

GILBERTO GAGG

**AUSCULTAÇÃO GRAVIMÉTRICA NA REGIÃO DA  
BARRAGEM BENTO MUNHOZ DA ROCHA**

Dissertação apresentada como requisito  
parcial à obtenção do grau de Mestre.  
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geo-  
désicas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jair Mendes Marques

CURITIBA  
1997

# "AUSCULTAÇÃO GRAVIMÉTRICA NA REGIÃO DA BARRAGEM BENTO MUNHOZ DA ROCHA"

POR

GILBERTO GAGG


Dissertação aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



Prof. Dr. SÍLVIO ROGÉRIO CORREIA DE FREITAS - Presidente



Prof. Dr. JAIR MENDES MARQUES - Orientador



Prof. Dr. CAMIL GEMAEL - Co-Orientador



Prof. Dr. QUINTINO DAL MOLIN - Membro

Dedico este trabalho a minha esposa,  
pais e irmãos, pelo incentivo e apoio.

## AGRADECIMENTOS

O autor deseja externar seus agradecimentos às pessoas e entidades abaixo relacionadas:

- Ao Professor Dr. Jair Mendes Marques, pela dedicada orientação e incentivo;
- Ao Professor Dr. Camil Gemael, grande defensor da Gravimetria, pela idéia do trabalho e sugestões recomendadas;
- Ao Professor Dr. Quintino Dalmolin, pelo incentivo e apoio;
- Ao Engenheiro Eduardo Luis Coelho Figueira, pelo auxílio prestado nas questões computacionais;
- Ao amigo José Augusto Gomes Vieira, pelo encorajamento e estímulo;
- À minha esposa Eliana, pela paciência e incentivo;
- À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo durante a realização do curso;
- À todos os amigos que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho;
- A Deus, pela vitória.



## *SUMÁRIO*

SUMÁRIO.....	I
LISTA DE FIGURAS .....	IV
LISTA DE TABELAS .....	VII
RESUMO .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
1.1 DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA DO ASSUNTO .....	01
1.2 OBJETIVOS .....	03
1.3 DEFORMAÇÃO.....	03
1.4 METODOLOGIA .....	04
<b>2. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....</b>	<b>06</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA BARRAGEM BENTO MUNHOZ DA ROCHA .....	06
2.2 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO ASSOCIADO A GRAVIMETRIA .....	08
2.3 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO NA BARRAGEM BENTO MUNHOZ DA ROCHA .....	09
2.3.1 Definição das linhas de nivelamento .....	10
2.3.2 Monumentação das RRNN .....	12
2.3.3 Resultados do Nivelamento Geométrico .....	12
<b>3. GRAVIMETRIA DE PRECISÃO: FERRAMENTA ÚTIL NA DETECÇÃO DE MOVIMENTOS VERTICAIS.....</b>	<b>16</b>

3.1	Levantamento Gravimétrico na Barragem Bento Munhoz da Rocha.....	16
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES DE GRAVIDADE OBTIDOS .....</b>	<b>20</b>
4.1	VERIFICAÇÃO DA NORMALIDADE .....	21
4.2	EMPARELHAMENTO DE DADOS.....	31
4.2.1	Resultados Obtidos .....	34
4.2.2	Uso do método, limitando-se à faixa de abrangência .....	37
4.3	PROVA DE WILCOXON: TESTE NÃO PARAMÉTRICO .....	40
4.3.1	Fundamentos Lógicos.....	41
4.3.2	Aplicação para pequenas amostras .....	41
4.3.3	Aplicação para grandes amostras.....	43
4.3.4	Análise Final dos Resultados.....	44
4.4	ANÁLISE DA VARIÂNCIA.....	46
4.4.1	Definição do Método.....	46
4.4.2	Análise da Variância a um critério de classificação .....	48
4.4.3	Teste de igualdade de variâncias.....	52
4.4.3.1	Teste de Cochran.....	53
4.4.4	Avaliação da Normalidade para Análise da Variância .....	54
4.4.5	Resultados da Análise da Variância.....	57
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE COMPARATIVA DE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E</b>	
	<b>GRAVIMETRIA.....</b>	<b>59</b>
5.1	TESTE DE CORRELAÇÃO: NIVEL. GEOMÉTRICO X GRAVIMETRIA .....	59
5.2	COMPARAÇÃO DOS GRÁFICOS GERADOS.....	61

<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	74
<b>ANEXOS</b> .....	76
PROGRAMA NORMAL.FOR.....	77
PROGRAMA EMPARE.FOR.....	78
TABELA PARA TESTE DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (FILLIBEN).....	80
PROGRAMA VARIAN.FOR.....	81
TÁBUA G .....	83
PROGRAMA ANVAR.FOR.....	84
SAÍDA DO PROGRAMA ANVAR.FOR .....	87
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	88

## LISTA DE FIGURAS

1 - LOCALIZAÇÃO DA USINA NO ESTADO DO PARANÁ .....	07
2 - VISTA PANORÂMICA DA USINA HIDRELÉTRICA BENTO MUNHOZ DA ROCHA.....	07
3 - LINHAS GRAVIMETRADAS E NIVELADAS.....	11
4 - DISCREPÂNCIAS ACUMULADAS.....	13
5A - FAXINAL DO CÉU - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.....	14
5B - CRUZ MACHADO - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO .....	15
5C - BITURUNA - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.....	15
6 - GRÁFICO Q-Q PARA PROXIMIDADE 2,5 KM.....	28
7 - GRÁFICO Q-Q PARA LINHA CRUZ MACHADO.....	28
8 - GRÁFICO Q-Q PARA LINHA BITURUNA.....	29
9 - GRÁFICO Q-Q PARA LINHA FAXINAL DO CÉU.....	29
10 - GRÁFICO Q-Q PARA LINHA CRUZ MACHADO, IRRAD. 19.....	30
11 - GRÁFICO Q-Q PARA LIMITANTE A 10 KM.....	30
12 - GRÁFICO Q-Q PARA LINHA BITURUNA, IRRAD. 14.....	30
13 - DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR .....	50
14 - GRÁFICO Q-Q PARA AMOSTRA DE 31 PONTOS, G-454 .....	54
15 - GRÁFICO Q-Q PARA AMOSTRA DE 31 PONTOS, G-372.....	55
16 - GRÁFICO Q-Q PARA AMOSTRA DE 31 PONTOS, G-041 .....	55
17 - GRÁFICO Q-Q PARA AMOSTRA DE 98 PONTOS, G-454 .....	56
18 - GRÁFICO Q-Q PARA AMOSTRA DE 98 PONTOS, G-372.....	56

19 - GRÁFICO Q-Q PARA AMOSTRA DE 98 PONTOS, G-041 .....	57
20 - LINHA FAXINAL DO CÉU - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.....	62
21 - LINHA FAXINAL DO CÉU, G-454, GRAVIMETRIA.....	62
22 - LINHA FAXINAL DO CÉU, G-372, GRAVIMETRIA.....	62
23 - LINHA FAXINAL DO CÉU, G-041, GRAVIMETRIA.....	63
24- LINHA FAXINAL DO CÉU, MÉDIA, GRAVIMETRIA.....	63
25- LINHA CRUZ MACHADO - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.....	64
26 - LINHA CRUZ MACHADO, G-454, GRAVIMETRIA.....	64
27 - LINHA CRUZ MACHADO, G-372, GRAVIMETRIA.....	65
28 - LINHA CRUZ MACHADO, MÉDIA, GRAVIMETRIA.....	65
29- LINHA BITURUNA - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.....	66
30- LINHA BITURUNA, G-454, GRAVIMETRIA.....	67
31 - LINHA BITURUNA, G-372, GRAVIMETRIA.....	67
32 - LINHA BITURUNA, MÉDIA, GRAVIMETRIA.....	68
33 - LINHA BITURUNA- IRRAD. 01 - NIVEL. GEOMÉTRICO .....	69
34 - LINHA BITURUNA, IRRAD.01, MÉDIA, GRAVIMETRIA .....	69
35 - LINHA BITURUNA- IRRAD.14 - NIVEL. GEOMÉTRICO .....	69
36 - LINHA BITURUNA, IRRAD.14, MÉDIA, GRAVIMETRIA.....	70
37 - LINHA BITURUNA - IRRAD.26 - NIVEL. GEOMÉTRICO .....	70
38 - LINHA BITURUNA, IRRAD 26, MÉDIA, GRAVIMETRIA .....	70
39 - LINHA CRUZ MACHADO - IRRAD. 04 - NIVEL. GEOMÉTRICO.....	71
40 - LINHA CRUZ MACHADO, IRRAD 04, MÉDIA, GRAVIMETRIA.....	71

41- LINHA CRUZ MACHADO - IRRAD. 10 - NIVEL. GEOMÉTRICO.....	72
42- LINHA CRUZ MACHADO, IRRAD 10, MÉDIA, GRAVIMETRIA.....	72
43 - LINHA CRUZ MACHADO - IRRAD.19 - NIVEL. GEOMÉTRICO.....	72
44 - LINHA CRUZ MACHADO, IRRAD 19, MÉDIA, GRAVIMETRIA.....	72

## LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1.1 - LIMITANTE A 1 KM N=12.....	23
TABELA 4.1.2 - LIMITANTE A 2 KM N=11.....	23
TABELA 4.1.3 - LIMITANTE A 3 KM N=10.....	23
TABELA 4.1.4 - LIMITANTE A 5 KM N=8.....	24
TABELA 4.1.5 - LIMITANTE A 10 KM N=8.....	24
TABELA 4.1.6 - PROXIMIDADE DE 2,5 KM N=20.....	24
TABELA 4.1.7 - PROXIMIDADE DE 5 KM N=28.....	24
TABELA 4.1.8 - FAXINAL DO CÉU N=10.....	25
TABELA 4.1.9 - BITURUNA N=26.....	25
TABELA 4.1.10 - CRUZ MACHADO N=18.....	25
TABELA 4.1.11 - BITURUNA - IRRADIAMENTO 01, N=11.....	26
TABELA 4.1.12 - BITURUNA - IRRADIAMENTO 14, N=7.....	26
TABELA 4.1.13 - BITURUNA - IRRADIAMENTO 26, N=8.....	26
TABELA 4.1.14 - CRUZ MACHADO - IRRADIAMENTO 4, N=7.....	26
TABELA 4.1.15 - CRUZ MACHADO - IRRADIAMENTO 10, N=5.....	27
TABELA 4.1.16 - CRUZ MACHADO - IRRADIAMENTO 19, N=5.....	27
TABELA 4.2.1.1 - LINHA : FAXINAL DO CÉU.....	34
TABELA 4.2.1.2 - LINHA: BITURUNA.....	34
TABELA 4.2.1.3 - LINHA: CRUZ MACHADO.....	35
TABELA 4.2.1.4 - LINHA: CRUZ MACHADO - IRRADIAMENTO 4.....	35
TABELA 4.2.1.5 - LINHA: CRUZ MACHADO - IRRADIAMENTO 10.....	36
TABELA 4.2.1.6 - LINHA: CRUZ MACHADO - IRRADIAMENTO 19.....	36
TABELA 4.2.1.7 - LINHA: BITURUNA - IRRADIAMENTO 1.....	36
TABELA 4.2.1.8 - LINHA: BITURUNA - IRRADIAMENTO 14.....	37
TABELA 4.2.1.9 - LINHA: BITURUNA - IRRADIAMENTO 26.....	37
TABELA 4.2.2.1 - LINHA: ATÉ O LIMITE DE 1 KM (12 PONTOS).....	38
TABELA 4.2.2.2 - LINHA: ATÉ O LIMITE DE 2 KM (11 PONTOS).....	38
TABELA 4.2.2.3 - LINHA: ATÉ O LIMITE DE 3 KM (10 PONTOS).....	38
TABELA 4.2.2.4 - LINHA: ATÉ O LIMITE DE 5 KM (8 PONTOS).....	39
TABELA 4.2.2.5 - LINHA: ATÉ O LIMITE DE 10 KM (8 PONTOS).....	39
TABELA 4.2.2.6 - LINHA: PROXIMIDADE DE 2,5 KM (20 PONTOS).....	39
TABELA 4.2.2.7 - LINHA: PROXIMIDADE DE 5 KM (28 PONTOS).....	40
TABELA 4.3.2.1 - AMOSTRAS NÃO NORMAIS, N < 25.....	42
TABELA 4.3.3.1 - AMOSTRAS NÃO NORMAIS, N > 25.....	43
TABELA 4.4.2.1 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA A UM CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO.....	49
TABELA 4.4.5.1 - PARA AMOSTRA DE 31 PONTOS.....	57
TABELA 4.4.5.2 - PARA AMOSTRA DE 98 PONTOS.....	58
TABELA 5.1.1 - ANÁLISE DA CORRELAÇÃO: NIV. GEOMÉTRICO X GRAVIMETRIA.....	60

## **RESUMO**

Na região da Barragem de Bento Munhoz da Rocha - PR, foram realizadas medidas gravimétricas antes e após o enchimento do reservatório, visando-se detectar variações de  $g$  que possam ser indícios de subsidência. Foram empregados testes estatísticos para a interpretação dos resultados, pois a variação da gravidade foi da mesma ordem de grandeza que os erros observacionais. Os resultados foram confrontados com dados anteriormente disponíveis de nivelamento geométrico também efetuado na região.



## ABSTRACT

At the region of the “Bento Munhoz da Rocha - PR” dam, was developed gravimetric measurements before and after the reservoir filling, in order to detect gravity variations that could be indication of subsidence. Statistical tests were used to interpret the results, because the gravity variation was of the same magnitude as the observational errors. The results was compared with others results of geometric levelling previously available that also was developed at the region.

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA DO ASSUNTO

Os avanços tecnológicos crescentes que se têm observado nos últimos tempos, permitem que engenheiros e cientistas das mais diversas áreas, efetuem medidas cada vez mais precisas. Na Engenharia, os recursos advindos destes avanços possibilitam metodologias bastante eficientes, como por exemplo, no estudo e monitoramento de deformações em grandes estruturas, tais como: barragens, complexos atômicos, grandes edifícios, instalações portuárias, pontes, etc. Tal monitoramento propicia que ações preventivas e/ou corretivas que eventualmente se façam necessárias, sejam tomadas em tempo oportuno.

Enfocando o problema sob outro prisma, as deformações não ocorrem apenas em grandes estruturas, mas a própria crosta terrestre está sujeita à deformações, que podem ter causas naturais (caso de movimento de placas tectônicas, ocorrência de sismos, etc.), ou artificiais, quando causadas pelo homem. Tem-se como exemplo, a subsidência do solo devido à exploração de minas, água subterrânea, ou reservas de óleo bruto. A construção de grandes reservatórios nas barragens de usinas hidrelétricas pode induzir a deformações crustais e até mesmo, ocasionar sismos em regiões anteriormente assísmicas.

Existem razões práticas e científicas para se estudar as deformações. Como exemplo de razões práticas, tem-se a checagem da estabilidade da estrutura e a detecção das evidências precursoras de terremotos, medidas estas que podem evitar a ocorrência de catástrofes, e a conseqüente perda de vidas humanas, prejuízos financeiros e ambientais, etc. Como razão científica, cita-se a necessidade de um melhor entendimento do mecanismo de ocorrência da deformação, para testar teorias sobre o "design" de uma estrutura, e também o estabelecimento de métodos de predição.

No caso específico das barragens, estas devem estar sujeitas a um constante monitoramento para se evitar desastres. Sendo as barragens de grandes dimensões (altura de 100 metros ou mais), e com o conseqüente armazenamento de grandes massas de água, pode ocorrer que regiões propensas à sismicidade, acelerem o processo de ocorrência de sismos, e regiões assísmicas, tornem-se sismicamente ativas. Sabe-se que a probabilidade da ocorrência de sismos e fenômenos semelhantes aumenta sensivelmente, caso a crista da barragem apresente uma altura de água acumulada que ultrapasse 100 metros.

São inúmeros os exemplos de terremotos associados ao enchimento de reservatórios existentes nas grandes barragens. Outros terremotos estão mais relacionados com as condições geológicas instáveis peculiares de cada região, e outros associados evidentemente, a uma brusca alteração geográfica local (caso das barragens). Aliás, uma dificuldade manifestada por muitos autores, consiste na separação das deformações verticais como episódios isolados, dos processos tectônicos naturais.

O projeto de monitoramento da Barragem da Hidrelétrica Gov. Bento Munhoz da Rocha surgiu justamente face ao conhecimento das dimensões da barragem (160 m de altura), a qual pode ser classificada como potencialmente sismogênica. Surgiu assim, uma oportunidade de se estudar o problema da sismicidade induzida por grandes reservatórios (GEMAEL, 1987). Sabe-se que os problemas associados com o movimentos crustais são extremamente complexos e envolvem muitas disciplinas. O engenheiro cartógrafo é capaz de contribuir na solução de alguns destes problemas, valendo-se, por exemplo, da técnica de monitoramento de movimentos crustais baseada na repetição de levantamentos geodésicos precisos, em intervalos regulares.

Desta forma, teve origem o Projeto de Auscultação Geodésica (nivelamento geométrico) e Gravimétrica (determinação relativa da gravidade), em duas épocas distintas: antes e após o enchimento do reservatório. A etapa de nivelamento geométrico já tem seus resultados delineados (GEMAEL, 1987), restando a comparação das conclusões alcançadas por estes resultados, com aqueles a serem obtidos com as medidas gravimétricas.

Vale ressaltar a importância do assunto no contexto nacional, no que diz respeito à preocupação no monitoramento de grandes barragens, com acompanhamento sismológico, e

também ao pioneirismo no uso de gravimetria como ferramenta de detecção de deformações verticais.

## 1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tratará especificamente da análise das observações gravimétricas medidas nas redondezas da Barragem Bento Munhoz da Rocha. Fica evidenciado portanto, que não é a estrutura em si, no caso a barragem, que será alvo de monitoramento, mas sim, o comportamento da crosta terrestre nas imediações da mesma, atentando-se apenas para deformações verticais. As deformações horizontais não serão avaliadas.

Como objetivos, podem ser citados:

a) análise dos dados gravimétricos efetuados antes e após o enchimento do reservatório, visando-se a detecção de possíveis deslocamentos verticais da crosta, nas adjacências da barragem;

b) confrontação dos resultados obtidos no nivelamento geométrico (GEMAEL, 1987) com os resultados gravimétricos, para checagem das conclusões anteriormente definidas pela análise dos dados de nivelamento;

c) avaliação das medidas precisas da gravidade como ferramenta eficiente no monitoramento de deformações verticais, empregando-se testes estatísticos.

## 1.3 DEFORMAÇÕES

Caracteriza-se por deformação a variação das coordenadas de um ponto, ou conjunto de pontos (posição), ou de sua configuração, que julgava-se serem estáveis dentro de um intervalo de tempo finito.

Segundo especialistas da área, dependendo de suas extensões, as medidas de deformação podem ser classificadas em escala local, regional, continental ou global, enquadrando-se aquelas que são efetuadas nas imediações de uma barragem, a nível local.

Se comparadas com outros tipos de levantamentos, as medidas de deformação têm as seguintes características:

- a) necessidade de alto grau de acuracidade,
- b) repetibilidade de observações,
- c) integração de diferentes tipos de observações: nivelamento com gravimetria, e às vezes, o uso de instrumental físico-mecânico como tiltímetros, níveis hidrostáticos, etc.,
- d) análise sofisticada dos dados adquiridos,
- e) necessidade de amplo conhecimento interdisciplinar para uma interpretação física correta do fenômeno detectado.

A construção de barragens e açudes, com o rápido enchimento de reservatórios pode desencadear um processo sismogênico, afetando as condições geológicas e geográficas que existiam num determinado local ou região.

#### 1.4 METODOLOGIA

No primeiro capítulo é feita uma introdução, expondo a importância do monitoramento de deformações, o qual possibilita o controle de fenômenos que possam ocorrer em virtude das mesmas, e que induzam à catástrofes, como é o caso de sismos. Dentro desta situação, surgiu o Projeto de Auscultação Geodésica e Gravimétrica nas imediações da Barragem Bento Munhoz da Rocha (GEMAEL, 1987).

O segundo capítulo envolve as considerações preliminares necessárias à compreensão do estudo a nível geral. São mencionadas as características gerais da barragem, o uso da técnica gravimétrica associada a nivelamento geométrico para monitorar deslocamentos verticais, bem como exemplos de situações onde esta metodologia foi empregada. Os resultados e conclusões do nivelamento geométrico também são apresentados (GEMAEL, 1987).

O capítulo terceiro enfoca o levantamento gravimétrico efetuado nas imediações da barragem Bento Munhoz da Rocha, citando resumidamente os procedimentos de campo.

No capítulo quatro é feita a análise estatística dos valores de gravidade obtidos. Para tanto é checada a normalidade das populações e aplicado o emparelhamento de dados que é um método estatístico que se adapta à situação em estudo. Um teste não-paramétrico é utilizado para amostras oriundas de populações não normais, bem como é feita a análise da variância para avaliação dos gravímetros.

O capítulo cinco apresenta uma comparação dos gráficos de nivelamento geométrico e gravimetria.

No sexto capítulo são abordadas as conclusões e recomendações referentes aos estudos desenvolvidos.

## **CAPÍTULO II**

### **CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES**

Neste capítulo pretende-se abordar, num caráter genérico, as características gerais da barragem em estudo, o nivelamento geométrico executado no local, bem como os resultados e conclusões obtidos. Faz-se necessário mencionar que a presente pesquisa constitui-se na segunda etapa do Projeto Geral de Auscultação Geodésica e Gravimétrica da Barragem da Hidrelétrica Gov. Bento Munhoz da Rocha, tendo a primeira consistido da publicação dos procedimentos de campo para ambos os levantamentos e dos resultados obtidos no cálculo do nivelamento geométrico (GEMAEL, 1987).

#### **2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA BARRAGEM BENTO M. DA ROCHA**

A Usina Hidrelétrica Governador Bento Munhoz da Rocha foi construída pela Companhia Paranaense de Energia - COPEL, no período de 1975-1980, possuindo uma potência final instalada de 2 511 Mw, a partir de 6 unidades geradoras de 418, 5 Mw cada /26/. Está localizada a cerca de 200 km a sudoeste de Curitiba, no Rio Iguaçu, estando cerca de 5 km a jusante da foz do Rio da Areia, no limite dos municípios de Bituruna e Pinhão, no estado do Paraná, conforme pode-se visualizar na figura 1.

A barragem é de enrocamento, com face de concreto, possuindo uma extensão de 828 m ao longo da crista e altura de 160 metros no eixo do rio, constituindo-se numa das maiores do mundo neste gênero, quiçá a maior e a primeira deste gênero construída no Brasil.

Figura 1 - Localização da Usina no estado do Paraná

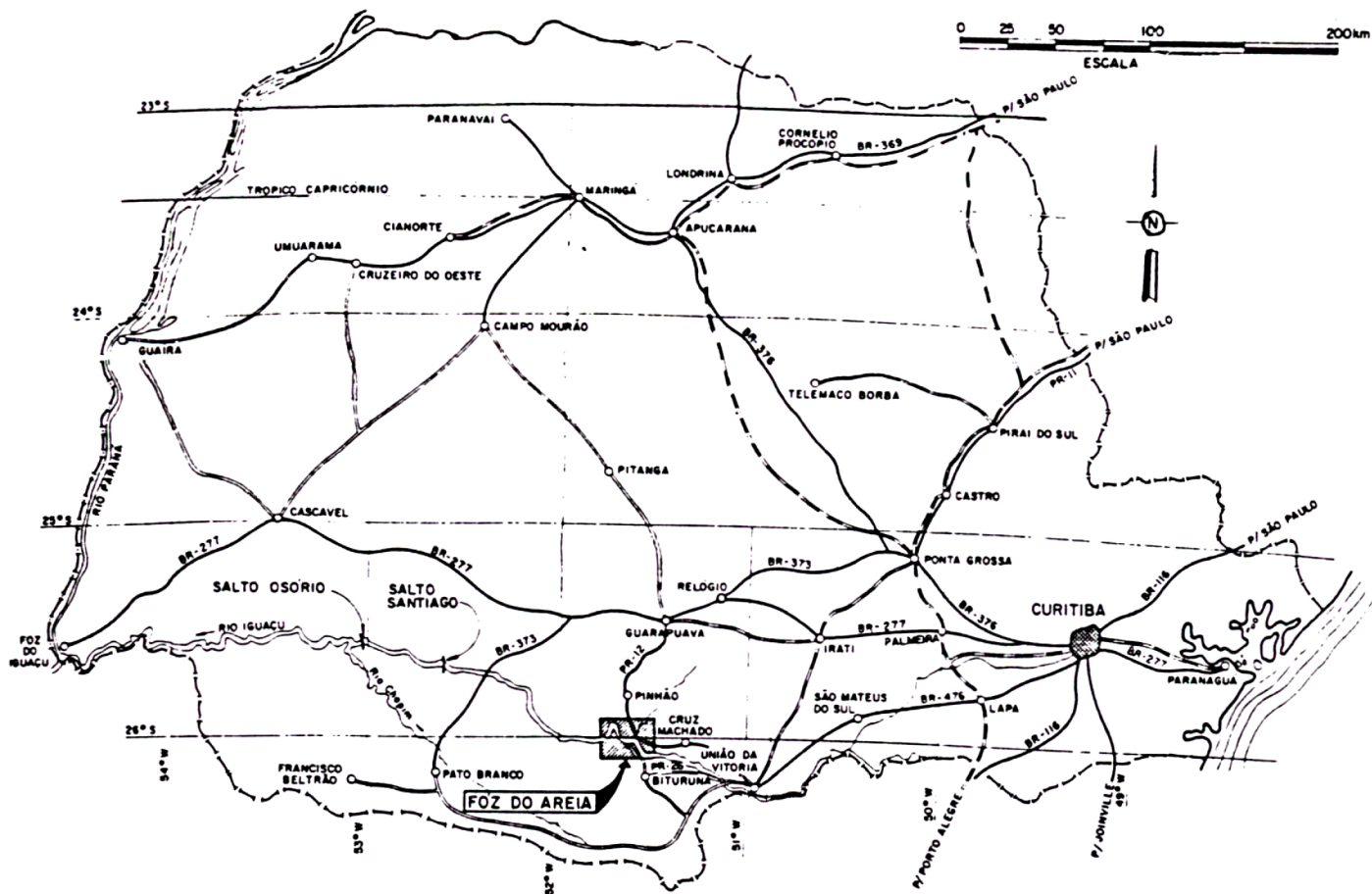
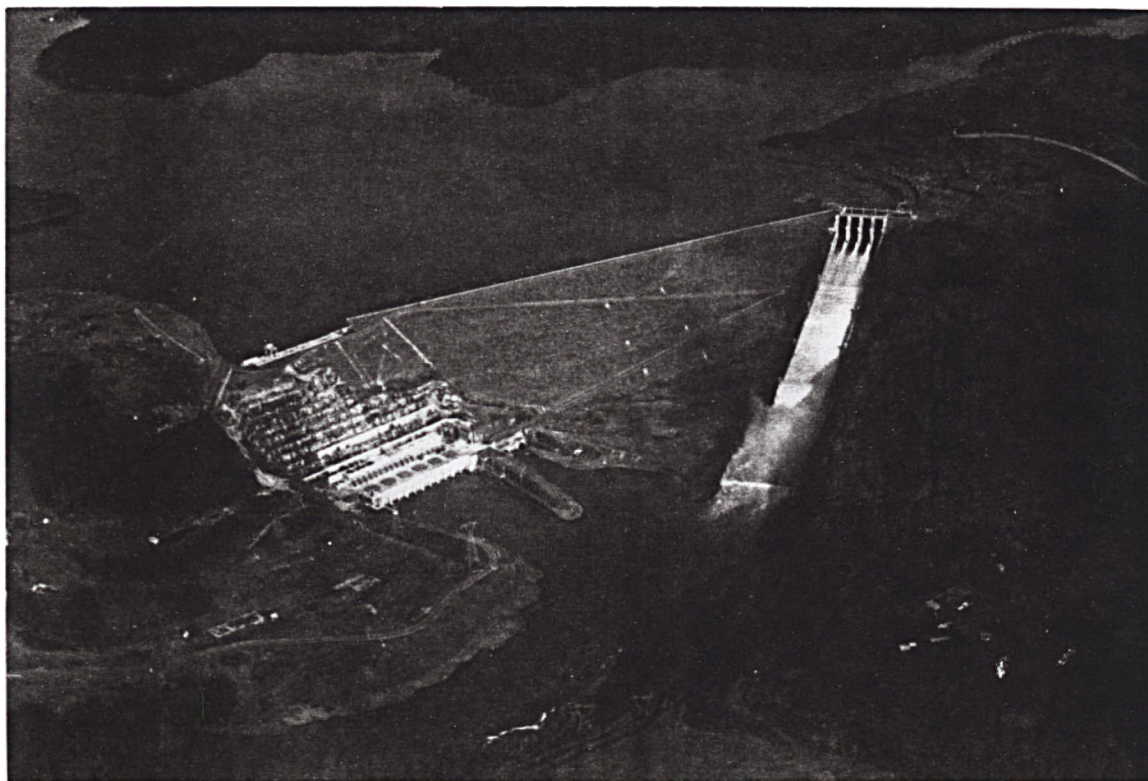


Figura 2 - Vista Panorâmica da usina Hidrelétrica Bento Munhoz da Rocha





O volume de água acumulado é de 6.100 milhões  $m^3$ , correspondendo a uma área inundada de 167  $km^2$  e capacidade de descarga de 11.000  $m^3/s$  /26/.

O relevo da região é montanhoso, sendo que as águas do Rio Iguaçu correm por um vale estreito assentado sobre rochas basálticas da Formação Serra Geral, excetuando-se a parte final do reservatório (Porto Vitória), onde os arenitos da Formação Botucatu e siltitos e folhelhos da porção superior do subgrupo Rio do Rasto são predominantes.

A figura 2 apresenta uma vista panorâmica da Usina Hidrelétrica Bento Munhoz da Rocha.

