Fidelity* acionada e os pontos verdes indicam os locais onde houve mudança na curva;

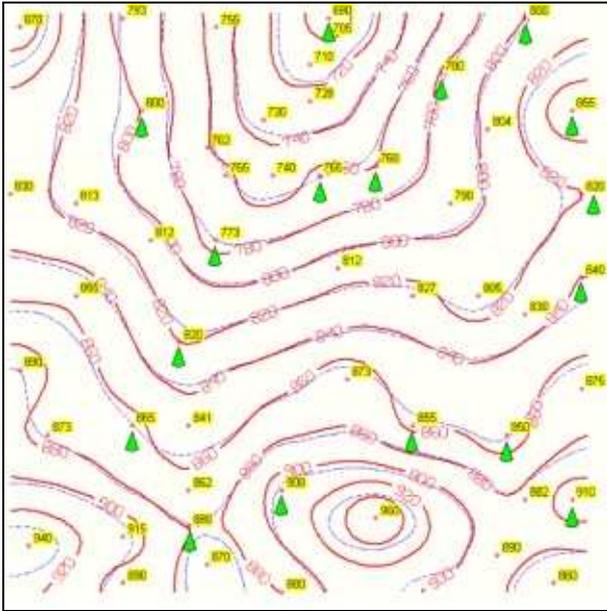


Figura 3.30 – Função *High-Fidelity* do *Rockworks* (*RockWorks*, 2008).

- Suavização da Grade (*Smooth Grid*): calcula o valor do nó da grade através de um valor médio da variável Z de pontos vizinhos ao nó. Pode-se utilizar um filtro, que determina o número de pontos adjacentes que podem ser utilizados para esse cálculo, e o número de iterações que serão feitas até chegar ao valor do nó final;
- Densificação (*Densify*): adiciona pontos pelo método de triangulação de Delaunay, citado anteriormente. Calcula-se a malha de triangulação para que sejam inseridos os pontos médios no meio do triângulo, conforme apresentado na Figura 3.31. Esta função permite salvar os pontos criados e pode ser utilizada sequencialmente, diversas vezes;

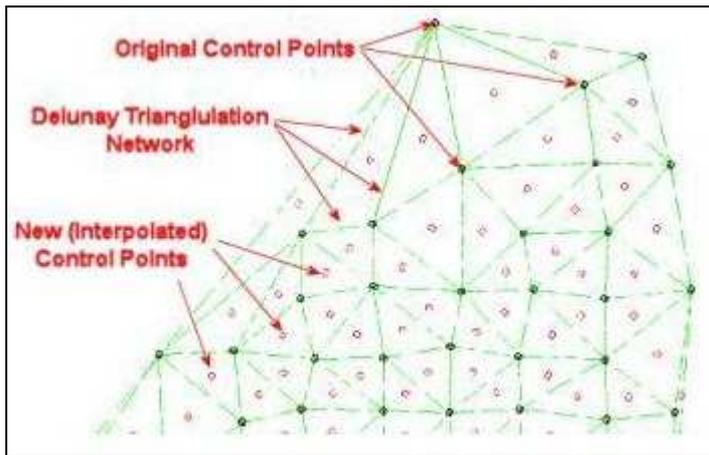


Figura 3.31 – Função *Densify* do *Rockworks* (*RockWorks*, 2008).

- Filtro de Distância Máxima (*Maximun Distance Filter*): esta função determina uma distância máxima de influência do ponto para o cálculo do nó, semelhante aos artifícios existentes na Krigagem e no Inverso da Distância. No entanto esta função não calcula pontos fora do limite estabelecido (Figura 3.32) como os métodos de interpolação fazem de maneira aleatória;

