

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

**ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS DE
MONITORAMENTO DE NÍVEL D'ÁGUA EM POÇOS
NO AQUÍFERO RIO CLARO**

Dagmar Carnier Neto

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao
Programa de Pós-Graduação em Geociências
e Meio Ambiente - Área de Concentração
em Geociências e Meio Ambiente
para obtenção do Título de Mestre em
Geociências.

Rio Claro (SP)

2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Prof. Dr. Paulo M. Barbosa Landim

Prof. Dr. Alexandre Campana Vidal

Aluno

Dagmar Carnier Neto

Rio Claro, 25 de Agosto de 2006

Resultado: Aprovado com Distinção

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Gerson e Marisa, que sempre estiveram ao meu lado
em todos os momentos da vida, e que se Deus quiser ainda
continuarão por vários anos,
e a Samira Athiê, um anjo que Ele
pôs em meu caminho.*

A G R A D E C I M E N T O S

Primeiramente ao Deus Pai, por ter me dado saúde para trabalhar e sabedoria para escolher os caminhos certos.

À minha família, pela força e compreensão.

Ao Prof. Dr. Chang Hung Kiang, pela confiança em mim depositada e que tem sido, mais que um orientador, um verdadeiro Mestre durante esses anos de convivência.

Ao pessoal do LEBAC e do H2L, em especial à Andresa e à Cristiane, pelo apoio.

SUMÁRIO

Índice	i
Índice de Tabelas	iii
Índice de Figuras	iv
Resumo	vi
Abstract	vii
1 – Monitoramento em Poços Tubulares	01
2 – Geologia da Área	04
3 – Materiais e Métodos	07
4 – Tratamento dos Dados	31
5 – Resultados do Monitoramento	36
6 – Análise dos Dados de Monitoramento	45
7 – Conclusões	58
8 - Referências Bibliográficas	59
ANEXO – Dados de Monitoramento de Coluna d'Água e Pluviometria	A-1

ÍNDICE

1 – Monitoramento em Poços Tubulares	01
1.1 – Introdução	01
1.2 – Objetivo	01
1.3 - Monitoramento – Conceito Geral	02
1.4 - Monitoramento em Poços Tubulares	03
2 – Geologia da Área	04
2.1 – Formação Rio Claro	04
2.2 – Aquífero Rio Claro	05
3 – Materiais e Métodos	07
3.1 - Medição de Coluna d'Água	07
3.1.1 – Sensores	07
3.1.2 - Indicador (<i>display</i>)	09
3.1.3 - Computador e <i>Software</i> de Leitura	10
3.2 – Poços de Monitoramento	12
3.3 – Métodos Matemáticos	14
3.3.1 – Análise de Fourier	14
3.3.2 – Correlação Cruzada	21
3.3.3 – Análise de Reescalonamento (Análise R/S)	26
4 – Tratamento dos Dados	31
4.1 – Problemas Relacionados aos Dados de Monitoramento	31
4.2 – Programas Utilizados para o Tratamento dos Dados	33

5 – Resultados do Monitoramento	36
5.1 – Ciclos Seculares ou Sazonais	36
5.2 – Variações Devido ao Efeito de Maré Terrestre	37
5.3 – Efeitos de Terremotos	42
6 – Análise dos Dados de Monitoramento	45
6.1 – Análise de Fourier	45
6.2 – Análise de Correlação Cruzada	50
6.3 – Análise de Reescalonamento	53
7 – Conclusões	58
8 – Referências Bibliográficas	59
ANEXO - Dados de Monitoramento de Coluna d'Água e Pluviometria	A-1

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dados dos poços de monitoramento IGCE-3 e IGCE-6.	13
Tabela 6.1 - Resultados da estimativa do expoente de Hurst sobre os dados de coluna d'água.	54
Tabela 6.2 – Resultados da estimativa do expoente de Hurst sobre dados de pluviometria.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama mostrando um processo de medição.	03
Figura 2.1 - Mapa geológico do Município de Rio Claro	06
Figura 3.1 – Visão explodida do transdutor de pressão utilizado para medição da coluna d’água.	08
Figura 3.2 – Comparação entre transdutores com relação à compensação barométrica.	09
Figura 3.3 – Computador ligado ao indicador de coluna d’água, rodando o Wellplex.	10
Figura 3.4 – Tela de configuração do Wellplex.	11
Figura 3.5 – Tela do Wellplex mostrando duas janelas de monitoramento, em tempo real e com arquivo de monitoramento gravado em disco.	11
Figura 3.6 – Poços de monitoramento localizados em frente ao H2L.	12
Figura 3.7 – Localização aproximada dos poços de monitoramento IGCE-3 e IGCE-6.	13
Figura 3.8 – Gráfico da função (2.13).	17
Figura 3.9 – Espectrograma da função (2.13).	18
Figura 3.10 – Gráfico da função(2.14).	19
Figura 3.11 – Espectrograma da função (2.14).	19
Figura 3.12 – Gráfico da função (2.14) adicionada de ruído branco gaussiano.	20
Figura 3.13 – Espectrograma da função (2.14) adicionada de ruído branco gaussiano.	21
Figura 3.14 – Gráfico das equações (2.21) e (2.22).	24
Figura 3.15 – Correlograma das funções (3.20) e (3.21).	24
Figura 3.16 – A função f_2 é deslocada 20s para frente no tempo, em relação a f_1 .	25
Figura 3.17 – Novo correlograma das funções da Figura 3.16.	26
Figura 3.18 – Diagrama mostrando o processo para a estimativa do expoente de Hurst.	29
Figura 3.19 – Gráfico log-log de R/S x tempo da atividade mensal de manchas solares.	30
Figura 4.1 – Tela do Wellutil, usado no tratamento dos dados de monitoramento.	34
Figura 4.2 – Tela do TSoft,, com dados de maré e de pressão atmosférica.	34
Figura 5.1 – Ciclos sazonais com inicio em Setembro de 2001 até Março de 2006.	36
Figura 5.2 – Gráficos do Tsoft com dados de coluna d’água e de pluviometria.	37.
Figura 5.3 – Efeito da rotação da Terra nas marés.	39
Figura 5.4 – Efeito da posição relativa do Sol e da Lua sobre as marés.	40
Figura 5.5 – Oscilações da coluna d’água devido à maré terrestre, Março de 2002 .	41
Figura 5.6 – Oscilações durante a fase de lua cheia .	41

Figura 5.7 – Oscilações durante a fase de quarto minguante.	42
Figura 5.8 – Oscilação devido ao terremoto no dia 23 de Junho de 2001 – Peru, e seu <i>aftershock</i> , em 7 de Julho.	43
Figura 5.9 – Oscilação devido ao terremoto ocorrido no Alaska, em Novembro de 2002.	43
Figura 5.10 – Oscilação causada pelo terremoto na Colômbia, em Novembro de 2004.	44
Figura 6.1 – Trecho da série temporal de 2003 escolhido para análise das marés.	45
Figura 6.2 – Espectro das oscilações de maré.	46
Figura 6.3 – Oscilações devido à maré terrestre, em 2004.	47
Figura 6.4 – Espectrograma das oscilações de maré do trecho de 2004.	47
Figura 6.5 – Comparação entre os comportamentos das marés das séries analisadas, em 2004 (topo) e 2003.	48
Figura 6.6 – Espectrograma da série temporal completa, de 2002 a 2005.	49
Figura 6.7 – Pico de frequência que mostra a variação sazonal de 0.0027 ciclos/dia (uma vez por ano).	50
Figura 6.8 – Correlograma resultante da análise dos dados de coluna d'água e pluviometria.	51
Figura 6.9 – Correlograma mostrando o efeito de um deslocamento temporal negativo de 87 dias na série de dados de coluna em relação à pluviometria.	52
Figura 6.10 – Tela do programa para cálculo do expoente de Hurst.	53
Figura 6.11 – Gráfico dos pontos da Tabela 5.1, juntamente com a reta ajustada da análise R/S para os dados de variação de coluna d'água.	54
Figura 6.12 – Gráfico dos pontos da Tabela 5.2 e a reta de ajuste da análise R/S para os dados de pluviometria.	56
Figura 6.13 – Quebra de inclinação próxima de $t = 132$ meses = 11 anos, no gráfico de $\text{Log}(R/S) \times \text{Log}(\text{tempo})$ para a série temporal de dados de manchas solares.	57
Figura 6.14 – O mesmo tipo de quebra da Figura 5.13, porém mais sutil, no gráfico da série temporal de coluna d'água, em $t = \log_2 8192$ horas = 341 dias.	57

RESUMO

Esse trabalho apresenta os resultados obtidos com o monitoramento detalhado de nível d'água, realizado no período de 2002 a 2005 em poços no Aquífero Rio Claro. Os problemas encontrados durante a coleta de dados dos poços de monitoramento foram solucionados por meio de programas desenvolvidos para este fim. Em seguida, os dados já tratados serviram à avaliação qualitativa dos fenômenos observados e comparados com aqueles encontrados na literatura. Por fim, foram aplicadas técnicas de análise de séries temporais (Análise de Fourier, Correlação Cruzada e Análise R/S) a esses dados, a fim de se verificar as periodicidades de alguns fenômenos naturais, como os ciclos sazonais e de maré terrestre, bem como estimar a relação temporal entre a pluviometria e a recarga, e avaliar o grau de persistência e auto-correlação das variações de nível d'água. Os resultados obtidos mostram que o monitoramento detalhado é capaz de fornecer informações que, além de contribuir para um melhor conhecimento das características do aquífero, podem auxiliar em processos de remediação, através da melhor caracterização da variação do nível d'água e seu conseqüente transporte vertical de contaminantes.

Palavras-chave: monitoramento de água subterrânea; Aquífero Rio Claro; séries temporais; Análise de Fourier

ABSTRACT

This work presents the results of detailed water level monitoring in the course of 2002 to 2005 in monitoring in wells on Rio Claro Aquifer. Problems found during data acquisition were solved by specific programs developed for this purpose. Qualitative evaluation of observed phenomena was made, comparing it with those from literature and, at the end, methods to time-series analysis were applied on data (Fourier Analysis, Cross-Correlation and R/S Analysis), in order to verify the periodicities of natural phenomena, like those resulting from seasonal cycles and earth-tides, to estimate temporal relationship between rainfall and well recovering, and evaluate the persistence and degree of auto-correlation of water levels variations. The results shows that detailed monitoring process gives important information that leads to a better knowledge on the aquifer characteristics, and it can help remediation process through a better characterization of water level variations and its consequent vertical transport of contaminants.

Keywords: *groundwater monitoring; Rio Claro Aquifer; time-series; Fourier Analysis*

Capítulo 1 - Monitoramento em Poços Tubulares

1.1 - Introdução

A cada ano a demanda de recursos naturais para a produção de bens e manutenção da vida, não só no Brasil como em todo o mundo, cresce proporcionalmente ao aumento da população. Dentre todos, a água, por sua importância para a sobrevivência, tem recebido atenção cada vez maior, sendo encarada também como um importante recurso estratégico futuro.

A degradação crescente e o esgotamento dos mananciais e fontes de água superficial no país têm feito com que a água subterrânea mostre-se como um recurso valioso que precisa ser cuidado e preservado, tendo em vista o fato de ser parcialmente renovável, a fim de permitir uma utilização sábia e sustentável pela sociedade. Assim, o monitoramento de poços constitui uma importante ferramenta de diagnóstico e controle das condições do aquífero, fornecendo informações que permitem saber o estado atual e as tendências dos parâmetros monitorados, registrando respostas de ações antrópicas e de fatores naturais. Com isso, tem-se o subsídio necessário para medidas de planejamento, controle, recuperação e preservação dos aquíferos, bem como meios para avaliar os resultados da atuação das instituições em relação a essas medidas.

1.2 - Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo interpretar os fenômenos que provocam a variação do nível d'água observados por meio do monitoramento automatizado em poços tubulares na Formação Rio Claro, com o uso de técnicas de análise para séries temporais. Dentre essas técnicas, utilizou-se a Transformada de Fourier para observação das diferentes frequências dos ciclos de variação, a Análise de Correlação Cruzada para avaliar a variação conjunta do nível d'água e da pluviometria, e a Análise de Reescalonamento (Análise R/S) para a estimativa do coeficiente de Hurst, um valor adimensional usado para caracterizar a natureza aleatória da série e seu grau de auto-correlação, ou seja, a influência do valor de uma amostra naquelas seguintes. Os dados utilizados provêm do monitoramento realizado durante quatro anos em dois poços perfurados no Aquífero Rio Claro, no campus da UNESP em Rio Claro, estado de São Paulo.

1.3 - Monitoramento – Conceito Geral

Entende-se por monitoramento o estudo e o acompanhamento contínuo e sistemático do comportamento de fenômenos, de eventos e de situações específicas, cujas condições deseja-se identificar, avaliar e comparar. Assim, de forma geral ele pode ser usado para:

- estudar as tendências de um fenômeno ao longo do tempo;
- gerar avaliações que permitam compreender os resultados qualitativos e quantitativos e a aplicação dos mesmos para vários usos e usuários;
- verificar as condições presentes a fim de projetar situações futuras;

O monitoramento envolve uma série de medições em intervalos de tempo idealmente, mas não necessariamente, regulares. Uma medição consiste, em termos gerais, no processo de converter alguma grandeza para um valor que possa ser interpretado e comparado com outros e/ou com um padrão definido anteriormente.

O diagrama da Figura 1.1 mostra como uma medição pode ser efetuada. Na maior parte dos casos, a medição da grandeza é incapaz de ser realizada confiavelmente apenas com os órgãos dos sentidos humanos, devido às limitações relativas a tamanho, sensibilidade, risco à saúde, etc., além da subjetividade da medida. Assim, a primeira parte da medição deve envolver o uso de um sensor, que vai transformar a grandeza (física ou química) em algum tipo de sinal que possa ser tratado.

Esse sinal, na maior parte dos sensores existentes, é de natureza elétrica e analógica, ou seja, contínua no tempo e na faixa de medição. Muitas vezes, devido à sua fraca intensidade, é necessário que se faça um condicionamento apropriado (amplificação e *offset*), cujo objetivo é aumentar a qualidade desse sinal de forma que possa convenientemente sofrer uma conversão.

Essa conversão transformará o sinal elétrico em um valor numérico, capaz de ser exibido em um mostrador e interpretado. Essa conversão pode tanto manter o sinal em sua forma analógica (usando indicadores analógicos, como um velocímetro de carro, por exemplo) ou transformar o sinal para o domínio digital, em que um circuito especial (conversor Analógico/Digital ou simplesmente ADC) irá realizar a amostragem do sinal a

uma determinada frequência e discretizá-lo, transformando-o em um valor em uma base numérica (binária ou decimal).

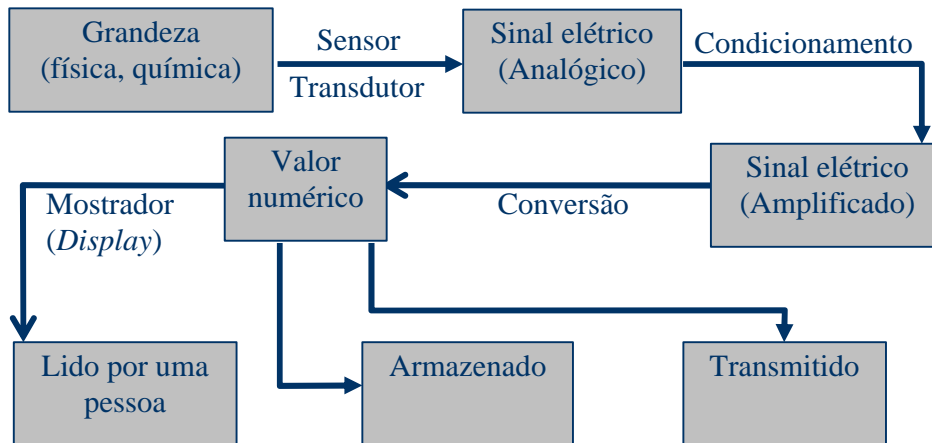


Figura 1.1 – Diagrama mostrando um processo de medição.

O valor da grandeza, nesse ponto, pode então ser simplesmente lido, armazenado de alguma forma (desde uma folha de anotações até uma memória eletrônica), transmitido através de um meio físico (como um cabo, ondas de rádio, etc) ou, ainda, uma combinação dos três.

1.4 - Monitoramento em Poços Tubulares

O monitoramento em poços tubulares tem como objetivo a avaliação do comportamento de duas características principais da água: a variação da qualidade e a variação do volume. A primeira está relacionada à sua composição química, e a alguns parâmetros físicos como condutividade elétrica, cujos valores podem indicar uma possível contaminação. A variação de volume é um indicativo direto da recarga do aquífero, que relaciona o nível d'água (nível piezométrico) com a pluviometria e que pode ser influenciada por fatores como fluxo de base, exploração e evapo-transpiração. Cargas externas, como o efeito de maré e terremotos, atuam também nos aquíferos, provocando variações no nível piezométrico (TODD, 1959).

Capítulo 2 – Geologia da Área

2.1 – Formação Rio Claro

A Formação Rio Claro é caracterizada por depósitos cenozóicos, que constituem extensas áreas de ocorrências no estado de São Paulo. Esses depósitos correspondem a níveis escalonados na paisagem, vinculados a fases de aplainamento. Suas espessuras em geral são pequenas, não ultrapassando 30 metros de espessura (FREITAS *et al.*, 1979).

Os depósitos sedimentares atribuídos à Formação Rio Claro ocorrem mais extensamente no platô do município de Rio Claro (Figura 2.1).

Fúlfaro e Suguio (1968) identificaram na Formação Rio Claro duas seqüências principais: uma basal, com 20 metros de espessura máxima, constituída por sucessões de estratos arenosos com intercalações subordinadas de leitos argilosos, foi interpretada como sendo depósitos de paleocanal fluvial, e uma superior, constituída predominantemente por sedimentos argilosos, com brechas intraformacionais e lentes arenosas subordinadas, foi interpretada como depósitos de acreção vertical, em planície de inundação. Segundo esses autores, a sedimentação da Formação Rio Claro se deu ao longo de um paleocanal fluvial, correspondente a um pretérito Rio Corumbataí, barrado à jusante pela reativação das falhas da área de estrutura de Pitanga. Segundo Penteado (1976), a acumulação da Formação Rio Claro seria o resultado de fatores climáticos e tectônicos.

Vários autores admitem causas tectônicas para sedimentação, sejam basculamentos regionais (SOARES e LANDIM, 1976 apud MELO *et al.*, 1997), seja tectônica rúptil, com formação de falhas e geração de barramentos da drenagem ou depressões (FÚLFARO e SUGUIO, 1968). Essas falhas possuem movimento vertical na área da estrutura de Pitanga, onde as principais são aquelas delimitadas pelos rios Passa Cinco (direção NW- SE) e Corumbataí (direção NE- SW).

Segundo Melo *et al.* (1997), a Formação Rio Claro possui quatro litofácies principais:

- Lamitos de processos gravitacionais.
- Cascalhos e areias de canais e barras fluviais.
- Areias finas de rompimento de diques marginais.
- Argilas de transbordamento em planícies de inundação.

Além dessas quatro litofácies principais, a Formação Rio Claro apresenta um horizonte delgado de conglomerados basal, cuja constituição reflete a contribuição das rochas sedimentares do substrato. Segundo esse autor, essas litofácies indicam que a sedimentação da Formação Rio Claro se deu em ambiente fluvial meandrante, no qual se admite baixos gradientes e clima úmido.

Quanto às relações estratigráficas, a Formação Rio Claro aparece principalmente sobreposta à Formação Corumbataí. Na borda leste da Depressão Periférica, os sedimentos estão sobrepostos ao Subgrupo Itararé e à Formação Aquidauana e, em Vargem Grande do Sul, aparece diretamente sobre o embasamento pré-cambriano (MELO, 1995).

Os dados obtidos por Oliva (2002), por meio da descrição de amostras de afloramentos e análise granulométrica, indicam que os arenitos da Formação Rio Claro possuem uma granulometria que varia de areia fina à média. Alguns deles apresentam alto teor de argilas, e outros são conglomeráticos, atestando que a sedimentação se deu em ambiente fluvial meandrante, no qual os níveis mais argilosos correspondem a planícies de inundação e os níveis conglomeráticos aos canais.

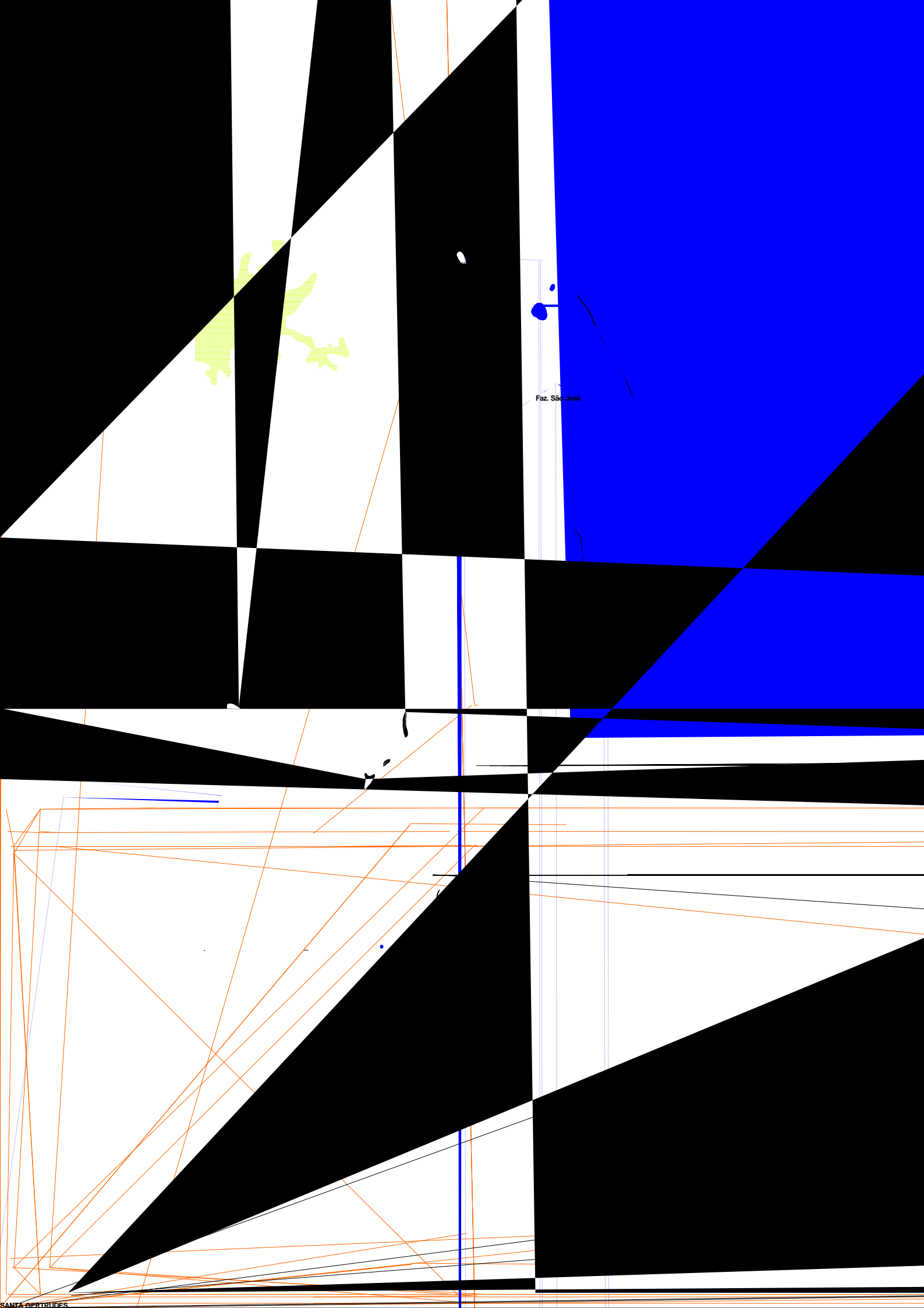
No município de Rio Claro, a espessura da Formação Rio Claro varia consideravelmente de um local para o outro, diminuindo da área Norte, onde encontra-se a Fazenda São José, para Sul (saída para Piracicaba).

