

# O MÉTODO ELÉCTRICO DA RESISTIVIDADE APLICADO À ARQUEOLOGIA. TRATAMENTO DE SINAL.

por

Jorge M. C. Machado de Carvalho\*  
e Abílio Tinoco Cavalheiro\*\*

**Resumo:** Considerações gerais sobre o método eléctrico da resistividade e sua aplicabilidade à prospecção arqueológica; tratamento de sinal, correspondente a perfis de resistividade aparente, utilizando filtros derivativos no domínio espacial e a Análise de Fourier unidimensional 1-D e bidimensional 2-D, no domínio espectral; filtros utilizados; exemplos de aplicação das metodologias de filtragem a alguns casos concretos.

**Palavras-chave:** Resistividade. Análise de Fourier. Filtragem.

**Abstract:** Generic considerations about the resistivity electrical method and its applicability to archaeological exploration; signal processing of apparent resistivity profiles, using derivative filters on the space domain and Fourier Analysis 1-D and 2-D on the frequency domain; filters used; practical examples.

**Key-words:** Resistivity. Fourier Analysis. Filtering.

## 1. INTRODUÇÃO

O método eléctrico da resistividade (figs. 1 e 2, Est. I) é um dos métodos de prospecção geofísica mais utilizados em arqueologia.

A sua eficácia está dependente da interacção de vários factores, nomeadamente:

- o contraste resistivo entre as estruturas arqueológicas procuradas, os terrenos envolventes e o “bedrock”;
- a morfologia daquelas estruturas, da interface “bedrock”/terrenos de cobertura e topografia.

---

\* Assistente - Dep. Minas, FEUP.

\*\* Professor Associado - Dep. Minas, FEUP.

- a profundidade a que se encontram enterradas as estruturas.
- a orientação dos perfis;
- a configuração electródica e o passo de amostragem utilizados.

Um dos frequentes e principais objectivos da aplicação de tal método de prospecção, isolada ou conjuntamente com outro(s), é a divisão duma determinada parcela de terreno em sub-parcelas e a consequente atribuição a cada uma delas, em função dos dados obtidos, de diferentes probabilidades de aí estarem localizadas estruturas arqueológicas.

Geralmente, a interpretação é feita sobre os dados de campo tal e qual, sem nenhum tratamento prévio especial, o que por vezes é insuficiente para ser alcançado, de forma aceitável, o objectivo referido.

No presente artigo, são apresentadas duas metodologias de tratamento de dados, relativos a campanhas de prospecção, utilizando o método eléctrico da resistividade e a configuração electródica tipo Wenner (fig. 1, Est. I), com um passo de amostragem sempre igual ao espaçamento interelectródico, desenvolvidas com o intuito de tornar os dados susceptíveis duma mais fiável interpretação<sup>1</sup>.

## 2. CONSIDERAÇÕES PRÉVIAS

A selecção de locais, apropriados para a realização de escavações arqueológicas, seria imensamente facilitada se possuíssemos a capacidade de ver em profundidade, através da superfície do terreno; sobretudo nos locais em que existem insuficientes indícios superficiais, sobre a existência e/ou localização das estruturas arqueológicas.

Na impossibilidade de tal forma de visão, são utilizados meios alternativos, como seja os métodos de prospecção geofísica, geradores de “imagens” de definição variável, mas com a vantagem de serem muito menos morosos e custosos que as campanhas de escavações - “tocar para crer”.

Como foi anteriormente referido, os dados obtidos com a aplicação de tais métodos, sendo uma síntese complexa das interferências dum grande conjunto de factores, nem sempre são susceptíveis de serem convenientemente interpretados.

O tratamento de sinal proposto, tem como objectivo filtrar os efeitos dos factores indesejados, de forma a tornar mais evidentes as anomalias correspondentes às estruturas procuradas.

---

<sup>1</sup> V. J. Carvalho, “Tratamento de Sinal na Geofísica Aplicada à Arqueologia” - Relatório para Provas de Capacidade Científica, Dep. Minas, FEUP - Set. 1991.

Seguidamente, serão feitas algumas considerações sobre os pressupostos subjacentes a tais procedimentos, assim como sobre as respectivas metodologias.