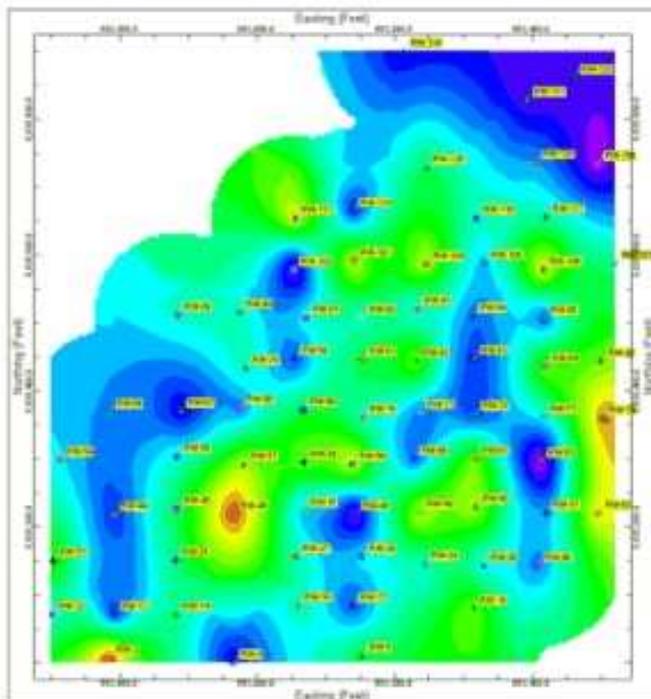


Figura 3.32 – Função *Maximun Distance Filter* do *Rockworks* (*RockWorks*, 2008).

- Sobreposição (*Onlap*): assegura que as formações mais profundas têm prioridade, por terem sido depositadas anteriormente, e as camadas mais rasas não podem atravessar, ou interferir, nestas camadas mais profundas, como pode ser observado na Figura 3.33. As camadas obedecem a ordem

do valor G de cada uma, o qual ordena a sobreposição das camadas, de cima para baixo.

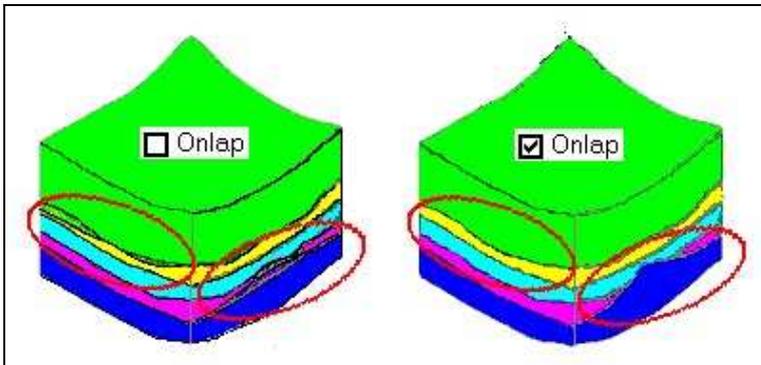


Figura 3.33 – Função *Onlap* do *Rockworks* (RockWorks, 2008).

A modelagem do aquífero permite o processamento de modelos 3D e mapas 2D a partir de dados de nível d'água, em data determinada ou intervalos de datas. Permite também a utilização dos algoritmos e métodos de interpolação iguais aos utilizados na modelagem estratigráfica. A Figura 3.34 apresenta um exemplo de modelo, no qual a camada em azul é o aquífero. Pode-se observar nesta figura que o software permite que sejam expostas as superfícies, inferior e superior, do modelo e os perfis e nomenclaturas das sondagens de forma a melhorar o entendimento sobre o modelo gerado.

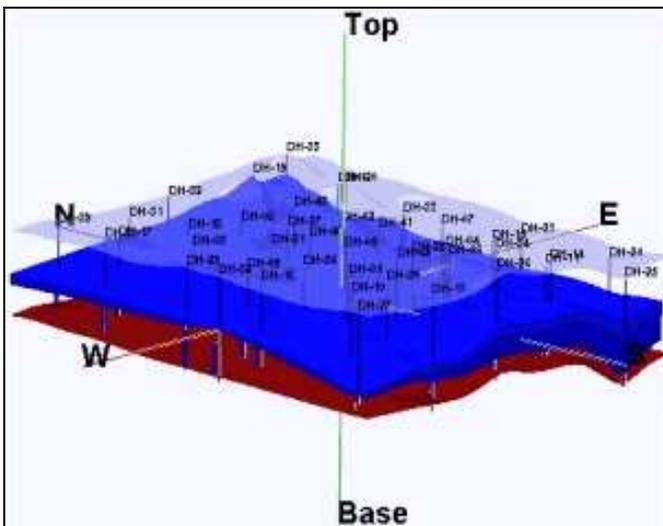


Figura 3.34 – Exemplo de modelo de Aquífero do *Rockworks* (RockWorks, 2008).