2.2 - Aquífero Rio Claro

Segundo DAEE (1981), o sistema Aquífero Rio Claro consiste de um aquífero livre - pouco profundo, com vazão entre 17 m³/h -4

3

o 96Tj -153.84 -20.76 TD -00.76 TD w0.0171 T (atestan7) Tj 130.92 4 0 TD 0.0048 Tc 0tid0s Tw (0eio) Tj 48.4803 TD -00.836 Tc 1.por Oliv((o qual l d'5 T



Faz. São José

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

3.1 – Medição de Coluna d'Água

3.1.1 - Sensores

A fim de realizar a medição do nível d'água, foram utilizados dois tipos de transdutores de pressão, ambos com tecnologia piezo-resistivo, fabricados pela GE Sensing/Druck, modelos PTX1830 e PDCR1730. Nesses transdutores, que trabalham submersos, um diafragma sofre uma deformação mecânica causada pela variação da pressão hidrostática, refletindo a variação na altura da coluna d'água imediatamente acima deste diafragma. Essa deformação é transmitida internamente para um elemento sensor, fabricado em silício, responsável por transformar essa deformação resultante da variação de pressão em um sinal elétrico analógico proporcional. A partir daí, o sinal emitido pelo transdutor pode ocorrer em duas formas, abaixo especificadas.

No PTX1830, que possui um condicionamento interno, o sinal é transmitido na forma de uma corrente elétrica variável de 4mA a 20mA. Esse modelo é indicado para os casos em que o cabo do transdutor corre próximo a fontes de interferências eletromagnéticas, como aquelas geradas por motores, cabos elétricos de alta-tensão, transformadores, etc, ou quando o comprimento do cabo pode agir como antena captando campos induzidos. Esse modelo possui apenas dois condutores (positivo e negativo), que conduzem ao mesmo tempo a corrente elétrica de alimentação do sensor e o sinal de medição.

O PDCR1730, por sua vez, possui quatro condutores: dois para a alimentação e dois para o sinal de saída, que é transmitido na forma de uma tensão diferencial. Essa tensão pode variar de 0-50mV ou 0-100mV, dependendo do valor máximo de coluna d'água a ser medido (transdutores para até 3.5m de coluna d'água usam a primeira faixa de resposta, enquanto a segunda é usada para fundos de escala a partir dos 7m). Esse modelo é mais sensível à interferência eletromagnética, porém seu efeito é minimizado devido ao uso de uma malha de proteção ao redor dos condutores e da resposta em tensão diferencial. Isso faz com que a indução de uma diferença de potencial devido a um ruído, quando ocorre, o faz em ambos os condutores do sinal, cancelando-se. Mais claramente:

Assumindo que as tensões nos condutores do sinal em relação à terra (GND ou negativo da alimentação) sejam S_p (sinal positivo) e S_n (sinal negativo), o sinal de medida (S_m) do sensor é dado pela diferença entre elas, ou seja:

$$S_m = S_p - S_n \quad (3.1)$$

Uma tensão de ruído Tr , quando induzida, ocorrerá em ambos os condutores de S_p e S_n , de forma que:

$$S_m = (S_p + Tr) - (S_n + Tr), \text{ ou} \quad (3.2)$$

$$S_m = S_p + Tr - S_n - Tr \quad (3.3)$$

Como a equação (3.3) iguala-se a (3.1), diz-se que o ruído se cancela. Como o ambiente do campus no qual foram utilizados os transdutores não apresenta nenhuma fonte intensa de ruído eletromagnético e o comprimento do cabo não ultrapassa os 30m, ambos os modelos mostraram-se adequados ao monitoramento, sem problemas com relação às interferências elétricas externas.

Os transdutores ainda possuem, no interior do cabo principal, uma fita de Kevlar para sustentação mecânica contra alongamentos, e um canículo ligando o elemento sensor (diafragma) ao final do cabo, que deve ficar em contato com a atmosfera, a fim de realizar a compensação barométrica (Figura 3.1).

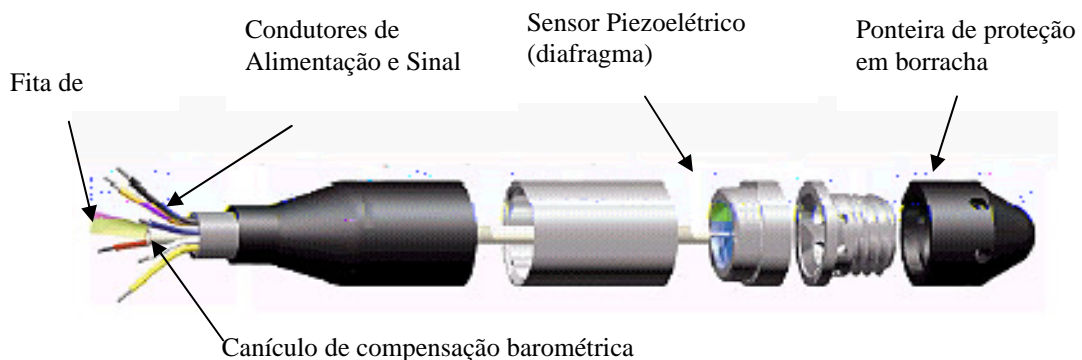


Figura 3.1 – Visão explodida do transdutor de pressão utilizado para medição da coluna d'água.

Essa compensação é importante para evitar que o sensor forneça indicações erradas de nível, pois sua medição baseia-se na pressão sobre o diafragma submerso, que é a soma da pressão causada pela coluna d'água mais a pressão atmosférica. Com as variações desta

última, o sensor poderia acusar falsas variações da coluna d'água se não houvesse essa compensação. O diagrama da Figura 3.2 ilustra as situações com e sem compensação barométrica.

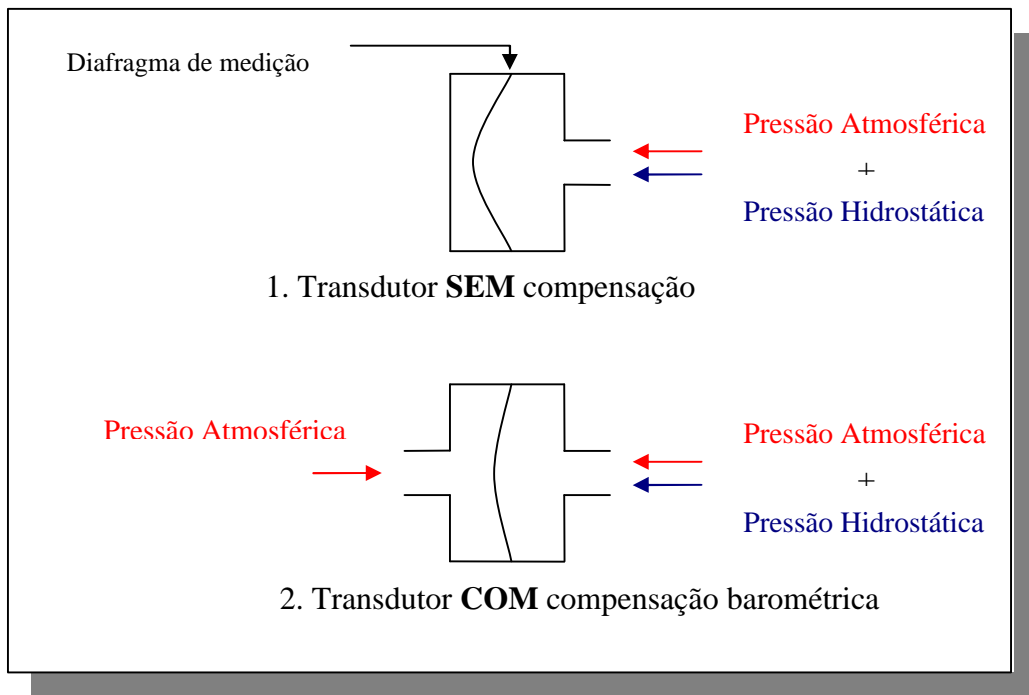


Figura 3.2 – Comparação entre transdutores com relação à compensação barométrica.

Observa-se no caso 2 (com compensação barométrica) que a pressão atmosférica, que é a mesma em ambos os lados do sensor, acaba por anular-se. Isso faz com que o único fator que realmente cause deformação no diafragma do sensor seja a pressão hidrostática – ou seja, a altura da coluna d'água.

3.1.2 - Indicador (*display*)

Para realizar a conversão do sinal analógico do transdutor para a forma digital, foi utilizado um indicador de processos, modelo DPI282, do mesmo fabricante do transdutor. Esse indicador aceita entradas de sinal tanto em corrente como em tensão (funcionando, portanto, com os dois modelos de transdutor descritos anteriormente), e possui um mostrador digital numérico que exibe o valor da coluna d'água medido, de acordo com uma escala de calibração armazenada internamente. O indicador possui ainda uma interface padrão RS-232 para comunicação com computador, utilizada para a leitura automatizada da medição.

3.1.3 Computador e *Software* de Leitura

Para a leitura e armazenamento dos dados de coluna d'água foi utilizado um computador do tipo *notebook*, padrão IBM-PC, com processador Pentium 133 e 32 Mb de memória RAM, ligado ao indicador acima descrito por meio da interface RS-232. O programa usado para a automatização das leituras foi o Wellplex (CHANG e CARNIER NETO, 2001), desenvolvido no Laboratório de Hidrogeologia e Hidrogeoquímica (H2L) da Unesp de Rio Claro (Figura 3.3), capaz de se comunicar com o indicador digital. O Wellplex permite, entre outras configurações, que se ajuste o intervalo de amostragem da grandeza monitorada, gravada continuamente no disco rígido do computador, em um arquivo especificado pelo usuário (Figura 3.4). São gerados dois gráficos: um deles exibindo as últimas n leituras, onde n é definido pelo usuário, e o outro mostrando todos os valores lidos desde o início do arquivo atual. Usando-se o *mouse*, pode-se aproximar uma área do gráfico (efeito de *zoom*) e também verificar a data e hora de qualquer ponto lido, posicionando o cursor sobre a curva. Também é possível abrir em diferentes janelas arquivos de monitoramentos anteriores (Figura 3.5)



Figura 3.3 – Computador ligado ao indicador de coluna d'água, rodando o Wellplex.

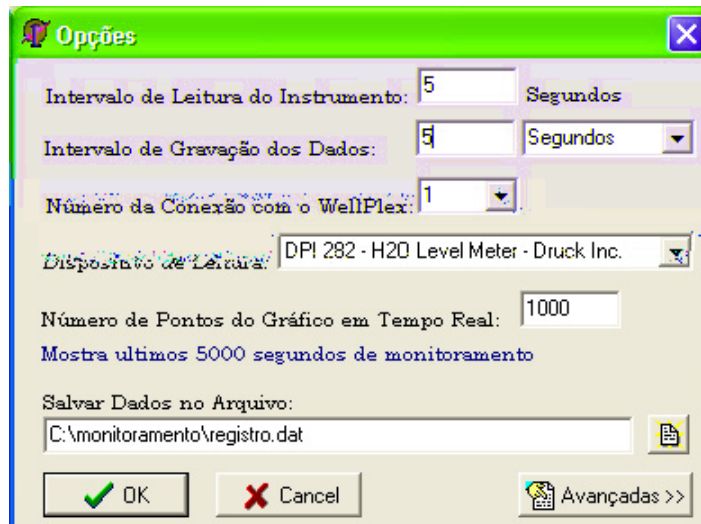


Figura 3.4 – Tela de configuração do Wellplex. É possível ajustar no programa, entre outros parâmetros, o intervalo de leitura do instrumento, o dispositivo de medição e o nome do arquivo de gravação dos dados de monitoramento.

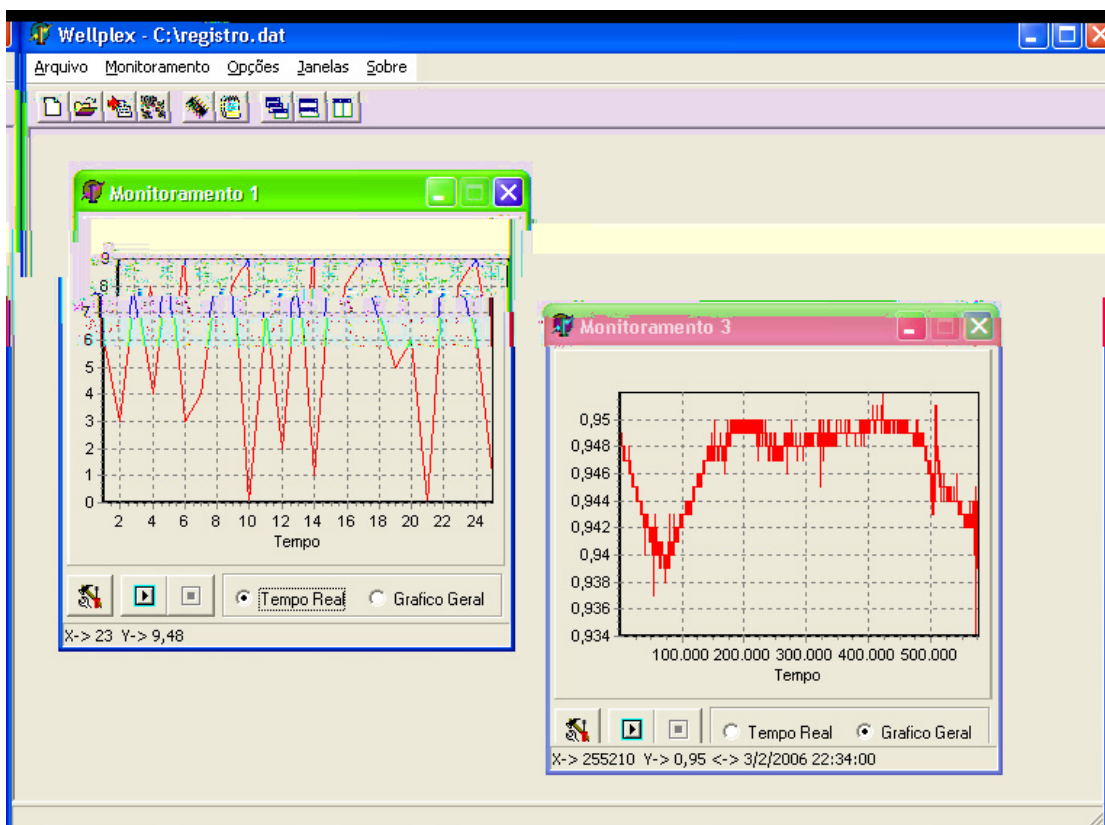


Figura 3.5 – Tela do Wellplex mostrando duas janelas de monitoramento, em tempo real (à esquerda) e com arquivo de monitoramento que foi gravado em disco (à direita).

3.2 – Poços de Monitoramento

Os poços cujos dados de monitoramento de coluna d'água foram utilizados neste trabalho foram perfurados no Campus Bela Vista da Unesp, em Rio Claro – SP, penetrando o aquífero Rio Claro. O primeiro poço a ser monitorado foi o IGCE-3, construído no final de Março de 2001, com profundidade de 17m, início do filtro a 5.6m e diâmetro de 2". Na ocasião da perfuração, o nível d'água (NA) se situava a 7.74m de profundidade.

Na Figura 3.6 é possível observar no IGCE-3, onde foi instalado o sensor de coluna d'água, a proteção criada para evitar a manipulação do material alojado em seu interior por pessoal não-autorizado. Essa proteção consta de uma gaiola de ferro firmemente presa ao chão, com uma tampa superior que pode ser trancada por um cadeado. O cabo do sensor percorria então uma distância de cerca de 10m através de um conduíte elétrico enterrado, até o interior do Laboratório de Hidrogeologia e Hidrogeoquímica, onde estavam instalados o medidor e o computador.

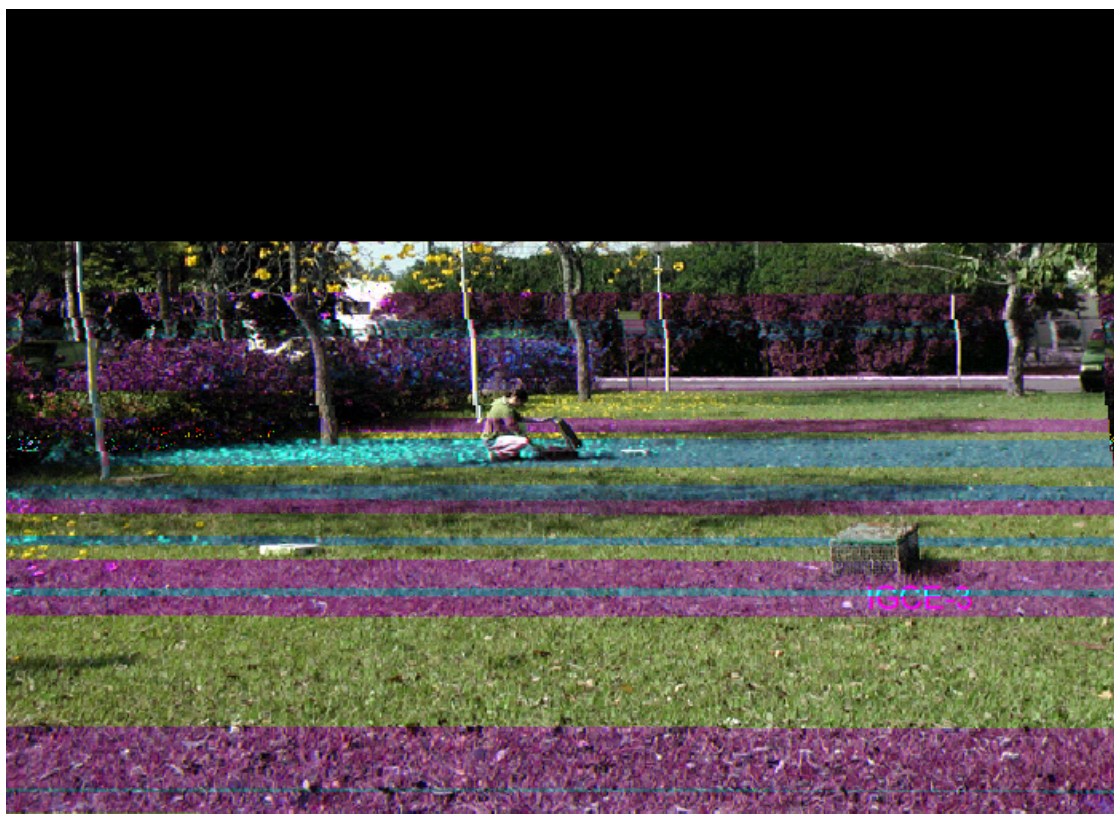


Figura 3.6 – Poços de monitoramento localizados em frente ao H2L. Nota-se a gaiola de ferro ao redor do IGCE-3, instalada para proteger o sensor de coluna d'água instalado no interior do poço.

Esse poço foi monitorado a partir de Abril de 2001 até Abril de 2004, quando os equipamentos tiveram de ser retirados devido a reformas no prédio. Os mesmos foram então instalados no interior do Laboratório de Estudos de Bacias (LEBAC), a cerca de 80m do H2L, para continuar o monitoramento usando o poço identificado por IGCE-6, perfurado em Setembro de 2003, próximo ao LEBAC. Esse poço, de diâmetro de 2”, tem uma profundidade de 20.1m, com início do filtro a 7.1m (Tabela 3.1). Quando da perfuração, o NA estava a 10.06m, e foi usando este poço que o monitoramento prosseguiu. Na Figura 3.7 é possível ver a localização relativa dos poços.

Nome do Poço	Æ do tubo	Profundidade do Poço	Início do Filtro	Final do Filtro	NA na Perf.	Data Perf.
IGCE-3	2"	17.0m	5.6m	17.0m	7.74m	mar/2001
IGCE-6	2"	20.1m	7.1m	20.1m	10.06m	set/2003

Tabela 3.1 – Dados dos poços de monitoramento IGCE-3 e IGCE-6



Figura 3.7 – Localização aproximada dos poços de monitoramento IGCE-3 e IGCE-6 (GoogleEarth, 2006).

3.3 – Métodos Matemáticos

3.3.1 – Análise de Fourier

Fenômenos periódicos ocorrem bastante frequentemente em muitos campos de estudo e, especialmente dentro das Ciências da Terra, os ciclos da natureza estão presentes de muitas formas. Jean-Baptiste Joseph Fourier, físico e matemático francês nascido na segunda metade do século XVI, em Paris, desenvolveu uma forma de descrever funções periódicas complexas como somas de funções trigonométricas mais simples, usando senos e cossenos, que ficou conhecida como Série de Fourier.

Em seu trabalho *Théorie Analytique de la Chaleur* (Teoria Analítica do Calor, (FOURIER, 1882 apud KREYSZIG, 1993)), Fourier utilizou essas séries, derivadas dos trabalhos de Euler e Daniel Bernoulli, para descrever uma teoria sobre a condução do calor. Porém, devido à sua universalidade de aplicações, a série de Fourier tornou-se uma das mais importantes ferramentas na matemática e na física, e seus princípios acabaram levando às integrais de Fourier e à Transformada de Fourier. O conjunto dessas técnicas forma o que é conhecido como Análise de Fourier, uma ferramenta amplamente usada no processamento de séries temporais nas mais variadas áreas, que vão da sísmica de reflexão à espectroscopia, da filtragem de ondas sonoras às telecomunicações, da tomografia computadorizada à economia.

Uma função é chamada de periódica se ela é definida para todo x real e se existe um número positivo p , tal que

$$f(x + p) = f(x), \quad \text{para todo } x. \quad (3.4)$$

Esse número p é chamado de período de $f(x)$ (KREYSZIG, 1993). Usando (3.4), tem-se que:

$$f(x + 2p) = f[(x + p) + p] = f(x + p) = f(x).$$

Então, para qualquer valor inteiro n ,

$$f(x + np) = f(x), \quad (3.5)$$

de forma que $2p$, $3p$, $4p$ também são períodos de $f(x)$.

A série de Fourier assume que uma função $f(x)$ de período 2π pode ser representada por

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx), \quad (3.6)$$

sendo a_0 , a_n , e b_n , chamados de coeficientes de Fourier. Com isso, pode-se dizer que qualquer função periódica pode ser reescrita como uma soma do produto de senos e cossenos por diferentes coeficientes.

O desenvolvimento da série de Fourier para a forma complexa, usando as fórmulas de Euler dadas por

$$\begin{aligned} e^{inx} &= \cos nx + i \sin nx & e \\ e^{-inx} &= \cos nx - i \sin nx, \end{aligned} \quad (3.7)$$

levou à Transformada de Fourier Contínua, dada por KREYSZIG(1993)

$$\hat{f}(w) = \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-iwx} dx, \quad (3.8)$$

em que w é o conjunto das diversas frequências que compõem a função $f(x)$, e $i = \sqrt{-1}$.

