

# PROSPECÇÃO GEOELÉCTRICA EM ZONAS COSTEIRAS

António Roque de Andrade Afonso

O método da resistividade foi utilizado na localização da interface água doce-água salgada, na determinação da possança, na delimitação das zonas quimicamente poluídas e no estabelecimento da topografia do substrato impermeável do aquífero freático existente na duna do Monte Gordo-Vila Real de Santo António.

O trabalho de campo de prospecção geofísica constou de 129 sondagens eléctricas verticais do tipo Schlumberger (S.E.V.), localizadas em perfis perpendiculares à linha de costa.

A interpretação das curvas de resistividade aparente das S.E.V., fez-se por um ajustamento de mínimos quadrados entre as transformadas teórica e de campo da resistividade, usando o método do máximo gradiente descendente.

Os resultados da interpretação obtidos a partir das S.E.V. foram calibrados com sondagens mecânicas, apresentando uma forte correlação com a litologia desta região do litoral algarvio.

**THE RESISTIVITY METHOD IN SEASHORE ZONES** – The resistivity method was used in the detection of the interface between fresh and saline water, in the localization of chemically polluted zones, in the study of the topography and nature of the impermeable substratum of the phreatic aquifer existing in the dunes of Monte Gordo-Vila Real de Santo António.

129 vertical electrical soundings (V.E.S.) were carried out on lines perpendicular to the coast lines.

The interpretation of the V.E.S. was performed by a least square adjustment between the field resistivity transform and the resistivity transform obtained from a model guessed "a priori", using the steepest descent method.

The results obtained from the V.E.S. interpretation are strongly correlated with the mechanical soundings in this zone of the Algarve seashore.

## 1. INTRODUÇÃO

A aplicação do método de resistividade ao estudo de aquíferos tem sido utilizada com sucesso em inúmeras regiões.

Neste trabalho usou-se o método numa zona costeira, onde o aquífero se encontra numa formação dunar cuja espessura não ultrapassa 15 metros, subjacente à qual existe uma camada constituída essencialmente por lodos ou argilas, que constituem o substrato impermeável.

Este problema foi abordado por vários autores, que usaram sobretudo o dispositivo de Schlumberger. Assim, Mendes Victor (1966) efectuou o estudo do aquífero do planalto dos Cajueiros em Porto Amélia (Moçambique), tendo estabelecido a topografia do

substrato impermeável e localizado a interface água doce-água salgada. Koefoed (1979) apresenta um estudo efectuado na região oeste da Holanda, onde numa formação arenosa, foi localizada a zona de transição entre a água doce e a água salgada, sendo a interpretação das curvas de resistividade aparente associadas aos cortes geoelectricos mais complexos, obtidas pelo ajustamento entre as resistividades de campo e teórica, usando o método do máximo gradiente descendente.

No presente trabalho, o ajustamento fez-se entre as transformadas teórica e de campo da resistividade, usando um método idêntico.

Este estudo visou sobretudo a determinação da possança, da geometria do substrato impermeável, a localização da interface água doce-água salgada e a

Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa, Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Rua da Escola Politécnica, 58, 1200 Lisboa, Portugal



determinação das zonas poluídas quimicamente do aquífero livre existente na duna de Monte Gordo-Vila Real de Santo António.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Para um meio horizontalmente estratificado e para o dispositivo de Schlumberger, a transformada da resistividade à superfície do terreno pode obter-se da relação (Ghosh, 1971)

$$T(\lambda) = \int_0^{\infty} [\rho_a(s)j_1(\lambda s)/s] ds \quad (1)$$

onde  $s$  é a semidistância entre os eléctrodos de injeção de corrente eléctrica,  $\rho_a$  é a resistividade aparente e  $j_1$  a função de Bessel de primeira espécie e ordem 1.

Introduzindo novas variáveis,  $x = \ln s$  e  $y = \ln(1/\lambda)$ , virá:

$$\bar{T}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\rho}_a(x) \bar{j}_1(y-x) dx \quad (2)$$

Esta relação é uma convolução integral e admitindo que a resistividade aparente é de espectro limitado, a transformada da resistividade pode obter-se dos valores das resistividades tomados em pontos igualmente espaçados em escala logarítmica natural

$$\bar{T}_c(y_0) = \sum_{m=Ne}^{Nd} \bar{\rho}_a(y_0 - m \Delta x) h(m \Delta x) \quad (3)$$

onde  $\Delta x$  é o intervalo de amostragem ( $1/6 \cdot \ln 10$  neste caso),  $h(m \Delta x)$  representa os coeficientes de filtragem e  $Ne + Nd + 1$  é o número de coeficientes do filtro.

