

## An interdisciplinary geophysical approach to detect cavities in a karst region

*Baradello Luca, Bratus Antonio, Nieto Yabar Daniel, Paganini Paolo, Palmieri Francesco, Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale-OGS, Trieste, Italy.*

### Abstract

The aim of this research carried out by Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale-OGS Trieste, was to apply several geophysical methodologies such as ERT (Earth Resistivity Tomography), GPR, and microgravity survey to detect cavities in karst area. A well-known cavity system was chosen as the test site, in order to verify geophysical data with a real situation. The results was really satisfactory, since the methods had a very good power of investigation and they has been complementary which other. The surveying lines location was carried out in collaboration with the “Civico Museo di Storia Naturale” of Trieste.

### Introduction

The aim of this research was to integrate several geophysical methodologies to detect the presence of cavities in the karst area. The investigation was carried out in a site test which particular conditions allowed to test very well the methodologies employed. Unfortunately, due to local environmental conditions wasn't possible applied homogeneously the proposed methods. The selected area was above the Doria cave (n° 3875-3876), which is located in the Carso Triestino (Fig. 1). The choice of this site is related to particular conditions such as:

- the cavity system is well-know and was available a complete bibliography and a detailed topography survey
- the cave shows a rather regular geometry and it is placed along a horizontal axis, which direction is continuous and defined on the surface
- the cavity is divided into two branch, of which the easterly is interrupted

The comparison of data highlight the potentiality of several methodologies and it has showed a good similarity of the results.

### Geological description

The area is characterize by the presence of bioclastic limestones with high contents of fossils (Rudiste), both whole and in pieces, with lateral and vertical changes of grey limestones more thick and also black

flaky, of the Turonian inf. p.p., Senonian p.p; sometimes the rock formation takes on mud firm characteristics. The limestones belong to Borgo Grotta Gigante Member of Carso Triestino Formation, and they have a colouring from light grey to blackish, with hackly fracture and high level of karstification. Nearby the Doria cave, the rocky mass appears clearly stratified with average attitude of 320/20, and power of strata above one meter. Just this direction agrees with the total length of the under discussion cavities (n°3875-3876)

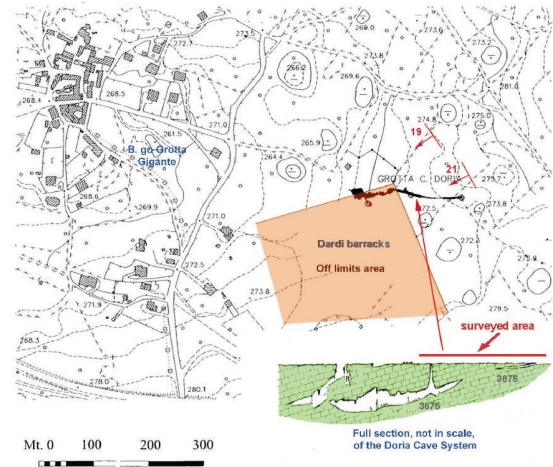


Fig. 1: The surveyed area

### Microgravity prospecting

Microgravity prospecting is particularly devoted to locate underground cavities and to obtain reliable information about the volume and the depth of the them. The anomaly's amplitude is usually very small, few tenths of  $\mu\text{Gal}$ , therefore it is imperative achieve highly accuracy during the field work and during the data processing. The microgravity measurements were made with a LaCoste-Romberg mod. D with a ZLS feedback: the electronic feedback system provides a valuable tool to eliminate the periodic errors of measurement screw and transmission, these kind of errors rise an amplitude of 3-5  $\mu\text{Gal}$ , in fact the electrostatic force acts on the lever system in order to restore (or null) it to the zero position and keep it there and the measurement screw is not moved working within the feedback range. The area surveyed covered over 4000 mq; the station separation was 5 m in the surrounding areas of the main cavity and 10 m apart in the far areas in order to detect the regional gravity field; two bases were selected as points belonging to the first order net. A total of 150 stations has been measured, according to the loop method in order to check, roughly every hour, the drift behaviour (Fig. 2).

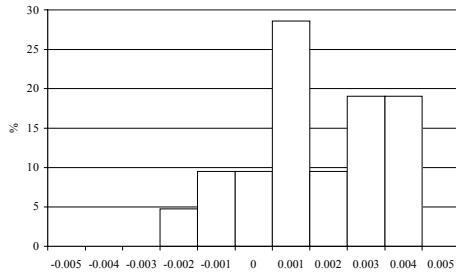


Fig. 2: drift (mGal/h)

The closure's errors lie in a range between  $\pm 0.002$  mGal (fig. 3).

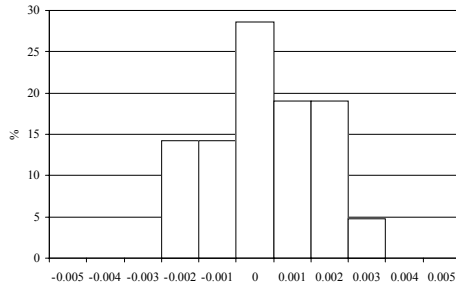


Fig. 3: closure's error (mGal)

Besides over 25% of the stations has been repeated in order to check the quality, the accuracy and repeatability of the LCR data: the results indicate that roughly 80% are in the range  $\pm 0.002$  mGal (Fig. 4). The stations' elevations have been carried out with a Leika level with an accuracy less than 0.5 cm, and the position with a total station with an accuracy less than 10 cm.

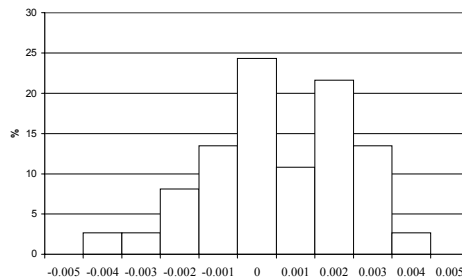


Fig. 4:  $\Delta g$  in repeated stations (mGal)

The data so collected have been processed following the usual steps:

- tidal effects using the harmonic developments
- at each observation point have been measured also the height of the top of LCR with respect to the benchmark in order to refer the gravity reading to it and the heights of the top of LCR with respect the ground in order to apply a "Bouguer correction" due to the different

penetration of the aluminium baseplate in the ground

- drift correction considering drift linear with time
- latitude correction assigning a reference latitude to the reference station (lower elevation) and computing for the other stations the correction term, according to the latitude gravity gradient
- Faye correction considering also the square term of height
- Bouguer correction taking into account also the curvature correction
- terrain correction has been automatically computed using the right prism method

The data elevation set has been obtained from a digitized map on the scale 1:5000 and from an extra height set data collected in the field in order to produce an accurate digital terrain model to be used for the inner terrain correction. For the inner zone (from 0 to 50 m) the prism size was 2.5 m, from 50 to 1000 m was 10 m; beyond 1000 m the terrain correction was constant. The anomaly map after these corrections and after the removing of the regional trend by means of a polynomial surface of 3<sup>rd</sup> order is presented fig. 5.

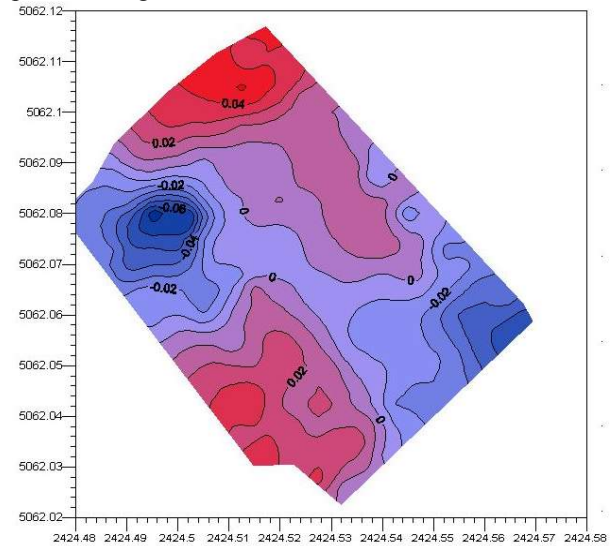


Fig. 5: Residual gravity map

From the pattern anomaly it is very clear the presence of roughly circular negative anomaly with a minimum ( $-0.060$  mGal) located in the position  $X=2424.498$  and  $Y=5062.079$ , whose corresponds a deficit of mass, applying the Gauss theorem, about 335 tons.; besides this anomaly shows an elongation along the NW-SE direction, other area with a negative trend is located in the SE border with a minimum of  $-0.040$  mGal.

## Earth Resistivity Tomography

To collect DC data, a Syscal R2 equipment by Iris Instruments was employed. A multinode lines survey with 32 electrodes were disposed. The electrode spacing was 4 m and the line was just over the cave system. A polar dipole-dipole geometry array was used because it yielded a much more detailed image of the subsurface, which is essentially composed of a highly inhomogeneous overburden and a bedrock. The apparent resistivity data were inverted using the RES2DINV software (Loke and Barker, 1996), selecting the robust inversion option because of some noise amount on the data, due to shallow inhomogeneities and sometimes to difficult ground contacts. The amount of information on the cave system and an existing detailed topographic survey

are a test for comparing the resistivity model with the real situation. The limestone resistivity is between 1000 and 5000 ohm/m, higher values indicate void presence, lower unconsolidated deposits and soil. The model (fig 6) detects an high resistivity body between 48 and 68m at a depth of about 4 m and a lengthened high resistivity between 76 and 100m that corresponds to the cavity n. 3876. On the right part of the model, the low resistivity values indicates the presence of unconsolidated deposits due to a typical karst morphology. The high resistivity body between 48 and 68 seems define a unique cave instead of two different caves, as suggested by the Civico Museo di Storia Naturale of Trieste. The model indicates that the bedrock is close to the surface and the soil has a maximum thickness of 2,5 m.

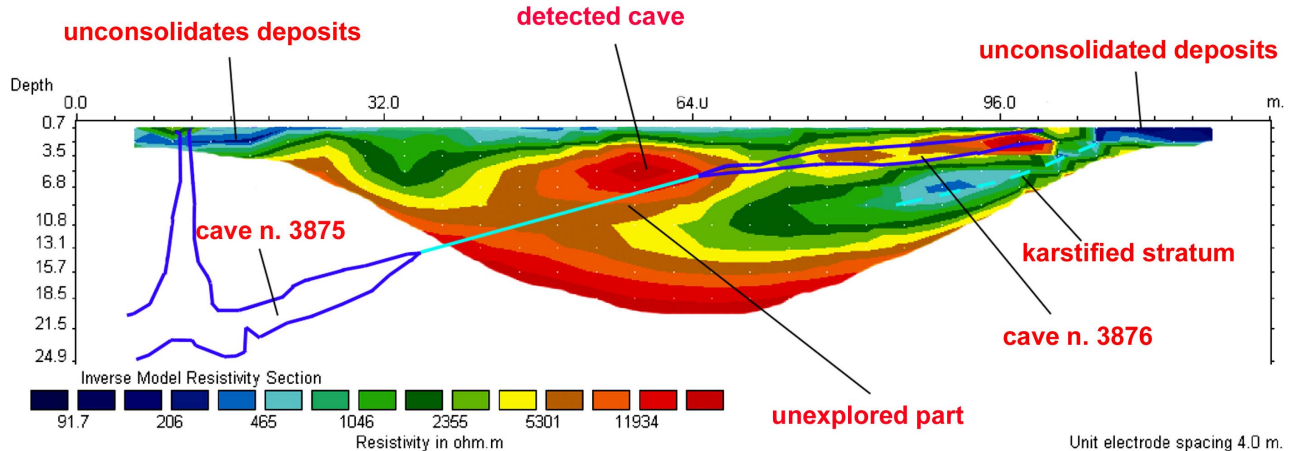


Fig. 6: Resistivity model

## GPR survey

A GPR investigation was carried out between the two well-known caves. The GPR grid was a pseudo three-dimensional acquisition: a total of 22 parallel profiles up to 20 m long with the separation between adjacent profiles of 2 m and intertrace of 2 cm. Three perpendicular profiles were acquired too. Then georadar data were recorded over 800 mq area. The surface survey was performed using a georadar SIR2000-GSSI system equipped with monostatic shielded antennas having nominal centre frequency of 70MHz (SUBECHO). After several antennas tests, we chose 70MHz because this frequency permitted a good penetration and a reasonable resolution for our study. During acquisition the transmitter was carried coupling to soil to avoid reflections from air events.

Every trace had 1024 samples with a sample interval of 683.5 ps, therefore a time window of 700 ns. Data showed a good Signal/Noise ratio, therefore the multi-fold technique was not necessary (Pipan et al., 1999). Whole dataset was processed with GRADIX software. After geometry, the steps of processing were: 1) Time-zero drift correction; 2) Background removal algorithm with a mean of traces without strong targets; 3) Amplitude analysis and gain function (Spherical divergence correction and AGC); 4) Band-pass filter; 5)  $f-k$  migration; 6) Building of cuboid and his interpretation

A first shallow continuous reflector is visible on all sections: it's the discontinuity between a soil and limestone. The thickness of soil varies from 150 cm to few centimetres. In many profiles we can see very well the geological stratification of the area



investigated. A large variety of scattered signal supposes the probably presence of materials with several cracks and fracture zones. In several lines there was a strong hyperbolic-shape signal. The  $f-k$  migration with a velocity of 10 cm/ns focused very well the energy into a spot and has clarified the location and geometry of this signal (Fig. 7). To estimate the average velocity of the investigated site we used wide-angle reflection and refraction (WARR) method. We collected a few WARR and then we calculated georadar velocity with semblance. The velocity range of reflections checked was stable between 9 and 10 cm/ns, a typical characteristic velocity of limestone. In this case the resolution obtained is 50-60 cm.

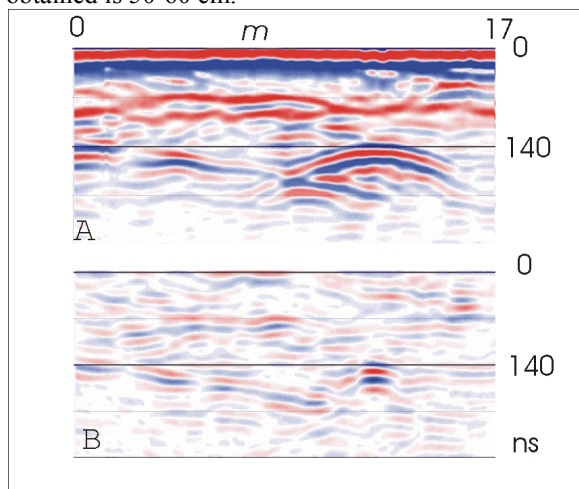


Fig. 7: The same profile (a) before and (b) after  $f-k$  migration. The algorithm focuses the top of the cavity and a dipping continuous reflector.

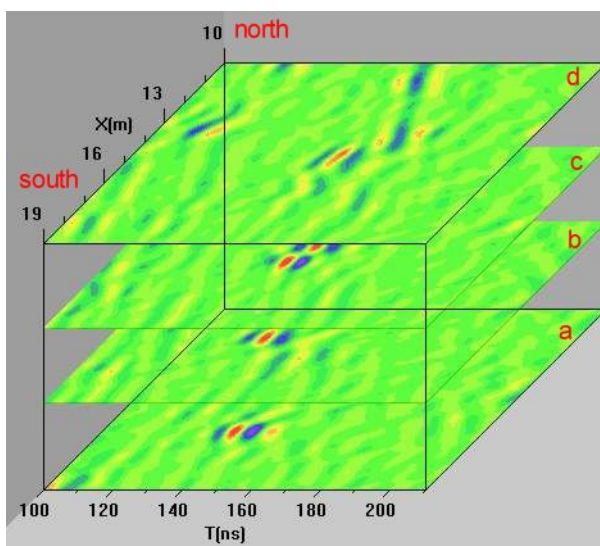


Fig. 8: A cuboid composed by four migrated sections. The strong central signal shows the cavity.

The Fig. 8 shows four adjacent migrated sections displaying into cuboid. The interesting target is 1.5-2 m width and 7 m deep. We can see that signal goes to the bottom and moves from south to north through section (a) to (d). Probably it is a cave that connects the two cavities 3875 and 3876. This signal is not visible on all lines and therefore we can stand that either there is a third cavity or it's a tunnel that connected the two cavities and now partly collapsed. Loading all georadar data collected into a cuboid allows us to do a good interpretation: so we can follow one reflector using several sections (inline, crossline, arbitrary plane and time slice) (Grasmueck, 1996).

## Conclusions

Even if conducted following all the procedures to reduce the data inaccuracies (during the field and processing steps), where the microgravity prospecting has been tested with a station separation of 5 m, mainly in the central-west side of the area, the anomalies reflect very well the underground features, instead where the station separation was 10 m (mainly in the SE side of the area) the anomalies loose in definition and don't depict with accuracy the aimed target. The GPR and ERT, carried out in the same areas, have reach a good resolution and they has shown a good data's congruence. Particularly, it has been possible not only define the cavity 3876, but also it has been highlighted an unknown cavity (probably the prosecution) between the main cavities (n°3875-3876).

## References

- Di Filippo M., Maniscalco A., Marson I., Palmieri F., Samir A., Toro B., 1986, Studio microgravimetrico per la ricerca di cavità nel centro storico di Zagarolo (Roma); Proceedings 5° Congress GNGTS.
- Forti F.; 1961: Studio Geomorfologico della Grotta "Costantino Doria" N. 3875 V.G. In: Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", Tipo-Litografia Leghissa, Trieste, pp. 5 – 16.
- Grasmueck , M, 1996, 3-D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss; Geophysics, v. 61, n. 4, pp. 1050-1064.
- Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996, Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131-152.
- Pipan M., Baradello L., Forte E., Prizzon A., Finetti I. 1999, 2-D and 3-D processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar data: a case history from an archaeological site. J. Applied Geophysics, v. 41, n. 2-3, pp. 271-292.



# Aplicação de Ensaios Elétricos e Eletromagnéticos em Problema de Poluição Ambiental

Jorge Eduardo da Silva<sup>1</sup>, Elaine Maria Lopes Loureiro<sup>1</sup>, Vagner Roberto Elis<sup>1</sup>, Francisco Yukio Hiodo<sup>1</sup> & Jorge Luís Porsani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo – Email: [quartafeira@hotmail.com](mailto:quartafeira@hotmail.com)

## Abstract

This work aims at the detection of the contamination caused by a waste disposal area, through the electric geophysical methods of resistivity, induced electromagnetics. Field measurements had been carried out in Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil, in a deactivated waste disposal area. The obtained data had been dealt with appropriate softwares that enabled the distinction of the anomalies which help the characterization of the environmental pollution problem.

## Resumo

Este trabalho visa o estudo de contaminação causada por um lixão, através dos métodos geofísicos da resistividade, eletromagnético indutivo. Os trabalhos foram realizados em Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, em um lixão desativado. Os dados obtidos foram tratados com softwares apropriados que possibilitaram o realce das anomalias, as quais auxiliaram na caracterização do problema ambiental causado.

## Introdução

Exemplos de aplicação de geofísica no estudo da contaminação gerada por resíduos urbanos podem ser encontrados na literatura desde o final da década de 60 e início dos anos 70, sendo o método da eletrorresistividade amplamente utilizado (Stollar & Roux, 1975; Kelly, 1976). Elis & Zuquette (1997) e Elis (1999) mostraram a possibilidade de aplicação dos métodos da eletrorresistividade, com o uso de sondagens elétricas verticais e caminhamento elétrico dipolo-dipolo no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos urbanos e industriais. Foram obtidas informações importantes, como profundidade da zona saturada, fluxo subterrâneo, posição dos resíduos, formato e extensão da pluma de contaminação. Neste trabalho foram utilizados os métodos elétricos da resistividade para detecção da pluma de contaminação originada por um lixão desativado. A área estudada situa-se na região de Ribeirão Preto situada na porção nordeste do estado de São Paulo, Brasil, latitude  $21^{\circ}10'$ , longitude  $47^{\circ}48'$ . Os dados obtidos foram tratados com softwares apropriados que possibilitaram o realce das anomalias relacionadas às zonas com problemas de contaminação.

## Caracterização da Área e Es

A área caracteriza-se como um divisor de águas superficiais que tem como substrato rochoso os arenitos não silicificados da Formação Botucatu, como pode ser observado no mapa da Figura 1. Esse material é recoberto por materiais inconsolidados constituídos na parte inferior por solos residuais dos arenitos e na parte superior por materiais argilosos retrabalhados e oriundos das áreas mais elevadas topograficamente constituídas pelos magmatitos (basaltos) da Formação Serra Geral (Zuquette et al, 1990). No local de estudo através dos métodos geofísicos foram dispostos aproximadamente  $600.000 \text{ m}^3$  de resíduos sólidos domésticos em duas cavas alongadas com profundidade média de 10 metros (Figura 2).

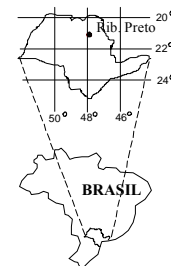
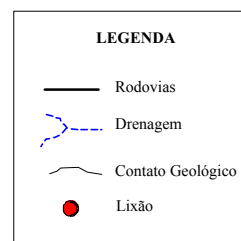
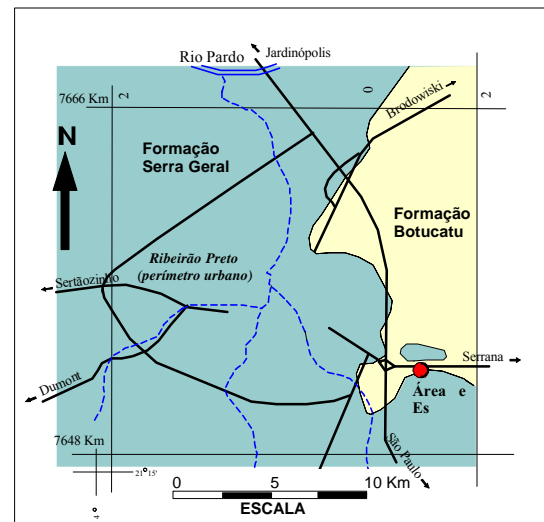


Figura 1- Localização da área de pesquisa.

## Aplicação de Ensaios Elétricos e Eletromagnéticos em Problema de Poluição Ambiental.

### Me a

O método da eletrorresistividade emprega uma corrente elétrica artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados de A e B), com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados de M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície. A resistividade (e seu inverso, a condutividade) de solos e rochas sofre a influência da quantidade de água contida e da salinidade dessa água, o que permite uma imensa possibilidade de aplicação do método em estudos ambientais e hidrogeológicos, sendo a presença de água e de substâncias contaminantes facilmente detectadas. A variedade de técnicas de aplicação de ensaios (caminhamentos e sondagens) conferem ao método uma versatilidade muito grande, que possibilita, no caso específico de áreas de disposição de resíduos a aplicação de técnicas e arranjos diferentes que atendem às necessidades de investigação dos mais variados parâmetros importantes para a caracterização da área e determinação da zona contaminada. A técnica utilizada neste trabalho foi o caminhamento dipolo-dipolo com espaçamento de 10 que possibilitou a observação da variação de resistividade aparente em cinco níveis teóricos.

O método eletromagnético indutivo utilizada duas bobinas: uma transmissora Tx e outra receptora Rx. Acoplada a bobina transmissora existe um módulo de controle e emissão de corrente elétrica, alimentado por uma bateria. À bobina receptora está acoplado um módulo de leitura que fornece valores de condutividade aparente do terreno. Durante a operação, é injetada uma corrente alternada na bobina transmissora, que vai gerar um campo magnético primário  $H_p$ , ortogonal à disposição da bobina. Esse campo magnético primário vai induzir correntes elétricas no subsolo, sendo assim energizado. Passando por um condutor, essas correntes vão dar origem há um campo magnético secundário  $H_s$ , que será lido pela bobina receptora, juntamente com o campo magnético primário. A razão entre  $H_s$  e  $H_p$  é usada pelo equipamento para medir diretamente a condutividade aparente.

As bobinas podem ser dispostas em duas configurações: coplanar horizontal e vertical, o que altera a profundidade teórica de investigação.

Na área de estudo foram realizadas quatro linhas de caminhamento elétrico e eletromagnético (Linhas C1 a C4). As linhas C2 a C4 estão posicionadas sobre as cavas e a Linha C1 está posicionada a norte das cavas, a jusante do fluxo subterrâneo local. Essa disposição dos ensaios possibilita avaliar se a contaminação está restrita às cavas ou se está ocor-

rendo migração de contaminantes dentro da zona saturada. Os dados dos ensaios elétricos e eletromagnéticos foram apresentados utilizando o software Surfêr 7.0 da Golden Software, Inc.

### Res a s

Os ensaios realizados permitiram elaborar pseudo-seções de resistividade e condutividade aparente com vários níveis de investigação possibilitando a observação de zonas anômalas. Tais anomalias são relacionadas a presença de resíduos e líquidos poluentes das cavas e da infiltração de poluentes (chorume) no solo que penetram na zona saturada sendo dispersos pelo fluxo de água. As pseudo-seções de resistividade aparente e condutividade aparente da Linha C1 (**F ras 3 e 4**) ilustram bem esta última situação, pois os ensaios foram feitos fora das cavas do lixão, mas no entanto apresentam anomalia de baixa resistividade e alta condutividade entre 120-80m entre as profundidades teóricas de 20 e 30m, indicando que a contaminação está avançando dentro da zona saturada e para fora da área do lixão. As pseudo-seções da Linha C4 (**F ras e**) foram realizadas cortando as cavas e apresentam zonas de baixa resistividade e alta condutividade entre 80 e 220m, da superfície até a profundidade teórica de 30m. Essas anomalias condutivas representam as cavas preenchidas com resíduos e chorume.

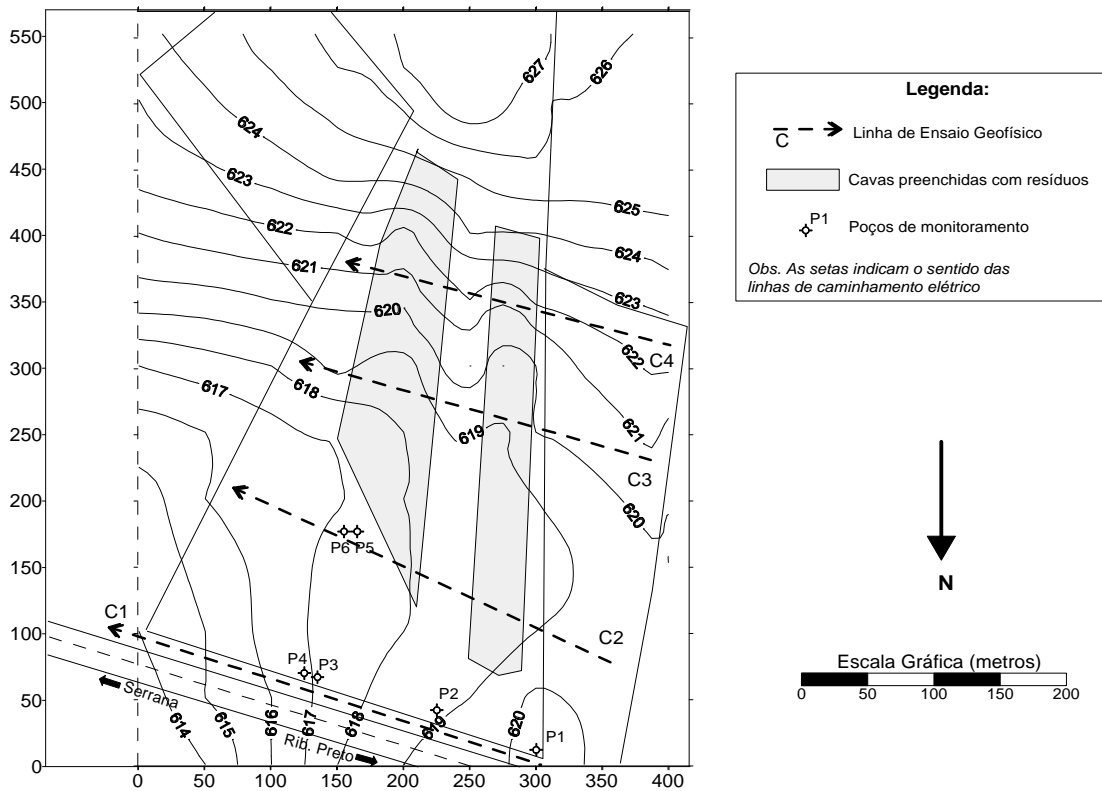
### Bibliografia

- ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. - 1997 - Determinação da estrutura do aterro sanitário de Ribeirão Preto - SP através de métodos geoeletricos. *Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo (SP), Vol 1*, pp. 417-420.
- ELIS, V. R. - 1999 - *Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos*, Tese de Doutorado, São Paulo-SP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Unesp, Rio Claro/SP. (inédita)
- KELLY, W.E. - 1976 - Geoelectric Sounding for delineating groundwater contamination. *Ground Water 14 (1)*, pp. 6-10.
- STOLLAR, R.L. & ROUX, P. - 1975 - Earth resistivity surveys - A method for delineating groundwater contamination. *Ground Water 13 (2)*, pp. 145-150.

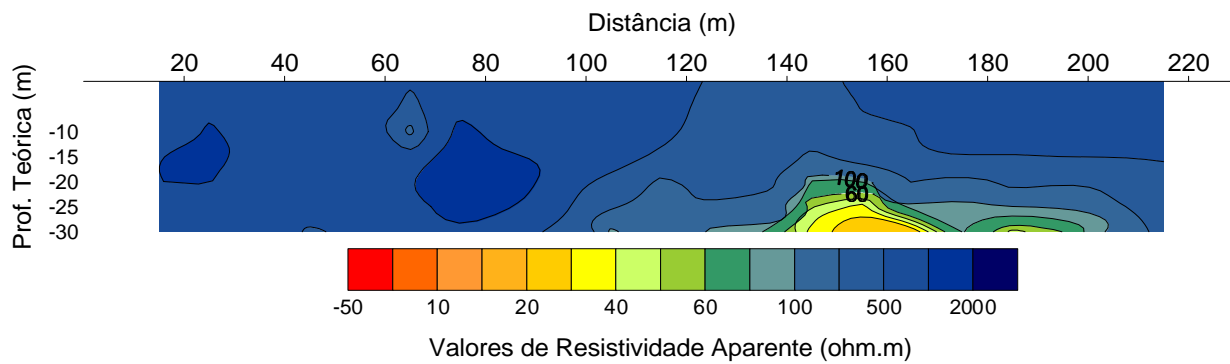
## Aplicação de Ensaios Elétricos e Eletromagnéticos em Problema de Poluição Ambiental.

ZUQUETTE, L.V.; GANDOLFI, N. & PEJON, O.J.  
 - 1990 - O mapeamento geotécnico na previsão  
 e prevenção de riscos geológicos em áreas ur-

banas. *I Simpósio Latino Americano sobre Risco Geológico Urbano*, São Paulo-SP, pp. 305-315.



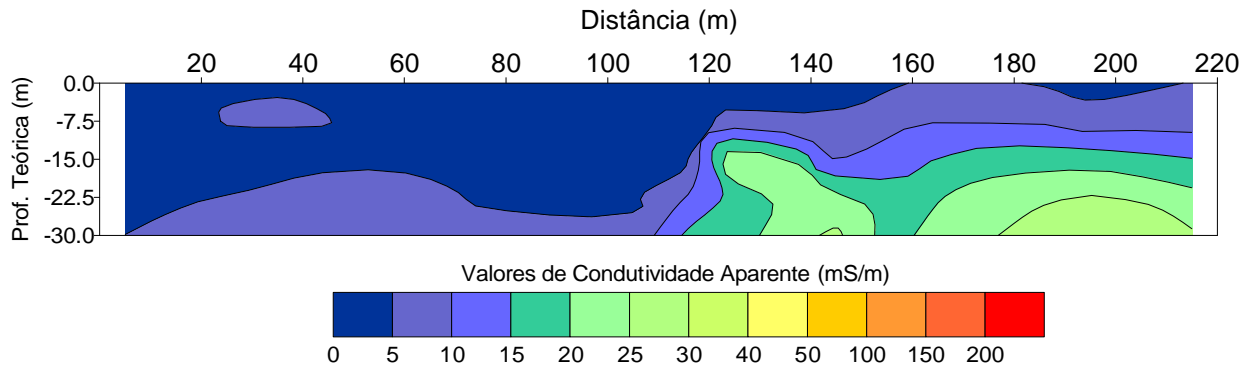
**F ra 2-** Localização das linhas de ensaio.



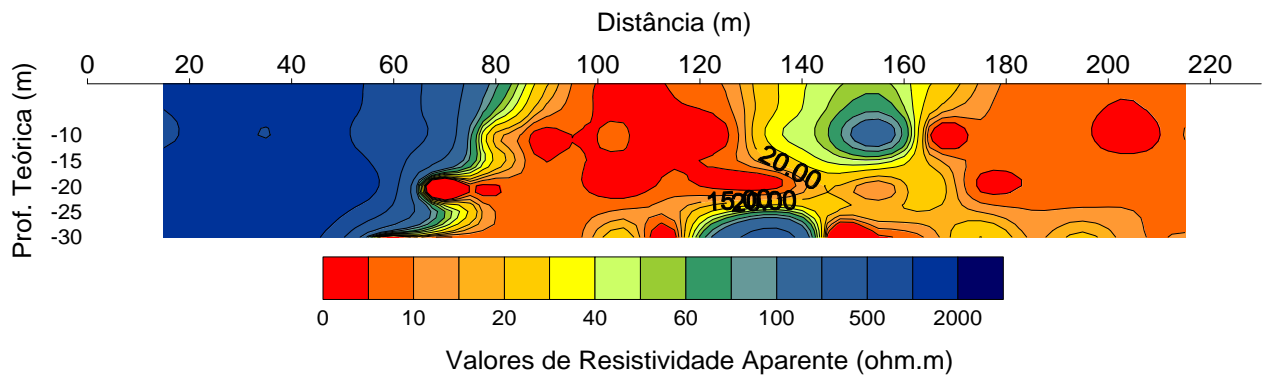
**F ra 3 –** Pseudo seção de resistividade aparente – Linha C1



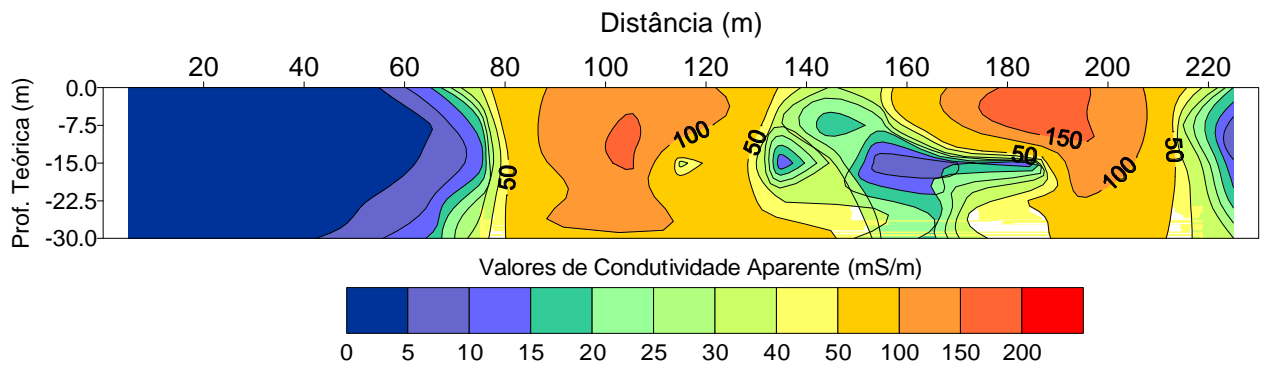
## Aplicação de Ensaios Elétricos e Eletromagnéticos em Problema de Poluição Ambiental.



**F ra 4** – Pseudo seção de condutividade aparente – Linha C1



**F ra** – Pseudo seção de resistividade aparente – Linha C4



**F ra** – Pseudo seção de condutividade aparente – Linha C4



## CARACTERIZAÇÃO DE PALEOAMBIENTE SUBMARINO COM SIDE SCAN SONAR, ECOBATÍMETRO E AMOSTRAS DE FUNDO – BACIA DE CAMPOS - RJ

Anídio C.T.Corrêa, LAGEMAR-UFF, Brasil – Luiz A.P.Gamboa, PETROBRÁS, Brasil – Georgina O. Castaños, (georgina@unisys.com.br)

### Abstract

Side scan sonar images acquired by Petrobrás in Campos Basin during the year of 1998, presented large linear features which lay down on the sea floor, at a water depth of 110m. The features were also registered in bathymetric profiles and have been operationally described as *beachrocks*.

In this study, specially designed softwares for digital image processing allowed a better view of one of these occurrences, in the central portion of Campos Basin, in an area close to the shelf brake.

Based on the studies conducted on the sonographic images, regarding the submarine environment and the information provided by samples, which were collected directly from the sea floor, the features were assumed to be old sand ridges which laid down along the shoreline. Afterwards, the ridges were cemented, in a period of time during which the relative sea level was stabilized, which is thought to have happened 15.800 years BP. When the sea level re-start to rise up, the morphologies were drowned, becoming a rigid substratum for the installation of thick algal banks.

### Introdução

Na Bacia de Campos, feições submarinas de grande extensão linear e expressivo relevo positivo, foram registradas em levantamentos de sonar de varredura lateral e em perfis de ecobatímetro a profundidades de -110m, sendo referidas, operacionalmente, como sendo *beachrocks*.