Sua contraparte, a Transformada Inversa de Fourier Contínua, é dada por

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(w) e^{iwx} dw. \quad (3.9)$$

Portanto, o que as equações (3.8) e (3.9) realizam é a transformação ou transposição de uma função $f(x)$ no domínio do tempo, para uma função $f(w)$ no domínio das frequências, e vice-versa, respectivamente.

No item 1.3 foi visto que o monitoramento é o acompanhamento no tempo de um fenômeno que se deseja estudar, realizado por meio de sucessivas medições. Com isso, obtêm-se uma série temporal $f(t)$ de comprimento N , que é formada por um número discreto de valores f_0, f_1, \dots, f_{N-1} a intervalos bem-definidos, para $t = 0, 1, \dots, N-1$. Nesse caso, a aplicação da transformada de Fourier é efetuada por meio da chamada Transformada Discreta de Fourier, que é dada por BRACEWELL(1986)

$$F_{(n)} = \sum_{t=0}^{N-1} f(t) e^{-i\omega_n t}, \quad (3.10)$$

onde $\omega_n = \frac{2\pi n}{N}$, para $n = 0, 1, \dots, N-1$, formando o conjunto discreto das frequências de Fourier.

Dessa forma, aplicando a transformada (Eq. 3.10) em um sinal discreto, que é composto pela soma de outros sinais periódicos de diferentes frequências, pode-se construir um gráfico chamado de periodograma ou espectrograma, que mostra a contribuição de cada frequência particular para a formação do sinal original. Ou seja, a aplicação da transformada decompõe um sinal complexo em suas componentes básicas periódicas.

A partir das componentes $F(n)$ em frequência, também é possível realizar o processo inverso, transpondo-as de volta para o domínio do tempo usando a Transformada Inversa Discreta de Fourier, definida por BRACEWELL(1986):

$$f_n(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F_{(n)} e^{i\omega_n t}. \quad (3.11)$$

O algoritmo computacional que realiza o cálculo da transformada discreta foi desenvolvido por COOLEY e TUKEY(1965), e ficou conhecido como FFT (*Fast Fourier Transform*), ou Transformada Rápida de Fourier. O processo de combinar as transformadas direta e inversa pode ser usado para filtrar um sinal, de forma a eliminar as componentes de determinada frequência depois de aplicar a transformada direta, e então reconstruir o sinal original no tempo, agora sem as componentes filtradas, usando a transformada inversa.

A fim de ilustrar melhor a aplicação da teoria, foi gerada, usando o programa Tsoft, uma série temporal de período igual a 12 segundos, a partir da equação (3.12):

$$f(t) = 6 \sin\left(2\pi \frac{t}{12}\right) \quad (3.12)$$

O gráfico da função é visto na Figura 3.8

Usando o próprio Tsoft para calcular o espectrograma da função (3.12), obtemos o gráfico da Figura 3.9.

Como a frequência é o inverso do período, com um período de 12 segundos obtem-se um pico espectral na marca de $\frac{1}{12}$ Hz, ou 0.083Hz. Sendo a série temporal constituída de apenas uma componente, vê-se que existe apenas um pico no espectrograma.

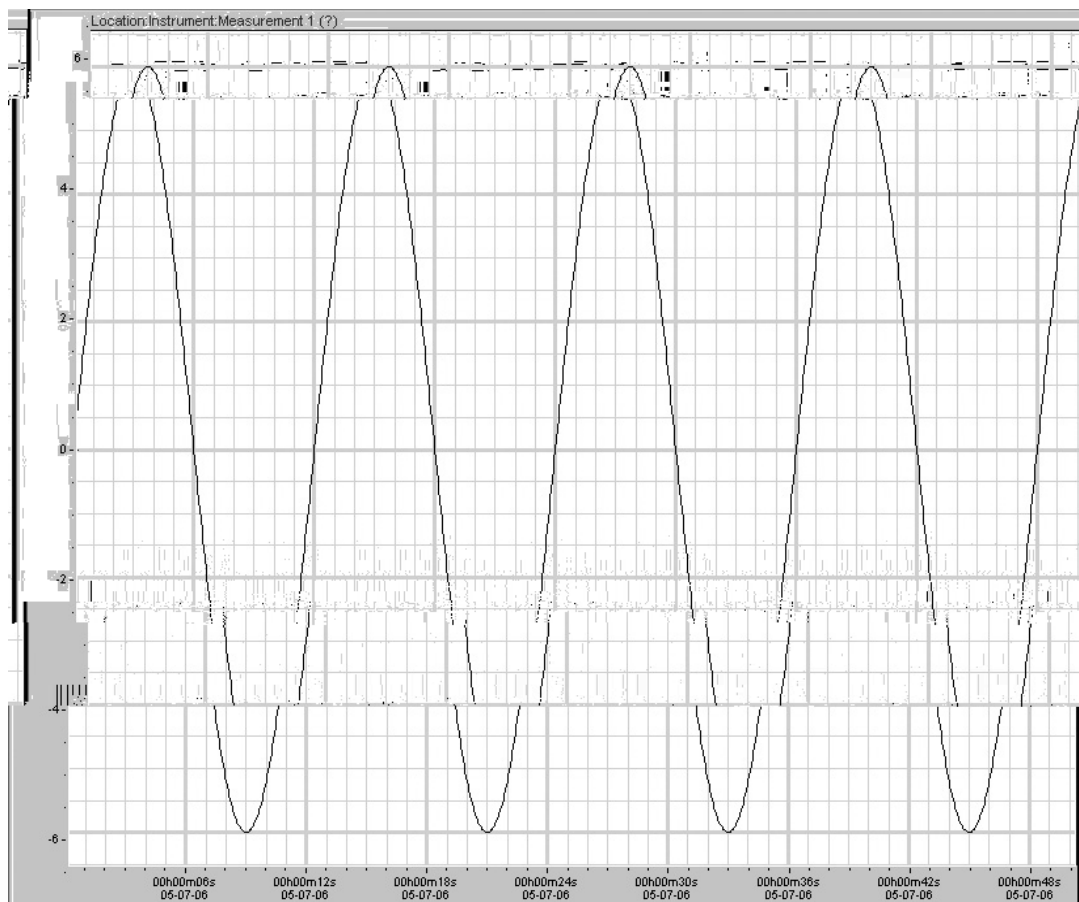


Figura 3.8 – Gráfico da função (3.12)

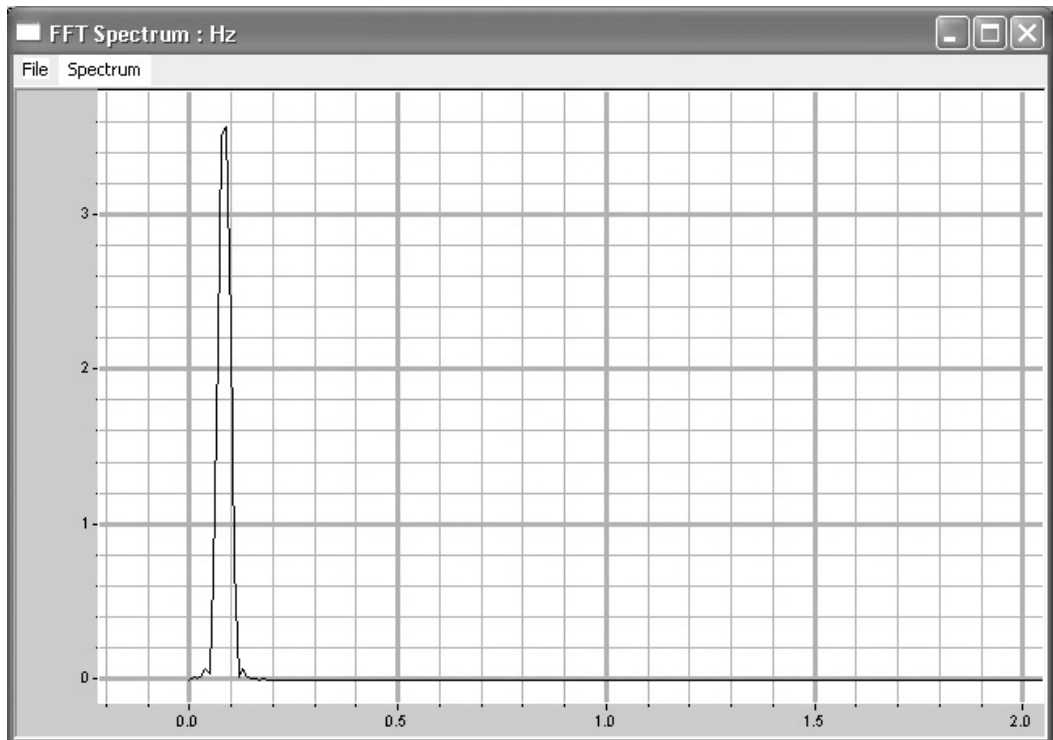


Figura 3.9 – Espectrograma da função (3.12). Eixo das abscissas em Hz.

Em seguida, gerou-se uma segunda série temporal, mantendo a senóide original e adicionando a ela uma outra, de frequência igual a 2 segundos, e com 1/3 da amplitude da primeira, segundo a equação

$$f(x) = 6\sin\left(2\pi \frac{t}{12}\right) + 2\sin(2\pi 2t), \quad (3.13)$$

que gerou uma onda mais complexa, conforme o gráfico da Figura 3.10. Calculando o espectrograma dessa nova onda, obtém-se o resultado da Figura 3.11

Como agora a função compõe-se de duas componentes de frequências diferentes, aparecem 2 picos, sendo que o novo pico situa-se exatamente sobre a marca de 2Hz, que é a frequência da nova senóide. Nota-se também que ele possui aproximadamente 1/3 do tamanho do pico da primeira senóide, mantendo a relação de proporção da equação.

Assim, conforme se adiciona novas componentes periódicas, estas vão aparecer como novos picos no espectrograma, de forma que é possível, partindo de uma série temporal complexa, saber quais são suas componentes básicas em frequência, usando a transformada de Fourier.

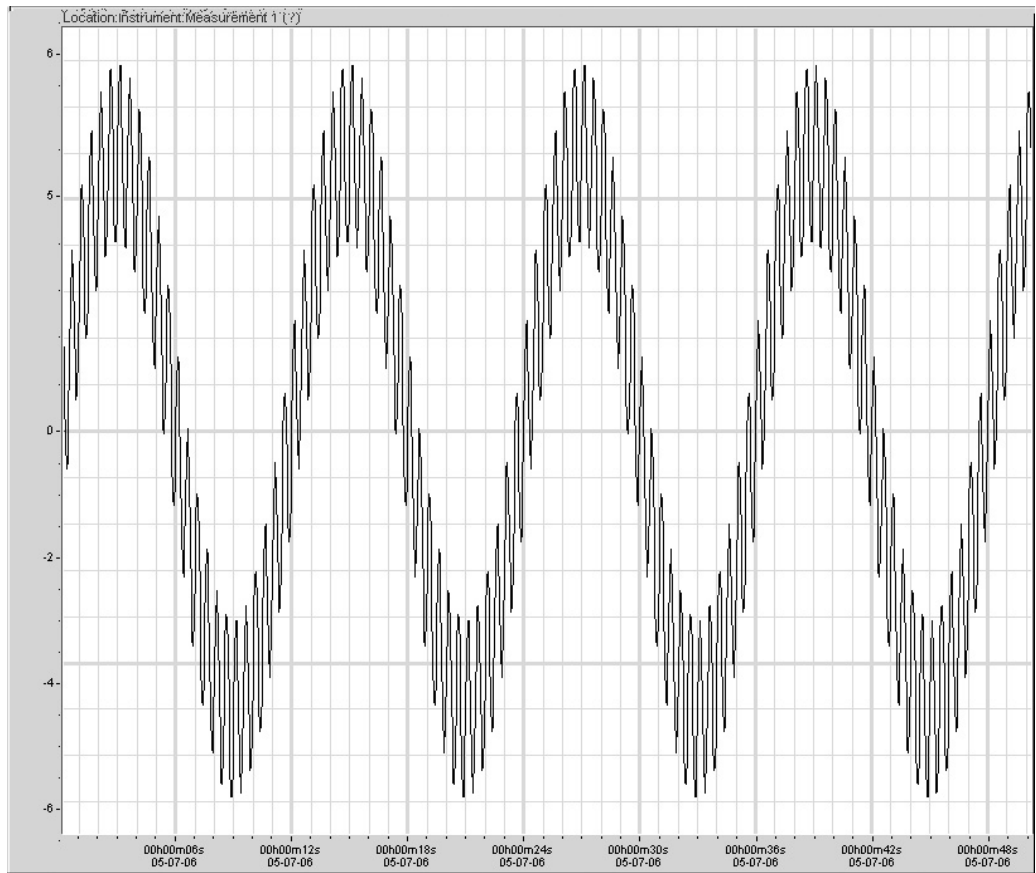


Figura 3.10 – Gráfico da função (3.13)

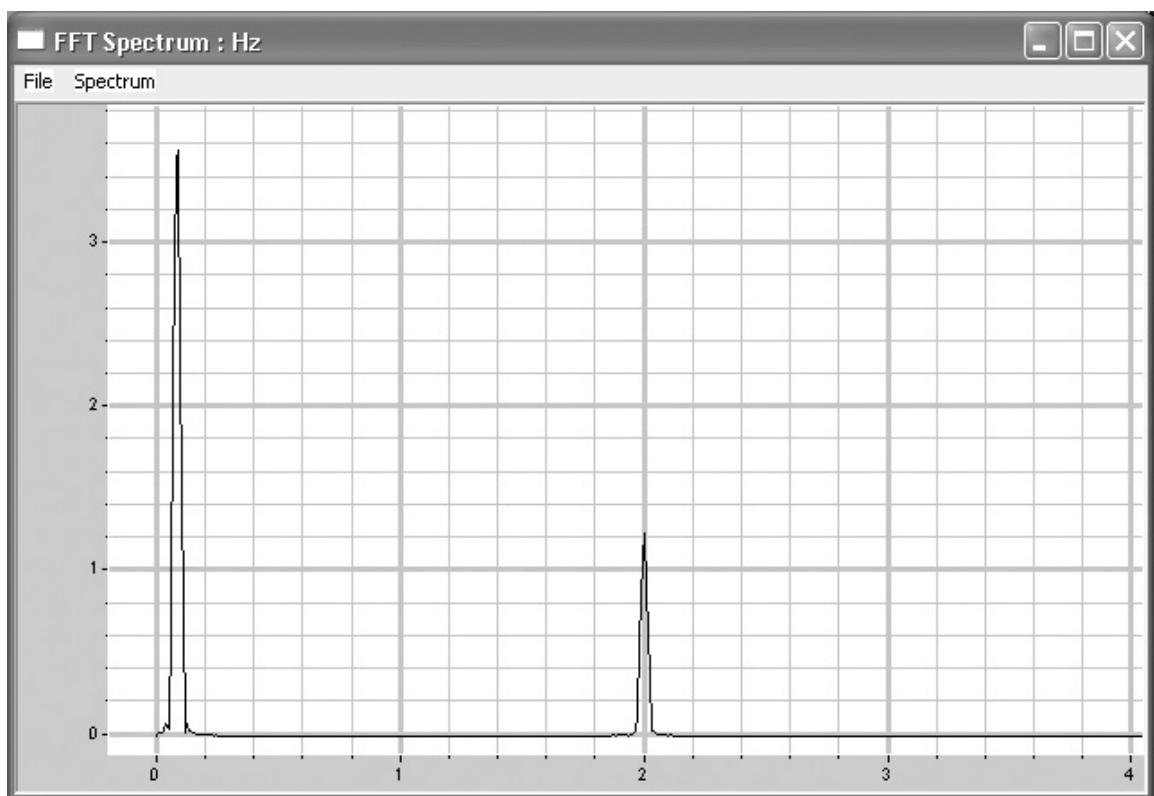


Figura 3.11 – Espectrograma da função (3.13)

Quando se trabalha com dados de monitoramento reais, há sempre certa quantidade de ruído fazendo parte das medidas, que pode ter as mais diversas origens. O ruído é um componente aleatório, que pode estar concentrado em certa parte do espectro, ou espalhar-se por uma grande faixa, como acontece com o ruído de fundo presente em vários fenômenos da natureza.

Como ilustração, adicionou-se à função (3.13) um componente de ruído branco gaussiano, que se espalha por uma ampla faixa de frequências, resultando na onda da Figura 3.12. Mesmo com o ruído que foi introduzido, e que aparentemente mascara a componente de menor amplitude (de frequência igual a 2Hz), é possível distinguir no espectrograma as componentes originais (Figura 3.13)

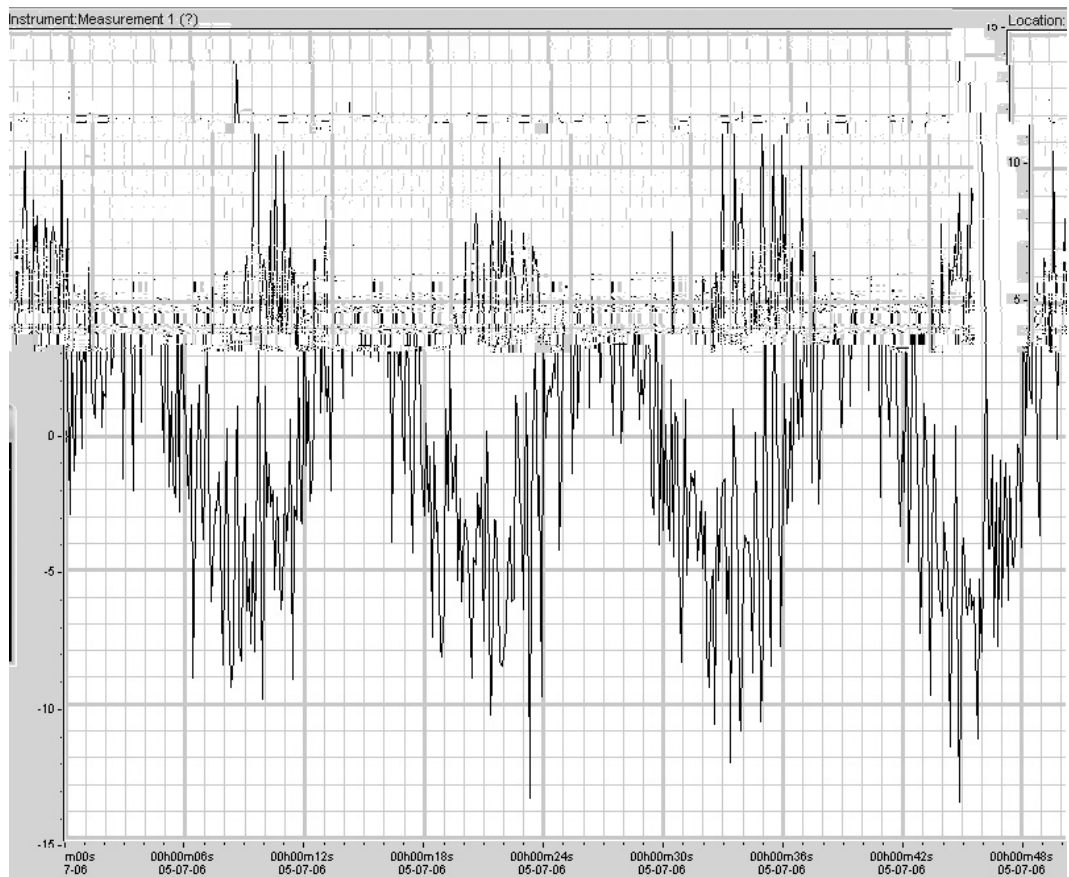


Figura 3.12 – Gráfico da função (3.13) adicionada de ruído branco gaussiano

Na Figura 3.13 nota-se que o ruído aparece espalhado por toda faixa de frequências, o que é característico do ruído branco, e que a transformada de Fourier foi capaz de separar as duas componentes originais da função.

Dependendo da amplitude do ruído presente no sinal, algumas componentes podem ser mascaradas, de forma que se torna impossível recuperá-las. É o que acontece, por exemplo, quando se tenta conversar em um ambiente barulhento. Para que uma pessoa consiga entender o que a outra diz, é necessário falar mais alto que num ambiente silencioso, para que o ruído não encubra o som da voz. No caso do monitoramento, o sinal de medição deve ser devidamente amplificado de forma que a presença de eventuais ruídos (por exemplo, causados por interferência eletromagnética), tenha uma intensidade relativa menor que aquela do sinal que se deseja registrar.

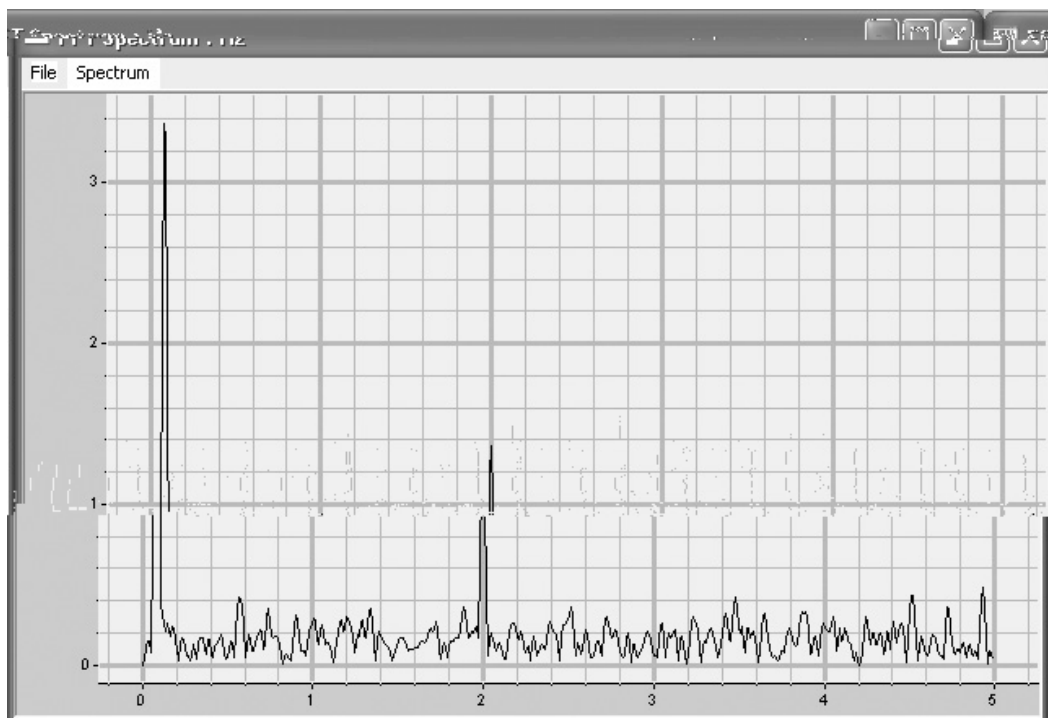


Figura 3.13 – Espectrograma do sinal da Figura 3.12

3.3.2 – Correlação Cruzada

Enquanto a Análise de Fourier é um método univariado, aplicado sobre apenas uma série temporal, a correlação cruzada (*cross-correlation*) é bivariada, levando em consideração a relação entre duas séries simultaneamente.