Houve uma preocupação na época de construção da barragem, no que se refere à monitoração sísmica da região tendo a COPEL firmado um convênio com o IAG (Instituto Astronômico e Geofísico - USP), o qual se incumbiu de monitorar sísmicamente a região, cerca de 16 meses antes do início do enchimento do reservatório, através de uma estação localizada 15 km à leste da barragem. Naquele período, não se registraram quaisquer eventos sísmicos de magnitude maior que 1, num raio de 100 km, o que comprova ser a região assísmica até aquele momento.

## 2.2 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO ASSOCIADO À GRAVIMETRIA

Para uma mais segura constatação da ocorrência de deslocamentos verticais, recomenda-se que as medidas gravimétricas de precisão, executadas com este objetivo específico, sejam acompanhadas por nivelamento de precisão, para auxiliar na interpretação dos resultados.

Na bibliografia podem ser encontrados exemplos, onde os levantamentos gravimétricos estiveram associados a nivelamento de precisão (geométrico). Alguns destes exemplos são relatados a seguir.

Nas proximidades do reservatório da barragem La Grande 2, em Quebec no Canadá, foram feitas medidas gravimétricas e nivelamento geométrico, objetivando-se medir variações em altimetria na crosta, e alterações na gravidade causadas pelo peso da massa de água do reservatório (MAINVILLE, A., LAMBERT, A. & LIARD, J. O. /13/).

No estudo das mudanças da gravidade constatadas antes e após o terremoto de Tangshan (1976, na China), que foram associadas à ocorrência do episódio, recorreu-se a comparações entre as alterações da gravidade e de altitude locais, para uma melhor avaliação das observações (MENGHUA, 1985).

Nakagawa, 1977 afirma que linhas de nivelamento extensas, que visam a detecção de movimentos crustais, podem ser controladas por medidas precisas repetidas da gravidade. Nakagawa inclusive, nas suas observações gravimétricas ao redor do Lago Biwa no Japão, sugere que na detecção de movimentos verticais da crosta terrestre, proceda-se repetitivamente medidas precisas da gravidade na área em estudo, acompanhadas de nivelamento preciso na área onde foram constatadas variações gravimétricas, e posteriormente, compare-se os resultados.

A combinação entre gravimetria e nivelamento de precisão permite a distinção entre deslocamentos crustais que de fato tenham ocorrido e variações de massas internas (densidade) na terra (WHITCOMB, 1976). As deformações pré-sísmicas que atuam na dilatação da crosta, também podem ser acompanhadas por gravimetria e nivelamento, na análise dos padrões de dilatação (LAMBERT & BEAUMONT, 1977).

Estes fatos reforçam a idéia expressa por HECK (1983), de que o tipo de dados mais sensíveis com respeito a movimentos verticais, são as medidas gravimétricas e de nivelamento.

Modernamente recorre-se também à Geodésia Celeste através do GPS-Global Positioning System, para se monitorar tanto as deformações horizontais, como também as verticais, sendo esta última objeto de discussão entre vários pesquisadores.

### 2.3 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO NA BARRAGEM BENTO MUNHOZ DA ROCHA

Neste tópico pretende-se, de forma concisa, abordar algumas considerações sobre o nivelamento geométrico efetuado nas imediações da barragem, e os resultados e conclusões que foram alcançados (GEMAEL, 1987).

### 2.3.1 Definição das linhas de nivelamento

No que se refere a reservatórios artificiais e seu impacto sobre o comportamento da crosta terrestre, há pouca experiência quanto ao controle geodésico das deformações verticais que possam ocorrer. Sabendo-se que tais deformações possivelmente estejam associadas com as formações geológicas locais, o mais recomendável é que as linhas de nivelamento sejam estabelecidas partindo-se de bases (supostamente fixas), que situem-se o mais distante possível do lago, e bem distribuídas.

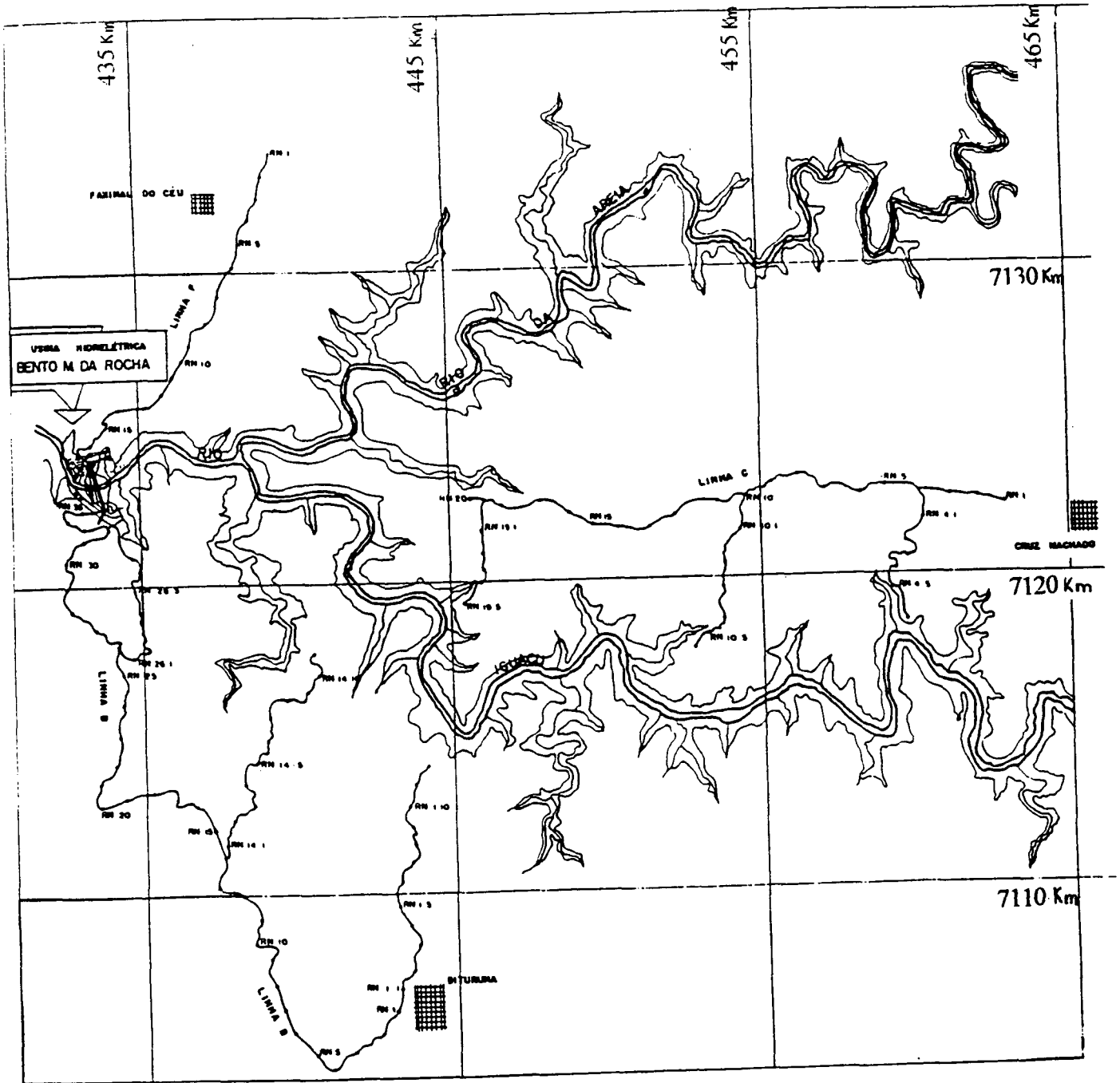
Um fator limitante à esta pretensão, é o alto custo das operações de campo envolvido num nivelamento geométrico. Sendo assim, procurou-se adotar uma sistemática conveniente quanto a este aspecto, que também facilitasse as operações de campo. Condiçãoou-se a implantação de uma rede de nivelamento geométrico, à rede viária local, o que implicou mesmo assim num retardamento e encarecimento das operações de campo, pois certas estradas vicinais apresentaram inclinações tão acentuadas, que forçaram visadas de apenas 15 m (GEMAEL, 1982).

A figura 3 apresenta a disposição das linhas de nivelamento implantadas, que são:

- linha C: Cruz Machado - barragem, com origem nas imediações da cidade de Cruz Machado, com extensão de 19 km sobre estrada macadamizada, possuindo 18 km de irradiações em caminhos vicinais.
- linha B: Bituruna - barragem, parte da cidade de Bituruna, possuindo 38 km de extensão sobre estrada pavimentada e 35 km de irradiações em caminhos vicinais.
- linha F: com ponto de partida próximo a cidade de Faxinal do Céu, com apenas 16,5 km, toda sobre estrada com pavimentação asfáltica, não possuindo irradiações.

A extensão total nivelada atinge 126,5 Km (GEMAEL, 1982).

Figura 3 - Linhas gravimetradas e niveladas



fonte: GEMAEL, 1982

### 2.3.2 Monumentação das RRNN

A monumentação de pontos é um aspecto importante nos projetos que visam a detecção de deformações cujas prescrições específicas variam em se tratando de monitoramento de áreas urbanas ou não urbanas, justamente pelo fato das primeiras estarem sujeitas a situações que não ocorrem com as últimas, como por exemplo, uma maior incidência de agentes externos, colaborando para a alteração de uma realidade que perdurava até então, construção de novos edifícios, escavações, etc.).

Independente de tratar-se de área urbana ou não, o ponto (RN, no caso específico), deve ser monumentado de forma a facilitar sua identificação e atender as exigências de estabilidade, acesso, intervisibilidade (se for o caso), dimensões específicas, dispositivos de centragem forçada, etc. Os cuidados na fase de monumentação se devem ao fato de que as mudanças detectadas (seja em coordenadas, ou valor de  $g$ ) dos pontos monitorados, devem ser devidas a deslocamentos sofridos pela estação, sujeita à subsidência, soerguimentos ou processos semelhantes, e não devido à monumentação deficiente ou imprópria.

Na região em estudo, foram implantadas 123 referências de nível dispostas ao longo das três linhas de nivelamento, e também das irradiações. As RRNN encontram-se espaçadas entre si de aproximadamente 1 Km, tendo sido concretadas no local apresentando forma tronco-piramidal, de seção quadrada, possuindo base superior de 30x30 cm, e inferior de 45x45 cm. A base inferior situa-se em geral, cerca de 1m abaixo da superfície; já a superior aflora cerca de 20 cm, (GEMAEL, 1982).

### 2.3.3 Resultados do Nivelamento Geométrico

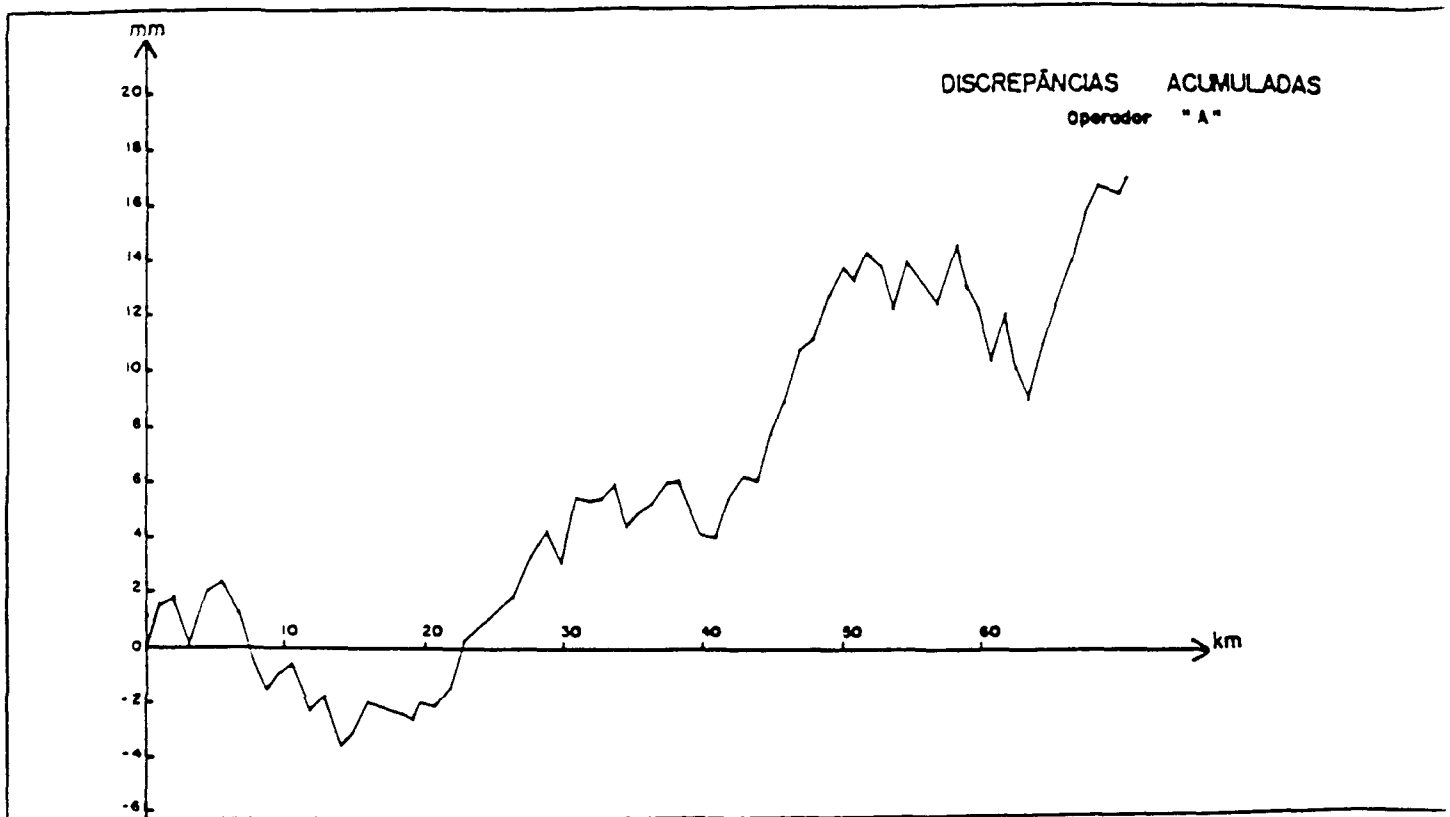
Constatou-se que as operações de nivelamento efetuadas atingiram uma precisão elevada. Segundo (GEMAEL, 1987), a discrepância entre os desníveis obtidos no nivelamento e contra-nivelamento de uma seção de 1 km de comprimento, permaneceu sempre abaixo de 2 mm, o que significa um erro médio quadrático de módulo inferior a  $10^{-6}$ , o que quer dizer sempre abaixo de 1 ppm.

Tal grau de precisão elevado só pôde ser alcançado, graças ao empenho e dedicação dos profissionais envolvidos e o cumprimento rigoroso de várias especificações técnicas, entre elas a extensão máxima de 50 m para as visadas, e outras que podem ser encontradas em (GEMAEL, 1982).

O equipamento utilizado nesta etapa de nivelamento geométrico foi o nível de precisão Wild N-3, com placa plano paralela e miras de invar. Tanto na expedição anterior, como na posterior ao enchimento do reservatório, utilizou-se o mesmo equipamento, e as observações foram feitas pelo mesmo observador. As miras de invar não foram calibradas na época, pela impossibilidade de se proceder a calibração.

As discrepâncias acumuladas entre os desníveis de ida e volta de cada seção, podem ser visualizadas no gráfico da figura 4, no qual pode-se constatar que as mesmas mantiveram-se sempre abaixo de 2 mm por km, embora exista uma tendência acumulativa.

Figura 4 - Discrepâncias acumuladas



fonte: GEMAEL, 1982

Para o nivelamento geométrico, foram aplicados os testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, nos quais ficou constatado que a hipótese de distribuição normal não foi rejeitada ao nível de significância de 5%.

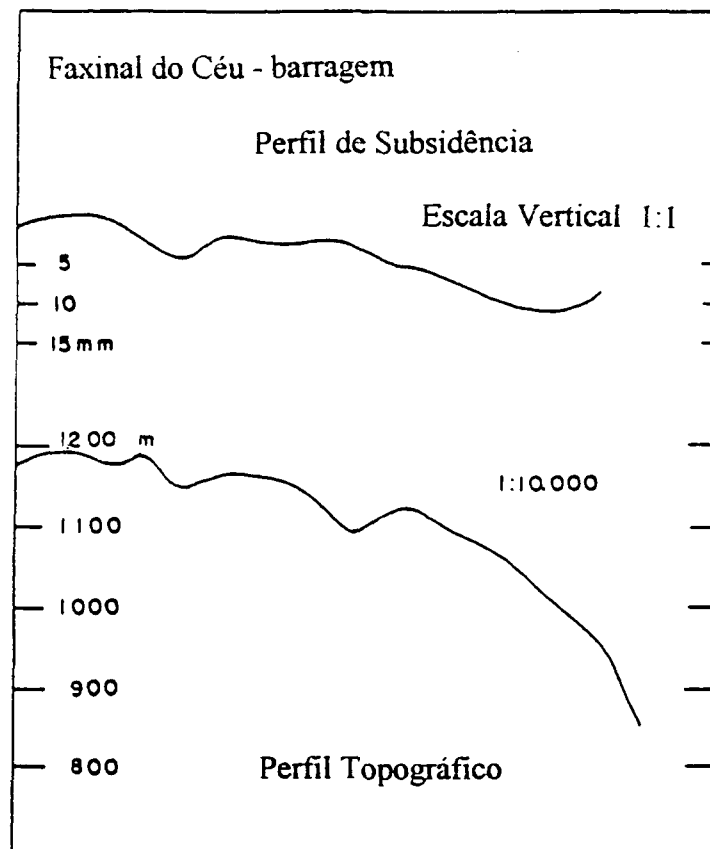
Os resultados numéricos da análise dos dados de nivelamento geométrico podem ser encontrados em (GEMAEL, 1982). Como conclusões mais importantes, cabe salientiar que foi constatada uma subsidência na região vizinha ao lago artificial, pelo fato de:

a) as altitudes dos pontos monitorados após o enchimento do reservatório serem sistematicamente menores que as observadas anteriormente.

b) de uma maneira geral, quanto menor a distância até o reservatório, maior a diferença de altitude.

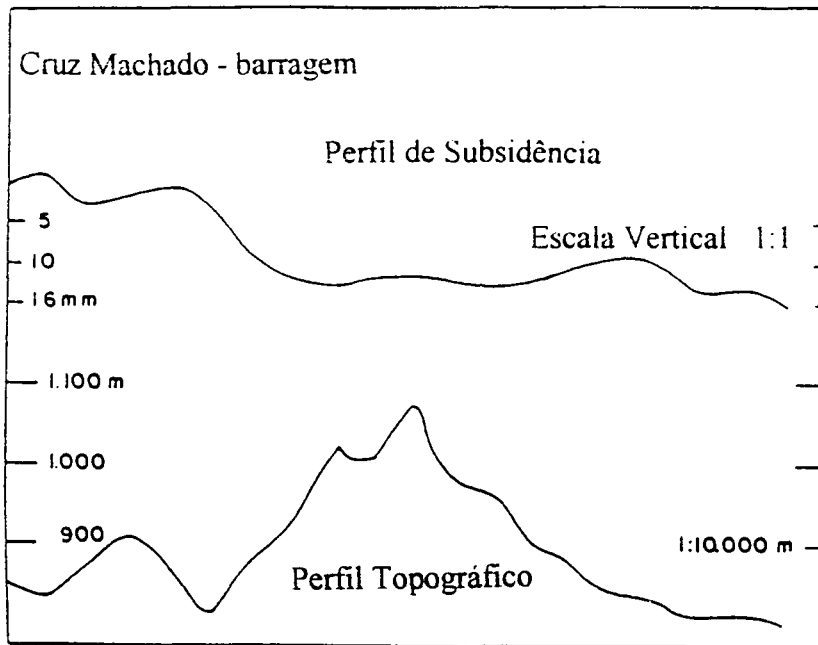
Os gráficos das figuras 5a, 5b, 5c evidenciam as conclusões acima, apresentando conjuntamente os perfis das rotas niveladas (perfil topográfico), e os perfis de subsidência.

Figura 5a - Faxinal do Céu - Nivelamento geométrico



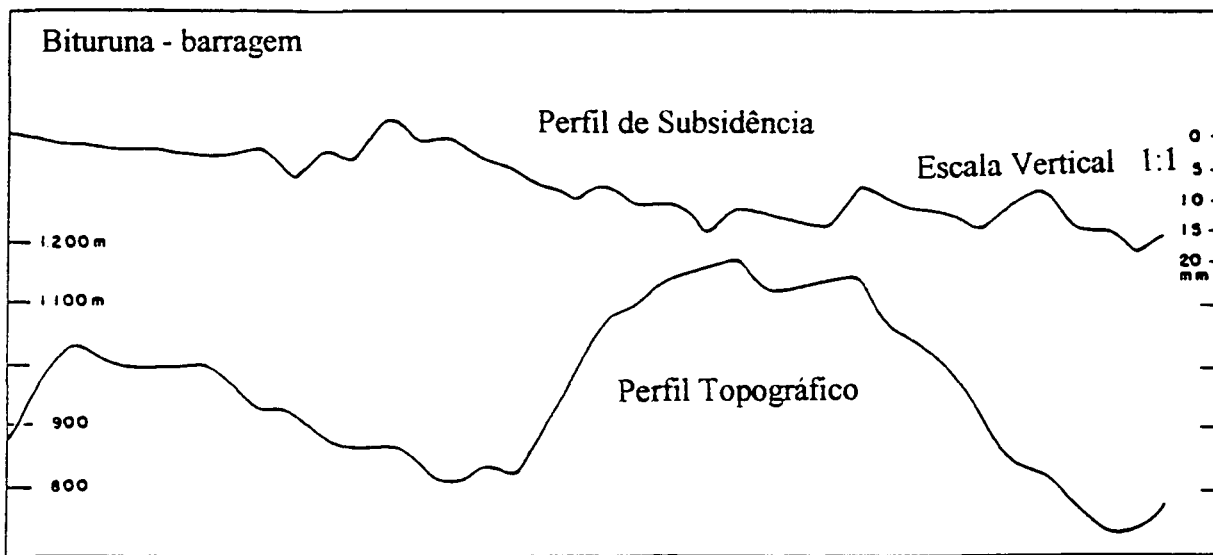
fonte: GEMAEL, 1982

Figura 5b - Cruz Machado - Nivelamento geométrico



fonte: GEMAEL, 1982

Figura 5c - Bituruna - Nivelamento geométrico



fonte: GEMAEL, 1982

Nota-se que a subsidência atingiu 20 mm, tendo alcançado até 21,20 mm numa das ramificações da linha Bituruna - Barragem.

A subsidência constatada no nivelamento geométrico, será considerada na análise comparativa com os resultados do levantamento gravimétrico



## **CAPÍTULO III**

### **GRAVIMETRIA DE PRECISÃO:**

#### **FERRAMENTA ÚTIL NA DETECÇÃO DE MOVIMENTOS VERTICAIS**

Vanicek e Krakiwsky /24/ já afirmaram que as variações da gravidade geralmente constituem-se num bom indicativo de movimentos verticais.

Como consequência dos avanços verificados nas técnicas absolutas e relativas, as medidas gravimétricas atingiram uma precisão que possibilita o seu emprego como uma eficiente ferramenta na detecção de movimentos verticais da crosta. Tanto é que, na pesquisa geodinâmica de regiões de grande extensão, com condições climáticas desfavoráveis, e dificuldades topográficas, recomenda-se o uso de gravimetria de precisão.

A gravimetria também pode ser utilizada no estudo das mudanças de densidade que acompanham os movimentos verticais, bem como na determinação do mecanismo que causou o movimento (sismos etc.).

#### **3.1 LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO NA BARRAGEM BENTO MUNHOZ DA ROCHA**

Neste tópico, pretende-se de forma concisa, descrever algumas das operações de campo e considerações a serem feitas num levantamento gravimétrico. Não se entrará em pormenores haja vista o objetivo da presente dissertação voltar-se para a análise estatística dos dados gravimétricos. Assim sendo, as informações de procedimentos de campo e as considerações envolvidas, principalmente no que se refere à correção de erros instrumentais e outros, que estão presentes neste tópico, devem ser suficientes para auxiliar na análise dos dados gravimétricos. Vale registrar que o levantamento gravimétrico foi executado pela mesma equipe nas duas épocas de medição. A primeira etapa (antes do enchimento do reservatório) foi desenvolvida entre

janeiro e abril de 1980 e a segunda etapa foi feita em meados de 1982. Para proceder-se o início do presente trabalho de pesquisa, os dados gravimétricos utilizados como ponto de partida foram os valores de  $g$  de ida e volta do levantamento gravimétrico, e a média destes valores, para os três gravímetros envolvidos nas duas épocas de medição.

As referências de nível que foram implantadas na área em estudo, também se constituíram em estações gravimétricas nas quais calculou-se o desnível gravimétrico.

O transporte do valor da gravidade a partir da rede gravimétrica brasileira foi efetivada das estações de Guarapuava e União da Vitória. Dois Circuitos partindo destas estações atingiram as estações de segunda ordem: Faxinal do Céu, Bituruna e Cruz Machado.

Procedeu-se o levantamento de campo da seguinte forma: partiu-se das estações de segunda ordem, fechando-se os circuitos no mesmo dia nestas estações, conforme os esquemas abaixo:

a) Faxinal do Céu; RN01; RN02; RN03; RN2; RN01; Faxinal do Céu.

b) Bituruna; RN01; RN02; RN02-1; RN02-2; RN02-2; RN02-1; RN02; RN01; Bituruna (no caso de sub-circuitos).

Foram utilizados três gravímetros La Coste and Romberg, modelo G (LC-R no. 041, LC-R no. 372, LC-R no. 454). É importante citar que os gravímetros La Coste and Romberg modelo G, são instrumentos confiáveis, apresentam pequenas variações nas suas funções de escala com o decorrer do tempo, derivas instrumentais reduzidas e aproximadamente regulares e são de manejo simples (ROSIER,1979). Pela impossibilidade naquela época de se efetuar a calibração dos gravímetros no Brasil, a mesma não foi executada. As verificações feitas nos gravímetros foram da sensibilidade do nível longitudinal e transversal e verificação da temperatura do termostato em cada observação.

Cada circuito foi gravimetrado em ida e volta, o que implica que cada estação foi ocupada duas vezes, e em cada uma delas por três gravímetros, com 3 leituras para cada um deles, totalizando assim 18 leituras por estação, resultando 6 leituras médias, duas para cada gravímetro, sendo uma para o percurso de ida, e outra para o de volta.

Para cada gravímetro, as três leituras sequenciais foram processadas num intervalo não superior a 2,5 minutos, adotando-se como critério de aceitação, a concordância das leituras

dentro de 0,002 da graduação do gravímetro. Calculou-se a média das leituras para cada RN e para cada gravímetro, transformando-se o valor médio em mGal utilizando-se as tabelas de transformação de cada gravímetro, através de seu fator de escala (GEMAEL, 1987).

Após o cálculo da média das leituras gravimétricas, estas foram corrigidas da componente vertical da força de maré empregando-se as fórmulas de Longmann, e posteriormente foi efetuada a correção relativa a deriva dinâmica, sendo que em mais de 50% dos casos, para os três gravímetros, a deriva horária raras vezes ultrapassou 20 (vinte) microgals. O turno de trabalho variou de 9 a 12 horas, e como as interrupções não foram superiores a 40 minutos, ignorou-se a deriva estática, considerando-a linear.

Para efetuar-se a correção da deriva dinâmica e também para aumentar a precisão, o levantamento gravimétrico foi feito em ida e volta, já que as linhas gravimétricas não configuram um polígono. A deriva dinâmica (drift), surge em consequência do comportamento do sistema elástico do gravímetro, que faz com que as leituras executadas numa mesma estação em horários diferentes não coincidam, mesmo após a depuração dos erros sistemáticos, como a força de maré. Para o gravímetro La Coste and Romberg, a deriva é relativamente fraca (menor que 1mGal/mês) e pode, para intervalos de 2 a 3 dias, ser admitida como linear. O intervalo máximo foi de 12 horas.

O procedimento de cálculo baseia-se na diferença entre as leituras final e inicial da estação base, após a correção da força de maré, dividida pelo intervalo de tempo entre as mencionadas leituras. Posteriormente é distribuída às estações intermediárias, proporcionalmente ao tempo.

Os desníveis gravimétricos de cada seção foram calculados separadamente para cada gravímetro, não se constatando nenhuma tendência sistemática quanto ao sinal das discrepâncias (desnível de ida - desnível de volta) (GEMAEL, 1982):

LC-R no. 041 - 52% das discrepâncias menores que 0,

LC-R no. 372 - 52,5% das discrepâncias menores que 0,

LC-R no. 454 - 47% das discrepâncias menores que 0.

Foi calculado o valor médio da gravidade para cada gravímetro em cada estação, para as duas épocas de medição. As anomalias de free-air e Bouguer foram calculadas e podem ser consultadas em GEMAEL & DOUBEK.

Por meio de circuitos especiais e terrestres, as estações base e conseqüentemente todas as demais, foram vinculadas gravimetricamente a outras estações já referidas a "International Gravity Standartization Net" (IGSN-71).

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES DE GRAVIDADE OBTIDOS

Na análise do resultado do nivelamento geométrico foi constatada a ocorrência de subsidência que é tanto maior quanto mais próximo situa-se o ponto em relação ao reservatório.

No que se refere à diferença gravimétrica observada nas duas épocas de medição, somente será possível uma interpretação concludente mediante análise estatística.

Há alguns fatores que indicam de antemão um provável acréscimo no valor de  $g$  após o enchimento do reservatório. São eles: a subsidência comprovada por nivelamento geométrico, a componente vertical de atração da água represada e o novo nível do lençol freático. Este dois últimos fatores deverão apresentar efeitos bastante pequenos, possivelmente no nível de tolerância dos erros de medida.