Neste estudo, programas de processamento e interpretação de imagens digitais permitiram uma melhor visualização de uma ocorrência desses lineamentos, na porção central da Bacia de Campos, próximo à borda externa da plataforma continental.

Com base na interpretação das imagens sonográficas do ambiente submarino e em informações litológicas de sedimentos do assoalho marinho, as feições foram interpretadas como remanescentes de paleo-cordões litorâneos. Estes paleo-cordões teriam sido expostos a um processo de cimentação diagenética, durante um período de estabilização do nível do mar, cuja ocorrência está estimada em torno 15.800 anos BP. Após a retomada do movimento de subida do nível do mar, essas morfologias foram afogadas, passando a servir de substrato para a implantação de espessos bancos de algas coralíneas.

### Localização e características da área

A área estudada situa-se na porção central da Bacia de Campos, à profundidade de 110m, em uma região caracterizada como de transição entre a borda externa da plataforma e a porção superior do talude continental (Vianna, 1998). Suas coordenadas limites são: latitudes 22°17'S e 22°26'S e longitudes 40°31'W e 40°18'W.

Em termos oceanográficos a região é atravessada, predominantemente, pela porção superior da Corrente do Brasil, que se desloca para de NE para SW com velocidades oscilando em torno de 0,25 m/s. Entretanto, eventuais entradas de frentes frias vindas de S-SW, provocam inversões desta corrente que, temporariamente, passa a se deslocar para N-NE com velocidades de 0,5 m/s (Lima, 1998). Em termos geomorfológicos, trata-se de uma região submarina predominantemente plana, em cujo relevo se destacam apenas os lineamentos alvo do presente estudo e campos de *sandwaves* de pouca expressão. Feições menores associadas a construções de origem biológica estão também presentes.

### Os registros sonográficos

Levantamentos de sonar de varredura lateral realizados pela Petrobrás durante o ano de 1998, registraram feições lineares de grande extensão longitudinal, dispostas no assoalho marinho ao longo da direção NE-SW (Figura 1). O mosaico ilustrado na Figura é composto por seis linhas de levantamento, com uma superposição média de 50%. As linhas foram adquiridas com equipamento modelo 260 da EGG, rebocado à uma altitude média de 45m em relação ao fundo do mar. As imagens foram georeferenciadas com o programa Vista e "mosaicadas" com o programa ER-Mapper.

As feições dos lineamentos destacam-se na imagem, apresentando um marcante paralelismo entre si e, também, com a linha de costa atual. O lineamento situado mais a sul, apresenta-se mais contínuo e retilíneo, alcançando até 16 km de extensão. O lineamento mais a norte constitui-se de segmentos menores, de orientação mais irregular. Na porção oeste da imagem, observa-se, ainda, a presença de vários segmentos de lineamentos de pequena extensão, dispostos

## Side Scan Sonar

entre os dois lineamentos principais, guardando com estes um estreito paralelismo.

Em quase toda a sua extensão, os lineamentos apresentam uma expressiva sombra sonográfica, evidenciando a presença de um significativo relevo em relação ao assoalho oceânico adjacente.

Dados registrados pelo ecobatímetro confirmaram que estas morfologias constituem um expressivo relevo positivo no fundo do mar (Figura 2). Na Figura observamos que o lineamento situado mais a sul apresenta um desnível em relação ao assoalho marinho muito maior do que aquele registrado pelo lineamento situado mais a norte.

### Amostras litológicas

Apesar de serem referenciados, informalmente, como sendo *beachrocks*, até hoje, nenhum trabalho científico realizado naquela área, recuperou amostras litológicas que caracterizassem essas feições como sendo realmente constituídas de *beachrocks*. Amostragens realizadas anteriormente na área recuperaram, predominantemente, concreções algálicas na forma de crostas carbonáticas e rodolitos, evidenciando uma vasta região de ocorrência de algas coralináceas do gênero *Lithothamnium*.

Recentemente, um testemunho recuperado sobre a crista do lineamento mais a sul apresentou aproximadamente 1,3 m de sedimentos constituídos essencialmente de concreções carbonáticas (predominantemente crostas) imersos em uma matriz de argila terrígena com elevados teores de lama carbonática. Localmente, o testemunho assume feições conglomeráticas, com variadíssimo conteúdo bioclástico (Corrêa, 2001, no prelo).

### Interpretação das Feições

Inúmeros trabalhos realizados ao longo da costa brasileira descrevem feições lineares submarinas de relevo positivo e situadas à profundidades próximas a 110m. Em todos eles, essas feições estão associadas a um período de estabilidade do nível do mar, ocorrido durante a última transgressão holocênica (Kowsman, et al, 1976, Kowsman e Costa, 1979, dentre outros). As feições aqui estudadas, por suas características de linearidade e paralelismo em relação à linha de costa atual, levam-nos imediatamente a interpretá-las, também, como sendo morfologias que representam uma antiga posição da linha de costa.

Entretanto, pelas expressivas dimensões de seu relevo e pela forma abrupta como afloram do assoalho submarino (Figura 2), descarta-se a interpretação de que essas morfologias tenham sido originadas a partir de

processos hidrodinâmicos de movimentação e empilhamento de sedimentos do fundo oceânico, ou ainda pelo retrabalhamento de sedimentos relictos, a exemplo de interpretações elaboradas em outros trabalhos. As amostras litológicas da porção superior desses lineamentos, por constituírem-se predominantemente de concreções de algas coralináceas, sugerem que as mesmas tenham sido formadas pelo empilhamento vertical de crostas carbonáticas sintetizadas por essas algas. Por outro lado, as espécies de algas que constroem essas crostas, necessitam de um substrato rígido que propicie sua fixação, permitindo a instalação e o desenvolvimento da colonização algal. Com base nos dados disponíveis, interpreta-se, então, que esse substrato rígido é, exatamente, a evidência da presença de *beachrocks* na base das feições. As características morfológicas de linearidade, continuidade, relevo e de paralelismo desses lineamentos com a linha de costa, sugerem que os mesmos representem paleo cordões litorâneos, que margeavam uma linha de praia pretérita, tendo sido construídos em um período de estabilidade relativa do nível do mar. Reiniciada a subida do nível do mar, o cordão arenoso cimentado foi afogado, constituindo-se em um substrato rígido no assoalho submarino que, aliado a outros fatores climáticos e ambientais favoráveis, proporcionou a instalação e o crescimento de uma exuberante colonização algal.

### Idade das Feições Mapeadas

A construção desses cordões, bem como a cimentação dos sedimentos que os constituem, são evidências de que ocorreu uma parada na subida do nível do mar. Esse período de estabilização encontra-se documentado em diversas plataformas continentais, em diversos pontos do mundo.

Para efeito de datação, projetando-se a profundidade de ocorrência desses *beachrocks* na curva de variação do nível do mar de Fairbanks (1990), encontramos uma idade  $^{14}\text{C}$  de 15.800 anos B.P. e de 18.800 anos B.P., para a curva  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ .

### Conclusões

As imagens sonográficas da plataforma externa da Bacia de Campos proporcionaram uma melhor visão das morfologias presentes naquela porção do assoalho marinho. A observação dessas morfologias com o uso de programas de processamento e interpretação de imagens, permitiu uma boa avaliação de sua distribuição areal, facilitando a interpretação do ambiente submarino pretérito e atual. Aliados às imagens sono-



## Side Scan Sonar

gráficas, os perfis registrados pelo ecobatímetro permitiram uma visão clara do relevo destas morfologias, caracterizando bem a grandeza dos processos morfogenéticos envolvidos.

Os dados permitiram a caracterização de um ambiente marinho costeiro, emoldurado por um extenso cordão litorâneo que foi cimentado, afogado e colonizado por algas coralíneas que se desenvolvem sob a forma de crostas carbonáticas

### Bibliografia

- Corrêa, A.C.T., 2001, Estudo de feições morfológicas do assoalho marinho na plataforma externa da Baía de Campos – Tese de Mestrado – UFF – LA-GEMAR.
- Fairbanks, R.G., 1990, Barbados Coral Cores Establish First Continuous and Detailed Record of Sea Level Change During Last Deglaciation. *Lamont - Spring 1990* - Vol. 23, 1-3.
- Hanor, JS (1978): Precipitation of Beachrock Cements: Mixing of Marine and Meteoric Waters vs. CO<sub>2</sub>-Degassing. *Jour. Sed. Petrol.* 48, 489-501.
- Kowsmann,RO; Costa,MPA (1979): Evidence of Late Quaternary Sea Level Stillstands on the Upper Brazilian Continental Margin: a Synthesis. 1978 International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary - Sao Paulo - Brasil (1979), 170-192.
- Kowsmann,RO; Costa,MPA; Gamboa,LAP (1910): Evidências de Estabilizações Holocênicas do Nível do Mar na Plataforma Continental do RS. XXIX Cong Bras de Geol - 1, 211-216.
- Lima,JAM (1997): Oceanic Circulation on the Brazilian Shelf Brake and Continental Slope at 22°. Ms Thesis, University of New South Wales - Austrália. 164 p.
- Miranda,FP; Fonseca,LEN; Carr,JR (1998): Semivariogram Textural Classification of JERS-1 (Fuyo-1) SAR data obtained over a flooded area of the Amazon Rainforest. *Int J Remote Sensing* 19, 549-556.
- Viana,AR; Faugeres,JC; Kowsmann,RO; Lima,JAM; Caddah,LFG; Rizzo,JG (1997): Hydrology, morphology and sedimentology of the Campos Continental margin, offshore Brazil. *Sedim. Geology* 115, 133-157.
- Viana,AR; Faugeres,JC; Stow,DAV (1997): Bottom-current-controlled sand deposits - a review of modern shallow-to-deep-water environments. *Sedim. Geology* 115, 53-80.

### Agradecimentos

Agradeço à PETROBRAS pela oportunidade de publicação deste artigo. Agradeço também meus colegas Luiz Gamboa, Paulo Maldonado, Pedro Piauilino E Cláudio Gallea pela ajuda fundamental no processamento das imagens e as profícuas discussões, ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

## Side Scan Sonar

FIGURAS

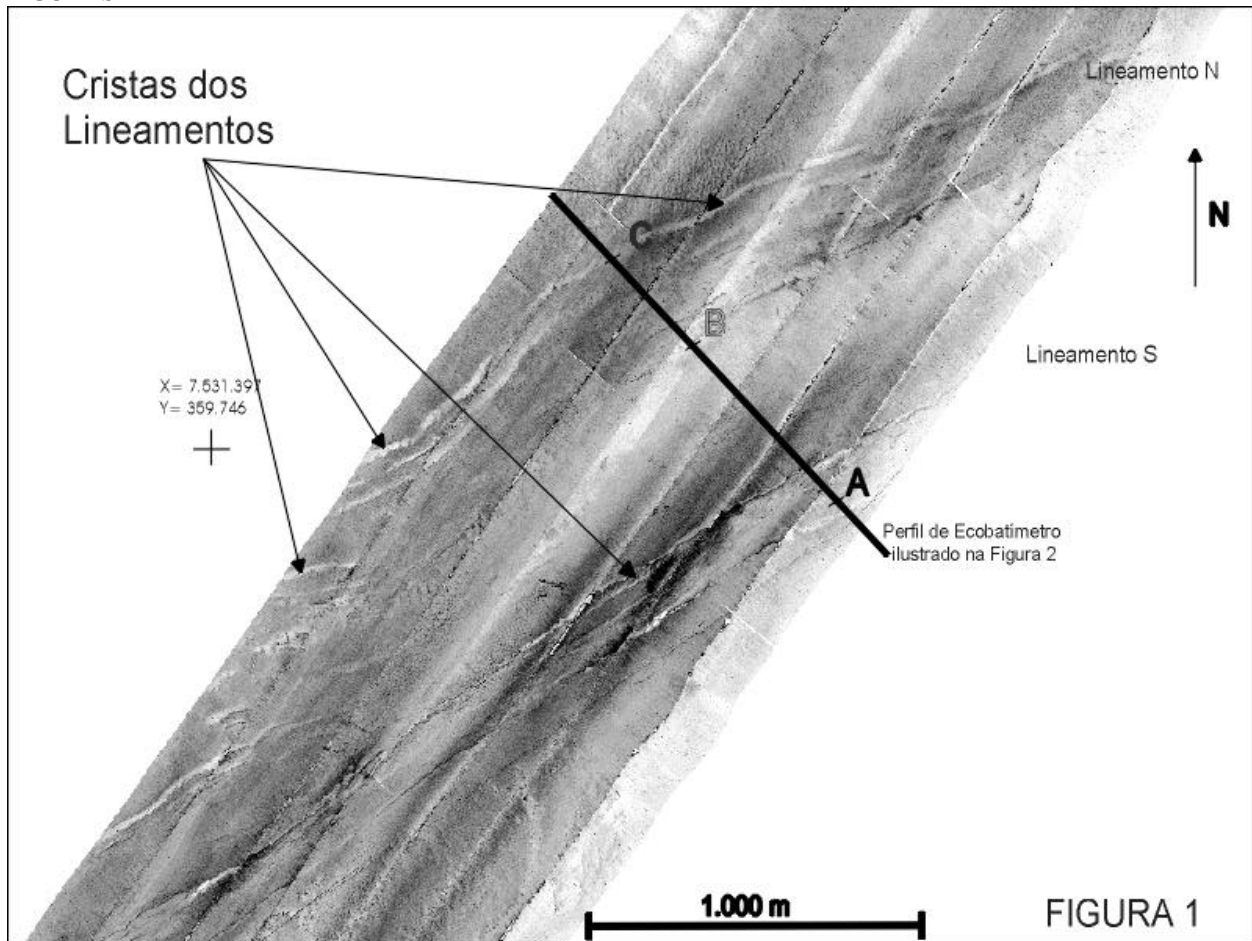


FIGURA 1 – Porção do mosaico sonográfico onde se pode observar a disposição espacial dos lineamentos estudados, destacando-se sua extensão longitudinal, seu paralelismo e sua abrangência areal. Pode-se ainda perceber a presença de uma expressiva sombra sonográfica, que atesta a característica de um pronunciado relevo para essas morfologias.

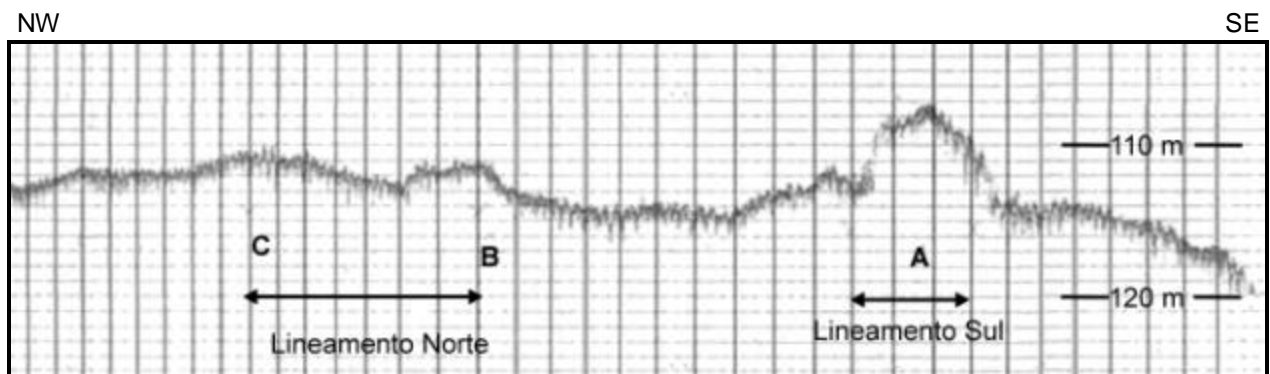


FIGURA 2: Perfil registrado pelo ecobatímetro ao longo da linha destacada na FIGURA 1. Observa-se a morfologia dos lineamentos mapeados, com destaque para o lineamento mais a sul. Destaca-se a forma abrupta como este lineamento aflora do assoalho oceânico, com um desnível que, neste ponto, alcança os 6m de altura (exagero vertical 4,4 vezes).

## Characterisation of three different waste disposals using resistivity and IP methods

A. Bratus, D. Nieto Yabar, OGS Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Italy, e-mail [abratus@ogs.trieste.it](mailto:abratus@ogs.trieste.it)

### Abstract

This is the report of an integrated geophysical survey on a landfill system, composed of three urban solid waste disposals located in three different old quarries of sand and gravel.

The landfills have different ages and different isolation systems. The oldest one (called A) was closed in the eighties and doesn't have any isolation, the second one (called B) was closed in the nineties and has a clay isolation layer as prescribed by the Italian law of 1982, the third one (called C) is open and has HDPE isolation.

In all the case studies, the depth of the body waste is about 20 m and the water table is located at 70 m from the surface.

To investigate the area, earth resistivity and induced polarisation tomography have been used.

Two N-S lines of 630 m and one E-W line of 310 m have been done in different periods of the year in order to define:

- The most proper measurement array geometry
- The landfills geometry
- The waste resistivity and chargeability features
- Contamination in the surrounding geological strata due to leachate movement

### Introduction

The Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) of Trieste (Italy) is working for an environmental project to define the results of different geophysical methodologies in detecting pollution problems in soils and waters, due to landfills and old factories.

A particular field test site is available in the North part of the Alta Pianura Friulana (N-E. Italy).

The site is characterised by the presence of three different types of urban solid waste disposal, having different features having been realised in different periods:

- the landfill A was closed in the eighties and have no isolation
- the landfill B was closed in the nineties and have a clay isolation layer as prescribed by the Italian law of 1982,
- the landfill C is actually working and has a HDPE isolation.

All the waste disposals were 20 m deep sand and gravel quarries, successively filled by urban solid refusal.

The results of earth resistivity and induced polarisation tomography surveys in this area will be presented.

### Geology of the area

The site test is located in a plane area having an altitude between 124 and 117 m on the sea level.

The soil thickness is about 80 cm and it is characterised by muddy-sandy deposits having a gravel framework.

The underlying fluvioglacial deposits have 55-75% of gravel, 15-30 % of sand and 10-25 % of mud. Sometimes they are welded and they have a thickness of about 60 m. The deeper carbonate cement conglomerate has an high cementation degree. The rounded elements are made of limestone and dolomite with a small part of sandstone, chert, phorfiry and quartzite.

The miocenic sandstone bedrock is at about 290 m from the surface.

The alluvial deposit features determinate a non-confined aquifer. The water table has an irregular morphology and its minimum depth changes from 61 m in the N to 58 m in the S, with a medium high from the sea level of 60 m

Its maximum depth is 79 m in the N part of the area.

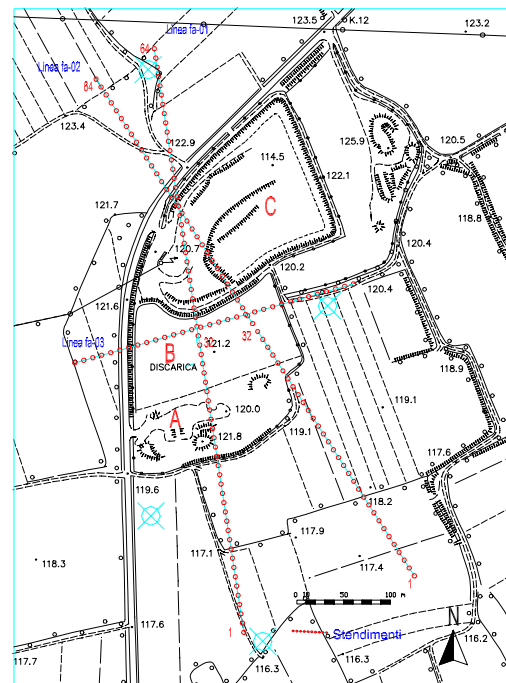
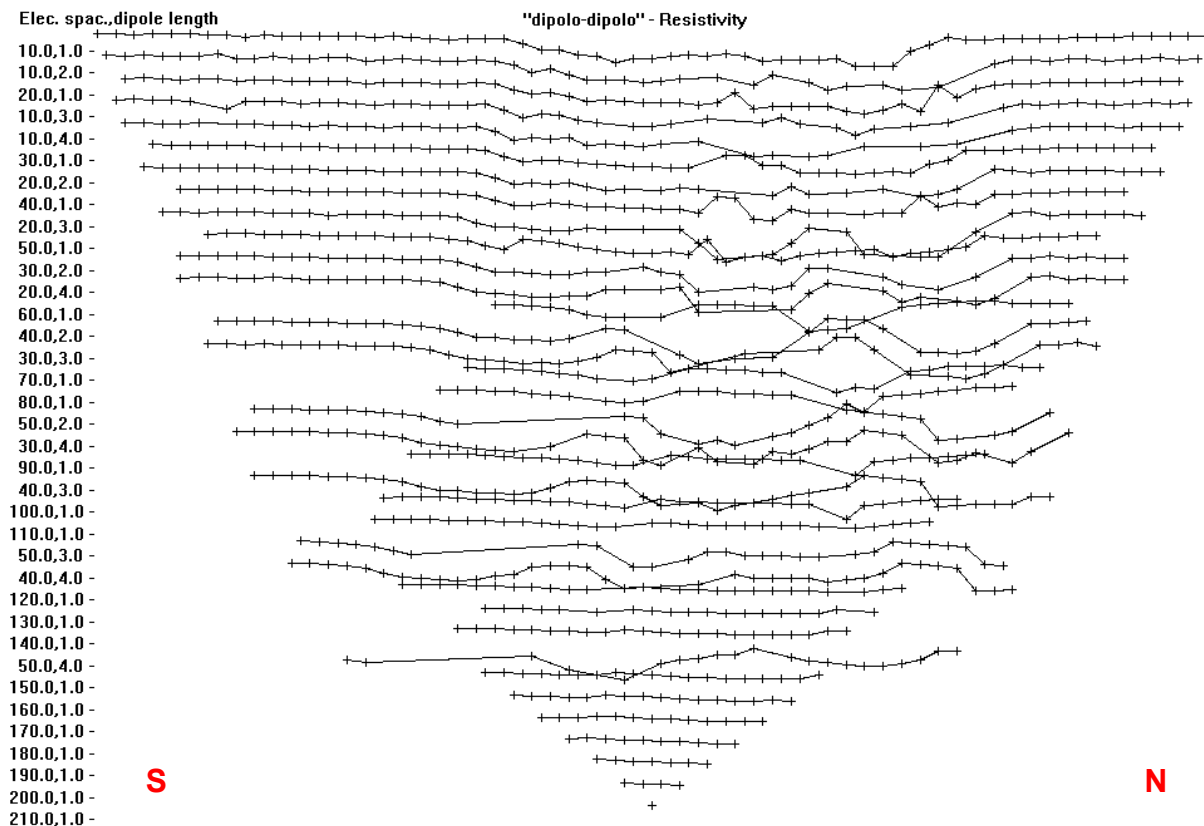


Fig. 1 Lines position





+Measured data +Removed data  
 Fig. 2 The dipole-dipole resistivity data set of the Fa-01 line

### Data acquisition

To collect DC resistivity and time domain induced polarisation (IP) data, a Syscal R2 equipment by Iris Instruments was employed.

Three multinode lines survey were disposed: two of 64 electrodes and one of 32. The interval between each electrode was of 10 m. (fig 1)

The two 630 m length lines, named Fa 01 and Fa 02, are approximately N-S the 310 m one, named Fa 03, is approximately E-W.

The Fa 01 line investigates all landfills, the Fa 02 investigates the B and C and the Fa 03 only the B.

The first step of the experiment was aimed to define the most proper geometry of acquisition between Wenner and polar dipole-dipole arrays.

Because of the presence of the HDPE isolation layer in the landfill C, the dipole-dipole data were extremely noisy, and their result was not reliable both in resistivity (fig. 2) and in chargeability.

The Wenner array gave data with a better quality, so it was used for the survey.

A tension between 200 and 400 V and a time of chargeability of 500 msec were used during the surveys.

### Data analysis

The apparent resistivity and the chargeability data were inverted using the RES2DINV software (Loke and Barker, 1996), selecting the robust inversion option because of some noise amount on the data, due to the waste lack of homogeneity and to the HDPE layer.

The effect of the topographic surface was corrected using a grid calculated with the inverse Schwartz-Christofel transformation (Loke, 2000). The inversion approaches are well explained in the software manual.

### Interpretation of results

The interpretation of the data gives a lot of information on the landfill geometry, the waste resistivity and chargeability features, the description of the underlying fluvio-glacial deposits and the contamination in the surrounding geological strata due to leachate movement.

The 2D lines investigate both the waste disposal and the surrounding uncontaminated land.

As example, the result of the data inversion of the Fa 01 line is reported (fig. 3).

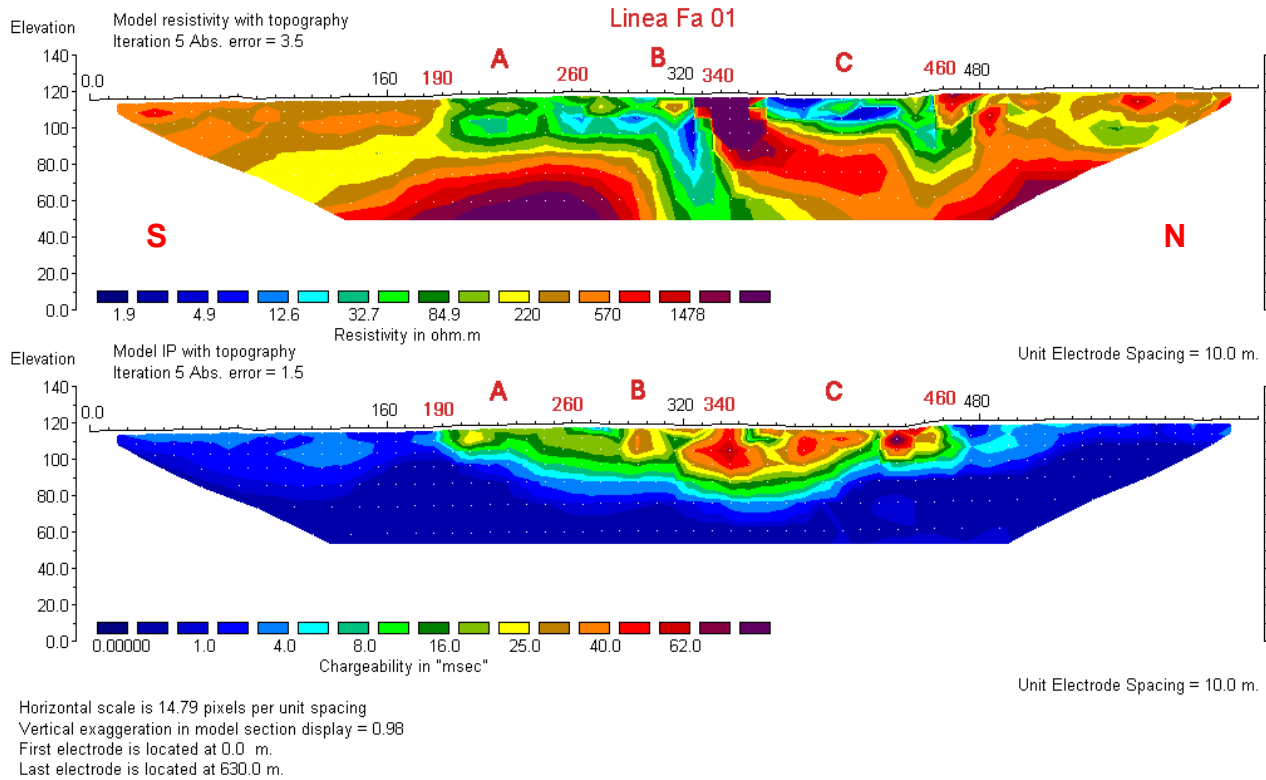


Fig.3 Resistivity and chargeability model of the line Fa 01

### Resistivity model

The low resistivity anomaly due to the landfill A is described between the profile progressive 190 and 260. The waste disposal seems to be confined, because of the age of the deposits (more than 20 years), but continues to be characterised by low resistivity values.

The model presents a width of the waste disposal of about 20 m, according with the project documentation. The landfill B, surveyed from 260 to 340 m, presents some low resistivity bodies and, at 310 m, a low resistivity depth extending plume. It is important to note that the model doesn't allow to define a border between the A and B landfills, so they seem to be one body.

The low resistivity feature of the plume indicates that it is characterised by a leachate movement from the waste of the landfill B. It results to be confined in about 20 m of length, but its depth extension is more than 60 m from the surface.

The high resistivities superficial values (more than 1000 ohm/m) from 340 to 350 m limits the S embankment of the landfill C; and analogous anomalies limiting the N embankment are detected at 460-480 m.

The waste disposal C is isolated from the other two, and presents low resistivity values (from 5 to 80 ohm/m) for the waste, especially in the southern part. The waste seems to be confined at a depth of 20 m, but in the N part, from 450 to 480, at the bottom of the landfill, a low resistivity body (from 30 to 100 ohm/m) 20 m depth extends from the regular geometry of the disposal.

This anomaly represents a problem for the landfill waterproofing and locates a contamination in the surrounding geological strata due to leachate movement.

In this case the contamination is less widespread than the landfill B one, but it represents a more dangerous situation because this landfill is still in activity.

The model resistivity of the geological strata describe the presence of high resistivity bodies (more than 1000 ohm/m) due to the presence of welded levels.

### Chargeability model

The chargeability model gives information on the characteristic of the waste, which seems to have high chargeability values in the landfill C (about 60 msec) and lower values in the landfill A (about 10 msec).

The model describes a great difference in chargeability between the waste and the alluvial deposits.

## **Conclusion**

The response of the geoelectrical survey in this case is really satisfactory.

It is obvious that the 10 m spacing between electrodes can't describe the waste resistivity feature in detail, but it gives a good information on the presence of anomalies in the waste disposal.

The survey underlines the presence of two leachate plumes from both the landfill B and C and describes the geometry of all three waste disposals.

It can distinguish the different kind of waste, especially for the solid urban ones of the landfill C

It gives a contribution to the geological knowledge too, adding information about the geometry of the different alluvial deposit layers.

It is important to underline the low cost of this type of survey, compared to the given results.

## **References**

- Aristodemu, E., Thomas-Betts, A., 2000, DC resistivity and induced polarisation investigations at a waste disposal site and its environments, *Journal of Applied Geophysics*, 44, 275-302
- Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996, Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Loke, M.H., 2000, Topographic modeling in electrical imaging inversion, abstract for the EAGE 62<sup>nd</sup> Conference and Technical Exhibition, Glasgow
- Meju, M.A., 2000. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach, 44, 115-150.

# Clima de Ondas na Bacia de Campos: Fundamentos e Análise dos Dados

Ney A. B. Seixas, CNPq/ON, seixas@on.br

## Resumo

Este trabalho tem como principal objetivo o estudo do clima de ondas na Bacia de Campos. Para realizá-lo foi utilizada uma bóia oceanográfica do tipo “pitch and roll”, operada pela Petrobras, no período 91/95, na região dos campos de Marlim e Barracuda, ambos com mais de 1000 metros de profundidade. Tal iniciativa foi, até agora, a mais ampla e detalhada campanha de coleta de dados de onda feita no Brasil. Os resultados deste estudo revelaram características desconhecidas do clima de ondas da região. Mais de 60 parâmetros de onda foram obtidos, a partir do processamento das medições instrumentais e da modelagem de algumas grandezas físicas das ondas. Os resultados possuem aplicação direta em várias áreas como engenharias oceânica, naval e costeira, além de meio ambiente e novas pesquisas.

### 1) Introdução

As ondas que se propagam nos oceanos são classificadas por período (ou frequência), possuindo relação com os processos que lhes originaram. Os períodos variam desde décimos de segundos até centenas de horas. Dentro desta variedade, uma característica é constatada: as ondas de menor período são geradas pelo vento e, conseqüentemente, denominadas *ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento*. O vento atua na interface atmosfera-oceano, transferindo energia do primeiro meio para o segundo e resultando no movimento irregular da superfície. Este movimento é denominado *agitação marítima*. A gravidade atua como força restauradora, recuperando a condição de equilíbrio da superfície.

### 2) A Agitação Marítima

É o resultado da soma de várias componentes ondulatórias com diferentes amplitudes, frequências, direções e fases, produzindo a superfície irregular do oceano. Este é um *processo estocástico*. Além de estocástico, outras hipóteses são feitas sobre sua natureza: é *estacionário*, *ergódico*, de *banda estreita* e as *alturas de onda obedecem a distribuição de Rayleigh*. Tais considerações são fundamentais, pois tem implicações diretas na abordagem matemática utilizada no processamento dos dados. As figuras 1 e 2 ilustram os aspectos discutidos até este ponto.

### 3) Instrumentação

O movimento da bóia é resultante das excitações externas que recebe do mar. Internamente ela possui dispositivos que transformam a resposta instrumental em grandezas relacionadas às ondas: a elevação da superfície ( $\eta$ ) e duas inclinações ortogonais ( $\eta_x$  e  $\eta_y$ ). São 3 séries temporais ortogonais, amostradas com uma taxa

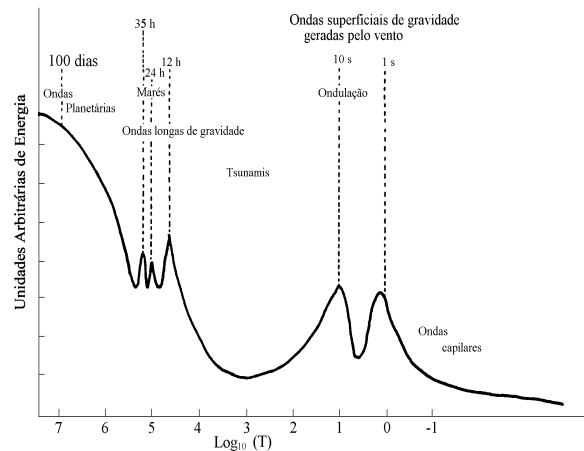


Figura 1: Diversidade das ondas nos oceanos (LeBlond e Mysak, 1978).

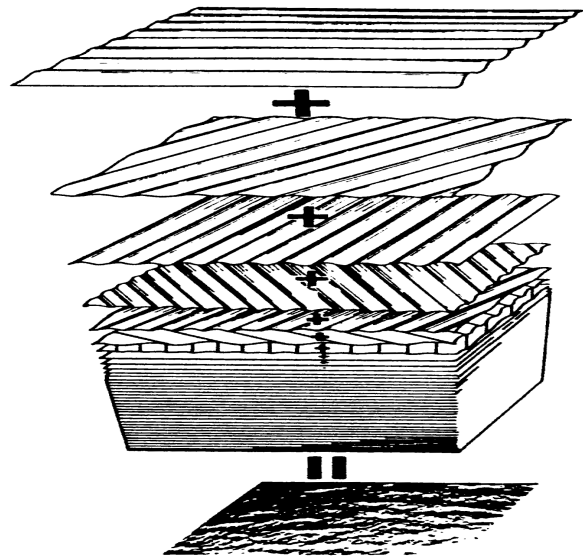


Figura 2: Processo de formação da agitação marítima (Pierson, 1958).

de 1Hz ( $\Delta t = 1$  s) e registradas durante 20 minutos, à cada 3 horas. O instrumento também fornece a velocidade e direção de vento e corrente, registrando seus valores médios no respectivo intervalo de 20 minutos.

### 4) A Densidade Espectral Direcional $S(f, \theta)$

A densidade espectral direcional  $S(f, \theta)$  é uma abordagem matemática elaborada para estudar a agitação marítima no domínio da frequência e do espaço, sendo  $f$  a frequência e  $\theta$  a direção da onda. Ela foi proposta em 1963 por Longuet-Higgins et al. como uma expansão em série de Fourier na forma:

### Clima de Ondas na Bacia de Campos

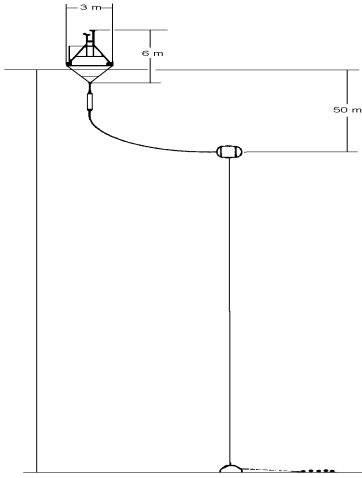


Figura3: Diagrama da bóia e demais aparatos.

$$S(f, \theta) = \frac{a_0(f)}{2} + \sum_{n=1}^2 [a_n(f) \cos(n\theta) + b_n(f) \sin(n\theta)] \quad (1)$$

A limitação da expansão a até 2 harmônicos é decorrência do número de coeficientes ( $a_0, a_1, b_1, a_2$  e  $b_2$ ), que por sua vez decorre do fato de existirem apenas 3 séries temporais. Para encontrar uma maneira mais simples de expressar  $S(f, \theta)$ , as variáveis  $\eta, \eta_x$  e  $\eta_y$  serão redefinidas como  $\eta_1, \eta_3$  e  $\eta_2$  respectivamente. A análise espectral efetuada com as 3 séries permite obter espectros cruzados

$$S_{jk}(f) = C_{jk}(f) + iQ_{jk}(f) \quad (2)$$

onde  $C_{jk}(f)$  e  $Q_{jk}(f)$  são, respectivamente, as partes real e imaginária de  $S_{jk}(f)$  e  $j, k=1, 3$ . Mediante um desenvolvimento matemático com os espectros das séries temporais, chega-se a uma forma mais simples de representar a densidade espectral direcional:

$$S(f, \theta) = S(f)D_f(\theta) \quad (3)$$

Sendo,  $S(f)=C_{11}(f)$ , a densidade espectral de potência da elevação da superfície, e  $D_f(\theta)$  o espalhamento angular ("spreading"), dado por:

$$D_f(\theta) = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^2 a_n(f) \cos(n\theta) + b_n(f) \sin(n\theta) \right] \quad (4)$$

A continuidade do desenvolvimento matemático com os espectros das séries temporais, permite chegar a dois outros importantes resultados: o número de onda  $K(f)$  e a direção  $\theta(f)$ , dados por:

$$k(f) = \left( \frac{C_{22}(f) + C_{33}(f)}{C_{11}(f)} \right)^{1/2} \quad (5)$$

e

$$\theta(f) = \arctg \left( \frac{b_1(f)}{a_1(f)} \right) = \arctg \left( \frac{Q_{13}(f)}{Q_{12}(f)} \right) \quad (6)$$

O número de onda é obtido tanto através do processamento dos dados instrumentais, como teoricamente, dado pela equação de dispersão para águas profundas:  $\omega^2 = gk(f)$ . A comparação entre os dois resultados é fundamental, pois é um avaliador da confiabilidade da medição instrumental dentro de uma faixa de frequência estudada. Já a direção  $\theta(f)$  indica o rumo da onda. Porém, deseja-se saber sua direção de origem e num referencial azimutal. Tal direção, denominada  $\alpha(f)$ , é dada por:

$$\alpha(f) = 90^\circ - (\theta(f) - 180^\circ) = 270^\circ - \theta(f) \quad (7)$$

Para ter-se a direção medida num referencial fixo, deve-se subtrair a declinação magnética local. Logo a densidade espectral direcional é agora representada por  $S(f, \alpha)$ . Outros resultados também já podem ser obtidos no domínio da frequência: a integração do espectro de  $S(f)$ , de 0 a  $f_N$  (frequência de Nyquist), permite obter a área sob o mesmo, que relaciona-se com a energia total contida nele. Introduzindo-se o conceito de momento espectral, definido por

$$m_n = \int_0^{f_N} (2\pi f)^n S(f) df \quad (8)$$

tem-se, dentre outros, o momento  $m_0$  que representa a energia total contida em  $S(f)$ , a partir do qual são calculadas várias alturas de onda ( $H_{med}, H_{1/3}, H_{1/10}$  e  $H_{max}$ ). Estas alturas também são calculadas no domínio do tempo e a comparação entre os resultados é recomendável.