Sejam duas séries temporais discretas: a primeira, x_t (x_1, x_2, \dots, x_n), é o sinal de entrada no sistema estudado, a causa, a segunda, y_t (y_1, y_2, \dots, y_n), é o sinal de saída, o resultado da

primeira sobre o sistema estudado, o efeito. A função de correlação cruzada, então, é dada pelas expressões (PADILLA e PULIDO-BOSCH, 1995):

$$r_{+k} = r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \quad \text{e} \quad (3.14)$$

$$r_{-k} = r_{yx}(k) = \frac{C_{yx}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \quad , \quad (3.15)$$

onde

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad , \quad (3.16)$$

$$C_{yx}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (y_t - \bar{y})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad , \quad (3.17)$$

$$C_x(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \quad \text{e} \quad (3.18)$$

$$C_y(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2 \quad , \quad (3.19)$$

sendo que \bar{x} e \bar{y} são as médias das séries x_t e y_t , $k=0, 1, 2...m$, e m é conhecido como *cutting point* ou “ponto de corte”. Esse valor determina o período de tempo sobre o qual a análise de correlação cruzada será efetuada, e normalmente é escolhido de forma a abranger o fenômeno sobre o qual se deseja verificar a relação entre as séries temporais (LAROCQUE, 1998).

É importante notar aqui que nem sempre correlação implica causa, pois a correlação mede apenas a associação de crescimento ou decrescimento mútuo entre duas variáveis, de forma que ambas x_t e y_t podem estar variando em função de uma terceira, z_t . Porém, para o estudo aqui proposto, assume-se que a série x_t seja realmente a causa de y_t , devido a um conhecimento prévio do funcionamento do fenômeno.

A função de correlação cruzada gera um gráfico chamado de correlograma, que mostra o valor da correlação entre os elementos da série de entrada e os da série de saída, para cada k , também chamado de *lag*. Um valor positivo de correlação indica que valores altos de x_t estão associados a valores altos de y_t , enquanto que uma correlação negativa indica que valores altos de x_t estão associados a valores baixos y_t . O atraso causal (*delay*) entre a série de entrada e a de saída é definido como o intervalo de tempo entre $k = 0$ e o valor máximo do correlograma, de forma que quanto menor esse intervalo, mais rápido a série de saída y_t reage a um sinal da série x_t de entrada. Se não houver atraso entre o sinal de entrada e o de saída, de forma que a influência do primeiro sobre o segundo é instantânea, o valor de máxima correlação é encontrado em $k = 0$.

Como ilustração da teoria, foram geradas no Tsoft duas ondas, segundo as funções:

$$f_1(t) = 1 + 6 \sin(2\pi \frac{t}{12}) \quad (3.20)$$

$$f_2(t) = 1 + 3 \sin(2\pi \frac{t}{12}) \quad , \quad (3.21)$$

ambas definidas para o intervalo de $12 \leq t \leq 24$, e com valor igual a 1 para $t < 12$ e $t > 24$.

O gráfico dessas funções pode ser visto na Figura 3.14. Considere-se f_1 como a série de entrada e f_2 como a série de saída. Como ambas ocorrem simultaneamente, sendo definidas nos mesmos instantes, pode-se imaginar que f_2 é o resultado de algum fenômeno que apenas atenua o sinal de entrada de f_1 , fazendo sua amplitude cair pela metade, sem causar nenhum atraso. Quando se calcula a correlação cruzada das séries, obtêm-se o correlograma da Figura 3.15. Como as séries ocorrem simultaneamente, o valor de máxima correlação coincide com o instante $k = 0$.

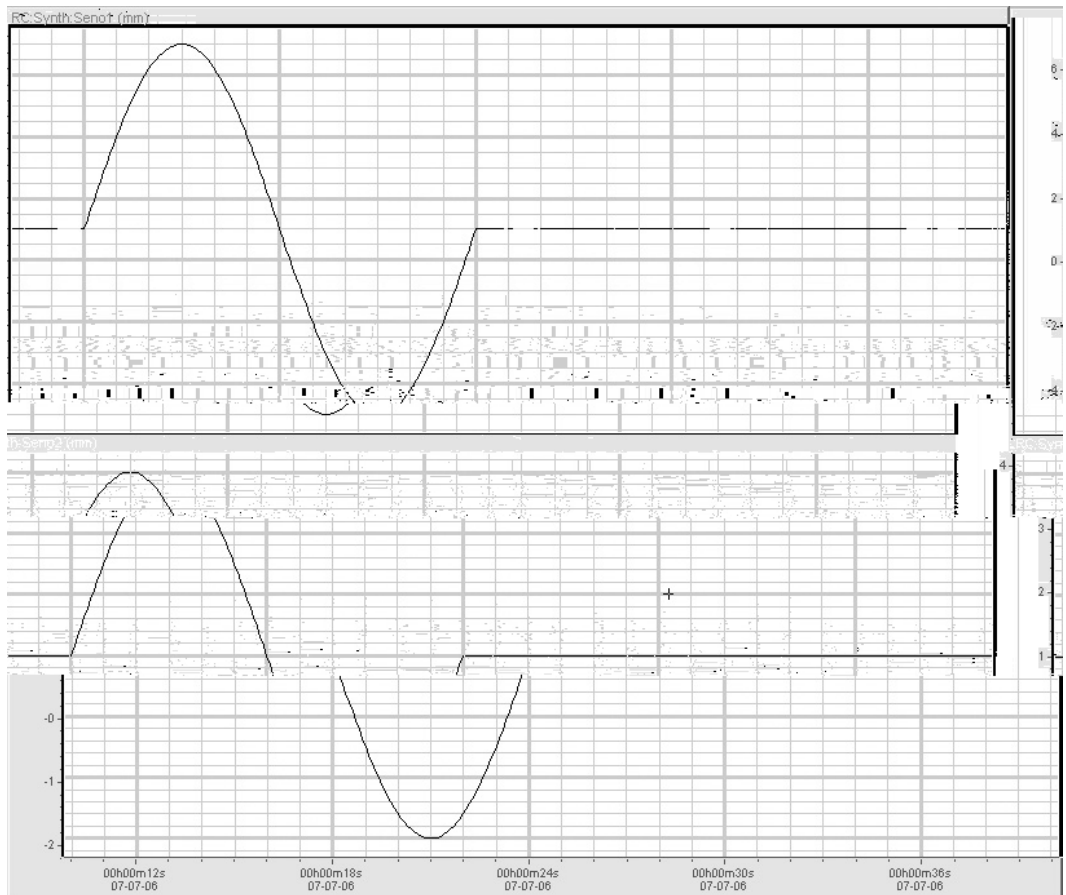


Figura 3.14 – Gráfico das equações (3.20) e (3.21)

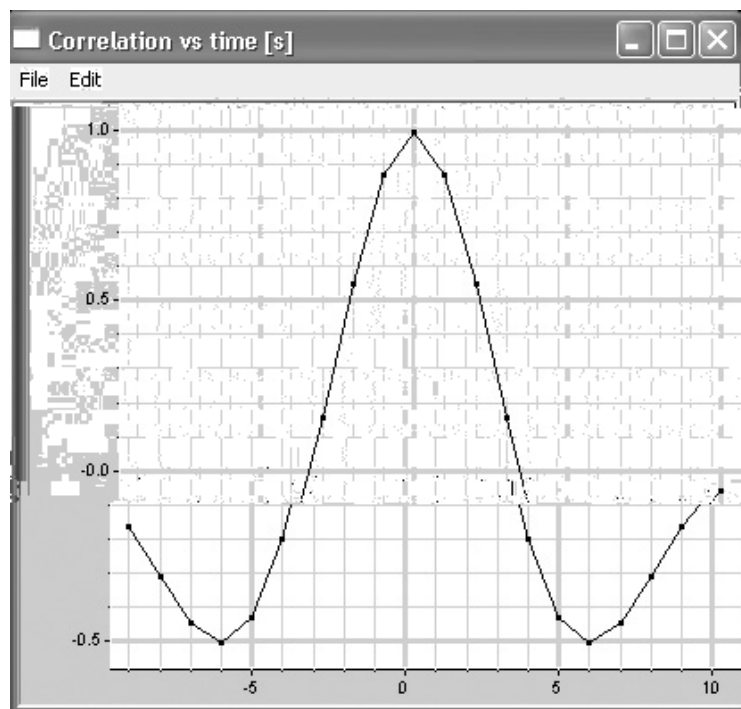


Figura 3.15 – Correlograma das funções (3.20) e (3.21)

E se a série f_2 ocorresse com atraso em relação a f_1 ? Para simular essa situação, desloca-se f_2 20s para frente no tempo, de forma que agora ela é definida no intervalo $32 \leq t \leq 44$, e com valor igual a 1 para $t < 32$ e $t > 44$. O gráfico obtido com esse deslocamento temporal é mostrado na Figura 3.16.

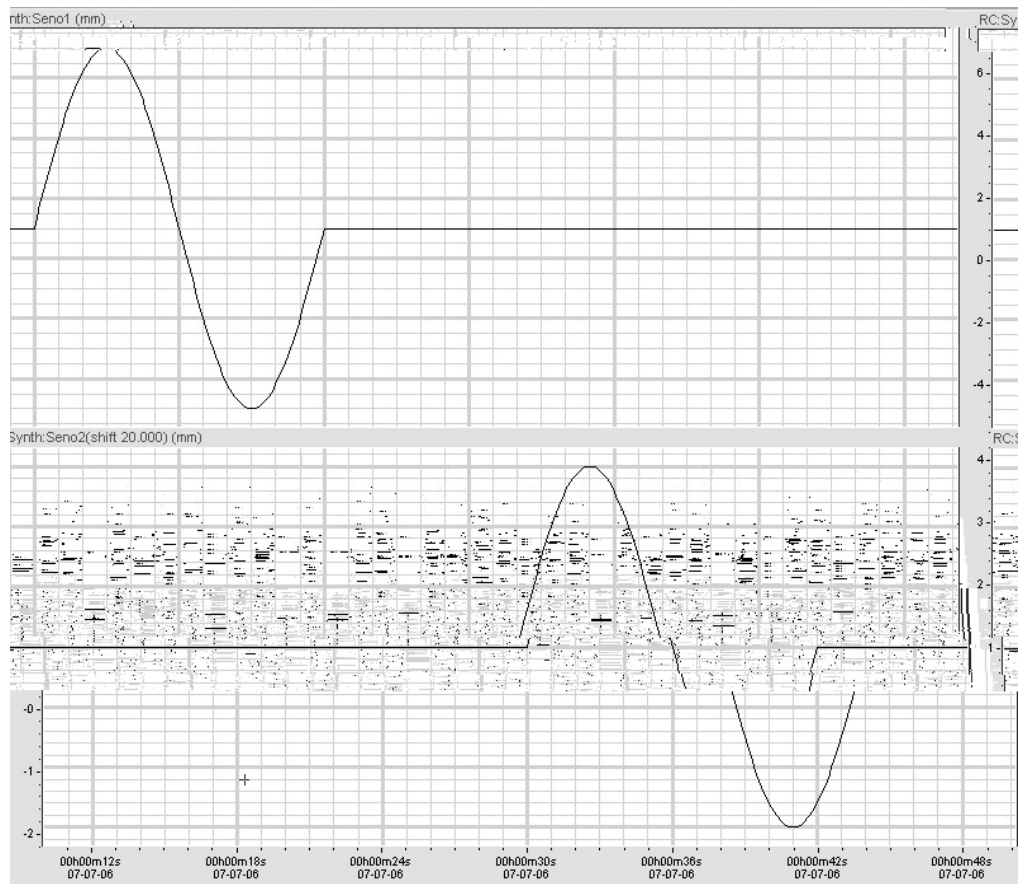


Figura 3.16 – A função f_2 é deslocada 20s para frente no tempo, em relação a f_1

A partir daí calcula-se novamente o correlograma, obtendo-se o resultado da Figura 3.17. Por esta figura, nota-se que o maior valor de correlação ocorreu na marca de tempo $k = 20s$, o que significa que as duas séries estão mais bem correlacionadas com f_1 deslocada 20s em relação a f_2 (ou seja, a série f_2 possui um atraso de 20s em relação a f_1).

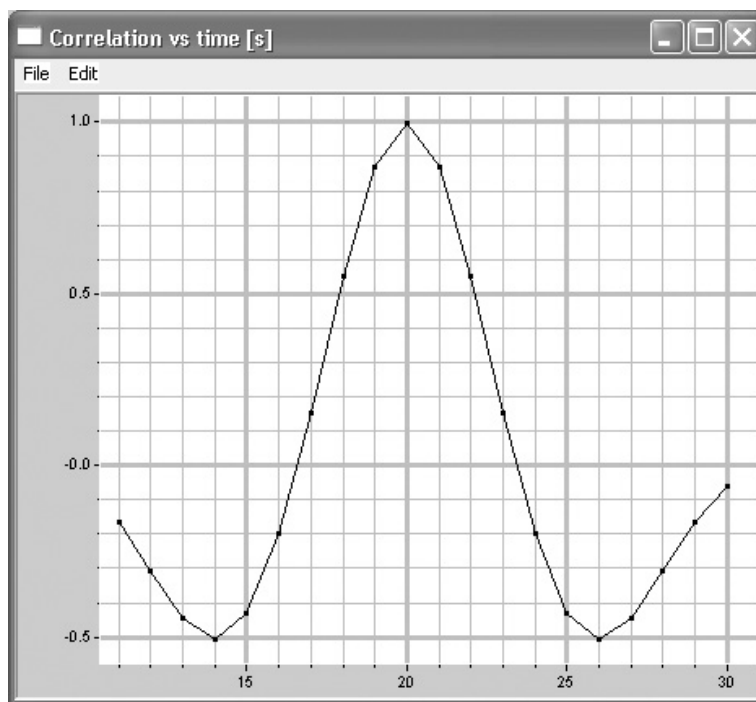


Figura 3.17 – Novo correlograma das funções da Figura 3.16

Verifica-se, assim, que a análise de correlação cruzada é capaz de calcular o atraso entre dois sinais que se sabe possuírem uma relação de causa e efeito.

3.3.3 – Análise de Reescalamento (Análise R/S)

Em 1906, o governo britânico nomeou o engenheiro Harold E. Hurst para trabalhar no Cairo, no projeto de uma represa no rio Nilo. Um dos problemas estudados foi como dimensionar um reservatório ideal, que não esvaziasse por completo durante a estação seca nem transbordasse durante a estação chuvosa. Hurst assumiu que tanto a entrada de água no reservatório como sua saída seriam fenômenos de natureza aleatória, regidos pela chuva e pela demanda de água, respectivamente (FAVARETTO, 2004).

Para testar sua suposição, ele criou um método estatístico chamado de Análise de Reescalamento – Análise R/S - (HURST *et al.*, 1965), que encontrou larga aplicabilidade em séries temporais de fenômenos da natureza (MANDELBROT e WALLIS, 1969), (CHRISTOFOLETTI, 1997), (BRESLIN e BELWARD, 1999), (MIRANDA e ANDRADE, 2001), (PETERS *et al.*, 2002), (FAVARETTO, 2004), (PETERS e CHRISTENSEN, 2006). Essa análise gera um valor conhecido como Expoente de Hurst, H , capaz de classificar as séries temporais entre aleatórias e não-aleatórias, além de fornecer informações sobre o grau de auto-correlação da série analisada.

Estudando o registro de quase 1000 anos do regime de inundações do Nilo, Hurst percebeu que um ano de cheia tinha a tendência de ser seguido por outro de cheia, enquanto que um ano de seca tinha grandes chances de ser seguido por outro de seca. A esse tipo de comportamento não-aleatório ele chamou de persistente, o que mais tarde foi chamado “Efeito José” por Mandelbrot e Wallis (1968), referindo-se ao episódio bíblico no qual José interpretou o sonho do faraó do Egito como uma seqüência de sete anos de fartura seguidos de sete anos de fome.

O método da Análise R/S é mais bem entendido no contexto para o qual foi criado, que é o modelamento de um reservatório. Se considerarmos que a entrada de água no mesmo, em um ano u , seja representado por $\mathbf{x}(u)$, então o desvio da média (calculada no período de vários anos, τ) para aquele ano é $\mathbf{x}(u) - \langle \mathbf{x} \rangle_t$, sendo a média dada por:

$$\langle \mathbf{x} \rangle_t = \frac{1}{t} \sum_{u=1}^t \mathbf{x}(u). \quad (3.22)$$

A soma dos desvios da média das descargas é então dada por:

$$X(t, \mathbf{t}) = \sum_{u=1}^t \{ \mathbf{x}(u) - \langle \mathbf{x} \rangle_t \}. \quad (3.23)$$

A diferença entre o valor máximo e mínimo de X é a medida R (*range*), que para o reservatório modelado é a diferença entre o nível máximo e mínimo de água armazenada no decorrer de τ anos, e é dada por:

$$R(\mathbf{t}) = \max X(t, \mathbf{t}) - \min X(t, \mathbf{t}), (1 \leq t \leq \mathbf{t}). \quad (3.24)$$

O valor do desvio padrão, S , é dado por:

$$S = \sqrt{\left(\frac{1}{t} \sum_{t=1}^t \{ \mathbf{x}(t) - \langle \mathbf{x} \rangle_t \}^2 \right)}. \quad (3.25)$$

Fazendo a divisão de R/S sobre vários trechos da série de dados e calculando sua média (valor esperado, E), Hurst observou que as mesmas convergiam para uma lei exponencial:

$$E \left[\frac{R(N)}{S(N)} \right] = kN^H, \text{ com } N \rightarrow \infty, \quad (3.26)$$

sendo k uma constante, N o número de observações e H o Expoente de Hurst.

Se $H = 0.5$, os desvios dos valores da série temporal em relação à média são aleatórios, independentes (movimento Browniano), ou seja, um valor não tem nenhuma relação com o anterior ou com o valor seguinte.

Se $0.5 < H < 1$, a série não é aleatória, e os desvios são persistentes, ou seja, um ano de inundação tende a ser seguido por outro de inundação e anos de seca tendem a ser seguidos por outros de seca. A probabilidade de um valor da série desviar na mesma direção (positiva ou negativa) do valor anterior vai aumentando conforme aumenta o valor de H.

Se $0 < H < 0.5$, os desvios são anti-persistentes, então um desvio positivo tende a ser seguido por um desvio negativo e vice-versa. A probabilidade dessa inversão de desvios em relação à média aumenta conforme diminui o valor de H.

Breslin e Belward (1999) apresentam uma medida de auto-correlação, C, relacionada ao expoente de Hurst por meio da fórmula:

$$C = 2^{2H-1} - 1 \quad (3.27)$$

Assim, se $H = 0.5$ tem-se $C = 0$, ou seja, para séries aleatórias não existe auto-correlação entre as medidas, de forma que valores seguidos no tempo são independentes entre

si. Se $H > 0.5$ ou $H < 0.5$ a correlação é positiva ou negativa, ou seja, o sistema guarda uma memória dos eventos anteriores, de forma que eventos passados têm efeitos sobre os eventos futuros. O valor de uma medida é o resultado da influência das anteriores, e também influenciará futuros resultados.

Para que a teoria seja aplicada sobre uma série temporal, primeiramente, estabelece-se o maior e o menor tamanho das subdivisões (os diversos N da equação 3.26) da série temporal sobre os quais será efetuado o cálculo de R/S . Assim, parte-se do maior tamanho (um valor igual ou muito próximo ao da série completa), calculando o valor de R/S . Depois divide-se essa série em duas partes, e calcula-se o R/S para cada uma delas, fazendo sua média. Em seguida, divide-se novamente cada uma dessas metades em dois, repetindo o processo até que se chegue ao menor tamanho estipulado inicialmente, sempre calculando a média dos valores de R/S para cada conjunto de subdivisões (Figura 3.18).

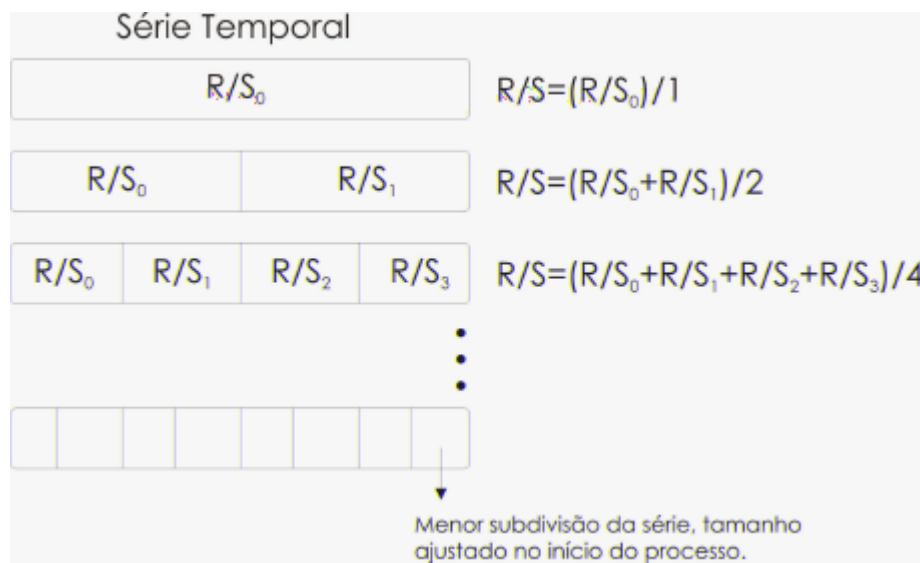


Figura 3.18 – Diagrama mostrando o processo para a estimativa do expoente de Hurst

Partindo da relação 3.26 e aplicando o logaritmo em ambos os lados da equação, tem-se:

$$\log\left(\frac{R(N)}{S(N)}\right) = \log kN^H \Rightarrow \log\left(\frac{R(N)}{S(N)}\right) = H \log N + \log k . \quad (3.28)$$

Portanto, traçando um gráfico log-log com os valores calculados, ou calculando-se o logaritmo dos valores e traçando um gráfico linear, pode-se estimar o valor de H a partir da inclinação da reta passando pelos pontos, o que pode ser obtido por um processo simples de regressão linear por mínimos quadrados.

Mandelbrot e Wallis (1969) obtiveram valores de H maiores que 0.5 aplicando a análise R/S para uma série de registros de fenômenos naturais, que incluem, além das variações do Rio Nilo ($H=0.91$), a atividade mensal de manchas solares ($H=0.93$, Figura 3.18), o fluxo anual do Rio St. Lawrence, em Nova York ($H=0.98$), do Rio Loire ($H=0.69$), a precipitação em Charleston, EUA ($H=0.89$), a espessura dos varvitos em Timiskaming, Canadá ($H=0.96$) e os anéis de crescimento dos pinheiros na Califórnia ($H=0.78$).