A transformada da resistividade de um modelo arbitrado à "priori", pode obter-se (Koefoed, 1976)

$$T_i(\lambda) = \frac{T_{i+1}(\lambda) + \rho_i \tanh(\lambda d_i)}{1 + T_{i+1}(\lambda) \tanh(\lambda d_i) / \rho_i} \quad (4)$$

No presente trabalho, o modelo final obteve-se pelo ajustamento entre a transformada obtida das resistividades aparentes de campo e a obtida de um modelo  $p$  arbitrado "a priori", usando um método de mínimos quadrados e minimizando a relação

$$E(p) = \sum_{i=1}^{Np} [\bar{T}_c(y_i) - \bar{T}_t(y_i; p)]^2 / \bar{T}_c^2(y_i) \quad (5)$$

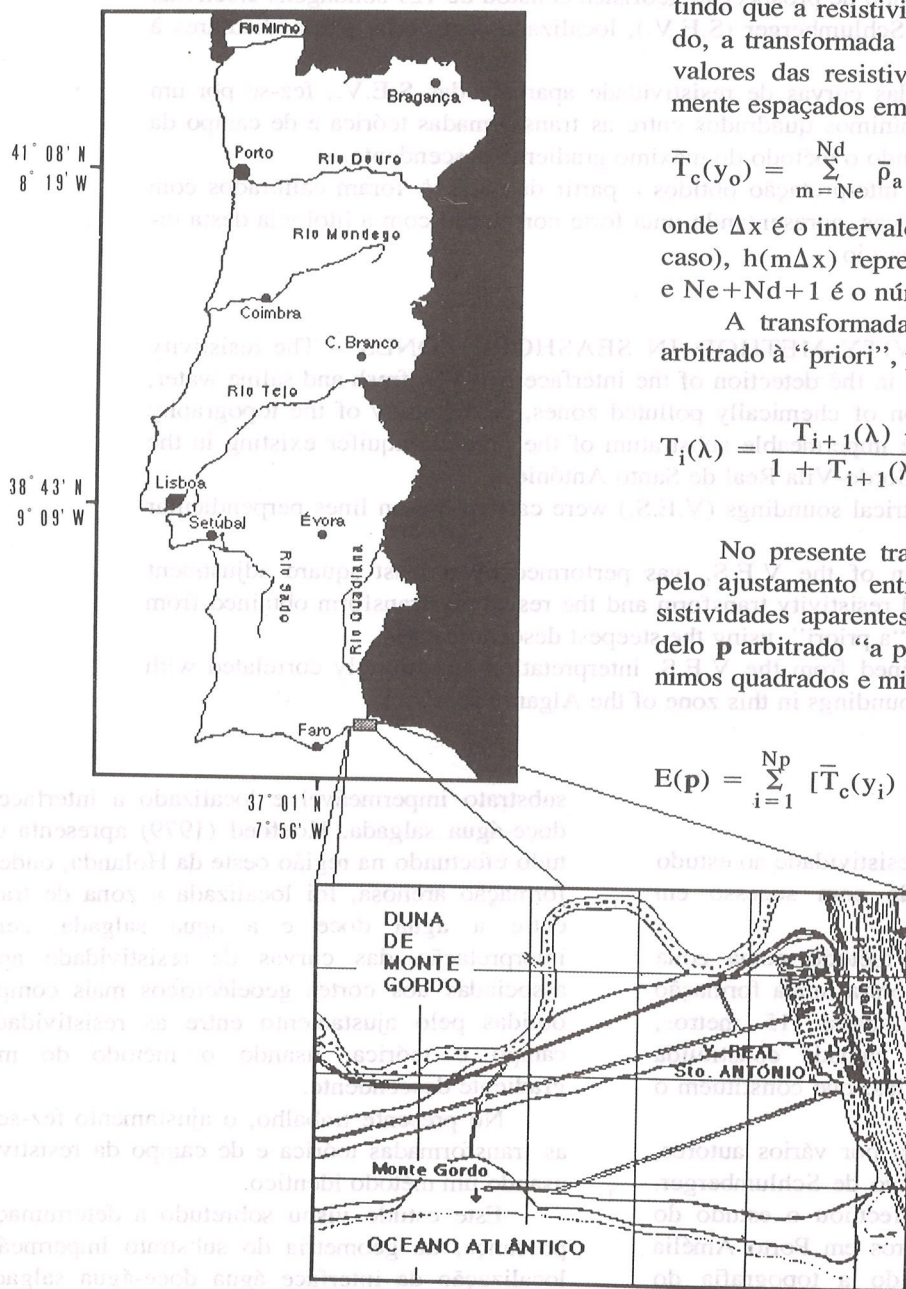


Figura 1. Localização da zona estudada.

Figure 1. Location of the surveyed region.



onde  $\bar{T}_c(y_i)$  é a transformada de campo no ponto  $y_i$  e  $\bar{T}_t(y_i, p) = \bar{T}_t(y_i, d_1, d_2, \dots, d_{n-1}, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$  é a transformada teórica para o corte geoelectrico  $(d_1, d_2, \dots, d_{n-1}, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$  no mesmo ponto.