#### 5) Análise Espectral

A obtenção de um bom estimador para descrever um processo estocástico envolve questões como resolução espectral, tendência, variância e consistência do estimador, além da técnica de análise utilizada. Quanto à resolução espectral e a técnica de análise, existe uma importante diferença na obtenção de  $S(f)$  e  $D_f(\alpha)$ .  $S(f)$  é muito bem amostrada. O mesmo não ocorre com  $D_f(\alpha)$ , que possui apenas 2 harmônicos, conforme mostra a equação (4). Logo, para  $S(f)$ , a abordagem clássica de Fourier é perfeitamente aplicável. Porém, para  $D_f(\alpha)$  será utilizada uma abordagem não clássica, mais exatamente, o método de máxima entropia.

#### 5.1) A Abordagem Clássica de Fourier:



## Clima de Ondas na Bacia de Campos

A abordagem clássica utilizada para  $S(f)$  (e  $\alpha(f)$ ), conhecida como técnica de Welch (Marple, 1987), visa diminuir a tendência e a variância do estimador e aumentar sua consistência. Para atingir este objetivo suas 3 etapas podem ser resumidas da seguinte forma: **a)** segmentação do registro original em  $n$  partes iguais; **b)** utilização de uma janela; **c)** utilização de um percentual sobreposição em cada uma das  $n$  partes. A figura (4) resume o procedimento:

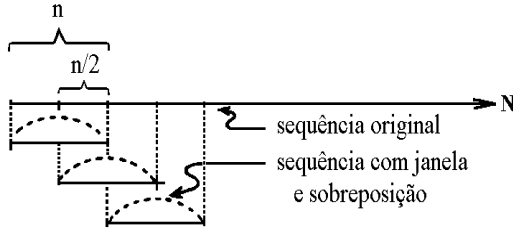


Figura 4: Técnica de Welch: segmentação, janela e sobreposição.

*Neste trabalho foram adotados:* **a)** 16 segmentos com 64 s de duração; **b)** janela de Hamming; **c)** 50% de sobreposição. Cada uma destas etapas requer a introdução de fatores de normalização específicos, para que a energia total do espectro seja preservada.

### 5.2) O Método de Máxima Entropia

Dentre as várias técnicas de análise espectral não clássicas tem-se, como uma das mais conhecidas, o método de máxima entropia (Burg, 1975). Por ser uma técnica de alta resolução, é adequado à situações onde o sinal registrado possui curta duração ou baixa amostragem, como ocorre na equação (1), onde a análise de Fourier clássica pouco (ou nada) pode obter. A seguir será apresentada a expressão desenvolvida por Lygre e Krogstad (1986) para  $D_f(\alpha)$ :

$$2\pi D_f(\alpha) = (1 - \phi_1 c_1^* - \phi_2 c_2^*) / |1 - \phi_1 e^{-i\alpha} - \phi_2 e^{-2i\alpha}|^2 \quad (9)$$

Tanto os conjugados complexos dos coeficientes  $c_1$  e  $c_2$  quanto os parâmetros  $\phi_1$  e  $\phi_2$  são obtidos através de manipulações matemáticas feitas com  $C_{jk}(f)$  e  $Q_{jk}(f)$  ( $j, k = 1, 3$ ) da equação (2). Uma vez obtido  $D_f(\alpha)$  instrumentalmente, torna-se necessário medir a largura do espalhamento angular ou “spreading”,  $\sigma$ . Ela é obtida integrando-se  $D_f(\alpha)$  no intervalo  $-\pi/2$  a  $\pi/2$  e obtendo-se um parâmetro denominado  $\delta$ . Kuik et al. (1988) estabeleceram a seguinte relação entre  $\sigma$  e  $\delta$ :  $\sigma = (2(1-\delta))^{1/2}$ , com  $\sigma$  em radianos.

### 6) Formulações Espectrais

São expressões analíticas para representar os espectros de  $S(f)$  e  $D_f(\alpha)$ . Existem várias propostas na literatura do assunto. Neste trabalho foram adotadas a formulação de JONSWAP (**J**oint **N**orth **S**ea **W**ave **P**roject) para  $S(f)$  e

a formulação  $\cos^{2s}$  para  $D_f(\alpha)$ . Em ambos os casos, o objetivo é modelar os espectros instrumentais.

#### 6.1) A Formulação de JONSWAP

Proposta por Hasselmann et al. (1973), ela é dada por

$$S(f) = [(\alpha g^2) / ((2\pi)^4 f^5)] \exp[-1.25(f_p/f)^4] \cdot \text{vs.} \quad \gamma \exp \left[ -\left( f - f_p \right)^2 / (2\sigma^2 f_p^2) \right] \quad (10)$$

onde  $f_p$  é a frequência de pico,  $\sigma$  um parâmetro fixo, (sem nenhuma relação com a largura do “spreading”) e  $\alpha$  e  $\gamma$  parâmetros a determinar, denominados fator de escala e fator de forma, respectivamente. Inicialmente esta formulação foi proposta para mares unimodais. G Soares em 1984, estendeu-a à mares bimodais. Neste trabalho, dada a rara oportunidade de ter um equipamento operando em mar aberto e onde vários espectros obtidos instrumentalmente revelavam-se trimodais, a extensão à estes casos foi obtida com êxito. A implementação da modelagem é complexa e detalhada e, não será abordada aqui.

#### 6.2) A Formulação $\cos^{2s}$

É a mais adotada para modelar o espectro de  $D_f(\alpha)$ , sendo dada por:

$$D_f(\alpha) = A \cos^{2s} [(\alpha - \alpha_p)] \quad (11)$$

onde  $A$  é uma constante de normalização tal que

$\int_0^{2\pi} D_f(\alpha) d\alpha = 1$ ;  $s$ : parâmetro controlador da largura do espalhamento;  $\alpha_p$ : direção associada à uma determinada frequência de pico  $f_p$ . A principal questão relacionada a este modelo é como obter  $s$ . Kuik et al. (1988), estabeleceram a seguinte relação:

$$\sigma = \left( \frac{2}{s+1} \right) \Rightarrow s = (2/\sigma) - 1 \quad (12)$$

### 7) Os Picos Espectrais

Apenas os picos espectrais estão relacionados a processos físicos de interesse. Diante da diversidade de estados de mar, tornou-se fundamental estabelecer critérios para sua identificação e classificação, que baseiam-se em: quando ocorrem 2, 3 ou mais picos no mesmo espectro, são considerados a energia de cada pico, sua quantidade, a separação entre eles, seu período, direção e o teste do qui quadrado nos espectros modelados.

#### a) energia do pico:

o chamado pico dominante (ou pico 1) é o de maior energia e os demais são ordenados decrescentemente.

#### b) separação mínima entre os picos:

após várias investigações, chegou-se à conclusão de que

### Clima de Ondas na Bacia de Campos

após várias investigações, chegou-se à conclusão de que **90%** da energia total de cada pico (em mais de 7500 registros) está concentrada num intervalo de **0.15 Hz**. Logo, a separação mínima entre picos foi estabelecida em **0.03 Hz**. Isto dá origem a 5 bandas espectrais. Na verdade são 8, pois variam de  $f \leq 0.05$  Hz a  $f \leq 0.26$  Hz.

#### c) os períodos (ou frequências) dos picos:

alguns espectros apresentam mais de 3 picos (que é o número máximo admitido), presentes tanto na região de alta frequência como na de baixa. Nestes casos, são priorizados os da baixa frequência (mesmo possuindo menor energia). Esta é uma típica situação de mar cruzado, onde o mar local é fortemente dominante mas as ondas cuja zona de geração está bem distante do local de medição não são extintas, isto é, mesmo contendo muito menos energia, continuam presentes. Esta situação é importante, tanto fisicamente quanto para aplicações práticas.

#### d) direção:

nas ocorrências de mar cruzado descritas acima, as ondas sempre possuem direções completamente distintas.

#### e) o teste do qui quadrado:

é aplicado aos espectros modelados de  $S(f)$ , para validação (ou não) dos picos espectrais de  $S(f)$  obtidos instrumentalmente.

### 8) Conclusões

A seguir serão apresentados resultados que caracterizam o clima de ondas na Bacia de Campos, no tocante à modalidades do mar, distribuição do pico dominante (ou *1º pico*) em bandas de frequência e octantes de direção, nas figuras 5, 6 e 7, respectivamente.

### 9) Bibliografia (na ordem de citação no texto)

- Le Blond, P. and Mysak, L.; Waves in the Ocean; Elsevier Scientific Publishing Co.; Amsterdam, Netherlands; 1978.
- Pierson, J., Neumann, G. and James, R.; Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics; Hydrogr. Off. Publ., No. 603; U.S. Navy Hydrographic Office, Washington, D.C.; 1958.
- Longuet-Higgins, S., Cartwright, D. E. and Smith, N. D.; Observations of the Directional Wave Spectrum of Sea Waves Using the Motions of Floating Buoy; Ocean Wave Spectra; Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall; 1963.
- Marple Jr., S. L.; Digital Analysis with Applications; Prentice Hall Signal Processing Series; 1987.
- Burg, J.; Maximum Entropy Spectral Analysis; Ph.D. Dissertation; Stanford University; 1975.
- Lygre, A. and Krogstad, E.; Maximum Entropy Estimation of the Directional Distribution in Ocean Wave Spectra; JPO, Vol 16, 2052-2060, 1986.
- Kuik, J., Van Vledder, G. and Holthuijsen, L.; A Method for the Routine Analysis of Pitch-and-Roll Buoy Wave Data; JPO; 1988.
- Burg, J.; Maximum Entropy Spectral Analysis; Ph.D. Dissertation; Stanford University; 1975.

Lygre, A. and Krogstad, E.; Maximum Entropy Estimation of the Directional Distribution in Ocean Wave Spectra; JPO, Vol 16, 2052-2060, 1986.

Kuik, J., Van Vledder, G. and Holthuijsen, L.; A Method for the Routine Analysis of Pitch-and-Roll Buoy Wave Data; JPO; 1988.

Hasselmann, K. et al.; Measurements of Wind-Wave Growth and the Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP); Duet. Hydrog. Zeit., Reich A12, 95pp; 1973.

Soares, G.; Representation of Double-Peaked Sea Wave Spectra; Ocean Engng., Vol 11, No. 2, pp 185-207; 1984.

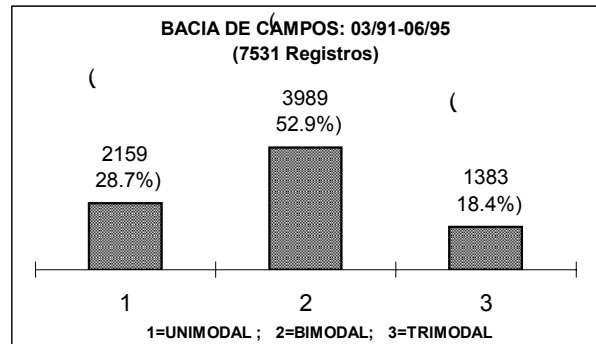


Figura 5: Modalidades do mar.

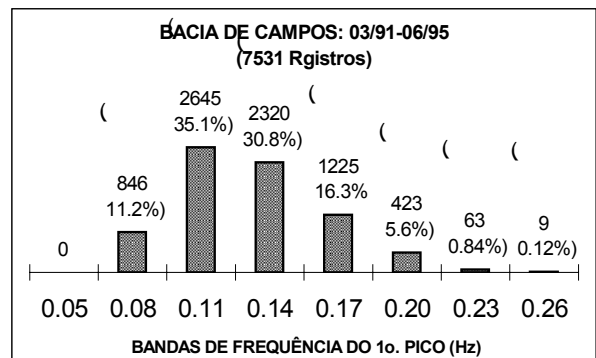


Figura 6

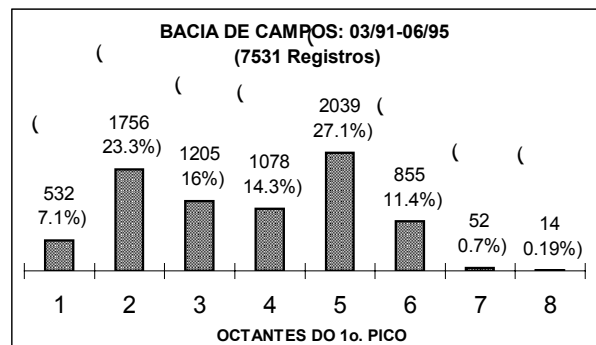


Figura 7: Setores de 45° centrados nos pontos cardiais, com ±22.5° de abertura para cada lado.

## Climate changes of the recent past in southern parts of Brazil

Andrei S.B. Cavalcanti and Valiya M. Hamza, *Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brazil*

### Abstract

Bore-hole temperature data from 23 localities in southern Brazil were examined for identifying thermal signals related to climate changes of the historic past. Both forward and inverse modeling methods were employed in the analysis of vertical distribution of temperatures. The forward modeling approach is based on the classical method of least square fits to theoretical curves, with a priori assumption as to the form of temperature variation. The inverse method can handle non-linear problems and allows convenient trade-off between model and data.

The data set examined so far reveal the following information about recent climate changes in southern Brazil:

- the form of temperature variation is indicative of a warming trend in all of the 23 localities;
- the magnitudes of temperature variations are in the range of 1 to 4°C while the time elapsed vary from 20 to 200 years;
- the climate change seem to be more pronounced in coastal areas compared to that in inland and semi-arid zones;
- there is a progressive increase in the age of climatic perturbation, as one moves from the coastal area towards the interior of the continent;
- changes in vegetation cover have marked effects on surface temperatures in southern parts of Brazil;
- the changes found in semi-arid zones, being unaffected by changes in vegetation cover, appears to be indicative of global climate changes.

### Introduction

Surface temperature variations arising from climate changes are known to penetrate near surface layers of the earth's crust. Thermal regime at shallow depths are thus characterized by the presence of down-going climate-related temperature signals superimposed on temperature variations arising from outflow of geothermal heat, as illustrated in the schematic diagram of figure (1). The temperature logs of bore-holes are thus capable providing information past climatic changes (Birch, 1948, Cermak, 1971, Beck, 1982, Lachenbruch *et al.*, 1986) Pioneering studies aimed at extracting information on past climate changes, making use of bore-hole temperature data from Brazil, was carried out by Hamza (1991, 1998). Since then a better and improved data set has been gathered as part of geothermal research programs of the Geothermal Laboratory of Observatório Nacional. Results based on this new data set are discussed in the present work.

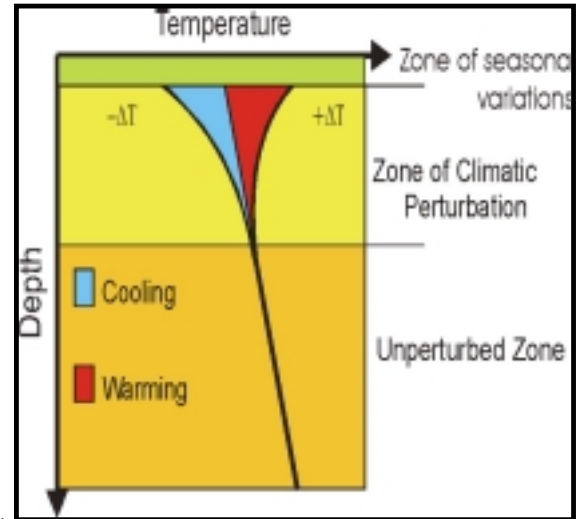


Figure (1). Schematic representation of temperature variations in near surface layers in the presence of climate changes.

### Methodology

The near surface layer of earth is considered as a homogeneous medium where transport of heat is exclusively by solid-state conduction. The temperature variation with depth in such a layer in the presence of thermal perturbations at its surface, is given by the relation:

$$\theta(z,t) = \theta_0 + \Gamma_0 z + v(z,t) \quad (1)$$

where  $\theta$  is the temperature at depth  $z$  and time  $t$ ,  $\theta_0$  the mean annual surface temperature,  $\Gamma_0$  the geothermal gradient and  $v$  the surface perturbation. In the present context, it is assumed that the surface perturbation is induced by changes in local climate, even though the exact nature of thermal coupling between it and soil layer at the ground level is unknown. The downward propagation of this perturbation is governed by the partial differential equation:

$$-\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \alpha \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

where  $\alpha$  is the thermal diffusivity.

In the forward modeling approach it is customary to make a priori assumption as to the form of surface temperature variation. The theoretical curves that best fit the observational data set may then be used for determining the surface temperature history. For example, a simple analytical solution of equation (2) may be obtained by assuming a power law variation of surface temperature:

$$v(0,t) = D(t/t^*)^{n/2} \quad \text{for } 0 < t \leq t^* \quad (3)$$

## Climate changes of the recent past in Southern Brazil

where  $t^*$  is the duration of the climatic event and  $D$  the magnitude of the perturbation. The value of 'n' may be used to specify the form of temperature variation. If the initial condition is given as  $v(z,0) = 0$  the solution is (Carslaw e Jaeger, 1959; Lachenbruch et al, 1986):

$$v(z,t) = D 2^n \Gamma(n/2 + 1) i^n \operatorname{erfc}(z/\sqrt{4\alpha t^*}) \quad (3)$$

where  $\Gamma$  is the gamma function and  $i^n \operatorname{erfc}$  the nth integral of the complementary error function.

In the inverse method temperature history that best fit the data set is obtained as a posteriori result (see for example Shen and Beck, 1983; Beltrami and Mareschal, 1995; Beltrami, 2001). The functional space inversion procedure suggested by Shen and Beck (1993) was adopted in the present work.

Within the uncertainties of experimental data sets available both approaches were found to lead to very similar results. For reasons of brevity only those from the forward modeling approach are discussed in the present work.

In studies aimed at extracting climate related information from bore-hole temperature logs it is normal practice to remove the component of temperature variation arising from geothermal heat flux. In many cases, temperature data from deeper parts of the bore-hole, which are relatively free of surface perturbations, provide a convenient means of determining the 'undisturbed' geothermal gradient. The residual temperature profile, may be considered as containing the climate related signals. Best fitting curves would then allow the determination of the model parameters, an example of which is presented in figure (2).

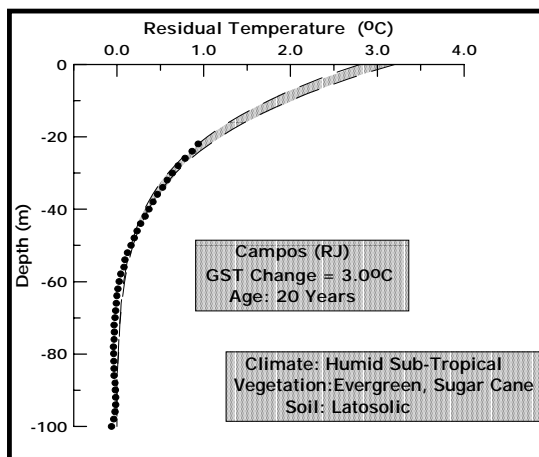


Figure (2). Residual temperature variations observed at Campos (RJ). The dashed curves are model predictions for a temperature variation of  $3^{\circ}\text{C}$ , occurring 20 years back in time.

The main problem with this approach is the non-uniqueness of the solution, since least square minima occur for a variety of combinations of model parameters. Nevertheless the estimates based on this method often provide useful information.

## Results of Model Fits

During the first stage of this work results of temperature logs carried out in 23 localities were selected for studying the effects of climatic variations. These localities are distributed within the states of Santa Catarina, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais and Bahia (see Table-1). For the purposes of the present study these localities were grouped into categories depending on their geographic and characteristics and climatic conditions. The climate zones adopted as part of the initial attempts in grouping the data are presented in table (2).

Table (1). Localities for which suitable geothermal data are available for studies of recent changes in climate.

State	Locality
Santa Catarina	Papanduva
São Paulo	Araras
	Cosmópolis
	Itu
	Águas de Lindóia
	Amparo
	Bragança Paulista
	Itapira
	Jundiaí
Rio de Janeiro	Cambuci
	Itaocara
	Miracema
	Boa Vista
	Rio Bonito
	Maricá
	Campos
	Teresópolis
Espírito Santo	C. Itapemirim
Minas Gerais	Poços de Caldas
	Poço de Fora
Bahia	Arraial
	Caraíba

Table (2) Zones for geothermal climate changes studies.

Climate Zone	Description
1	Humid Coastal regions
2	Sub-tropical inland areas
3	Sub-tropical highland areas
4	Tropical Semi-arid zones

## Climate changes of the recent past in Southern Brazil

Results of best fitting model parameters (equation 4) for these climate zones are presented in tables (3), (4), (5) and (6) respectively. In these tables  $\Delta u$  represent the magnitude of change in surface temperature and  $\Delta t$  the time elapsed (ie: the age of climatic event). The last column provides values of the least square misfit in milli-Kelvin.

Table (3) Climate-change data for humid sub-tropical coastal regions.

Locality	$\Delta u$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t$ (Years)	Misfit (mK)
Boa Vista (RJ)	4.4	15	16.3
Rio Bonito (RJ)	1.8	40	7.7
Maricá (RJ)	0.4	15	2.9
Campos (RJ)	3.0	20	6.7
C. Itapemirim (ES)	3.6	65	14.1

Table (4) Climate-change data for sub-tropical inland areas.

Locality	$\Delta u$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t$ (Years)	Misfit (mK)
Papanduva (SC)	1.2	90	15.0
Araras (SP)	3.4	40	6.4
Cosmópolis (SP)	3.8	75	5.5
Itu (SP)	1.2	60	3.2
Cambuci (RJ)	3.6	70	19.8
Itaocara (RJ)	4.0	45	18.3
Miracema (RJ)	3.6	30	7.3

Table (5) Climate-change data for sub-tropical highland areas.

Locality	$\Delta u$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t$ (Years)	Misfit (mK)
Ág. Lindoya (SP)	3.2	90	15.0
Amparo (SP)	3.4	40	6.4
Teresópolis (RJ)	3.8	75	5.5
Brag. Paulista (SP)	1.2	60	3.2
Itapira (SP)	3.6	70	19.8
Jundiá (SP)	4.0	45	18.3
Poço. Caldas (MG)	3.6	30	7.3

Table (6) Climate-change data for tropical semi-arid zones

Locality	$\Delta u$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t$ (Years)	Misfit (mK)
Arraial (BA)	1.4	85	8.4
Caraíba (BA) <sup>1</sup>	1.4	110	9.3
Caraíba (BA) <sup>2</sup>	2.0	125	8.4
Poço Fora (MG)	2.2	105	4.9

## Inferences about Climate Changes

As can be seen from the results in tables 3 to 6 the values of least square misfit are, in most cases, no more than a few tens of milli-Kelvin. This can be considered as indication that the model parameters are reasonably well determined.

The mean values of temperature changes are about  $3.2^{\circ}\text{C}$  for coastal and inland areas,  $2.3^{\circ}\text{C}$  for the highland areas and  $1.8^{\circ}\text{C}$  for the semi-arid zones. Though there are obvious limitations in the available data set there appears to be some association between the magnitude of the climate change and the type of climate zone. This association, illustrated in figure (3), may be considered as indicative of a systematic decrease of climatic perturbation with distance from the coast line. However the possibility that the observed trend is a consequence of changes induced by human activities affecting the original vegetation cover cannot entirely be ruled out.

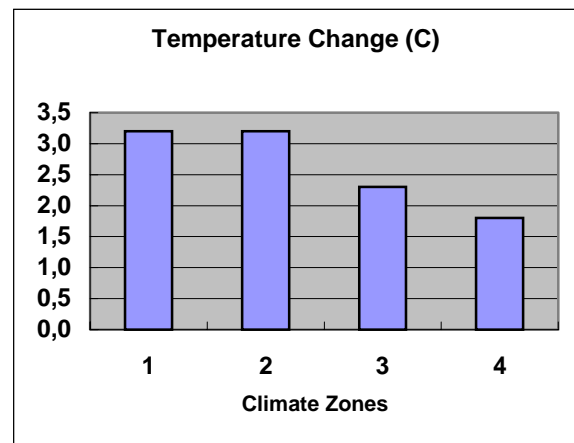


Figure (3). Magnitudes of temperature changes observed in different zones in southern Brazil (for description of climate zones see Table 2).

Tables 3 to 6 also provide estimates of the time period during which climate changes have taken place. The mean values of time elapsed (in other words the ages of climatic events) are about 32 years for the coastal regions, 57 years for the inland areas, 80 years for the highland areas and 106 years for the semi-arid zones. Thus there appears to be a close association between the age of climatic event and the type of climate zone. This association, illustrated in figure (4), may be considered as indicative of a systematic increase of the perturbation period with distance from the coast line. This trend however, is surprising and opposite to the expected pattern for climate changes induced by progressive westward occupation of inland areas for agricultural practices in Brazil. On



## Climate changes of the recent past in Southern Brazil

the other hand, it could also be considered as an indication that climate changes of oceanic regions are recent compared to that in interior regions of continental areas.

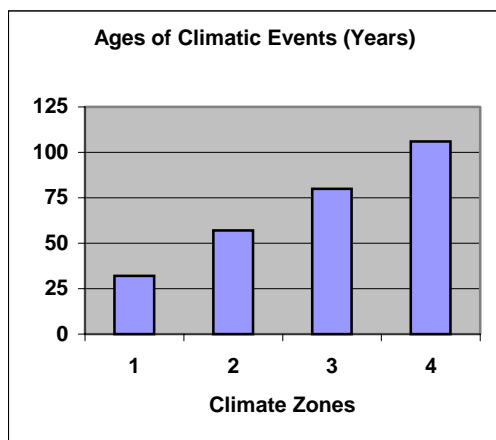


Figure (4). Ages of climate changes in different zones in southern Brazil (for description of climate zones see Table 2).

### Conclusions

The results reported here are found to be useful in understanding climate changes of the recent past in southern Brazil. Estimates of the magnitude and age of climate changes have been made. In addition it has also been possible to identify specific regional characteristics of climate changes. Such information can be of considerable use in assessment of economic and social implications of climate changes (IPCC, 1996).

Geothermal methods offer a convenient means of investigating climate changes of the recent past. The climatic signal present in subsurface layers is relatively free from the strong noise associated with short period changes. This is one of main advantage of the geothermal method over the conventional methods based on time series analysis of meteorological data. In addition climatic history for any locality can be obtained, provided suitable boreholes are available.

### References

- Birch, F. 1948. The effect of Pleistocene climatic variations upon geothermal gradients. *Am. J. Sci.* 246: 729-760.
- Beck, A. E.. 1982. Precision Logging of Temperature Gradients and the Extraction of Past Climate. *Tectonophysics*, 83:1-11.
- Beltrami, H., 2001, Surface heat flux histories from geothermal data: Inferences from inversion. *Geophysical Res. Lett.*, v.28, 4, 655-658.

- Beltrami, H. and Mareschal, J.C., 1995, Resolution of ground temperature histories inverted from borehole temperature data. *Global and Planet. Changes*, 11, 57-70.
- Cermák, V.. 1971. Underground Temperature and Inferred Climatic Temperature of the Past Millennium. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 10:1-19.
- Hamza, V. M.. 1991, Evidências geotérmicas sobre variações climáticas recentes no hemisfério sul. *Anais do 2<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Geofísica*, Salvador (BA), 971-973.
- Hamza, V.M., 1998, A proposal for continuous recording of subsurface temperatures at the sites of Geomagnetic field Observatories. *Rev. Geofísica, Instituto Panamericano de Geografía e História* v.48, 183-198.
- Hamza, V. M.; Ribeiro, F. B.; Becker, E. A.. 1991. Recent Climatic Changes in the Southern Hemisphere. *XX General Assembly, IUGG*, Viena (Austria).
- IPCC, 1996. Climate Change 1995 – Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contributions of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J. Bruce; Hoesung Lee; E. Haites (eds.), Press Syndicate of the University of Cambridge. USA. 878p
- Lachenbruch, A. H.; Marshall, B. V.. 1986. Changing Climate: geothermal Evidence from Permafrost in the Alaskan Arctic. *Science*, 234:689-696.
- Shen, P. Y.; Beck, A. E.. 1983. Determination of surface temperature history from borehole temperature gradients. *J. Geophys. Res.*, 88: 7485-7493.
- Shen, P.Y. and Beck, A.E., 1991. Least Squares Inversion of Borehole Temperature Measurements in Functional Space. *J. Geophys. Res.*, 96(B12): 19965-19979

### Acknowledgments

The present work is being carried out as part of M.Sc. thesis work of the first author. Geothermal research programs at Observatório Nacional did not receive adequate institutional support during the period 1999-2000. Thus facilities provided by Fundação Amapro à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ (Project No. E-26/150.954/99) were used for carrying out the present work. Paul Y. Shen, Dept. of Earth Sciences of the University of Western Ontario, provided the source code for the functional space inversion program.



## Cronologia de sedimentação recente na baía de Todos os Santos usando $Pb^{210}$ e $Cs^{137}$

Roberto Max de Argollo (robmax@ufba.br) e Antônio Expedito G. de Azevedo. Instituto de Física-CPGG-UFBA.

### Abstract

Three sediment cores from Todos os Santos Bay were analysed for  $^{210}Pb$ ,  $^{137}Cs$  and  $^{226}Ra$ . The core BTS-7, collected alongside a channel, had predominance of fine sand followed by mud; the cores BTS-8 and BTS-9, coming from a low energy area, had predominance of mud. The recent mass and linear sedimentation rates determined in these cores were, respectively, for the BTS-7,  $3.8 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  and  $4.5 \text{ mm a}^{-1}$ ; for the BTS-8  $7.6 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  and  $9.5 \text{ mm a}^{-1}$  and for the BTS-9  $8.6 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  and  $9.9 \text{ mm a}^{-1}$ . For the core BTS-9 was noted an increase in the sedimentation rate from  $2.9 \text{ mm a}^{-1}$  in the lower part to  $9.9 \text{ mm a}^{-1}$  in the upper 33 cm, probably due to changes induced by the deforestation of the margin of the Bay on that place. The activity levels of  $^{137}Cs$  do not exceed  $5 \text{ Bq kg}^{-1}$ , which correspond to 20 % of those found in sediments of northern hemisphere. In the core BTS-9,  $^{137}Cs$  had its activity peak ( $4.90 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) in the depth of 32.5 cm, corresponding to the year of 1965 and was detected up to 40.5 cm, year of 1958, suggesting that  $^{137}Cs$  did not migrate to the lower layers after its deposition.

### Introdução

O uso de radionuclídeos em geocronologia sedimentar tem desfrutado considerável sucesso nas últimas duas décadas. Krishnaswami *et alli* (1971) avaliaram o uso dos radionuclídeos naturais  $Pb^{210}$ ,  $Si^{32}$  e  $Fe^{55}$  e do antropogênico  $Cs^{137}$ , para datar sedimentos recentes de lagos de água doce e concluíram que o  $Pb^{210}$  é ideal para datar sedimentos lacustres com idades de 100 anos ou mais e que  $Cs^{137}$  é útil para identificar sedimentos acumulados durante o período 1963-1964. Posteriormente, Koide *et alli* (1972) verificaram a validade do método do  $Pb^{210}$  para determinar taxas de sedimentação em lagos e baías sobre períodos variando de anos a um século. Robbins e Edgington (1975) entre outros, usaram o método combinado do  $Pb^{210}$  natural e do  $Cs^{137}$  antropogênico no lago Michigan, concluindo aqueles autores que a mobilidade de ambos radionuclídeos dentro do sedimento é pequena e constatando que as medidas das taxas de sedimentação estavam concordantes com aquelas derivadas de métodos mais laboriosos — e estabelecidos — palinológicos e estratigráficos.

Neste trabalho é apresentado os resultados do uso do método conjugado do  $Pb^{210}$  e do  $Cs^{137}$  na medida da taxa de sedimentação recente em três áreas da baía de Todos os Santos. O conhecimento dessa taxa permite avaliar o modo como a baía vem se comportando nas últimas décadas e as alterações havidas em seus vários ecossistemas nesse período.

### Bases teóricas

$Pb^{210}$  ( $T_{1/2} = 22,26 \text{ a}$ ) é um parente distante do  $Ra^{226}$  na série radioativa do  $U^{238}$ . Uma série de propriedades favoráveis, nucleares e químicas, combinam-se para torná-lo uma ferramenta útil em estudos geocronológicos de sedimentos. O  $Pb^{210}$  é envolvido em processos sedimentares através de uma série de eventos. Inicialmente, o radionuclídeo  $Rn^{222}$  escapa da crosta da Terra após formação pelo  $Ra^{226}$ , numa taxa média de  $42 \text{ átomos min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ . O  $Rn^{222}$  ( $T_{1/2} = 3,8 \text{ d}$ ) decai na atmosfera, onde, seguindo-se uma série de decaimentos de radionuclídeos intermediários de vida curta, o  $Pb^{210}$  é formado e em seguida removido da atmosfera — onde tem um tempo de residência em torno de 10 dias — por chuva e neve e injetado nas águas dos oceanos e lagos através de suas superfícies.

No corpo d'água, o  $Pb^{210}$  presente é, parte proveniente da atmosfera e parte produzida pelo decaimento do  $Ra^{226}$  existente na água. O  $Pb^{210}$  é rapidamente removido da água por reações inorgânicas e bioquímicas, adsorvido por matérias em suspensão e afunda com o fluxo de partículas de sedimentação. O tempo de residência do  $Pb^{210}$  nos oceanos é de 1 a 2 anos antes de ele ser incorporado aos sedimentos. O  $Pb^{210}$  produzido *in situ* pelo  $Ra^{226}$  presente nos minerais constituintes dos sedimentos constitui o  $Pb^{210}$  suportado o qual está normalmente em equilíbrio radioativo com o  $Ra^{226}$ . O  $Pb^{210}$  precipitado da coluna d'água vem, portanto, constituir-se num excesso de  $Pb^{210}$  relativo ao  $Pb^{210}$  suportado.

Nas camadas do topo dos sedimentos, um perfil da atividade de  $Pb^{210}$  deve mostrar um sobre-equilíbrio radioativo em relação ao  $Ra^{226}$ . Com a profundidade, a atividade do  $Pb^{210}$  decresce exponencialmente até atingir a atividade do  $Ra^{226}$ . Essa atividade é o nível do ruído de fundo do  $Ra^{226}$  e dá o nível de atividade natural do  $Pb^{210}$  nos materiais dos sedimentos. O excesso de  $Pb^{210}$  nas camadas do topo é a preservação da injeção deste nuclídeo através da coluna d'água e é diretamente dependente do fluxo de deposição do sedimento, ambos considerados serem constante no período geológico considerado. A atividade do excesso de  $Pb^{210}$  numa dada amostra é calculada pela diferença entre a atividade total do  $Pb^{210}$  e a atividade do  $Pb^{210}$  suportado, ou seja,

$$[Pb_{exc}^{210}] = [Pb_{total}^{210}] - [Pb_{sup.}^{210}]. \quad (1)$$

A atividade do  $Pb_{exc}^{210}$  decresce exponencialmente com a profundidade conforme a equação:

$$A(z) = A(0) e^{-\frac{\lambda z}{f}}, \quad (2)$$

## Cronologia de sedimentação recente na baía de Todos os Santos usando $Pb^{210}$ e $Cs^{137}$

onde  $A(z)$  e  $A(0)$  são as atividades numa profundidade  $z$  e na interface água-sedimento, respectivamente,  $m$  é a massa cumulativa de sedimento por unidade de área acima duma profundidade  $z$ ,  $f$  é o fluxo de massa de sedimento e  $\lambda$  é a constante de decaimento radioativo para o  $Pb^{210}$  ( $3,111 \times 10^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). O gráfico de  $\log A(z)$  versus  $m$  é uma reta, cujo coeficiente angular permite calcular o fluxo  $f$ .