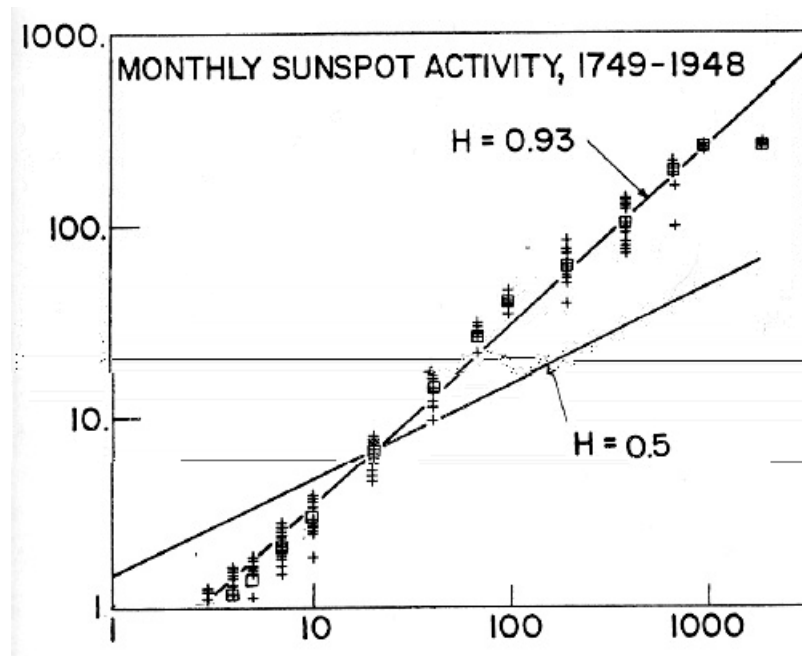


Figura 3.19 – Gráfico log-log de R/S (coordenadas) x tempo (abscissas) da atividade mensal de manchas solares, mostrando as retas de $H=0.5$ (fenômeno aleatório) e de $H=0.93$ (fenômeno persistente), estimadas por Mandelbrot e Wallis (1969)

Capítulo 4 – Tratamento dos Dados

4.1 – Problemas Relacionados aos Dados de Monitoramento

Dados brutos de séries temporais, obtidos com monitoramento, podem apresentar uma série de problemas causados por eventos naturais ou falhas na instrumentação (VAN CAMP e VAUTERIN, 2005). A maior parte desses eventos pode comprometer seriamente análises posteriores, por isso sempre que possível os dados devem passar por algum tratamento prévio.

A seguir

devem sofrer uma correção dos seus valores de data e hora, assim como deve-se alterar o relógio do computador para que o registro das próximas medições esteja com a data e hora corretas.

- o Imperfeições no tempo causadas pelo sistema de aquisição - Para melhorar a precisão dos intervalos de aquisição, o Wellplex utiliza data e hora do circuito (*hardware*) de relógio do computador, porém ainda assim ocorrem imperfeições nos intervalos, devido ao funcionamento da própria máquina e do sistema operacional. Pequenos atrasos, de frações de segundo, causados pelo processamento de várias tarefas ou acionamento do disco podem, cumulativamente, fazer com que o intervalo entre uma leitura e outra seja maior que aquele configurado, em cerca de 1 ou 2 segundos. Isso causa problemas em análises posteriores, uma vez que o intervalo deve ser bem-definido e uniforme em toda a série temporal.

Além da solução dos problemas mencionados acima, ainda deve-se seguir alguns procedimentos para tornar os dados mais facilmente manipuláveis e organizados. Embora teoricamente fosse possível manter todos os registros em um único arquivo de monitoramento, na prática isto torna-se inviável, principalmente nos casos em que o monitoramento é feito a intervalos curtos de tempo, durante períodos extensos, devido ao tamanho dos arquivos gerados. No sistema aqui tratado, a aquisição foi feita a cada cinco segundos, o que resulta em 12 aquisições/minuto, ou 720 aquisições/hora, que são 17280 aquisições/dia, totalizando mais de 6 milhões de aquisições/ano. Neste caso, o tamanho médio total dos arquivos gerados por ano de monitoramento, em estado bruto, é de cerca de 140 Mbytes. Assim, com cinco anos de monitoramento, reuniu-se cerca de 30 milhões de pontos e mais de 600Mb de dados em formato texto (ASCII), que é o formato utilizado pelo Wellplex.

Com essa quantidade de dados, operações comuns com o arquivo (abertura, visualização, correções, cópia) tornam-se dispendiosas em termos de processamento. Além disso, uma falha de escrita pode colocar em risco todo seu conteúdo e, conseqüentemente, uma grande quantidade de dados amostrados. Portanto, optou-se por dividir o monitoramento em arquivos com duração média de sete dias, a fim de minimizar os riscos e não sobrecarregar a máquina. Em razão dessa estratégia, a visualização do monitoramento de grandes períodos exigiu a concatenação de vários arquivos menores em um único arquivo, processado em uma máquina com maiores recursos computacionais que aquela usada para o monitoramento.

Outro procedimento tomado para a visualização de grandes períodos foi a filtragem (re-amostragem), em intervalos maiores de tempo. Assim, a partir de um arquivo com intervalo de 5s, por exemplo, pode-se gerar outro, tomando-se uma amostra de cada seis originais, de maneira que o novo arquivo tenha intervalos de amostra de 30s. Com isso, arquivos compreendendo grandes períodos de tempo podem ser manipulados com mais agilidade, pois o número de registros diminui. Para as análises matemáticas efetuadas, decidiu-se filtrar os arquivos deixando um intervalo de 1h de aquisição entre as leituras, devido à baixa frequência dos fenômenos analisados, o que está confortavelmente acima da frequência mínima de amostragem, dada pelo Teorema de Amostragem de Nyquist-Shannon (SHANNON, 1949):

$$f_a \geq 2f_s \quad , \quad (4.1)$$

onde f_a é a frequência de amostragem e f_s é a maior frequência do sinal que se deseja amostrar. Como o fenômeno com maior frequência registrado foi a maré terrestre, ocorrendo duas vezes ao dia, a menor frequência de amostragem teórica seria de 4 amostras/dia (uma amostra a cada 6 horas).

4.2 – Programas Utilizados para o Tratamento dos Dados

A fim de realizar as operações descritas, foram desenvolvidos também pelo Laboratório de Hidrogeologia e Hidrogeoquímica alguns programas utilitários, reunidos no *software* Wellutil (*Wellplex Utility*), capazes de corrigir os problemas de *offset*, de tempo, de fazer a concatenação dos arquivos e a filtragem dos dados (Figura 4.1).

Para realizar as análises matemáticas, foi utilizado um programa gratuito criado pelo Observatório Real da Bélgica, o Tsoft (VAN CAMP e VAUTERIN, 2005), destinado à análise e ao processamento de séries temporais de dados gravitacionais (como os de marés), que possui uma série de ferramentas numéricas tais como o cálculo do espectro por Transformada Rápida de Fourier, filtros, análise de correlação, etc. Outra característica interessante é que o Tsoft permite operar com vários canais de aquisição ao mesmo tempo (Figura 4.2), o que possibilitou a análise conjunta dos dados provenientes do monitoramento de nível e de pluviometria.

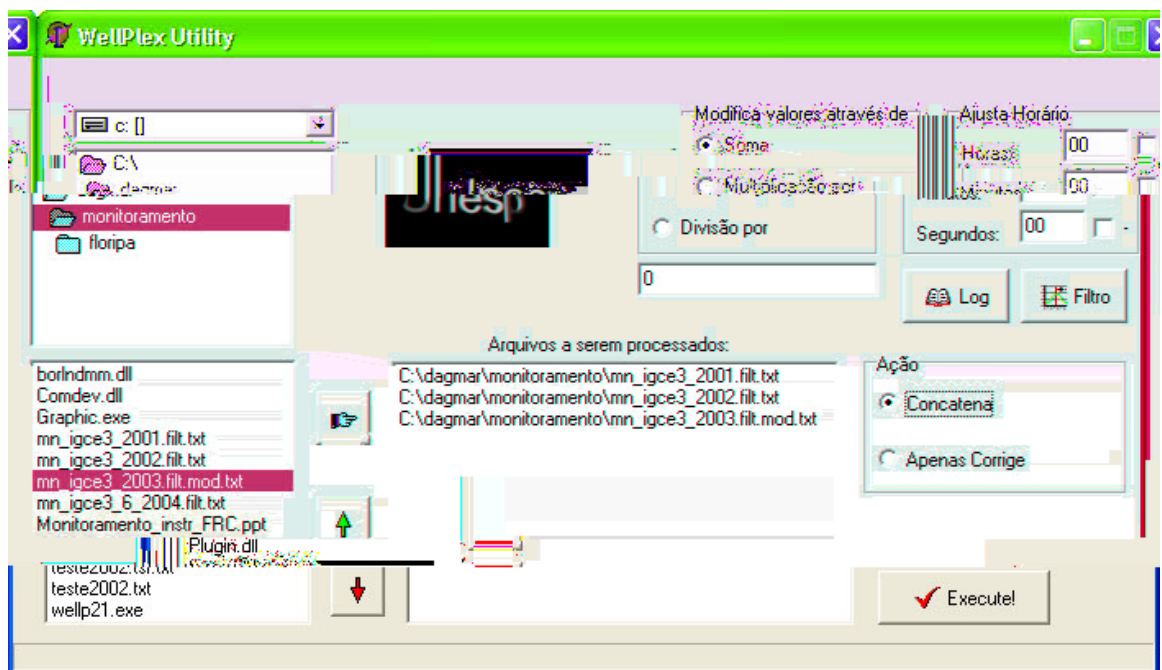


Figura 4.1 – Tela do Wellutil, usado no tratamento dos dados de monitoramento.

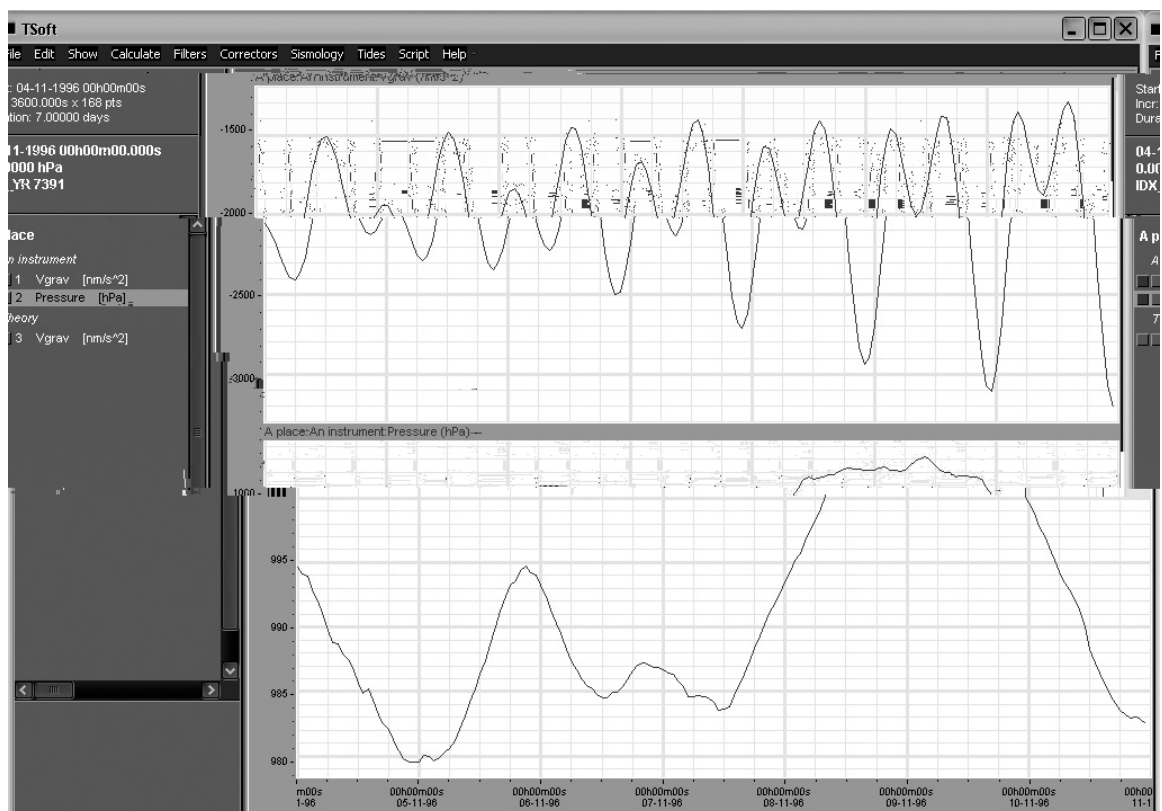


Figura 4.2 – Tela do TSoft, com dois canais, sendo o gráfico superior com dados de maré e o inferior com medidas de pressão atmosférica (arquivo de exemplo do programa).

Para que os dados provenientes do Wellplex pudessem ser utilizados no Tsoft, foi necessária a criação de um utilitário, capaz de converter os arquivos do formato original (ASCII, com colunas separadas por tabulações) para o formato especificado no manual do Tsoft, que inclui, além dos dados, um cabeçalho contendo informações adicionais sobre o intervalo de amostragem, número de canais, nome do instrumento, etc.

Capítulo 5 - Resultados do Monitoramento

5.1 – Ciclos Seculares ou Sazonais

De acordo com Todd (1959), ciclos sazonais ou seculares são aqueles que têm duração de alguns anos ou mais. A Figura 5.1 mostra os ciclos verificados ao longo de quatro anos e seis meses de monitoramento, com início em Setembro de 2001 até 31 de Março de 2006. Como o monitoramento foi efetuado em dois poços em épocas diferentes, as séries de dados foram concatenadas e corrigidas, de forma a obter-se uma única curva, com dados dos poços IGCE-3 (monitorado até final de Março de 2004) e IGCE-6 (a partir de Abril de 2004).

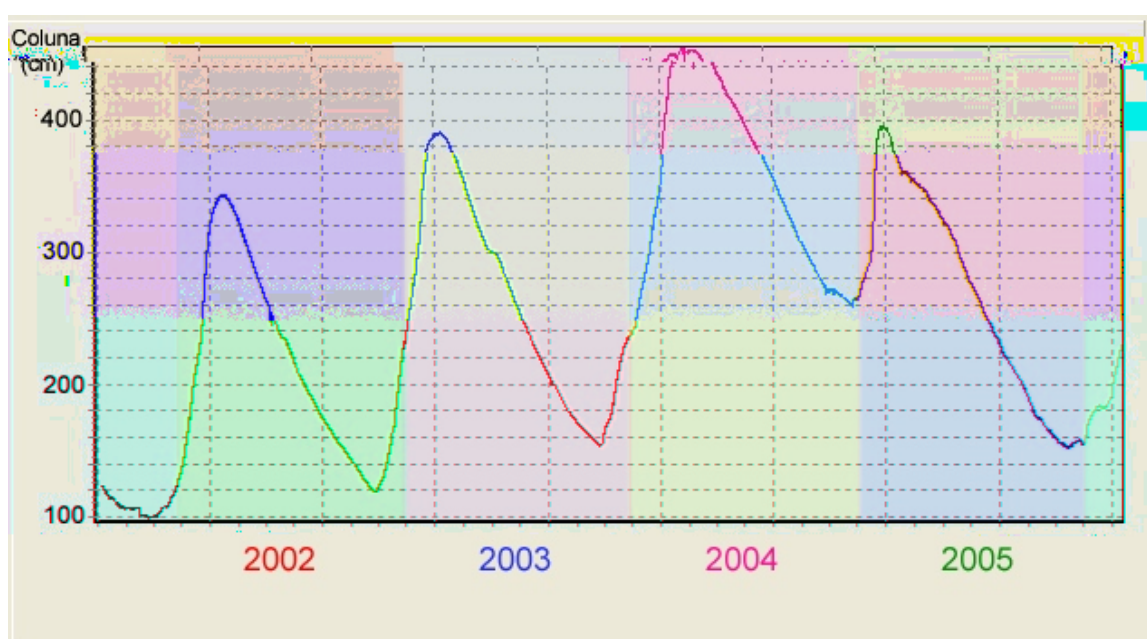


Figura 5.1 – Ciclos sazonais com início em Setembro de 2001 até Março de 2006.

Observa-se os ciclos sazonais de recarga e rebaixamento do aquífero, e como o valor máximo da coluna d'água aumentou de 2002 a 2004, quando então voltou a diminuir.

É possível observar claramente a variação sazonal de coluna d'água resultante das variações pluviométricas anuais, e como o valor máximo daquela aumentou a cada ciclo em 2002, 2003 e 2004, quando então voltou a cair em 2005.

A Figura 5.2 mostra os mesmos dados de coluna, utilizando o Tsoft, juntamente com os dados de chuva, fornecidos pela estação pluviométrica do CEAPLA – Centro de Estudos e Planejamento Ambiental, localizado a cerca de 500m dos poços de monitoramento. É

interessante notar como a recarga é influenciada não somente pela quantidade de chuvas, mas também por sua distribuição: chuvas mais bem distribuídas em 2004 fizeram com que a curva da coluna d'água atingisse seu maior valor, enquanto que em 2005, embora se tenha o maior pico de chuva da série de dados, a estação chuvosa teve uma duração mais curta, de forma que a recarga não foi tão grande quanto o ano anterior. Chuvas mais bem distribuídas infiltram de modo mais efetivo no solo, de forma que o escoamento superficial é menor e, portanto, tem-se uma maior recarga.

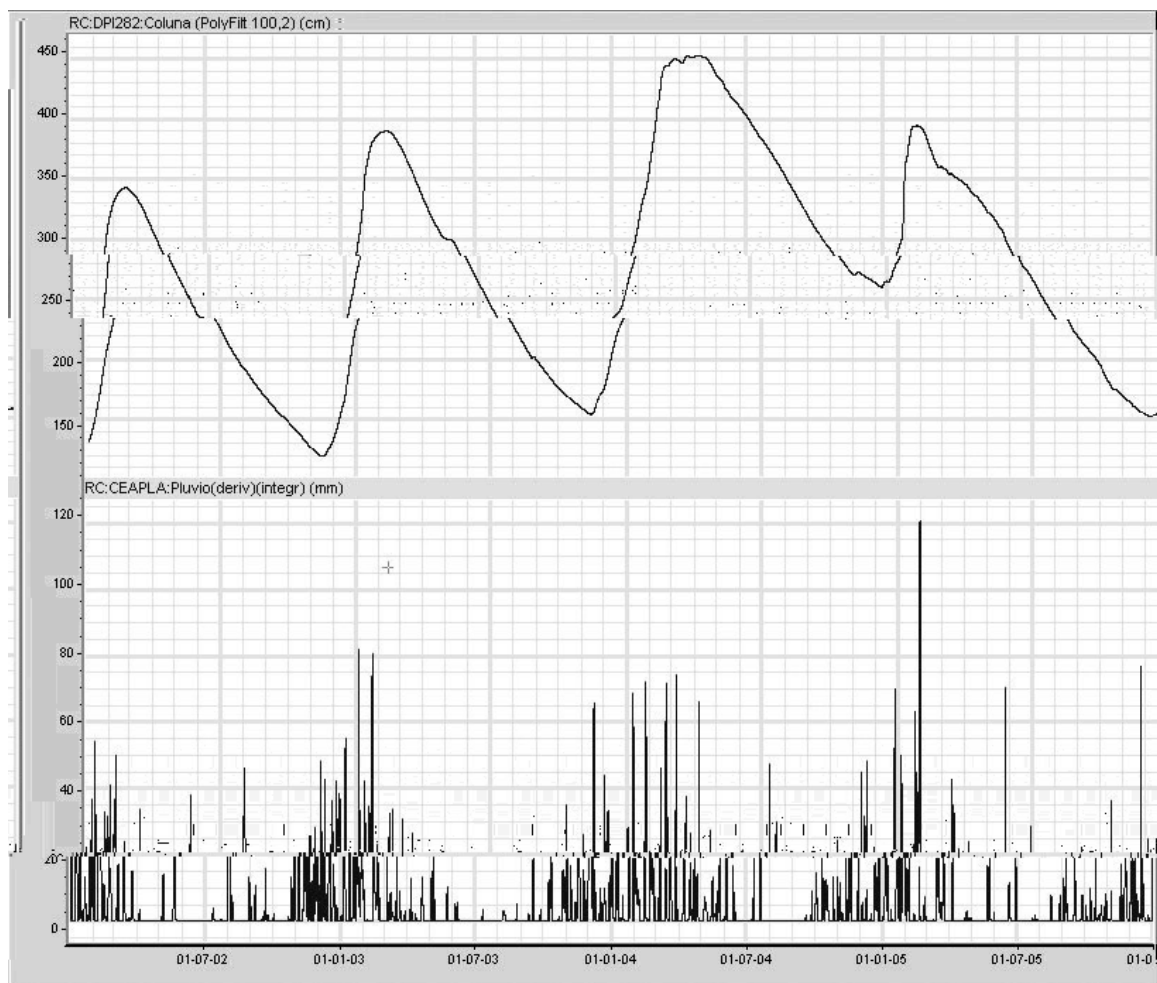


Figura 5.2 – Gráficos do Tsoft com dados de coluna d'água (acima) e de pluviometria (abaixo). Nota-se que a duração do período de chuvas influencia a recarga do poço, bem como a duração do intervalo entre dois valores mínimos consecutivos de coluna d'água.

5.2 – Variações Devido ao Efeito de Maré Terrestre

A atração gravitacional conjunta da Lua e do Sol causa deformações sobre a massa líquida e sólida da Terra, que dão origem às marés oceânica e terrestre, respectivamente. Se

calcularmos apenas a atração gravitacional que o Sol e a Lua exercem sobre uma massa de 1Kg na Terra, respectivamente, tem-se (SAWICKI, 1999):

$$a_s = \frac{GM_s}{d_s^2} = 6.04 \times 10^{-4} g \quad \text{e} \quad (5.1)$$

$$a_L = \frac{GM_L}{d_L^2} = 3.39 \times 10^{-6} g \quad , \quad (5.2)$$

sendo a distância média do centro da Terra ao do Sol $d_s = 1.496 \times 10^{11}$ m, a distância média do centro da Terra ao da Lua $d_L = 3.84 \times 10^8$ m, a massa do Sol $M_s = 2 \times 10^{30}$ kg, a massa da Lua $M_L = 1 \times 10^{23}$ kg, a constante universal de gravitação $G = 6.67 \times 10^{-11}$ e $g = 9.81$ N/kg. Assim, a atração do Sol sobre a Terra é cerca de 178 vezes maior que a da Lua. Contudo, as marés não são geradas pela atração gravitacional em si, mas pela chamada “atração diferencial” ou “força diferencial”, que é a diferença da atração gravitacional entre os lados mais próximo e mais distante da Terra em relação ao seu centro. Assumindo o raio da Terra $R = 6.37 \times 10^6$ m, a diferença da atração gravitacional do Sol para o lado mais distante da Terra é:

$$\Delta a_s = \frac{GM_s}{d_s^2} - \frac{GM_s}{(d_s + R)^2} = \frac{2GM_s R}{d_s^3} = a_s \frac{2R}{d_s} = 0.515 \times 10^{-7} g \quad (5.3)$$

Ou seja, Δa_s é menor que a_s . Se o mesmo cálculo for realizado para o lado mais próximo, será encontrado um valor maior, pela mesma diferença Δa_s . Assim, objetos do lado mais próximo do Sol tendem a ser acelerados em sua direção por $a_s + \Delta a_s$, enquanto que os objetos do lado mais distante por $a_s - \Delta a_s$. Esse efeito, aliado à componente tangencial nos pontos perpendiculares ao eixo de atração Terra-Sol, fazem com que a massa líquida se deforme, formando “bulbos” de água, conforme a Figura 5.3.

Por sua vez, se analogamente a atração diferencial for calculada para a Lua, tem-se:

$$\Delta a_L = a_L \frac{2R}{d_L} = 1.13 \times 10^{-7} g \quad , \quad (5.4)$$

de onde se observa que, embora a atração gravitacional do Sol sobre a Terra seja cerca de 178 vezes maior que a da Lua, a força diferencial que ele exerce sobre a Terra é de 0.46 vezes a da Lua, ou seja, menos da metade. Isso porque a atração diferencial é calculada sobre o cubo da distância (Equação 5.3), de forma que, estando a Lua 390 vezes mais perto da Terra que o Sol, é ela quem exerce a maior influência nesse complexo mecanismo, mostrado aqui de forma simplificada (maiores detalhes podem ser encontrados em SAWICKI(1999)).