### 3. DESCRIÇÃO E TRABALHO DE CAMPO

A área estudada encontra-se no extremo SE de Portugal (Fig. 1). É uma zona em que as formações superficiais são constituídas sobretudo por areia de duna que constituem a matriz porosa de um aquífero freático, limitado a sul pelo Oceano Atlântico, a leste pelo rio Guadiana e a norte pela ribeira da Carrasqueira. A oeste a duna continua em direcção à Praia Verde. A região forma praticamente uma península (Fig. 2) e apresenta a norte uma zona agrícola, e a sul uma zona de pinhal onde estão implantadas as captações de água para abastecimento público às vilas de Monte Gordo e Vila Real de Santo António. O aquífero é submetido a exploração intensa nos meses de verão devido à grande afluência de turistas, estando sujeito a fenómenos de salinização provocados pelo avanço da interface água doce-água salgada associados à diminuição do fluxo de água doce no sentido do mar e do Guadiana.

Está ainda sujeito na zona agrícola, a fenómenos de poluição química provocados pelos adubos.

Os trabalhos de prospecção efectuados integraram-se no estudo do comportamento e modelação matemática do aquífero já mencionado (Andrade Afonso, 1987), e a aquisição dos dados de campo fez-se utilizando sobretudo o dispositivo de Schlumberger, tendo-se efectuado 129 sondagens eléctricas verticais (Fig. 2).

Na zona agrícola, a resistência do contacto entre os eléctrodos e a areia, com uma percentagem elevada de matéria orgânica era relativamente baixa, não tendo surgido dificuldades na escolha dos locais de implantação das sondagens. Todavia, na área do pinhal, a resistência do contacto, muito elevada, tornou bastante difícil a aquisição dos dados de campo. No entanto, sempre que tal foi possível as sondagens foram implantadas segundo perfis perpendiculares aos limites da área em estudo, apertando a malha nas proximidades do mar, do Guadiana e da Ribeira da Carrasqueira, para detectar a geometria da interface água doce-água salgada.