As próprias diferenças nos valores de  $g$  entre as épocas de medição poderão situar-se próximas do erro tolerável nas medições, como é o caso da precisão do gravímetro. Diante deste fato, justifica-se o emprego de análise estatística na interpretação dos resultados gravimétricos.

Não se optou pelo ajustamento, para não se perder a "característica bruta", por assim dizer, das observações gravimétricas, evitando que se incorra num possível mascaramento das observações. O que faz o ajustamento? Ele implica em homogeneização, compensação, regularização das observações, e com isso pode-se alterar valores significativos que poderiam representar evidências consistentes de alteração do valor da gravidade. Os resultados do nivelamento geométrico também não foram ajustados.

Os testes estatísticos efetuados baseiam-se em testes de hipótese, nos quais são definidas uma hipótese  $H_0$  (hipótese existente a ser testada) e  $H_1$  (hipótese alternativa), sendo fixado também um nível de significância  $\alpha$ .

Na análise que se pretende realizar, testar-se-á as médias dos valores anteriores e posteriores ao enchimento do reservatório.

A seguir são apresentados os princípios teóricos dos métodos de análise estatística adotados.

#### 4.1 VERIFICAÇÃO DA NORMALIDADE

Muitos dos testes estatísticos empregados para se avaliar amostras de populações, pressupõe uma distribuição normal. Para se verificar a normalidade emprega-se, por exemplo, o teste  $\chi^2$ , o qual não é entretanto um teste geral, havendo uma série de restrições para o seu uso: não é recomendado para amostras pequenas, e pelo fato de medir a discrepância entre frequências, depende do comportamento do histograma de frequências.

Filliben, já na década de 70, empregou um teste de normalidade baseado na análise do coeficiente de correlação. Recentemente, muitos pesquisadores têm empregado o teste como uma ferramenta confiável e poderosa na avaliação da normalidade de uma amostra.

O teste estatístico  $r$  combina dois conceitos fundamentalmente simples: um gráfico de probabilidades e o coeficiente de correlação. Este gráfico de probabilidade conhecido por Q-Q PLOT, permite verificar a normalidade, e tem na ordenada as observações dispostas em ordem crescente  $x_{(j)}$  e na abcissa as quantidades  $z_{(j)}$  obtidas a partir de uma distribuição normal padronizada. No caso de uma distribuição normal, o gráfico das observações  $x_{(j)}$  versus os valores  $z_{(j)}$  será aproximadamente linear. Se houver desvios significativos, a normalidade é suspeita. Segundo Johnson e Wichern, o padrão dos desvios pode proporcionar indícios acerca da natureza da normalidade, sendo possível ações corretivas a respeito.

No caso de amostras pequenas ( $n \leq 20$ ), a condição de normalidade para aplicação de testes estatísticos se torna mais relevante, o qual é o nosso caso na maioria das situações.

Para uma distribuição univariada, os passos para se testar a normalidade são os seguintes:

a) ordenar em ordem crescente as observações originais  $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$  e as correspondentes probabilidades  $p_{(j)}$  que, para uma distribuição normal padronizada são definidas pela relação:

$$P(z \leq q_j) = \int_{-\infty}^{q_j} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz = p_{(j)} = \frac{j - 1/2}{n} \quad (1)$$

onde:

- o valor  $\frac{1}{2}$  é dito correção de continuidade, pelo fato de se aproximar uma distribuição discreta por uma outra contínua (JOHNSON & WICHERN, /11/).
- $q_j$  é o quantil observado.
- $j$  refere-se à cada observação ordenada ( $j=1, \dots, n$ ).
- $p(j)$  é a expressão da função de distribuição acumulada.

Chama-se quantil a divisão genérica de um conjunto ordenado de valores num certo número de partes iguais ( por exemplo quartil são 4 partes iguais, decil são 10 partes iguais, etc.).

b) Determinar na tabela o valor de  $z = \Phi^{-1} \left( \frac{j - \frac{1}{2}}{n} \right)$  (2)

que são os quantis normais padronizados.

c) Calcular o coeficiente de correlação  $r$  entre as observações  $x_{(j)}$  e os quantis normais padronizados  $z_{(j)}$  através da expressão:

$$r = \text{correl}(z_j, x_j) = \frac{n \sum xz - (\sum x)(\sum z)}{\sqrt{\left[ n \sum x^2 - (\sum x)^2 \right] \left[ n \sum z^2 - (\sum z)^2 \right]}} \quad (3)$$

- d) Efetuar o teste: se o coeficiente de correlação calculado for maior que o tabelado, aceita-se a normalidade. Filliben desenvolveu uma tabela para vários tamanhos de amostras a vários níveis de significância para se avaliar o coeficiente de correlação. A tabela, bem como a metodologia adotada para sua elaboração pode ser encontrada em (FILLIBEN, 1975). O coeficiente de correlação foi calculado através do programa NORMAL.FOR elaborado em Fortran, e que se encontra nos ANEXOS.
- e) Elaborar um gráfico com os pares de observação ( $z_j$  e  $x_j$ ) e examinar se os pontos estão distribuídos muito proximamente ao longo de uma linha reta, o que confirmará que os dados são normalmente distribuídos.

Considerando as amostras a serem testadas, obteve-se os resultados que são apresentados nas tabelas que se seguem. Foram elaboradas tabelas que envolvem amostras de pontos a uma certa proximidade da barragem (distantes 2,5 e 5 km), de acordo com a distância limitante (afastados cerca de 1, 2, 3, 5 ou 10 km) e das linhas principais e linhas irradiadas. Foi feita a comparação do coeficiente de correlação calculado e tabelado para os níveis de significância de 1% e 5%, para cada gravímetro e a média. Na coluna normalidade, quando se verificou a normalidade consta um “S”; caso contrário consta um “N”.

- de acordo com a distância limitante

Tabela 4.1.1 - Limitante a 1 km n=12

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G - 372	0,94958	0,889	0,926	S	S
G - 454	0,95848	0,889	0,926	S	S
Média	0,95764	0,889	0,926	S	S

Tabela 4.1.2 - Limitante a 2 km n=11

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G - 372	0,84100	0,883	0,922	N	N
G - 454	0,93110	0,883	0,922	S	S
Média	0,97881	0,883	0,922	S	S

Tabela 4.1.3 - Limitante a 3 km n=10

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G - 372	0,95958	0,876	0,917	S	S
G - 454	0,91024	0,876	0,917	S	N
Média	0,92535	0,876	0,917	S	S



Tabela 4.1.4 - Limitante a 5 km n=8

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G - 372	0,87342	0,859	0,905	S	N
G - 454	0,94981	0,859	0,905	S	S
Média	0,94559	0,859	0,905	S	S

Tabela 4.1.5 - Limitante a 10 km n=8

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G - 372	0,98860	0,859	0,905	S	S
G - 454	0,93804	0,859	0,905	S	S
Média	0,98420	0,859	0,905	S	S

- de acordo com a proximidade:

Tabela 4.1.6 - Proximidade de 2.5 km n=20

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G - 372	0,91916	0,925	0,950	N	N
G - 454	0,95281	0,925	0,950	S	S
Média	0,91640	0,925	0,950	N	N

Tabela 4.1.7 - Proximidade de 5 km n=28

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G - 372	0,90065	0,943	0,962	N	N
G - 454	0,95268	0,943	0,962	S	N
Média	0,89654	0,943	0,962	N	N

- linhas principais

Tabela 4.1.8 - Faxinal do Céu n=10

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G - 372	0,92040	0,876	0,917	S	S
G - 454	0,92903	0,876	0,917	S	S
G - 041	0,97873	0,876	0,917	S	S
Média	0,94284	0,876	0,917	S	S

Tabela 4.1.9 - Bituruna n=26

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G - 372	0,85308	0,939	0,959	N	N
G - 454	0,93822	0,939	0,959	N	N
Média	0,93600	0,939	0,959	N	N

Tabela 4.1.10 - Cruz Machado n=18

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G - 372	0,96900	0,919	0,945	S	S
G - 454	0,94700	0,919	0,945	S	S
Média	0,93013	0,919	0,945	S	N

- linhas irradiadas

Tabela 4.1.11 - Bituruna - Irradiamento 01, n=11

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G-372	0,99441	0,883	0,922	S	S
G-454	0,97304	0,883	0,922	S	S
Média	0,96579	0,883	0,922	S	S

Tabela 4.1.12 - Bituruna - Irradiamento 14, n=7

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G-372	0,97037	0,847	0,899	S	S
G-454	0,98235	0,847	0,899	S	S
Média	0,93887	0,847	0,899	S	S

Tabela 4.1.13 - Bituruna - Irradiamento 26, n=8

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G-372	0,88393	0,859	0,905	S	N
G-454	0,90295	0,859	0,905	S	N
G-041	0,76149	0,859	0,905	N	N
Média	0,83304	0,859	0,905	N	N

Tabela 4.1.14 - Cruz Machado - Irradiamento 4, n=7

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G-372	0,97714	0,847	0,899	S	S
G-454	0,87164	0,847	0,899	S	N
Média	0,94099	0,847	0,899	S	S

Tabela 4.1.15 - Cruz Machado - Irradiamento 10, n=5

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G-372	0,95473	0,822	0,879	S	S
G-454	0,99219	0,822	0,879	S	S
Média	0,95028	0,822	0,879	S	S

Tabela 4.1.16 - Cruz Machado - Irradiamento 19, n=5

Gravímetro	Coeficiente de Correlação			Normalidade	
	calculado	tabelado 1%	tabelado 5%	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$
G-372	0,92837	0,822	0,879	S	S
G-454	0,91244	0,822	0,879	S	S
Média	0,95074	0,822	0,879	S	S

Note-se que para a linha Bituruna, os valores do coeficiente de correlação calculado e tabelado (1%), estão próximos (vide Tabela 4.1.9). Sendo assim, aplicou-se o emparelhamento de dados para esta linha ( ver tópico 4.2 ), considerando-se sua amostra como normal.

Analisando-se os resultados, nota-se que em muitos casos a normalidade não foi confirmada, requerendo um teste não-paramétrico para checagem da subsidiência, teste este que será tratado no tópico 4.3.

Para algumas amostras, a normalidade só é verificada de acordo com um nível de significância específico (limitante a 3 km e a 5 km, linha Cruz Machado, etc), enquanto que para outros níveis, a normalidade é rejeitada. O mesmo fato ocorre dependendo do gravímetro (proximidade de 2,5 km), pois para um determinado gravímetro a amostra é normal, e para outro não é normal. Para estas amostras, empregou-se o emparelhamento de dados para fins comparativos com o teste não-paramétrico recomendável nestas situações.

Algumas amostras, apesar de não terem a normalidade verificada, apresentaram os valores dos coeficientes de correlação comparados (teórico e calculado) significativamente próximos. É o caso da amostra limitante a 3 km (G-454) para  $\alpha =5\%$  , das amostras de

proximidade de 2,5 km (G-372 e Média) para  $\alpha = 1\%$ , e o irradiamento 26 da linha Bituruna (G-454) para  $\alpha = 5\%$ . Nestas situações, pode-se dizer que as amostras são aproximadamente normais.

Com respeito aos gráficos Q-Q, os mesmos são particularmente informativos no caso de amostras pequenas ( $n < 20$ ). Para comparar-se os resultados obtidos com a análise dos coeficientes de correlação, são apresentados os gráficos Q-Q para sete amostras. Em todas elas optou-se por representar a média. Ao lado dos gráficos estão listados os pares de observação  $z_j, x_j$ .

$z(j)$	$x(j)$
-1,96	-229,7
-1,44	-214,1
-1,15	-143,9
-0,93	-134,8
-0,76	-112,3
-0,6	-79,4
-0,45	-76,5
-0,32	-71,3
-0,19	-64,1
-0,06	-36,8
0,06	-32,9
0,19	-25,2
0,32	-21,4
0,45	-17,9
0,6	-17,3
0,76	-16,1
0,93	-11,3
1,15	-10,6
1,44	-5,6
1,96	4,2

Figura 6 - Gráfico Q-Q para Proximidade 2,5 km

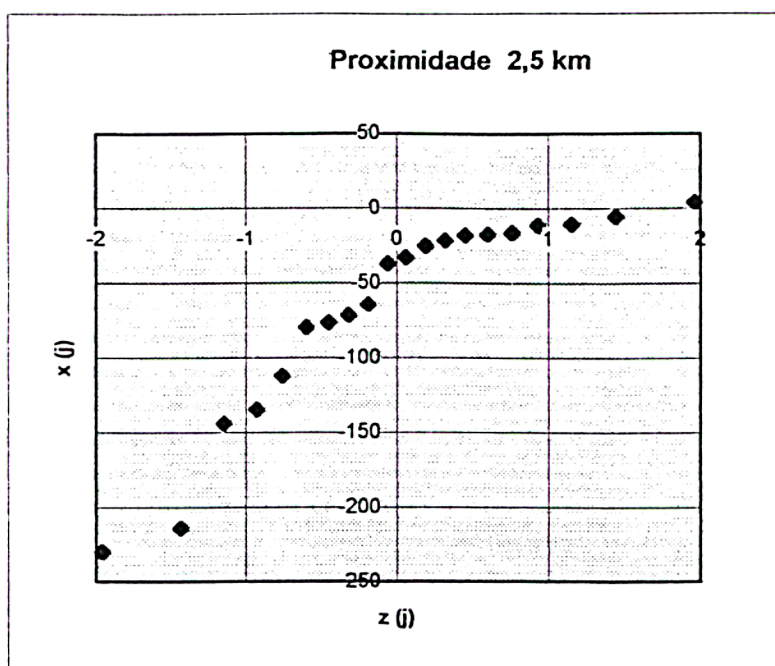
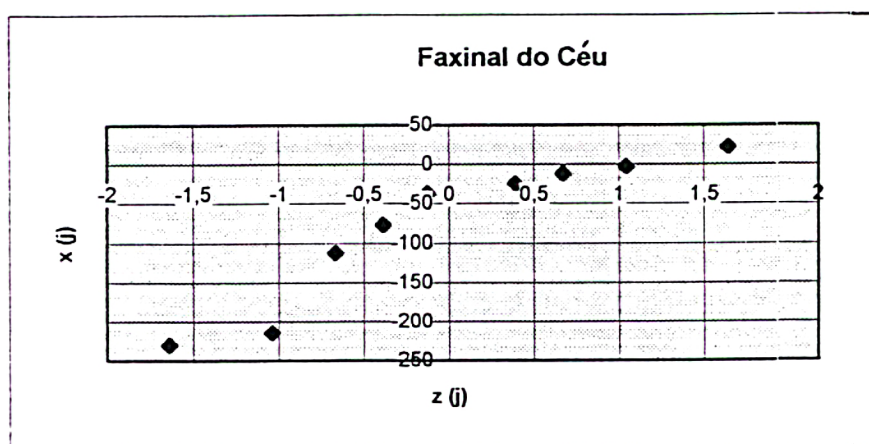


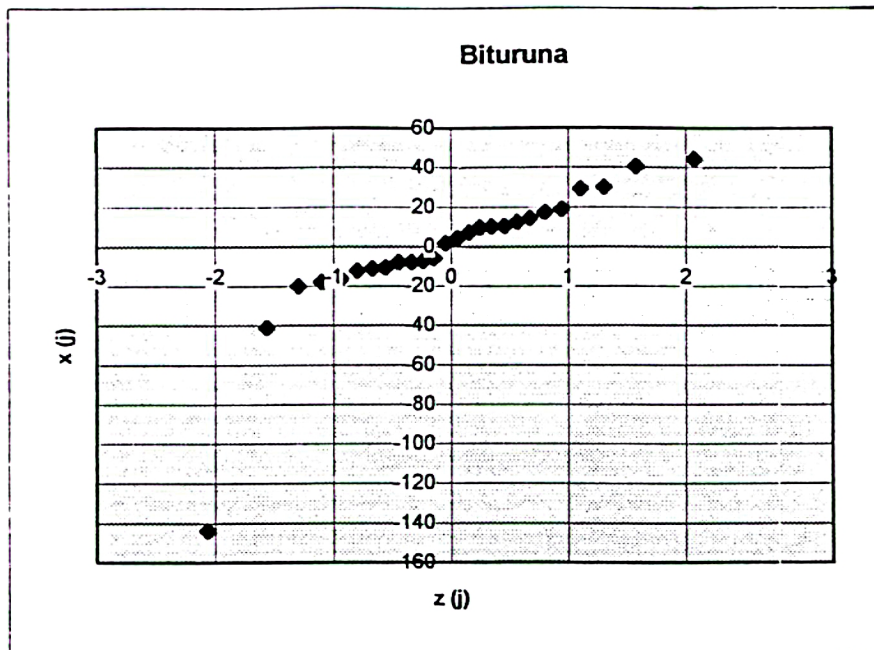
Figura 7 - Gráfico Q-Q para linha Faxinal do Céu

$z(j)$	$x(j)$
-1,64	-229,7
-1,04	-214,1
-0,67	-112,3
-0,39	-76,5
-0,13	-36,8
0,39	-24
0,67	-11,3
1,04	-2,8
1,64	22,3



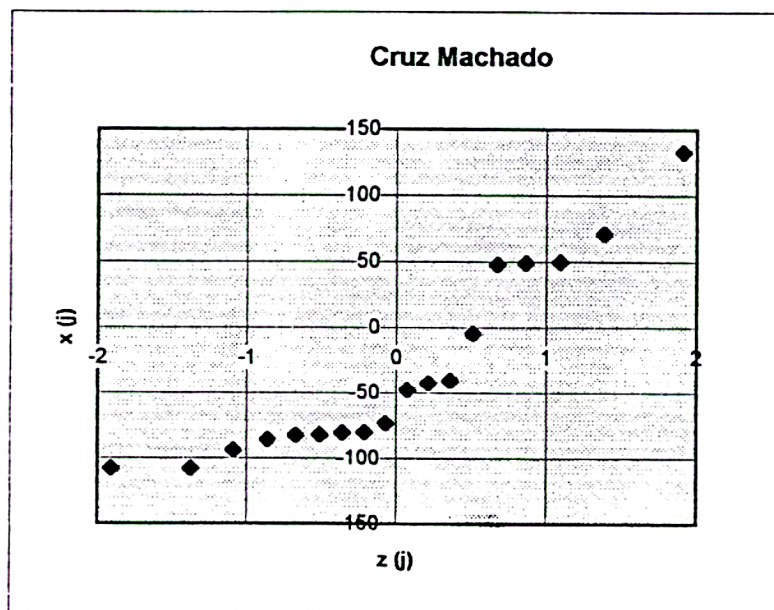
$z(i)$	$x(i)$
-2,07	-143,9
-1,57	-41
-1,3	-19,9
-1,1	-17,9
-0,94	-16,1
-0,8	-12,1
-0,67	-11
-0,56	-10,6
-0,45	-7,9
-0,34	-7,8
-0,24	-7,3
-0,15	-5,6
-0,05	1,8
0,05	4,2
0,15	7,2
0,24	9,6
0,34	10,1
0,45	10,5
0,56	12,5
0,67	14,4
0,8	17,4
0,94	19,1
1,1	29,2
1,3	30
1,57	40,6
2,07	44,4

Figura 8 - Gráfico Q-Q para linha Bituruna



$z(i)$	$x(i)$
-1,91	-107,9
-1,38	-107,8
-1,09	-93,8
-0,86	-85,6
-0,67	-82,3
-0,51	-82,1
-0,36	-80,4
-0,21	-79,9
-0,07	-73,1
0,07	-47,6
0,21	-42,4
0,36	-40,1
0,51	-4,6
0,67	47,9
0,86	48,9
1,09	49,7
1,38	71,1
1,91	133,1

Figura 9 - Gráfico Q-Q para Linha Cruz Machado



$z(j)$	$x(j)$
-1,28	-78,4
-0,52	-77,6
0	-53,6
0,52	-42
1,28	-4,6

Figura 10 - Gráfico Q-Q para linha Cruz Machado, Irrad. 19

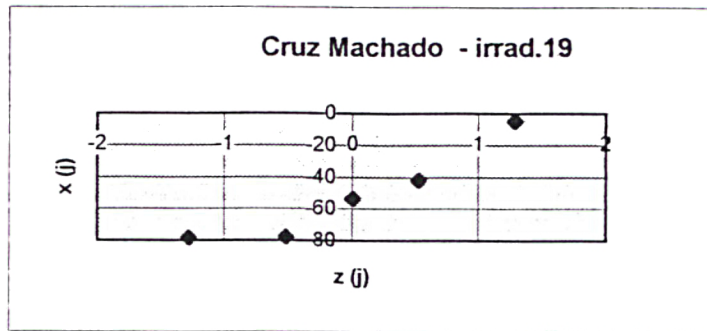
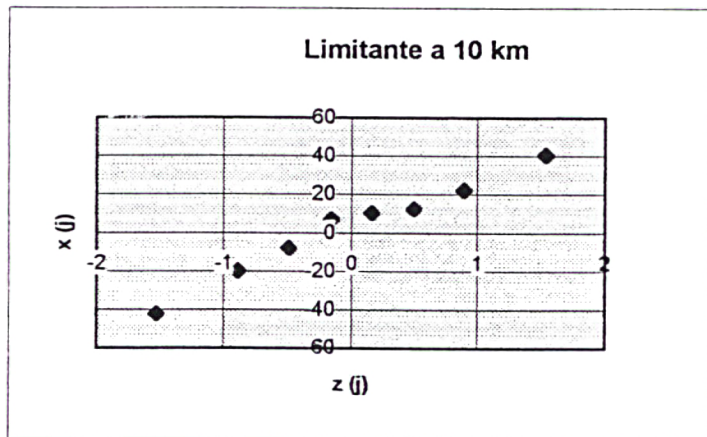


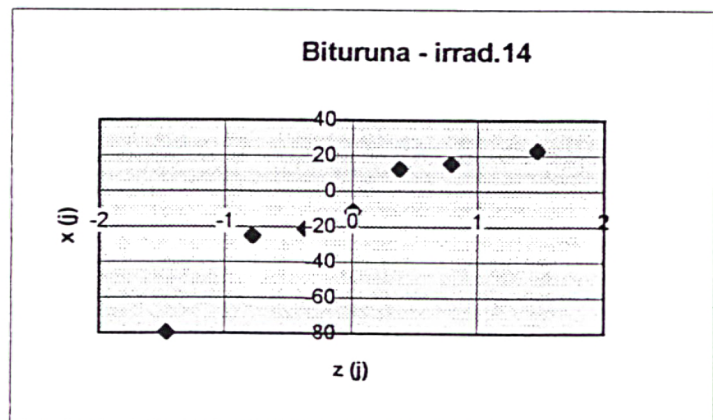
Figura 11 - Gráfico Q-Q para Limitante a 10 km

$z(j)$	$x(j)$
-1,53	-42,4
-0,89	-19,9
-0,49	-7,8
-0,16	7,2
0,16	10,5
0,49	12,5
0,89	22,3
1,53	40,6



$z(j)$	$x(j)$
-1,47	-79,5
-0,79	-25,2
-0,37	-21,4
0	-11,5
0,37	12,6
0,79	15,5
1,47	22,8

Figura 12 - Gráfico Q-Q para linha Bituruna, Irrad. 14





O gráfico Bituruna (fig.8) confirma a não normalidade constatada analiticamente. Apresenta um ponto extremo que está bastante afastado dos demais, o que compromete a validade de uma “reta média”. Provavelmente este ponto representa um erro grosseiro. A não consideração deste ponto permite que se constate a normalidade no gráfico.

O gráfico Faxinal do Céu (fig.9) apresenta os pontos mais dispersos. É uma amostra de poucos elementos, cujo gráfico Q-Q evidencia a normalidade, confirmando o resultado analítico visto na tabela 4.1.8.

Já o gráfico para a linha Cruz Machado (fig.7) apresenta dificuldades na sua interpretação. Analiticamente, a normalidade só é válida para  $\alpha=1\%$ ; para  $\alpha=5\%$  é rejeitada.

O gráfico para a amostra de proximidade de 2,5 km (fig.6) demonstra que os pontos não estão distribuídos ao longo de uma reta, descaracterizando a normalidade.

O gráfico para o irradiação 14 (fig.12) apresenta dificuldades em se avaliar a normalidade, embora a mesma tenha sido confirmada analiticamente. Mas podemos constatar que é possível se traçar uma “reta média” satisfatoriamente.

O gráfico para o irradiação 19 (fig.10) confirma a normalidade obtida pela análise do coeficiente de correlação; o mesmo acontece com a amostra limitante a 10 km (fig.11), na qual os pontos estão bastante próximos da linearidade.

## 4.2 EMPARELHAMENTO DE DADOS

O emparelhamento de dados é um teste paramétrico, que como o próprio nome diz, testa parâmetros ( no nosso caso, a média ).

As observações gravimétricas efetuadas antes e após o enchimento do reservatório, podem ser encaradas como dados emparelhados.

Os resultados de duas amostras constituem dados emparelhados quando estão relacionados dois a dois segundo algum critério que introduza uma influência marcante entre os diversos pares (COSTA NETO, 1977).



A influência marcante que se verifica é o enchimento do reservatório o qual define duas épocas distintas: antes e após o enchimento do reservatório. Pelo fato dos pontos observados nas duas épocas, os aparelhos utilizados, bem como os procedimentos de campo serem os mesmos, esta situação permite que sejam definidos pares de observações constituídos do valor de gravidade para determinado ponto, antes e depois do surgimento do reservatório.

Sendo assim calculam-se as diferenças  $d_i$  correspondentes a cada par de valores, ficando os dados reduzidos a uma única amostra de  $n$  diferenças.

O teste a ser aplicado tem os seguintes passos

- a) definição da hipótese  $H_0$   $H_0: \mu_a - \mu_d = d_0$
- b) definição da hipótese  $H_1$   $H_1: \mu_a - \mu_d < d_0$
- c) definição do nível de significância
- d) determinação da região de rejeição (R.R) pela distribuição t de Student
- e) cálculo do t amostral

$$t = (\bar{d} - d_0) / (s / \sqrt{n}) \tag{4}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}} \tag{5}$$

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{n} \tag{6}$$

$$d_i = x_a - x_d \tag{7}$$

onde:  $\bar{d}$  - média da amostra das diferenças

$d_0$  - valor testado da média das diferenças nas populações

$s$  - desvio padrão da amostra das diferenças

$d_i$  - i-ésima diferença entre duas observações emparelhadas

$x_a$  - valor da gravidade antes do enchimento do reservatório

$x_d$  - valor da gravidade depois do enchimento do reservatório

f) conclusões: se  $t < -t_{\alpha}$ , rejeita-se  $H_0$

sendo:  $t$  - o valor de  $t$  amostral

$t_{\alpha}$  - o valor de  $t$  tabelado

Supondo-se  $d_0=0$ , a hipótese  $H_0$  de igualdade das médias expressa que não houve movimento, ou seja, dentro de um certo nível de significância o valor de  $g$  permanece inalterado.

Na hipótese  $H_1$  fica definido que  $\mu_a$  é menor que  $\mu_d$ , sendo:

$\mu_a$ -valor médio de  $g$  antes do enchimento do reservatório,

$\mu_d$ -valor médio de  $g$  após o enchimento do reservatório.

Como já foi citado, se o valor de  $g$  para um mesmo ponto aumenta após certo tempo, é um indício da subsidência. Assim sendo, caso for rejeitada a hipótese  $H_0$ , ficará constatada a subsidência, dentro do nível de confiança adotado.

Através do programa EMPARE.FOR elaborado em linguagem FORTRAN, e que se encontra nos ANEXOS, efetuou-se o teste por emparelhamento de dados para as linhas gravimetradas.

O teste foi aplicado considerando-se  $d_0$  como:

- a diferença entre os valores médios da gravidade ( a média dos valores de  $g$  antes menos o valor médio de  $g$  após o enchimento do reservatório );

- a diferença entre o valores de gravidade para cada gravímetro especificamente (G-372, G-454, G-041). Em outras palavras, vale afirmar que adotou-se como valor de gravidade médio, o valor obtido para o gravímetro 372, o mesmo acontecendo para os demais gravímetros, isto quando dispõe-se dos dados observados, haja vista o gravímetro G-041 não ter sido utilizado em todas as medições.

O programa calcula as diferenças entre o valores de gravidade para as duas épocas, e demais elementos necessários para a aplicação do teste.

Foram adotados quatro níveis de significância, sendo eles 1%, 2.5%, 5% e 10%, para se ter uma idéia da confiabilidade das conclusões.

Os valores tabelados da distribuição t de Student foram inseridos no programa, sendo que o próprio programa define o valor de t tabelado, procurando-o na tabela de acordo com o nível de significância e graus de liberdade.

A seguir seguem os resultados obtidos com o uso do método de emparelhamento para as diversas linhas gravimetradas, considerando-se cada gravímetro individualmente, e também a média dos valores de g obtidos com estes gravímetros.

Nas tabelas abaixo, as notações empregadas são

$t_{am}$  - valor de t amostral     $t_t$  - valor de t tabelado

#### 4.2.1 Resultados obtidos

Tabela 4.2.1.1 - Linha : Faxinal do Céu

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=-3,433$	G - 454 $t_{am}=-1,273$	G - 041 $t_{am}=-2,729$	MÉDIA $t_{am}=-2,763$
1%	-2,82	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
2,5%	-2,26	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
5%	-1,83	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
10%	-1,38	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$

Tabela 4.2.1.2 - Linha: Bituruna

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=-0,688$	G - 454 $t_{am}=-0,168$	MÉDIA $t_{am}=-0,281$
1%	-2,48	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
2,5%	-2,06	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
5%	-1,71	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
10%	-1,32	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$

Tabela 4.2.1.3 - Linha: Cruz Machado

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=-0,492$	G - 454 $t_{am}=-3,000$	MÉDIA $t_{am}=-1,888$
1%	-2,57	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
2,5%	-2,11	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
5%	-1,74	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
10%	-1,33	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$

Analisando-se o resultados obtidos para as linhas principais, a linha Bituruna apresentou-se totalmente estável; a linha Cruz Machado apresenta subsidência a um nível de significância de 5% e a linha Faxinal do Céu foi a que apresentou mais indícios de subsidência ( $\mu_a < \mu_d$ ), confirmada para  $\alpha = 2,5 \%$ .