Os efeitos da deformação variam conforme a rotação da Terra em torno do seu próprio eixo, e de acordo com a rotação da Lua em torno da Terra. A Figura 5.3 mostra como um ponto, situado na superfície da Terra, passa por duas marés altas e duas marés baixas dentro de um intervalo de 24 horas, em um ciclo completo de rotação da Terra.

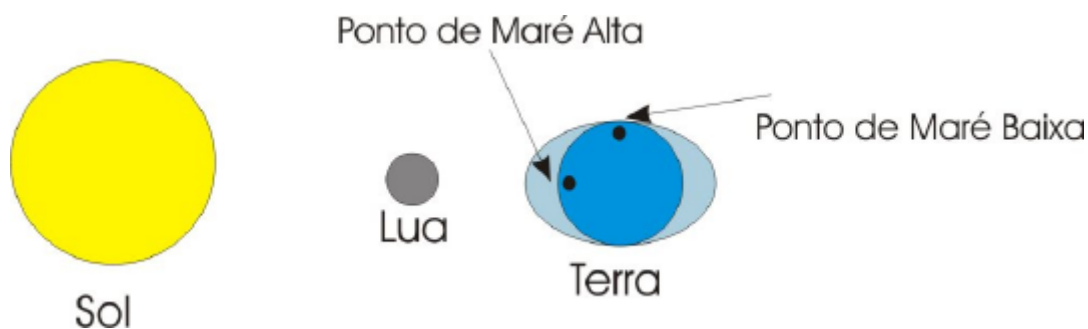


Figura 5.3 – Efeito da rotação da Terra nas marés. O ponto marcado em preto sobre a superfície terrestre passa, dentro de um intervalo de 24h, por duas marés altas e duas marés baixas.

Na Figura 5.4 é mostrado o efeito da posição relativa do Sol e da Lua nas marés. Simplificadamente, nos períodos de Lua Nova e Lua Cheia as forças gravitacionais dos dois corpos estão alinhadas, agindo com maior intensidade. Já nos períodos de Quarto Minguante e Quarto Crescente as forças estão perpendiculares entre si, de forma que a amplitude das marés resultantes é menor.

Embora o efeito das marés seja muito mais evidente sobre a massa líquida da Terra, as forças de tensão geradas pelos campos gravitacionais causam deformações também na massa sólida, causando a Maré Terrestre. Seu efeito sobre o nível d'água de poços em aquíferos confinados é um fenômeno bem conhecido e documentado. Segundo Bredehoeft (1967), desde o final do século XIX existem observações a respeito das flutuações de nível causadas por esse fenômeno e Todd (1959) cita o trabalho de Robinson (1939), descrevendo as

variações de nível d'água de poços em Iowa e Novo México (EUA).

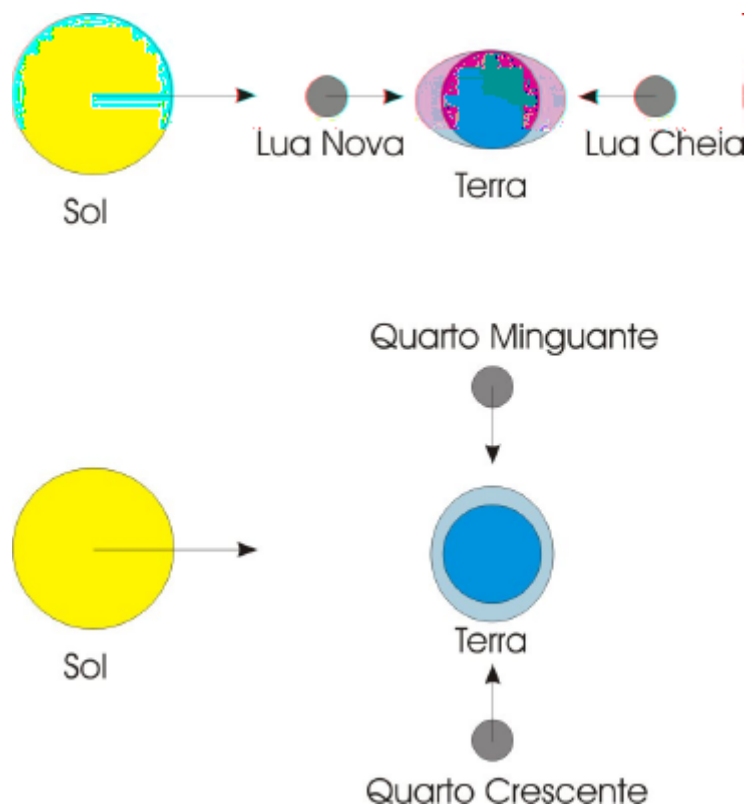


Figura 5.4 – Efeito da posição relativa do Sol e da Lua sobre as marés. Nos períodos de Lua Nova e Cheia, as forças gravitacionais da Lua e do Sol agem na mesma direção, intensificando o efeito. Nos períodos de Quartos Minguante e Crescente, as forças do Sol e da Lua agem perpendicularmente, o que ocasiona marés de menor intensidade.

Nos poços monitorados, mesmo sendo localizados em um aquífero livre como é o Rio Claro, foi possível registrar o efeito da maré terrestre no nível d'água, graças à sensibilidade dos instrumentos utilizados. Ocorrem dois ciclos por dia (Figura 5.5), sendo que o de maior amplitude acontece ao redor das 15:00hs e 16:00hs e o menor durante a madrugada, por volta das 3:00hs e 4:00hs. Como citado em Todd (1959), durante os períodos de Lua Nova e Cheia as variações possuem amplitude maior e são mais regulares, enquanto que nas fases de Lua Crescente e Minguante a amplitude é menor, com ciclos menos regulares.

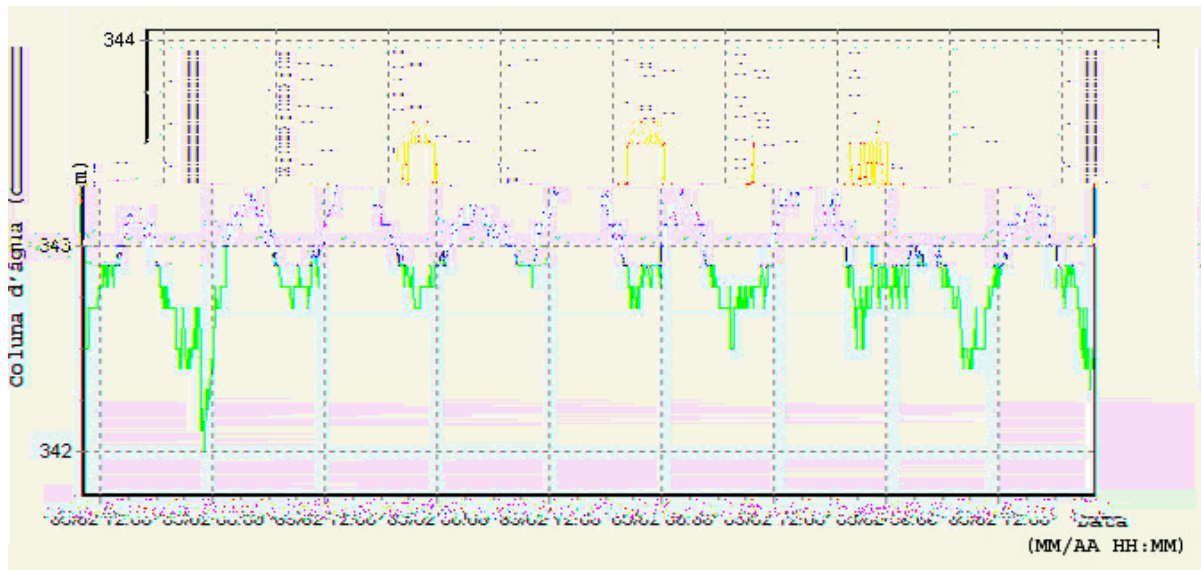


Figura 5.5 – Oscilações da coluna d’água devido à maré terrestre, Março de 2002. Nota-se a presença de dois valores máximos e dois valores mínimos, por dia.

Para fins de comparação, as Figuras 5.6 e 5.7 mostram as oscilações em Março de 2003, durante as fases de Lua Cheia e Quarto Minguante, respectivamente, onde é possível observar a maior amplitude das oscilações no primeiro caso.

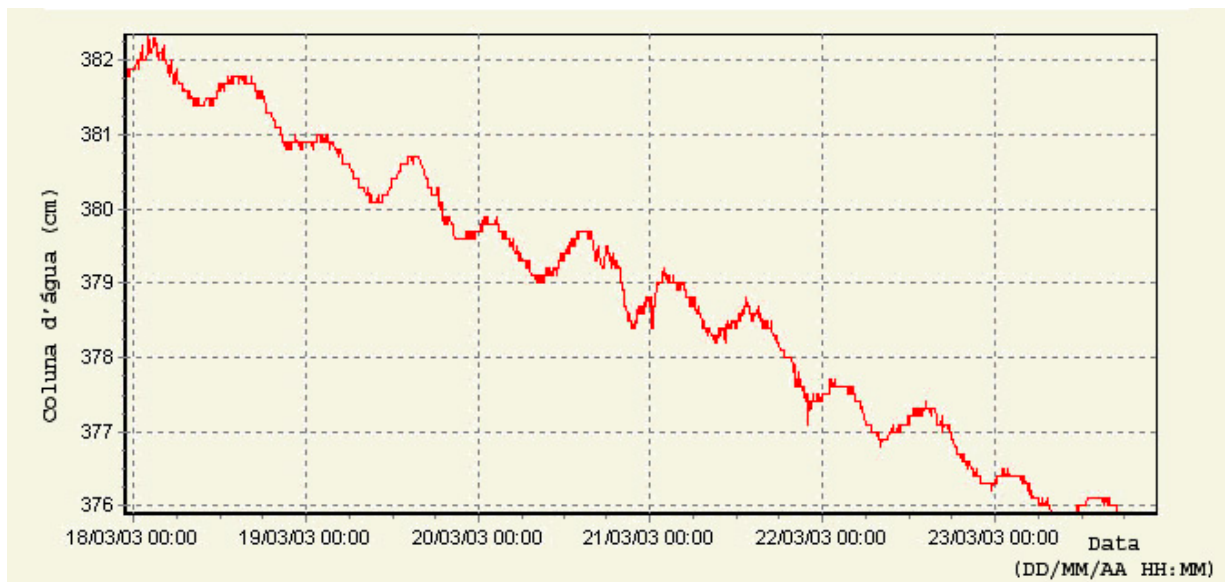


Figura 5.6 – Oscilações durante a fase de lua cheia

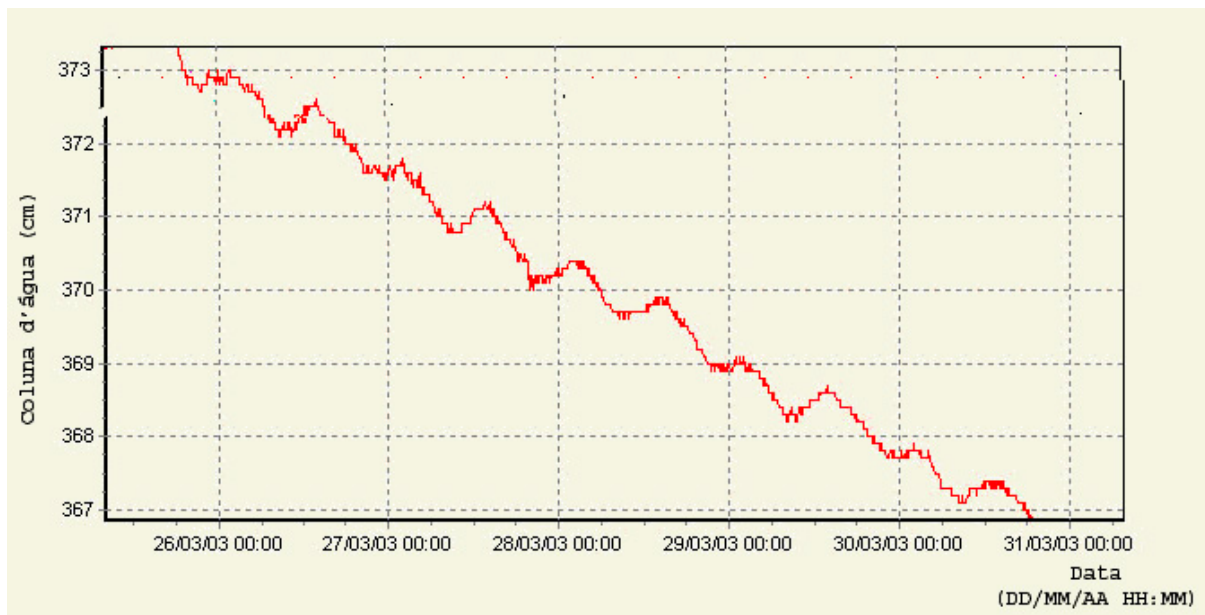


Figura 5.7 – Oscilações durante a fase de quarto minguante

5.3 – Efeitos de Terremotos

Terremotos podem causar oscilações do nível d'água em poços de aquíferos livres e confinados. A propagação das ondas causa uma mudança na carga do aquífero, provocando sua compressão e expansão, fazendo com que o nível oscile (TODD, 1959).

Durante o monitoramento tratado nesse trabalho foi possível detectar os efeitos de três terremotos. O primeiro ocorreu dia 23 de Junho de 2001 na costa do Peru, às 20:33hs GMT, com magnitude de 8.4 graus (USGS, 2005). A Figura 5.8 (à esquerda) mostra a oscilação causada na coluna d'água do IGCE-3 devido ao abalo, com uma amplitude máxima de aproximadamente 4 cm. No dia 7 de Julho houve um *aftershock* de 7.6 graus às 9:38hs GMT, que também foi detectado pelo transdutor no poço, mostrado na Figura 5.8 (à direita).

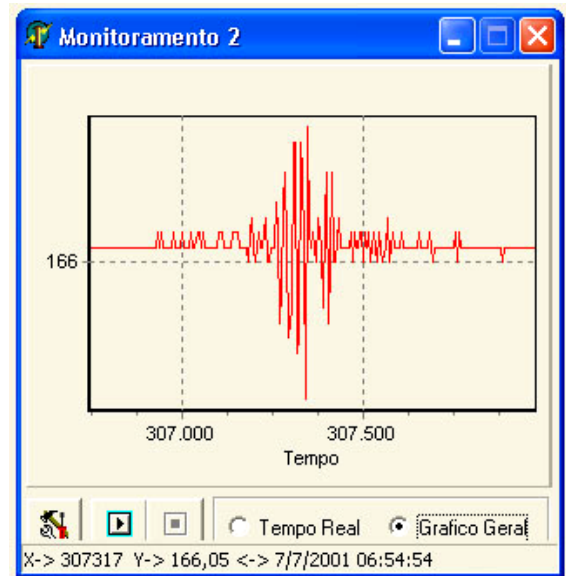
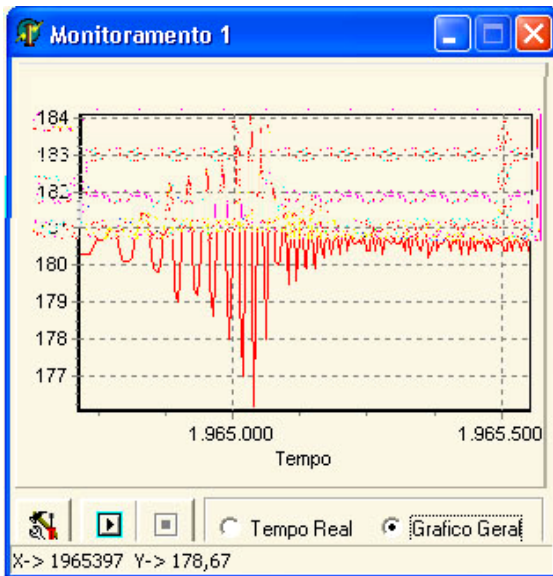


Figura 5.8 – Oscilação devido ao terremoto no dia 23 de Junho de 2001 – Peru (à esquerda), e seu *aftershock* (à direita), em 7 de Julho. (Tempo em segundos e Coluna em cm)

O segundo terremoto ocorreu dia 3 de Novembro de 2002, às 22:12 GMT, no Alaska,
 com magnitude de 7.9 graus

Alaska9Tj - 46.44 0 T86-0.0185

O terceiro e último terremoto detectado ocorreu em 2004, no dia 15 de Novembro, na costa da Colômbia, às 9:06hs GMT, com magnitude de 7.2 graus (USGS, 2005). Sua influência no nível d'água do poço IGCE-6, com amplitude média de cerca de 4mm, é mostrada na Figura 5.10.



Figura 5.10 – Oscilação causada pelo terremoto na Colômbia, em Novembro de 2004 (Tempo em segundos e Coluna em cm).

Capítulo 6 – Análise dos Dados de Monitoramento

6.1 – Análise de Fourier

Foi visto no capítulo anterior que a série temporal de coluna d'água estudada apresenta dois tipos de variação periódica distintas: a variação sazonal, de recarga e rebaixamento do aquífero, ocorrendo uma vez por ano, e a variação causada pela maré terrestre, com dois ciclos por dia. Portanto, uma análise de Fourier desses dados, conforme apresentada na seção 3.3.1, deveria mostrar no espectrograma os componentes em frequência desses dois fenômenos.

Para a análise das marés foram utilizados dois intervalos de monitoramento, dos anos de 2003 e 2004, em trechos cujo efeito da maré é mais claro, que são os picos dos ciclos sazonais, quando o valor da coluna d'água é mais estável, sem muita influência do processo de recarga ou descarga. A Figura 6.1 mostra o período que vai de 10 de Fevereiro de 2003 a 31 de Março do mesmo ano, na tela do Tsoft.

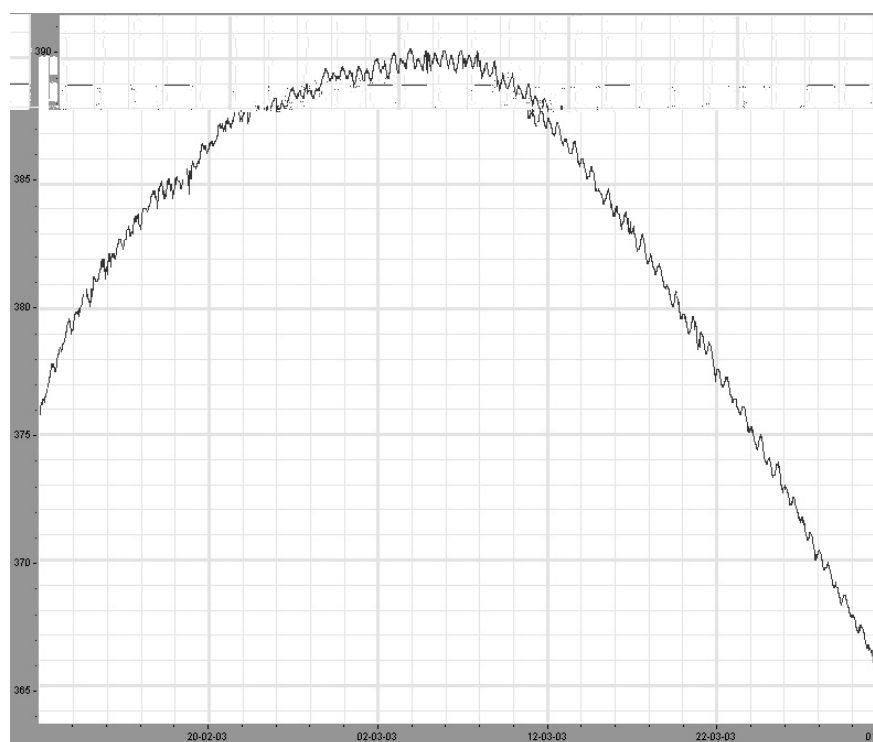


Figura 6.1 – Trecho da série temporal de 2003 escolhido para análise das marés. Devido à baixa variação do nível d'água neste período, que corresponde ao pico da recarga, o fenômeno das marés é mais facilmente percebido.

Nesse programa, usando a função de cálculo do espectro de frequências por meio da transformada de Fourier, foi gerado o espectrograma mostrado na Figura 6.2. O eixo das abscissas está graduado em Ciclos por Dia. Nota-se claramente o maior pico de frequência na marca de 2 ciclos/dia, e um menor na marca de 1 ciclo/dia.

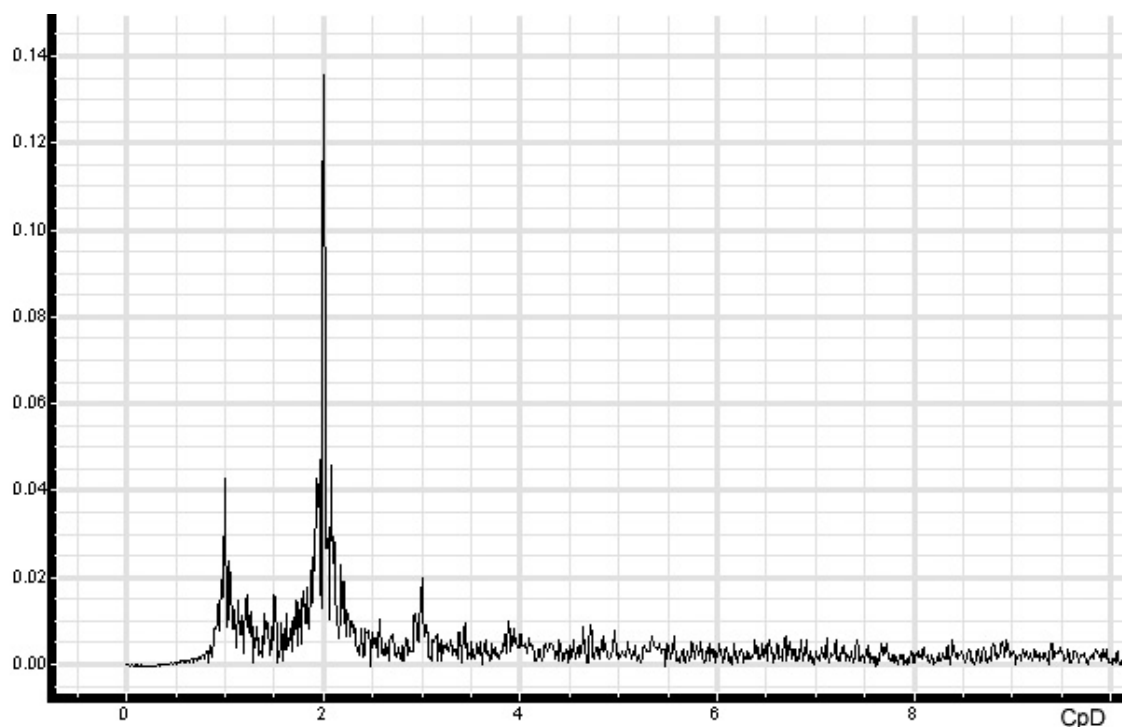


Figura 6.2 – Espectro das oscilações de maré. É claramente observável o pico na marca de 2 ciclos/dia, relacionado às marés.