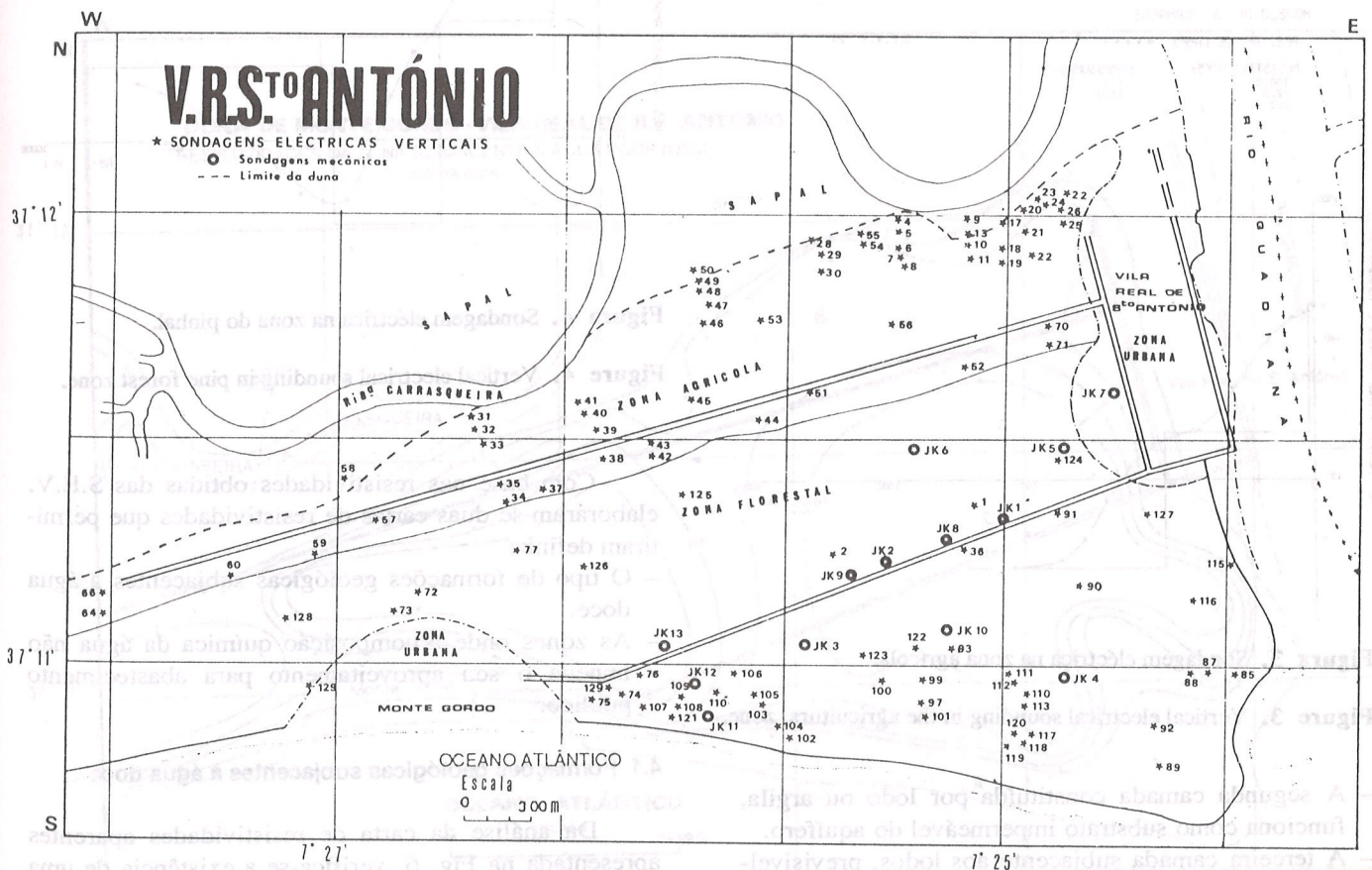


Figura 2. Carta da implantação das sondagens.

Figure 2. Map of the soundings implantation.



#### 4. INTERPRETAÇÃO

A resistividade da zona saturada de qualquer aquífero, depende da resistividade da matriz rochosa e da do electrólito que preenche os vazios existentes nesta. O aumento da concentração de iões, provenientes dos adubos na zona agrícola ou existentes na água do mar nas zonas limítrofes do aquífero, origina um aumento da condutividade eléctrica, detectável pelo método da resistividade. Os modelos obtidos da interpretação das curvas de resistividade foram calibrados com os dados de poços existentes e apontam para a existência em toda a duna e até uma profundidade de cerca de 100 metros, de três camadas de espessura variável:

– A camada superficial constituída por areia de duna, forma um meio poroso no qual se encontra o aquífero. Apresenta, portanto, do ponto de vista geolétrico duas “camadas”, correspondendo uma à zona de aeração e a outra, à franja capilar e à zona de saturação. Nas zonas do aquífero onde existe interface água doce-água salgada, aparece ainda, do ponto de vista geolétrico, uma terceira “camada” que corresponde à zona saturada pela água salgada.

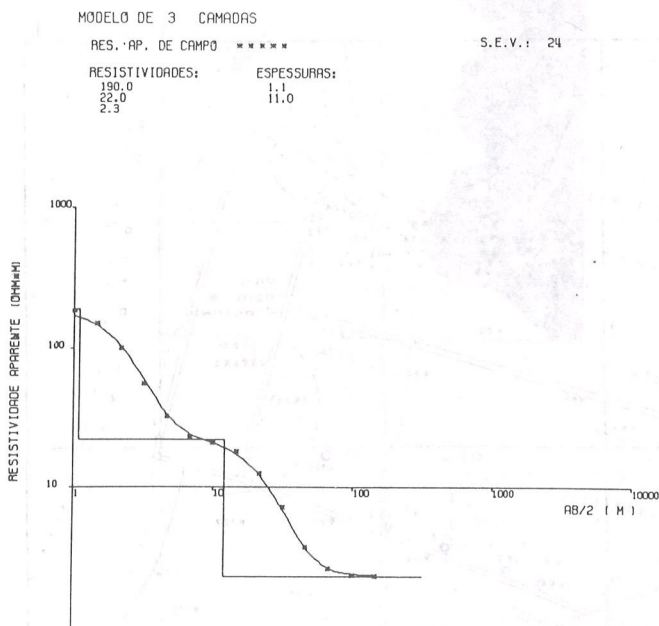


Figura 3. Sondagem eléctrica na zona agrícola.

Figure 3. Vertical electrical sounding in the agricultural zone.

- A segunda camada constituída por lodo ou argila, funciona como substrato impermeável do aquífero.
- A terceira camada subjacente aos lodos, previsivelmente arrastados pelo Guadiana. Esta camada, constituída possivelmente por calcários alterados, só excepcionalmente foi atingida devido à baixa resis-

tividade da segunda.

As resistividades da primeira camada apresentam valores bastante diferentes quer na zona de aeração quer na zona de saturação, consoante as S.E.V. tenham sido efectuadas na zona agrícola (Fig. 3), na zona do pinhal (Fig. 4) e junto ao mar ou ao Guadiana (Fig. 5). Com efeito, a presença de percentagens elevadas de matéria orgânica e de iões na zona agrícola, tornam a condutividade bastante superior à verificada na zona do pinhal. Junto ao mar e ao Guadiana, verifica-se um aumento acentuado da condutividade na zona subjacente à água doce, correspondendo a intrusão salina.