A seguir, seguem as tabelas referentes aos irradiamentos:

Tabela 4.2.1.4 - Linha: Cruz Machado - irradiação 4

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=-1,023$	G - 454 $t_{am}=-1,162$	MÉDIA $t_{am}=-4,264$
1%	-3,14	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
2,5%	-2,45	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
5%	-1,94	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
10%	-1,44	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$

Tabela 4.2.1.5 - Linha: Cruz Machado - irradiamento 10

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am} = 0,910$	G - 454 $t_{am} = -8,481$	MÉDIA $t_{am} = -5,776$
1%	-3,75	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
2,5%	-2,78	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
5%	-2,13	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
10%	-1,53	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$

Tabela 4.2.1.6 - Linha: Cruz Machado - irradiamento 19

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am} = -4,950$	G - 454 $t_{am} = -18,081$	MÉDIA $t_{am} = -3,768$
1%	-3,75	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
2,5%	-2,78	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
5%	-2,13	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
10%	-1,53	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$

Tabela 4.2.1.7 - Linha: Bituruna - irradiamento 1

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am} = -1,782$	G - 454 $t_{am} = -0,902$	MÉDIA $t_{am} = -2,300$
1%	-2,76	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
2,5%	-2,23	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
5%	-1,81	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
10%	-1,37	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$

Tabela 4.2.1.8 - Linha: Bituruna - irradiação 14

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=-1,099$	G - 454 $t_{am}=1,808$	MÉDIA $t_{am}=-0,933$
1%	-3,14	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
2,5%	-2,45	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
5%	-1,94	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
10%	-1,44	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$

Tabela 4.2.1.9 - Linha: Bituruna - irradiação 26

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=-0,300$	G - 454 $t_{am}=-0,862$	G - 041 $t_{am}=-2,393$	MÉDIA $t_{am}=-0,805$
1%	-3,00	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
2,5%	-2,36	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
5%	-1,90	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
10%	-1,42	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$

Onde consta  $\mu_a < \mu_d$  confirmou-se a subsidência. O gravímetro G-454 para a amostra da linha Cruz Machado, irradiação 19 (Tabela 4.2.1.6) apresentou um valor significativo que reforça a ocorrência de subsidência.

#### 4.2.2 Uso do método, limitando-se à faixa de abrangência

A seguir são apresentadas as tabelas que demonstram o resultado do emparelhamento, desta vez limitando-se à área de abrangência. Testou-se, por exemplo, para pontos distantes 2 km do reservatório, bem como foram feitos testes que abrangem os pontos situados até 2 km da barragem. Esta distinção foi feita para que os pontos mais distantes do

reservatório não sofrêssem a influência daqueles que se situam na proximidade do mesmo. Os dados do G-041 foram suprimidos por não serem disponíveis em todos os pontos.

Tabela 4.2.2.1 - Linha: até o limite de 1 km (12 pontos)

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=-3,212$	G - 454 $t_{am}=-4,814$	MÉDIA $t_{am}=-4,096$
1%	-2,72	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
2,5%	-2,20	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
5%	-1,80	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
10%	-1,36	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$

Tabela 4.2.2.2 - Linha: até o limite de 2 km (11 pontos)

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=-3,371$	G - 454 $t_{am}=-2,655$	MÉDIA $t_{am}=-2,799$
1%	-2,76	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
2,5%	-2,23	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
5%	-1,81	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
10%	-1,37	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$

Tabela 4.2.2.3 - Linha: até o limite de 3 km (10 pontos)

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=-0,889$	G - 454 $t_{am}=-0,987$	MÉDIA $t_{am}=-1,471$
1%	-2,82	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
2,5%	-2,26	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
5%	-1,83	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
10%	-1,38	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$

Tabela 4.2.2.4 - Linha: até o limite de 5 km (8 pontos)

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=0,068$	G - 454 $t_{am}=-1,168$	MÉDIA $t_{am}=-1,276$
1%	-3,00	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
2,5%	-2,36	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
5%	-1,90	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
10%	-1,42	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$

Tabela 4.2.2.5 - Linha: até o limite de 10 km (8 pontos)

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=0,840$	G - 454 $t_{am}=0,245$	MÉDIA $t_{am}=0,315$
1%	-3,00	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
2,5%	-2,36	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
5%	-1,90	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$
10%	-1,42	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$

Tabela 4.2.2.6 - Linha: proximidade de 2,5 km (20 pontos)

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=-3,699$	G - 454 $t_{am}=-2,915$	MÉDIA $t_{am}=-4,293$
1%	-2,54	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
2,5%	-2,09	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
5%	-1,73	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
10%	-1,33	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$



Tabela 4.2.2.7 - Linha: proximidade de 5 km (28 pontos)

GRAVIM. NÍVEL SIGNIF.	$t_t$	G - 372 $t_{am}=-3,106$	G - 454 $t_{am}=-1,768$	MÉDIA $t_{am}=-3,334$
1%	-2,47	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
2,5%	-2,05	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a = \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
5%	-1,70	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$
10%	-1,31	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$	$\mu_a < \mu_d$

Considerando-se os pontos situados até certo limite de distância do reservatório, confirmou-se a expectativa de que quanto mais próximo o reservatório, mais chances de ocorrência de subsidência, o que se confirmou para pontos situados a 2 km do reservatório e tendência para pontos a 3 km de distância (10% de significância).

Adotando-se como critério de inclusão de pontos para análise, aqueles que se localizam numa área de proximidade de 2,5 km ou 5 km, verificou-se subsidência em ambas as situações. Nestes casos, o número de pontos é maior, sendo que os pontos mais próximos induzem o resultado, ou seja, influenciam de tal forma que, sob o ponto de vista geral, configura-se a subsidência. Isto não ocorreu nos testes específicos que englobaram somente os pontos que se situam, por exemplo a 5 km do reservatório, situação na qual não se verificou subsidência.

#### 4.3. PROVA DE WILCOXON: TESTE NÃO-PARAMÉTRICO

Em algumas amostras testadas, a normalidade não foi confirmada. Para estes casos não se recomenda aplicar um teste paramétrico. Recorreu-se a um teste não-paramétrico adequado para a comparação de duas populações: a prova de Wilcoxon.

A prova de Wilcoxon é bastante útil para as ciências do comportamento, segundo (SIEGEL, Sidney), mas nada impede que seja aplicada em outras ciências. Baseia-se em atribuir-se maior ponderação (posto maior) para os pares que resultem grandes diferenças e posto menor

quando as diferenças são pequenas, efetuando-se posteriormente a soma de postos dos valores observados. O posto de um certo valor em um conjunto de  $n$  valores é um número que indica sua posição no conjunto ordenado de forma crescente ou decrescente, do primeiro ao  $n$ -ésimo.

#### 4.3.1. Fundamentos Lógicos

Sendo  $d_i$  a diferença para cada par de observações gravimétricas pré e pós enchimento do reservatório, faz-se a atribuição de postos a cada  $d_i$ , independentemente do sinal. Para a menor  $d_i$ , o posto 1, para a  $d_i$  seguinte posto 2, e assim sucessivamente.

Atribui-se a cada posto o sinal da diferença, identificando-se assim quais são oriundos de  $d_{iS}$  positivos ou negativos. Se as amostras forem idênticas, as somas dos postos das diferenças positivas e negativas deverão ser aproximadamente iguais, aceitando-se  $H_0$ .

Podem ocorrer situações particulares quando se vai atribuir posto às observações:

- quando  $d_i=0$ , o par de observações é excluído da análise, interferindo assim no número de pares final  $n$ .

- dois ou mais  $d_{iS}$  podem ter o mesmo valor. Neste caso, atribui-se o posto em seqüência, como se os  $d_{iS}$  fossem diferentes. Soma-se o valor dos postos para  $d_{iS}$  iguais e divide-se pelo número de  $d_{iS}$  de mesmo valor. Para cada  $d_i$  de mesmo valor será atribuído o posto correspondente à média dos postos que seriam atribuídos aos  $d_{iS}$  se eles fossem ligeiramente diferentes. O próximo  $d_i$  receberá posto sequencial ao último posto utilizado no cálculo da média.

A prova de Wilcoxon pode ser empregada para amostras pequenas e amostras grandes. Em ambas as situações, adota-se  $H_0$ : igualdade da média das amostras e  $H_1$ : diferença entre as médias, no caso de teste bilateral.

#### 4.3.2. Aplicação para pequenas amostras

Após a atribuição de posto às diferenças calculadas, adota-se para  $T$  a menor soma dos postos de mesmo sinal, seja positivo ou negativo. A Tábua  $G$  (vide Anexos), fornece diversos valores de  $T$  associados a níveis de significância. Se o valor de  $T$  calculado não excede o valor de  $T$  tabelado para o nível de significância adotado, pode-se rejeitar a hipótese de nulidade aquele

nível. A Tábua G fornece os valores críticos de T até para n=25 e pode ser empregada tanto em provas unilaterais como bilaterais.

Sendo assim, as amostras pequenas consideradas não normais no teste de normalidade foram submetidas à prova de Wilcoxon. Vejamos um exemplo detalhado no caso da amostra limitante a 5km para o gravímetro G-372, sendo n=8, temos:

$$\sum \text{postos negativos}=21$$

$$\sum \text{postos positivos}=15, \text{ sendo portanto } T_{\text{calc}}=15.$$

Para  $\alpha =5\%$ , o valor de T na Tábua G é  $T_{\text{tab}}=4$ , donde se conclui que  $T_{\text{calc}}>T_{\text{tab}}$ , aceitando-se  $H_0$ , sendo  $H_0$  a hipótese de igualdade entre os valores de  $\Delta g$  para antes e depois do enchimento do reservatório.

Os resultados obtidos quando se empregou a prova de Wilcoxon, no caso de pequenas amostras para um nível de significância de 5%, são apresentados na tabela a seguir, conforme a amostra analisada.

Tabela 4.3.2.1 - Amostras não normais, n<25

AMOSTRA ANALISADA	n	T <sub>calc</sub>	T <sub>tab</sub>	conclusão
Limitante a 5km, G-372	8	15	4	aceita Ho
Irrad.4, Cruz Machado, G-454	7	8	2	aceita Ho
Limitante a 3km, G-454	10	26	8	aceita Ho
Média para linha Cruz Machado	18	44	40	aceita Ho
Proximidade 2,5km, média	20	1	52	rejeita Ho
Proximidade 2,5km, G-372	20	13	52	rejeita Ho
Limitante a 2km, G-372	11	0	11	rejeita Ho
Irrad.26, Bituruna, média	8	17	4	aceita Ho
Irrad.26, Bituruna, G-454	8	8	4	aceita Ho
Irrad.26, Bituruna, G-372	8	17	4	aceita Ho
Irrad.26, Bituruna, G-041	8	0	4	rejeita Ho

#### 4.3.3. Aplicação para grandes amostras

No caso de amostras com  $n$  maior que 25, não se pode utilizar a Tábua G. Nestes casos, a soma dos postos  $T$  tem distribuição praticamente normal com:

$$\text{Média} = \mu_T = n(n + 1) / 4 \quad (8)$$

$$\text{Desvio Padrão} = \sigma_T = \sqrt{\frac{n(n + 1)(2n + 1)}{24}} \quad (9)$$

Sendo assim, considera-se:

$$z = \frac{T - \mu_T}{\sigma_T} \quad (10)$$

a distribuição aproximadamente normal, com média zero e variância unitária.

A conclusão quanto à aceitação ou rejeição de  $H_0$ , advém da análise do valor de  $z$  obtido pela aplicação da fórmula anterior.

Se  $|z_{\text{calc}}| > z_{\text{tab}}$  - rejeita-se  $H_0$ .

Se  $|z_{\text{calc}}| \leq z_{\text{tab}}$  - aceita-se  $H_0$ .

Para amostras não normais com  $n > 25$ , com um nível de significância de 5% e considerando-se um teste bilateral em que  $z_{\text{tab}} = 1.96$ , obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 4.3.3.1 - Amostras não normais,  $n > 25$

AMOSTRA ANALISADA	n	T	$z_{\text{calc}}$	Conclusão
Linha Bituruna, G-454	26	158	-0,444	aceita $H_0$
Linha Bituruna, G-372	26	161	-0,368	aceita $H_0$
Linha Bituruna, média	26	161	-0,368	aceita $H_0$
Proximidade de 5km, G-454	28	151	-1,184	aceita $H_0$
Proximidade de 5km, G-372	28	81	-2,778	rejeita $H_0$
Proximidade de 5km, média	28	65	-3,142	rejeita $H_0$

No caso da tabela anterior, quando  $n=26$ , obteve-se  $\mu_T = 175,5$  e  $\sigma_T = 39,37321$

De igual modo quando  $n=28$ , obteve-se  $\mu_T = 203$  e  $\sigma_T = 43,91469$ .

#### 4.3.4. Análise Final dos Resultados

Considerando-se as pequenas amostras e as grandes amostras, na maioria dos casos houve aceitação de  $H_0$ , o que implica na estabilidade de  $g$  com o enchimento do reservatório. Nos casos de rejeição de  $H_0$ , há evidências de subsidência ou soerguimento, o que deve ser investigado. Isto implica num teste unilateral, no qual se prediz o sentido da diferença (Siegel). Sendo assim, no caso das pequenas amostras, deve ser possível predizer antes de examinar os dados, qual o sinal da menor soma dos postos. No nosso caso, é de se esperar que  $T$  seja oriundo do somatório de postos positivos, pois as diferenças são obtidas pela diferença de  $g$  antes do enchimento com  $g$  após o enchimento do reservatório. Nesta circunstância, pressupõe-se que irá ocorrer subsidência, originando aumento de  $g$  após o enchimento e conseqüentemente, diferenças negativas. Portanto, a maioria dos postos assumirão o sinal negativo, resultando um menor somatório para os postos positivos, que por sua vez definirão o sinal para  $T$ . Se de fato o valor de  $T$  for igual ao somatório dos postos positivos, confirma-se a subsidência. Na tabela 4.3.2.1 temos 4 situações de rejeição de  $H_0$ . Os somatórios de postos para as quatro situações é a que se segue:

Proximidade 2,5km (Média) -  $\sum \text{pos}=1$  ,  $\sum \text{neg}=209$

Proximidade 2,5Km (G-372) -  $\sum \text{pos}=13$  ,  $\sum \text{neg}=197$

Limitante a 2km (G-372) -  $\sum \text{pos}=0$  ,  $\sum \text{neg}=66$

Irrad.26, Bituruna (G 041)-  $\sum \text{pos}=0$  ,  $\sum \text{neg}=36$

onde  $\sum \text{pos}$ = somatório dos postos positivos

$\sum \text{neg}$ = somatório dos postos negativos

Em todas as situações confirma-se o aumento de  $g$  indicando a subsidência, resultado que também foi obtido para as mesmas amostras pelo método de emparelhamento de dados, embora este último não seja apropriado no caso de amostras de populações não normais (vide tópico 4.2.1 e 4.2.2).

Para o caso das grandes amostras, as duas situações em que houve rejeição da hipótese  $H_0$ , apresentam  $z_{calc}$  com valor negativo, onde o sinal é indicativo da subsidência (vide tabela 4.3.3). As duas situações se referem à amostras de pontos que se situam numa proximidade de 5km do reservatório. Para estes dois casos, o emparelhamento também foi aplicado para simples efeito de comparação. Os resultados também indicaram subsidência (vide tópico 4.2.2).

Confrontando-se os resultados dos testes não paramétricos com os obtidos pelo emparelhamento de dados, mesmo quando este não é recomendável por se tratar de amostras não normais, chegou-se à mesma conclusão, confirmando-se que o emparelhamento de dados é um método bastante robusto, ou seja, um pequeno afastamento das condições previstas para aplicação do método não invalida o mesmo. Apenas duas situações não apresentaram, numa primeira análise, resultados semelhantes: as amostras de proximidade de 5 km para o G-454 e  $\alpha = 5\%$  e a linha Cruz Machado, amostra da média e  $\alpha = 5\%$ . No primeiro caso, pelo emparelhamento de dados constatou-se subsidência a 5%, com os valores significativamente próximos ( $1,768 > 1,70$ ), ou seja, a hipótese de subsidência que foi confirmada, esteve próxima de ser rejeitada; já o método não-paramétrico não evidenciou a subsidência. No caso da linha Cruz Machado, para  $\alpha = 5\%$  constatou-se subsidência pelo emparelhamento de dados, a qual mesmo não sendo verificada pelo método não-paramétrico, apresentou os valores de T comparados bastante próximos (44 e 40).

## 4.4 ANÁLISE DA VARIÂNCIA

Quando se estuda questões que envolvam a comparação de várias médias, um método de grande importância que pode ser utilizado é a análise da variância. É um método suficientemente poderoso que permite identificar diferenças entre as médias populacionais devidas a inúmeras causas (COSTA NETO, 1977).

Na análise da variância testamos  $k$  ( $k \geq 2$ ) médias populacionais com base na estatística F. Este método portanto testa a igualdade de médias, utilizando variâncias na tomada de decisões.

### 4.4.1 Definição do Método

Considerando-se  $k$  amostras de tamanho  $n$ , retiradas de  $k$  populações cujas médias  $\mu_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) serão comparadas, a hipótese  $H_0$  fica assim definida:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

sendo que  $H_1$  estabelece que pelo menos uma das médias seja diferente das demais.

Há algumas condições básicas que devem ser satisfeitas, ou seja, que as populações sejam normalmente distribuídas, e que as variâncias populacionais sejam estatisticamente iguais.

O método é robusto, ou seja, um afastamento das condições básicas, ainda conduz a resultados válidos (COSTA NETO, 1977).

Sendo verdadeira a hipótese  $H_0$ , há três maneiras de se estimar a variância  $\sigma^2$ , comum implicitamente a todas as populações.

#### a) Variância Total

Considera-se as  $k$  amostras reunidas em uma só, o que é possível pelo fato das variâncias populacionais serem todas iguais a  $\sigma^2$ .

Essa variância será estimada por :

$$S_t^2 = \frac{\left[ \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 \right]}{(N - 1)} \quad (11)$$

O numerador é denominado Soma Total dos Quadrados (SQT)

Na expressão acima, e nas duas seguintes, tem-se

$X_{ij}$  - i-ésimo elemento da j-ésima amostra

$\bar{X}_j$  - média da j-ésima amostra

$\bar{X}$  - média do conjunto de todas as amostras

$N$  - número total de observações.

#### b) Variância entre amostras

Sendo  $H_0$  verdadeira, todos os valores  $X_{ij}$  são provenientes de uma única população, e pode-se estimar a variância  $\sigma^2$  através da média das  $k$  amostras, ou seja, como sendo uma amostra de  $k$  valores.

Então:

$$S_c^2 = \frac{\left( \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (\bar{X}_j - \bar{X})^2 \right)}{(k - 1)} \quad (12)$$

O numerador da expressão acima é denominado Soma de Quadrados Entre Amostras (SQE).

#### c) Variância Residual

Consiste em estimar-se as variâncias individualmente a partir dos elementos de cada uma das  $k$  amostras, ou seja, dentro de cada amostra e posteriormente estimar-se um único valor de  $\sigma^2$  pela combinação das  $k$  variâncias.



Numa amostra qualquer, a estimativa individual é dada por

$$S_j^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n \left( X_{ij} - \bar{X}_j \right)^2 \right]}{(n-1)} \quad (13)$$

Na combinação das k variâncias, a estimativa de  $\sigma^2$  é dada por:

$$S_r^2 = \frac{\left( \sum_{j=1}^k S_j^2 \right)}{k} = \frac{\left[ \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \left( X_{ij} - \bar{X}_j \right)^2 \right]}{(N-k)} \quad (14)$$

O numerador da (14) é denominado Soma de Quadrado Residuais (SQR).

Confirmando-se a veracidade de **H<sub>0</sub>**, demonstra-se que  $S_e^2$  e  $S_r^2$  são independentes, podendo ser comparadas mediante a estatística F.

$$F = \frac{S_e^2}{S_r} \quad (15)$$

O teste será do tipo unilateral pois sendo **H<sub>0</sub>** falsa, F sempre tenderá a crescer (MARQUES,1987). Para maiores esclarecimentos recomenda-se Costa Neto /01/.

O valor crítico de F para um nível de significância  $\alpha$  será  $F_\alpha (k-1, N-k)$ .

A hipótese **H<sub>0</sub>** será rejeitada para  $F > F_\alpha (k-1, N-k)$ , onde  $N=nk$ .

O método de análise da variância pode ser empregado para um ou mais critérios de classificação. No caso em questão, empregar-se-á um critério de classificação: gravímetros variados.

#### 4.4.2 Análise da variância a um critério de classificação

Neste caso, os elementos observados são classificados de acordo com um critério de interesse que será testado.

Consideremos as k populações:  $P_1, P_2, \dots, P_k$  e as amostras correspondentes com tamanhos  $n_1, n_2, \dots, n_k$ .

Tabela 4.4.2.1 - Análise de variância a um critério de classificação

$P_1$	$P_2$	...	$P_k$
$X_{11}$	$X_{12}$		$X_{1k}$
$X_{21}$	$X_{22}$		$X_{2k}$
⋮	⋮	...	⋮
$X_{i1}$	$X_{i2}$		$X_{ik}$
⋮	⋮		⋮
$X_{n_1 1}$	$X_{n_2 2}$		$X_{n_k k}$

Temos que:

$x_{ij}$  -  $i$ -ésimo elemento da  $j$ -ésima amostra

$\bar{x}_j$  - média da  $j$ -ésima amostra

$\bar{X}$  - média do conjunto de todas as amostras

$k$  - número de amostras

$n_k$  - número de elementos para cada amostra

$N$  - número total de observações

A seqüência do teste é dada por:

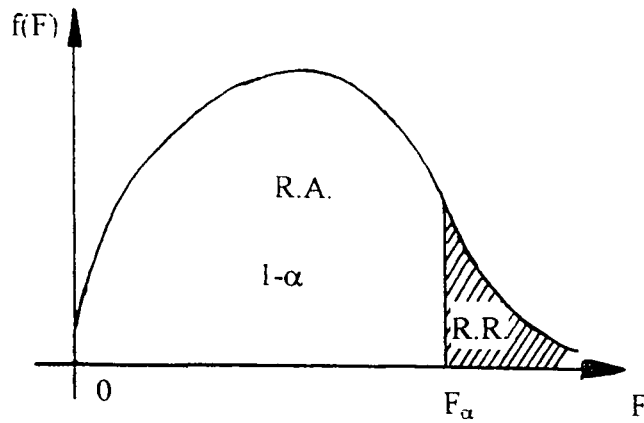
a)  $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$

b)  $H_1$  : pelo menos uma das  $\mu_j$  é diferente das demais ( $\mu_j \neq \mu$ )

c) Definição do nível de significância  $\alpha$

d) Região de rejeição da hipótese  $H_0$

Figura 13 - Distribuição F de Snedecor



onde:

$F_{\alpha}$  ( $k-1, N-k$ ) valor tabelado da estatística F de Snedecor

e) Cálculo da estatística F

A definição da soma dos quadrados quando se tem um critério de classificação é a que segue abaixo:

$$SQE = \sum_{j=1}^k \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij} \right)^2}{n_j} \right] - \frac{\left( \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij} \right)^2}{N} \quad (16)$$

$$SQR = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}^2 - \sum_{j=1}^k \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij} \right)^2}{n_j} \right] \quad (17)$$

$$SQT = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}^2 - \frac{\left( \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij} \right)^2}{N} \quad (18)$$

onde:

SQE - Soma de Quadrados Entre Amostras;

SQR - Soma de Quadrados Residual;

SQT - Soma de Quadrados Total.

Analisando-se as expressões para SQE, SQR e SQT, nota-se que  $SQT = SQE + SQR$ . Os valores para SQE, SQR e SQT não poderão nunca resultar com sinal negativo, pois não deixam de expressar variância ( $\sigma^2$ ).

Para facilitar a compreensão dos cálculos, o quadro da ANOVA (Analysis of Variancy) é de grande utilidade, sendo montado da seguinte forma:

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Estatística F
Entre Amostras	SQE	k - 1	$QME = \frac{SQE}{k - 1}$	F = $\frac{QME}{QMR}$
Residual	SQR	N - k	$QMR = \frac{SQR}{N - k}$	
Total	SQT	N - 1		

f) Conclusão : Se F for maior que  $F_{\alpha}(k-1, N-k)$ , rejeita-se a hipótese  $H_0$  ; caso contrário, aceita-se  $H_0$  .

Nos testes envolvendo a análise de variância temos três amostras (k=3), uma para cada gravímetro. Pretende-se comprovar que os três gravímetros são igualmente confiáveis (hipótese  $H_0$ ). Para se empregar o quadro da ANOVA, foram testadas as duas condições básicas: igualdade de variância das populações e normalidade, que são apresentadas a seguir. O teste de Cochran foi calculado através do programa VARIAN.FOR que se encontra nos ANEXOS.

#### 4.4.3 Teste de igualdade de variâncias

Para se testar a igualdade de variâncias, é preciso considerar o tamanho das amostras envolvidas. Se são apenas duas amostras com tamanhos diferentes, aplica-se a estatística F de Snedecor. Para situações com mais de 2 amostras envolvidas, se as amostras tiverem tamanhos diferentes, aplica-se o teste de Bartlett; se as amostras tiverem tamanhos iguais, emprega-se o teste de Cochran. No nosso caso temos 3 amostras, uma para cada gravímetro. Como o objetivo é estimar-se a confiabilidade dos 3 gravímetros, agrupou-se num bloco as observações gravimétricas para todas as linhas principais e irradiações feitas antes do enchimento do reservatório, gravímetro por gravímetro. O mesmo procedimento foi adotado para as medidas gravimétricas efetuadas após o enchimento do reservatório.

No primeiro caso, são 3 amostras com tamanhos iguais (cada gravímetro foi utilizado em 98 pontos distintos). No segundo caso, as amostras têm tamanhos diferentes, sendo:

- para o G-454 - 92 pontos
- para o G-372 - 92 pontos
- para o G-041 - 31 pontos.

Face ao exposto, foram efetuados 2 testes:

- 1) Teste de Cochran para amostras obtidas antes do enchimento do reservatório;
- 2) Teste de Cochran para amostras obtidas depois do enchimento do reservatório, considerando-se apenas os pontos que dispunham de valores gravimétricos para os 3 gravímetros (31 pontos).

A amostra com tamanhos diferentes (92, 92, 31) deveria ser testada pelo Método de Bartlett. Como o objetivo final é a análise da variância, esta amostra está descaracterizada, ou seja, o número diferente de pontos (31) para o terceiro gravímetro evidencia a ausência de observações para outros pontos, e não a falta de observações para um mesmo ponto. A média das observações para este gravímetro diverge das médias para os outros dois gravímetros, inviabilizando a aplicação do teste para este caso.

#### 4.4.3.1. Teste de Cochran

Para amostras de mesmo tamanho, a comparação das variâncias será feita pelo teste de Cochran. A hipótese  $H_0$  de igualdade das variâncias será testada pela estatística:

$$G = \frac{\max s_i^2}{\sum s_i^2} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (19)$$

Os valores de G se encontram tabelados para os níveis de significância de 1% e 5%. Os argumentos de entrada são o número de amostras (k) e o número de elementos das amostras (n).

A hipótese  $H_0$  será rejeitada se  $G > G_{\alpha}$ , sendo  $G_{\alpha}$  o valor tabelado. A notação usual para o teste de Cochran seria empregar "g" ao invés de "G". Na expressão anterior adotou-se G para não confundir com g que expressa a gravidade.

Os resultados obtidos empregando-se o teste de Cochran foram:

- antes do enchimento do reservatório (n=98)

$$G = 0,3337$$

$$G (\alpha = 5\%) = 0,4343$$

$G (\alpha = 1\%) = 0,4631$ . Como  $G < G_{\alpha}$ , aceita-se a hipótese  $H_0$  de igualdade de variâncias, tanto para  $\alpha=1\%$ , como para  $\alpha=5\%$ .

- depois do enchimento do reservatório (n=31)

$$G = 0,3336$$

$$G (\alpha = 5\%) = 0,49634$$

$G (\alpha = 1\%) = 0,54248$ . Como  $G < G_{\alpha}$ , aceita-se a hipótese  $H_0$ , para os dois níveis de significância.

Nas duas situações, os valores de G tabelados foram obtidos por interpolação.

#### 4.4.4. Avaliação da Normalidade para Análise da Variância

Como foi abordado no item 4.1., a condição de normalidade é fundamental na aplicação de testes estatísticos paramétricos. A avaliação pode ser feita por meio da análise do coeficiente de correlação e gráficos.

As amostras que serão analisadas quanto à sua normalidade correspondem às observações de  $g$  para 98 pontos distintos (antes do enchimento do reservatório) e para 31 pontos distintos (após o enchimento do reservatório). Os resultados podem ser visualizados nos gráficos Q-Q elaborados para avaliação da normalidade. Como os pares  $(z_j, x_j)$  estão distribuídos muito próximos de uma reta, isto evidencia a normalidade.

Foram elaborados gráficos para os três gravímetros, para 98 pontos e 31 pontos. Em todos eles é possível perceber que os pontos se distribuem ao longo de uma reta média, indicando a normalidade aproximada dos dados (vide figuras 14, 15, 16, 17, 18 e 19).

Como a Análise da Variância é um método bastante robusto, considerar-se uma normalidade aproximada para uma amostra não traz maiores consequências.