### **3. FILTRAGEM - PRESSUPOSTOS E METODOLOGIAS**

#### **3.1. Introdução**

A possibilidade de interpretação “correcta” dum sinal depende, em larga medida, de nele estar suficientemente evidenciada a parte da anomalia correspondente à(s) estrutura(s) procurada(s), o que nem sempre se verifica.

De forma a tentar ultrapassar este constrangimento, começemos por classificar as diferentes influências componentes do sinal, em três classes fundamentais:

- componente regional;
- ruído;
- estruturas arqueológicas (paredes, muralhas, pavimentos e outro tipo de construções).

Tomando como referência a última classe (estruturas arqueológicas) a primeira corresponde a variações lentas de propriedades e/ou características do terreno envolvente, assim como da topografia — baixas frequências. Na segunda classe (ruído) estão contidas as componentes relativas a estruturas de pequena dimensão e mais próximas da superfície, a que correspondem variações bruscas de características e/ou propriedades — altas frequências.

As medidas da resistividade aparente, resultantes duma campanha de prospecção, são atribuídas a determinados pontos, definidos pelas suas coordenadas, podendo portanto ser consideradas amostragens duma função do espaço, real e contínua. A distinção, no domínio espacial de amostragem, das componentes do sinal relativas a cada uma das referidas classes, é uma actividade dependente, em larga medida, da experiência e sensibilidade do analista.

O objectivo do tratamento (filtragem) é “limpar” o sinal das influências tanto da componente regional como do ruído, de forma a isolar e evidenciar, tanto quanto possível a anomalia correspondente à(s) estrutura(s) procurada(s).

#### **3.2. Metodologia de filtragem**

##### **3.2.1. Domínio espectral (das frequências)**

A Transformada de Fourier — ao permitir passar do domínio espacial do sinal original, para um outro domínio (das frequências ou espectral) sem perda

de informação, no qual as influências componentes do sinal, a que correspondem diferentes frequências, se apresentam explicitadas — possibilita um tipo de tratamento do sinal mais controlado e passível de interpretação física imediata.

São consideradas duas situações, unidimensional, 1-D e bidimensional, 2-D, correspondentes, respectivamente, ao tratamento dum perfil isolado e dum conjunto de perfis relacionados espacialmente segundo uma malha rectangular.

A estratégia adoptada, foi a filtragem, predominantemente das baixas e altas frequências do espectro de amplitudes complexo, tentando, tanto quanto possível, isolar a banda de frequências intermédias, correspondentes às estruturas procuradas, ou seja, a utilização dum filtro passa - banda.

Na prática, como foi referido, a operação de filtragem corresponde à multiplicação do espectro de amplitudes complexo por uma das funções filtro posteriormente apresentadas (secção 3.4.1).

Finalmente, após a operação de filtragem, é possível regressar ao domínio original do sinal, pela aplicação da Transformada Inversa de Fourier e interpretar a anomalia filtrada, comparando-a com a original

O facto das funções filtro serem funções pares, não altera, após multiplicação, a simetria do espectro — parte real par e parte imaginária ímpar — pelo que a anomalia filtrada se mantém uma função real, no domínio espacial.

Para o efeito, foram desenvolvidas algumas rotinas em linguagem “MATLAB” e utilizadas as funções daquele “software”, relacionadas com a Análise de Fourier.

O número de pontos a filtrar  $m$ , igual em cada um dos semi-eixos das frequências, é uma das variáveis das funções filtro construídas, tendo sido possível constatar, numa primeira aproximação e com base em situações experimentais controladas, que o seu valor óptimo varia entre  $N/2-2$  e  $N/2-N/4$ , sendo  $N$  o número de pontos do sinal a filtrar.

Foram contempladas as situações 1-D, correspondente ao tratamento de perfis isolados e 2-D, correspondente à situação de um conjunto de perfis relacionados espacialmente segundo uma malha rectangular.