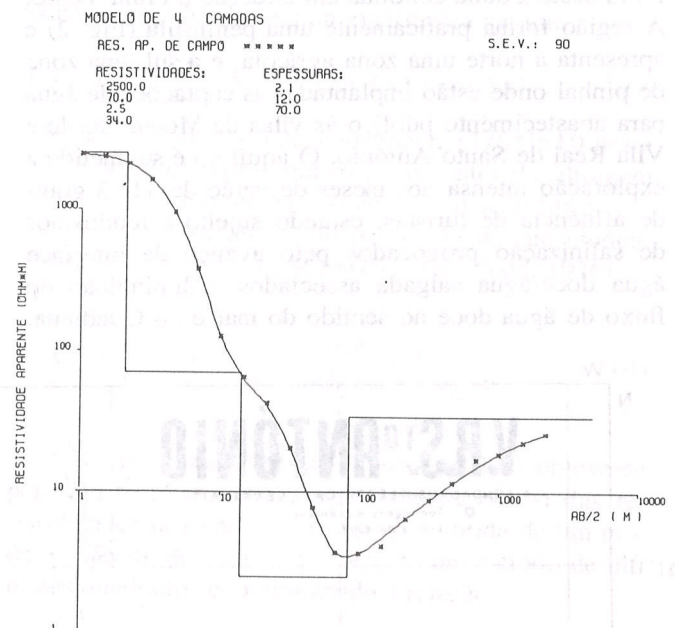


Figura 4. Sondagem eléctrica na zona do pinhal.

Figure 4. Vertical electrical sounding in pine forest zone.

Com base nas resistividades obtidas das S.E.V. elaboraram-se duas cartas de resistividades que permitiram definir:

- O tipo de formações geológicas subjacentes à água doce.
- As zonas onde a composição química da água não impede o seu aproveitamento para abastecimento público.

#### 4.1 Formações geológicas subjacentes à água doce

Da análise da carta de resistividades aparentes apresentada na Fig. 6, verifica-se a existência de uma zona de resistividades superiores a 3 ohm.m (zona C), e que corresponde “grosso modo” à zona onde estão implantadas as captações para abastecimento público.



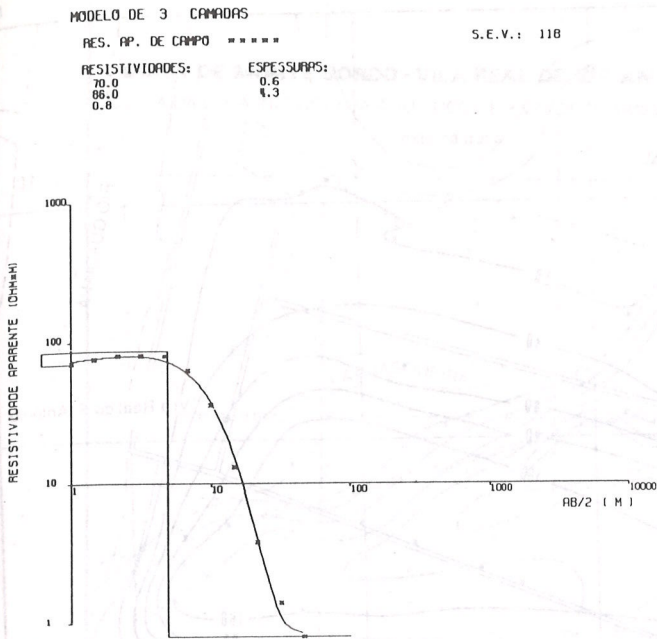


Figura 5. Sondagem eléctrica na zona de intrusão salina.

Figure 5. Vertical electrical sounding in the salt water intrusion zone.

A sua maior resistividade está associada à natureza das formações geológicas que a constituem, predominando as argilas impregnadas em água com uma concentração elevada em cloretos. Circundando esta zona e prolongando-se para W encontra-se uma área onde as resistividades variam entre 1 e 3 ohm.m (zona B). Apresenta resistividades bastante homogêneas, correspondendo a lodo impregnado de água salgada.

A zona junto ao mar e ao Guadiana (zona A), apresenta resistividades inferiores a 1 ohm.m. As resistividades muito baixas aí observadas correspondem previsivelmente a fenómenos de intrusão salina actual ou em anos recentes. Deve notar-se, que mesmo que a interface água doce-água salgada tenha recuado pelo aumento da descarga de água doce do mar, fica retida durante alguns anos na matriz porosa uma certa quantidade de água salgada.

4.2 Carta de resistividades da "cota média" do aquífero

Esta carta de resistividades (Fig. 7) permite delimitar as áreas que do ponto de vista da poluição química, apresentam aptidão para a instalação de capta-