Figura 14 - Gráfico Q-Q para amostra de 31 pontos, G-041

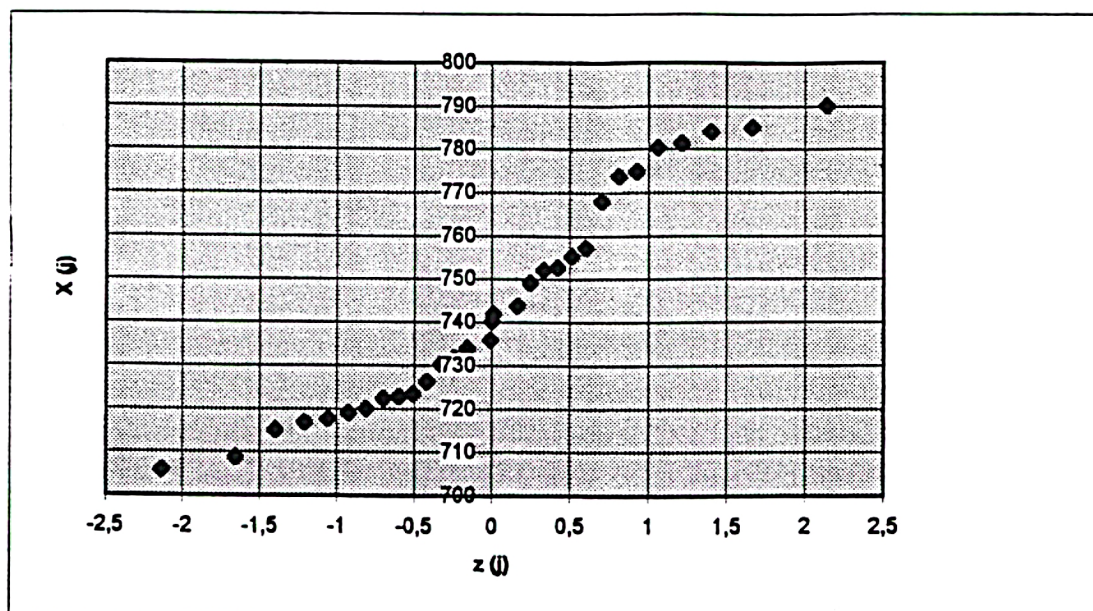




Figura 15 - Gráfico Q-Q para amostra de 31 pontos, G-454

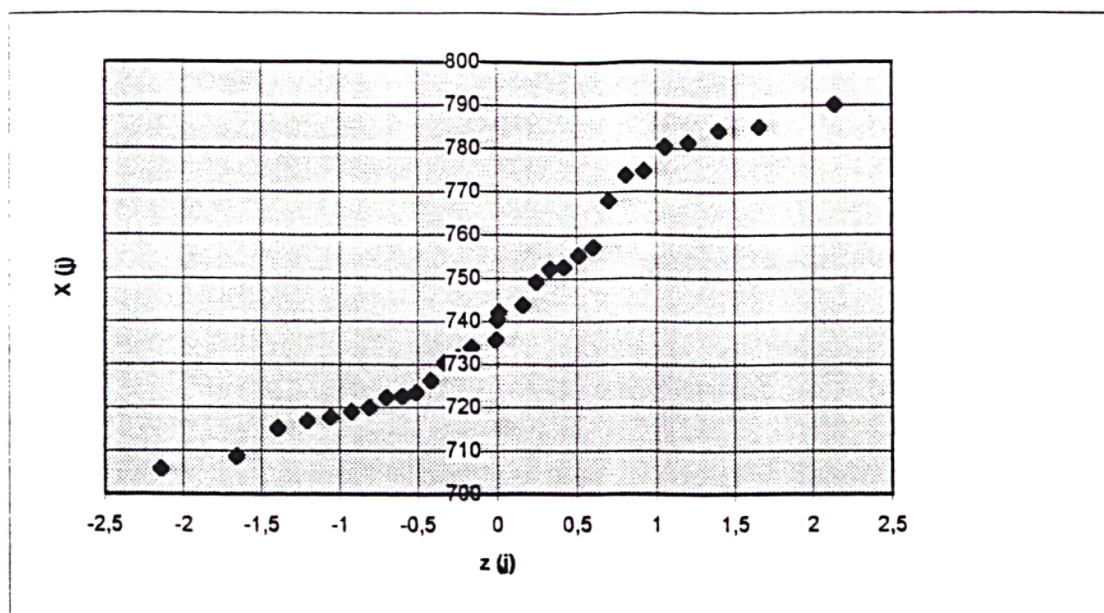


Figura 16 - Gráfico Q-Q para amostra de 31 pontos, G-372

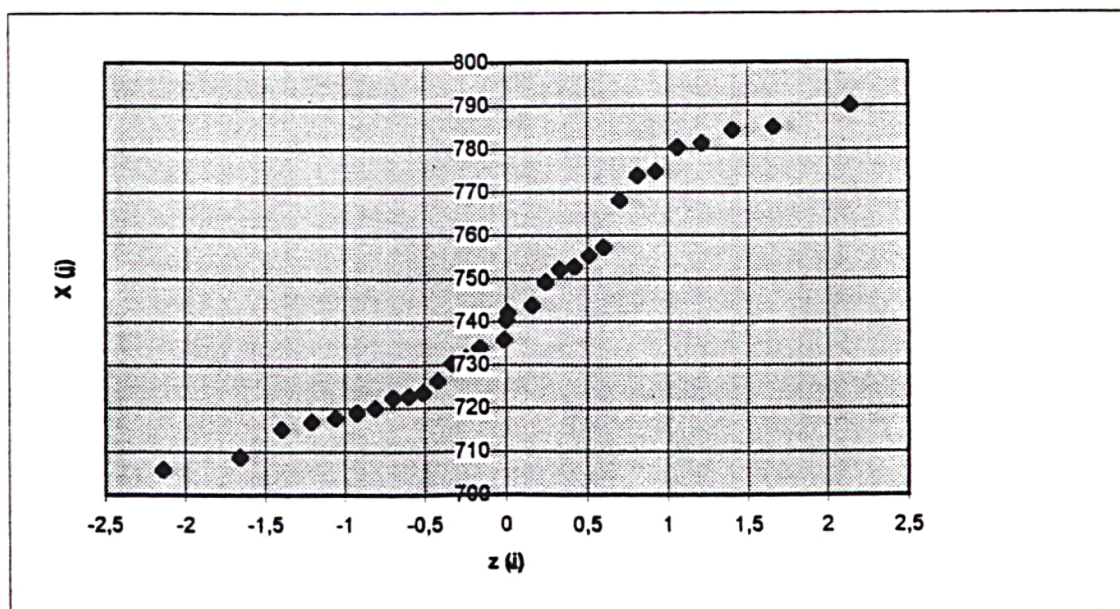




Figura 17 - Gráfico Q-Q para amostra de 98 pontos, G-372

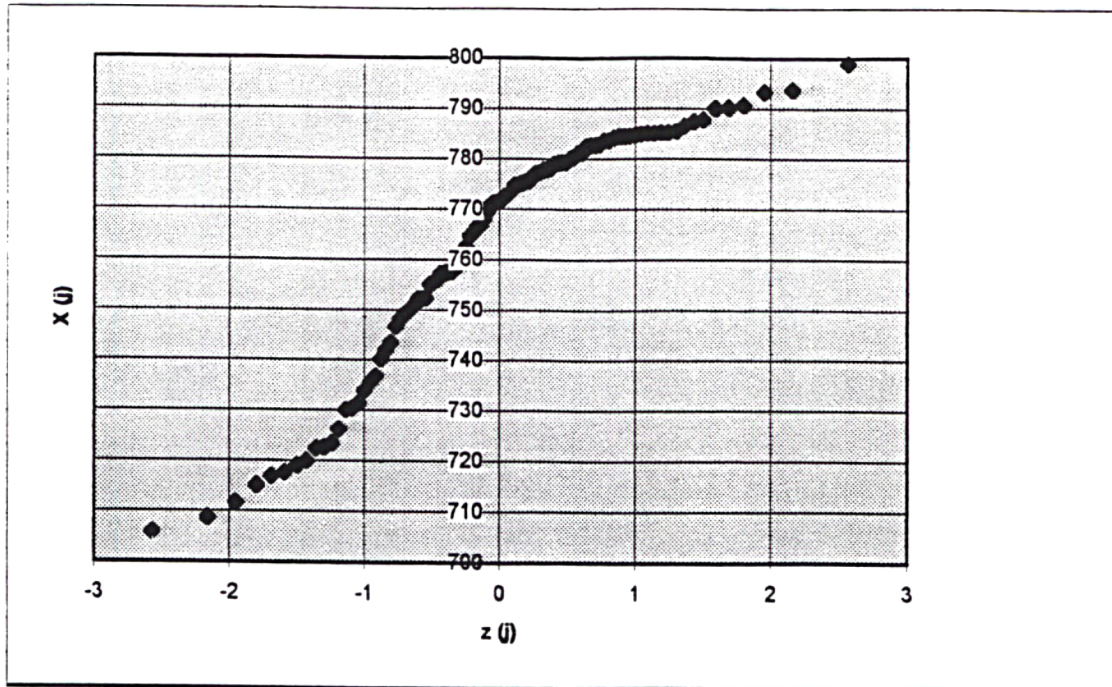


Figura 18 - Gráfico Q-Q para amostra de 98 pontos, G-041

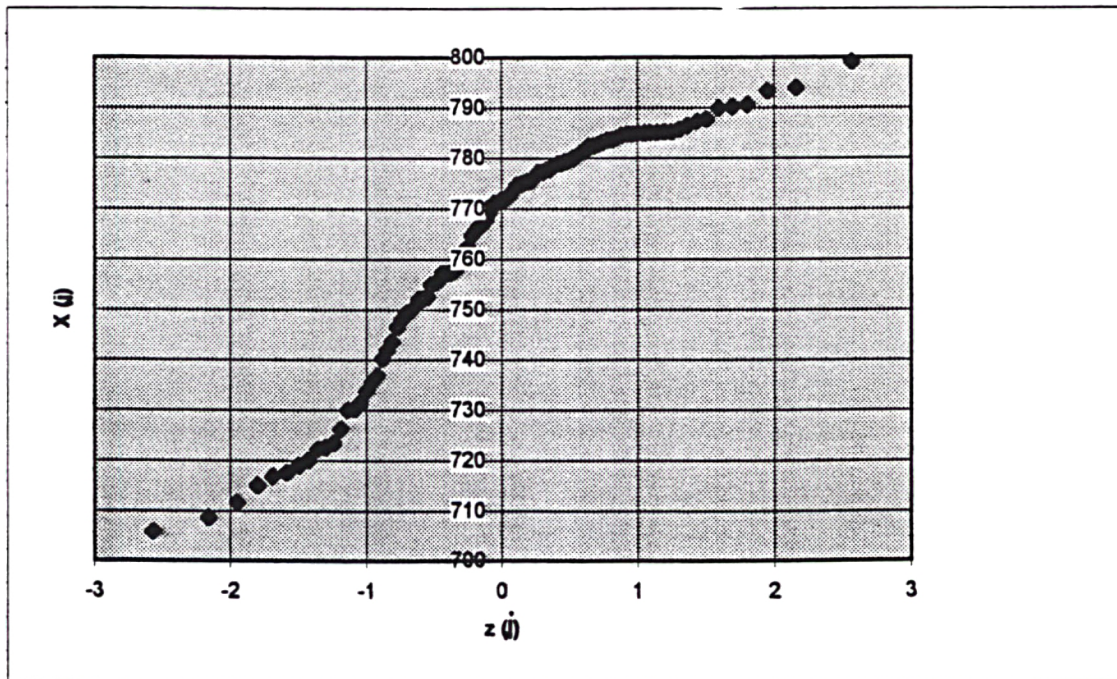
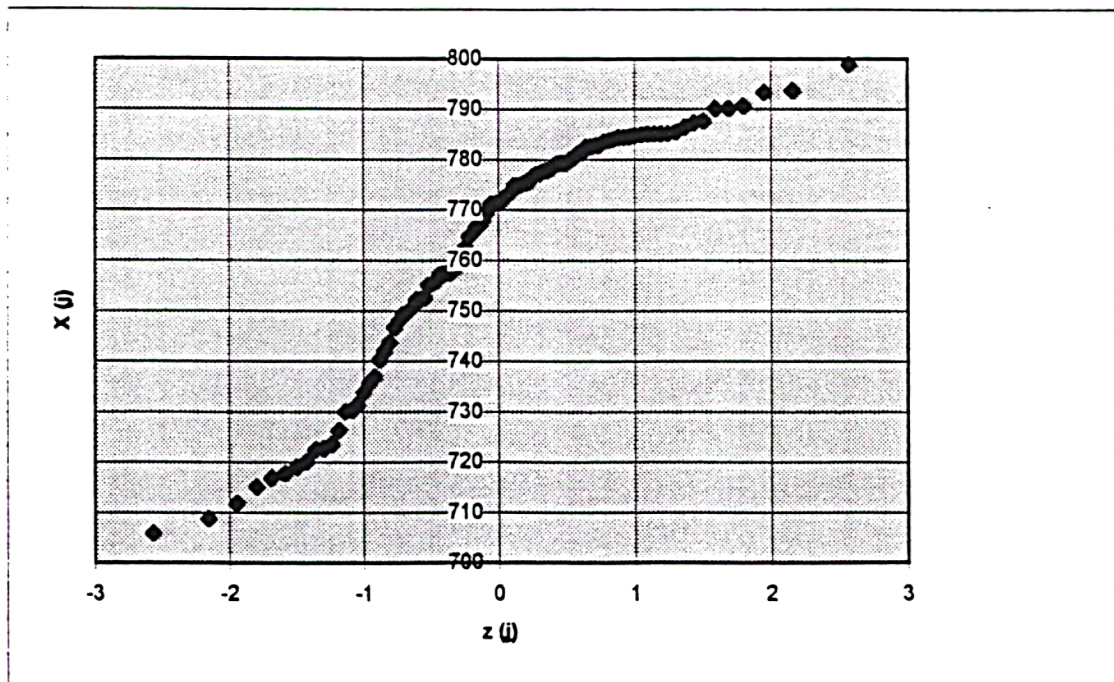


Figura 19 - Gráfico Q-Q para amostra de 98 pontos, G-454



#### 4.4.5 Resultados da Análise da Variância

Os pré-requisitos para a aplicação da análise da variância: confirmação da normalidade das amostras testadas no item 4.4.4 e da igualdade de variâncias analisada no item 4.4.3 foram plenamente satisfeitos.

Sendo assim, os resultados da análise da variância para as amostras de 98 pontos e 31 pontos analisadas, são apresentados no quadro da ANOVA a seguir:

Tabela 4.4.5.1 - para amostra de 31 pontos

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F
Entre Amostras	0,7670008E-02	0,004	0,000006
Residual	0,5813430E-05	645,937	
Total	0,5813431E-05		

Não há diferença significativa entre gravímetros pois o valor tabelado  $F_{tab}=3,0977$  é maior que o valor de F calculado.

Tabela 4.4.5.2 - para amostra de 98 pontos

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F
Entre Amostras	0,1789144E-02	0,009	0,000016
Residual	0,1604842E-05	551,492	
Total	0,1604842E-05		

Não há diferença significativa entre gravímetros, pois o valor tabelado  $F_{tab}=3,0268$  é maior que o valor de F calculado.

Sendo assim, pode-se afirmar que não há diferença entre os gravímetros utilizados nas duas amostras, para um nível de significância de 5%.

Observando-se os resultados obtidos nos dois casos, percebe-se que a Soma dos Quadrados Entre Amostras é bastante pequena, compatível com as médias para cada gravímetro, que também são bastante semelhantes entre si. As médias para as amostras de 31 pontos para os três gravímetros são 978743,9171 mGal, 978743,9356 mGal e 978743,9370 mGal. Já para a amostra de 98 pontos, as médias são 978763,3637 mGal, 978763,3522 mGal e 978763,3712 mGal.

A Soma dos Quadrados Residual (SQR) resultou num valor superior ao da Soma de Quadrados Entre Amostras (SQE), isto em função dos valores para cada amostra apresentarem uma variação razoável entre os próprios elementos da amostra, variação esta bastante superior à das três médias citadas anteriormente. Este fato pode ser elucidado na cópia de saída do programa ANVAR.FOR e que se encontra nos ANEXOS.



## CAPÍTULO V

### ANÁLISE COMPARATIVA DE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E

### GRAVIMETRIA

A análise comparativa dos resultados obtidos com nivelamento geométrico e gravimetria, consistiu na checagem da correlação entre estes resultados, bem como na análise dos gráficos gerados.

#### 5.1 TESTE DE CORRELAÇÃO: NIVEL. GEOMÉTRICO X GRAVIMETRIA

Muitas vezes deseja-se saber se um dado valor de  $r$  associado com o respectivo tamanho da amostra  $n$ , e para um certo nível de significância  $\alpha$ , permite concluir se de fato existe correlação linear entre as variáveis testadas.

No caso em questão, foi efetuado um teste para se avaliar a correlação linear entre os resultados alcançados através do nivelamento geométrico e da gravimetria, considerando-se as amostras referentes às linhas principais e às linhas irradiadas.

O valor de  $r$  é calculado a partir de  $n$  elementos de uma amostra, representando portanto, uma estimativa do verdadeiro coeficiente de correlação populacional  $\rho$  (vide COSTA NETO, 1977).

As hipóteses a serem testadas são:

$$H_0 \quad \rho = 0$$

$$H_1 \quad \rho \neq 0$$

Este teste pode ser efetuado através da expressão:

$$t_{n-2} = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (20)$$

onde tem-se  $(n-2)$  graus de liberdade, sendo  $t_{n-2}$  o valor da estatística  $t$  de Student calculada ( $t(\text{calc.})$ ).

No caso do teste bilateral, os argumentos de entrada para se obter o valor de t de Student tabelado são  $(n-2, \alpha/2)$ .

O coeficiente de correlação r foi calculado através da expressão (3), também empregada na avaliação da normalidade, utilizando-se o programa NORMAL.FOR.

Se o valor  $|t_{n-2}| < t_{tab}$ , aceita-se  $H_0$ .

A tabela 5.1.1 apresenta os resultados do teste empregado.

Tabela 5.1.1 - Análise da Correlação Nivelamento Geométrico x Gravimetria

<b>AMOSTRA ANALISADA</b>	<b>n</b>	<b>valor de r</b>	<b>t (calc.)</b>	<b>t (tab.)</b>	<b>conclusão</b>
Faxinal do Céu	10	0,78880	3,630	2,306	correlação $\neq 0$
Cruz Machado	15	0,52441	2,221	2,160	correlação $\neq 0$
Bituruna	24	0,45189	2,376	2,074	correlação $\neq 0$
Bituruna-Irrad. 01	10	0,64465	2,385	2,306	correlação $\neq 0$
Bituruna-Irrad. 14	7	0,36859	0,887	2,571	correlação = 0
Bituruna-Irrad. 26	7	0,64777	1,901	2,571	correlação = 0
Cruz Machado-Irrad. 04	6	0,81295	2,792	2,776	correlação $\neq 0$
Cruz Machado-Irrad 10	5	0,53903	1,108	3,182	correlação = 0
Cruz Machado-Irrad 19	5	0,38557	0,724	3,182	correlação = 0

Analisando-se a tabela 5.1.1, constata-se que:

- a linha Faxinal do Céu apresentou uma correlação significativa entre os resultados de nivelamento geométrico e gravimetria, pois o valor de t(calc.) é razoavelmente maior que t(tab.).

- as linhas Cruz Machado, Bituruna-Irrad. 01 e Cruz Machado-Irrad. 04 apresentaram correlação entre os resultados obtidos por nivelamento geométrico e gravimetria. Note-se entretanto que os valores de t comparados estão próximos, indicando que a correlação verificada é “pouco intensa”.

- a linha Bituruna apresentou correlação entre os resultados obtidos pelos métodos testados.

- as demais linhas de irradiações (Bituruna-Irrad.14 e 26 e Cruz Machado-Irrad.10 e 19) não apresentaram correlação entre os resultados de nivelamento geométrico e gravimetria. Há que se considerar o fato de que as amostras são pequenas ( $n=5$  e  $n=7$ ).

## 5.2 COMPARAÇÃO DOS GRÁFICOS GERADOS

Neste tópico são apresentados os gráficos dos resultados de nivelamento geométrico e do levantamento gravimétrico. Os gráficos apresentam na ordenada a variação “Delta h” ou “Delta G” para nivelamento geométrico e gravimetria respectivamente, e na abcissa o ponto correspondente (RN). Alguns gráficos de resultados gravimétricos apresentam menos pontos que os de nivelamento geométrico para uma mesma linha analisada. Isto se deve ao fato de algumas RRNN terem sido destruídas.

Vale ressaltar que a análise comparativa consistirá em se analisar os resultados sob o ponto de vista qualitativo, ou seja, as tendências de subsidência, e não o aspecto quantitativo.

Os gráficos para nivelamento geométrico foram gerados novamente para cada linha nivelada, utilizando-se o mesmo procedimento adotado para os gráficos de gravimetria, visando facilitar a comparação. Os valores de “Delta h” são dados em milímetros e os de “Delta G” em microgals.

Comparando-se os diversos gráficos, temos:

•Linha Faxinal do Céu (figuras 20,21,22,23 e 24)- os gráficos para os diversos gravímetros e a média são bastante semelhantes, confirmando a tendência de subsidência também verificada no gráfico com resultados de nivelamento geométrico. É interessante observar que para os dois métodos, o último ponto (RN 16) apresentou subsidência bastante inferior em relação aos pontos imediatamente anteriores. É possível que alguma característica geológica das redondezas do ponto 16 tenha sido a responsável por tal efeito. Os resultados gravimétricos para o gravímetro G-372 foram os que apresentaram maior variação de gravidade. A linha Faxinal do Céu foi a que mais evidenciou a subsidência. A grande semelhança entre os gráficos de nivelamento geométrico

e de gravimetria confirma a correlação evidenciada na comparação dos métodos.

Figura 20 - Linha Faxinal do Céu - Nivelamento Geométrico

2	1.69
3	1.96
4	-2.29
5	-3.75
6	-0.92
7	-2.3
8	-1.72
9	-2.34
10	-4.94
11	-5.62
12	-8.08
13	-9.52
14	-10.78
15	-8.54
16	-1.61

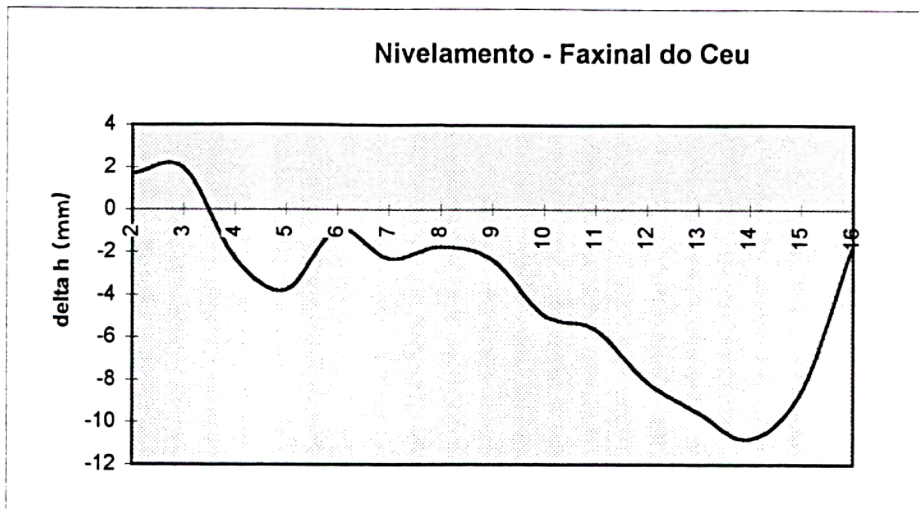


Figura 21 - Linha Faxinal do Céu, G-454, Gravimetria

TABELA

4	37,9
7	15,5
9	-8
10	22,9
11	35,7
12	-39,9
13	-59,7
14	-145
15	-137,3
16	5,5

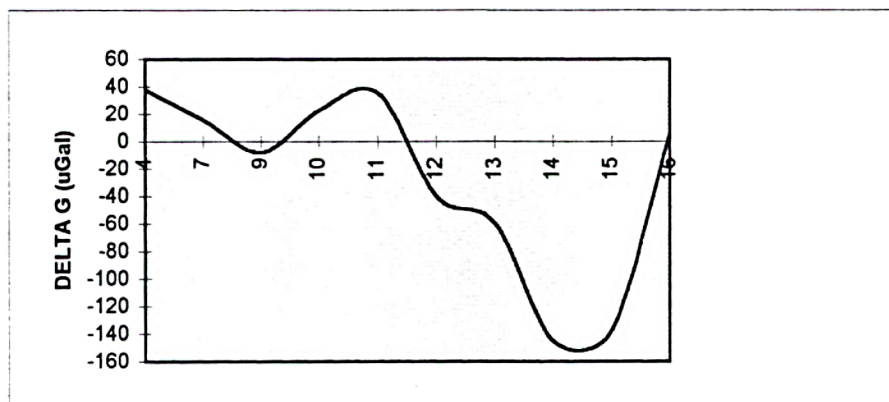


Figura 22 - Linha Faxinal do Céu, G-372, Gravimetria

TABELA

4	-20,1
7	-16
9	-75,1
10	-44,8
11	-75,4
12	-96,9
13	-184,5
14	-328,6
15	-358,3
16	-124,7

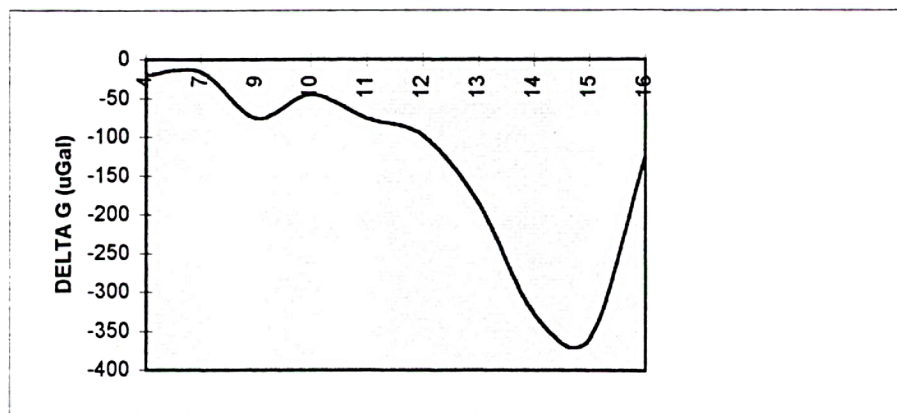


Figura 23 - Linha Faxinal do Céu, G-041, Gravimetria

TABELA

4	48,9
7	-7,7
9	11,3
10	-11,8
11	-70,6
12	-92,7
13	-92,6
14	-168,8
15	-193,5
16	-94,6

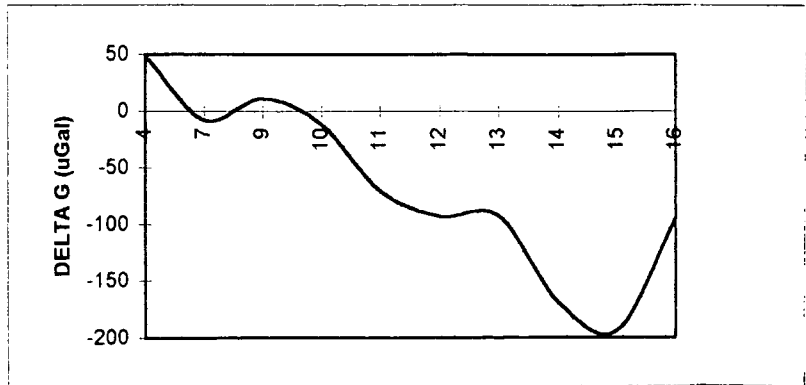
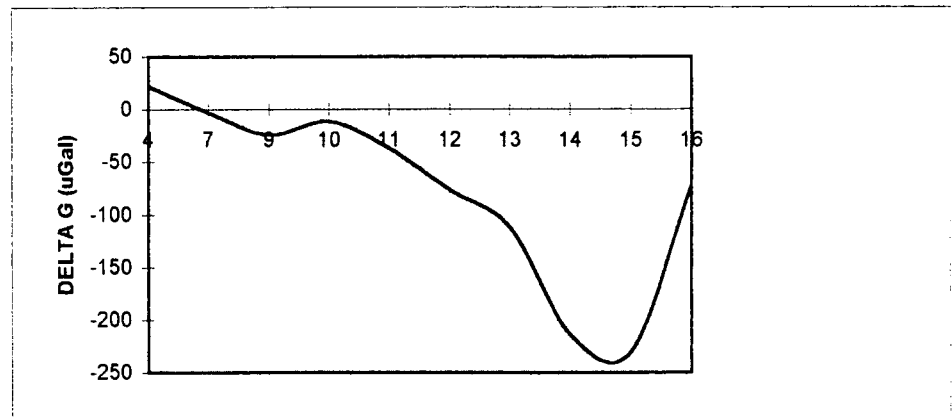


Figura 24 - Linha Faxinal do Céu, Média, Gravimetria

TABELA

4	22,3
7	-2,8
9	-24
10	-11,3
11	-36,8
12	-76,5
13	-112,3
14	-214,1
15	-229,7
16	-71,3



•Linha Cruz Machado (figuras 25,26,27 e 28) - ambos os métodos evidenciam a subsidência, embora no nivelamento geométrico esteja melhor caracterizada. O gravímetro G-454 apresentou indícios mais significativos de subsidência que o G-372.