A massa cumulativa,  $m$ , serve como uma correção da compactação do sedimento e do encurtamento do testemunho devido ao impacto do amostrador e é calculada a partir do perfil de porosidade em cada testemunho pela equação

$$m = \sum (1 - \phi_z) \rho_s \delta_x, \quad (3)$$

onde  $\phi_z$  é a porosidade do sedimento na profundidade  $z$ ,  $\rho_s$  é a densidade do sedimento na forma sólida — comumente  $2500 \text{ kg m}^{-3}$  para sedimentos marinhos e lacustres e  $\delta_x$  a espessura de cada fatia em que foi seccionado o testemunho do sedimento. A porosidade  $\phi_z$  é calculada pela fórmula

$$\phi_z = \frac{P - S}{P + \left(\frac{\rho_a}{\rho_s} - 1\right)S}, \quad (4)$$

onde  $P$  é a massa da amostra saturada de água,  $D$  é a massa da amostra seca e  $\rho_a$  a densidade da água intersticial.

A taxa de sedimentação linear  $\omega$  é dada pela fórmula

$$f = \omega(1 - \phi_0) \rho_s = \omega \rho, \quad (5)$$

onde  $\phi_0$  é a porosidade e  $\rho$  a densidade, *in situ*, do sedimento, ambos no topo do testemunho.

### Área de Estudo

A área de estudo é a parte norte da baía de Todos os Santos onde os sedimentos são caracterizados por fácies de lama, de acordo com Lessa *et alli* (2000). As amostras e suas locações são dadas na fig. 1 e tabela 1. A baía de Todos os Santos é um dos maiores acidentes hidrográficos da costa brasileira, com uma área de cerca de  $1086 \text{ km}^2$ . Três rios principais deságuam na baía, o Paraguaçu, o Jaguaribe e o Subaé, com uma descarga média de  $120 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . A ilha de Itaparica, na entrada da baía, delimita os canais de Itaparica a oeste, estreito e pouco profundo e o de Itaparica-Salvador a leste, largo e profundo. A baía apresenta uma topografia de fundo relativamente plana, com uma profundidade média de cerca de 6 m. Áreas mais profundas, maiores que 30 m são encontradas em alguns canais entre as ilhas, atingindo 102 m no canal de Salvador.

Na entrada da baía situa-se Salvador. Em sua parte norte há atualmente vários complexos industriais



Figura 1. Mapa fisiográfico da baía de Todos os Santos com a localização dos testemunhos.

compreendendo mais que uma centena de indústrias dedicadas à metalurgia, petroquímica, cimento, solventes, exploração e refino de petróleo, celulose e usinas de asfalto, de açúcar e de álcool.

Tabela 1. Localização dos testemunhos por GPS

Amostra	Localidade	Latitude S	Longitude O
BTS-7	Madre de Deus	12° 32,52'	38° 38,50'
BTS-8	Martelo-I. de Maré	12° 44,38'	38° 31,18'
BTS-9	Oratório-I. de Maré	12° 45,42'	38° 30,48'

### Materiais e métodos

Três testemunhos foram retirados da parte norte da baía em janeiro de 1998, em profundidades de 5 a 15 m de lâminas d'água (fig. 1 e tab. 1), utilizando-se tubos de PVC de 76 mm de diâmetro e 1 m de comprimento, introduzidos no sedimento por percussão e depois mantidos congelados. Após extração do tubo, cada testemunho foi retalhado em fatias de 1 cm de espessura e estas foram pesadas ainda congeladas e depois de secadas a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 48 h, para determinar-se seus teores de água e suas porosidades.

A determinação do  $Pb^{210}$  foi feita através da medida da atividade alfa do  $Po^{210}$ . Para a extração do polônio, as fatias secadas foram pulverizadas usando-se morteiro e pistilo de ágata e alíquotas de 3 g digeridas em bequer de teflon com soluções ácidas contendo ácidos fluorídrico, nítrico, perclórico em três etapas, com a mistura levada à secura cada vez. 1 ml do traçador  $Po^{209}$  foi adicionado à amostra antes da digestão para controlar a eficiência de recuperação do  $Po^{210}$ . Na solução final, o resíduo é dissolvido em ácido clorídrico concentrado e o polônio recuperado em discos de prata (Flynn, 1968). O disco é, então, removido, lavado com água desmineralizada e metanol, secado e posto no espectrômetro alfa para contagens de 24 h. O  $Po^{210}$  ( $T = 138,8 \text{ d}$ ) e o  $Po^{209}$

Cronologia de sedimentação recente na baía de Todos os Santos usando  $Pb^{210}$  e  $Cs^{137}$  ( $T_{1/2} = 102$  a) são determinados através de suas emissões alfa de 5304 keV e 4882 keV, respectivamente.

Os radioisótopos  $Ra^{226}$  e  $Cs^{137}$  foram determinados simultaneamente por espectrometria gama não-destrutiva usando-se um espectrômetro gama com detector de germânio de alta pureza tipo poço;  $Ra^{226}$  via o fotopico de 352 keV do  $Pb^{214}$  — as amostras foram guardadas hermeticamente fechadas por um mínimo de 32 dias antes da contagem, para garantir o equilíbrio radioativo entre esses dois radioisótopos — e o  $Cs^{137}$  através de seu fotopico em 661,6 keV.

### Resultados e discussão

A análise granulométrica dos testemunhos deu para o BTS-7 75 % em peso de areia fina e 13 % de lama; no BTS-8, a parcela de lama é cerca de 70 % com 15 % de areia fina; e no BTS-9 lama e areia fina participam com cerca de 50 % cada.

As porosidades das fatias foram calculadas através da equação (4); verifica-se que a porosidade decresce com a profundidade em todos os testemunhos, mais fortemente no topo. A massa integrada foi calculada usando a equação (3) e tomando-se  $\rho_s = 2.500 \text{ kg m}^{-3}$ . A atividade do excesso do  $Pb^{210}$  de cada amostra foi calculada pela equação (1) tomando-se a atividade do  $Ra^{226}$  na amostra como igual a do  $Pb^{210}$  suportado. Os gráficos de regressão do logaritmo das atividades *versus* a massa integrada para os três testemunhos são mostrados no lado esquerdo da figura 2. As taxas recentes de sedimentação de massa calculadas pelos coeficientes angulares das retas de regressão são mostradas na segunda coluna da tabela 2. As taxas de sedimentação de massa na área estudada variam de 3,82 a 8,60  $\text{kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , podendo-se considerar dois grupos distintos de testemunhos: o BTS-7 com uma taxa é 3,82  $\text{kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  e BTS-8 e BTS-9 com taxas de 7,62 e 8,60  $\text{kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , respectivamente, com média de 8,11  $\text{kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , mais que o dobro da anterior. Uma possível explicação para uma menor taxa de deposição na área do testemunho BTS-7 é que esta fica próxima a um canal, onde correntes mais fortes podem tornar a taxa de deposição mais baixa nessa região. Já as áreas dos testemunhos BTS-8 e BTS-9 são regiões de baixas energias e de correntes fracas, propiciando maiores taxas de deposição. Para o testemunho BTS-9 vê-se dois trechos lineares, resultando em duas taxas de sedimentação distintas: uma de 8,60  $\text{kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  até os 33 cm de profundidade e outra de 2,55  $\text{kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  a partir dessa profundidade. Defronte à localidade do testemunho BTS-9, encontra-se o Centro Industrial de Aratu, implantado na década de 60 e cuja área marginal à baía foi desmatada. É possível que a mudança observada na taxa de deposição de sedimento decorra do aumento da erosão nessa margem.

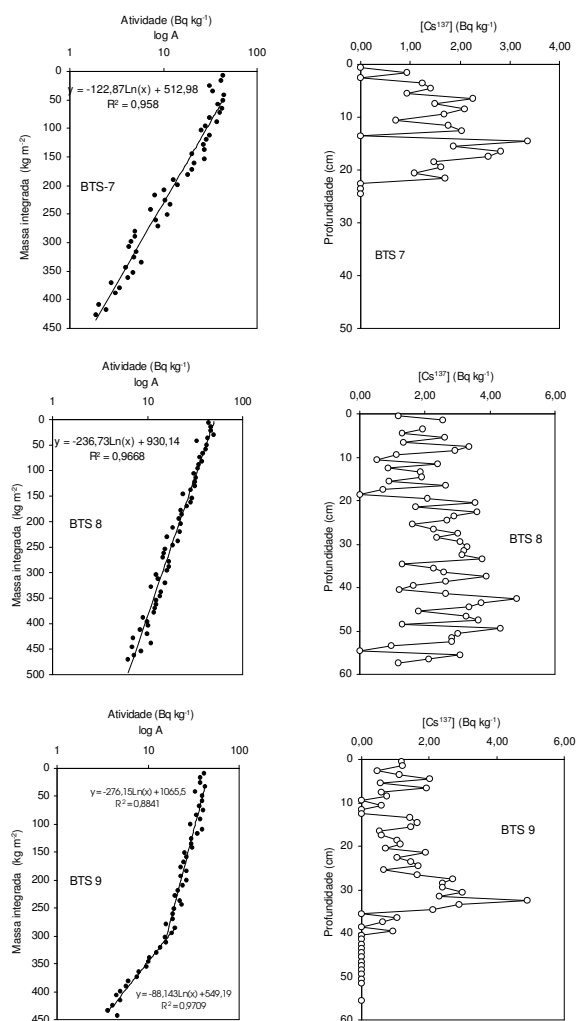


Figura 2. Gráficos de regressão do logaritmo da atividade do excesso do  $Pb^{210}$  *versus* a massa integrada (lado esquerdo) e da atividade do  $Cs^{137}$  *versus* a profundidade (lado direito) para os três testemunhos.

As taxas de sedimentação linear são dadas na coluna 3 da tabela 2, calculadas pela equação (5). A taxa de 2,87  $\text{mm a}^{-1}$  para o trecho inferior do BTS-9 é muito próxima daquela de 2,4  $\text{mm a}^{-1}$  encontrada por Lessa *et alli* (2000) para a taxa de sedimentação média dos

Tabela 2. Taxas de sedimentação de massa e linear

Testemunho	Taxa de sedimentação	
	de massa ( $\text{kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )	linear ( $\text{mm a}^{-1}$ )
BTS-7	$3,82 \pm 0,11$	$4,33 \pm 0,13$
BTS-8	$7,62 \pm 0,19$	$9,28 \pm 0,22$
BTS-9	$4,33 \pm 0,13$	$9,94 \pm 0,61$
	$2,887 \pm 0,093$	$2,87 \pm 0,13$

♠ Trecho superior: 0 a 33 cm. ♥ Trecho inferior: 33 a 59 cm.

## Cronologia de sedimentação recente na baía de Todos os Santos usando $Pb^{210}$ e $Cs^{137}$

últimos 5.000 anos para a mesma área da baía usando dados sísmicos. Ainda, a taxa de  $4,33 \text{ mm a}^{-1}$  do testemunho BTS-7 está praticamente na faixa de  $0$  a  $4 \text{ mm a}^{-1}$  encontrada por aqueles autores no trabalho citado. O comprimento de  $58 \text{ cm}$  do testemunho BTS-8 foi insuficiente para se atingir a profundidade de penetração do excesso de  $Pb^{210}$ . Contudo, não se verificou com o BTS-8, apesar de sua proximidade com o BTS-9, uma mudança na taxa de sedimentação como ocorreu naquele testemunho. O BTS-8 foi retirado do extremo norte de ilha de Maré, defronte do canal que separa a ilha do continente, enquanto o local do BTS-9 é uma pequena enseada a nordeste da ilha com águas bastantes calmas. É possível que a diferença no modelo de sedimentação possa ser explicado pelos modelos diferentes de corrente nesses dois locais, mas para verificar isso precisamos de novas amostragens.

A atividade máxima do  $Cs^{137}$  na baía de Todos os Santos não ultrapassa  $5 \text{ Bq kg}^{-1}$ , representando cerca de um quinto dos valores encontrado na literatura para algumas baías do hemisfério norte. O testemunho BTS-9 apresentou um ápice bem pronunciado de atividade do  $Cs^{137}$ ,  $4,90 \text{ Bq kg}^{-1}$ , em  $32,5 \text{ cm}$  e uma profundidade de penetração de  $35,5 \text{ cm}$ . Se associarmos esse ápice ao ano de 1965 — um ano após o ápice da atividade do  $Cs^{137}$  na atmosfera no hemisfério norte em 1964 — a profundidade de penetração corresponderá ao ano de 1961. Esses resultados estão de acordo com a cronologia obtida com o  $Pb^{210}$ , sugerindo que o  $Cs^{137}$  neste testemunho não migrou para as camadas mais profundas do sedimento após sua deposição. No testemunho BTS-7, o ápice de  $3,35 \text{ Bq kg}^{-1}$  na profundidade de  $14,5 \text{ cm}$  foi pouco pronunciado e a profundidade de penetração foi de  $22,5 \text{ cm}$ . Tomando o ápice como 1965, este valor difere de um ano daquele obtido pela cronologia do  $Pb^{210}$  (1966) e a profundidade de penetração corresponderia ao ano de 1947, sugerindo que houve migração. O testemunho BTS-8 mostrou mais de uma região de máximo e uma penetração além de  $57,5 \text{ cm}$  provavelmente resultado de remobilização.

### Conclusões

Do estudo realizado, podemos retirar as seguintes conclusões:

- 1) O método cronológico do  $Pb^{210}$  mostrou-se válido para determinar taxas recentes de sedimentação na baía de Todos os Santos. Isto significa que a atividade do  $Pb^{210}$  injetada via coluna d'água para o sedimento na baía é suficiente para ser detectada, acima da radiação de fundo, em períodos da ordem de 100 anos ou mais.
- 2) A taxas recentes de sedimentação de massa e linear para o testemunho BTS-7 retirado à margem de um canal com fortes correntes, foi de  $3,87 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  e  $4,45 \text{ mm a}^{-1}$ ; respectivamente. Para os testemunhos

BTS-8 e BTS-9, originários duma região de baixa energia e correntes fracas, essas taxas foram em média de  $7,73 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  e  $9,60 \text{ mm a}^{-1}$ . O testemunho BTS-9 mostrou um aumento na taxa de sedimentação nos últimos 32 anos, de  $2,9$  para  $10 \text{ mm a}^{-1}$ , possivelmente devido a mudanças no modelo de sedimentação pelo desmatamento das margens da baía naquela localidade.

3) O  $Cs^{137}$  foi detectado na baía de Todos os Santos com níveis de atividade que não ultrapassam  $5 \text{ Bq kg}^{-1}$ . No testemunho BTS-9 a atividade do  $Cs^{137}$  tem um ápice bem pronunciado de  $4,90 \text{ Bq kg}^{-1}$  na profundidade de  $32,5 \text{ cm}$ , correspondendo ao ano de 1965, sendo detectada até uma profundidade de  $40,5 \text{ cm}$ , correspondendo ao ano de 1958, ambas as datas em acordo com a cronologia obtida com o  $Pb^{210}$ . Esses resultados sugerem que o  $Cs^{137}$  não migrou para as camadas mais profundas após sua deposição. Essa é a primeira vez — para nosso conhecimento — que essa detecção é reconhecida na América do Sul. Nos testemunhos BTS-7 e BTS-8, os ápices e as profundidades de penetração das atividades do  $Cs^{137}$ , correlacionados com as cronologias do  $Pb^{210}$ , sugerem que neles houve migração do  $Cs^{137}$ .

### Agradecimento

Agradecemos ao CADCT-Septantec-Bahia pelos auxílios financeiros que possibilitaram a realização desta pesquisa.

### Bibliografia

- Argollo, R. M., 2001. Cronologias de sedimentação recente e de deposição de metais pesados na baía de Todos os Santos. Tese de doutorado em geofísica, Universidade Federal da Bahia .
- Flynn, W.W., 1968. The determination of low levels of Polonium-210 in environmental materials. *Anal. Chim. Acta* **43**, 221-227
- Koide, M., J.J. Griffin e E. D. Goldberg, 1975. Records of plutonium in marine and terrestrial samples. *J. Geophys. Res.* **80**, 4153-4162.
- Krishnaswami, S., D. Lal, J.M. Martin e M. Meybeck, 1971. Geochronology of lake sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* **11**, 407-414
- Lessa, G.C., A. C.S.P. Bittencourt, A. Brichta e J.M.L. Dominguez, 2000. A reevaluation of the late Quaternary sedimentation in Todos os Santos Bay (BA), Brazil. *An. Acad. Bras. de Ci.* **72** (4), 573-590.
- Robbins, J. A. e D.N. Edgington, 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan Using  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$ . *Geochim. Cosmochim. Acta* **39**, 285-304.





## Delimitação da Pluma de Contaminação dos Resíduos Sólidos do Lixão do Aurá (Ananindeua/PA) por Imageamento Elétrico

Gundisalvo Piratoba Morales, CPGG/UFPA, [Gundy@ufpa.br](mailto:Gundy@ufpa.br); José Gouvêa Luiz, CPGf/UFPA, [gouvea@ufpa.br](mailto:gouvea@ufpa.br); Ronaldo Lopes Rodrigues Mendes, NAEA/UFPA, [rlrmendes@bol.com.br](mailto:rlrmendes@bol.com.br); João Augusto Barradas, CEFET-PA, [jbarradas@jbarradas.com](mailto:jbarradas@jbarradas.com)

### Resumo

Na área de abrangência do lixão do Aurá foi realizado imageamento elétrico ao longo de nove perfis, usando arranjo Wenner. Os resultados obtidos com essa metodologia confirmam trabalhos realizados anteriormente na área, indicando que a água subterrânea está sendo atingida pelo deslocamento da pluma de contaminação provocada pelo choro produzido pela degradação dos resíduos sólidos da área.

### Introdução

O Método geofísico da Eletrorresistividade tem sido utilizado na detecção e no monitoramento de poluição causada por depósitos de lixo industrial e domiciliar. Medidas usando as técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) e de caminhamento elétrico foram, por exemplo, utilizadas por Stollar & Roux (1975) e Kelly, (1976) para determinar a poluição de águas subterrâneas.

A área do depósito de resíduos sólidos do Aurá tem acumulado aproximadamente 3,3 milhões de toneladas de lixo de forma precária, provocando a migração de “chorume”, que atinge o lençol freático, alterando as propriedades elétricas do subsolo. Estudos conduzidos por Piratoba Morales & Fenzl (2000) e por Luiz *et al.* (1999) indicaram que nesta área existe aquífero livre e pontualmente confinado, o qual possui porosidade de 0,28, condutividade hidráulica de  $1.4 \times 10^{-4}$  m/s e gradiente hidráulico de 0,695%, cujo lençol freático é predominantemente raso (entre 0,20 m e 3,00 m de profundidade). Essas propriedades hidrodinâmicas proporcionam velocidade de aproximadamente 8 cm/dia para os fluxos subterrâneos na área.

### Geologia da Área

Baseado nos estudos realizados previamente por BASTOS (1991) e em amostras coletadas através de sondagens SPT (profundidade máxima de 15 m), a geologia local é constituída de porções sedimentares silto-arenosas de coloração variada, arenosas (com granulometria variando de fina a grossa) de cor amarelada, branca e avermelhada, areno-siltosas marrons e variegada, argilo-siltosas e argilosas em geral variegadas. Ocorrem, ainda, ocasionalmente, níveis de concreção ferruginosa. As porções constituídas por siltes e areias são predominantes,

sobretudo nos níveis acima de 10 m, sendo nessas porções que ocorre o fluxo de choro.

### Metodologia

O levantamento foi realizado com imageamento Wenner (Griffiths & Barker, 1994), que permite identificar a variação de resistividade da subsuperfície nas direções horizontal e vertical. Foi empregada abertura mínima de  $a$  igual a 5 m e máxima de 25 m. As medidas em campo foram realizadas no mês de novembro e dezembro do ano 2000, utilizando equipamento *Sting RI IP*. Foram realizados oito perfis de 115 m e um de 275 m de comprimento, dispostos de forma aproximadamente radial ao depósito de resíduos sólidos (Figura 1). Os perfis de 115 m permitiram investigar até 16 m de profundidade, enquanto que o perfil de 275 m investigou até cerca de 40 m de profundidade. No processamento e representação das informações foi utilizado o programa de computador RES2DINV.

### Discussão dos Resultados

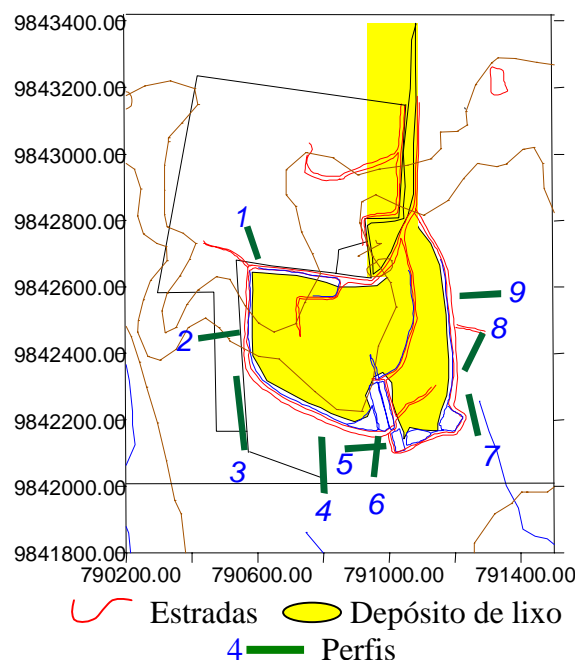
Os valores de resistividade medidos permitiram que se estabelecesse a seguinte associação com os tipos litológicos da área: as areias secas mostraram valores de resistividade maiores que 100  $\Omega$ .m; areias com água valores entre 70 e 100  $\Omega$ .m; siltes, entre 50 e 70  $\Omega$ .m; argilas entre 10 e 50  $\Omega$ .m e as camadas de concreções ferruginosas com resistividades na ordem de 1.500  $\Omega$ .m ou mais.

As areias atingidas pelo choro, que possui componentes orgânicos e inorgânicos ionizados (sais, ácidos, etc.) e que por isso provocam diminuição da resistividade, possuem valores menores que 10  $\Omega$ .m (entre 0,1 e 8  $\Omega$ .m, normalmente). Por isso as águas presentes nestas areias são consideradas poluídas por essa substância.

Os mais baixos valores de resistividade observados nos perfis indicam que a contaminação do lençol freático está ocorrendo de duas formas diferentes: a primeira causada pelos deslocamentos subterrâneos, os quais dependem fundamentalmente das características hidrodinâmicas do aquífero da área; e, a segunda, originada pela infiltração do choro que antes se deslocava superficialmente na área de abrangência do lixão do Aurá. Este último caminho depende das características geológicas do meio, as quais determinam os valores de porosidade e condutividade hidráulica.

## Delimitação da Pluma de Contaminação por Imageamento Elétrico

Os perfis 1, 3 e 8 mostram que as porções NO, SO e E da área apresentam contaminações provenientes da infiltração a partir da superfície, atingindo profundidades de até 5 ou 6 m. Por outro lado, os perfis 2, 4 e 9 mostram evidências de contaminação originada pelos deslocamentos subterrâneos de chorume nas direções antes mencionadas e ainda a O.



**Figura 1** – Localização dos perfis.

Essa contaminação ocorre entre 12 e 16 metros de profundidade. Nessas áreas não há infiltração proveniente da superfície. Pode-se apreciar nesses últimos perfis que os baixos valores de resistividade foram encontrados de maneira generalizada logo no início destes, ou seja, nas porções mais próximas ao depósito de resíduos sólidos.

Já os perfis 5 e 6, na porção sul da área, praticamente não apresentam contaminação até a profundidade investigada, a não ser localmente nas bases destes perfis, semelhante ao que ocorre no perfil 4, sendo neste último, muito mais pronunciado.

O perfil 3 (único com 275 m) demonstra a contaminação desta área (porção SO) e exibe também duas faixas grandes, bastante resistivas, isoladas, que possivelmente estão relacionadas a areia seca e/ou concreções ferruginosas (mais provavelmente esta última).

Os perfis 5 e 6 são constituídos por faixas de argila e areia com resistividades entre 8 e 100  $\Omega$ .m, relativamente contínuas, e praticamente sem resistividades baixas, exceto em uma faixa contínua

mas pouco espessa em profundidade (16 m). A ausência quase total de contaminação nestes perfis pode indicar que o chorume proveniente do depósito de resíduos sólidos, ao N desta faixa, estaria contaminando camadas mais profundas, não investigadas por estas medidas geofísicas. Esta conclusão advém de amostras de água de poços com 12 e 20 m de profundidade desta área que apresentam contaminação (Piratoba Morales & Fenzl, 2000). Apesar de haver camadas permeáveis acima, o chorume pode possuir recarga apenas nas camadas inferiores e como este poluente possui características hidráulicas/hidrogeológicas que o fazem deslocar-se lateralmente e para baixo, não haveria como poluir camadas superiores.

### Conclusões

De uma forma geral a pesquisa geofísica na área demonstra que os recursos hídricos subterrâneos estão sendo atingidos pelo deslocamento superficial e subterrâneo de chorume.

O fluxo do chorume parece seguir não apenas uma direção, mas várias, de forma quase radial, como demonstram os indícios de contaminação, tanto no lado O, como no E da área, pelo menos nos níveis investigados. Porém, há possibilidade de grande parte deste poluente ser apenas de origem superficial (lagoas ou disposição aleatória de chorume no terreno). Seriam necessárias mais algumas medidas para dirimir esta dúvida.

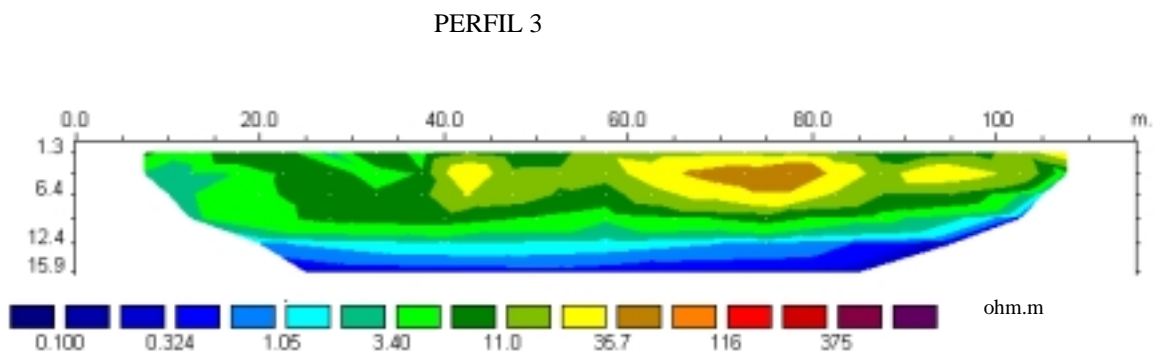
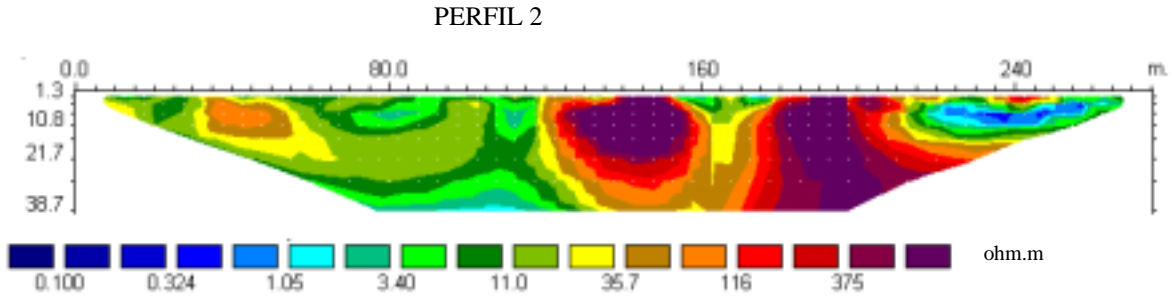
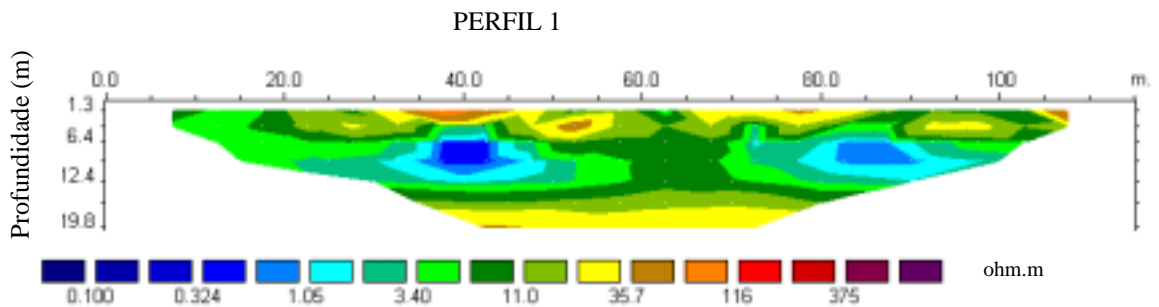
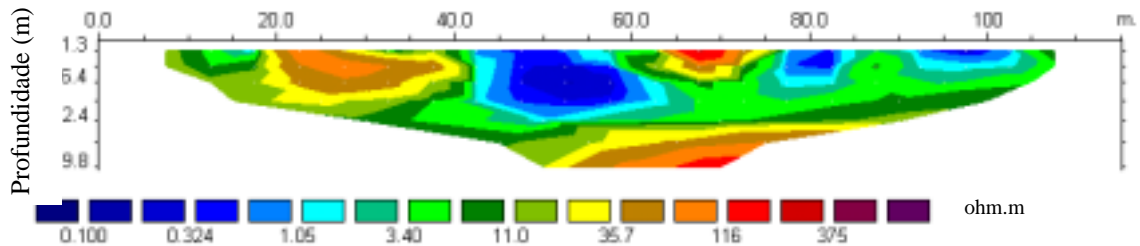
### Referências Bibliográficas

- BASTOS, R. G. P. 1991. Mapeamento por Método Geofísico das Camadas Permeáveis na Área do Complexo de Destino Final dos Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Belém. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia. Belém: Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará.
- GRIFFITHS, D.H. & BARKER, R.D. 1994. Electrical imaging in archaeology. *Journ. of Archaeological Science*. 21: 153-158.
- KELLY, Y. W. 1976. Geoelectric sounding for delineating ground water contamination. *Ground Water*. 14(1):6-10.
- LUIZ, J.G.; PIRATOBA MORALES, G.; ALVES, J. G.V.; LOPES, E. 1999. Apparent Resistivity Measurements in Complexo do Aurá Landfill, Ananindeua - Pará -Brazil. Sixth International Congress of Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro de Julho de 1999.
- PIRATOBA MORALES, G. & FENZL, N. 2000. Environmental impact for of the deposit of solid

## Delimitação da Pluma de Contaminação por Imageamento Elétrico

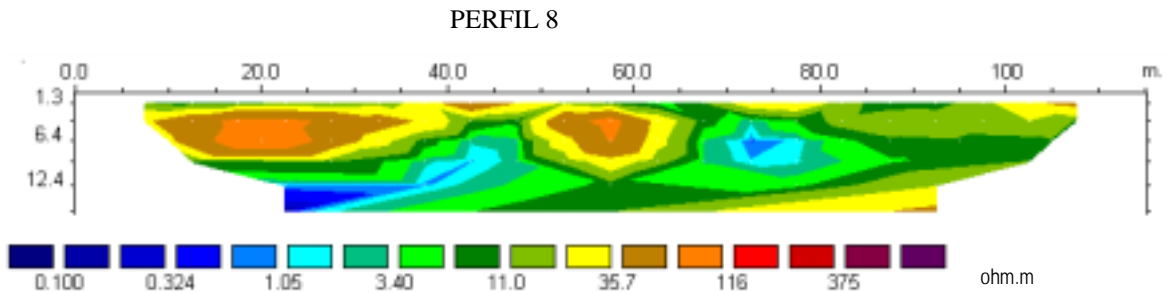
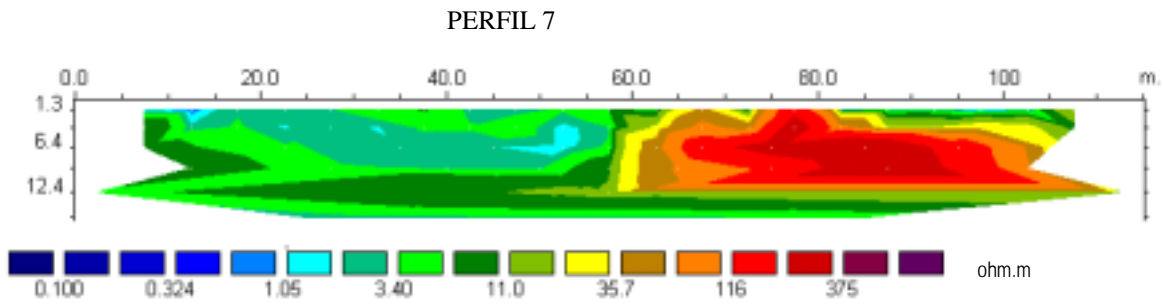
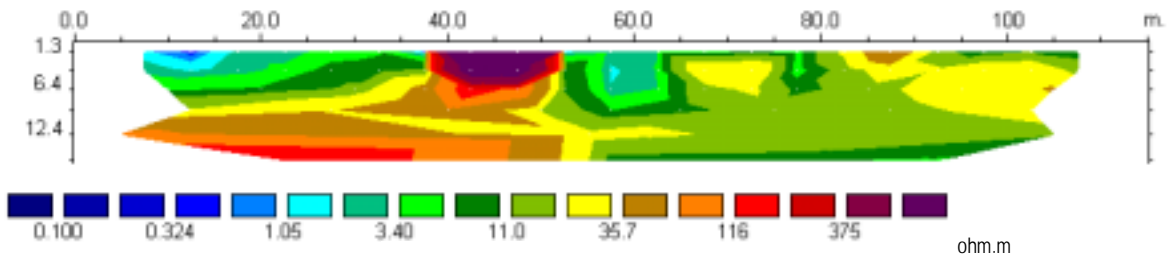
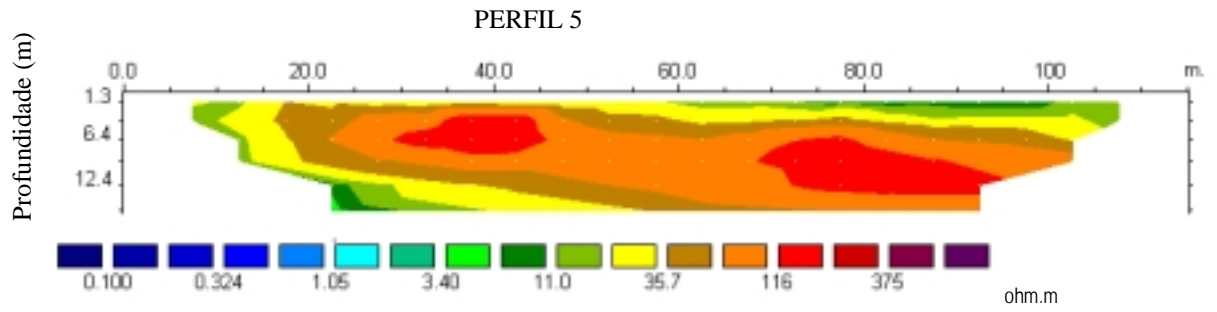
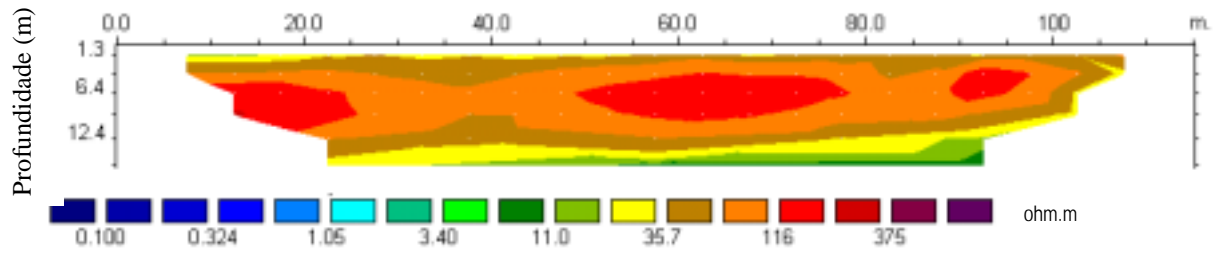
waste of the "Aura" Belém-PA (Brazil) 31<sup>a</sup>  
International Geological Congress. Rio de  
Janeiro - Brasil. Agosto 6-17/2000 (4218-A53).

STOLLAR, R. L. & ROUX, P. 1975. Earth resistivity  
survey – A method for defining groundwater  
contamination. *Ground Water*. 13(12):145-150.



PERFIL 4

## Delimitação da Pluma de Contaminação por Imageamento Elétrico



PERFIL 9



## Environmental Gamma Radiation Dose in Municipalities, Eastern São Paulo State, Brazil.

Rodrigo O. Bastos, UNICAMP, [rbastos@ige.unicamp.br](mailto:rbastos@ige.unicamp.br)

Elisabete M. Pascholati, UNICAMP, [paschol@ige.unicamp.br](mailto:paschol@ige.unicamp.br)

### Abstract

Aerial gamma spectrometric data were reprocessed aiming to estimate outdoor gamma radiation dose for an area of about 11500 Km<sup>2</sup> in eastern of São Paulo state, Brazil, which covers fifty municipalities.