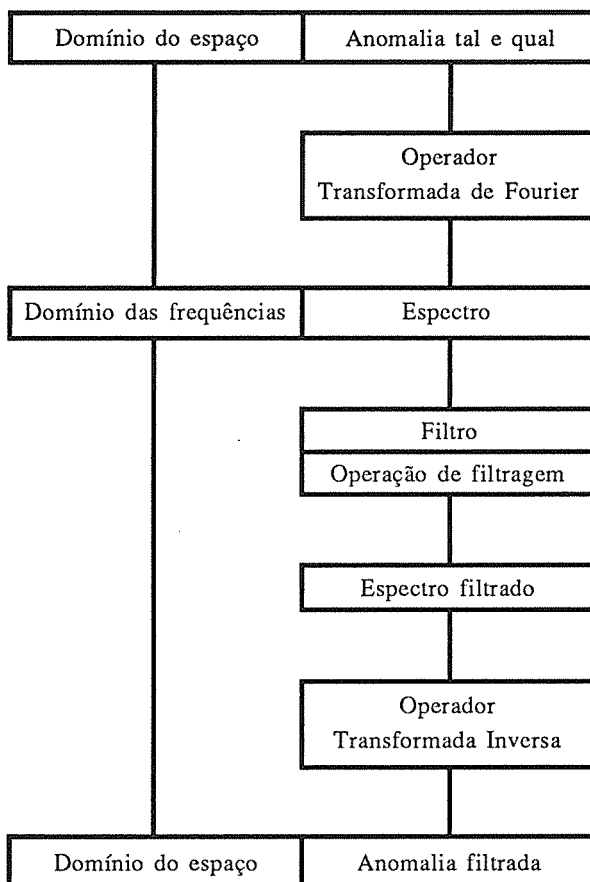
Neste último caso, não se utilizaram filtros bidimensionais, tendo sido aplicados os filtros unidimensionais referidos, segundo direcções perpendiculares às arestas da malha formada pelo conjunto de perfis.

Foram feitas várias experiências de filtragem, nomeadamente utilizando em série mais do que um tipo de filtro, em situações 1-D, ou diferentes filtros em direcções perpendiculares, em situações 2-D.

Em algumas situações, sobretudo 1-D, foi possível comprovar os bons resultados obtidos, visto estes serem correspondentes a condições controladas (secção 4.1).

Seguidamente, é apresentada, esquematicamente, a sequência de operações realizadas:

### Filtragem no domínio espectral - sequência de operações



#### 3.2.2. Domínio do espaço

Apesar das vantagens referidas, inerentes ao tratamento de sinal no domínio espectral, a dualidade entre os dois domínios, permite a realização de operações de filtragem no domínio espacial, correspondentes às anteriormente descritas. A eventual conveniência de tal procedimento pode estar relacionada, nomeadamente, com uma questão de economia em formalismos matemáticos.

Neste caso, o formalismo matemático correspondente ao processo de filtragem é a operação de convolução.

Os resultados obtidos com a aplicação dos filtros, apresentados na secção 3.4.2, são equivalentes aos obtidos ajustando curvas polinomiais a segmentos da função a filtrar e posteriormente utilizar as suas derivadas.

Subjacente a este procedimento, está, mais uma vez, a ideia de que as oscilações de pequeno comprimento de onda, são causadas por condições assimiláveis a ruído, o qual é filtrado pelo ajuste polinomial; as oscilações de maior comprimento de onda e declive menos variável, correspondem a tendências regionais, sendo o seu efeito filtrado ao passarem pelo operador derivada; as oscilações evidenciadas, após o cálculo da derivada, são as de comprimento de onda intermédio — correspondentes, sobretudo às estruturas procuradas — cujas variações de declive locais constituem desvios suficientemente significativos, relativamente às tendências regionais.

Este tipo de filtros são tanto mais eficientes quanto mais as estruturas procuradas se afastam “norma” regional e local, devendo a sua utilização ser antecedida duma cuidadosa observação das medidas de campo.

### 3.3. Filtros utilizados

#### 3.3.1. Domínio das frequências

Seguidamente serão descritas as funções filtro utilizadas e posteriormente algumas operações e resultados com elas obtidos.

— Função filtro “Seno”.

As expressões analíticas correspondentes a este filtro são as seguintes.

$$\left[ \frac{\sin(f) + 1}{2} \right]^p$$

$$\left[ \frac{\sin(f) + 1}{0.1} \right]^p + 0.2$$

O parâmetro - p - permite variar a curtose da curva.