As modelagens que levam em consideração o tipo de dado amostrado sejam eles de intervalo em camadas, dependentes do tempo ou pontuais, permitem os mesmos algoritmos e alguns métodos de interpolação encontrados nas modelagens

de aquífero e estratigráfica. A diferença na modelagem é que estas modelagens permitem variações no Inverso da Distância, como isotropia e anisotropia da propriedade estipulada e, dentre os métodos de interpolação mais comuns não possibilita a utilização da Krigagem e Triangulação, indicados para cálculo de superfícies.

A escolha do tipo de modelagem depende de como é o comportamento da propriedade e, conseqüentemente como será tratada. Dados de: permeabilidade e concentrações de areia, cascalho, argila, mica ou ferro variando de acordo com cada camada, ou intervalo, podem ser abordados como *I-Data* (Figura 3.35). Dados que variem quanto ao tempo, como concentrações de contaminantes no solo ou no aquífero são tratados como *T-Data* (Figura 3.36). E dados pontuais, como a medida de resistividade em certa profundidade, são trabalhados como *P-Data* (Figura 3.37).

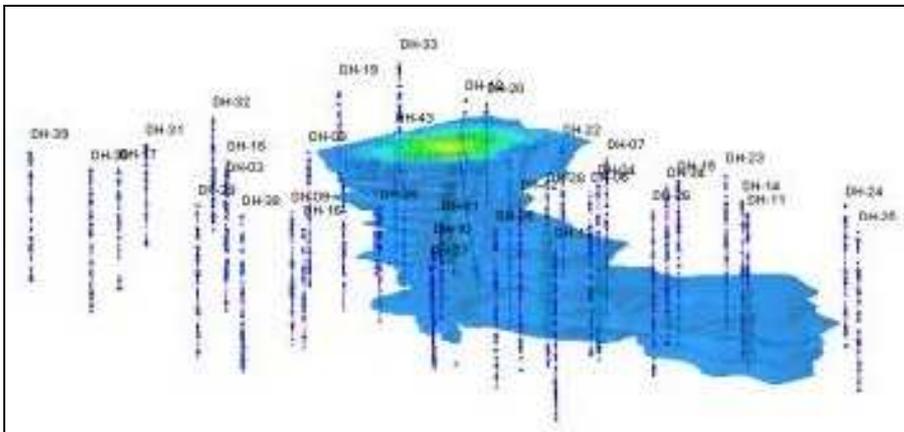


Figura 3.35 – Exemplo de modelo *I-Data* do *Rockworks* (*RockWorks*, 2008).

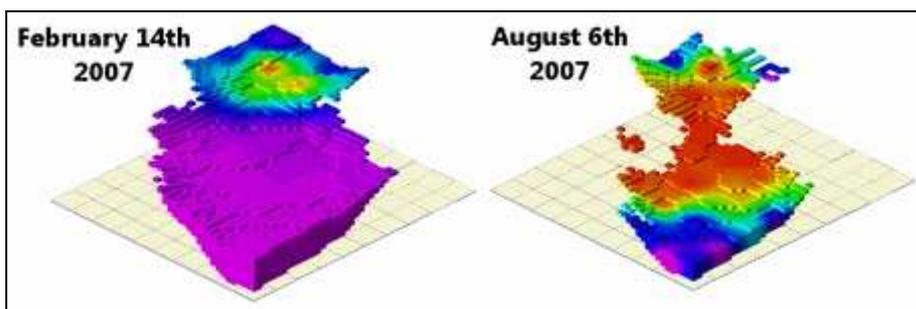


Figura 3.36 – Exemplo de modelo *T-Data* do *Rockworks* (*RockWorks*, 2008).