To evaluate the reliability of these reprocessed data, a residual analysis was carried out for grids constructed by different methods of interpolation, and results for the Itu Intrusive Suite obtained from the aerial data were compared with published values estimated from terrestrial survey. This comparison shows up attenuation regarding probably to soil moisture and vegetal recovery of at least 20%.

A map of average radiation dose per municipality is presented. The averages varied from 665  $\mu\text{Sv. year}^{-1}$  in Engenheiro Coelho to 1276  $\mu\text{Sv. year}^{-1}$ , in Votorantim. Median values were estimated for Campinas, Itu and Paulínia (924  $\mu\text{Sv. year}^{-1}$ , 900  $\mu\text{Sv. year}^{-1}$  e 847  $\mu\text{Sv. year}^{-1}$ , respectively). The population-weighted average dose for the area was 888  $\mu\text{Sv. year}^{-1}$ .

The municipalities situated over sediments of Paraná Basin presented lowers averages. The higher ones were estimated in municipalities where part of the area covers granite intrusive suites.

### Introduction

Since its discovery, ionizing radiation has been a target of different kinds of studies on the effects in live organisms. Although some exceptions, as the adaptative response (Wolf, 1992), the major known effects of radiation in human beings comes from high level exposure (Yalow, 1983). There is not much evidence of harmful effects for low doses of radiation. At present, it is being difficult to establish them, remaining inconclusive an estimate of precise effects – the conclusions are pointed by studies of diverse nature, nonreplicable. The necessity to enunciate safety limits of radiation permitted in work places and in general environment, stimulate the search for a solution to tackle this problem (Mauss, 1983).

The most important contributions to the radiation absorbed by human populations are from sources that occur in the natural environment: cosmic rays; radioactive isotopes present in human body; and <sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U, and <sup>232</sup>Th placed in rocks and soils that compound earth's crust. This paper deals principally

with the last one as it determines the major contrasts of dose values on a regional scale.

The original purpose of the aerial geophysical surveys done in Brazil by CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) was to support geological mapping aiming, exclusively, mineral exploration. In this work, data from the São Paulo – Rio de Janeiro Project, executed by the same company, were reprocessed and analyzed considering the municipal areas of the studied region. Intending an estimate of the dose absorbed by municipal populations, gamma ray spectrometry was used to calculate the concentration of radioactive elements in terrestrial environment and than the radiation exposition rate. It permitted to generate a map of average radiation dose per municipality.

To evaluate the reliability of these reprocessed data, besides a residual analysis that was carried out for grids constructed by different methods of interpolation, results for the Itu Intrusive Suite obtained from the aerial data were compared with published values estimated from terrestrial survey (Pascholati et al. (1997), Pascholati (1990)).

### Area Delimitation and Source of the Aerial Data

The gamma spectrometric data used here refers to the data obtained in the sub-area 6 (delimited by the polygon that has as its vertices the coordinates of table 1) of the São Paulo – Rio de Janeiro Project, executed by CPRM.

Table 1- Coordinates of the vertices of the polygon that delimit the sub-area 6 of São Paulo - Rio de Janeiro Project.

South Latitude	West Longitude
23° 45'	47° 30'
22° 00'	47° 30'
22° 00'	SP/MG *
SP/MG *	46° 30'
23° 45'	46° 30'

\*Political limits between states: São Paulo (SP), and Minas Gerais (MG).

This area was chosen because the assess ability of the data and the lithological differences that presented. In the northeast, the area covers the sediments of Paraná Basin, a geological unit that, in general, presents low concentrations of radioactive elements. In the southwest, there are granite intrusive suites (with known higher concentrations of <sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U, and <sup>232</sup>Th) situated in sequences of metasediments, where lower radiometric responses are expected.



## Radiation Dose in Municipalities, SP, Brazil.

### Sensitivities and Radiation Dose Estimates

The sensitivity values (counts per unit of time per unit of element concentration) used were 4.68, 7.49, 62.86, for Th, U e K, respectively. These values were calculated through the theoretical model developed by Amaral and Pascholati (1998).

The same criteria used by Pascholati et al (1997), that surveyed environmental radiation in Itu Intrusive Suite was used here to estimate the radiation dose. Taking in account even the contributions of cosmic rays (130  $\mu\text{Sv. year}^{-1}$ ) and the internal radioactivity of the body (190  $\mu\text{Sv. year}^{-1}$ ), annual dose was calculated by the following equation:

$$\text{Dose } (\mu\text{Sv. year}^{-1}) = 320 + (114,964 * K (\%) + 52,499 * eU (\text{ppm}) + 22,266 * eTh (\text{ppm}))$$

### Convenience of Gridding Methods

The data were interpolated by different methods: Krigging, minimum curvature and bi-directional (linear, cubic, Akima and nearest neighbor, for each interpolation direction).

The reliability of the generated grid (eighteen in all) was analyzed using the Normalized Residual Index (NRI) (Berry, 1997). The NRI is defined by the expression:  $\text{NRI} = \text{absolute residual values average} / \text{real values arithmetic average}$ ; where residual value is understood as the difference between the real or measured value and the one estimated by the interpolation method. Defined in this way, as the NRI becomes smaller, the estimated values become closer to the ones measured in the survey. Among the interpolation methods that presented good visual responses, the bi-directional Akima-cubic obtained the smallest NRI.

Due to the necessity of applying anti-aliasing filter in interpolation processes, grids do not have the same degree of spatial variation that the profiles, measured along the flight lines, have. Following in this argument, Grasty (1983) chose to use profiles instead of grids to estimate dose in population, as they would preserve the real variations of the superficial radioactivity. In this paper we opted to use grids because they reflect the regional character (not punctual) of the superficial variation of the environmental gamma radiation, as the distribution of the population has the same character.

### Itu Intrusive Suite

Among the granite bodies located in the area, radiometric properties have been studied for the Itu Intrusive Suite, whose dose map is shown in figure 1.

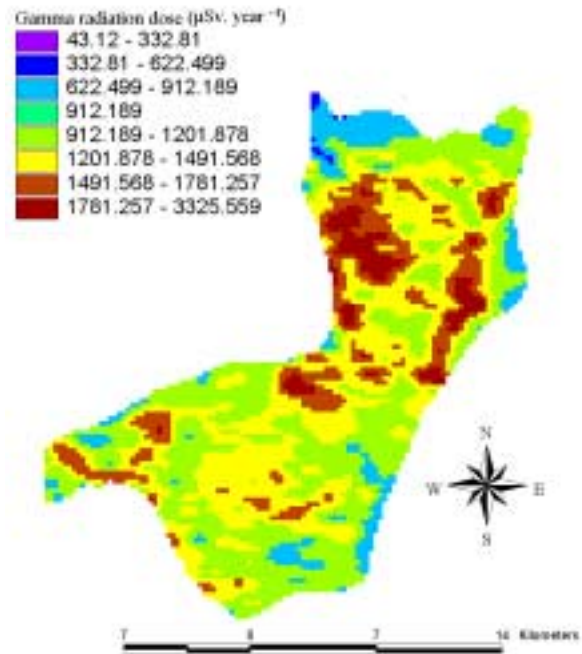


Figure 1: Itu Granite Suite map of gamma radiation dose.

To compare the results obtained here, using aerial data obtained by Pascholati et al. (1990) and Pascholati (1997) through terrestrial data, dose was calculated either using the criteria described by Grasty (1993). Table 2 shows the encountered values.

Table 2 – Dose values obtained for Itu Intrusive Suite by two different conversion criteria.

	Grasty (1983)	Pascholati et. al. (1997)
Data		
Terrestrial	1318 $\mu\text{Sv. year}^{-1}$ (513 a 2208)* (Pascholati, 1990)	1590 $\mu\text{Sv. year}^{-1}$ (565 a 3658)* (Pascholati et. al, 1997)
Aerial	974 $\mu\text{Sv. year}^{-1}$ (492 a 1813)*	1251 $\mu\text{Sv. year}^{-1}$ (568 a 2436)*

\* Minimum and maximum doses for the suite.

The systematically lower values (attenuation of 26 % and 21 %) found through aerial data are probably due to vegetation cover and soil moisture not considered in the estimate, and to intrinsic features of the data, in which dose values represent the mean in an area that depends essentially on flight height.

### Radiation Dose Estimates in Municipalities

Grasty (1983) claims that the dose values estimated using concentrations of radioactive elements, inferred by aerial data, must be submitted to correction factors

## Radiation Dose in Municipalities, SP, Brazil.

related to: the effect of vegetation cover, the variation of soil moisture along the year, and the population distribution.

The effect of vegetation and soil moisture was not considered in the analysis. So the following estimates are at least 20 % lower than the real values (see table 2).

The conventional way to treat the population distribution is to assume population equally distributed in politically determined areas. It happens because the accessible population data are usually the demographic senses, which have as minimum unit of area this political division.

Figure 2 shows a map where political limits between municipalities were superposed on a map of annual gamma radiation dose. Figure 3 presents a map of average radiation dose per municipality (average of grid values that falls inside the municipal limits). The average annual dose for the fifty municipalities is  $904 \mu\text{Sv}\cdot\text{year}^{-1}$ , and the population-weighted average is  $888 \mu\text{Sv}\cdot\text{year}^{-1}$ . The table 3 presents the results for several municipalities.

Table 3: Minimum, maximum, and average values of dose for several municipalities presented in figure 3.

Municipality	N <sup>o</sup>	Dose ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{year}^{-1}$ )		
		Min.	Max.	Average
Votorantim	1	385	3326	1276
Valinhos	2	666	2500	1190
Espírito S. do Pinhal	3	334	2863	1186
Itupeva	4	637	2486	1161
São Roque	5	462	2274	1151
S. Antônio do Jardim	6	710	1958	1147
Morungaba	7	574	2290	1143
Itatiba	8	649	1963	1128
Pedreira	9	540	2480	1119
Araçariguama	10	455	2248	1061
Alumínio	11	353	2282	1055
Jaguariúna	13	424	2461	1035
Tuiuti	15	538	2940	1015
Amparo	18	486	2884	958
Campinas	20	414	2574	924
Itu	22	460	1863	900
Serra Negra	23	417	2231	896
Leme	25	354	1921	873
Monte Alegre do Sul	28	513	2170	862
Várzea Paulista	29	548	1065	857
Paulínia	30	394	1304	847
Araras	32	402	1958	814
Pirapora do Bom Jesus	34	189	1679	800
Estiva Gerbi	36	471	1193	768
Mogi-Guaçu	37	361	2534	767
Cabreúva	38	363	1636	762
Americana	39	339	1291	746
Conchal	40	484	1100	744
Santo Antônio da Posse	41	412	1142	729
Monte Mor	42	452	1375	728
Elias Fausto	43	439	1378	726

Moji Mirim	44	463	1737	725
Sumaré	45	472	1285	716
Nova Odessa	46	320	1275	704
Hortolândia	47	437	1258	695
Holambra	48	479	1055	684
Artur Nogueira	49	481	1032	680
Engenheiro Coelho	50	445	954	665

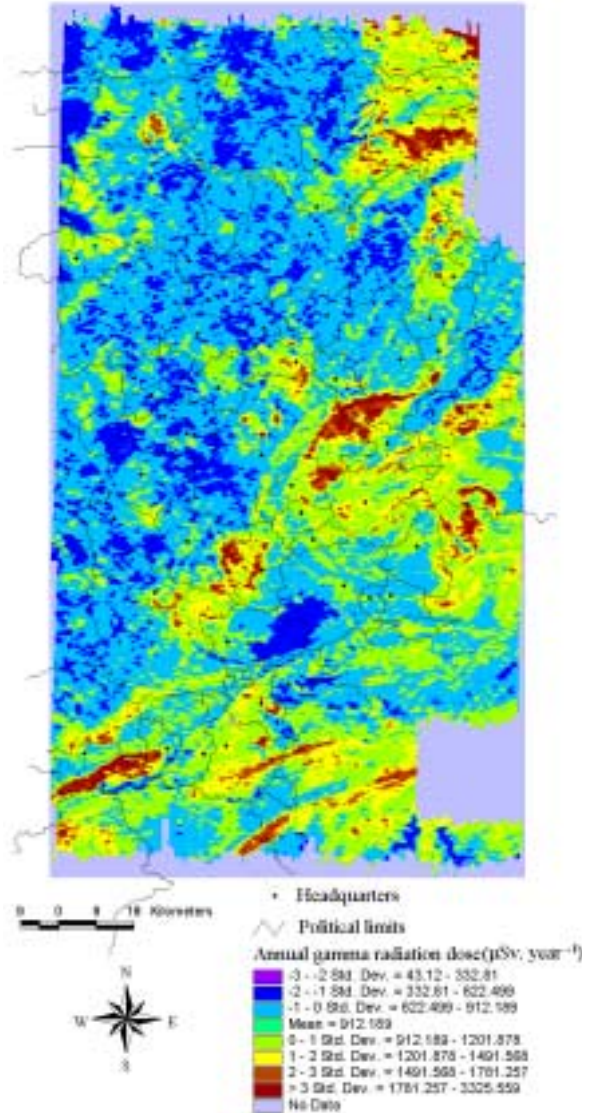


Figure 2: Map of political limits between municipalities over a map of annual gamma radiation dose.

## Radiation Dose in Municipalities, SP, Brazil.

As the effect of vegetation and soil moisture was not considered in the analysis, the estimates presented are at least 20 % lower than the real values. This percentage is indicated by comparison between dose estimates obtained through terrestrial and aerial gamma spectrometric data for Itu Intrusive Suite.

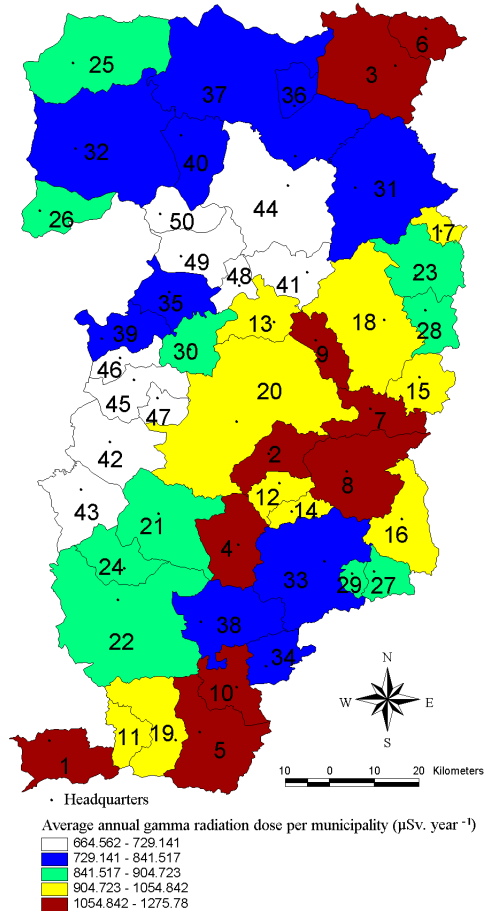


Figure 3: Map of average radiation dose per municipality. The municipalities are numerated in descending order of average dose value (see table 3).

### Conclusions

As expected, municipalities situated over sediments of Paraná Basin presented lower dose averages (Artur Nogueira  $680 \mu\text{Sv} \cdot \text{year}^{-1}$ , Engenheiro Coelho  $665 \mu\text{Sv} \cdot \text{year}^{-1}$ ). The higher ones were estimated in municipalities where part of the area covers granite intrusive suites (Votorantim  $1276 \mu\text{Sv} \cdot \text{year}^{-1}$ , Valinhos  $1190 \mu\text{Sv} \cdot \text{year}^{-1}$ ). For this reason they presented either big variations of dose values in their own municipal areas – the granites are fitted in meta-sediments sequences with much lower concentration of radiogenic isotopes. Median values were estimated for Campinas ( $924 \mu\text{Sv} \cdot \text{year}^{-1}$ ), Itu ( $900 \mu\text{Sv} \cdot \text{year}^{-1}$ ) and Paulínia ( $847 \mu\text{Sv} \cdot \text{year}^{-1}$ ).

The population-weighted average dose for the fifty municipalities was  $888 \mu\text{Sv} \cdot \text{year}^{-1}$ .

### References

- Amaral G., Pascholati E. M., 1998, Transformação dos dados aerogeofísicos do Projeto Rio das Velhas para uso em integração de dados, Annals XL Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, 396.
- Berry, J.K., 1997, Beyond Mapping: Justifiable Interpolation, GIS World, 10 (2), 34.
- Grasty, R.L., Carson J.M., Charbonneau, B.W., Holman, P.B., 1983, Natural background radiation in Canada, Ottawa, Geological Survey of Canada, 39 p. (Bulletin 360).
- Mauss, E.A., 1983, Health effects of ionizing radiation in the low-dose range, Annals New York Academy of Sciences, 27-36.
- Pascholati, E.M., 1990, Caracterização geofísica da Suite Intrusiva de Itu, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, Ph.D. Thesis, 135.
- Pascholati, E. M., Amaral, G., Hiodo, F.Y., Okuno, E., Yoshimura, E.M., Yukihiro, E.G., 1997, Survey of environmental gamma radiation around Itu (SP), Annals XI ENFIR/IV ENAN JOINT NUCLEAR CONFERENCES, Poços de Caldas, MG., Digital Register, 6p.
- Wolff, S., 1992, Is radiation all bad? The search for adaptation, Radiation Research, 131:117-123.
- Yalow, R.S., 1983, Reappraisal of potential risks associated with low-level radiation, Annals New York Academy of Sciences, 37.

### Acknowledgments

Gratitude to CPRM, because ceded aerial data and to CNPq, for the financial support given to this work.

# Estatística Básica com Grandezas do Clima de Ondas da Bacia de Campos

Ney A.B. Seixas, CNPq/ON, seixas@on.br

## Resumo

Este trabalho apresenta alguns resultados do estudo do Clima de Ondas da Bacia de Campos: Fundamentos e Análise dos Dados (Seixas, 2001). Os resultados constituem a base para o entendimento das características do clima desta região ou de qualquer outra.

## 1) Introdução

Mais de 70% das ocorrências na Bacia de Campos tem como principal característica a coexistência de 2 ou 3 mares totalmente distintos, em período, direção e altura das ondas. A constatação, baseada nas medições instrumentais, assegura, sem nenhuma dúvida, a multimodalidade predominante na região. Este é o ponto de partida para a estatística básica apresentada a seguir. Porém, antes de apresentá-la, convém esclarecer o que é entendido como tal. A combinação das características do clima de ondas, com até 3 mares distintos, 8 bandas de período (ou frequência) e 8 octantes de direção permite conjugá-los de forma que é possível a obtenção centenas de subconjuntos. Além disto, é também usual (e relevante) introduzir em cada um dos subconjuntos as alturas de onda, variando em intervalos regulares (0.25m ou 0.5m), aumentando-se ainda mais o seu número. Dentre os estudos que podem ser feitos, um deles é particularmente importante e denominado distribuição conjunta de altura e período. Seu objetivo é avaliar a resposta das estruturas marítimas às excitações externas recebidas das ondas. Todas elas (plataformas, navios, etc...) possuem um período natural de oscilação. O efeito combinado da altura e do período de uma onda serve como avaliador de risco ao qual estão expostas. Se o período da onda é longo ou curto em comparação com o período natural da estrutura, ela não corre riscos. Por outro lado, se o período for próximo ao período natural de oscilação da estrutura, sua resposta pode atingir níveis críticos, aumentando proporcionalmente com a altura da onda (ressonância). Existem ainda dois importantes aspectos na distribuição conjunta de altura e período: **1<sup>o</sup>** são sempre utilizados a altura significativa da onda,  $H_s$ , e o período de pico  $T_p$  (Seixas, 2001). **2<sup>o</sup>** numa ocorrência unimodal tem-se apenas um par  $(H_s, T_p)$ . Entretanto, em casos bi ou trimodais, estes pares devem ser correlacionados:  $(H_{s1}, T_{p1})$ ,  $(H_{s2}, T_{p2})$  e  $(H_{s3}, T_{p3})$ , além de pertencerem a um mesmo octante.

## 2) Resultados da Estatística Básica

A estatística básica mostra como as alturas, frequências (ou períodos) e direções das ondas se distribuem em função das modalidades do mar, apresentadas nas figuras a seguir:

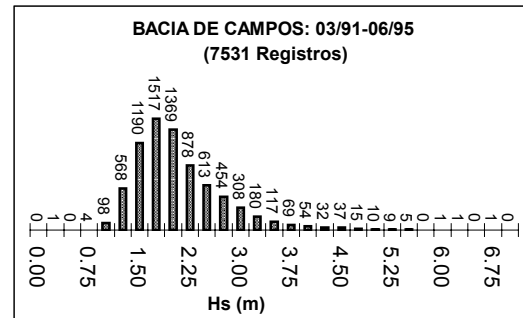


Figura 1a: Total das alturas significativas.

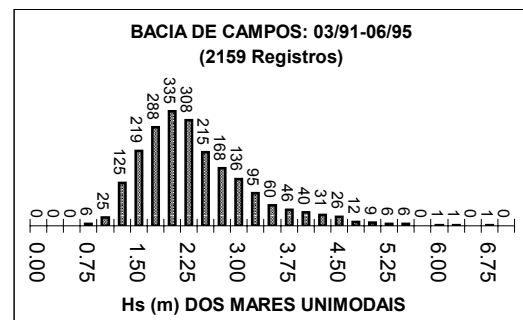


Figura 1b

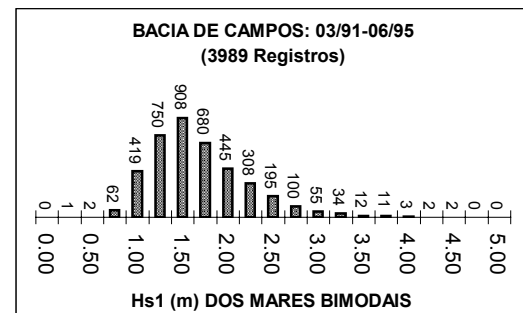


Figura 1c

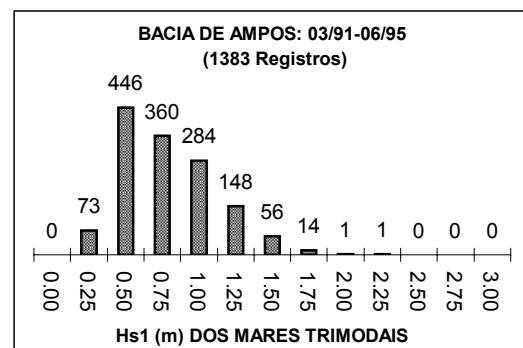
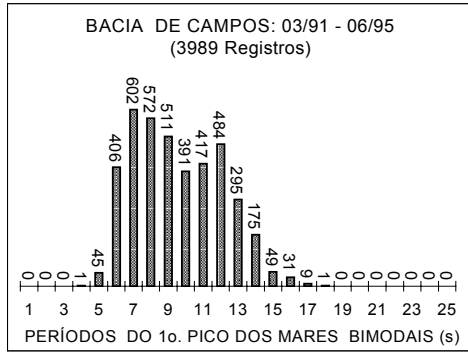
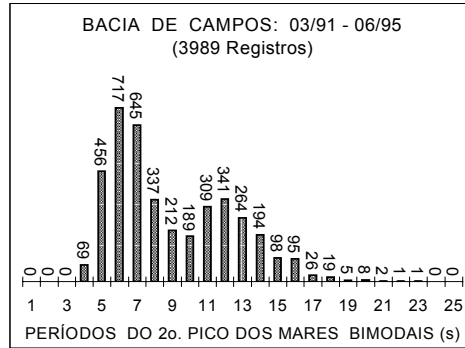


Figura 1d

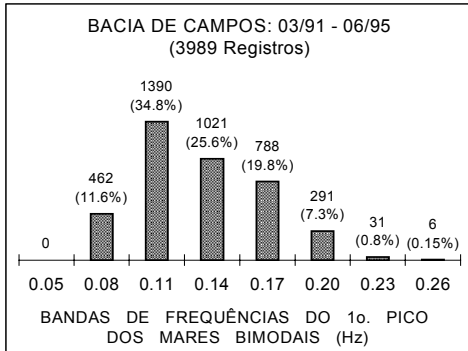
### Estatística Básica com Grandezas do Clima de Ondas



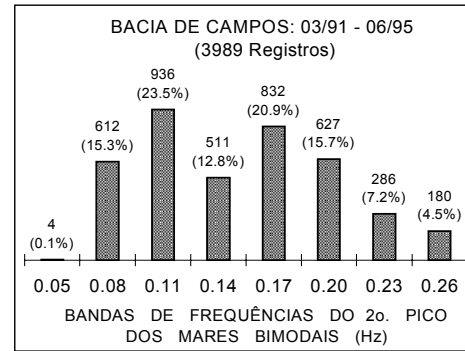
a1



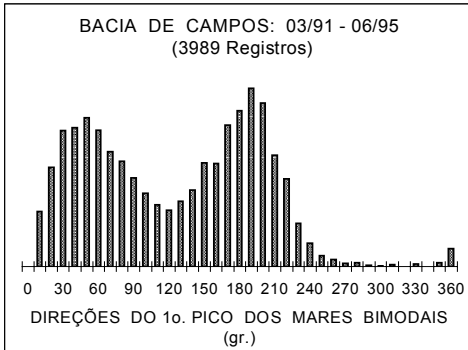
b1



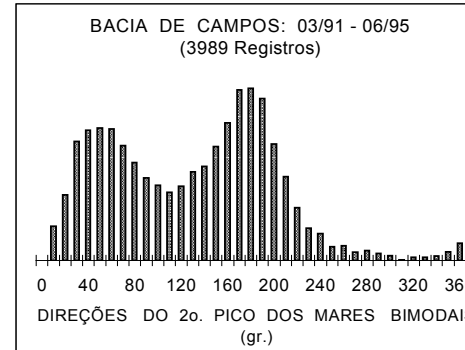
a2



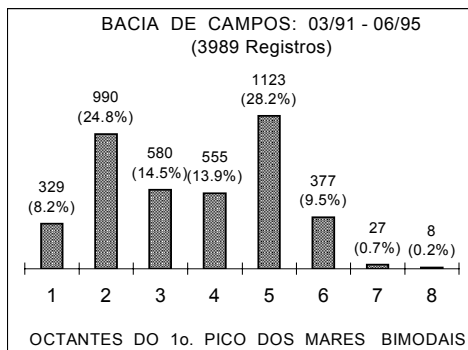
b2



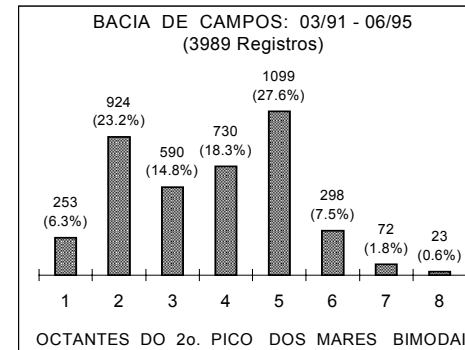
a3



b3



a4



b4

Figura 2: Distribuição de algumas grandezas dos picos dos mares bimodais.



### Estatística Básica com Grandezas do Clima de Ondas

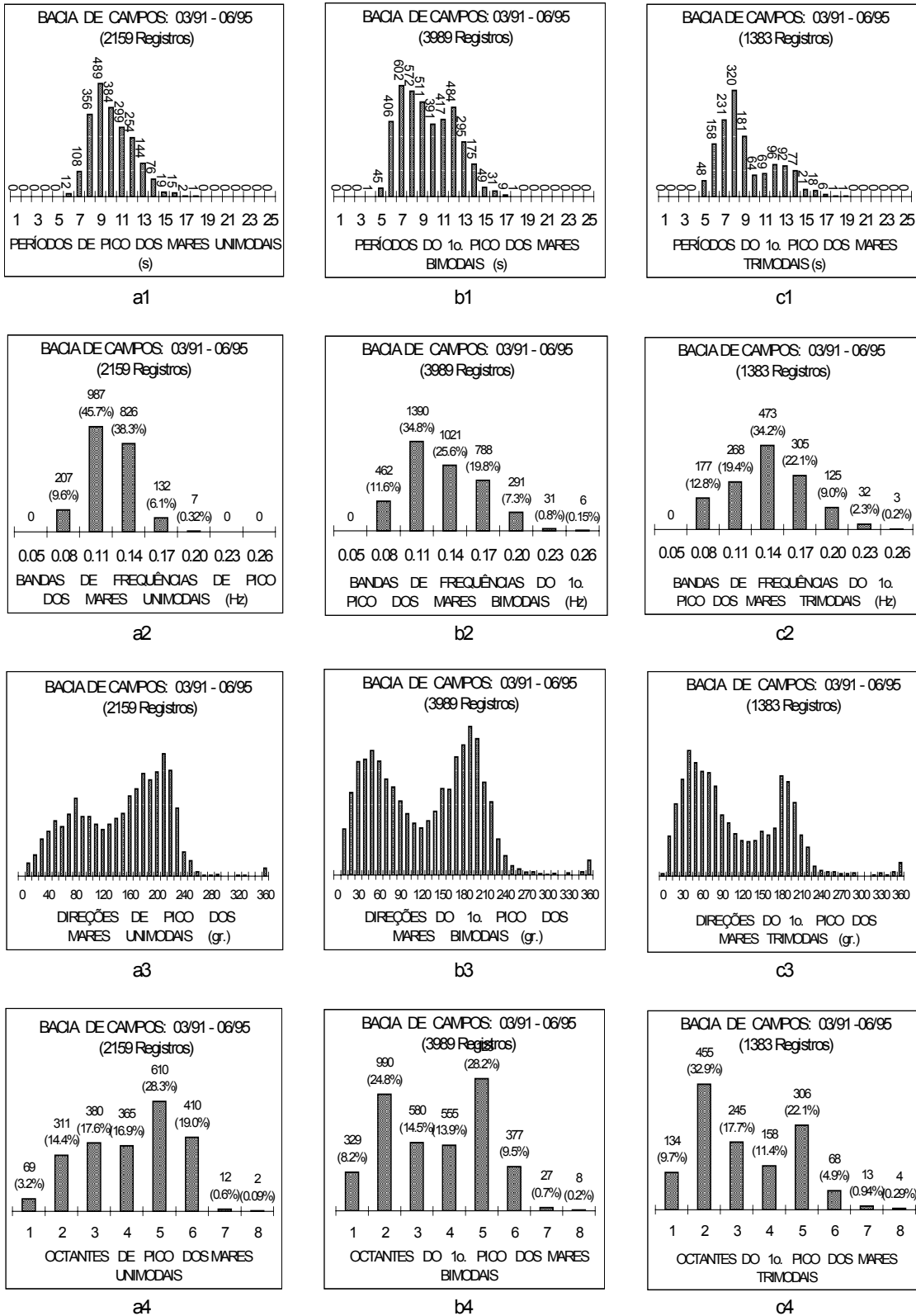


Figura 3: Distribuição de algumas grandezas do pico do mar unimodal (figuras *a*) e do pico dominante dos mares bi e trimodais (figuras *b* e *c*, respectivamente.).



## Estatística Básica com Grandezas do Clima de Ondas

### 3) Considerações Sobre os Resultados

Conforme afirmado em Seixas, N. (2001), o processamento dos dados instrumentais e a modelagem de alguns espectros, resultam na obtenção de mais de 60 grandezas (ou parâmetros) de onda. Logo, uma estatística ampla permite o estudo de inúmeros aspectos do clima de ondas, seja com grandezas individuais (como apresentado neste trabalho) ou com a combinação de duas ou mais delas, como é o caso da distribuição conjunta de altura de onda e período. Embora este estudo esteja pronto, não será mostrado no presente trabalho, devido à limitação de espaço. Para melhor entendimento do leitor, no tocante à quantidade de estudos que podem ser realizados, basta considerar que tem-se 3 modalidades de mar, 8 bandas de frequência e 8 octantes de direção, totalizando 192 subgrupos distintos (3x8x8). No caso da distribuição conjunta de altura e período, a introdução de intervalos regulares de 0.5m nas alturas de onda, implicará numa quantidade ainda maior de subconjuntos. Além disto, nos casos bimodais, por exemplo, existe uma classificação interna entre os espectros que são dominados baixa ou alta frequência. Ídem para os trimodais, que podem ser dominados por baixas, médias ou altas frequências. Em resumo, são várias centenas de subconjuntos e todos devem ser analisados. Portanto, faz pouco sentido apresentar, a título de ilustração, apenas um ou dois, mostrando as semelhanças e diferenças entre ambos. Contudo, vale realçar que em alguns subconjuntos há uma grande concentração de ocorrências, se comparado a outros. É o caso dos bimodais, com eventos nos octantes 2 e 5. Concluindo, o autor coloca à disposição dos leitores interessados todos os resultados, com as particularidades discutidas acima.

#### 3.1) Considerações Sobre a Estatística Básica

##### 3.1.1) As Alturas das Ondas

Nas figuras 1 são apresentadas as distribuições das alturas significativas das ondas. Em (1a), que abrange o total da campanha, pode ser notado que a maior altura significativa registrada foi 6.75 m. O mesmo valor é encontrado nos mares exclusivamente unimodais (1b). Na verdade é o mesmo evento. As figuras (1c) e (1d) mostram as alturas significativas dos picos dominantes dos mares bi e trimodais, registrando valores de 4.5 e 2.25 m, respectivamente. Em Seixas, N. (2001), viu-se que as alturas das ondas calculadas no domínio da frequência dependem do momento espectral  $m_0$  e que as mesmas também são calculadas no domínio do tempo, sendo importante confrontação dos resultados. Na tabela 1 abaixo, são apresentados as **médias** das quatro formas mais comuns de expressar as alturas de onda em ambos os domínios:

	frequência	tempo
$H_{med.}$	1.22 m	1.15 m
$H_s$	1.96 m	1.78 m
$H_{1/10}$	2.50 m	2.15 m
$H_{max}$	3.12 m	2.87 m

Tabela 1: Valores médios das alturas de onda.

Como pode ser claramente notado, todas as médias calculadas no domínio da frequência são maiores que as calculadas no domínio do tempo. De acordo com a literatura do assunto, isto deve-se ao fato de que as equações utilizadas no domínio da frequência tendem a sobreestimar os resultados. Curiosamente, no caso da **maior onda registrada em toda a campanha**, foram calculados **9.43 m** no domínio da frequência e **11.69 m** no domínio do tempo.

#### 3.1.2) Os Períodos, Bandas de Frequência, Direções e Octantes das Ondas.

Na figura 2, que trata exclusivamente dos casos bimodais, podem ser notadas outras peculiaridades: o **maior período registrado é 23 s** e corresponde ao segundo pico do espectro. Este é um caso interessante pois trata-se de um evento com pico dominante na alta frequência e uma outra ondulação de frequência muito baixa. Este segundo pico corresponde à uma onda de pequena altura, cuja zona de geração encontra-se bem distante do local de medição e, conseqüentemente, percorreu uma longa distância até este ponto. As ondulações longínquas são denominadas “swell”. As figuras (2a3), (2b3), (2a4) e (2b4) mostram que a presença deste tipo de onda é dominante nos mares bimodais da região e fortemente acentuada também nos mares trimodais. Em linhas gerais, o “swell” é o padrão de onda dominante da Baía de Campos, fato confirmado pela correspondente dominância do octante 5 (**Sul**, centrado em 180° de azimute), seguido de perto por mares com características opostas, isto é, possuem zona de geração bem mais próxima do local de medição e são denominadas simplesmente “mar local” ou “sea” e pertencentes ao octante 2 (**Nordeste**, centrado em 45° de azimute). **Estes dois padrões**, presentes em grande parte dos registros, **representam mais de 50% do total das ocorrências**. Tal fato só pode ser conhecido com certeza após este trabalho, que fez uso de dados coletados por uma bóia oceanográfica direcional.

#### 4) Bibliografia

Seixas, N.A.B.; Clima De Ondas na Baía de Campos: Fundamentos e Análise dos Dados ; 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society; Salvador, Bahia, Brasil; 2001.



## Estudos Geofísicos Integrados no Lixão de Cuiabá, MT, Brasil – Resultados Preliminares

Shozo Shiraiwa, ICET-UFMT, Brazil, [shozo@cpd.ufmt.br](mailto:shozo@cpd.ufmt.br)

Solange Pereira Lisovsky, Mestranda IGCE-UNESP, Brazil, [hidrosane@ig.com.br](mailto:hidrosane@ig.com.br)

Vagner Roberto Elis, IAG-USP, [vagnelis@iag.usp.br](mailto:vagnelis@iag.usp.br)

Jorge Luís Porsani, IAG-USP, [porsani@iag.usp.br](mailto:porsani@iag.usp.br)

Welitom Rodrigues Borges, Mestrando IAG-USP, [welitom.tom@bol.com.br](mailto:welitom.tom@bol.com.br)

### Abstract

One of the major concerns in geoenvironmental projects is the soil and water contamination caused by the waste disposal. The geophysical methods applied are a good way to get some information required in a site characterization program. This work shows some results obtained through resistivity, EM inductive and GPR surveys in the search of informations about the impact caused by a waste disposal area in Cuiabá, State of Mato Grosso, Brazil.