Figura 25- Linha Cruz Machado - Nivelamento Geométrico

2	1,37
4	-2,48
5	-0,77
7	0,67
8	-2,23
9	-8,78
10	-10,89
11	-11,16
12	-10,94
13	-11,3
14	-11,6
15	-10,51
16	-8,34
17	-9,78
18	-12,77
19	-13,1
20	-11,07

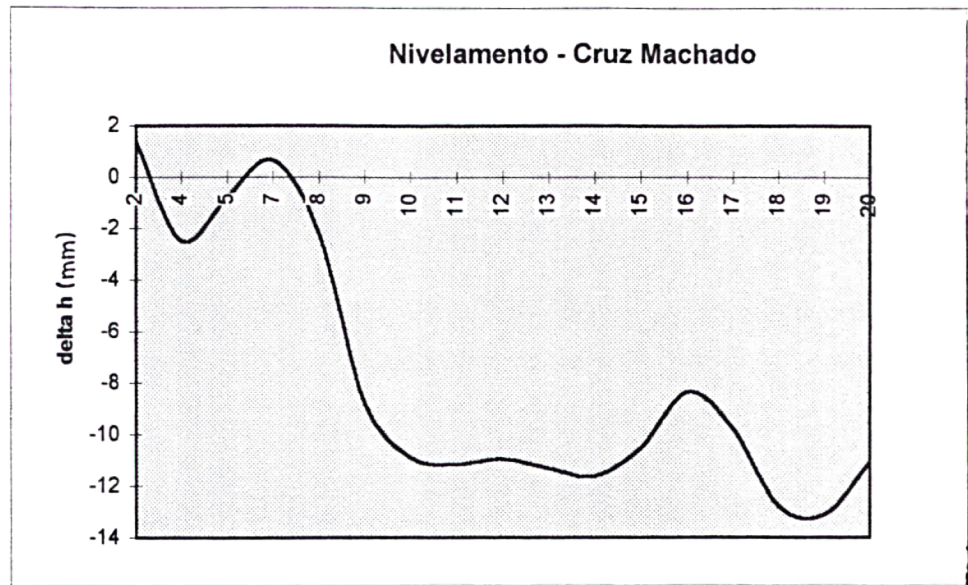


Figura 26 - Linha Cruz Machado, G-454, Gravimetria

TABELA

1	68
2	65,9
3	62,2
4	32,3
5	-83,4
6	94
7	-67,5
9	-60,6
10	-99,4
12	-114,6
13	-116
14	-112,8
15	-114,6
16	-146,8
17	-135
18	-50,7
19	-152,5
20	-185,8

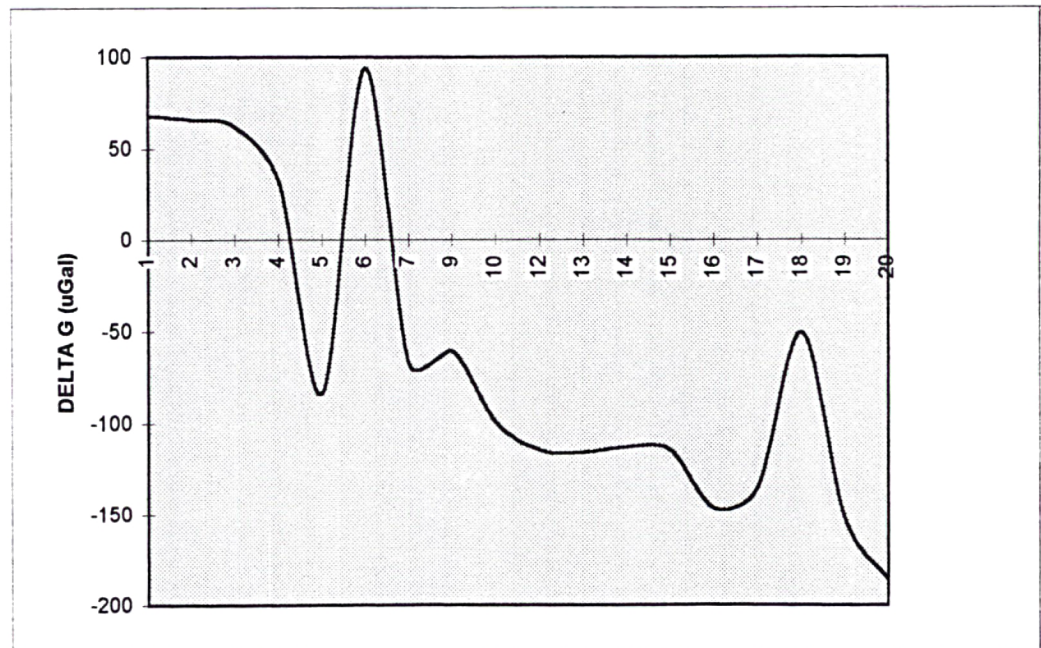


Figura 27 - Linha Cruz Machado, G-372, Gravimetria

TABELA

1	25,1
2	68,1
3	113
4	-1,9
5	49,5
6	169,7
7	24,3
9	23
10	88,1
12	-47,7
13	-77,2
14	-21,9
15	-36,2
16	-84,4
17	-31
18	-45,8
19	-47,9
20	-23,6

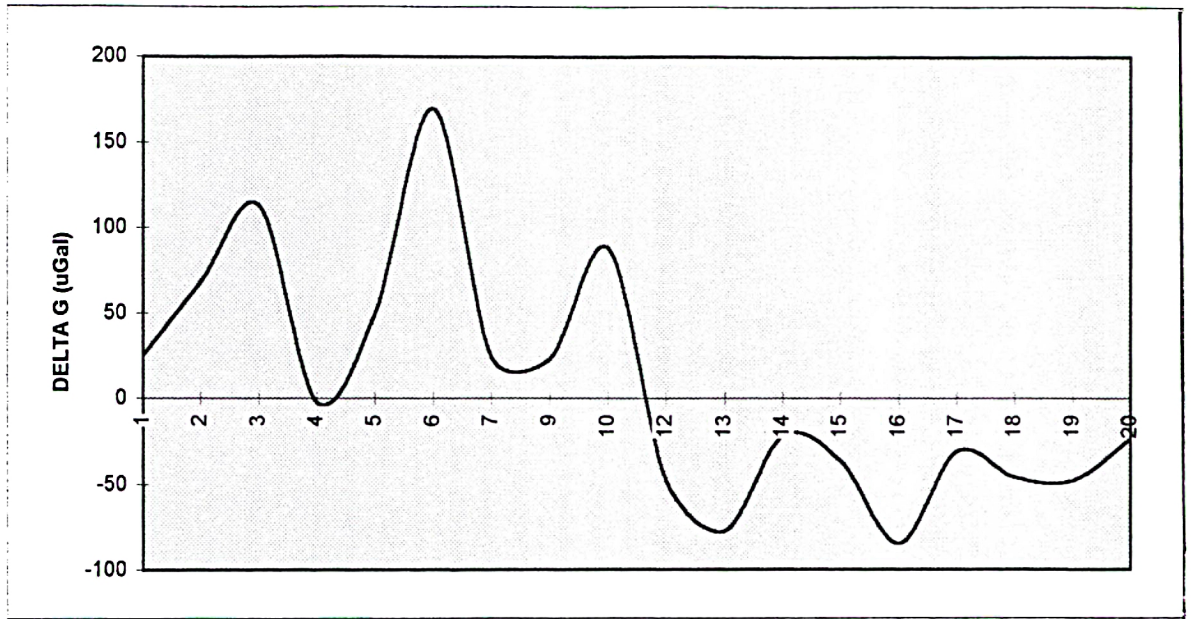
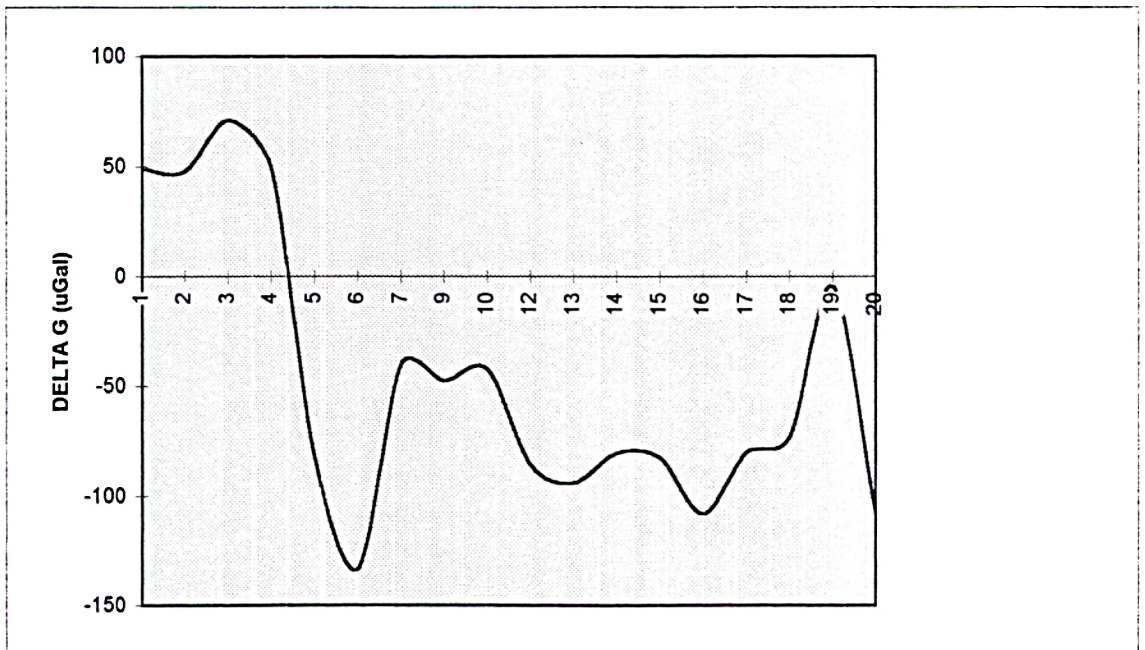


Figura 28 - Linha Cruz Machado, Média, Gravimetria

TABELA

1	48,9
2	47,9
3	71,1
4	49,7
5	-82,1
6	-133,1
7	-40,1
9	-47,6
10	-42,4
12	-85,6
13	-93,8
14	-80,4
15	-82,3
16	-107,9
17	-79,9
18	-73,1
19	-4,6
20	-107,8

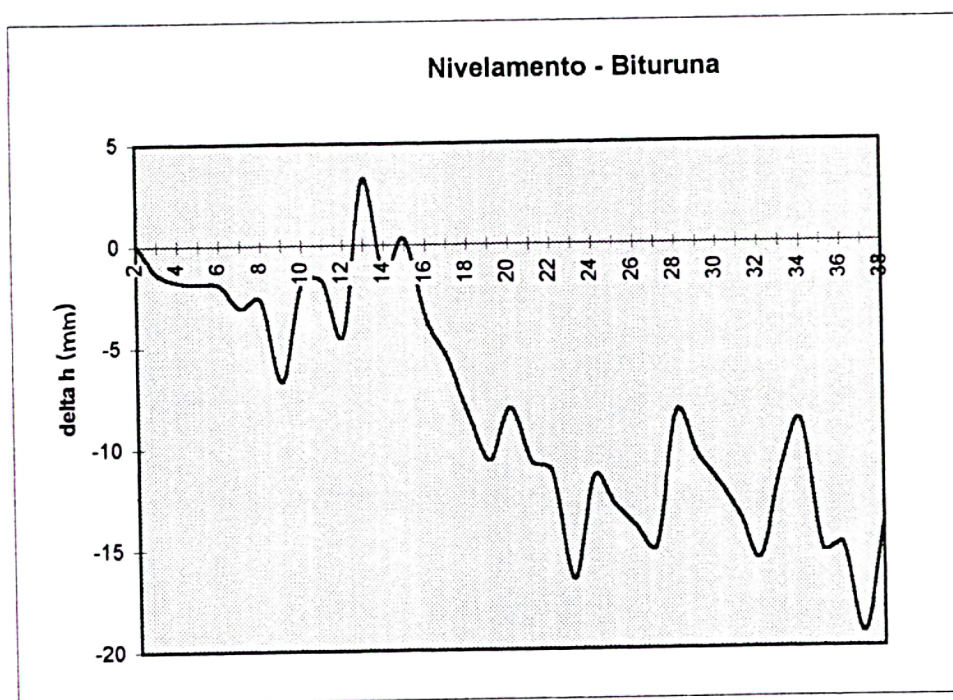




•Linha Bituruna (figuras 29,30,31 e 32)- a tendência de subsidência é mais perceptível no nivelamento geométrico, apresentando um gráfico mais contínuo, sem grandes oscilações. Já o método gravimétrico reflete uma tendência de subsidência para os últimos pontos; para os demais pontos apresenta uma certa estabilidade, com leves oscilações. É interessante notar que a RN 23 e principalmente a RN 32 apresentaram indícios de subsidência mais acentuada em relação aos demais pontos, para ambos os métodos.

Figura 29 - Linha Bituruna - Nivelamento Geométrico

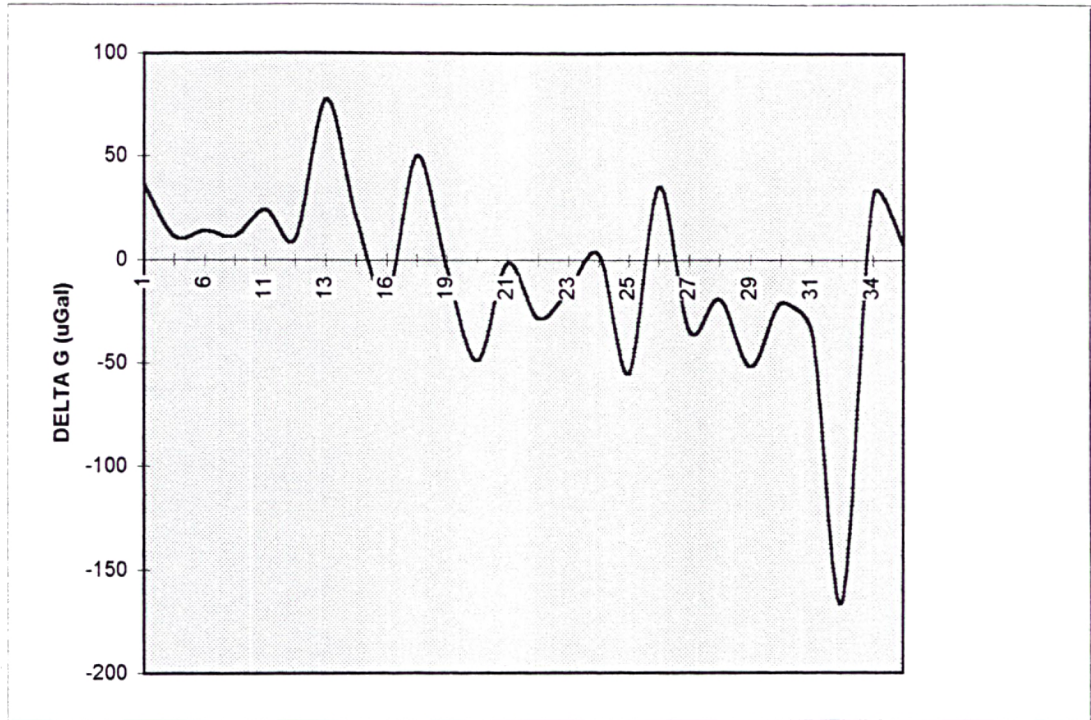
2	0,08
3	-1,35
4	-1,79
5	-1,89
6	-1,94
7	-3,08
8	-2,71
9	-6,68
10	-1,9
11	-1,76
12	-4,42
13	3,26
14	-1,42
15	0,31
16	-3,65
17	-5,59
18	-8,42
19	-10,65
20	-8,07
21	-10,77
22	-11,26
23	-16,56
24	-11,52
25	-12,89
26	-13,99
27	-14,94
28	-8,38
29	-10,47
30	-11,79
31	-13,42
32	-15,55



33	-11,21
34	-8,88
35	-15,12
36	-14,94
37	-19,29
38	-13,86

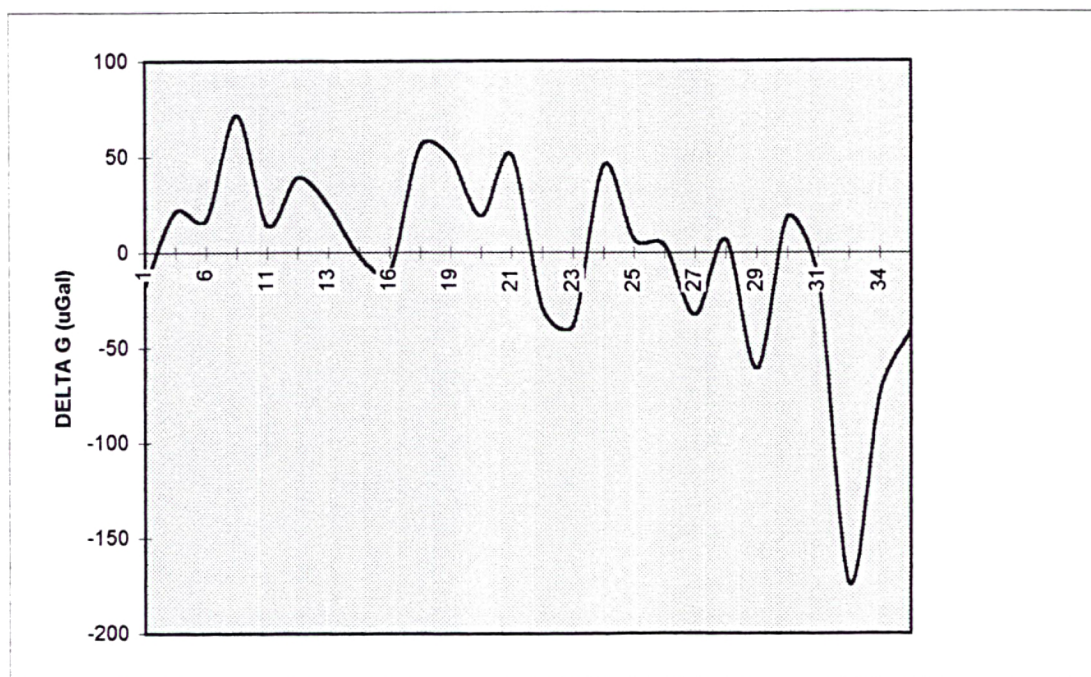
1	36,3
3	11,4
6	14,3
8	11,8
11	24,5
12	10,7
13	77,7
15	20,5
16	-17,4
18	50,5
19	-4
20	-48,6
21	-1,7
22	-28,2
23	-14,1
24	2,5
25	-54,9
26	35,4
27	-34,3
28	-19
29	-51,6
30	-20,7
31	-34,7
33	-166,1
34	31
35	7,4

Figura 30 - Linha Bituruna, G-454, Gravimetria



1	-17,8
3	21,7
6	17,4
8	72
11	14,2
12	39,4
13	24,4
15	-1,8
16	-9
18	55,5
19	50,1
20	19,2
21	51
22	-29,3
23	-37,7
24	45,8
25	7
26	3,9
27	-32,4
28	6,7
29	-60,8
30	18,8
31	-13,9
33	-173,7
34	-73,4
35	-40,7

Figura 31 - Linha Bituruna, G-372, Gravimetria

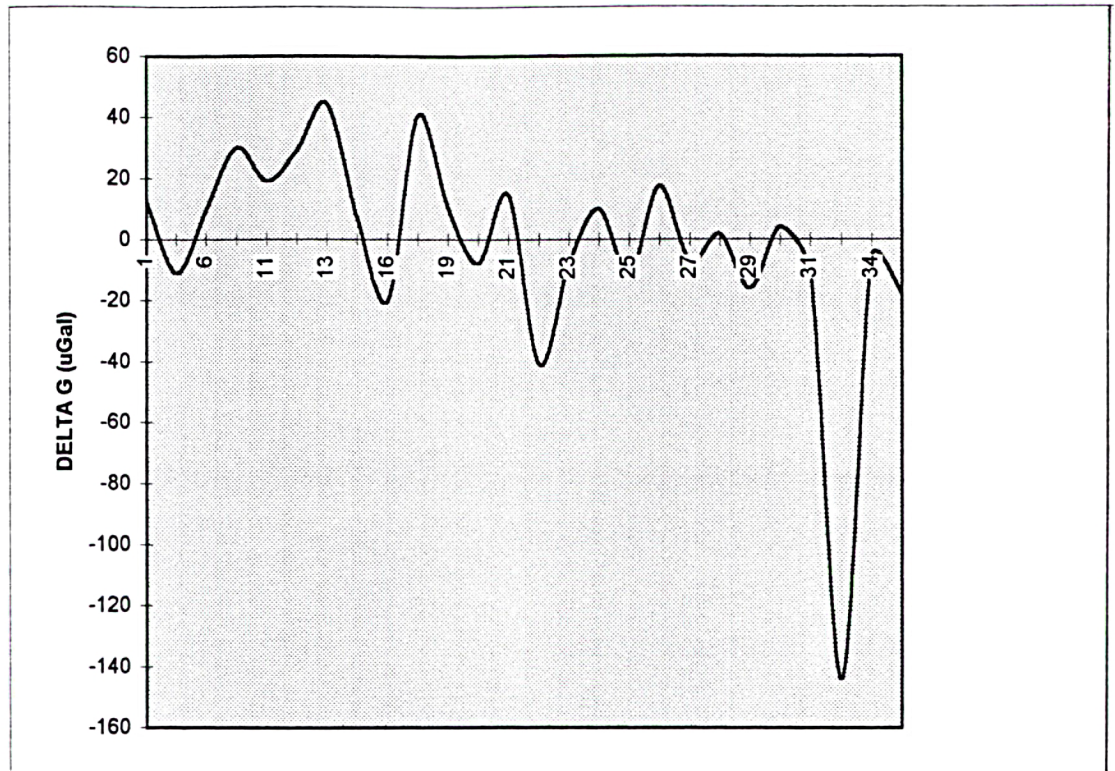




TABELA

Figura 32 - Linha Bituruna, Média, Gravimetria

1	12,5
3	-11
6	9,6
8	30
11	19,1
12	29,2
13	44,4
15	7,2
16	-19,9
18	40,6
19	10,5
20	-7,8
21	14,4
22	-41
23	-7,9
24	10,1
25	-12,1
26	17,4
27	-7,3
28	1,8
29	-16,1
30	4,2
31	-10,6
33	-143,9
34	-5,6
35	-17,9



Para os irradiamentos, os gráficos de gravimetria foram elaborados apenas para a média. As conclusões são as seguintes:

- Bituruna,irradiamento 1 (figuras 33 e 34)- confirma a tendência à subsidência em ambos os métodos, a qual apresenta valores mais expressivos para o nivelamento geométrico. Quanto ao método gravimétrico, não é uma das amostras com grande variação de gravidade.

- Bituruna,irradiamento 14 (figuras 35 e 36)- é mais difícil a comparação pois faltam muitos pontos no gráfico de gravimetria. Para os últimos pontos desta linha, a subsidência é mais notória para o nivelamento geométrico.

- Bituruna, irradiamento 26 (figuras 37 e 38)- o nivelamento geométrico apresenta uma subsidência de aspecto constante ao longo da linha irradiada, que se acentua em direção às extremidades. O método gravimétrico indica subsidência somente para os pontos extremos.

Figura 33 - Linha Bituruna- Irrad. 01 - Nivel. Geométrico

1-1	-13,69
1-2	-13,8
1-3	-11,62
1-4	-6,96
1-5	-5
1-6	-16,54
1-7	-16,76
1-8	-21,2
1-9	-19,31
1-10	-19,59
1-11	-20,65
1-12	-18,67

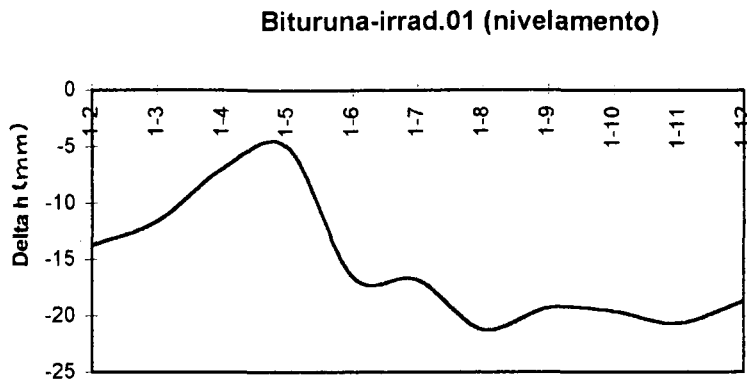


Figura 34 - Linha Bituruna, Irrad.01, Média, Gravimetria

1	9,2
1-1	25,1
1-2	-41,1
1-3	-3,5
1-4	16,8
1-5	-8
1-7	5,4
1-9	-35,4
1-10	-60,9
1-11	-43,2
1-12	-62

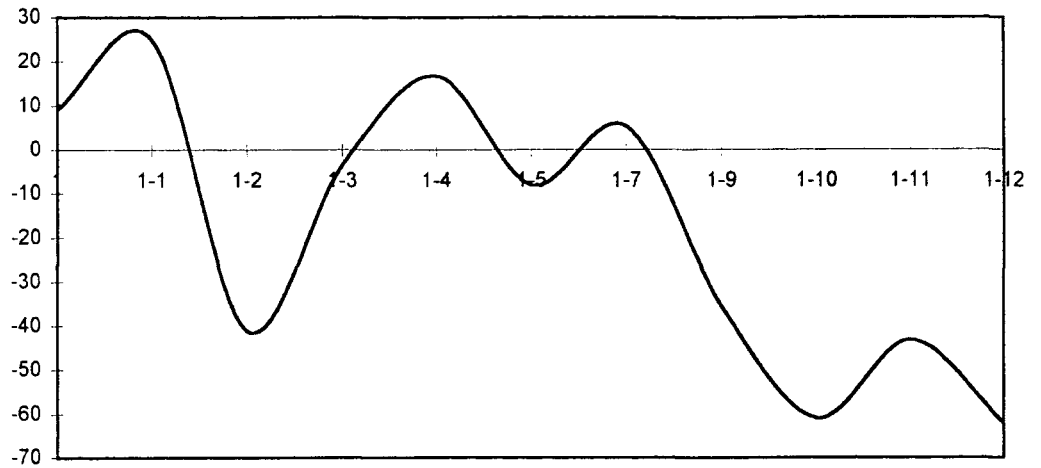


Figura 35 - Linha Bituruna- Irrad.14 - Nivel. Geométrico

14	-1,42
14-1	1,96
14-2	-0,55
14-3	-2,35
14-4	1,36
14-5	-0,68
14-6	-13,44
14-7	-5,37
14-8	-7,72
14-9	-9,1
14-11	-11,58

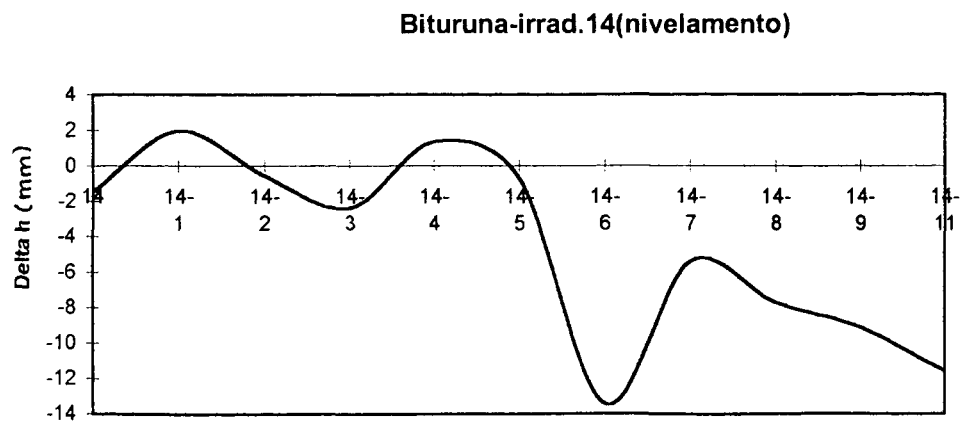


Figura 36 - Linha Bituruna, Irrad.14, Média, Gravimetria

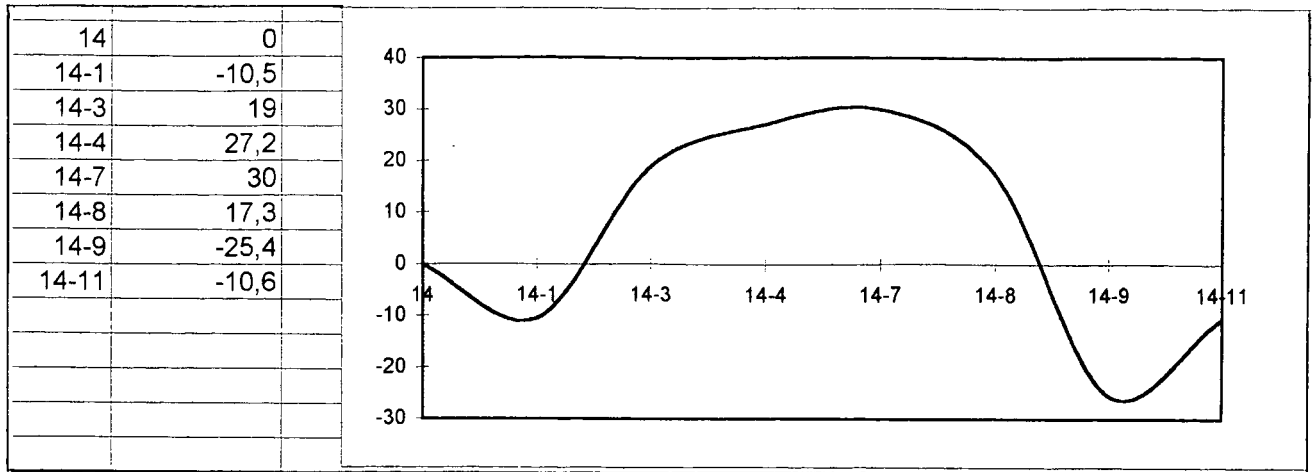


Figura 37 - Linha Bituruna - Irrad.26 - Nivel. Geométrico

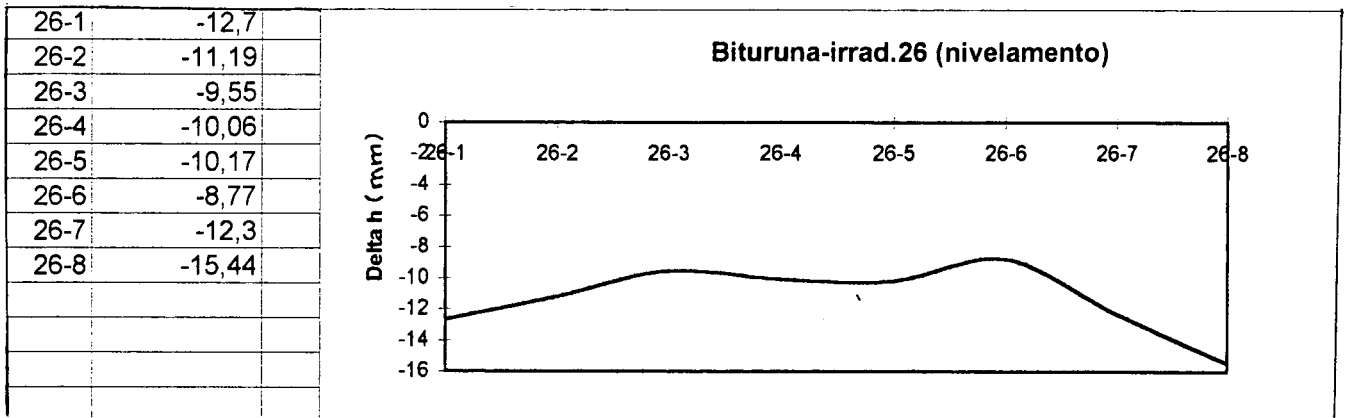
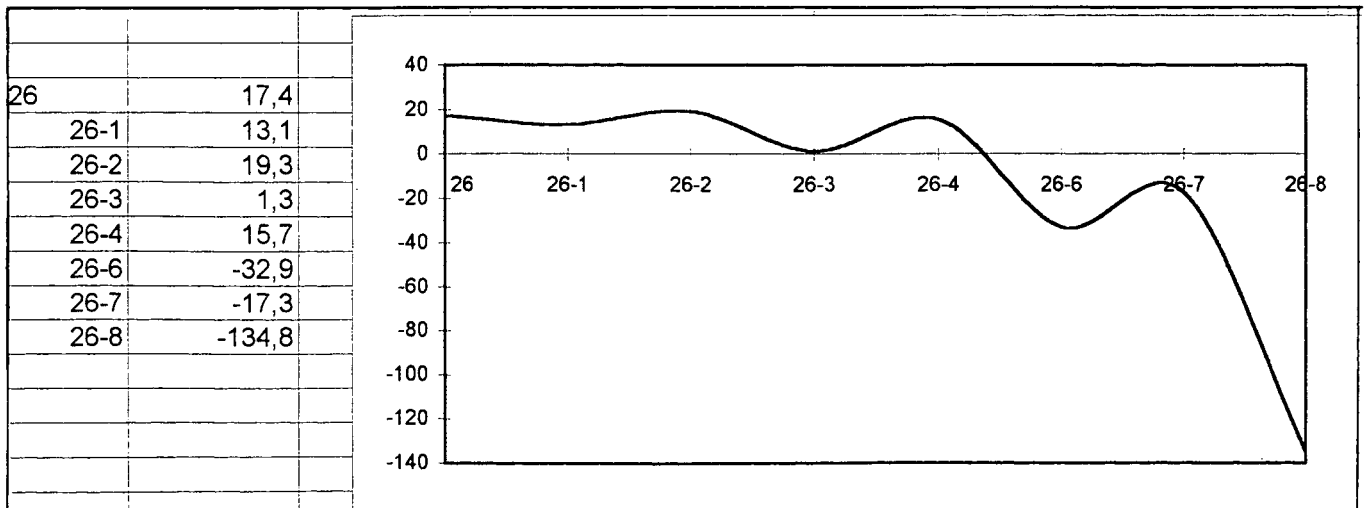


Figura 38 - Linha Bituruna, Irrad 26, Média, Gravimetria



•Cruz Machado,irradiamento 4 (figuras 39 e 40)- os gráficos são semelhantes e revelam uma tendência à subsidência à medida que os pontos se afastam do ponto principal.