O argumento da função sin - f - varia entre  $\pi/2$  e  $3\pi/2$ , de forma a incluir os pontos de inflexão e as zonas de decrescimento mais suave, reduzindo os inconvenientes dum corte de frequências demasiadamente brusco, aquando das operações de filtragem.

Graficamente, a função filtro encontra-se posicionada de forma simétrica relativamente à origem do eixo das frequências, podendo o número de pontos a filtrar variar, de acordo com as exigências de cada situação.

— Função filtro “Gauss”.

A função utilizada neste caso, de uso frequente em estatística, tem a seguinte expressão analítica:

$$\frac{1}{\sigma \times \sqrt{2} \times \pi} \times e^{-\frac{1}{2} \times \left(\frac{v-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

sendo -  $\sigma$  - o desvio padrão, -  $\mu$  - a média e -  $v$  - a abcissa.

Neste caso é a possibilidade de variar o desvio padrão, que permite modificar a forma da curva.

Também neste caso e graficamente, a função filtro encontra-se posicionada de forma simétrica relativamente à origem do eixo das frequências, podendo o número de pontos a filtrar variar, de acordo com as exigências de cada situação.

### 3.3.2. Domínio do espaço

Sob a designação de filtros derivativos, consideraremos um conjunto de filtros, (John C. Davis, “Statistics and Data Analysis in Geology”, 2ª edição, pág. 272 e seguintes) sobre os quais foram tecidas algumas considerações na secção 3.4.2.

Foram considerados os seguintes vectores:

De 2ª ordem:

- f23 = [1 0 -1];
- f25 = [2 1 0 -1 -2]/10;
- f27 = [3 2 1 0 -1 -2 -3]/28;
- f29 = [4 3 2 1 0 -1 -2 -3 -4]/60;
- f211 = [5 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 -4 -5]/110;
- f213 = [6 5 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 -4 -5 -6]/128;

De 3ª ordem:

- f35 = [-1 8 0 -8 1]/12;
- f37 = [-22 67 58 0 -58 -67 22]/252;
- f39 = [-86 142 193 126 0 -126 -139 -142 86]/1188;
- f311 = [-300 294 532 503 296 0 -296 -503 -532 -294 300]/5148;
- f313 = [-1133 660 1578 1796 1489 832 0 -832 -1489 -1796 -1578 -660 1133]/240024.

## 4. ALGUNS EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

### 4.1. Em condições controladas

A necessidade de utilização de dados de campo, obtidos em condições controladas e obedecendo a determinados requisitos, conducente a uma aplicação dos filtros igualmente controlada, levou à utilização dum modelo em escala reduzida, a seguir apresentado:

– uma estrutura de pequenas dimensões (30x5x5 cms.) em forma de “muro”, constituída por blocos de granito, foi colocada no fundo duma sanja §§(de 3x3x0.8mts.) aberta num solo de terra vegetal (representação esquemática na Est. I fig. 1). Seguidamente, foram sendo colocadas camadas de terra crivada, sobre a estrutura e efectuadas medições da resistividade aparente, segundo perfis perpendiculares à direcção do “muro”.

Foram utilizados eléctrodos de latão, com cerca de 15cm de comprimento e 0.2cm de diâmetro.

O passo de amostragem  $a$ , variável, foi sempre igual ao afastamento inter-electrónico da configuração tipo Wenner utilizada.

Nas Est. II e III, figs. 1, podem ser observadas as anomalias de campo relativas às seguintes condições:

– anomalia 1 - Est. II, fig. 1: estrutura enterrada a  $p=10$  cm de profundidade e perfil perpendicular à sua maior dimensão e passando à mesma distância dos extremos. Passo de amostragem igual a 5 cm.

– anomalia 2 - Est. III, fig. 1: estrutura enterrada a  $p=30$  cm de profundidade e perfil perpendicular à sua maior dimensão e passando à mesma distância dos extremos. Passo de amostragem igual a 10 cm.