O segundo trecho escolhido vai de 11 de Março de 2004 a 4 de Abril do mesmo ano e é mostrado na Figura 6.3. Aplicando a mesma análise anterior, tem-se o espectrograma da Figura 6.4 e, novamente, fica evidente o pico na marca de dois ciclos/dia, porém não se observa nenhum componente marcando 1 ciclo/dia de forma clara, como na Figura 6.2.

Esse fato se deve ao comportamento diferenciado das duas séries analisadas. Na primeira, que compreende um período de tempo mais longo, os dois picos de maré alta de cada dia possuem amplitudes diferentes. Assim, tem-se um componente com frequência de 1 ciclo/dia (as marés de mesma amplitude, a cada dia) e um componente com frequência de 2 ciclos/dia (as duas marés altas, dentro do mesmo dia). Na segunda série temporal, de período mais curto, as duas marés dentro de um mesmo dia possuem praticamente a mesma amplitude, então existe apenas um componente de frequência igual a 2 ciclos/dia.

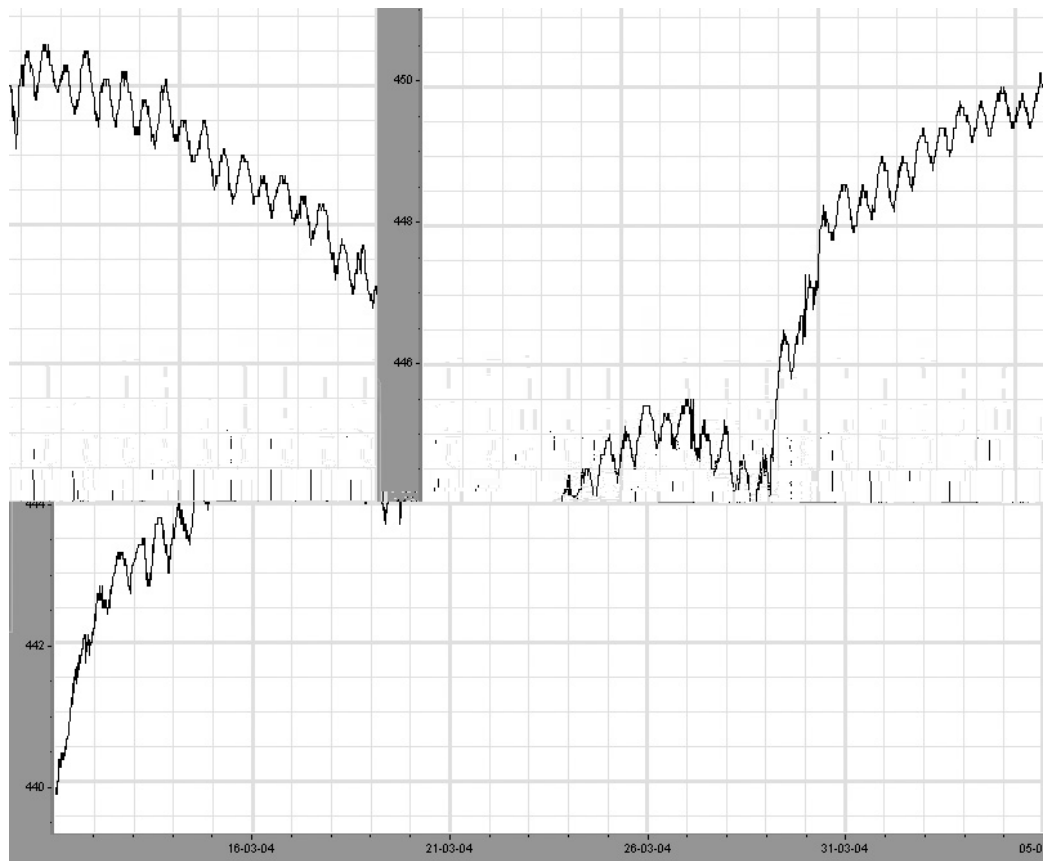


Figura 6.3 – Oscilações devido à maré terrestre, em 2004

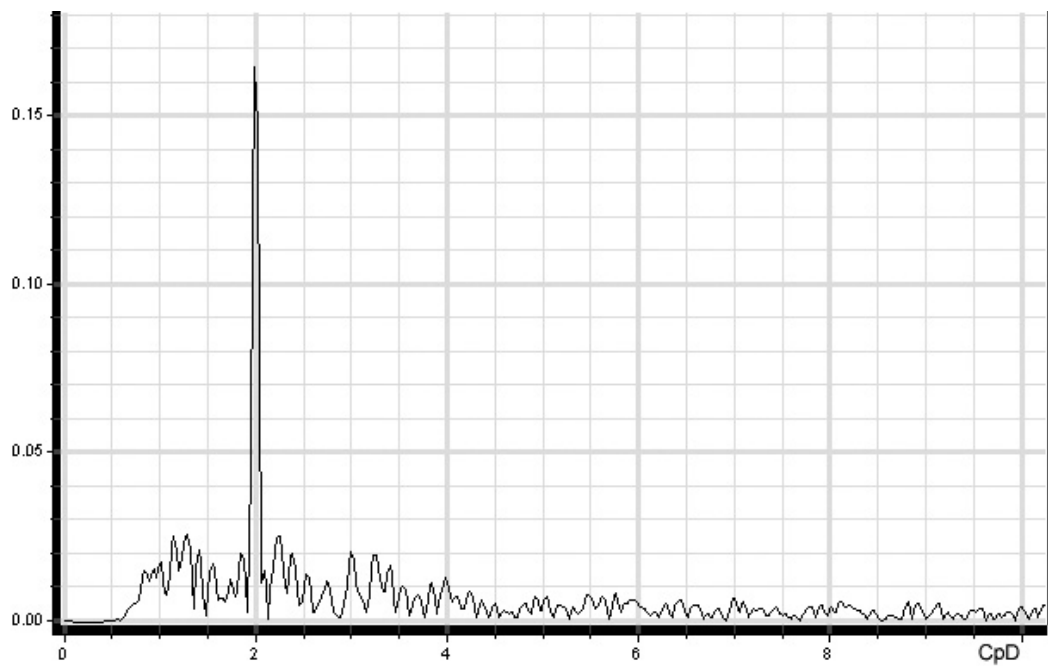


Figura 6.4 – Espectrograma das oscilações de maré do trecho de 2004.

Para tornar essa diferença mais claramente visível, eliminou-se das duas séries de dados a variação natural do aquífero, por meio de uma filtragem que usa as transformadas discreta e inversa de Fourier (Eq. 3.10 e 3.11). Primeiro, transpõe-se a série temporal do domínio do tempo para o da frequência, usando a transformada direta. Então, elimina-se os componentes que possuem frequência inferior a 1 Ciclo/dia (que formam a variação sazonal). Em seguida, realiza-se a transformada inversa, e a série de dados é transposta de volta para o domínio temporal. Com isso, mantém-se todas as variações maiores que 1 Ciclo/dia (todos esses passos formam um filtro passa-alta com frequência de corte igual a 1 ciclo por dia). O resultado pode ser visto na Figura 6.5.

Observando-se nesta figura que cada divisão maior representa um período de 24 horas, é possível notar claramente a diferença entre as variações, sendo que no gráfico superior as duas marés altas diárias têm valores de amplitude muito próximos (o que ocorre durante as fases de Lua Cheia e Nova), enquanto que no gráfico inferior se tem marés altas de diferentes amplitudes dentro de um mesmo dia (fase de Quartos Minguante e Crescente). Isso explica a ausência da componente espectral de 1 ciclo/dia na Figura 6.4, relacionada à série do gráfico superior, pois o período de tempo analisado da primeira série é mais curto, havendo predominância das variações típicas de Lua Cheia e Nova.

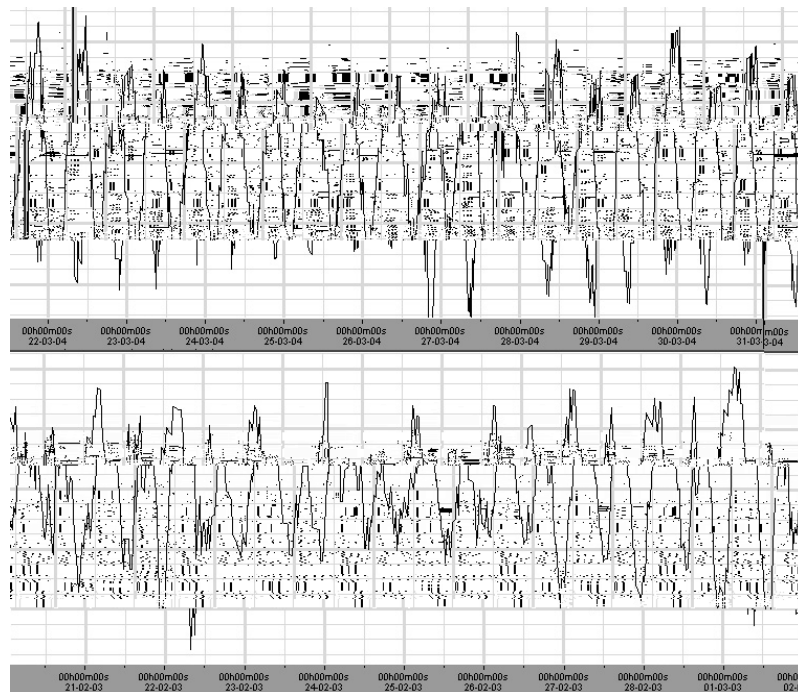


Figura 6.5 – Comparação entre os comportamentos das marés das séries analisadas, em 2004 (topo) e 2003. Cada marca mais escura do *grid* do gráfico corresponde a um período de 24hs.

O outro tipo de variação da coluna d'água, o sazonal, também foi detectado pela aplicação da análise de Fourier. Para tanto, foi usada a série completa de dados, com quatro anos de monitoramento. Os espectrogramas resultantes são mostrados nas Figuras 6.6 e 6.7, em gráfico Log-Lin para melhor visualização do pico espectral.

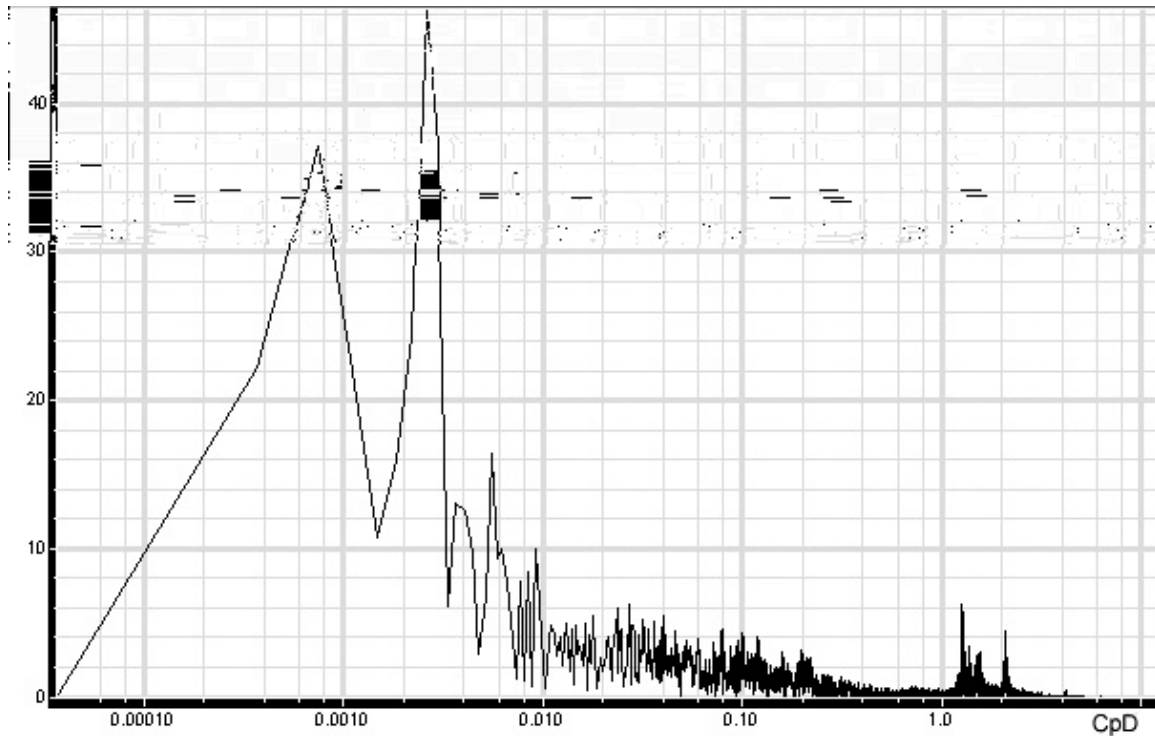


Figura 6.6 - Espectrograma da série temporal completa, de 2002 a 2005.

Como a variação sazonal ocorre uma vez por ano, então sua frequência é de $\frac{1}{365}$ ciclos/dia, ou aproximadamente 0.0027 ciclos/dia. Na Figura 6.7 é possível observar que o pico ocorre muito próximo desse valor, confirmando essa periodicidade.

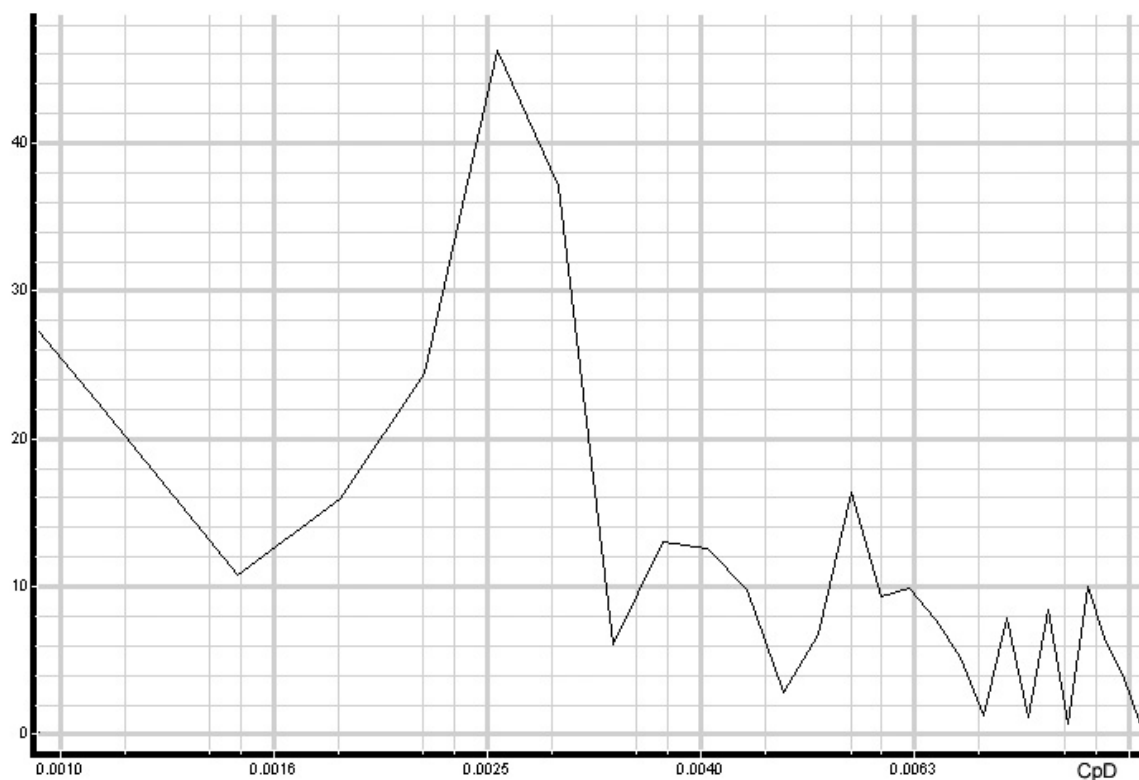


Figura 6.7 – Pico de frequência que mostra a variação sazonal de 0.0027 ciclos/dia (uma vez por ano).

6.2 – Análise de Correlação Cruzada

Ao lado da Análise de Fourier, a análise de correlação cruzada (*cross-correlation*) mostra-se como uma valiosa ferramenta para séries temporais que pode ser aplicada em estudos hidrogeológicos. Padilla e Pulido-Bosch (1995), bem como Larocque (1998), utilizaram essa ferramenta como parte de uma metodologia para estudar as características hidrodinâmicas de aquíferos cársticos, como sua variabilidade espacial e temporal, relação com as zonas de descarga por meio das hidrógrafas de rios e córregos, estimativa do armazenamento específico e porosidade, e atraso entre sinais de entrada e saída, como a pluviometria e os níveis piezométricos.

Seguindo-se o mesmo procedimento e aplicando-se os conceitos mostrados na seção 3.3.2, considerou-se a série temporal de dados de pluviometria como entrada e os dados de monitoramento de coluna d'água como saída (Figura 5.2), de forma a calcular um valor médio

do tempo Δt que a chuva ocorrida no instante t leva para atingir o nível d'água, no instante $t + \Delta t$, posto que a recarga é o reflexo direto da pluviometria.

Para essa análise ser realizada no Tsoft, após o carregamento das duas séries de dados, foram fornecidos ao programa três parâmetros: *Min Shift*, *Max Shift* e *Step*. Os dois primeiros estão relacionados ao ponto de corte, ou seja, uma das séries temporais será deslocada no tempo por um valor de *Min Shift* até *Max Shift*, tendo cada deslocamento um incremento igual ao valor de *Step*. Para cada incremento, é calculado um valor de correlação e ao final do processo ter-se-á o correlograma. Esses três valores de tempo devem ser fornecidos em Segundos, portanto, para uma análise com ponto de corte de aproximadamente seis meses, com um incremento de 24hs, *Min Shift* = - 15552000s, *Max Shift* = 15552000s, e *Step* = 86400s. O resultado é mostrado na Figura 6.8.

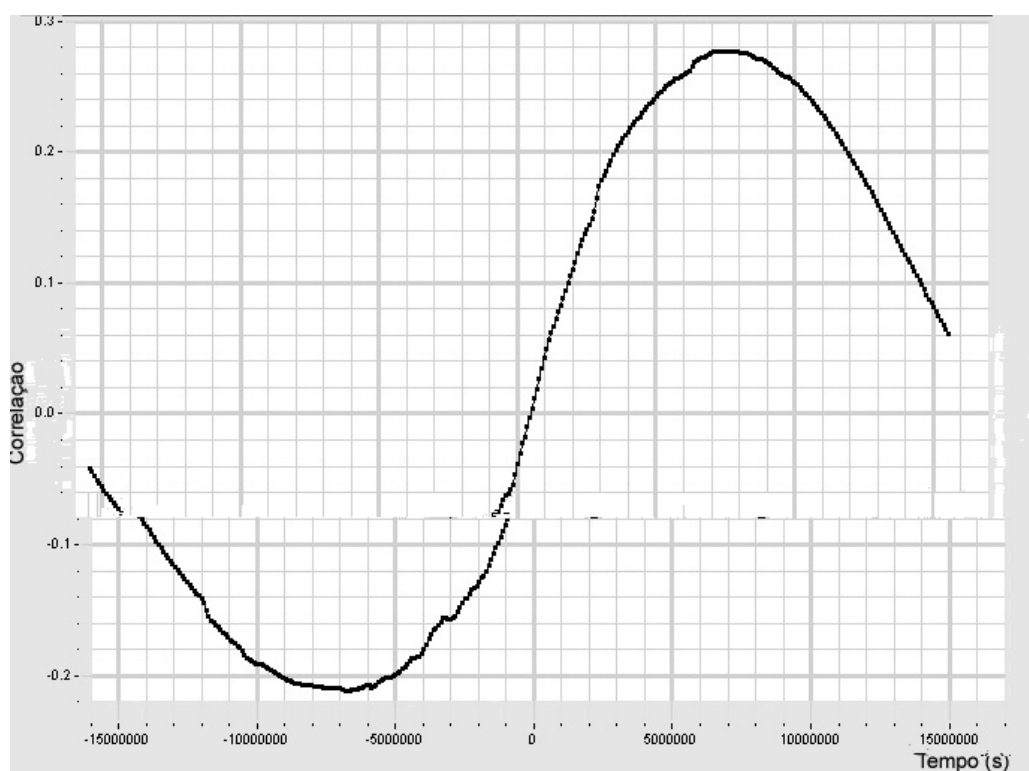


Figura 6.8 – Correlograma resultante da análise dos dados de coluna d'água e pluviometria

O maior valor de correlação obtido foi de 0.278, para um tempo igual a 7516800 segundos, ou seja, 87 dias. Essa é a estimativa do tempo médio que a água da chuva leva para percorrer a zona não-saturada do aquífero e atingir o nível piezométrico do poço monitorado.

Se a série de dados de coluna d'água for deslocada para trás no tempo por esse valor e a correlação for recalculada, obtêm-se o gráfico da Figura 6.9, em que os eventos de chuva e variação de nível estão com máxima correlação no tempo $k = 0$, como se o efeito da pluviometria fosse instantâneo, analogamente ao que ocorreria num reservatório perfeitamente impermeável, a céu aberto.

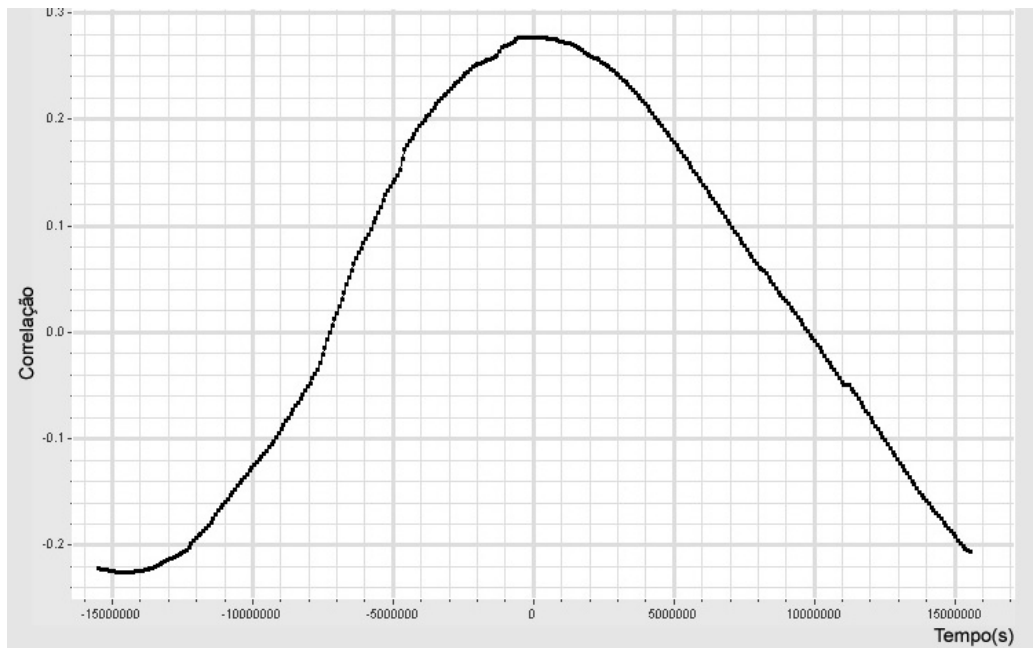


Figura 6.9 – Correlograma mostrando o efeito de um deslocamento temporal negativo de 87 dias na série de dados de coluna em relação à pluviometria.