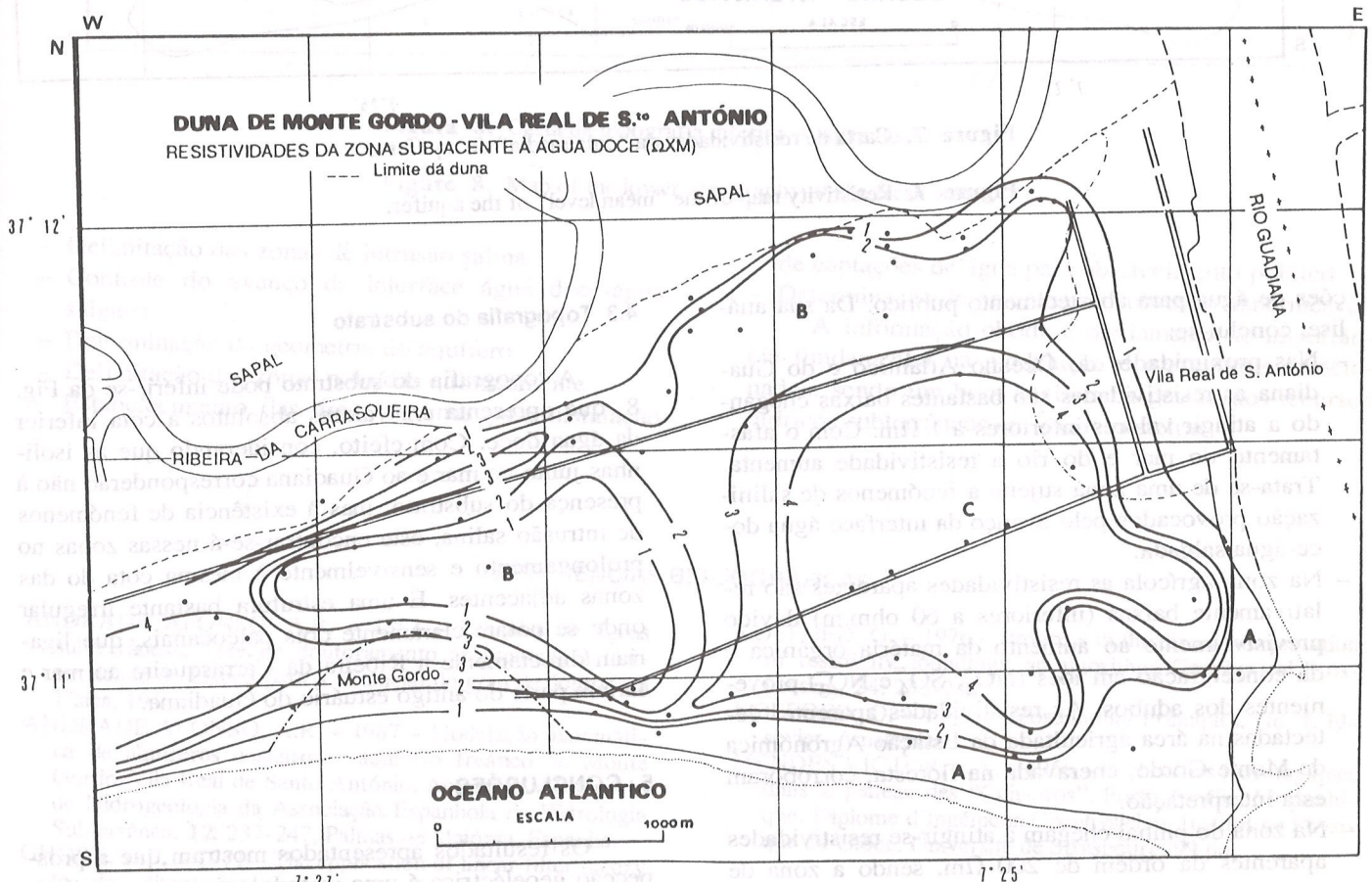


Figura 6. Carta de resistividades das formações subjacentes à água doce.

Figure 6. Resistivity of the formations underlying the fresh water.