Nas Est. II e III, figs. 2, podem-se observar alguns resultados de filtragens das anomalias referidas:

– anomalia 1 filtrada - Est. II, fig. 2: resultado da aplicação do filtro “Gauss” na anomalia 1. Como se pode observar, a probabilidade de detecção da estrutura, localizada a meio do perfil, aumenta significativamente após a operação de filtragem.

– anomalia 2 filtrada - Est. III, fig. 2: resultado da aplicação do filtro derivativo  $f_{37}$  na anomalia 2. Também neste caso se verifica um aumento significativo da probabilidade de detecção da estrutura.



## 4.2. Em condições não controladas

Seguidamente será apresentado um exemplo de filtragem 2-D, duma anomalia que se pensa corresponder a uma mamoa.

Na Est. IV, fig. 1 pode-se observar a anomalia de campo tal e qual.

As figs. 2 e 3, da mesma estampa, correspondem a duas filtrações da referida anomalia, utilizando o filtro "Seno" segundo duas direcções perpendiculares. A metodologia de filtragem foi a mesma nos dois casos, variando apenas o número de pontos filtrados que foi superior na anomalia da fig. 3.

Não houve ainda possibilidade de aferir a qualidade da filtragem, visto a mamoa não ter sido escavada, até à data. No entanto, nota-se uma maior individualização de pontos com resistividade mais elevada, que se espera que correspondam à localização dos fragmentos rochosos constituintes, de maiores dimensões.

## 5. CONCLUSÕES

Uma apreciação genérica dos filtros referidos anteriormente, permite concluir que, nas condições controladas 1-D em que foram utilizados, conduzem a resultados bastante mais interpretáveis que os sinais tal e qual.

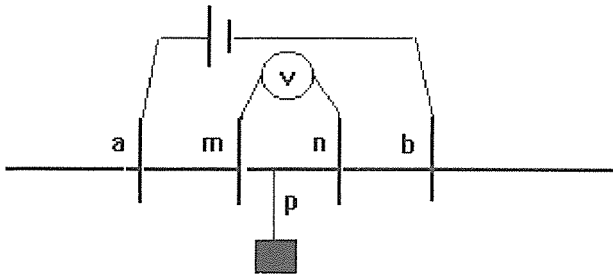
A sua utilização em condições 2-D, refere-se apenas a situações não controladas e a locais onde não se procederam ainda a escavações ou, então, onde não foi possível referenciar espacialmente os resultados obtidos. No entanto, em algumas das situações, nomeadamente no caso apresentado na Est. IV, os resultados obtidos são credíveis e prometedores.

No tocante aos filtros derivativos, os melhores resultados em média, foram obtidos com os de menor número de termos.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- BRACEWELL, R.; 1976 - *The Fourier Transform and its applications*. Third Edition, Mc.Graw Hill.
- CAMARA, M. E.; HERNANDEZ, M. C.; GISBERT, J; 1990 - Estudio geofísico en la avenida de las Industrias (Denia, Alicante). Aplicación de la Transformada de Fourier (1D) en la interpretación de los datos. *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, vol. 5, fasc. 1, pp 63-70.
- DAVIES, J. C.; 1986 - *Statistics and Data Analysis in Geology*. 2ª Edição, John Willey & Sons.
- DOBRIN, M.; 1976 - *Introduction to Geophysical Prospecting*. Third Edition, Mc.Graw Hill.

- GRANT, F. S. & WEST, G. F.; 1965 - *Interpretation theory in applied geophysics*. 1<sup>o</sup> vol., Mc.Graw Hill.
- Jornadas sobre teledetección y geofísica aplicadas a la arqueología*. 1992, 1<sup>a</sup> edición, Madrid, Edita. Ministerio de Cultura, Dir. Gral. de Bellas Artes e Archivos, Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales.
- LOSADA, F. P.; ALMEIDA, F.; MATIAS, M. S.; 1989 - Prospecção geofísica e escavação arqueológica em Noville (Mugardos - A Coruña - Galiza). *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, vol. 5, fasc. 1, pp 49-61
- MADUREIRA, C. N., 1971 - *Teoria dos métodos geofísicos*. Dep.Minas da FEUP.
- KOEFOD, O.; 1979 - *Geosounding principles, 1- Resistivity sounding measurements*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- KUC, R.; 1982 - *Introduction to digital signal processing*. Mc.Graw Hill International Editions.
- TELFORD, GELDART, SHERIFF & KEYS; 1976 - *Applied geophysics*. Cambridge University Press.