•Cruz Machado, irradiamento 10 (figuras 41 e 42)- ambos os métodos indicam subsidência, embora com características diferentes: o nivelamento apresenta uma subsidência praticamente constante ao longo da linha; já no método gravimétrico, a subsidência é crescente, acentuando-se na direção do último ponto.

•Cruz Machado, irradiamento 19 (figuras 43 e 44)- a subsidência é verificada em ambos os métodos, apresentando um aspecto aproximadamente constante ao longo da linha.

Figura 39 - Linha Cruz Machado - Irrad. 04 - Nivel. Geométrico

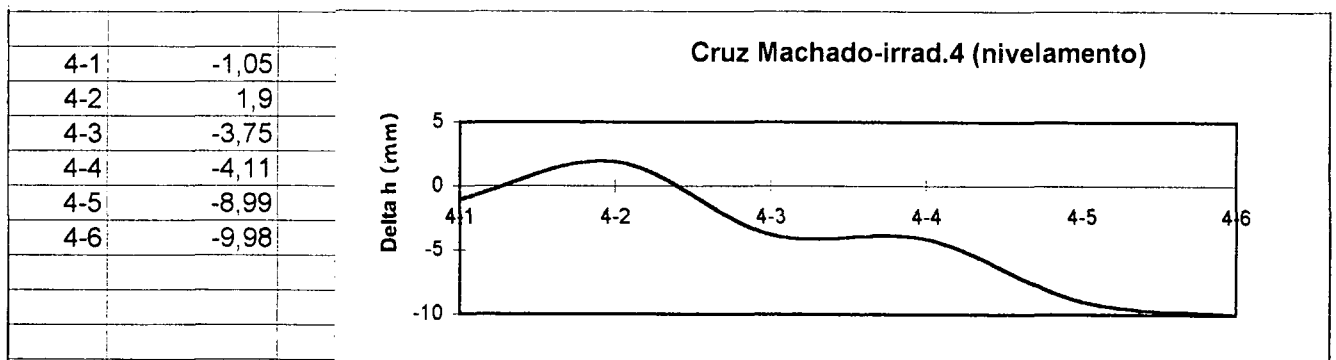


Figura 40 - Linha Cruz Machado, Irrad 04, Média, Gravimetria

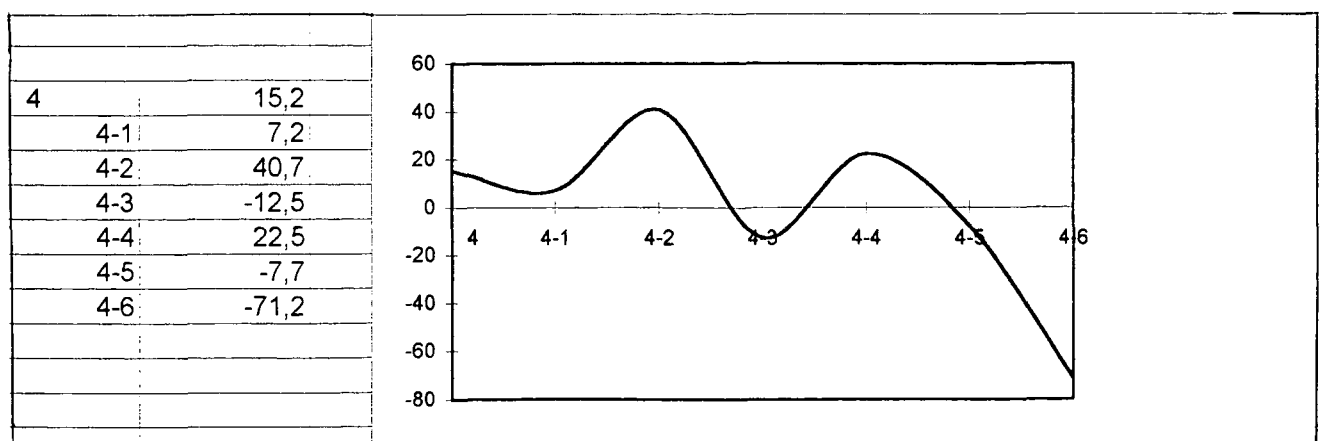




Figura 41 - Linha Cruz Machado - Irrad. 10 - Nivel. Geométrico

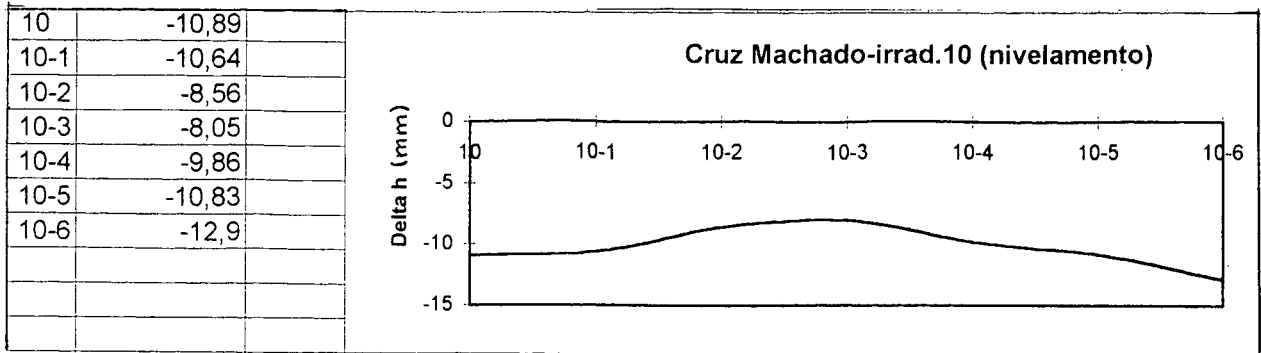


Figura 42 - Linha Cruz Machado, Irrad 10, Média, Gravimetria

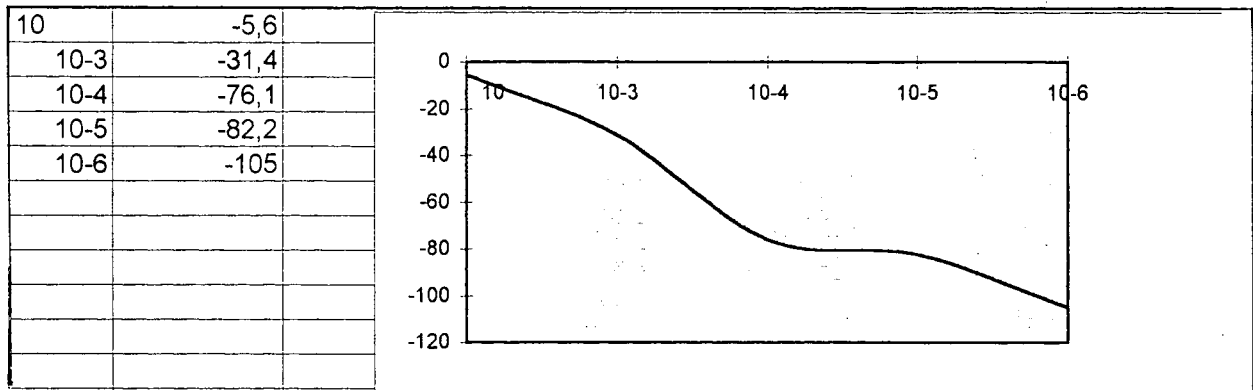


Figura 43 - Linha Cruz Machado - Irrad.19 - Nivel. Geométrico

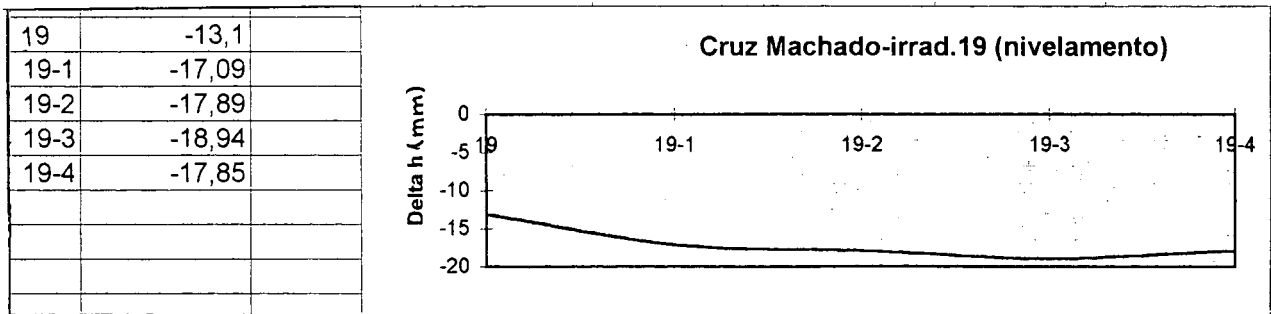
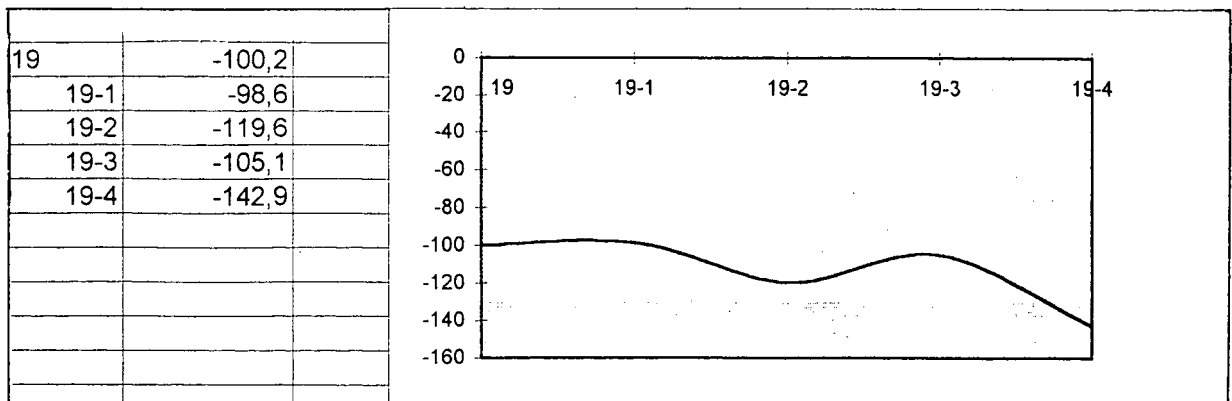


Figura 44 - Linha Cruz Machado, Irrad 19, Média, Gravimetria



Nota-se pela análise dos gráficos, que nos pontos onde a subsidência é menor, podem haver divergências entre os métodos, ainda mais pelo fato da gravidade ser uma força bastante fraca e que varia muito pouco com a altitude. Numa comparação rápida quanto ao comportamento dos gráficos de nivelamento geométrico e de gravimetria tanto para as linhas principais quanto para as linhas irradiadas, a gravimetria confirmou cerca de 75% a 80% dos resultados de nivelamento geométrico.

O que é importante ressaltar é que tanto os gráficos de nivelamento geométrico como os de gravimetria não são contraditórios, mas sempre apresentam uma tendência à subsidência em maior ou menor escala, sendo isto o que se pretendia demonstrar neste estudo.

Em muitos casos, como já foi citado anteriormente, recorre-se ao nivelamento geométrico associado à gravimetria no monitoramento de deslocamentos da crosta terrestre, para se tentar identificar a razão de sua ocorrência, bem como a influência de movimentos de massa no interior da terra, haja vista que as mudanças de gravidade acompanham as mudanças de distribuição de massas. Conforme o objetivo a se atingir, pode-se optar isoladamente por um dos métodos.

DRAGOMIR, 1982, afirma que as técnicas gravimétricas atingiram um nível de desenvolvimento que possibilita equivaler, e em parte substituir algumas técnicas de nivelamento. Apresenta vantagens ao serem empregadas em regiões de grande extensão e com dificuldades topográficas ou condições climáticas adversas.

No nosso caso, os resultados gravimétricos confirmaram as expectativas de subsidência.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O nivelamento geométrico é sem dúvida um método mais consistente que a gravimetria, e que fornece diretamente o valor da altitude ou diferença de altitude, algo que não ocorre no método gravimétrico que fornece apenas medidas da gravidade.

Entretanto, em função do objetivo que se pretende atingir, o método gravimétrico de monitoramento de deslocamentos verticais pode ser uma ferramenta bastante satisfatória, com custo bastante inferior ao nivelamento geométrico e de rápida execução, sendo estas suas principais vantagens, já que o nivelamento geométrico é demorado e de custo elevado. É evidente que para ambos os métodos as RRNN devem estar implantadas no campo.

A densidade de pontos medidos, bem como a necessidade das estações de observação serem bem monumentadas, são fatores importantes para garantir o monitoramento dos deslocamentos em estudo.

O intervalo de tempo entre as épocas de medição é função das mudanças esperadas e da precisão requerida, e também do histórico de estabilidade da região.

No uso do método gravimétrico, é preciso que se tenha consciência do tipo de magnitude dos erros presentes nas determinações gravimétricas para que sejam efetivamente corrigidos, para não comprometer os resultados. A calibração de gravímetros, que tem sido negligenciada no Brasil e que atualmente é possível com a RENECA - Rede Nacional de Estações Gravimétricas Absolutas, deve ser efetuada não só para se determinar os coeficientes de transformação das leituras, mas também para garantir a qualidade das leituras.

Sugere-se também o estabelecimento de redes gravimétricas de precisão em regiões aparentemente instáveis, e repetição periódica das medidas, pois os movimentos detectados podem perdurar por anos, e inclusive aumentar de intensidade.

Recomenda-se rigor no uso dos testes estatísticos, avaliando-se os pressupostos básicos de emprego de cada método, como é o caso da normalidade das amostras, para se ter maior confiabilidade na análise dos resultados.

Os testes estatísticos efetuados para as amostras gravimétricas, segundo um nível de significância adotado, apresentaram subsidência na maioria deles, mesmo que as variações de gravidade observadas estejam próximas dos erros instrumentais.

O monitoramento de deslocamentos ou deformações verticais induzidos pelo enchimento de reservatórios de usinas hidrelétricas, é de fundamental importância para se promover um controle de sismicidade de uma determinada região, ou mesmo compreender o comportamento da crosta terrestre em função de alterações feitas na natureza pelo homem.

No geral, as amostras analisadas tanto para nivelamento geométrico como para gravimetria apresentaram subsidência, sendo a mesma mais evidente à medida que o ponto analisado se situa mais próximo do reservatório.

## **ANEXOS**

PROGRAMA NORMAL.

PROGRAMA EMPARE.FOR

TABELA PARA TESTE DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (FILLIBEN)

PROGRAMA VARIAN.

TÁBUA G

PROGRAMA ANVAR.

SAÍDA DO PROGRAMA ANVAR.FOR

# PROGRAMA NORMAL.FOR

C ESTE PROGRAMA CALCULA A NORMALIDADE

C DEFINICAO DAS VARIAVEIS

C DELTAG - VARIACAO DA GRAVIDADE

C N - NUMERO DE PONTOS

C Z - ESTATISTICA Z

C CORREL - COEFICIENTE DE CORRELACAO

C VALORES DE DELTAG EM uGAL

\$DEBUG

IMPLICIT REAL \*8(A-H,O-Z)

DIMENSION DELTAG(30),Z(30)

OPEN (5,FILE='NORMA.DAT',STATUS='OLD',FORM='FORMATTED')

OPEN (6,FILE='COEF.DAT',STATUS='NEW',FORM='FORMATTED')

READ (5,\*) N

C LEITURA DOS VALORES ORDENADOS DE DELTAG E Z CORRESPONDENTES

DO 100 I=1,N

READ (5,\*) DELTAG(I),Z(I)

100 CONTINUE

C DEFINICAO DE VALORES NULOS INICIAIS

SDELTAG=0

SOMZ=0

SPROD=0

SDELQ=0

SZQUAD=0

C CALCULO DE VALORES INTERMEDIARIOS

DO 200 I=1,N

SDELTAG=SDELTAG+DELTAG(I)

SOMZ=SOMZ+Z(I)

SPROD=SPROD+(DELTAG(I)\*Z(I))

SDELQ=SDELQ+(DELTAG(I)\*\*2)

SZQUAD=SZQUAD+(Z(I)\*\*2)

200 CONTINUE

C CALCULO DE CORREL

A=N\*SPROD

B=SDELTAG\*SOMZ

C=(N\*SDELQ)-(SDELTAG\*\*2)

D=(N\*SZQUAD)-(SOMZ\*\*2)

E=A-B

F=SQRT(C\*D)

CORREL=E/F

WRITE (6,05) A,B,C

05 FORMAT(5X,'A= ',F10.4/,5X,'B= ',F10.4/,5X,'C= ',F10.4)

WRITE (6,15) D,E,F

15 FORMAT(5X,'D= ',F10.4/,5X,'E= ',F10.4/,5X,'F= ',F10.4)

WRITE (6,10) CORREL

10 FORMAT(/,5X,'COEFICIENTE DE CORRELACAO = ',2X,F7.5)

END

C \*\*\*\*\*

|||||

## PROGRAMA EMPARE.FOR

- \* Programa para dados emparelhados \*
- \* Este programa realiza o teste de hipotese para dados emparelhados\*
- \* utilizando a distribuicao t de Student \*

- C Definicao das variaveis
- C GANT -valor medio da gravidade antes do enchimento do reservatorio
- C GDEP -valor medio da gravidade depois do enchimento do reservat.
- C IN -numero da RN
- C N -numero de pontos (RRNN)
- C DELTAG -variacao da gravidade
- C SDELTA -somatorio dos DELTAG
- C SDELQ -somatorio dos quadrados de DELTAG
- C SDD -variancia
- C SD -desvio padrao da amostra de diferencas deltag
- C DELTGM -valor medio de DELTAG
- C VTEST -valor testado da media das diferencas das populacoes
- C T -t experimental
- C TTABEL -valor de t tabelado
- C XNIVEL - nivel de significancia
- C Se J=1 - xnivel=1% J=2 - xnivel=2,5% J=3 - xnivel=5%
- C J=4 - xnivel=10%
- C O valor de K corresponde aos graus de liberdade (K=N-1)

### \$DEBUG

- ```
IMPLICIT REAL *8(A-H,O-Z)
DIMENSION GANT(10),GDEP(10),DELTAG(10),TTAB(25,4)

OPEN(5,FILE='DADO.DAT',STATUS='OLD',FORM='FORMATTED')
OPEN(6,FILE='RESUL.DAT',STATUS='NEW',FORM='FORMATTED')

WRITE(6,20)
20 FORMAT(50('**'),/,**',3X,'LINHA : FAXINAL DO CEU'.23X,'**',/,50('**')
$J3X,'RN',3X,'GANT (mGal)',3X,'GDEP (mGal)',3X,'DELTAG(uGal)')

READ(5,*) N

C Leitura dos valores da tabela t de Student,para niveis de signifi-
C cancia de 1%, 2,5%, 5% e 10%, a partir de 7 graus de liberdade.
DO 40 K=7,31
    READ(5,*) TTAB(K,1),TTAB(K,2),TTAB(K,3),TTAB(K,4)
40 CONTINUE

C Leitura dos valores medios de g antes e depois do enchimento do
C reservatorio e calculo das diferencas de gravidade e sua transfor-
C macao de mGal para uGal.

DO 100 I=1,N
    READ(5,*) IN,GANT(I), GDEP(I)
    DELTAG(I)= GANT(I) - GDEP(I)
    DELTAG(I)= DELTAG(I)*1000.D0
    WRITE(6,50) IN,GANT(I),GDEP(I),DELTAG(I)
50 FORMAT (3X,I2,3X,F11.4,3X,F11.4,6X,F7.1)
100 CONTINUE

C Calculo de valores intermediarios
DO 200 I=1,N
    SDELTA= SDELTA + DELTAG(I)
    SDELQ= SDELQ +(DELTAG(I)**2)
200 CONTINUE

C Calculo de DELTAG medio
DELTGM=SDELTA/N

C Calculo do desvio padrao
SDD=(SDELQ-(SDELTA**2)/N)/(N-1)
SD=DSQRT(SDD)
```

```

C   Calculo do t de Student experimental
VTEST=0.D0
R=FLOAT(N)
TDEN=SD/SQRT(R)
T=(DELTM-VTEST)/TDEN
C   Definicao de TTAB
K=N-1

DO 250 J=1,4
WRITE(6,230)
230 FORMAT(/,3X,'t(calc)',3X,'ttabel',3X,'n.signif.')
IF (J.EQ.1) THEN
XNIVEL=0.01D0
ELSE
IF (J.EQ.2) THEN
XNIVEL=0.025D0
ELSE
IF (J.EQ.3) THEN
XNIVEL=0.05D0
ELSE
XNIVEL=0.10D0
ENDIF
ENDIF
ENDIF
TTABEL=TTAB(K,J)
WRITE(6,300)T,TTABEL,XNIVEL
300 FORMAT(3X,F7.3,2X,F6.2,5X,F5.3)

C   TESTE DE REJEICAO
C   H0 : GANT - GDEP=0
C   H1 : GANT - GDEP<0

IF (T.LT.(-1.D0*TTABEL)) THEN
WRITE(6,*) ' REJEITA-SE H0, sendo H1:GANT -GDEP<0 '
ELSE
WRITE(6,*) ' ACEITA-SE H0, sendo H0:GANT-GDEP=0 '
ENDIF
250 CONTINUE
END