Considerando que o nível piezométrico varia entre 7m e 10m, dependendo do ano, pode-se estimar as velocidades de infiltração:

$$v_1 = \frac{7m}{87dias} = \frac{700cm}{7516800s} = 9.31 \times 10^{-5} cm/s$$

$$v_2 = \frac{10m}{87dias} = \frac{1000cm}{7516800s} = 1.33 \times 10^{-4} cm/s$$

Segundo a Ley de Darcy, a velocidade de fluxo v depende da condutividade hidráulica k e do gradiente hidráulico i (TODD, 1959):

$$v = ki \quad (6.1)$$

Quando o fluxo é vertical e em zona saturada, o gradiente hidráulico iguala-se a 1, pois está relacionado aos potenciais gravitacional e de sucção do solo. Sendo a velocidade estimada aqui referente a um fluxo vertical, porém em solo não-saturado (no qual o gradiente hidráulico diminui), a velocidade de fluxo é menor que aquela do solo saturado. Segundo Kumayama (2004), a condutividade hidráulica do solo saturado da área estudada varia de 10^{-3} a 10^{-4} cm/s. Portanto, os valores estimados estão coerentes, situando-se dentro da faixa entre 10^{-4} e 10^{-5} cm/s.

6.3 – Análise de Reescalonamento

A estimativa do Expoente de Hurst, calculado pela Análise de Reescalonamento da série de dados de monitoramento, foi obtida usando um programa escrito especificamente para esse fim, durante o desenvolvimento desta pesquisa, segundo a formulação apresentada no item 3.3.3. A Figura 6.10 mostra a tela do programa escrito para o cálculo do expoente.

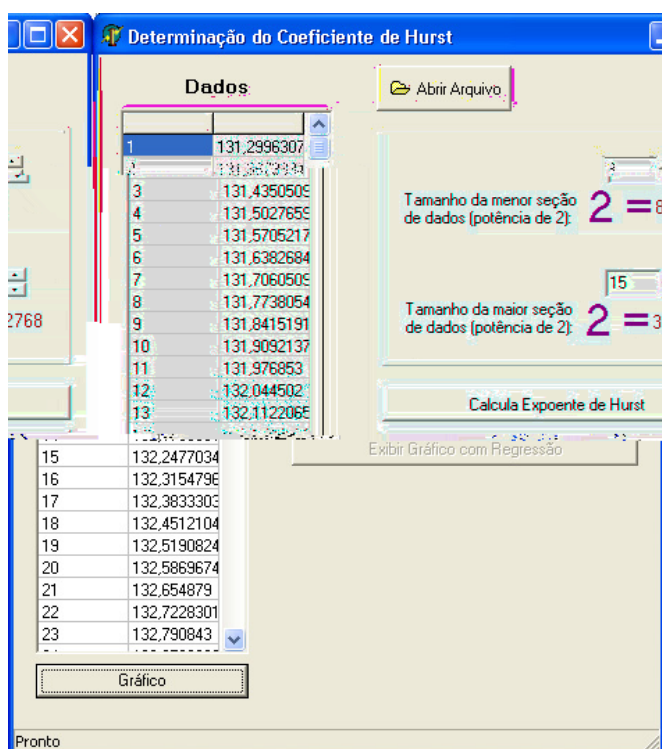


Figura 6.10 – Tela do programa para cálculo do expoente de Hurst, com os dados de coluna d’água carregados. Ajusta-se os tamanhos da maior e da menor seção da série temporal sobre a qual serão calculados os diversos valores de R/S, segundo a metodologia apresentada no item 3.3.3.

A série utilizada foi a mesma das análises anteriores, com intervalo de 1 hora entre cada leitura. O comprimento da menor seção foi de 8 leituras, enquanto que o da maior foi de 32768 leituras, o valor em potência de 2 mais próximo do total de leituras que era de pouco mais de 34 mil leituras. O resultado dos pontos estimados segundo o método descrito anteriormente é dado na Tabela 6.1; a Figura 6.11 mostra o gráfico traçado com os mesmos pontos, juntamente com a reta de melhor ajuste e o valor de sua inclinação.

Tam. Seção	Media (RS)	Log2 (Tam. Seção)	Log2 (Media RS)
8	3.491	3	1.804
16	6.941	4	2.795
32	13.861	5	3.793
64	27.708	6	4.792
128	55.426	7	5.793
256	110.458	8	6.787
512	218.893	9	7.774
1024	435.093	10	8.765
2048	905.375	11	9.822
4096	1719.366	12	10.748
8192	3533.701	13	11.787
16384	5219.362	14	12.35
32768	10118.01	15	13.305

Tabela 6.1 – Resultados da estimativa do expoente de Hurst sobre os dados de coluna d’água

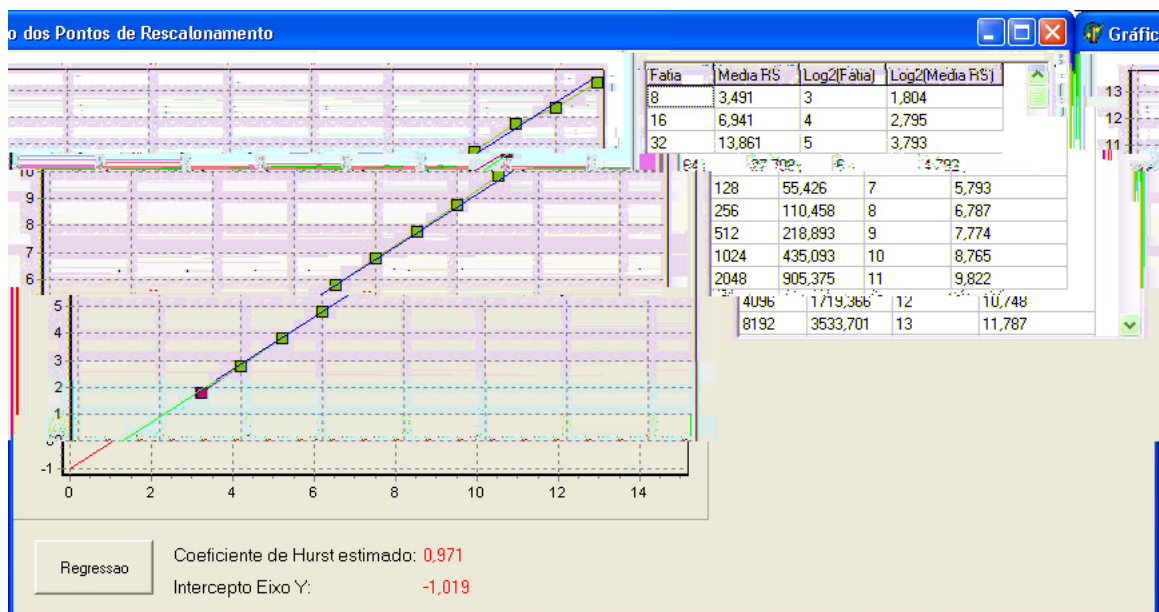


Figura 6.11 – Gráfico dos pontos da Tabela 5.1 (em azul), juntamente com a reta ajustada (em vermelho) da análise R/S para os dados de variação de coluna d’água.

O valor do expoente de Hurst estimado, que corresponde à inclinação da reta do gráfico, foi de 0.971. Sendo maior que 0.5, ele indica que as variações de nível d'água dessa série são persistentes, ou seja: o sistema carrega uma memória dos níveis passados, com valores altamente auto-correlacionados. Como comparação, o valor de H obtido por Hurst, resultante da análise dos valores de mínimos níveis do Rio Nilo no período compreendido dos anos 622 a 1469 foi de 0.91 (MANDELBROT e WALLIS, 1969).

Quando se realiza o mesmo processo, agora sobre os dados de pluviometria, são obtidos os resultados mostrados na Tabela 6.2 e na Figura 6.12.

Neste caso, o resultado do expoente de Hurst para a série de dados de pluviometria foi de 0.766, indicando novamente um fenômeno persistente e de acordo com o resultado obtido com diferentes séries de chuvas (FAVARETTO, 2004), (PETERS e CHRISTENSEN, 2006).

É interessante notar que o valor de H obtido com os dados de coluna d'água é maior que aquele obtido com a pluviometria. A explicação para esse fato é que o aquífero, funcionando como um reservatório, de certa forma “integra” as variações pluviométricas no tempo. Assim, para as diversas escalas de tempo, eventos de chuva que tendem a ser intercalados com eventos de seca são “suavizados” pelo aquífero, pois com o armazenamento a água infiltrada da chuva é liberada aos poucos, fazendo com que os valores de coluna d'água apresentem uma auto-correlação maior, de for que o sistema apresenta uma “memória” dos eventos por um tempo maior (acentuando o “Efeito José” da série).

Tam. Seção	Media(RS)	Log2 (Tam. Seção)	Log2 (Media RS)
-----------------------	------------------	------------------------------	----------------------------

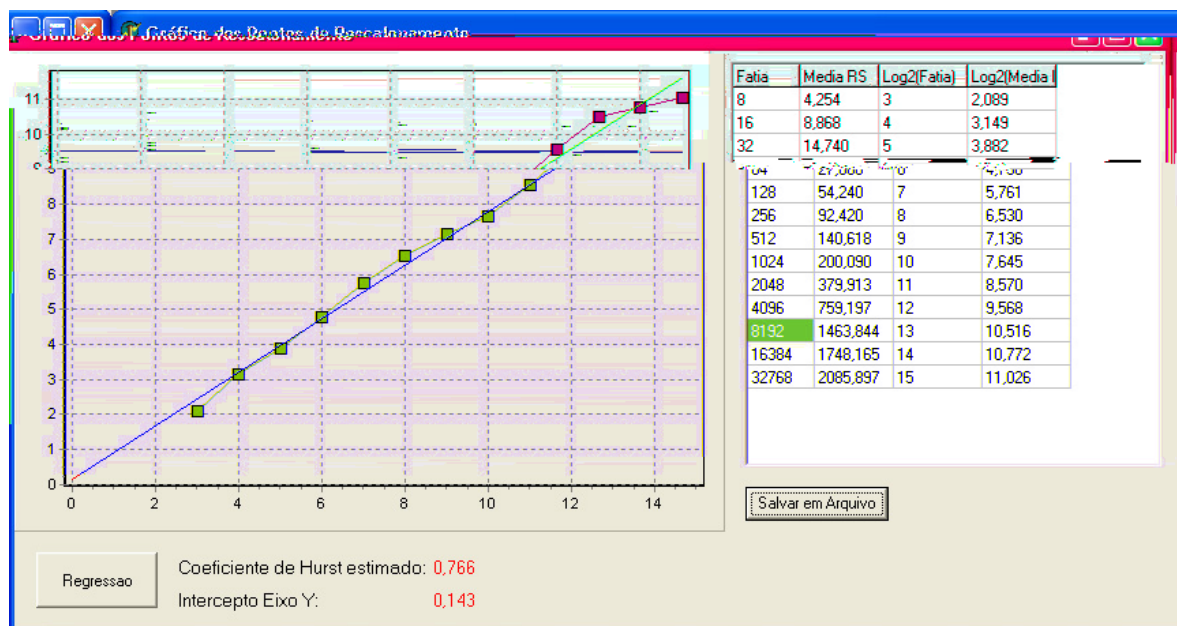


Figura 6.12 – Gráfico dos pontos da Tabela 6.2 (em azul) e a reta de ajuste (em vermelho) da análise R/S para os dados de pluviometria.

Outro ponto interessante é que é possível notar no gráfico da Figura 6.11, próximo do ponto $t = 13$ (log do tempo), como o valor de y se desvia um pouco para baixo da reta de regressão, quando então parece retomar a inclinação a partir do ponto $t = 14$. Segundo Mandelbrot e Wallis (1969), uma mudança na inclinação dos pontos, como essa, é um indício de uma forte periodicidade na série temporal analisada, com ciclos de duração próxima ao valor de tempo onde ocorre essa mudança. Tomando o exemplo dos mesmos autores, a Figura 6.13 mostra o gráfico para a atividade mensal das manchas solares (detalhe da Figura 3.19 do item 3.3.3). É possível notar uma quebra na inclinação próxima ao valor de $t = 132$ meses (11 anos), que é o valor conhecido dos ciclos de atividade das manchas solares.

A Figura 6.14 mostra um detalhe do gráfico da Figura 6.11, onde é possível ver melhor a referida quebra de $t = 13$. Como esse ponto corresponde a $2^{13} = 8192$ horas, o que equivale a cerca de 341 dias, é possível que isso indique a periodicidade da oscilação sazonal do aquífero (um valor de 365 dias equivaleria a 8760 horas, cujo valor de \log_2 é aproximadamente 13.1), sugerindo assim que a Análise R/S também pode acusar a variação sazonal. Porém, quando o objetivo é a verificação de periodicidades de séries temporais, a análise de Fourier possui uma precisão muito maior.

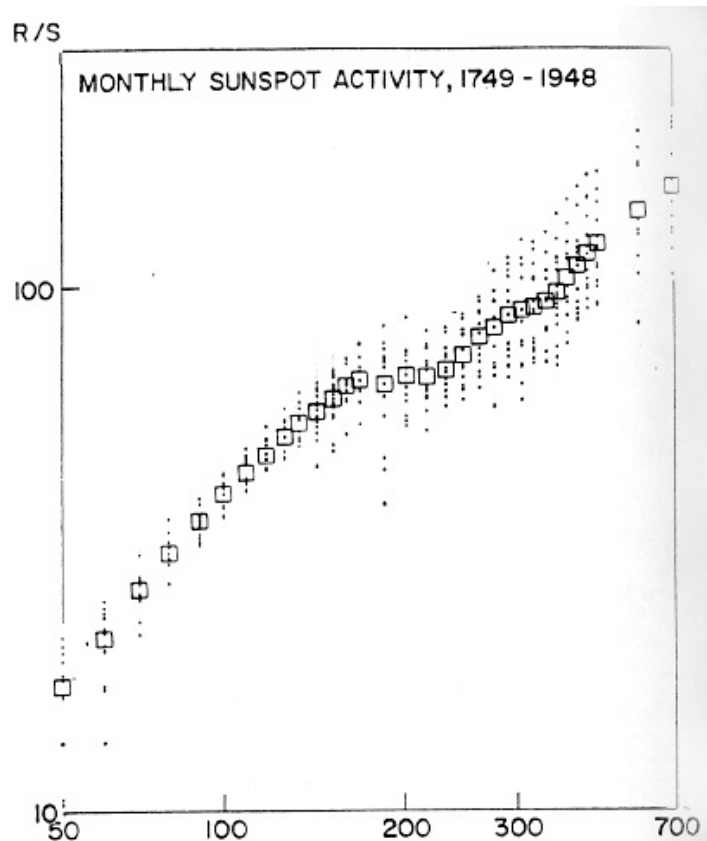


Figura 6.13 – Quebra de inclinação próxima de $t = 132$ meses = 11 anos, no gráfico de $\text{Log}(R/S) \times \text{Log}(\text{tempo})$ para a série temporal de dados de manchas solares, indício de forte periodicidade.

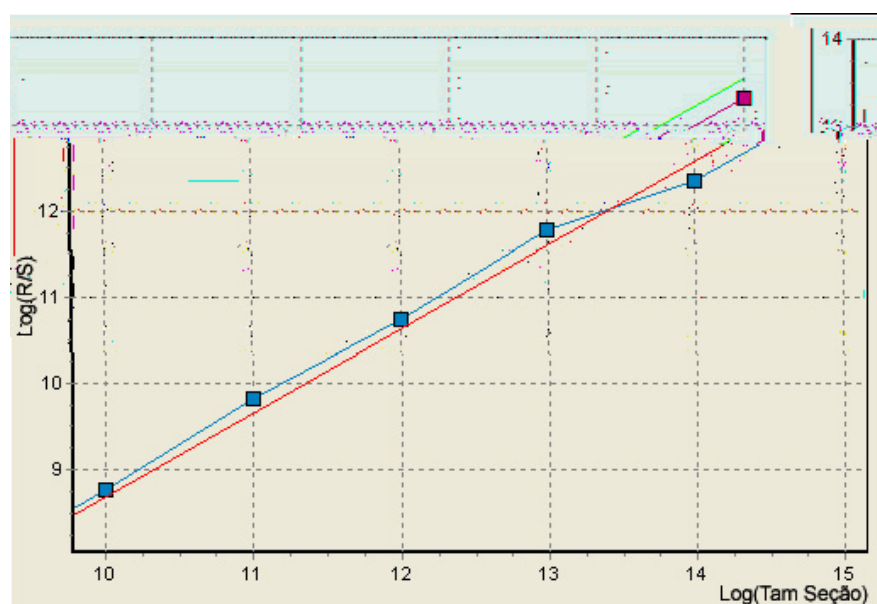


Figura 6.14 – O mesmo tipo de quebra da Figura 6.13, porém mais sutil, no gráfico da série temporal de coluna d'água, em $t = \log_2 8192$ horas = 341 dias

Capítulo 7 – Conclusões

A partir do monitoramento sistemático de coluna d'água apresentado, utilizando a instrumentação adequada, foi possível obter uma série temporal com elevado nível de detalhe, capaz de registrar oscilações de pequenas amplitudes (da ordem de 10^{-3} m), relacionadas a fenômenos naturais como a maré terrestre e o efeito de terremotos distantes, pequenos demais para serem percebidos cotidianamente mas ainda assim existentes.

Com uma série temporal detalhada foi possível a aplicação de ferramentas matemáticas consagradas para a análise de séries temporais, que permitiram:

1) corroborar alguns resultados qualitativos observados, como a frequência das marés (duas vezes ao dia) e da oscilação sazonal (um ciclo por ano);

2) mostrar a relação temporal da pluviometria com a recarga do aquífero, e estimar o tempo médio de infiltração (87 dias) e a condutividade hidráulica da zona não-saturada (entre 10^{-4} e 10^{-5} cm/s) na área monitorada;

3) mostrar que as oscilações do nível d'água, assim como outros fenômenos naturais, como a chuva, apresentam um comportamento que traz embutido uma “memória” de eventos anteriores, em que o resultado futuro é influenciado pela história dos resultados passados.

Além da importância relacionada ao melhor conhecimento das características naturais do aquífero, os resultados do monitoramento aqui apresentados podem auxiliar de forma direta em processos de remediação de áreas contaminadas, seja por meio de uma melhor caracterização dos fenômenos envolvidos na variação do nível d'água e seu conseqüente transporte vertical de contaminantes, seja por meio da estimativa e incorporação de parâmetros em modelos de simulação numérica de forma a refinar e aproximar melhor os resultados teóricos daqueles observados em campo.

Capítulo 8 - Referências Bibliográficas

- BRACEWELL, R. N. **The Fourier Transform and its Applications**. McGraw-Hill, 474p. 1986.
- BREDEHOEFT, J. D. **Response of Well-Aquifer Systems to Earth Tides**. Journal of Geophysical Research, v.72, n.12, p.3075-3087, Jun. 1967.
- BRESLIN, M. C., BELWARD, J. A. **Fractal Dimensions for Rainfall Time Series**. Mathematics and Computers in Simulation, n.48, v.4-6, p.437-446, Jun 1999.
- CHANG, H. K., CARNIER NETO, D. **Wellplex**. INPI 00044145, 2001.
- CHRISTOFOLETTI, A. L. H. **Análise Fractal e Multifractal da Estrutura de Estações Chuvosas em Localidades do Estado de São Paulo**. 263p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.
- COOLEY, J. W. e TUKEY, J. W. **An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series**. Mathematics and Computers, v.19, p.297-301, 1965.
- DAEE. **Estudo de Águas Subterrâneas, Região Administrativa 5 (Campinas), SP**. São Paulo, 2V. 1981.
- FAVARETTO, A. B. **Estimativa do Expoente de Hurst de Séries Temporais de chuvas no Estado de São Paulo usando as Transformadas de Fourier, Wavelets e Análise R/S**. 89p. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.
- FOLK, R. L. **Petrology of Sedimentary Rocks**. Austin: Hemphill's, 182p. 1968.
- FULFARO, V. J., SUGUIO K. **A Formação Rio Claro, (Neo-cenozóico), e seu ambiente de deposição**. Boletim Instituto Geográfico e Geológico, v.20, p45-60, 1968.
- HURST, H. E., BLACK, R. P., SIMAIKA, Y.M. **Long-term Storage: an Experimental Study**. London: Constable London, 145p. 1965.
- KREYSZIG, E. **Advanced Engineering Mathematics**. John Wiley & Sons, Inc. 1271p, 1993.
- KUMAYAMA, D. M. **Calibração de um reflectômetro (TDR) para o estudo da variação do teor de umidade num perfil de solo não saturado**. 74p. Trabalho de Formatura para o

Curso de Geologia. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

LANDIM, P. M. B., SOARES, P. C., GAMA, J. R. E. **Estratigrafia do noroeste da bacia sedimentar do Paraná**, p.45 (Curso de Especialização: Convênio IPT –UNESP –Rio Claro). 1980.

MANDELBROT, B. B., WALLIS, J. R. **Noah, Joseph and Operational Hydrology**. Water Resources Research, n.4, p.909-918, 1968.

MANDELBROT, B. B., WALLIS, J. R. **Global Dependence in Geophysical Records**. Water Resources Research, n.5, p.312-340, 1969.

MIRANDA, J. G. V., ANDRADE, R. F. S. **R/S Analysis of Pluviometric Recors: Comparison with Numerical Experiments**. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, v.295, n.1-2, p.38-41, Jun 2001.

OLIVA, A. **Estudo Hidrogeológico da Formação Rio Claro no Município de Rio Claro-SP**. 71p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

PADILLA, A., PULIDO-BOSCH, A. **Study of Hydrographs of Karstic Aquifers by means of Correlation and Cross-spectral Analysis**. Journal of Hidrology, v.168, p. 73-89, 1995.

LAROCQUE. M., MANGIN, A., RAZACK, M., BANTON, O. **Contribution of Correlation and Spectral Analyses to the Regional Study of a Large Karst Aquifer (Charente, France)**. Journal of Hidrology, v.205, p. 217-231, 1998.

PENTEADO, M. M. **Geomorfologia do setor centro-ocidental da depressão periférica paulista**. Instituto de Geografia – USP. Serie Teses e Monografias, n.22, 86p, 1976.

PETERS, O., HERTLEIN C., CHRISTENSEN K. **A Complexity View of Rainfall**. Physical Review Letters, v.88, n.1, Jan 2002.

PETERS, O., CHRISTENSEN K. **Rain Viewed as Relaxational Events**. Journal of Hidrology, *in Press*, 2006.

ROBINSON, T. W. **Earth-tides shown by fluctuations of water-levels in wells in New Mexico and Iowa**. Trans. Am. Geophys. Union, v.20, p.656-666. 1939.

SAWICKI, M. **Myths about Gravity and Tides**. The Physics Teacher, v37, p.438-441, 1999.

SHANNON, C. E. **Communication in the Presence of Noise.** Proceedings of Institute of Radio Engineers, v.37, n.1, p.10-21, Jan 1949.

TODD, D. K. **Groundwater Hidrology.** Nova York : John Wiley & Sons Inc., 1959. 320p.

USGS **Earthquake Hazards Program.** Significant Earthquakes of the World. Disponível em: <<http://neic.usgs.gov/neis/eqlists/significant.html>>. Acesso em 15 jun. 2005.

VAN CAMP, M., VAUTERIN, P. **Tsoft: Graphical and Interactive Software for the Analysis of Time Series and Earth Tides.** Computers & Geosciences, v.31, n.5, p.631-640, Jun. 2005.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)