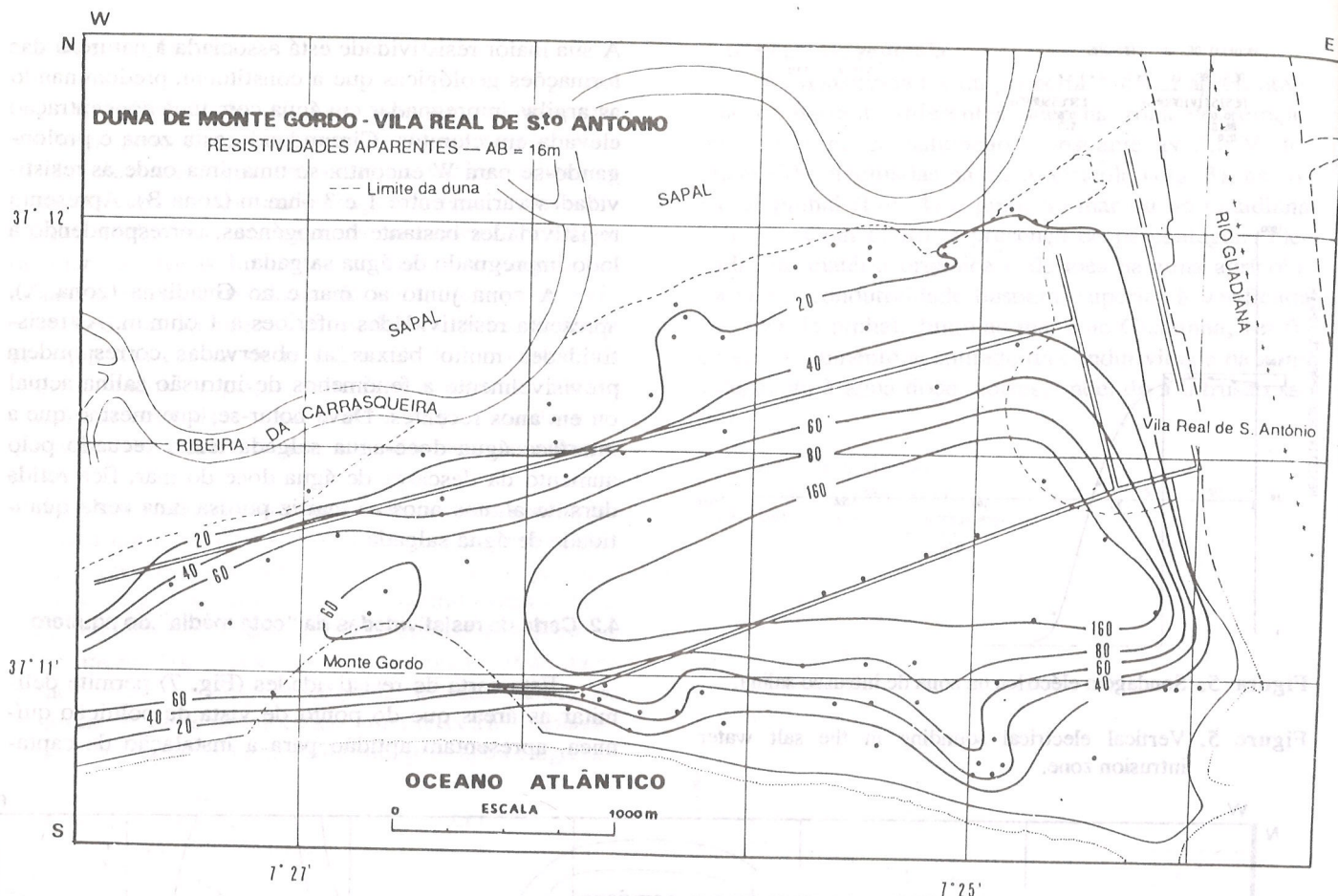


Figura 7. Carta de resistividades da "cota média" do aquífero.

Figure 7. Resistivity map of the "mean level" of the aquifer.

ções de água para abastecimento público. Da sua análise, conclui-se:

- Nas proximidades do Oceano Atlântico e do Guadiana as resistividades são bastantes baixas chegando a atingir valores inferiores a  $1 \Omega m$ . Com o afastamento do mar e do rio a resistividade aumenta. Trata-se de uma zona sujeita a fenómenos de salinização provocados pelo avanço da interface água doce-água salgada.
- Na zona agrícola as resistividades aparentes são relativamente baixas (inferiores a  $60 \Omega m$ ) devido previsivelmente ao aumento da matéria orgânica e da concentração em iões ( $NO_2^-$ ,  $SO_4^{2-}$  e  $NO_3^-$ ) provenientes dos adubos. As resistividades aparentes detectadas na área agricultada da Estação Agronómica de Monte Gordo, encravada na floresta, corroboram esta interpretação.
- Na zona do pinhal chegam a atingir-se resistividades aparentes da ordem de  $200 \Omega m$ , sendo a zona de maior aptidão para a instalação de captações para abastecimento público.

#### 4.3 Topografia do substrato

A topografia do substrato pode inferir-se da Fig. 8, que apresenta em valores absolutos a cota inferior da água doce. Com efeito, considerando que as isolinhas junto ao mar e ao Guadiana corresponderão não à presença do substrato, mas à existência de fenómenos de intrusão salina, este encontrar-se-á nessas zonas no prolongamento e sensivelmente à mesma cota do das zonas adjacentes. É uma estrutura bastante irregular onde se notam claramente dois paleocanais, que ligariam directamente a Ribeira da Carrasqueira ao mar e fariam parte do antigo estuário do Guadiana.

#### 5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram que a prospecção geolétrica é uma metodologia cuja contribuição é importante no estudo de aquíferos costeiros, permitindo nomeadamente:



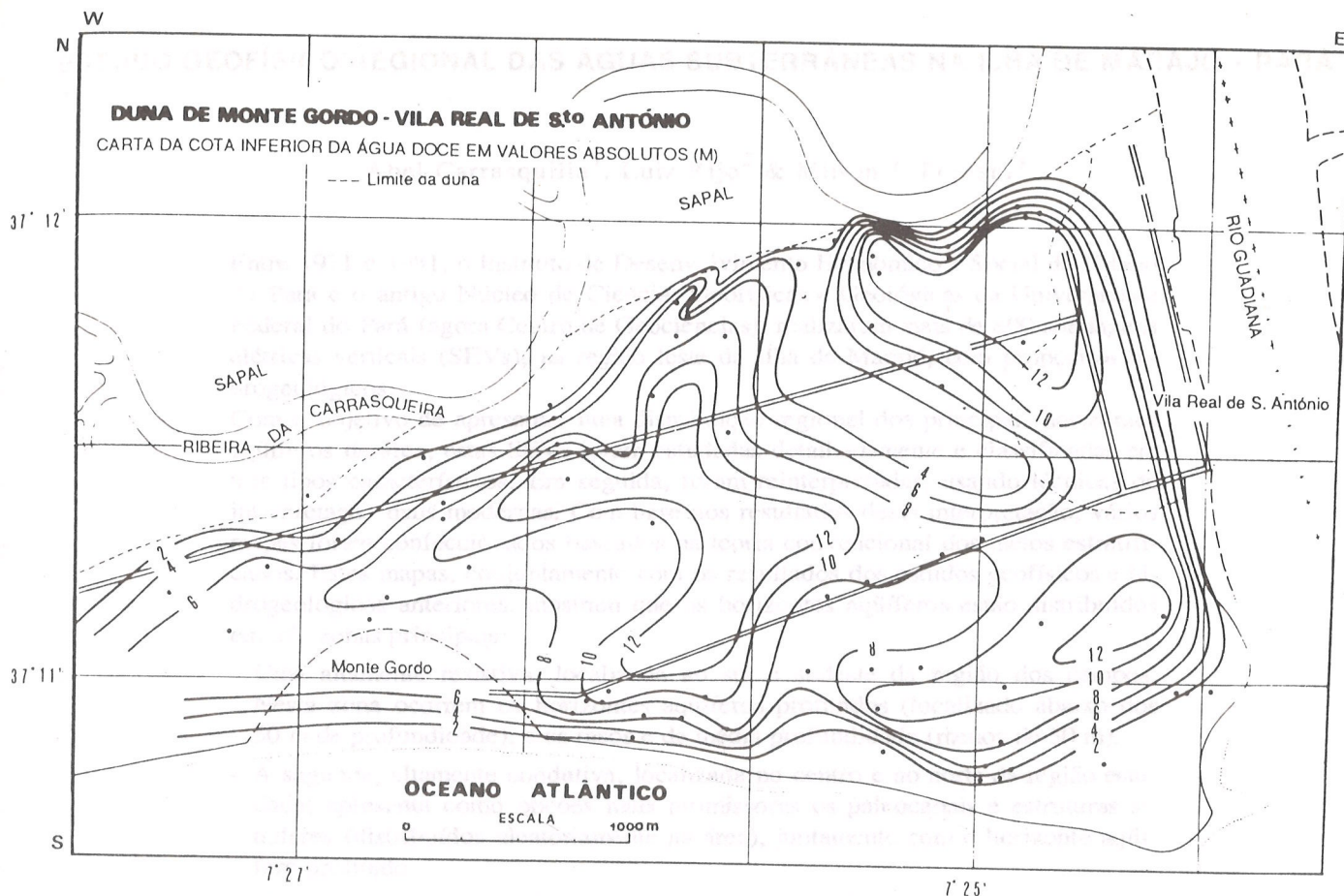


Figura 8. Carta da topografia inferior da água doce.

Figure 8. Map of the lower topography of the fresh water.

- Delimitação das zonas de intrusão salina
- Controle do avanço da interface água doce-água salgada
- Determinação da geometria do aquífero
- Delimitação das zonas poluídas quimicamente
- Estabelecimento das áreas óptimas para instalação

- Determinação da natureza do substrato impermeável

A informação obtida é obviamente de importância fundamental na modelação dos aquíferos mencionados, sendo um bom auxiliar na gestão dos recursos hídricos subterrâneos em zonas costeiras.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE AFONSO, A.R. - 1983 - Pesquisa de águas subterrâneas. Tese de doutoramento apresentada à Universidade de Lisboa para a obtenção do grau de doutor em Física, 195 pp.
- ANDRADE AFONSO, A.R. - 1987 - Modelação matemática de aquíferos costeiros - aquífero freático de Monte Gordo-Vila Real de Santo António. Actas do IV Simpósio de Hidrogeologia da Associação Espanhola de Hidrologia Subterrânea, 12: 237-247, Palmas de Maiorca, Espanha.
- GHOSH, D.P. - 1971 - The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectric resistivity sounding measurements. *Geophysical Prospecting*, 19: 192-217.

KOEFOD, O. - 1976 - Progress in the direct interpretation of resistivity soundings: an algorithm. *Geophysical Prospecting*, 24: 233-240.

KOEFOD, O. - 1979 - *Geosounding Principles*. No. 1, Elsevier, Amsterdam.

MENDES VICTOR, L.A. - 1966 - Recherches hydrologiques dans le plateau des "Cajueiros", Porto Amélia, Moçambique. Diplôme d'Ingénieur Geophysicien, Institut de Physique du Globe, Université de Strasbourg, 99 pp.

Versão recebida em: 24/11/89

Versão revista e aceita em: 02/09/91

Editor Associado: L. Rijo