### Introdução

O processo migratório em busca de melhorias é um dos fatores do aumento da produção de lixo urbano, comprometendo todo o planejamento urbano. Em apenas três décadas o Brasil reverteu a relação entre população urbana e população rural. Enquanto até o final da década de 60 havia 30% das pessoas morando nas cidades e os demais na zona rural, hoje temos 70% de nossos habitantes vivendo em zonas urbanas. O conhecimento técnico do espaço físico, via de regra, não é levado em conta para a escolha de locais adequados para a disposição final dos resíduos sólidos, e com isso tem-se a formação de “lixões”. Um dos problemas gerados com a disposição inadequada dos resíduos urbanos está na contaminação do lençol freático. Esses problemas poderiam ser amenizados com a utilização de métodos geofísicos para escolha de áreas apropriadas e na monitoração do depósito. Os métodos de ELETRORESISTIVIDADE, EM INDUTIVO e GPR mostram-se eficientes na localização e monitoramento da contaminação das águas subterrâneas, sobretudo considerando-se a rapidez e baixo custo com que são obtidas as informações. Buscando mostrar os principais problemas do destino final dos resíduos sólidos em depósitos a céu aberto denominados “lixões”, foi escolhido como objeto deste estudo o antigo “Lixão” de Cuiabá. Esse depósito, hoje desativado, encontra-se às margens do córrego Camundongo, que deságua no Ribeirão do Lipa, afluente do rio Cuiabá, a 12 km do centro da cidade (Elis et al., 1995).

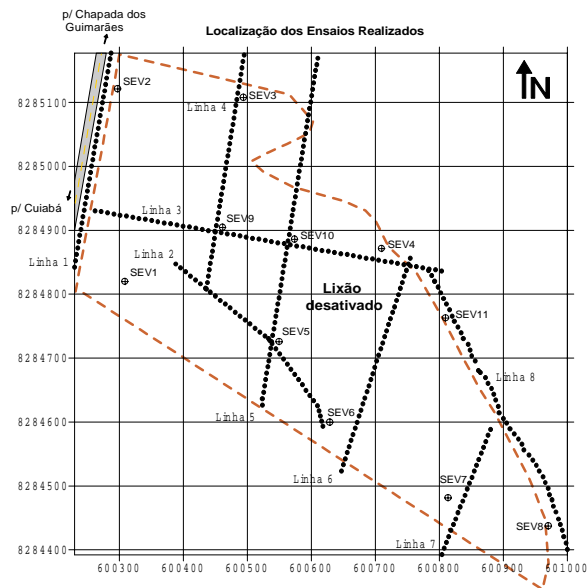
### Características Geológicas e Hidrogeológicas

A área de estudo está inserida no Grupo Cuiabá, o qual é formado por rochas metamórficas de baixo grau, de idade Pré-Cambriana. Migliorini et al (1998) definem três associações litológicas nas regiões de Cuiabá e Várzea Grande: (1) metadiamictitos, (2) metaortocomglomerados e metarenitos grossos quartzosos, com filito subordinados e (3) filitos sericíticos laminados ou maciços com raras intercalações de metarenitos feldspáticos. Na associação (1) os veios de quartzo são raros e subconcordantes com a foliação principal. A associação (2) distingue-se pelo grande volume de veios de quartzo, principalmente nos conglomerados e arenitos. As diáclases são mais abundantes nos metapelitos e agrupam-se em duas famílias principais, paralelas a  $S_2$  e  $S_3$ . Na associação (3) os veios são poucos, centimétricos. Os sistemas de diáclases e veios de quartzo que recortam as rochas do grupo Cuiabá, exercem papel relevante no fluxo e armazenamento das águas subterrâneas na região de estudo. Segundo Migliorini (1999) o sistema aquífero na região de Cuiabá é do tipo livre, heterogêneo e anisotrópico, com intensa variação lateral e em profundidade.

### Investigações realizadas e resultados

Dentro de uma proposta de aplicação integrada de métodos geofísicos para caracterização do problema ambiental originado pelo Lixão de Cuiabá, foram realizadas investigações geofísicas, tais como, Sondagem Elétrica Vertical (SEV's), Caminhamento Eletromagnético (EM) e Perfis de Radar de Penetração no Solo - GPR (**Figura 1**). As SEV's foram adquiridas com arranjo Schlumberger e objetivaram estudar o perfil vertical do terreno individualizando as camadas de solo, a zona saturada, o topo do filito inalterado, bem como a camada de resíduos e a presença de contaminação nos pontos investigados dentro do depósito de lixo propriamente dito. Os perfis de caminhamento EM foram adquiridos com o equipamento EM34 de forma a investigar as profundidades teóricas de 7,5, 15 e 30 metros. Esses perfis foram realizados visando delimitar a área ocupada por resíduos e identificar a

zona de influência da contaminação. Os perfis GPR objetivaram imagear a subsuperfície rasa visando localizar a pluma de contaminação, a profundidade do nível freático, a estratigrafia do lixão e localizar regiões anômalas dentro dos resíduos.



**Figura 1 – Localização das investigações geofísicas na área do Lixão de Cuiabá.**

A análise conjunta das SEV's, perfis EM e perfis de GPR permitiram a caracterização da área quanto à profundidade da zona saturada e do topo da rocha, existência e espessura da camada de resíduos e contaminação do lençol freático pelo chorume gerado. Essa análise pode ser realizada através dos perfis das Linhas 2 e 5. A Linha 2 está posicionada em uma zona de borda da área ocupada pelos resíduos, e possibilitou uma visualização das condições do local com pouca influência da contaminação. A **Figura 2**, mostra a seção geológica construída por meio dos resultados obtidos das SEV's, da seção de condutividade aparente obtida pelo EM e do perfil GPR, permitindo observar o comportamento da zona saturada, do topo do filito e da presença de resíduos e influência de contaminação. A zona saturada é caracterizada pela camada com valores de resistividade entre 16,4 a 44 ohm.m que ocorre em profundidades de 5 a 10 metros. O topo do filito está abaixo dessa camada, a profundidades de 20 a 30 metros, com resistividades de 293 a 437 ohm.m. A seção de condutividade mostra em sua grande parte valores de condutividade aparente relativamente baixos, de 4 a 10 mS/m (valores de resistividade

aparente de 250 e 100 ohm.m, respectivamente) e uma zona mais condutora superficial entre 260 e 280 metros, com condutividades de até 22 mS/m (45,5 ohm.m). Essa situação aliada às informações do perfil GPR, onde ocorre uma zona com refletores localizados também próximos da posição 260 metros, sugere a presença de restos de material metálico misturado com resíduos nessa posição. Informações sobre o local sugerem a possível presença de restos de carteiras escolares. O refletor subhorizontal em torno de 6m de profundidade, pode estar relacionado com o topo do nível freático.

A Linha 5 atravessa o depósito transversalmente, o que pode ser visualizado na seção de condutividade aparente (**Figura 3**). No início do perfil ocorre uma zona mais condutora (60 mS/m) provavelmente relacionada com a presença de resíduos. O depósito de lixo principal ocorre das posições 160 a 360 do perfil, com valores de condutividade aparente de 60 a 180 mS/m (resistividades de 16,6 a 5,6 ohm.m, respectivamente). Pode-se notar a presença dessa zona condutora em profundidade, sugerindo a presença de contaminação na zona saturada que está posicionada a menos de 10 metros da superfície. A SEV10, realizada sobre a camada de resíduos, mostra que essa tem espessura de cerca de 8 metros com resistividade de 5,3 ohm.m. Da posição 360 até o final da seção os valores de condutividade aparente ainda mais altos que o *background*, que estão relacionados ao encontro da zona contaminada por chorume invadindo a planície de inundação de um córrego de regime intermitente localizado na posição 460 do perfil. Inclui a presença de uma zona mais condutora vertical nessa posição sugere fortemente que esse córrego está encaixado em uma zona de fratura. No perfil GPR pode-se notar a presença de chorume dentro dos resíduos da posição 210 até o final do perfil pela atenuação quase total do sinal.

### **Conclusões Preliminares**

Os resultados mostram que a interpretação integrada geofísica-geológica permite caracterizar a área do lixão e, conseqüentemente, a pluma de contaminação resultante do chorume originado. De acordo com os resultados, a pluma contaminante atinge a zona saturada. Da interpretação das Sondagens Elétricas Verticais, foi possível caracterizar a zona de transição solo-rocha, definir a profundidade do topo rochoso, a profundidade do nível d'água e a espessura do pacote de lixo. Esses resultados mostram são reflexo da disposição inadequada dos resíduos, em local onde o nível freático é pouco profundo e nas proximidades de um córrego, de forma que ocorre o transporte de chorume para outros locais onde existem moradias de

## Estudos Geofísicos Integrados no Lixão de Cuiabá, MT, Brasil – Resultados Preliminares

populações ribeirinhas, as quais convivem com o perigo da contaminação. O problema mais grave detectado neste local, além da própria evolução da pluma, é que essa população utiliza-se de cacimbas perfuradas nos limites do avanço da pluma, que num futuro próximo poderá ter conseqüências danosas à saúde.

### Bibliografia

ELIS, V.R.; MATTOS, M.R.; CUTRIM, A.O. - 1995 - Sondagens Elétricas Aplicadas ao Estudo da Contaminação Gerada pelo Lixão de Cuiabá - MT. *Anais do V Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, Goiânia - GO, pp. 37-39.

MIGLIORINI, R.B., RUIZ, A.S. SANTOS, A.A. - 1998 - Caracterização dos Sistemas de Diáclases e

dos Veios de Quartzo no Grupo Cuiabá. Regiões de Cuiabá e Várzea Grande - MT. *Anais VI Encontro de Iniciação Científica* - Cuiabá - MT, pg. 77.

MIGLIORINI, R.B – 1999 - *Hidrogeologia em Meio Urbano. Região de Cuiabá e Várzea Grande - MT*. Tese de Doutorado, São Paulo - SP,

### Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMAT pelo suporte financeiro (Proc. N° 3.5.2.125/08-1999E), ao PADCT/CNPq (Proc. N.º 62. 0153/97-0- GTM) e ao ICET/UFMT pelo apoio logístico, e a CAPES pela bolsa de Mestrado da S.P Lisovsky

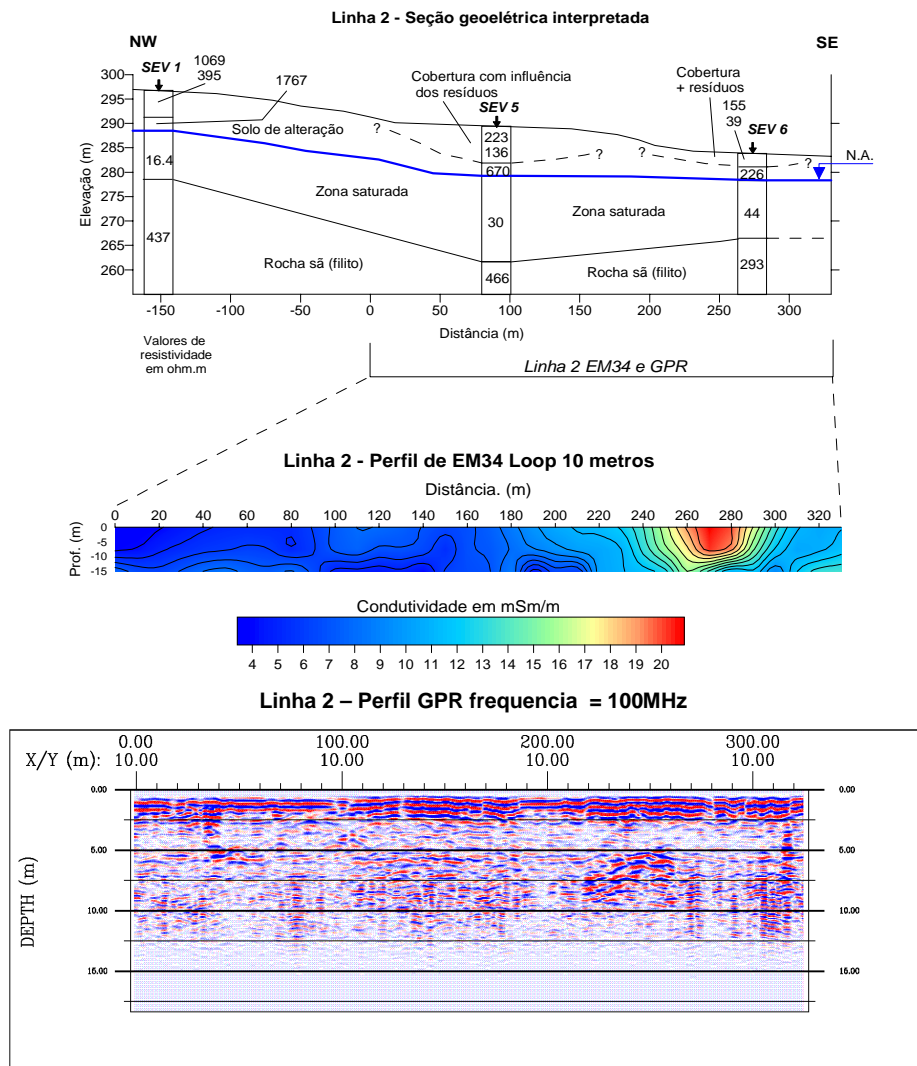
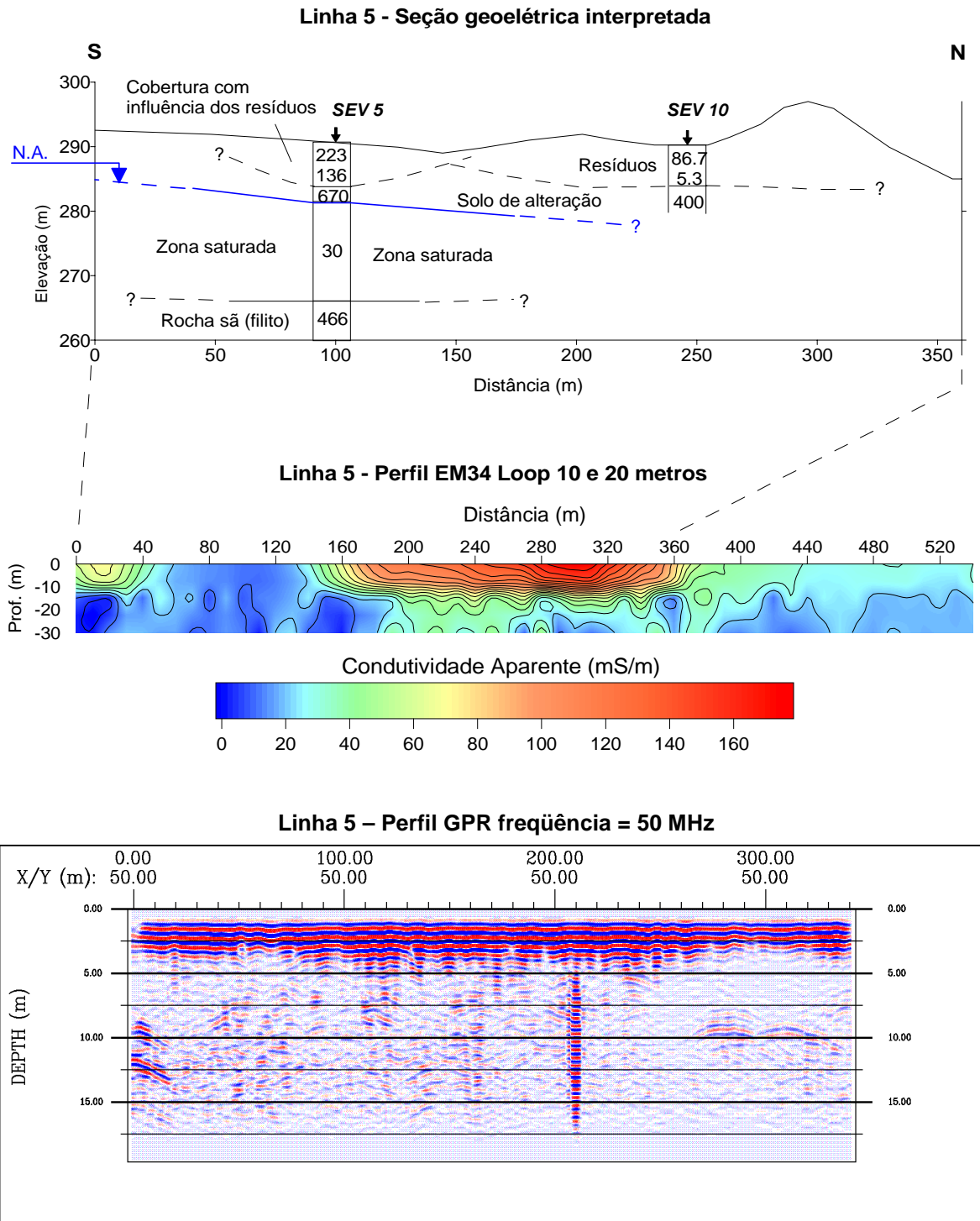


Figura 2 – Interpretação geofísica integrada da Linha 2.



**Figura 3 – Interpretação geofísica integrada da Linha 5.**





## Five years of ozone measurements at La Paz, Bolivia

Francesco Zaratti, Ricardo N. Forno and Eduardo R. Palenque..

Atmospheric Physics Laboratory, Physics Research Institute, Universidad Mayor de San Andres, La Paz, Bolivia

### Abstract

We present main results of a 5 years ozone measurements program at La Paz, Bolivia, where a Brewer spectrophotometer is in operation since July 1996. We also show interesting comparisons with “overpassing” satellite data, taken by the TOMS (Total Ozone Mapping Spectrophotometer). Finally, results of an ozone sonde campaign, carried out in order to explore a possibly ozone anomaly over the Andean Highland, are reported.

### Introduction

In 1996, with co-operation from the Brazilian Institute for Space Research (INPE), the Atmospheric Physics Laboratory (LFA) was created at La Paz, Bolivia (16.5S, 68.1W, 3420 m asl). The high altitude location of the LFA, the tropical Southern latitude, and some peculiar characteristics of the local atmosphere, make this laboratory a significant observatory in terms of monitoring atmospheric changes and checking measurements obtained by satellite instruments.

### Instruments and methods

A Brewer spectrophotometer (for details about the instrument, see Brewer, 1973) is in continuous operation at LFA since July 1996, measuring total ozone and UV radiation. This instrument is part of the South-American Network for monitoring the ozone layer and UVB radiation led by INPE. The daily outputs of Brewer are “direct” (DS, looking at the sun) and “zenithal” (ZS, looking at the zenith) measurements at five UVB wavelengths. An algorithm converts the outputs into ozone values. Daily average values as well as monthly means are obtained and analyzed with standard statistical methods.

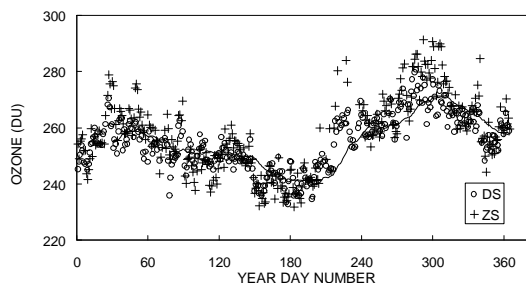
Moreover, ozone data from TOMS instruments –on board Nimbus 7 and Earth Probe satellites- released by NASA since 1978 and up now, with a 3-year interruption (1993-1996), has been analyzed and compared with surface data at LFA. We use TOMS “overpass” data centered at La Paz.

In 1998 a balloon ozone sonde campaign, had been carried out, in collaboration with INPE, aiming at studying ozone profiles over La Paz and comparing them with similar profiles taken in 1963 at the same location (Zaratti et al., 1999a).

### Results

Analysis of ozone data, taken at LFA and by satellite instruments in the period July 1996 - June 2001, allow us to reach some meaningful conclusions.

Ozone patterns in time series show typical behavior: Figure 1 shows DS and ZS daily time series for the year 1999 together with a 30-day running mean. This plot reflects the solar zenithal angle correlation: higher values in (austral) spring and lower in winter.



In Fig. 2, monthly averages are compared each year. Yearly differences can be noted, for instance 1997-98 was a particular “ozone-poor” year. The spread of values is usually at a minimum in winter, with the exception of the year 2000, which was possibly due to the influence of high solar activity that year.

Monthly minimum ozone content is approximately 235 DU and the maximum never exceeds 280 DU. In any case, the ozone column at La Paz is lower than that measured at the same latitude (zonal mean), a phenomenon that will be analyzed below.



## Five years of ozone measurements at La Paz, Bolivia

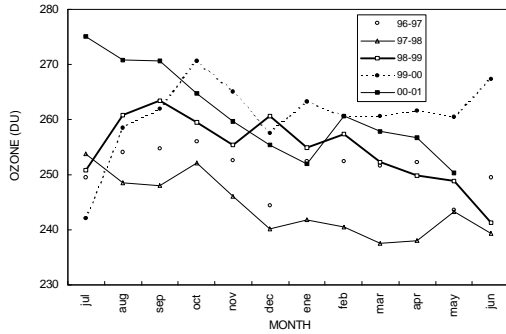


Figure 2 - 5-year monthly ozone values, by Brewer 110, synoptically compared. Year 2000 shows a very different seasonal trend than other years, even considering error bars (not shown).

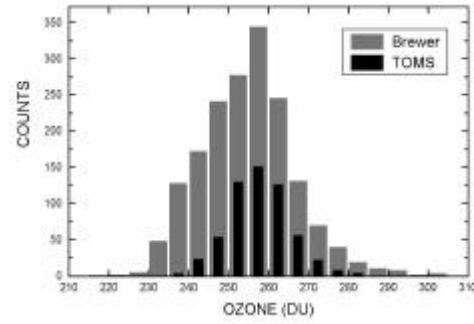


Fig. 4 - Distribution of 5-year daily means by 5 DU intervals: both data sets are centered on the same interval, however, Brewer's data shows stronger asymmetry.

In order to compare monthly Brewer's data with "overpass" La Paz data (1996-2001), released by TOMS instrument aboard the Earth Probe satellite a data validation process was performed: any data taken by EPTOMS out of the square of  $1^\circ$  centered at La Paz geographical coordinates was discarded. In fact, due to the proximity of our research station at the city of La Paz to the Andes mountain range, much satellite data affected by mountains' level differences had to be discarded. After corrected data errors, good correlation was observed (Fig. 3): both plots show similar trend and the differences are less than the statistical error. The correlation factor, computed on the total monthly data, is  $R=0.76$ ; however, a strong yearly dependence can be found: some years show a good correlation factor, as the year 1999 when  $R=0.92$ , whereas  $R=0.55$  in the year 2000. The latter year was very special, due to high solar activity levels as well as to an unusual high number of cloudy days in winter. Another possibility could be attributed to an inadequate calibration of the Brewer instrument, an issue that will be checked in next months.

If we analyze daily data, more scattered results are obtained. In Fig. 4, frequencies of ozone values,

by 5 DU intervals, are shown, with strong asymmetry between high and low ozone values in both systems. Based on the above mentioned correlation between satellite and surface data, we can use TOMS data in order to explore a possible anomaly in the ozone behavior trend since the beginning of the ozone records (1978). Plotting monthly time series during 23 years and looking for a change of ozone content, no clear trend can be observed, as expected at that latitude. On the basis of Fourier analyses, correlation with 11-year solar cycle and the Quasi-Biennial Oscillation (QBO) phenomenon has been found (Ghezzi et al., 2000). Main frequencies obtained by this analyses, are related with 11 (solar), 1.8 and 2.3 (QBO) years periods.

As mentioned before, the average total column ozone content, according to satellite measurements, is lower over La Paz than over other locations at the same latitude. We call this phenomenon the "Altiplano (Andean Highland) anomaly" and we assume that it is not only due to altitude effect, but also to some dynamical behavior of the atmosphere in presence of the large Andes mountains chain. (Zaratti et al., 1999b). When the ozone data column taken over the La Paz station is compared with other

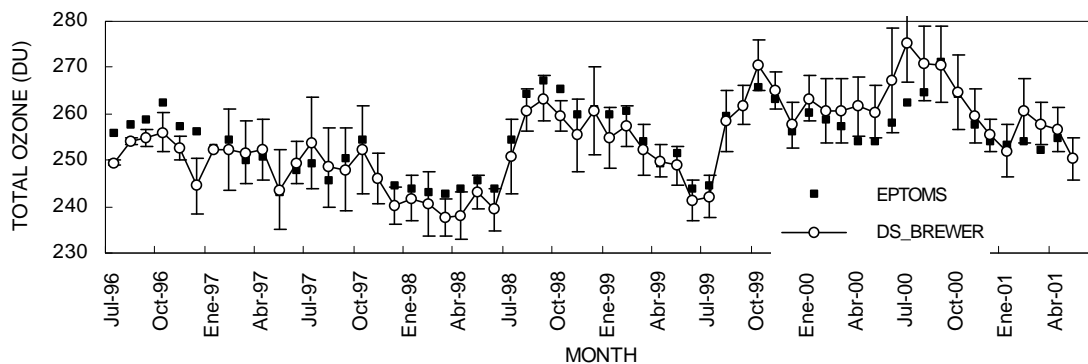


Figure 3 - Surface (Brewer 110) and satellite (EPTOMS) ozone monthly means show good agreement in trend as well as in absolute values. Note, however, the strong discrepancy in the year 2000 data, and see the text for comment.

locations' data at the same latitude, measurements are inconsistent, tending to be lower in La Paz, depending on the month and the locations. Figure 5 shows the ozone column anomaly along the longitudinal cut at 16.5°S latitude. Additional studies on this effect are presently conducted, with the objective of properly revealing this anomaly's true causes.

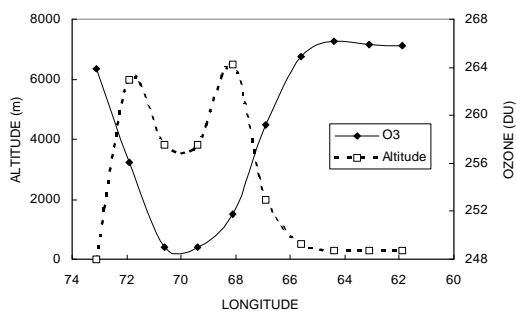


Figure 5 - Longitudinal ozone profile at 16.5°S, according to TOMS data (1978-1993). Approximate altitude of the corresponding locations is also plotted, showing anticorrelation with ozone content.

In order to study the above mentioned phenomenon, a balloon sonde campaign was carried out in 1998. Results on the ozone profile over the Altiplano were intricate, and they suggested that the aforementioned “anomaly” is located in the lower stratosphere more than in the troposphere. In fact, comparisons with ozone sonde data at sea level, allow us to estimate an amount of ozone up to 8 DU within the first 4 km of altitude, when a difference of around 14 DU is measured by TOMS instrument between La Paz and sea-level locations at the same latitude.

## Conclusion

The trend of the total ozone column at a tropical, high altitude location in the Southern Hemisphere is studied using both ground-based and satellite data. No significant change has been found for the period that a Brewer Spectrophotometer has been operated at La Paz, but a possible anomaly, due the presence of the latitudinal (North-South) high mountain chain, is being explored.

## References

- Brewer, A.W., 1973, A replacement of the Dobson Spectrophotometer: *Pure Appl. Geophys.*, 106-108,919-927.
- Ghezzi F., Saavedra P. and Zaratti F., 2001: Correlacion entre actividad solar y columna de ozono a latitudes tropicales, *Revista Boliviana de Fisica*, submitted.
- Zaratti, F., Andrade M., Forno R. and Palenque E.R., 1999a: Longitudinal and latitudinal variations of the total ozone over the Central Andes, *Il Nuovo Cimento* 22 C, 2, 145-152.
- Zaratti, F., Andrade M., Forno R. and Palenque E.R., 1999b, Resultados preliminares de la campaña de ozonosondeo en La Paz, Bolivia: *Revista Boliviana de Física* 5,15-21.

## Acknowledgments

The authors are in debt with the INPE Ozone Laboratory, in the person of V.W.J.H. Kirchhoff, for his support to the LFA with instruments and common projects, and with M. F. Andrade, from the University of Maryland, for his useful suggestions.



## Groundwater and contaminated land geophysics: pressing problems and the way forward

Max A. Meju

Department of Geology, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK. mxw@Le.ac.uk

### Abstract

Environmental geophysics is enjoying rapid growth in the present socio-political climate of increasing awareness of the effect of man's past activities on the environment. It deals with pressing issues attracting public attention ranging from local-scale fluid-rock changes to large-scale climatic changes caused by natural processes and anthropogenic activities. Realistic multi-dimensional imaging of contaminated land, understanding fluid-rock interactions, optimal data integration and remote prediction of flow and subsoil composition are the pressing scientific issues at the present time. Some suggestions are offered in this paper for handling these challenging problems.

### Introduction: problem definitions

Environmental geophysics is concerned with issues related to air, water and land quality and fall into two broad categories: (1) small- to regional-scale processes and (2) global phenomena such as climate change. Land contamination and groundwater protection fall into the first category and form the focus of this paper.

**Contaminated land investigation:** The decline in heavy industrial activities, past waste disposal practice and accidental spills, military decommissioning activities and past legislative inadequacies have left us a legacy of derelict sites (disused mines and quarries, military bases, oil and gas fields, petroleum refineries and petrol stations, and car breaker sites), many of which are contaminated with Light Non-Aqueous Phase Liquids (LNAPLs, such as gasoline-based benzene, toluene or xylene), Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPLs, such as cleaning solvents like trichloroethylene or heavy oils like crank-case oils), mine spoils and other inorganic pollutants (such as Pb or Ni added to petrol). Accidental spills or poor disposal practice at these sites would result in significant concentrations of numerous different types of both organic and inorganic contamination posing a severe threat to groundwater aquifers. LNAPLs and DNAPLs (petroleum liquids for short) occur in the subsurface as pure-phase organic liquids, vapour phase (in the vadose zone), and in very low concentrations in the dissolved phase; the presence of dissolved organic phases in drinking water, even at the low parts per billion level, is hazardous to human health. A network of boreholes is often used to

determine the spatial distribution of such contaminants before remediation operations. Boreholes are expensive, furnish poor constraints on the distribution of contaminants (and hydraulic parameters), and run the risk of liberating the organic compounds or triggering further migration of pure-phase organic contaminants. The ever-increasing urban population and the concurrent need for urban regeneration mean that some contaminated sites are increasingly being re-developed to provide for new domestic, retail, administrative and light industrial infrastructure. Current statutory regulations impose tight constraints on such developments and there is an urgent need for reliable non-intrusive methods for subsurface characterisation.

**Groundwater resource protection:** Intensive agricultural and other activities often lead to heavy chemical loading of the near-surface and underlying groundwater aquifers. This problem may be compounded further by the siting of unlined landfill sites over the aquifers. Many of such aquifers serve for domestic, agricultural and industrial water supplies, are not easily replenished from meteoric sources, and may be regarded as non-renewable groundwater resources. It is thus vital to monitor the quality and quantity of water in these aquifers. The determination of water quantity requires accurate permeability estimates such as traditionally furnished by pump test analysis or more recently by geophysical (resistivity, neutron-neutron porosity, density and sonic velocity) borehole logging. Cost-effective, non-invasive prediction of petrophysical properties of aquifers is still an outstanding research problem in hydrogeophysics. The quality or economic value of a groundwater resource is dependent on the concentration of dissolved solids in the water, and this concentration can vary laterally and vertically in a given aquifer. Traditional water quality assessments require hydrochemical measurements on samples from sparse monitoring wells. It will be more cost-effective if the quality of the water in place in an aquifer can be reliably determined without drilling. The drinking water standard is an equivalent chloride concentration less than 250 mg/l, sulphate content of less than 250 mg/l and total dissolved solids (TDS) of less than 500 mg/l. Defining the permissible limits accurately is necessary for optimised decision making in groundwater resource management. Understanding the habitat of groundwater and its vulnerability to

contamination is vital for resource protection, modern town planning and predictive transport modelling studies.

### **Some challenges for environmental geophysics**

Geophysical methods are established in groundwater and contaminated land investigations; their importance is underpinned by the fact that (1) groundwater distribution is controlled by geological factors, (2) groundwater quality is controlled by geochemical factors, and (3) rock resistivity is inherently related to porosity, fluid content and chemistry. The electrical conductivity of the subsurface is highly influenced by dissolved solids in groundwater making electrical and electromagnetic (including GPR) methods indispensable in groundwater quality studies. Geophysical methods can also be used to find solutions to other problems related to our natural environment such as engineering, mining and rapid natural disaster assessment and amelioration planning (Table 1). They have a tremendous potential for rapid, non-intrusive evaluation of the lateral and vertical extents of the impacted volume in contaminated land as well as for mapping the geological structure of the site. Environmental geophysics is enjoying rapid growth in the present socio-political climate of increasing awareness of the effect of man's past activities on the environment. Interestingly, new technological and multi-dimensional modelling advances have brought geophysical methods close to their theoretical resolving power. Advances in digital technology and concurrent developments in numerical modelling (e.g. Ellis & Oldenburg, 1994; Zhang et al., 1995) and instrumentation (e.g. Shima et al., 1996; Sorensen, 1996,1997 and references therein) have led to improved data acquisition and interpretation techniques especially for bulk data. In particular, novel technical developments in ground radar, shallow seismic reflection, spectral induced polarisation, dc resistivity, electromagnetic and other geophysical methods have enhanced the resolution of typical near-surface targets in model experiments. It is now possible to collect large volumes of field data of the highest achievable quality that may be used to push the methods to their limits and hence quantify their utility and resolving power in environmental (particularly groundwater and derelict or contaminated land) investigations. However, there are still some outstanding problems as enumerated below (cf. Meju, 2000a).

(1) *Sophisticated integrative mathematical models and controlled field experimental studies:* Many recent landmark papers highlight the prospects and

problems of 3-D geophysical modelling and inversion (e.g., Zhang et al., 1996; Weller et al., 2000) but for idealised structures. What is now needed is a demonstration of the resolving capability of three-dimensional (3-D) geophysical modelling/imaging of complex natural hydrogeological systems and urban waste sites. The ultimate aim will be to fully understand the prospects and problems of 3-D geophysical surveying and data interpretation in realistic geoenvironmental sites with the forward models incorporating contributions from pipes, fences and other common site infrastructure. There is also an urgent need for improved joint multi-dimensional inversion of bulk data. The capability for joint modelling of multiple physico-chemical systems in complex (3-D) media holds the key to cost-effective and improved geoenvironmental predictions. In this vein, integrating disparate hydrochemical, sedimentological and geophysical 'soft' data in hydraulic permeability determinations and inverse hydrofacies modelling requires further work. Also, the impact of local heterogeneity in the unsaturated zone on solute transport to the water table is not precisely understood. Realistic controlled experiments involving up-scaling from laboratory- to field-scales can furnish vital constraints on hydrological models of flow in the near-surface. Current effort is directed at using diffuse source tracers and subsequent 3D monitoring measurements to accurately characterise solute transport processes in the vadose zone (e.g. Slater et al., 2000). Integrated decimetre-scale surface and borehole geophysical (EM, resistivity, radar and seismic) monitoring of the vadose zone combined with core characterisation may help unravel this problem and provide insights into the temporal and spatial dynamics of moisture migration in this zone.

(2) *Development of robust surface-process models and correspondence principles for geophysical anomalies:* Understanding the interplay between physical, chemical and biological processes in the near-surface might lead to the development of robust integrated process models and correspondence principles for geophysical anomalies. This will in turn lead to improved rate of success and consistency of approach in environmental geophysical investigations. Meju (2000b) reviews the bio-geomorphic, geochemical and physical processes operative in landfill sites and develops a model for geoelectrical soundings over landfill sites that is consistent with these processes; a correspondence between geochemical and geoelectrical anomalies is explored and used to propose a novel scheme for estimating the age of fill in analogy to current geochemical practice. Using data from borehole geoelectrical probes at

several sites in the Michigan Basin (USA) and constraints provided by biogeochemical observations elsewhere, Sauck (2000) provides a model for the electrical response of LNAPL-contaminated land. These models need further refinements.

(3) *Improved integration of field techniques:* Shtivelman and Goldman (2000) demonstrated the improved resolution obtained by integrating shallow seismic reflection and TEM methods in the study of a coastal aquifer in Israel. Meju et al. (1999) provide a practical scheme for integrating dc resistivity, TEM and AMT soundings and successfully used the combined method to map regional aquifers in Brazil. It is highly desirable to adopt integrated geophysical, geochemical and microbial methods in routine high-resolution temporal and spatial characterisation of near-surface environments. Interestingly, despite the large number of recent publications and symposia presentations of environmental geophysical results for contaminated land and groundwater environments, it is hard to find unequivocal models describing the variations in the relevant physical properties in the near-surface. Many of the field studies employed individual surface techniques and without adequate attention to the temporal-spatial property variations, especially the geochemical-hydraulic-biologic characteristics of the respective sites and environs. For improved problem solution, there is a need for an integrated approach to contaminated land studies. For example, it may be instructive to investigate the temporal and spatial variations in dielectric permittivity, electrical resistivity/phase and biogeochemical characteristics associated with plumes originating from free product LNAPL sources in granular sediments so as to understand better the behaviour and migration pattern of low density hydrocarbons in the subsurface and also resolve some of the existing discrepancies between field and controlled experiments. Integrated geophysical, hydrogeological, microbial and geochemical time-lapse (temporal-spatial variation) studies of contaminated sites or groundwater aquifers can help push geophysical methods to their limits to establish whether they can furnish diagnostic data to resolve the characteristics/properties of subsurface targets as well as establish whether there is a relationship between hydrogeochemical patterns, say and 3-dimensional physical signatures across the investigated sites.

(4) New remediation techniques are emerging but apparently, their effectiveness depends on timely detection and delineation of causative bodies; the usual expensive pilot wells only provide point samples (i.e., incomplete picture) of the subsurface.