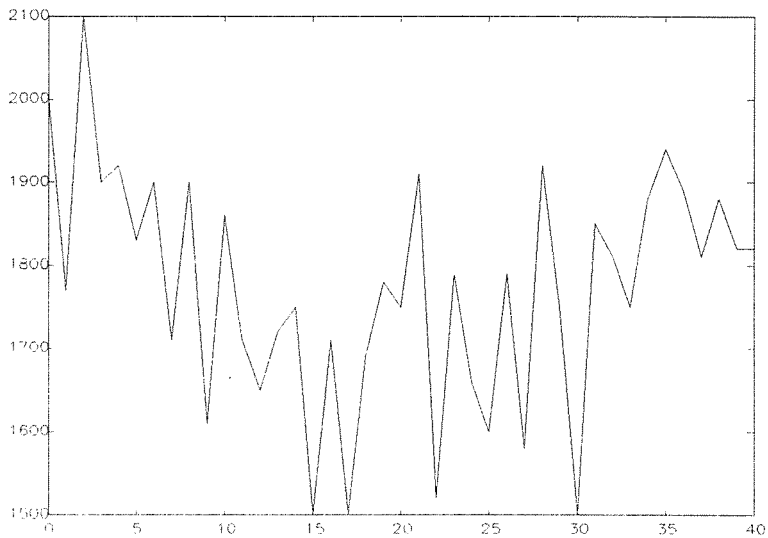


1 – Representação esquemática da configuração electrónica tipo Wenner e do modelo a escala reduzida, enterrado à profundidade  $p$ .

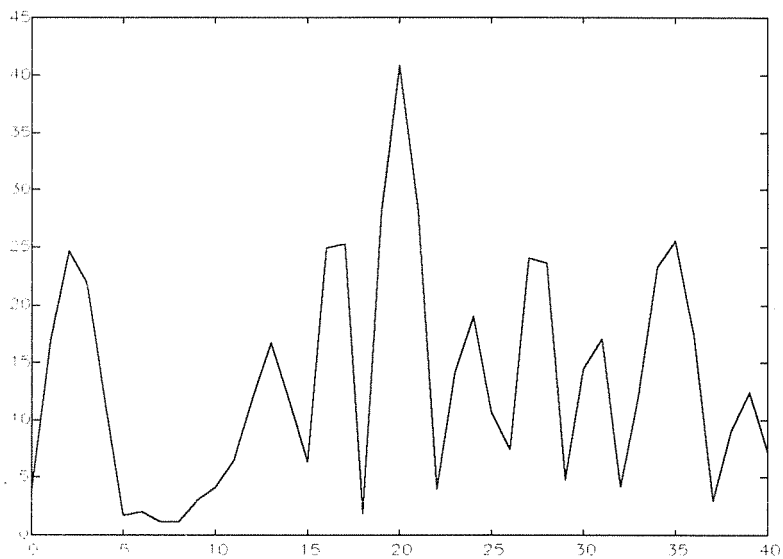


2 – Campanha de prospecção utilizando o método eléctrico da resistividade.