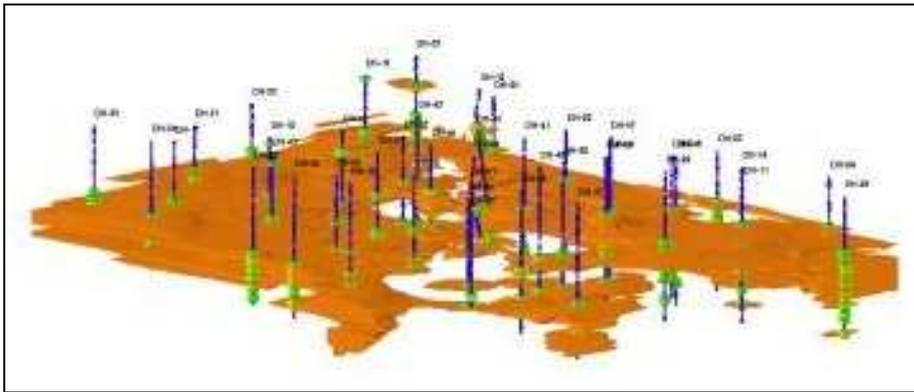


Figura 3.37 – Exemplo de modelo *P-Data* do *Rockworks* (*RockWorks*, 2008).

No entanto, os processos empregados nas modelagens, tanto Batimétrica quanto Geológica, são apresentados no Capítulo 4, Apresentação e Discussão de Resultados.

3.3.3. Logplot

Este programa computacional, *Logplot 7*, também comercializado pela *Rockware* foi utilizado para estabelecer um boletim de sondagem padrão e gerar novos boletins formatados de um mesmo *layout*. A Figura 3.38, logo abaixo, demonstra esse *layout* padrão utilizado e os alguns dos boletins utilizados na modelagem geológica, um exemplo de cada projeto, se encontram no Apêndice.

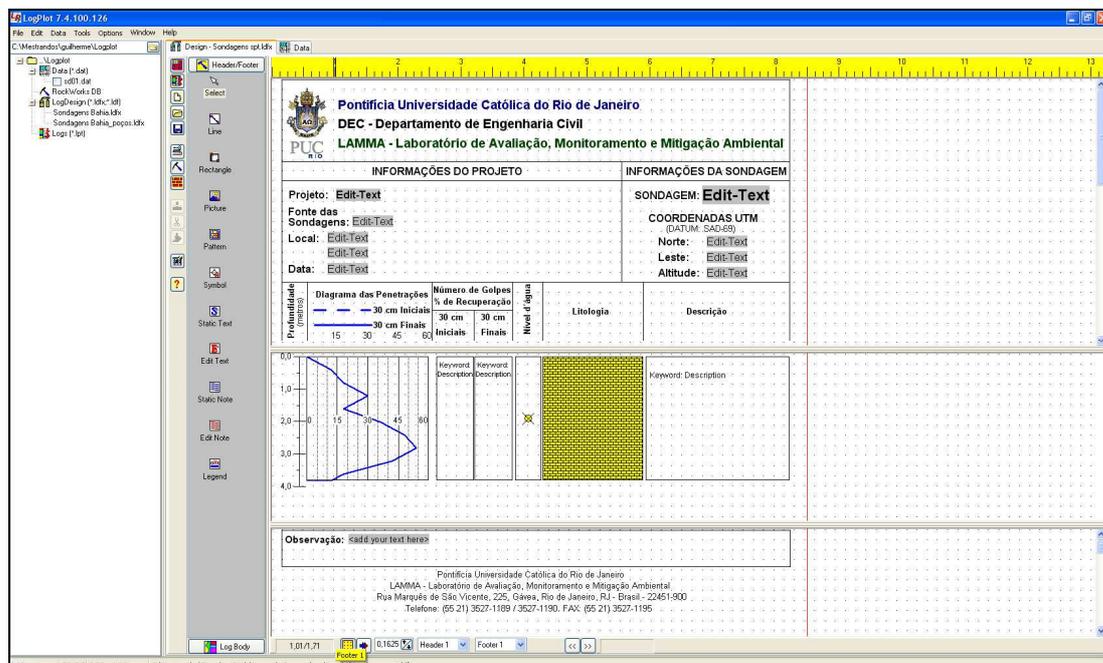


Figura 3.38 – *Layout* do boletim de sondagem padrão no *Logplot*.