Geophysical methods can image the region inaccessible to typical sparse monitoring wells and add valuable stratigraphic information to any model of contaminant transport for the sites. In combination with biogeochemical data, there is excellent potential for optimising exploratory drilling and positioning of monitoring-wells with attendant savings in expensive saturation drilling on a grid in conventional remediation operations. Geophysical, geotechnical engineering and microbial methods are now becoming integral parts of remediation programmes; understanding the temporal-spatial changes in contaminant behaviour from concurrent geophysical imaging or time-lapse geophysical-cum-microbial characterisations could furnish novel techniques for non-intrusive monitoring of the onset and progress of natural attenuation of contaminants in the subsurface.

### **Discussion and conclusion**

Much of the current work in environmental geophysics and geology cover a broad spectrum of quantitative investigation of fundamental fluid-rock processes in the Earth. Numerical methods are used extensively to simulate Earth system processes and non-linear optimisation techniques are then used to match hypothetical models to the experimental data. There is thus much scope for strong interaction between some of the research programmes in geophysics, physics, mathematical modelling and medical imaging. Table 1 provides a simple illustration of how some current research fields in environmental geophysics naturally link with mathematical modelling, medical tomography, organic chemistry and hydrochemistry research programmes. An integrated approach is recommended in routine environmental investigations.

### **References**

- Ellis, R.G. & Oldenburg, D.W., 1994. The pole-pole 3-D dc-resistivity inverse problem: a conjugate gradient approach. *Geophys. J. Int.*, **119**, 187-194.
- Meju, M.A., Fontes, S.L., Oliveira, M.F.B., Lima, J.P.R., Ulugergerli, E.U., and Carrasquilla, A.A., 1999. Regional aquifer mapping using combined VES-TEM-AMT/EMAP methods in the semi-arid eastern margin of Parnaiba basin, Brazil. *Geophysics*, **64**, 337-356.
- Meju, M.A., 2000a. Environmental Geophysics: the tasks ahead. *Journ. of Applied Geophysics*, **44**, 63-65.
- Meju, M.A., 2000b. Geoelectrical investigation of old/abandoned landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journ. of Applied Geophysics*, **44**, 115-150.
- Shima, H., Sakashita, S & Kobayashi, T., 1996. Development of non-contact data acquisition

techniques in electrical and electromagnetic explorations. *Jour. Applied Geophysics*, 35,167-173.

Shtivelman and Goldman, 2000, Integration of shallow reflection seismics and time-domain electromagnetics for detailed study of the coastal aquifer in the nitzanim area of Isreal. *J. Applied Geophys.*, 44, 197-216.

Slater, L., Binley, A.M., Daily, W and Johnson, R., 2000. Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection. *Journ. of Applied Geophysics*,

44,85-102.

Sorensen, 1996. Pulled array continuous electric profiling. *First Break*.

Sorensen, K.I., 1997, The pulled array TEM method: Proc. of 3<sup>rd</sup> meeting of Engineering & Environmental Geophysical Society-European Section, Aarhus, Demark, 135-138.

Zhang, J., Mackie, R.L. and Madden, T.R., 1995. 3-D resistivity forward modelling and inversion using conjugate gradients: *Geophysics*, 60,1313-1325.

Scope of environ. geophysics	Topical issues	Potential multi-disciplinary collaboration
Urban Environment	Noise/vibration monitoring , induced seismicity.	Seismic monitoring, engineering signal processing
	Urban geological mapping	Geophysical imaging
Site investigation for foundations and major engineering structures	Lithology and geological structure, depth to bedrock /water table.	Geotechnics, geophysical imaging
	Cavities, mine entrances, subsidence	Geophysical imaging, civil engineering, archaeology.
	Soil/rock physical properties	Sedimentology, geotechnics, soil/rock physics
Route Assessment	Roads/bridges, railways, tunnels, canals, pipelines, cables detection and condition	Geophysical imaging, engineering, archaeology, history
Groundwater resource evaluation	Groundwater distribution, quality and usage	Geology, geophysics, water engineering, aqueous chemistry
Contaminated /derelict land investigation and assessment	Groundwater pollution.	Geophysics, geotechnics, engineering, aqueous chemistry, microbiology(toxicology)
	Landfill leachate (formation migration and chemistry/ reactivity)	Hydrogeology, aqueous chemistry, engineering, toxicology, microbiology, fluid transport modelling, environmental law
	Fate of organic pollutants (light and dense petroleum liquids)	Geophysical imaging, chemistry, Fluid flow modelling, reactivity modelling, law
Hazardous waste disposal	Safe repositories for toxic wastes	Geophysics, engineering, toxicology

Large-scale or rapid natural hazards	Landslide, volcanic eruption and earthquake prediction; amelioration planning	Volcanology, seismology, mathematical modelling, geophysical imaging, engineering, geography-GIS,
Global climate changes	sea level variations, global warming, catastrophic floods	Stratigraphy, paleobiology, volcanology, mathematical modelling, fluid dynamics, geophysics, geography-GIS, atmospheric physics

**Table 1.** Scope of environmental geophysics, topical issues and preferred multi-disciplinary approaches for improved problem solution.





## IMAGEAMENTO ELÉTRICO 2-D APLICADO À AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE POSTO DE COMBUSTÍVEIS

Antonio Flavio Uberti Costa, AFC Geofísica Ltda, Instituto de Geociências da UFRGS

Iran Flores Pinto, AFC Geofísica Ltda

Rodrigo Tusi Costa, AFC Geofísica Ltda

### Abstract

An study including geoelectrical methods, drilling and chemical water analysis was carried out in an area to determine the extent of oil contamination in groundwater. Resistivity method was applied using a high resolution 2-D electrical imaging technique.

The origin of a well defined high resistivity anomaly was proved to be due a hydrocarbon contamination at the top of the saturated zone, showing the importance of the geophysical technique to this kind of problem.

### Introdução

Atendendo exigência do órgão de fiscalização ambiental do município de Porto Alegre(RS), para renovação de licença operacional, foram realizados estudos visando a confecção de relatório de avaliação ambiental na área de um posto de combustível e serviços.

Nestes estudos, além das técnicas tradicionais, que envolvem sondagens, construção de piezômetros e amostragem de água e solo para análise, foram realizados dois perfis de imageamento elétrico de alta resolução, cujos resultados são analisados neste trabalho, à luz das informações de amostras de água coletadas e analisadas.

A região na qual está instalado o posto de abastecimento em questão compõe-se de rochas graníticas com espesso manto de alteração formado por materiais predominantemente argilo arenosos, na zona não saturada e subsaturada, passando a areias argilosas, na zona inferior saturada.

### Metodologia

Inicialmente foram elaborados procedimentos investigativos de dados bibliográficos e histórico operacional do posto de abastecimento em questão e posteriormente foram realizados perfis geofísicos levando-se em conta a simetria e a inclinação do terreno bem como a localização dos tanques de armazenamento de combustível.

Os resultados obtidos na análise geofísica permitiu nortear o restante da

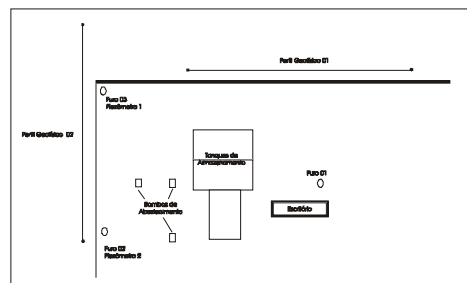


Figura 1. Localização dos perfis geofísicos

investigação, direcionando os demais métodos investigativos, tais como sondagens, análises químicas e ensaios de permeabilidade, de forma mais racional e puntual, permitindo deste modo minimizar custos e reduzir prazos, otimizando todo o processo.

O método que mais se adequou para o trabalho foi o de eletrorresistividade, com técnica de imageamento elétrico 2-D, arranjo schlumberger e espaçamento entre eletrodos de 0,50 metro. Empregou-se um sistema automático de aquisição dos dados elétricos fabricado pela AGI Advanced Geosciences Inc, modelo STING. A modelagem inversa dos dados foi realizada através do software RES2DINV.

Foram realizados, conforme a Figura 1, dois perfis geofísicos (PG01 e PG02) perpendiculares entre si, cada um com 20,5 metros e espaçamento entre eletrodos de 50 cm, num total de 42 eletrodos.

### Resultados.

#### Seção 1- Geofísica

##### Linha 1

Através do perfil geofísico desta linha (Figura 2) pode-se identificar claramente a ocorrência de uma camada de resistividade alta com espessura variável, tendendo a estreitar-se do início para o fim do perfil, ou seja, dos fundos à frente do posto, seguindo a inclinação do terreno. Esta feição identificada no perfil representa uma camada de concreto que sobrepõe-se a uma porção constituída de seixos e areia seca.

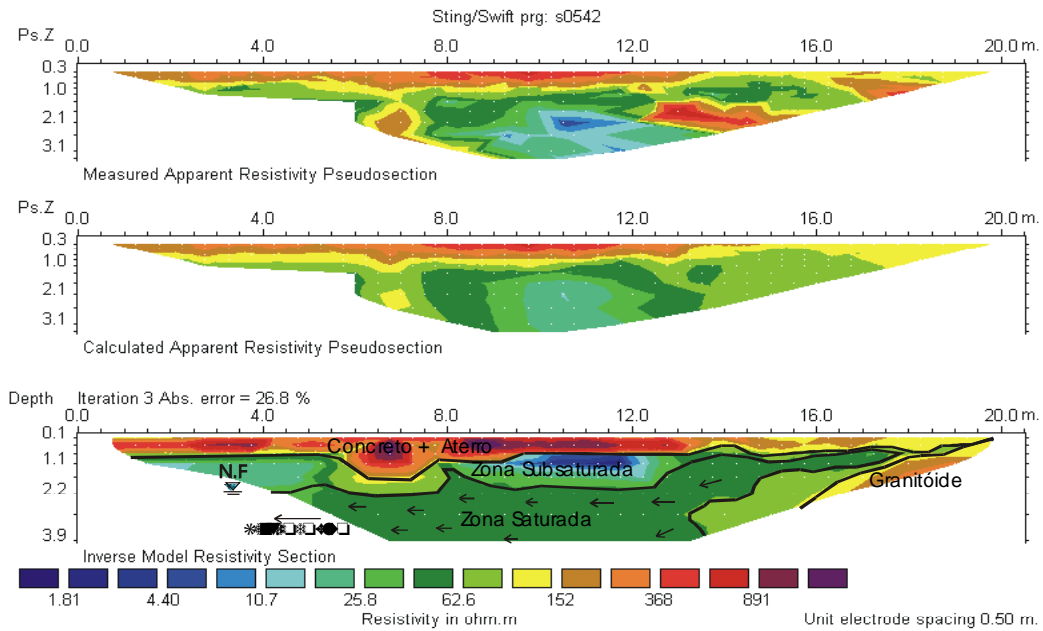


Fig.2 Modelamento do perfil geofísico 01

Abaixo desta cobertura antrópica observa-se uma camada que tende a baixos valores de resistividade. Este nível representa uma zona subsaturada composta por areia e argila com alto grau de umidade. Mais abaixo, a uma profundidade de cerca de dois metros há um gradual aumento na resistividade, que corresponde a uma zona saturada (menos argilosa), marcada pelo topo do nível freático.

No extremo direito da seção percebe-se uma porção bem delimitada de resistividade mais alta, que indica a ocorrência do corpo granítico menos alterado.

**Linha2**

Identifica-se (Figura 3) da mesma forma que a primeira linha uma cobertura superficial composta de material com alta resistividade, que corresponde ao pavimento de concreto e ao aterro (seixo e areia grossa seca).

Uma camada sotoposta é marcada por resistividades mais baixas, indicativas de uma zona subsaturada que gradualmente, com o aumento de profundidade tende a tornar-se saturada, marcando numa profundidade de cerca de 1,80m o topo do nível freático.

Percebe-se nitidamente neste perfil, na distância compreendida entre sete e nove metros, uma forte anomalia em subsuperfície com alta resistividade que se prolonga pela zona

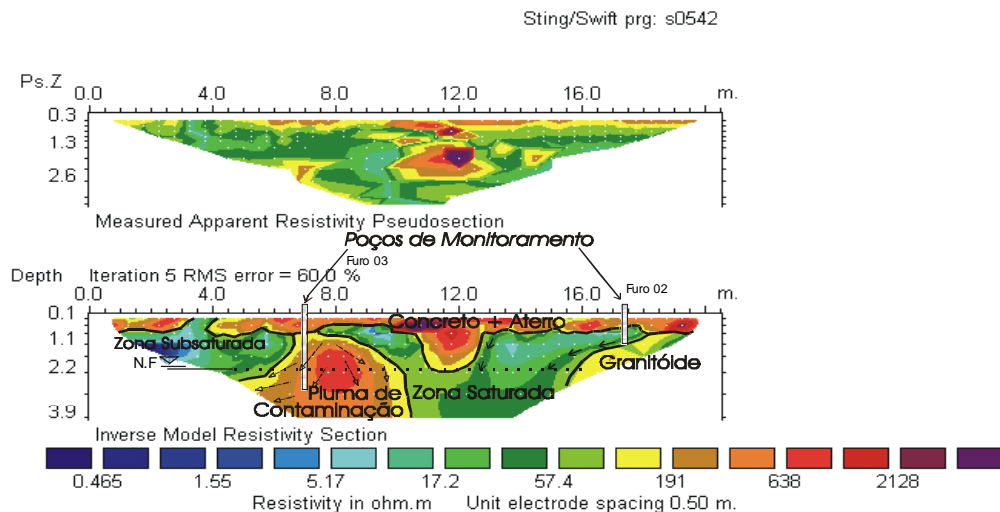


Fig.3 Modelamento do perfil geofísico 02.

subsaturada, tendendo a se ampliar ao atingir a zona saturada (Nível Freático). A ocorrência desta anomalia marca uma porção limitada do terreno onde há uma concentração de compostos derivados de petróleo em suas fases líquida e dissolvida. Tal anomalia, ou pluma de contaminação, como mostra a figura, tende claramente a deslocar-se no sentido do início da linha, coincidentemente com o caimento do terreno e fluxo da água subterrânea.

A uma distância de cerca de doze e dezenove metros do início do perfil identifica-se outras anomalias de alta resistividade com volumes muito menores e características bastante diferenciadas da primeira, atingindo uma profundidade máxima de 1,5m, estas anomalias estão relacionadas às caixas receptoras dos escapes de dutos de esgotos pluviais e cloacais.

### Seção 2- Sondagens

As sondagens foram realizadas levando-se em conta os resultados adquiridos através do imageamento geofísico, procurando-se desta forma estabelecer parâmetros que permitam identificar as causas das anomalias representadas nos perfis.

Locou-se conforme o resultado dos perfis geofísicos três furos de sondagem (furos 1, 2 e 3) ao redor dos tanques de armazenamento de combustíveis, onde em dois deles (furos 2 e 3) foram instalados poços de monitoramento (piezômetros).

As sondagens permitiram identificar as diferentes litologias do subsolo, que compõe-se basicamente de uma camada superficial constituída de aterro de obra contendo seixos e areia grossa com argila em proporções variáveis; uma segunda camada composta de areia média a grossa com muscovita e argila avermelhada oriunda da alteração do granito; e uma terceira camada semelhante à anterior porém de coloração acinzentada com níveis de argila contendo matéria orgânica.

O nível freático foi detectado através do poço de monitoramento a uma profundidade de 1,80m.

### Seção 3- Coletas e Análises

Foram coletadas amostras de solo de todos os furos de sondagem, e de água nos furos 2 e 3, já que nestes é que foram instalados piezômetros.

O procedimento de coleta de amostras seguiu um rigoroso padrão técnico a fim de evitar contaminações externas ao ambiente alvo. As amostras devidamente acondicionadas foram encaminhadas ao laboratório para análises químicas nos parâmetros BTXE (Benzeno, Tolueno, Xileno e Etil-Benzeno) e TPH

(Hidrocarbonetos Totais de Petróleo) através do método de Cromatografia Gasosa – Head Space.

À exceção da amostra de água do piezômetro do furo 03, todas as outras amostras, seja de solo ou de água, não detectaram qualquer tipo de contaminação nos parâmetros solicitados.

A análise da amostra de água coletada do piezômetro do furo 3 apresentou o seguinte resultado:

Concentrações de:	Material	Resultado em µg/L (ppb)
TPH	Água	1635
BENZENO	Água	19
TOUENO	Água	9
XILENO	Água	5
ETIL-BENZENO	Água	Não Detectado

### Conclusão Final

A conclusão principal resultante da análise de contaminação de solo através da utilização dos métodos geofísicos é que o procedimento adotado, técnica de imageamento elétrico 2-D de alta resolução, mostrou ser uma ferramenta confiável e importante no desenvolvimento de pesquisas desta natureza.

Os perfis geofísicos marcaram com grande definição anomalias que demonstraram estar relacionadas diretamente à pluma de contaminação no subsolo, que por sua vez está associada com as atividades do posto de combustível estudado, já que as análises revelaram a presença de compostos derivados de petróleo na amostra de água selecionada em um dos poços de monitoramento instalados na área do estabelecimento.

O resultado das análises sugere que tais contaminantes, provavelmente, são oriundos de um pequeno porém antigo vazamento de gasolina do(s) tanque(s) de abastecimento. A anomalia geofísica, entretanto, pelas suas características, de alta resistividade, sugere uma forte contribuição de contaminações recentes.

A pluma de contaminação, segundo dados geofísicos e de ensaios de permeabilidade, tende a seguir a direção nordeste, provavelmente migrando lentamente junto às águas subsuperficiais, até finalmente

atingir o Rio Guaíba, nas imediações do Porto de Porto Alegre.

A utilização da geofísica como ferramenta no estudo de contaminação por hidrocarbonetos derivados de petróleo permitiu avaliar a extensão e abrangência deste método, sendo a mesma uma indicadora e qualificadora de resultados, possibilitando o refinamento de dados e estabelecimento de condutas investigativas apuradas de mão-de-obra, procedimentos técnicos, controle de investimentos e prazos, o que em última análise reduz custos e otimiza o trabalho.



## **Investigações geofísicas na avaliação de risco geológico em áreas cársticas urbanas - Exemplos da Região Metropolitana de Curitiba, PR, Brasil**

Marcio J. Silva<sup>1</sup>, Augustinho Rigoti<sup>2</sup>, Eduardo de Mio<sup>1</sup>, Fernando Santos Corrêa<sup>3</sup>. <sup>1</sup>mestrando UFPR, Brasil, <sup>2</sup>Depto. Geologia, UFPR, Brasil, <sup>3</sup>mestrando Unicamp, Brasil.

### **Resumo**

Colapsos e acomodações da superfície são comuns em terrenos calcários e têm geralmente pequena importância quando ocorrem em áreas não povoadas, mas podem ser desastrosos quando ocorrem em áreas urbanas. Nos municípios localizados ao norte de Curitiba, região objeto do presente estudo, já foram registradas muitas ocorrências deste tipo de fenômeno mas, felizmente, sem conseqüências desastrosas até o momento. Contudo, o risco existe, é real. É muito importante poder-se contar com técnicas de reconhecimento de subsuperfície para demarcar as áreas de maior risco ou investigar as condições em áreas onde ocorrem grandes concentrações de pessoas como escolas e outros locais que causam aglomerações. Investigações diretas, com furos de sondagem, são muito caras para serem utilizadas sistematicamente. Por outro lado, métodos geofísicos podem auxiliar muito neste reconhecimento, com vantagens de custo e rapidez. O terreno cárstico, propenso a colapso, apresenta dutos e cavidades que podem estar vazias ou preenchidas por água e lama. Os métodos elétricos e eletromagnéticos (EM) podem detectar as variações de condutividade elétrica causadas por tais feições e prover seu adequado mapeamento. Contudo, os ruídos, principalmente indutivos, nas áreas urbanas, tornam os métodos elétricos com corrente contínua ou muito baixa frequência vantajosos com relação ao EM. Mostram-se seções de resistividade muito consistentes obtidas em área urbana, indicando, particularmente, uma zona de possível alteração e percolação em terreno calcário, em frente a uma escola na cidade de Almirante Tamandaré. Os exemplos aqui mostrados indicam que os métodos geofísicos, principalmente os geoeletricos, são ferramentas que podem auxiliar muito na avaliação de risco geológico em terrenos cársticos. Sugere-se que municípios da região metropolitana de Curitiba, situados sobre terrenos desta natureza, deveriam cobrir áreas críticas com levantamentos geofísicos, chefiados pela resistividade elétrica, como forma de prevenção de acidentes. Deveriam ainda utilizar estes ensaios para avaliar as condições de subsuperfície em áreas de expansão urbana, como forma de planejamento do uso e ocupação do solo.

### **Introdução**

O Aquífero Carste, localizado ao norte de Curitiba, hospeda-se em rochas carbonáticas proterozóicas que tiveram uma evolução geológica complexa, com associação a falhamentos e dobramentos. Estas rochas encontram-se delimitadas por metassedimentos e por diques de diabásio que condicionam aquíferos em células estruturais. Em muitas destas células tem-se hoje a presença de assentamentos e de núcleos urbanos. Para suprir a crescente demanda por água, o aquífero se configurou como nova alternativa, com a execução de poços de captação próximos às zonas urbanas. O bombeamento é acompanhado de um rebaixamento do nível d'água nas imediações dos furos, que pode quebrar um equilíbrio muito instável em que se encontram às vezes as camadas mais superficiais. Como conseqüência, ocorrem fissuras e rachaduras em edificações e estradas, caracterizando problemas ambientais e geotécnicos. Subsídências maiores, ou colapsos das camadas superficiais para dentro de cavidades que se alojam em níveis inferiores podem ser desastrosas.

Nestas situações, técnicas geofísicas constituem importantes ferramentas de investigação geotécnica, mas mais ainda devem ser utilizadas na prevenção de acidentes com causas desta natureza.

A magnetometria em conjunto com os métodos elétricos permite também o mapeamento de diques de diabásio. Este mapeamento dos diques nas áreas cársticas, por várias razões, configurou-se essencial. Eles contribuem para o processo de alteração dos calcários hospedeiros, facilitam a dissolução e percolação por água, no contato com as rochas carbonáticas e ainda constituem barreiras que compartimentam os carbonatos em células com comportamentos hidrogeológicos distintos (Rigoti *et al.* 1999a). Os ensaios geoeletricos, com sua sensibilidade à variação no conteúdo em água, auxiliam no mapeamento de áreas de risco, pois, zonas condutoras em meio a rochas calcárias, na região estudada, indicam alteração, dissolução e percolação. Investigações mecânicas são então necessárias para, após a detecção de alvos críticos pela geofísica, avaliar as proporções da dissolução e possíveis vazios associados. Sob outro ângulo, as técnicas geofísicas podem delimitar áreas mais estáveis e seguras para a ocupação antrópica.

## Geofísica na avaliação de risco geológico em zonas cársticas urbanas

### Base de dados

Os dados apresentados referem-se a ensaios realizados em duas áreas de estudo, Almirante Tamandaré e Fervida. Os objetivos dos levantamentos geofísicos em ambas as áreas foram avaliar as condições de percolação nas rochas calcárias, delimitá-las espacialmente e estimar os parâmetros dos diques principais existentes. A primeira área estudada encontra-se localizada no centro da cidade de Almirante Tamandaré e a segunda, na região de Fervida, município de Colombo.

Em ambas as áreas, os ensaios consistiram de perfis magnetométricos e de caminhamento elétrico. Estes, com arranjo eletródico dipolo-dipolo, espaçamento entre eletrodos de 20 metros e com 5 níveis de investigação. Para complementar a interpretação dos caminhamentos elétricos foram realizadas também sondagens elétricas verticais com arranjo Schlumberger.

### Resultados

Os perfis magnetométricos realizados em Almirante Tamandaré evidenciaram uma intensa anomalia dipolar (Fig.1), comprovando a suspeita de existência de um dique de diabásio (Rigoti 1998). Apesar da rede de energia elétrica sempre próxima, os dados são consistentes e os perfis puderam ser interpretados quanto à posição espacial do dique e parâmetros magnetométricos (Rigoti *et al.*1999a). Uma idéia da geometria do dique é mostrada na Figura 2, com um modelo capaz de reproduzir a anomalia observada.

O caminhamento elétrico nas ruas de Almirante Tamandaré é exemplificado na Figura 3. No topo desta figura tem-se a pseudo-seção de resistividade aparente observada e na base tem-se o modelo 2D de distribuição da resistividade que produz a pseudo-seção que aparece na porção central da figura. O programa de inversão 2D de Loke (1999) foi utilizado para obter o modelo que reproduz os dados observados dentro de 11%. No local onde o perfil magnético apresentou um alto magnético, teve-se um alto de resistividade. O dique aparece resistente pois, as rochas carbonáticas aparecem alteradas e saturadas em suas imediações. O condutor principal aparece entre as estacas 440S e 400S, cuja resistividade, tratando-se de rochas carbonáticas, só pode ser explicada por percolação por água destas rochas, com possivelmente alguma contribuição de material argiloso. Outros condutores aparecem entre as estacas 280S e 120S, em frente a um colégio, e também são indicativos de percolação provavelmente em zonas de fratura. As maiores resistividades são vistas em ambos os extremos do perfil e podem estar associadas

a outros diques de diabásio, considerando que nestes locais são observadas perturbações magnéticas (Fig.1).

O caminhamento elétrico na localidade de Fervida é exemplificado na Figura 4. Entre as estacas 160S e 340S encontra-se uma zona condutora superficial, que reflete cobertura argilosa saturada. Esta cobertura sofreu assentamento com conseqüentes rupturas do asfalto e do terreno nas proximidades de um poço de captação d'água, localizado na zona condutora, quando este iniciou o bombeamento (Rigoti *et al.*1999b). Certamente o aquífero neste local é carstefraturado, porque chegou à vazão experimental superior a 100 m<sup>3</sup>/h. No equilíbrio hidráulico, sem rebaixar o nível freático, bombeou 90 m<sup>3</sup>/h. Observam-se também em ambos os extremos da seção, altos de resistividade que são respostas diques de diabásio resistentes. Em particular, a anomalia tipo "pernas de calça" do extremo direito, é fornecida por um dique sub-aflorante.

Nesta mesma localidade de Fervida, sondagens elétricas verticais (SEVs) foram realizadas na região condutora para detalhar a seção vertical. Elas mostram que a zona de alteração é superficial e não ultrapassa a doze metros de profundidade em média. Contudo deve-se lembrar que as SEVs refletem um comportamento médio, volumétrico do subsolo e que podem não ter identificado possíveis cavidades. Mesmo as seções do caminhamento elétrico podem estar deixando de evidenciar cavidades e dutos que sejam volumetricamente pouco expressivos. Dependendo do interesse, sempre é possível ensaios de maior detalhe, como é o objetivo do trabalho em andamento, com levantamento 3D de resistividade neste local, com vistas a detectar cavidades que possam não ter se manifestado nos ensaios convencionais. Dada a proximidade do nível freático, não se espera nesta área de estudo cavidades secas, que poderiam apresentar alta resistividade.

A interpretação das SEVs sugere dois modelos geoeletricos para a área de Fervida. O primeiro, observado nos locais topograficamente mais baixos, exhibe duas camadas: uma primeira constituída de cobertura condutora (solo e rocha alterada em nível de saturação) e a segunda representada pela rocha sã, resistente. Incluem-se neste primeiro modelo a maioria das sondagens realizadas. O segundo modelo observado em locais com topografia mais elevada exhibe quatro camadas. Interpretou-se a seqüência de camadas neste modelo da seguinte forma: a primeira camada mais superficial, pouco mais condutora, refletindo uma camada com certa umidade (zona de raízes); a segunda, resistente, associa-se a uma zona de solo aerada, com pouca umidade; a terceira, reflete o nível de saturação, que engloba solo e rocha



## Geofísica na avaliação de risco geológico em zonas cársticas urbanas

alterada e a quarta e última camada, como no primeiro modelo reflete a rocha sã, resistente.

Agradecimentos à SANEPAR pela liberação dos dados.

### Conclusões

A utilização, em conjunto, de técnicas geofísicas de eletrorresistividade e de magnetometria mostrou-se eficaz na detecção e delimitação de zonas cársticas, subsidiando estudos ambientais e geotécnicos. Com a determinação e detalhamento da extensão lateral e vertical das zonas de percolação e alteração das rochas carbonáticas, através dos ensaios geoeletricos, pôde-se levantar quais são as áreas mais susceptíveis ao risco de subsidências e colapsos. E, em locais já urbanizados, auxiliou no tratamento de problemas geotécnicos e ambientais. A magnetometria por sua vez, contribuiu para o mapeamento dos diques de diabásio, que influem no comportamento hidrogeológico do aquífero cárstico. Por outro lado, se existissem vazios secos, a menos que fossem expressivos, seriam de difícil detecção. Não se observou evidência de cavidades secas nos levantamentos executados.

Tendo em vista que as zonas cársticas tão bem mapeadas podem trazer risco geológico se contiverem vazios que possam resultar em colapso de camadas superficiais, os resultados aqui mostrados servem para indicar as técnicas geofísicas como forma de prevenção de acidentes e de planejamento do uso e ocupação do solo.

### Referências

- Loke, M.H., 1999, Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, a practical guide to 2-D and 3-D surveys. [www.agiusa.com](http://www.agiusa.com)
- Rigoti, A., 1998, Projeto Carste, estudos geofísicos. SANEPAR, Companhia de Saneamento do Paraná, Relatório Técnico, 78p.
- Rigoti, A., Rosa Filho, E.F., Giusti, D.A., Guarda, M.J., Hindi, E., Silva, M.J., 1999a, Estratégia geofísica na exploração do Aquífero Carste na Região Metropolitana de Curitiba, PR. Anais do VII Simpósio Sul Brasileiro de Geologia e II Encontro de Geologia do Mercosul, Boletim de Resumos Expandidos, p.62, Foz do Iguaçu – PR.
- Rigoti, A., Rosa Filho, E.F., Giusti, D.A., Schicker, G., de Mio, E., 1999b, Métodos geoeletricos no tratamento de problemas geotécnicos no carste – caso de Fervida, Colombo, PR. Anais do VII Simpósio Sul Brasileiro de Geologia e II Encontro de Geologia do Mercosul, Boletim de Resumos Expandidos, p.70, Foz do Iguaçu – PR.

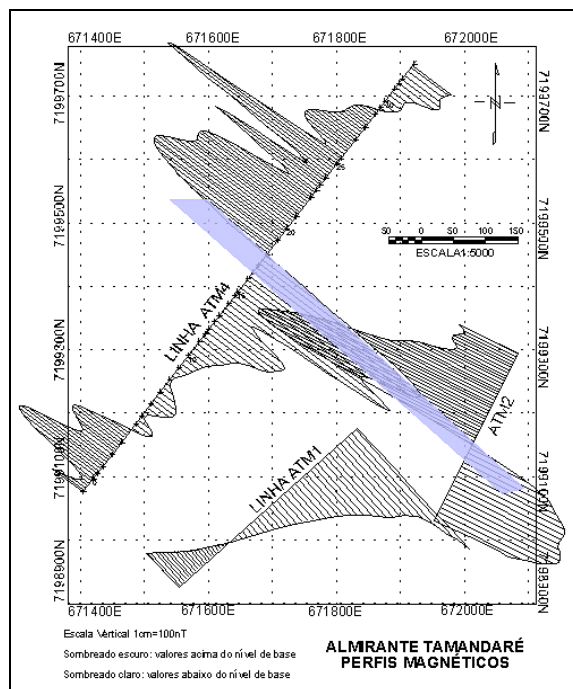


Figura 1 – Perfis magnetométricos realizados nas ruas de Almirante Tamandaré.

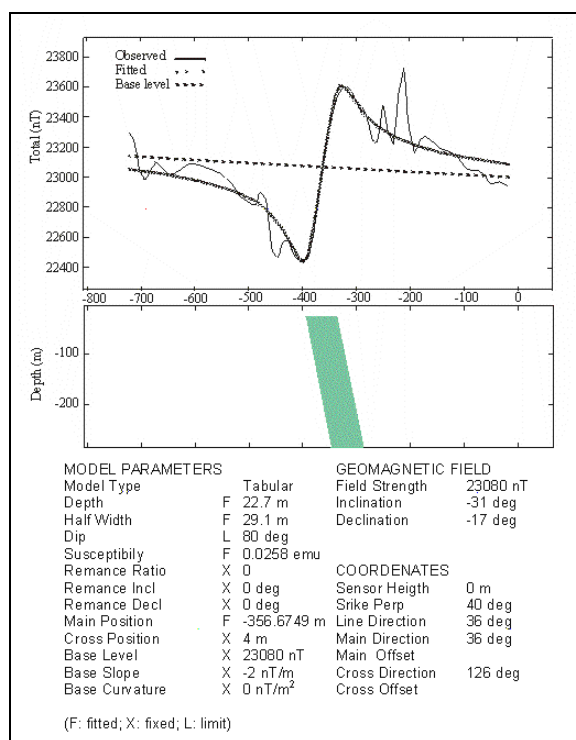


Figura 2 – Modelagem da anomalia magnética observada.

## Geofísica na avaliação de risco geológico em zonas cársticas urbanas

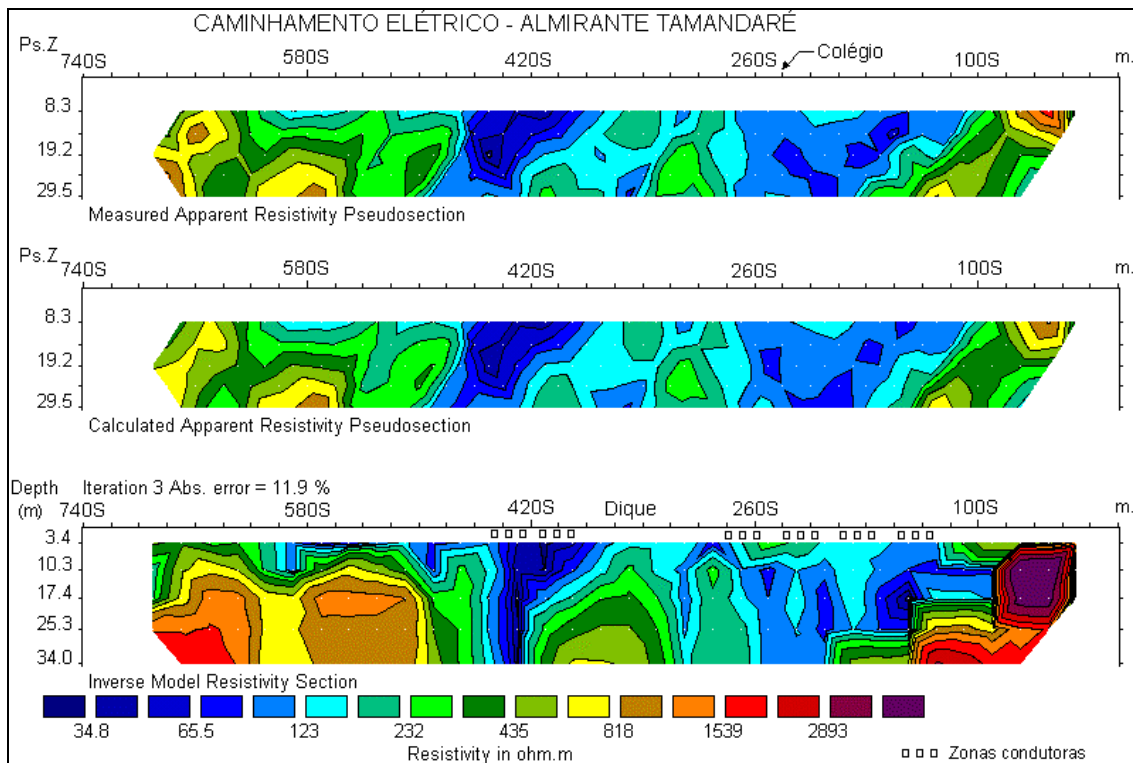


Figura 3 – Caminhamento elétrico em Almirante Tamandaré: no topo a pseudo-seção observada; na base o modelo 2D de distribuição da resistividade que produz a pseudo-seção da porção central da figura.

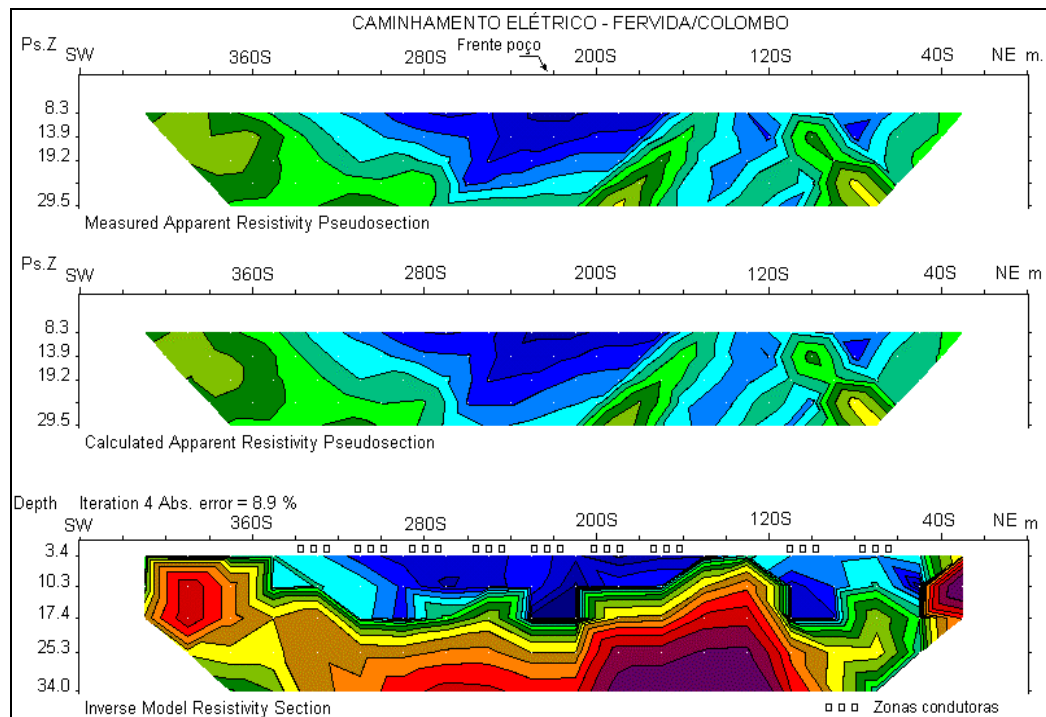


Figura 4 - Caminhamento elétrico em Fervida: pseudo-seção observada e modelo 2D de melhor ajuste.