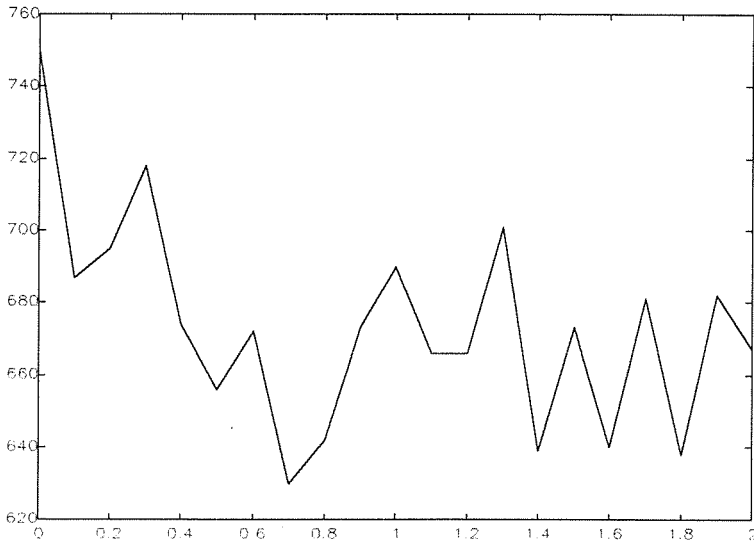
Est. II



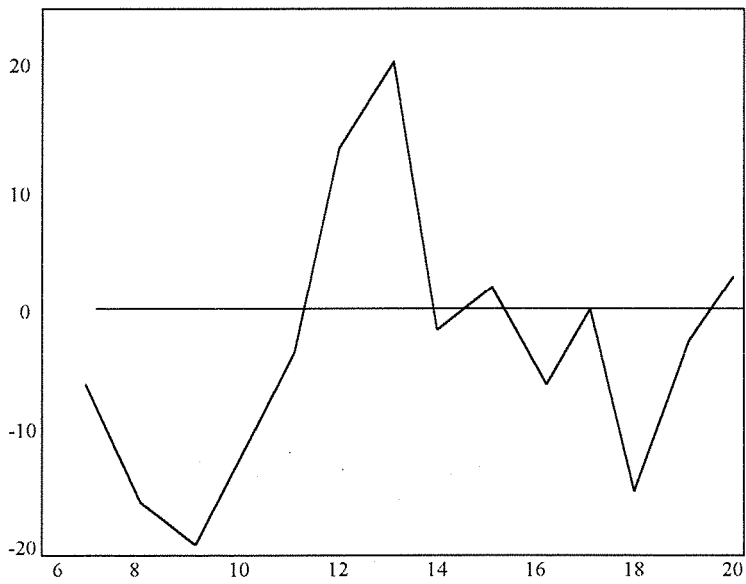
1 – Anomalia 1. «Muro» enterrado a meio do perfil.



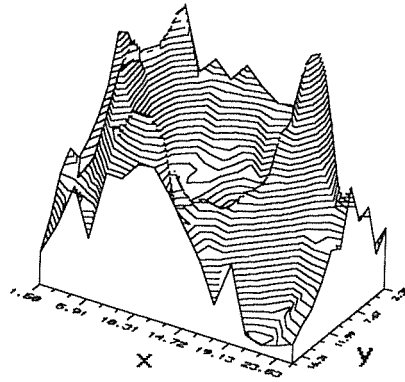
2 – Anomalia 1 filtrada pelo filtro «Gauss».



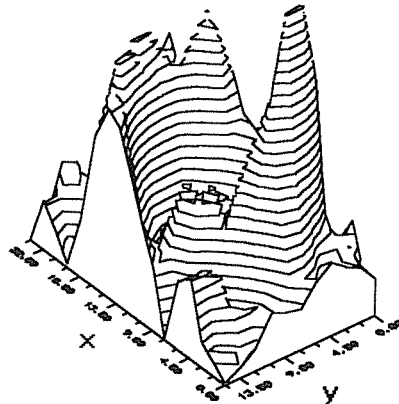
1 – Anomalia 2. «Muro enterrado a meio do perfil».



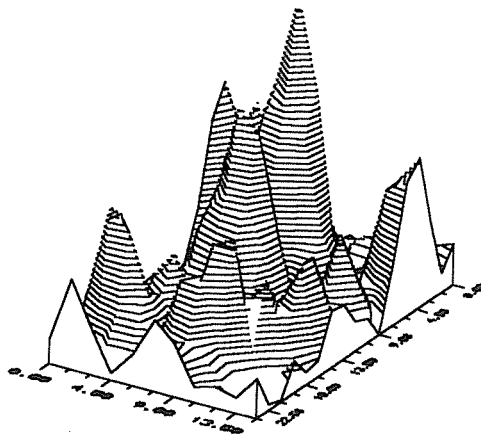
2 – Anomalia 2 filtrada pelo filtro derivativo f37.



1 - Anomalia 3.



2 - Anomalia 3 filtrada.



3 - Anomalia 3 filtrada.