```



TABELA PARA TESTE DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (FILLIBEN)

| n   | Level |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|     | .000  | .005 | .01  | .025 | .05  | .10  | .25  | .50  | .75  | .90  | .95   | .975  | .99   | .995  |
| 3   | .866  | .867 | .869 | .872 | .879 | .891 | .924 | .966 | .991 | .999 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 4   | .784  | .813 | .822 | .845 | .868 | .894 | .931 | .958 | .979 | .992 | .996  | .998  | .999  | 1.000 |
| 5   | .726  | .803 | .822 | .855 | .879 | .902 | .935 | .960 | .977 | .988 | .992  | .995  | .997  | .998  |
| 6   | .683  | .818 | .835 | .868 | .890 | .911 | .940 | .962 | .977 | .986 | .990  | .993  | .996  | .997  |
| 7   | .648  | .828 | .847 | .876 | .899 | .916 | .944 | .965 | .978 | .986 | .990  | .992  | .995  | .996  |
| 8   | .619  | .841 | .859 | .886 | .905 | .924 | .948 | .967 | .979 | .986 | .990  | .992  | .995  | .996  |
| 9   | .595  | .851 | .868 | .893 | .912 | .929 | .951 | .968 | .980 | .987 | .990  | .992  | .994  | .995  |
| 10  | .574  | .860 | .876 | .900 | .917 | .934 | .954 | .970 | .981 | .987 | .990  | .992  | .994  | .995  |
| 11  | .556  | .868 | .883 | .906 | .922 | .938 | .957 | .972 | .982 | .988 | .990  | .992  | .994  | .995  |
| 12  | .539  | .875 | .889 | .912 | .926 | .941 | .959 | .973 | .982 | .988 | .990  | .992  | .994  | .995  |
| 13  | .525  | .882 | .895 | .917 | .931 | .944 | .962 | .975 | .983 | .988 | .991  | .993  | .994  | .995  |
| 14  | .512  | .888 | .901 | .921 | .934 | .947 | .964 | .976 | .984 | .989 | .991  | .993  | .994  | .995  |
| 15  | .500  | .894 | .907 | .925 | .937 | .950 | .965 | .977 | .984 | .989 | .991  | .993  | .994  | .995  |
| 16  | .489  | .899 | .912 | .928 | .940 | .952 | .967 | .978 | .985 | .989 | .991  | .993  | .994  | .995  |
| 17  | .478  | .903 | .916 | .931 | .942 | .954 | .968 | .979 | .986 | .990 | .992  | .993  | .994  | .995  |
| 18  | .469  | .907 | .919 | .934 | .945 | .956 | .969 | .979 | .986 | .990 | .992  | .993  | .995  | .995  |
| 19  | .460  | .909 | .923 | .937 | .947 | .958 | .971 | .980 | .987 | .990 | .992  | .993  | .995  | .995  |
| 20  | .452  | .912 | .925 | .939 | .950 | .960 | .972 | .981 | .987 | .991 | .992  | .994  | .995  | .995  |
| 21  | .445  | .914 | .928 | .942 | .952 | .961 | .973 | .981 | .987 | .991 | .993  | .994  | .995  | .996  |
| 22  | .437  | .918 | .930 | .944 | .954 | .962 | .974 | .982 | .988 | .991 | .993  | .994  | .995  | .996  |
| 23  | .431  | .922 | .933 | .947 | .955 | .964 | .975 | .983 | .988 | .991 | .993  | .994  | .995  | .996  |
| 24  | .424  | .926 | .936 | .949 | .957 | .965 | .975 | .983 | .988 | .992 | .993  | .994  | .995  | .996  |
| 25  | .418  | .928 | .937 | .950 | .958 | .966 | .976 | .984 | .989 | .992 | .993  | .994  | .995  | .996  |
| 26  | .412  | .930 | .939 | .952 | .959 | .967 | .977 | .984 | .989 | .992 | .993  | .994  | .995  | .996  |
| 27  | .407  | .932 | .941 | .953 | .960 | .968 | .977 | .984 | .989 | .992 | .994  | .995  | .995  | .996  |
| 28  | .402  | .934 | .943 | .955 | .962 | .969 | .978 | .985 | .990 | .992 | .994  | .995  | .995  | .996  |
| 29  | .397  | .937 | .945 | .956 | .962 | .969 | .979 | .985 | .990 | .992 | .994  | .995  | .995  | .996  |
| 30  | .392  | .938 | .947 | .957 | .964 | .970 | .979 | .986 | .990 | .993 | .994  | .995  | .996  | .996  |
| 31  | .388  | .939 | .948 | .958 | .965 | .971 | .980 | .986 | .990 | .993 | .994  | .995  | .996  | .996  |
| 32  | .383  | .939 | .949 | .959 | .966 | .972 | .980 | .986 | .990 | .993 | .994  | .995  | .996  | .996  |
| 33  | .379  | .940 | .950 | .960 | .967 | .973 | .981 | .987 | .991 | .993 | .994  | .995  | .996  | .996  |
| 34  | .375  | .941 | .951 | .960 | .967 | .973 | .981 | .987 | .991 | .993 | .994  | .995  | .996  | .996  |
| 35  | .371  | .943 | .952 | .961 | .968 | .974 | .982 | .987 | .991 | .993 | .995  | .995  | .996  | .997  |
| 36  | .367  | .945 | .953 | .962 | .968 | .974 | .982 | .987 | .991 | .994 | .995  | .996  | .996  | .997  |
| 37  | .364  | .947 | .955 | .962 | .969 | .975 | .982 | .988 | .991 | .994 | .995  | .996  | .996  | .997  |
| 38  | .360  | .948 | .956 | .964 | .970 | .976 | .983 | .988 | .992 | .994 | .995  | .996  | .996  | .997  |
| 39  | .357  | .949 | .957 | .965 | .971 | .976 | .983 | .988 | .992 | .994 | .995  | .996  | .996  | .997  |
| 40  | .354  | .949 | .958 | .966 | .972 | .977 | .983 | .988 | .992 | .994 | .995  | .996  | .996  | .997  |
| 41  | .351  | .950 | .958 | .967 | .972 | .977 | .984 | .989 | .992 | .994 | .995  | .996  | .996  | .997  |
| 42  | .348  | .951 | .959 | .967 | .973 | .978 | .984 | .989 | .992 | .994 | .995  | .996  | .996  | .997  |
| 43  | .345  | .953 | .959 | .967 | .973 | .978 | .984 | .989 | .992 | .994 | .995  | .996  | .996  | .997  |
| 44  | .342  | .954 | .960 | .968 | .973 | .978 | .984 | .989 | .992 | .994 | .995  | .996  | .996  | .997  |
| 45  | .339  | .955 | .961 | .969 | .974 | .978 | .985 | .989 | .993 | .994 | .995  | .996  | .996  | .997  |
| 46  | .336  | .956 | .962 | .969 | .974 | .979 | .985 | .990 | .993 | .995 | .995  | .996  | .997  | .997  |
| 47  | .334  | .956 | .963 | .970 | .974 | .979 | .985 | .990 | .993 | .995 | .995  | .996  | .997  | .997  |
| 48  | .331  | .957 | .963 | .970 | .975 | .980 | .985 | .990 | .993 | .995 | .995  | .996  | .997  | .997  |
| 49  | .329  | .957 | .964 | .971 | .975 | .980 | .986 | .990 | .993 | .995 | .995  | .996  | .997  | .997  |
| 50  | .326  | .959 | .965 | .972 | .977 | .981 | .986 | .990 | .993 | .995 | .995  | .996  | .997  | .997  |
| 55  | .315  | .962 | .967 | .974 | .978 | .982 | .987 | .991 | .994 | .995 | .996  | .997  | .997  | .997  |
| 60  | .305  | .965 | .970 | .976 | .980 | .983 | .988 | .991 | .994 | .995 | .996  | .997  | .997  | .998  |
| 65  | .296  | .967 | .972 | .977 | .981 | .984 | .989 | .992 | .994 | .995 | .996  | .997  | .997  | .998  |
| 70  | .288  | .969 | .974 | .978 | .982 | .985 | .989 | .993 | .995 | .996 | .997  | .997  | .998  | .998  |
| 75  | .281  | .971 | .975 | .979 | .983 | .986 | .990 | .993 | .995 | .996 | .997  | .997  | .998  | .998  |
| 80  | .274  | .973 | .976 | .980 | .984 | .987 | .991 | .993 | .995 | .996 | .997  | .997  | .998  | .998  |
| 85  | .268  | .974 | .977 | .981 | .985 | .987 | .991 | .994 | .995 | .997 | .997  | .997  | .998  | .998  |
| 90  | .263  | .976 | .978 | .982 | .985 | .988 | .991 | .994 | .996 | .997 | .997  | .998  | .998  | .998  |
| 95  | .257  | .977 | .979 | .983 | .986 | .989 | .992 | .994 | .996 | .997 | .997  | .998  | .998  | .998  |
| 100 | .252  | .979 | .981 | .984 | .987 | .989 | .992 | .994 | .996 | .997 | .998  | .998  | .998  | .998  |

```

C PROGRAM VARIAN.FOR
C PROGRAMA PARA TESTAR A IGUALDADE DE VARIANCIAS
C ESTE PROGRAMA TESTA A IGUALDADE DE VARIANCIAS PARA VARIAS AMOSTRAS
C CONSIDERANDO:
C TESTE DE COCHRAN - AMOSTRAS DE TAMANHOS IGUAIS

C DOCUMENTARIO
C N1 - NUMERO DE ELEMENTOS DA 1a. AMOSTRA
C N2 - NUMERO DE ELEMENTOS DA 2a. AMOSTRA
C N3 - NUMERO DE ELEMENTOS DA 3a. AMOSTRA
C N - NUMERO TOTAL DE ELEMENTOS DAS 3 AMOSTRAS
C GCOCA(I),GCOCB(I),GCOCC(I)- VALOR DE G PARA CADA GRAVIMETRO
C GMEDA,GMEDB,GMEDC- VALOR DE G MEDIO PARA CADA GRAVIMETRO
C I - REFERE-SE PARA CADA PONTO (RN)
C VARA,VARB,VARC- VARIANCIA PARA CADA GRAVIMETRO
C K - NUMERO DE AMOSTRAS
C GLIBA,GLIBB,GLIBC - GRAUS DE LIBERDADE
C RN - NUMERO DA RN (PONTO)
C GCOC- VALOR DA ESTATISTICA G DE COCHRAN CALCULADA
C QUIQUAD- VALOR DA ESTATISTICA QUIQUADRADO CALCULADA
C PARCn-VALORES PARCIAIS

C CADA AMOSTRA CORRESPONDE A UM GRAVIMETRO
$DEBUG
  IMPLICIT REAL *8(A-H,O-Z)
  DIMENSION GCOCA(99),GCOCB(99),GCOCC(99)
  OPEN(5,FILE='ENTRO.DAT',STATUS='OLD',FORM='FORMATTED')
  OPEN(6,FILE='VARIA.DAT',STATUS='NEW',FORM='FORMATTED')

  READ(5,*) NA,NB,NC,K
  N=NA+NB+NC
  GSOMA=0
  GSOMB=0
  GSOMC=0
  A=0
  B=0
  C=0
  IF (NA.EQ.NB.AND.NA.EQ.NC) THEN

C LEITURA DOS VALORES DE ENTRADA
DO 50 I=1,NA
  READ(5,*) RN,GCOCA(I),GCOCB(I),GCOCC(I)
C CALCULO DA MEDIA
  GSOMA=GSOMA+GCOCA(I)
  GSOMB=GSOMB+GCOCB(I)
  GSOMC=GSOMC+GCOCC(I)
50 CONTINUE
  GMEDA=GSOMA/NA
  GMEDB=GSOMB/NB
  GMEDC=GSOMC/NC
C CALCULO DA VARIANCIA
DO 100 I=1,NA
  A=A+(GCOCA(I)-GMEDA)**2
  B=B+(GCOCB(I)-GMEDB)**2
  C=C+(GCOCC(I)-GMEDC)**2
100 CONTINUE
  VARA=A/(NA-1)
  VARB=B/(NB-1)
  VARC=C/(NC-1)

C IMPRESSAO DA MEDIA E VARIANCIA
WRITE(6,20) GMEDA,GMEDB,GMEDC,VARA,VARB,VARC
20 FORMAT(3X,'TESTE DE COCHRAN',3X,'GMEDA = ',F11.4,2X,'GMEDB = ',
$F11.4,2X,'GMEDC = ',F11.4,3X,'VARA = ',F22.5,3X,'VARB = ',F22.
$5,3X,'VARC = ',F22.5)

C CALCULO DO TESTE DE COCHRAN
  DENOM=VARA+VARB+VARC

```

```

        IF (VARA.GT.VARB.AND.VARA.GT.VARC) THEN
            XNUM=VARA
        ELSE
            IF (VARB.GT.VARA.AND.VARB.GT.VARC) THEN
                XNUM=VARB
            ELSE
                XNUM=VARC
            ENDIF
        ENDIF
        GCOC=XNUM/DENOM
        WRITE(6,30) GCOC
30  FORMAT(3X,'GCOCHRAN = ',F10.4)

C  SE AS AMOSTRAS TEM TAMANHOS DIFERENTES, APLICAR TESTE DE BARTLET
ELSE
C  LEITURA DOS VALORES DE ENTRADA
DO 150 I=1,NA
    READ(5,*) GCOCA(I)
C  CALCULO DA MEDIA
    GSOMA=GSOMA+GCOCA(I)
150 CONTINUE
    GMEDA=GSOMA/NA
DO 200 I=1,NB
    READ(5,*) GCOCB(I)
C  CALCULO DA MEDIA
    GSOMB=GSOMB+GCOCB(I)
200 CONTINUE
    GMEDB=GSOMB/NB
DO 250 I=1,NC
    READ(5,*) GCOCC(I)
C  CALCULO DA MEDIA
    GSOMC=GSOMC+GCOCC(I)
250 CONTINUE
    GMEDC=GSOMC/NC
C  CALCULO DA VARIANCIA
DO 300 I=1,NA
    A=A+(GCOCA(I)-GMEDA)**2
300 CONTINUE
    VARA=A/(NA-1)
DO 350 I=1,NB
    B=B+(GCOCB(I)-GMEDB)**2
350 CONTINUE    VARB=B/(NB-1)
DO 400 I=1,NC
    C=C+(GCOCC(I)-GMEDC)**2
400 CONTINUE
    VARC=C/(NC-1)
C  IMPRESSAO DA MEDIA E VARIANCIA
    WRITE(6,450) GMEDA,GMEDB,GMEDC,VARA,VARB,VARC
450  FORMAT(3X,'TESTE DE BARTLET' /,3X,'GMEDA = ',F11.4,2X,'GMEDB = ',F
    $11.4,2X,'GMEDC = ',F11.4/,3X,'VARA = ',F22.5/,3X,'VARB = ',F22.5
    $/,3X,'VARC = ',F22.5)

C  CALCULO DO TESTE DE BARTLET
GLIBA=NA-1
GLIBB=NB-1
GLIBC=NC-1
DIF=N-K
PARC1=3*(K-1)
PARC2=1/PARC1
PARC3=1/DIF
PARC4=((1/GLIBA)+(1/GLIBB)+(1/GLIBC))-PARC3)
CC=1+(PARC2*PARC4)
PARC5=2.3026/CC
PARC6=GLIBA*VARA+GLIBB*VARB+GLIBC*VARC
T=PARC6/DIF
PARC8=DIF*DALOG(T)
PARC9=GLIBA*DALOG(VARA)+GLIBB*DALOG(VARB)+GLIBC*DALOG(VARC)

```

```

WRITE (6,495) DIF,PARC1,PARC2,PARC3,PARC4,CC,PARC5,PARC6,PARC8
495 FORMAT (3X,'DIF= ',F5.1,3X,'PARC1= ',F3.1,3X,'PARC2= ',F7.4,3X,'PA
SRC3= ',F7.5,3X,'PARC4= ',F9.6,3X,'CC= ',F9.6,3X,'PARC5= ',F9.6,3
$,3X,'PARC6= ',F13.5,3X,'PARC8= ',F15.6)
QUIQUAD=PARC5*(PARC8-PARC9)
WRITE (6,500) T,PARC9,QUIQUAD
500 FORMAT (3X,'T = ',F11.6,5X,'PARC9= ',F11.6,3X,'QUIQUAD = ',F12.5)
ENDIF
END

```

C \*\*\*\*\*

### TÁBUA G

| N  | Nível de significância para prova unilateral |      |       |
|----|----------------------------------------------|------|-------|
|    | 0,025                                        | 0,01 | 0,005 |
|    | Nível de significância para prova bilateral  |      |       |
|    | 0,05                                         | 0,02 | 0,01  |
| 6  | 0                                            | —    | —     |
| 7  | 2                                            | 0    | —     |
| 8  | 4                                            | 2    | 0     |
| 9  | 6                                            | 3    | 2     |
| 10 | 8                                            | 5    | 3     |
| 11 | 11                                           | 7    | 5     |
| 12 | 14                                           | 10   | 7     |
| 13 | 17                                           | 13   | 10    |
| 14 | 21                                           | 16   | 13    |
| 15 | 25                                           | 20   | 16    |
| 16 | 30                                           | 24   | 20    |
| 17 | 35                                           | 28   | 23    |
| 18 | 40                                           | 33   | 28    |
| 19 | 46                                           | 38   | 32    |
| 20 | 52                                           | 43   | 38    |
| 21 | 59                                           | 49   | 43    |
| 22 | 66                                           | 56   | 49    |
| 23 | 73                                           | 62   | 55    |
| 24 | 81                                           | 69   | 61    |
| 25 | 89                                           | 77   | 68    |

FONTE: Sidney Siegel /22/

```

C *****
C PROGRAM ANVAR.FOR
C Objetivo: Este programa faz a analise da variancia para 1 criterio
C de classificacao;faz a identificacao da diferenca pelo M. Scheffe.
C *****

C *****
C Documentacao

C X(I,J) - elemento da i-esima linha e j-esima coluna (gravidade)
C XMEDA- valor de gravidade medio para o 1o. gravimetro.)
C XMEDB- valor de gravidade medio para o 2o. gravimetro.)
C XMEDC- valor de gravidade medio para o 3o. gravimetro.)
C GCOCA(I),GCOCB(I),GCOCC(I)- valor das observacoes para cada grav.
C K - numero de colunas (numero de gravimetros)
C SQL - soma dos quadrados entre linhas
C SQC - soma dos quadrados entre colunas
C SQRR - soma dos quadrados residual
C SQT - soma dos quadrados total
C QML - quadrado medio entre linhas
C QMC - quadrado medio entre colunas
C QMR - quadrado medio residual
C DIFAB - diferenca entre os gravimetros 1 e 2
C DIFAC - diferenca entre os gravimetros 1 e 3
C DIFBC - diferenca entre os gravimetros 2 e 3
C NA,NB,NC - numero total de observacoes para cada gravimetro
C DELTA - identificacao pelo metodo de Scheffe
C PONT - numero do ponto
C N- numero total de observacoes
C IGRA - identificador de diferenca de gravimetros
C O nivel de significancia adotado e de 0.05
C GMEDA,GMEDB,GMEDC - valores medios de g para cada gravim.
C ESTATISTICAS F DE SNEDECOR TABELADAS:
C   1% - F(2,291)-4.6788           F(2,90)-4.8491
C   5% - F(2,291)-3.0268           F(2,90)-3.0977

```

```

C *****

$debug
IMPLICIT REAL *8(A-H,O-Z)
DIMENSION GCOCA(99),GCOCB(99),GCOCC(99)
OPEN(5,FILE='INTRO.DAT',STATUS='OLD',FORM='FORMATTED')
OPEN(6,FILE='OUT.DAT',STATUS='NEW',FORM='FORMATTED')
READ(5,*) NA,NB,NC,K

C Definicao de valores da estatistica F tabelada (nivel signif=0.05)
IF (NA.EQ.98) THEN
    FTAB=3.0268D0
ELSE
    IF (NA.EQ.31) THEN
        FTAB=3.0977D0
    ENDIF
ENDIF
SOM1=0
SOM2=0  SOM3=0
ELEV1=0
ELEV2=0
ELEV3=0

C Leitura dos valores
IF (NA.EQ.NC) THEN
DO 100 I=1,NA
    READ (5,*) RN,GCOCA(I),GCOCB(I),GCOCC(I)
    SOM1=SOM1+GCOCA(I)
    ELEV1=ELEV1+(GCOCA(I)**2.D0)
    SOM2=SOM2+GCOCB(I)
    ELEV2=ELEV2+(GCOCB(I)**2.D0)
    SOM3=SOM3+GCOCC(I)

```

```

        ELEV3=ELEV3+(GCOCC(I)**2.D0)
100  CONTINUE
      ELSE
        DO 105 I=1,NA
          READ (5,*) GCOCA(I)
          SOM1=SOM1+GCOCA(I)
          ELEV1=ELEV1+GCOCA(I)**2
105  CONTINUE
        DO 110 I=1,NB
          READ (5,*) GCOCB(I)
          SOM2=SOM2+GCOCB(I)
          ELEV2=ELEV2+GCOCB(I)**2
110  CONTINUE
        DO 115 I=1,NC
          READ (5,*) GCOCC(I)
          SOM3=SOM3+GCOCC(I)
          ELEV3=ELEV3+GCOCC(I)**2
115  CONTINUE
      ENDIF
      N=NA+NB+NC

      FRA1=((SOM1+SOM2+SOM3)**2)/N
      FRA2=ELEV1+ELEV2+ELEV3
      FRA3=((SOM1**2)/NA)+((SOM2**2)/NB)+((SOM3**2)/NC)
      SQE=FRA3-FRA1
      SQR=FRA2-FRA3
      SQT=FRA2-FRA1
      WRITE(6,249) FRA1,FRA2,FRA3
249  FORMAT(3X,'FRA1= ',F23.3,/3X,'FRA2 = ',F23.3,/3X,'FRA3= ',F23.3)
C    Calculo dos quadrados medios
      QME=SQE/(K-1)
      QMR=SQR/(N-K)

C    Valores da estatistica F calculados
      F=QME/QMR
      WRITE(6,250) SQE,QME,F,SQR,QMR,SQT
250  FORMAT(61('-')/,15X,'QUADRO DA ANOVA'/,61('-')/, '**', 'FONTE
$ VARIACAO',2X,'**',2X,'SOMA QUADRADO',2X,'**',2X,'QUAD.MEDIO',2X,'**',
$2X,'ESTAT.F' ,'**',/,61('-')/, '**', 'ENTRE AMOSTRAS',2X,'**',2X,E13.7,
$2X,'**',2X,F10.3,2X,'**',1X,F8.3,'**',/,61('-')/, '**',2X,'RESIDUAL',6
$X,'**',2X,E13.7,2X,'**',2X,F10.3,2X,'**',/,51('-')/, '**',4X,'TOTAL',7
$X,'**',2X,E13.7,2X,'**',/,36('-')/)!
      IGRA=0

C    Teste de Rejeicao
      IF(F.LT.FTAB) THEN
        WRITE(6,*) ' nao ha diferenca significativa entre gravim.'
      ELSE
        WRITE(6,*) ' ha diferenca significativa entre gravim.'
        IGRA=1
      ENDIF

C    Identificacao do gravimetro que apresenta divergencia dos demais

C    Metodo de Scheffe
      IF (IGRA.EQ.1) THEN
        PARC=FLOAT(NA)
        DELT=QMR*(2/PARC)*(K-1)*FTAB
        DELTA=DSQRT(DELT)
        WRITE(6,415) DELTA
415  FORMAT(3X,'DELTA=',F9.3)
C    Calculo das medias para cada gravimetro
      GMEDA=SOM1/NA
      GMEDB=SOM2/NB
      GMEDC=SOM3/NC

```

```

C  Testes de identificacao
  DIFAB=GMEDA-GMEDB
  DIFAC=GMEDA-GMEDC
  DIFBC=GMEDB-GMEDC
  WRITE(6,450) DIFAB,DIFAC,DIFBC
450 FORMAT(3X,'DIFAB=',F10.2,3X,'DIFAC=',F10.2,3X,'DIFBC=',F10.2)
  IF(ABS(DIFAB).GT.DELTA) THEN
    WRITE(6,*) ' DIFAB difere'
  ENDIF
  IF(ABS(DIFAC).GT.DELTA) THEN
    WRITE(6,*) ' DIFAC difere'
  ENDIF
  IF(ABS(DIFBC).GT.DELTA) THEN
    WRITE(6,*) ' DIFBC difere'
  ENDIF
  ENDIF
  WRITE(6,475)
475 FORMAT(//)
  END
C  .....

```

S A Í D A      D O      P R O G R A M A      A N V A R . F O R

|           |          |           |          |           |          |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| GCOCA(I)= | 705.8189 | GCOCB(I)= | 705.8547 | GCOCC(I)= | 705.8213 |
| GCOCA(I)= | 708.7500 | GCOCB(I)= | 708.7684 | GCOCC(I)= | 708.7870 |
| GCOCA(I)= | 726.3099 | GCOCB(I)= | 726.3533 | GCOCC(I)= | 726.3207 |
| GCOCA(I)= | 719.0737 | GCOCB(I)= | 719.1125 | GCOCC(I)= | 719.1053 |
| GCOCA(I)= | 722.7007 | GCOCB(I)= | 722.7613 | GCOCC(I)= | 722.7978 |
| GCOCA(I)= | 731.6124 | GCOCB(I)= | 731.6577 | GCOCC(I)= | 731.7138 |
| GCOCA(I)= | 735.7762 | GCOCB(I)= | 735.8691 | GCOCC(I)= | 735.8840 |
| GCOCA(I)= | 743.8026 | GCOCB(I)= | 743.7855 | GCOCC(I)= | 743.8654 |
| GCOCA(I)= | 752.7063 | GCOCB(I)= | 752.7563 | GCOCC(I)= | 752.8445 |
| GCOCA(I)= | 774.7984 | GCOCB(I)= | 774.8309 | GCOCC(I)= | 774.9567 |
| GCOCA(I)= | 757.3135 | GCOCB(I)= | 757.3454 | GCOCC(I)= | 757.3407 |
| GCOCA(I)= | 752.1945 | GCOCB(I)= | 752.2355 | GCOCC(I)= | 752.2181 |
| GCOCA(I)= | 717.7597 | GCOCB(I)= | 717.7631 | GCOCC(I)= | 717.7212 |
| GCOCA(I)= | 715.1603 | GCOCB(I)= | 715.1633 | GCOCC(I)= | 715.0932 |
| GCOCA(I)= | 723.5765 | GCOCB(I)= | 723.5989 | GCOCC(I)= | 723.5632 |
| GCOCA(I)= | 720.1109 | GCOCB(I)= | 720.1077 | GCOCC(I)= | 720.0341 |
| GCOCA(I)= | 716.9387 | GCOCB(I)= | 716.9577 | GCOCC(I)= | 716.9106 |
| GCOCA(I)= | 734.0021 | GCOCB(I)= | 733.9822 | GCOCC(I)= | 733.9197 |
| GCOCA(I)= | 740.3095 | GCOCB(I)= | 740.3156 | GCOCC(I)= | 740.3081 |
| GCOCA(I)= | 749.2442 | GCOCB(I)= | 749.2412 | GCOCC(I)= | 749.2492 |
| GCOCA(I)= | 773.8771 | GCOCB(I)= | 773.8946 | GCOCC(I)= | 773.9010 |
| GCOCA(I)= | 780.3783 | GCOCB(I)= | 780.3482 | GCOCC(I)= | 780.3827 |
| GCOCA(I)= | 790.2042 | GCOCB(I)= | 790.1901 | GCOCC(I)= | 790.2645 |
| GCOCA(I)= | 722.4640 | GCOCB(I)= | 722.4360 | GCOCC(I)= | 722.4027 |
| GCOCA(I)= | 730.4103 | GCOCB(I)= | 730.4102 | GCOCC(I)= | 730.3684 |
| GCOCA(I)= | 742.0583 | GCOCB(I)= | 742.0641 | GCOCC(I)= | 742.0447 |
| GCOCA(I)= | 755.4389 | GCOCB(I)= | 755.4551 | GCOCC(I)= | 755.4443 |
| GCOCA(I)= | 768.0444 | GCOCB(I)= | 768.0760 | GCOCC(I)= | 768.0877 |
| GCOCA(I)= | 784.1907 | GCOCB(I)= | 784.2786 | GCOCC(I)= | 784.2056 |
| GCOCA(I)= | 785.0845 | GCOCB(I)= | 785.0827 | GCOCC(I)= | 785.1266 |
| GCOCA(I)= | 781.3209 | GCOCB(I)= | 781.3088 | GCOCC(I)= | 781.3657 |

NA= 31    NB= 31    NC= 31    N= 93    K= 3  
SOM1=            23061.431    SOM2=            23062.005    SOM3=            23062.049  
ELEV1=            .1717516E+08    ELEV2=            .1717601E+08    ELEV3=            .1717611E+08

FRA1=            51469152.351  
FRA2 =            51527286.663  
FRA3=            51469152.359

-----  
QUADRO DA ANOVA  
-----

|                 |   |               |   |            |   |           |
|-----------------|---|---------------|---|------------|---|-----------|
| *FONTE VARIACAO | * | SOMA QUADRADO | * | QUAD.MEDIO | * | ESTAT.F*  |
| -----           |   |               |   |            |   |           |
| *ENTRE AMOSTRAS | * | .7670008E-02  | * | .004       | * | 0.000006* |
| -----           |   |               |   |            |   |           |
| * RESIDUAL      | * | .5813430E+05  | * | 645.937    | * |           |
| -----           |   |               |   |            |   |           |
| * TOTAL         | * | .5813431E+05  | * |            | * |           |
| -----           |   |               |   |            |   |           |

não há diferença significativa entre gravim.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COSTA NETO, P. O. **Estatística**. São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda, 264p, 1977.
2. DRAGERT, H; LAMBERT, A., LIARD, J. Repeated Precise Gravity Measurements on Vancouver Island, British Columbia, **Journal of Geophysical Research**, Vol. 86, 191, pp 60-97-6106.
3. DRAGOMIR, V. et al. **Theory of the Earth's Shape**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing, 1982. 694p. il. (Developments in Solid Earth Geophysics, 13)
4. FILLIBEN, J. J. The Probability Plot Coefficient Test for Normality, **Technometrics**. v. 17, nº 1, p. 111-117, Fevereiro 1975.
5. GAGG, G., **Alguns Métodos de Monitoramento de Deslocamentos verticais**, Seminário do Curso de Pós Graduação, 1990, 39p.
6. GAGG, G., **Teste estatístico r : Avaliação de Normalidade**, Seminário do Curso de Pós Graduação, 1996.
7. GEMAEL, C. **Vertical Crustal Deformations near large dams**, REVISTA CARTOGRÁFICA, nº 51/52 Instituto Panamericano de Geografia e História, 1987.
8. GEMAEL, C. & DOUBEK, A. **Auscultação Geodésica da Região da Barragem Bento Munhoz da Rocha**. BOLETIM DA UFPR, nº 28, 1982.
9. HECK, B. & MALZER, H. Determination of vertical recent crustal movements by levelling Gravity Data, **Recent Crustal Movements**, 1982, ELSEVIER, Developments in Geotectonics, 20, p. 251-264, 1983.
10. JACHENS, R. C. The Gravity Method and Interpretative Techniques for Detecting Vertical Crustal Movements, **Applications of Geodesy to Geodynamics**, The Ohio State University, n. 280, p. 153-154, 1978
11. JOHNSON, R. A. & WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statitiscal Analysis**, Hall International. Inc, 2ª ed.
12. LAMBERT, A. & BEAUMONT, C. Nano Variations in gravity due to seasonal groundwater movements: implications for the gravitational detection of tectonic movement. **Journal of Geophysical Research**, v. 82, nº 2, p. 297-306, 1977.
13. MAINVILLE, A., LAMBERT, A. & LIARD, J. O. Movement and Gravity Change Near the La Grande-2 Reservoir, Quebec, **Journal of Geophysical Research**. v.91, p.9150-9160.

14. MARQUES, J. M. **Ajustamento de Observações I**. Apostila de Estatística. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 90p. Curitiba, 1987.
15. \_\_\_\_\_ . Estatística, Formulário e Tabelas.
16. MONICO, J.F.G., **Ajustamento e Análise Estatística de Observações Aplicados na Detecção de Deformação**, Tese de Mestrado, 1988, 89p
17. MENGHUA, W., ZHAO WEI & MA LI. Gravity Changes Before and After the Tangshan Earthquake of July 28, 1976 and Possible Interpretation, **Journal of Geophysical Research**. v. 90, p. 5421-5428, 1985.
18. NAKAGAWA, I. & SATOMURA, M. Gravity Change Observed Near Lake Biwa. **Bulletin Geodesique**. Japan, v. 51, nº 3, p. 213-217, 1977.
19. QUINTAS, M. C. L., **Métodos Geodésicos Aplicados na Determinação de Movimentos e Deformações Crustais**. Curitiba, 1989, 130 p. Dissertação de Mestrado, UFPR.
20. ROSIER, F.A., **Medidas Diferenciais da Gravidade: Ajustamento de uma Sub-rede de Estações Gravimétricas e Determinação de Coeficientes de Escala para Gravímetros La Coste & Romberg , Modelo G nº 41, 372 e 454**, 1979, 190p., Dissertação de Mestrado, UFPR.
21. RYMER, H., A contribution to precision microgravimetry data analysis using La Coste and Romberg Gravity Meters, **Geophysical Journal**, n. 97, p. 311-322, 1989.
22. SIEGEL, Sidney. **Estatística Não Paramétrica para as Ciências do Comportamento**. Trad. Alfredo A. de Farias, Mc Grawill.
23. TORGE, W., DREWES, H., Gravity Variations with Time in Northern Iceland 1965-1975, **Journal of Geophysics**, n. 43, p. 771-790, Hamburg, 1977.
24. VANICEK, P. & KRAKIWSKY, E. **Geodesy: The Concepts**. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1982. 691p., ISBN: 0444861491
25. WHITCOMB, J. H. New Vertical Geodesy. **Journal of Geophysical Research**. v. 81, nº 26, p. 4937-4944, 1976.
26. Foz do Areia Hydroelectric Project - Final Report, Kaiser Engineers International Corporation - Milder Kaiser Engenharia S.A., April 1981.