3.3.4. *RadExplorer*

O *software* RadExplorer foi projetado para o processamento e interpretação de seções GPR. Possui interface amigável que permite dominar rapidamente o programa para execução do processamento.

Este *software* é compatível com os formatos dos principais produtores de seções GPR incluindo SIR (GSIS), PulseEKKO (Sensores e *Softwares*), Zond (Sistemas de Radar), OKO (Logis), SEG-Y formato internacional com possibilidade de redefinição do campo e no caso desta dissertação RAMAC/GPR (Mala Geoscience).

O programa permite realizar todo o processamento e interpretação de dados GPR no âmbito de um único sistema: leitura e visualização de radargrama, remoção de DC, correção de amplitude, deconvolução, correção de topografia, determinação de velocidade de propagação constante dielétrica/de ondas eletromagnéticas, escolhendo reflexão, construção do modelo e conversão tempo em profundidade.

A maioria das rotinas de processamento determina seus parâmetros padrões de acordo com as propriedades registradas. Se o usuário não tem certeza sobre a seleção dos parâmetros de processamento, o uso dos parâmetros padrões pode muitas vezes assegurar um resultado aceitável.

3.3.5. *GPS Mapper*

O *software* MALA *GPS Mapper* proporciona ao usuário, uma fácil ferramenta de visualização de perfis ou traçados GPR georreferenciados no *Google Earth*. Ele manipula 3 diferentes tipos de arquivos (Marcações do RAMAC em arquivos de extensão mrk, a faixa do GPS do RAMAC em arquivos com extensão cor e arquivos (exportados do *Reflex* ou *RadExplorer*) contendo as interpretações do radar, e os converte para arquivos com extensão kmz.

A Figura 3.39, demonstra o *layout* de entrada das informações.

Para esta dissertação, foram geradas imagens no *Google Earth* por meio do lançamento das coordenadas dos traçados dos perfis GPR realizados para validação dos modelos Batimétrico e o Geológico gerados que são apresentados no Capítulo 4.

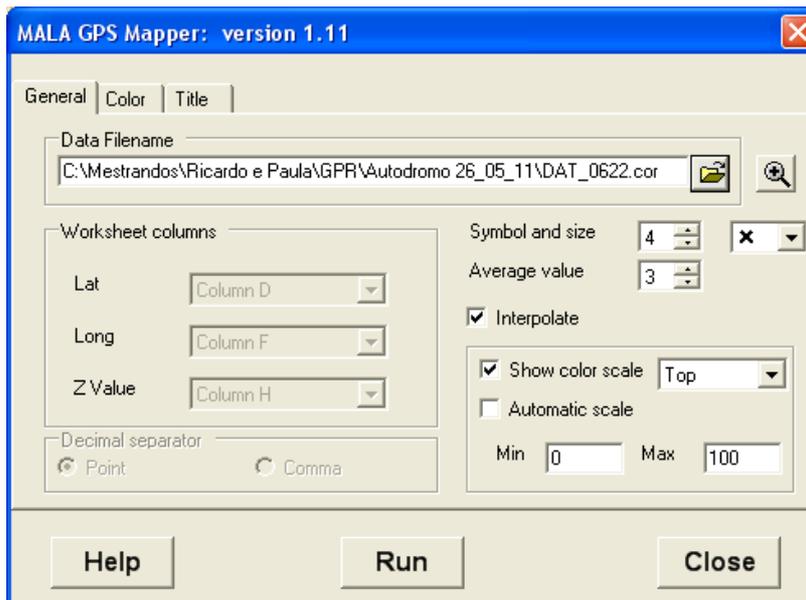


Figura 3.39 - Layout do software GPS Mapper.