# Levantamento Geofísico no Depósito de Lixo de Bangu na Zona Oeste da Cidade do Rio de Janeiro

Alexandre C. Monteiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, acm@cprm.gov.br

Rozanda G. da S. Costa, UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, rozand@zipmail.com.br

## Abstract

There is a program of decontamination of Guanabara bay in Rio de Janeiro state, Brazil. The Sarapuí river which has its estuary on this bay, pass by the east boundary of the waste disposal studied by this work. The groundwater contamination of the terrain below the deposit could be detected using eletrorresistivity and eletromagnetics (Geonics EM-34) and the flow direction is suggested here based on maps created from the data acquired. The groundwater flow goes towards a tributary of Sarapuí river (Cabral River in southwest of the area) and to that river in southeast part.

## Introdução

Este trabalho é a síntese de um relatório apresentado à COMLURB (Companhia Municipal de Limpeza Urbana) e foi elaborado para auxiliar na tese de doutoramento da segunda autora junto ao setor de Geologia de Engenharia Ambiental da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro). Trata-se de um programa maior com vistas à despoluição da baía de Guanabara. O rio Sarapuí, que passa rente ao depósito, e deságua na baía, está sendo contaminado pelo chorume oriundo deste depósito. Este trabalho visou quantificar a espessura desta camada saturada (chorume) bem como inferir a direção do fluxo subterrâneo para dar subsídios à recuperação da área. Para a realização deste levantamento, optou-se pelos métodos elétrico e eletromagnético, sendo realizadas 32 sondagens elétricas verticais (SEVs) utilizando o arranjo Schlumberger e 11 linhas com medidas a cada 50 metros com o equipamento Geonics EM-34, usando as três aberturas possíveis: 10, 20 e 40 metros. Com base em sondagens a percussão anteriores a instalação do depósito (87) foi possível de se quantificar a espessura das camadas através da inversão das SEVs, com a utilização do programa apresentado por Monteiro & Porsani, 1999. O levantamento eletromagnético permitiu, qualitativamente, avaliar as áreas mais comprometidas no depósito, dando subsídios para a indicação de locais para a instalação de poços de monitoramento.

## Área de estudo

A área de estudo localiza-se na zona oeste do município do Rio de Janeiro, situa-se no polígono formado por 660072900600073300 em coordenadas UTM (Figura 1) SF-23-BV-3

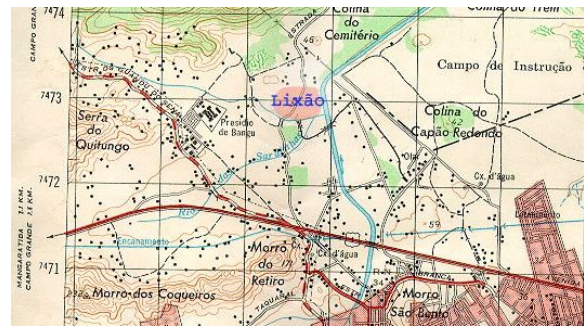


Figura 1: Mapa de Localização da Área do Depósito

## Geologia da área em estudo

A geologia na região do depósito de lixo de Bangu é composta pela serra de Madureira, que é uma intrusão alcalina de idade Terciária, e o local do depósito compõe-se de sedimentos Quaternários (colúvio) com espessuras variando entre 5 e 10 metros, de acordo com as sondagens a percussão citadas.

## Características Geofísicas da Área

Pôde-se classificar as SEVs de maneira geral, como possuindo 3 horizontes geoeletricos, a saber:

- Primeiro horizonte com espessura em torno de 12 metros podendo chegar a 20 metros em alguns pontos. A resistividade desta camada varia em função do material, que é muito heterogêneo, possuindo camadas muito finas e espessas com resistividades variando de 5,3 até

326  $\Omega\text{m}$ , entretanto as resistividades na maioria das vezes giram em torno dos 20 a 30  $\Omega\text{m}$ . Esta é a camada onde o conteúdo líquido é pouco ou nenhum.

- Segundo horizonte com espessura em torno dos 15 metros podendo chegar a 20 metros no lado do depósito próximo ao presídio.<sup>1</sup> A resistividade sempre baixa, nunca acima de 10  $\Omega\text{m}$  é o que caracteriza esta camada. Este horizonte representa a porção saturada do depósito, e devido a esta baixa resistividade constitui o chorume. Uma observação a respeito desta camada é que abaixo dela encontramos o embasamento quando seria de se esperar o manto de alteração antes do cristalino; isto não ocorre, provavelmente porque, como o lençol d'água está sendo percolado pelo chorume, este reduz a resistividade da água nos interstícios deste manto de alteração e assim mascara sua presença. Esta baixa resistividade, média de 5.65  $\Omega\text{m}$ , corresponde a uma condutividade de 176 mS/m, sabendo que estes valores correspondem a condutividade/resistividade total, mostra que a água em subsuperfície está comprometida.
- Terceiro e último horizonte que possui resistividade alta, na maioria das vezes acima dos 1000  $\Omega\text{m}$ , sendo aqui interpretado como o embasamento cristalino, situando-se a uma profundidade média de 30 metros podendo chegar aos 40 metros, isto a partir do topo do depósito. Levando em consideração a inversão das SEVs feitas na estrada do Gericinó, onde não há resíduos depositados, o embasamento foi alcançado em torno de 8 metros de profundidade; assim estas espessuras para o depósito embora não estejam respaldadas por poços, aproximam-se de uma realidade plausível.

Na Figura 1 vemos uma seção geoeletrica obtida a partir das inversões das SEVs, sendo ali mostrados os três horizontes acima descritos.

Além desta figura é mostrado um mapa de resistividade aparente para  $AB/2 = 56,2$  metros, (Figura 2), onde é possível ver os contornos da parte sudoeste da área, sugerindo uma descarga de chorume nesta direção (riacho Cabral). Na sua parte central (SEVs 17, 18 e 19), as quais foram feitas sobre a estrada do Gericinó, vê-se valores maiores da

<sup>1</sup> Consideraremos sempre lado do presídio a porção oeste do depósito em relação a estrada do Gericinó, a qual divide o depósito em duas partes. A porção leste será aqui denominada de lado do rio Sarapuú.

resistividade aparente, delineando o contorno desta estrada e dividindo o depósito em duas partes distintas, ou seja, duas diferentes plumas, uma a leste outra a oeste.

## Características do Levantamento Eletromagnético

Neste trabalho o levantamento eletromagnético serviu para delimitar as zonas de maior condutividade aparente, que foram associadas àquelas de baixa resistividade. Com isto, delimitou-se as zonas de maior contaminação, as quais, quando possível, indicaram o sentido do fluxo da pluma poluidora.

O mapa de condutividade aparente mostrado na Figura 3, revela também a presença de duas plumas poluidoras distintas, de maneira mais clara que a Figura 2. A linha 5 na respectiva figura foi realizada sobre a estrada do Gericinó, onde não há detritos e, portanto, os valores de condutividade aparente são menores para aquela profundidade de investigação. É possível ver o mesmo sentido de migração sudoeste da pluma contaminante citado para a figura anterior, bem como percebe-se também um fluxo no sentido sudeste em direção ao rio Sarapuú, na pluma leste do depósito.

## Conclusões

Conforme descrito, a correlação entre os métodos geofísicos utilizados neste trabalho propiciou a detecção da região onde a pluma poluidora é mais proeminente, e por conseguinte forneceu subsídios à locação de poços de monitoramento para auxiliar na recuperação desta área. Também pôde-se sugerir o sentido de migração do chorume.

## Agradecimentos

O primeiro autor agradece à CPRM pela possibilidade de realização deste trabalho. A segunda autora agradece ao CNPQ/UFRJ pelo apoio dado a pesquisa, e ambos agradecem a COMLURB pelo suporte e permissão para publicação deste resumo.

## Referências

- McNeill, J. D., 1990, Use of Electromagnetic Methods for Groundwater Studies, *In* SEG, Investigations in Geophysics - Geotechnical and

Environmental Geophysics: Academic Press-San Diego. 5.

Monteiro A. C., & Porsani, M. J., 1999, Inversão de sondagens elétricas verticais da região de Porto Seguro - BA utilizando norma  $Lp$ -variante: Sixth Congress of the Brazilian Geophysical Society, 1 CDROM, Sessão "Groundwater".

Benson, A. K., Payne L. Kelly & Stubben M. A., 1997, Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods-A case study: Geophysics, 62, (1), 80-86.

Ward, S. H., 1990, Resistivity and induced polarization methods, *In* SEG, Investigations in Geophysics - Geotechnical and Environmental Geophysics: Academic Press-San Diego. 5.

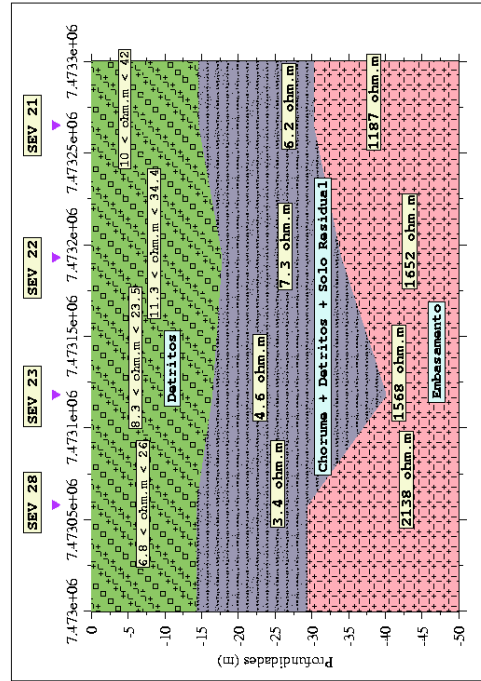


Figura 1: Seção Geométrica no Lado do Presídio.

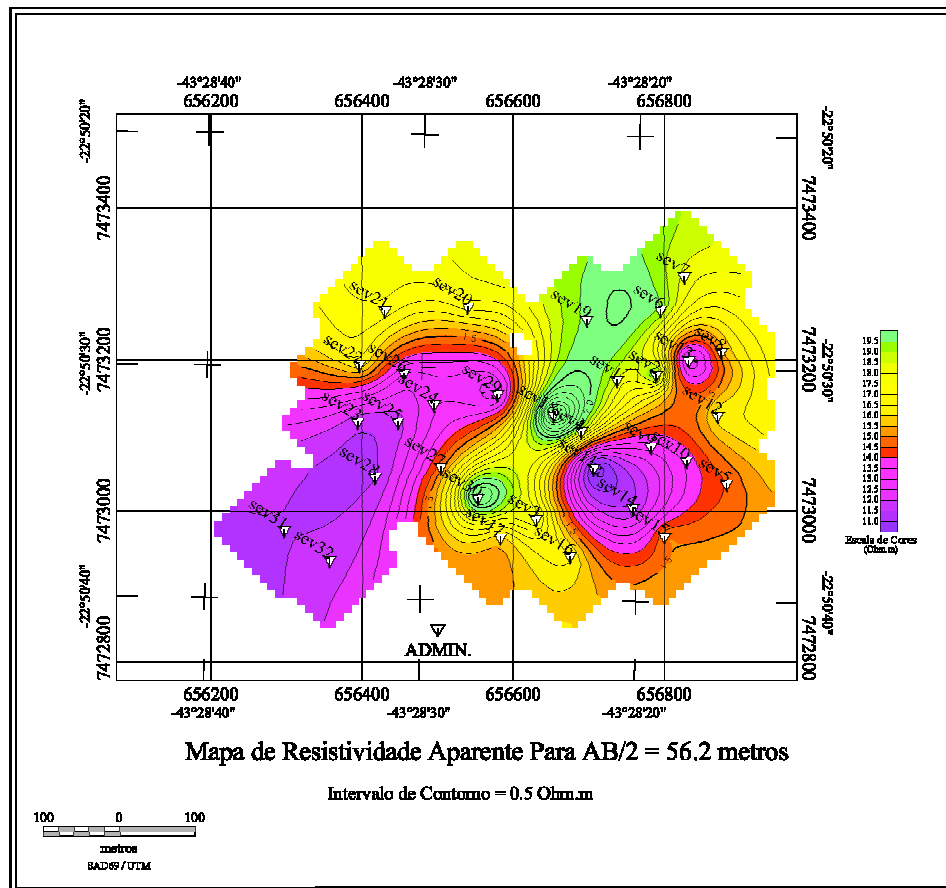


Figura 2: Mapa de Contorno de Resistividade Aparente.

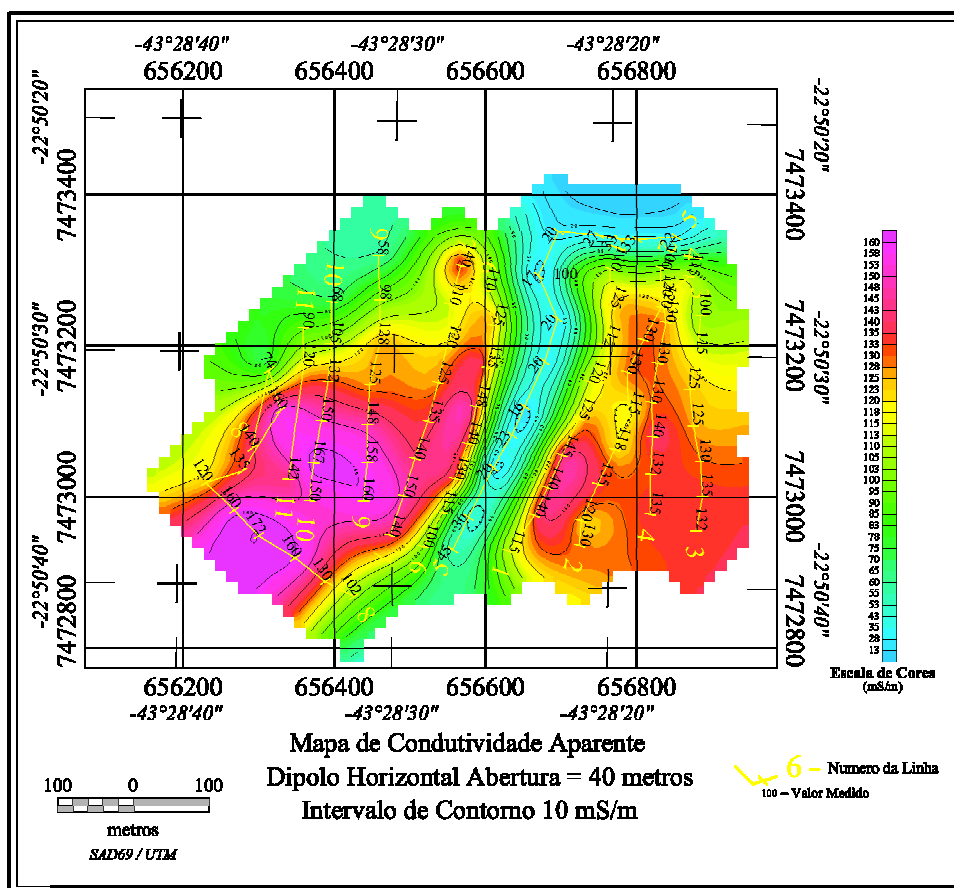


Figura 3: Mapa de Contorno de Condutividade Aparente.





## Método Eletromagnético Indutivo e GPR Aplicados à Detecção de Contaminação do Solo e Água Subterrânea Por Resíduos Industriais

Wagner França Aquino, CETESB e Marco Antonio B. Botelho, CPGG/UFBA

### Abstract

In the study presented, geophysical surveys were applied in the assessment of soil and groundwater contamination of an abandoned industrial area, where the hazardous wastes were infiltrated directly into the soil. The proposed goals were to detect and map the presence of the contaminants on the subsurface through the use of frequency domain electromagnetic method (FDEM) and ground penetrating radar (GPR). The FDEM method was carried out to obtain apparent electrical conductivity of the terrain in different investigated depths, what allowed to map contaminant plume related to the inorganic compounds disseminated in the soil and dissolved in the groundwater. The GPR data provided the imaging of the contaminants present in the vadose and saturated zones, besides to confirm the indications of the contamination flow as pointed by the FDEM survey. Also, it was verified that the low frequency antenna (25MHz) is able tool to determine the extension of the inorganic contamination plume.

### Introdução

Práticas como a infiltração ou descarte direto de resíduos no solo foram comumente adotadas, principalmente, nas décadas de 70 e 80. Como resultado deste processo, originaram-se passivos ambientais onde é notória a degradação da qualidade dos solos e das águas subterrâneas. Neste contexto, os métodos geofísicos podem contribuir de forma efetiva no diagnóstico de áreas suspeitas ou comprovadamente contaminadas na definição da abrangência da contaminação subterrânea e identificação dos pontos de maiores concentrações de contaminantes (hot spots), além de fornecerem informações fundamentais sobre a hidrogeologia local.

A adoção crescente desta metodologia não invasiva se justifica pela eficiência e rapidez apresentada, sendo que a aplicação de dois ou mais métodos geofísicos distintos aumenta a precisão das interpretações (Greenhouse & Harris, 1983). Meios muito condutivos atenuam de forma marcante o sinal de GPR, o que possibilita a aplicação dessa metodologia na identificação de plumas de contaminação (Nobes, 1996).

Este trabalho se refere ao diagnóstico realizado em área industrial abandonada, localizada no município de Araras (SP), onde a contaminação decorreu por

infiltração de resíduos provenientes da fabricação de sais e solventes halogenados (organoclorados) diretamente no solo (zona não saturada) através de poços de injeção, entre 1981 e 1988 (Aquino, 2000). A geologia do local é caracterizada pela presença e alternância de sedimentos argilosos e siltosos pertencentes ao Grupo Tubarão e apresentam uma condutividade hidráulica entre  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  cm/s. O nível d'água medido próximo à indústria varia de 7 a 15m e o sentido de fluxo da água subterrânea na área da indústria é preponderante para sudoeste (Figura 1).

### Metodologia Empregada

Na área investigada foram executados levantamentos combinando-se dois diferentes métodos geofísicos: eletromagnético indutivo no domínio da frequência (FDEM) e GPR (Ground Penetrating Radar). Para aquisição dos dados de condutividade elétrica aparente do terreno, através do método FDEM, foram utilizados condutivímetros de solo marca Geonics (Canadá). Foram estes, o EM31, com frequência de operação de 9.8kHz e profundidades teóricas de investigação de 3 e 6m, e o EM34-3XL, cujas frequências são 0.4, 1.6 e 6.4kHz e profundidades de alcance de 7.5, 15, 30 e 60m, dependendo do arranjo de campo utilizado (Monier-Williams et al., 1990). Nos levantamentos de GPR, empregou-se o equipamento Ramac/GPR, marca Måla Geoscience (Suécia), com antenas de frequências operação de 25 e de 100MHz.

A profundidade de investigação para este método depende da frequência de emissão utilizada e da condutividade elétrica do meio (Annan et.al, 1991).

### Discussão dos resultados geofísicos

A abrangência da contaminação determinada pelo levantamento eletromagnético indutivo extrapola as dependências da indústria (Figuras 2), e possui prolongamento em direção sudoeste, o que é concordante com o sentido de fluxo determinado pelo mapa potenciométrico elaborado para área (Figura 1). Além disso, os resultados deste levantamento indicaram a posição dos dois pontos de infiltração de resíduos (I1 e I2), confirmando as informações históricas sobre a contaminação do local.

A seção de radar da linha L1 com frequência de 25MHz (Figura 4) apresenta uma atenuação na parte central, entre as distâncias de 100 e 235m, que corresponde às condutividades aparentes maiores que

## Detecção de Contaminação do Solo e Água Subterrânea

50mS/m para o perfil de profundidade de 15m (Figura 3), que é aquele onde se constata uma correspondência maior com os dados de radar obtidos. Esta atenuação está relacionada à contaminação mais aguda presente no local, uma vez que este perfil cruza a pluma de contaminação próximo dos dois pontos de infiltração determinados (Figura 2).

Além da atenuação do sinal, podem ser verificados dois fortes refletores sub-horizontais, simetricamente opostos, nas distâncias de 30 a 100m e de 230 a 320m, posicionados na profundidade de 8m, e que foram interpretados como sendo a água subterrânea contaminada (pluma). Estes refletores, cujo sinal é bem definido, aparecem entre as condutividades aparentes de 18 a 50mS/m para o perfil eletromagnético de 15m. Presume-se, assim, que no intervalo compreendido entre estas condutividades aparentes, o coeficiente de reflexão da onda eletromagnética é acentuado devido à presença de contaminantes condutivos disseminados na água subterrânea. À medida que se distancia dos domínios da pluma de contaminação, os contrastes de impedância elétrica vão diminuindo, desaparecendo estas fortes reflexões.

Na seção GPR da Linha 1 da antena de 100MHz (Figura 5), entre as distâncias de 100 e 200m, foi observada uma atenuação menos profunda que a verificada para a antena de 25MHz, iniciando-se por volta de 2m de profundidade, ou seja, nas porções superficiais da zona não saturada. Esta anomalia foi interpretada como sendo o cone formado pela injeção de resíduos e demonstra, portanto, que os contaminantes, no trecho em questão, estão retidos sob condições não saturadas, corroborando com o modelo de infiltração de resíduos e confirmando as informações levantadas sobre o processo de contaminação do local.

Na seção da linha L2 (Figura 7), onde foi utilizada a antena de 25 MHz, observa-se a atenuação do sinal nos 45m iniciais, e que são relacionados aos valores de condutividade elétrica acima de 45mS/m, baseando-se no perfil de condutividade de 15m de profundidade (Figura 6). A partir desta distância, inicia-se uma forte reflexão, numa profundidade aproximada de 9 metros, interpretado como a pluma de contaminação dissolvida na água subterrânea, e que se prolonga até a distância de 110 metros. A presença deste refletor forte está relacionada às condutividades obtidas de 10 a 45mS/m, baseando-se no perfil eletromagnético de 15m, e apresenta uma visível inclinação, o que confere a existência de um gradiente no sentido da execução do perfil (para sudoeste).

A partir da distância de 110 metros, este refletor forte (contaminação) deixa de ser observado, decorrente da,

provável, diminuição das concentrações dos contaminantes condutivos, com conseqüente redução da condutividade elétrica da água subterrânea. Desta forma, o contraste de permissividade ou coeficiente dielétrico entre a água subterrânea e o meio argiloso se reduz, não produzindo, a partir deste trecho, uma reflexão marcante da onda eletromagnética.

Nesta seção também pode ser constatada a presença de outro refletor, que se estende do início ao fim do perfil, também apresentando inclinação, cuja a profundidade inicial é de 4 metros, terminando na profundidade de 8,5 metros. Este refletor contínuo, foi interpretado como sendo a franja capilar (topo da zona saturada) e está presente ao longo de todo o perfil. A existência de um gradiente neste perfil é coincidente com a indicação do mapa potenciométrico elaborado para a área (Figura 1), confirmando, assim, o sentido de fluxo da água subterrânea e da propagação dos contaminantes dissolvidos para sudoeste, conforme já havia sido observado no mapa de isocondutividade aparente (Figuras 2).

### Conclusões

A metodologia geofísica utilizada forneceu indicações fundamentais para o diagnóstico ambiental da área afetada, principalmente, no que se refere ao posicionamento da pluma de contaminação, tanto em área, como em profundidade, além de possibilitar a determinação do sentido preferencial de propagação dos contaminantes dissolvidos, de acordo com o fluxo local da água subterrânea. O mapa de isocondutividade aparente revelou valores extremamente altos da condutividade aparente do terreno, muito discrepantes dos valores naturais para a área (background), apontando a existência de altos índices de contaminação do solo local. Isto demonstra que mesmo tendo sido cessada a infiltração dos resíduos em 1988, a carga poluente que está presente na área afetada é intensa e se configura como uma fonte permanente do processo de contaminação.

Comprovou-se, neste trabalho, a correspondência direta entre os dados do GPR e os de condutividade elétrica aparente adquiridos no levantamento eletromagnético indutivo, observando-se, assim, três tipos de fenômenos distintos nas seções de radar, e que estão associados à pluma inorgânica: 1) atenuação do sinal eletromagnético quando se verificam altos valores de condutividade elétrica aparente; 2) reflexões fortes quando o meio apresenta uma condutividade elétrica acima do background porém, menores que os valores que provocam atenuação; 3) desaparecimento das fortes reflexões quando os valores de condutividade se aproximam do valor de background.

## Detecção de Contaminação do Solo e Água Subterrânea

Estes fatos indicam a viabilidade da antena de 25MHz para estudos de determinação dos limites da contaminação inorgânica na água subterrânea, de forma similar à efetuada através dos métodos eletromagnéticos indutivos, mesmo em terrenos argilosos como é caso.

### Agradecimento

Agradecimentos à Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) do Estado de São Paulo pela infra-estrutura fornecida para desenvolvimento deste trabalho.

### Referências Bibliográficas

Annan,A.P.; Cosway,S.W.; Redman,J.D.: 1991, "Water Table Detection with Ground Penetrating Radar", Expanded Abstracts, Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists 61, 494-496.

Aquino, W.F.: 2000, "Métodos Geofísicos Eletromagnéticos Aplicados ao Diagnóstico da Contaminação do Solo e das Águas Subterrâneas em Área de Infiltração de Resíduos Industriais", Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 121p.

Greenhouse,J.P.; Harris,R.D.: 1983 "Migration of Contaminants in Grondwater at a Landfill: a Case Study, 7. DC, VLF and Inductive Resistivity Surveys", Journal of Hydrology 63, 177-197.

Monier-Williams,M.E.; Greenhouse,J.P.; Mendes, J.M.; Ellert,N.: 1990, "Terrain Conductivity Mapping with Topographic Corrections at Three Wate Disposal Sites in Brazil, in S.H. Ward (ed.) Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol II - Environmental e Groundwater, Society of Exploration Geophysicists, 41-45.

Nobes,C.D.: 1996, "Troubled Waters: Environmental Applications of Electrical and Eletromagnetic Methods", Surveys in Geophysics 17, 393-454.

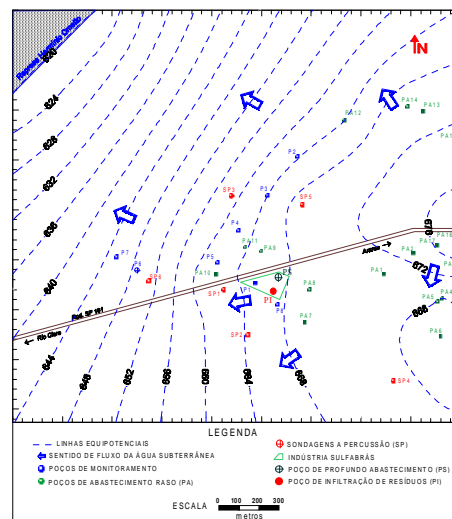


Figura 1 - Mapa potenciométrico da área em estudo.

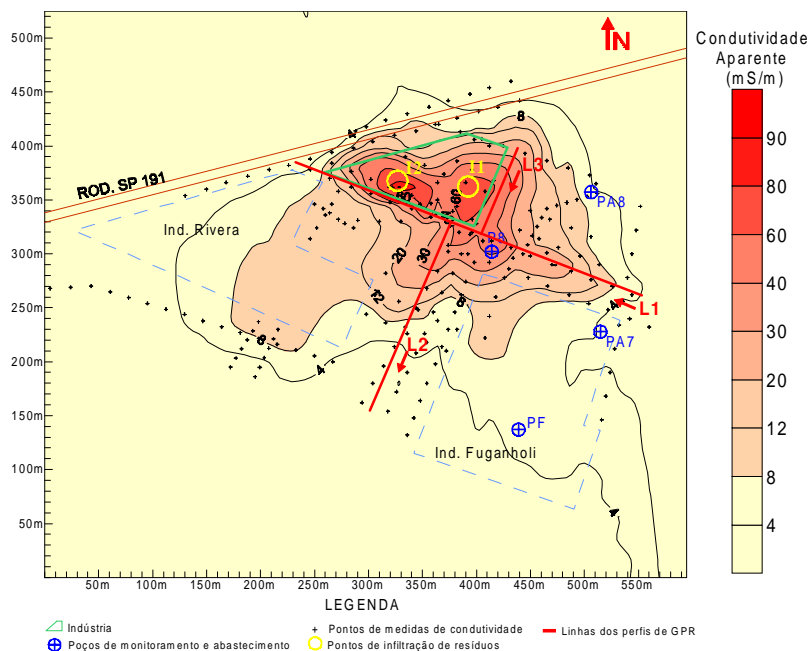


Figura 2 - Mapa de isocondutividade aparente em detalhe: profundidade até 7,5 metros (1999)

## Detecção de Contaminação do Solo e Água Subterrânea

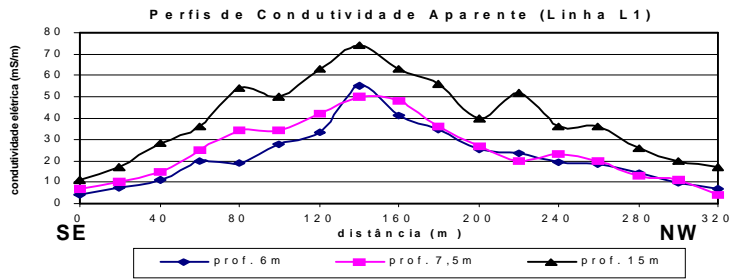


Figura 3 . Perfis de condutividade aparente da linha L1 para 6, 7,5 e 15m de profundidade

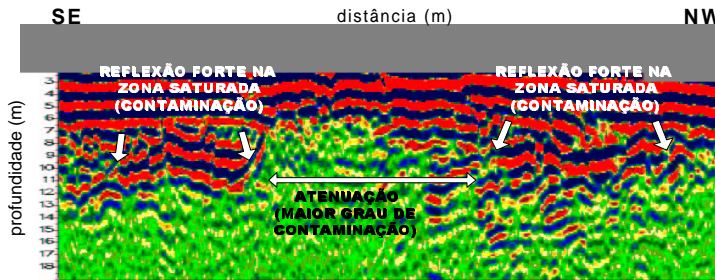


Figura 4 - Seção interpretada de GPR da linha L1 (frequência de 25MHz).

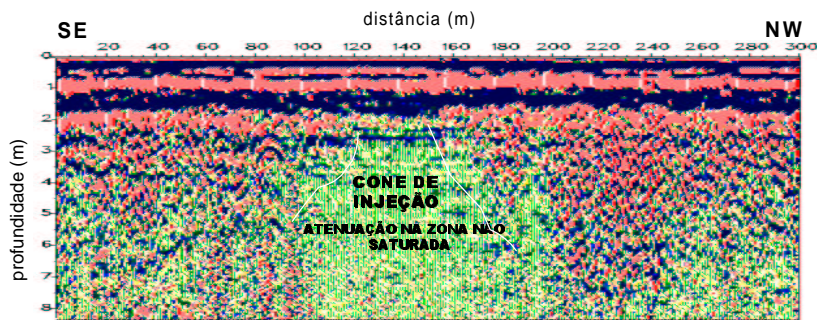


Figura 5- Seção interpretada de GPR para linha L1 (frequência de 100MHz).

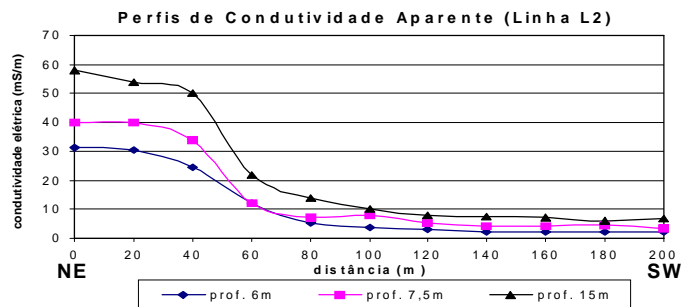


Figura 6 - Perfis de condutividade aparente da linha L2 para 6, 7,5 e 15m de profundidade.

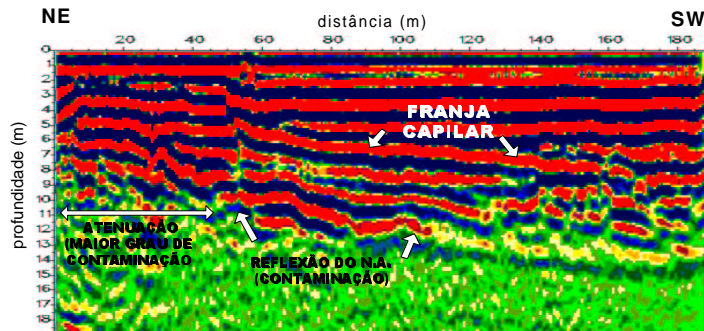


Figura 7 - Seção interpretada de GPR da linha L2 (frequência de 25MHz).



## **Modelagem de Pseudo-Seções de Resistividade e Polarizabilidade Aparentes – Estudo em uma Área de Disposição de Resíduos Urbanos**

*Helyson Paredes Moura, IGCE-UNESP-Rio Claro, hpmoura@rc.unesp.br*

*Walter Malagutti Filho, IGCE-UNESP-Rio Claro, malaguti@rc.unesp.br*

*Antônio Celso de Oliveira Braga, IGCE-UNESP-Rio Claro, acobraga@rc.unesp.br*

### **Abstract**

This work shows the results of quantitative interpretations of pseudosections of resistivity and apparent polarity. These pseudosections were obtained using the electric profiling, in dipole-dipole arrangement, at a sanitary landfill near the city of Rio Claro, São Paulo. The modeled pseudosections, using algorithm based on finite element numerical modeling methods, permitted the determination of the limits and depths of the waste pile and the surrounding zone contaminated by percolation of leachate derived from the landfill.

### **Introdução**

O resultado da prática obsoleta e inadequada de disposição de resíduos sólidos urbanos em terrenos de geologia inadequada, tem dirigido a atenção dos órgãos públicos e de instituições de pesquisa no sentido de avaliar os impactos da disposição, que tem como consequência, a contaminação do solo e da água subterrânea pela infiltração do percolato (chorume).

Após um longo período de aplicações prioritárias à prospecção mineral, os métodos geoeletricos vem sendo cada vez mais aplicados em estudos ambientais para o mapeamento e monitoramento de áreas de disposição de resíduos urbanos e industriais (Ross et al. 1990; Elis & Zuquette, 1997; Braga et al., 1999). As metodologias proporcionam uma visão global da subsuperfície, por meio de técnicas não-invasivas, que complementam as informações pontuais de testemunhos de furos de sondagens ou de amostras de poços de água subterrânea.

Nos últimos anos, integrada com as análises qualitativa e semi-quantitativa, quase genérica na interpretação dos dados de caminhamento elétrico (CE) de resistividade e polarização induzida, a interpretação quantitativa tem-se popularizado através de programas computacionais baseados em métodos matemáticos aproximativos, como elementos finitos, disponíveis no mercado (Interpex, 1997).

Neste trabalho apresenta-se o resultado da modelagem bidimensional de uma das linhas de CE, que fazem parte do estudo que consiste na utilização de técnicas geofísicas para subsidiar a avaliação do impacto ambiental causado pelo aterro controlado da

cidade de Rio Claro – SP. Esse aterro (antigo lixão) ainda em operação, existe a cerca de 19 anos, localizado ao lado da rodovia Fausto Santomauro (SP-127) que interliga os municípios de Rio Claro e Piracicaba, na altura do Km 2, possuindo uma área total de 44.242,16 m<sup>2</sup>.

### **Geologia e Aspectos Geotécnicos do Local**

A geologia da área sobre a qual está assentado o aterro controlado é constituída por rochas da Formação Rio Claro assentada discordantemente sobre rochas mais antigas (sedimentos Paleozóicos) da Formação Corumbataí, pertencentes à Bacia sedimentar do Paraná.

A Formação Rio Claro apresenta sedimentos predominantemente arenosos, esbranquiçados, amarelados e róseos, mal consolidados, com solo (latossolo areno-argiloso) bastante desenvolvido (8 a 12 metros) nos altos, topo dos ineflúvios (Zaine, 1994).

A Formação Corumbataí é constituída por argilitos, siltitos e folhelhos arroxeados e marrom-avermelhados, as vezes esverdeados, com intercalações de arenitos, leitos carbonáticos e coquinas.

Em outubro de 1999 foram executadas no aterro, sondagens SPT (Standard Penetration Test), nas quais nota-se que:

- i) os níveis freáticos foram encontrados nas profundidades de 9,6 m à jusante e 13,5 m à montante do aterro;
- ii) a base do aterro (cava) encontra-se em sedimentos arenosos e/ou areno-argiloso da Formação Rio Claro, chegando a um máximo de profundidade de 14,5 m;
- iii) a profundidade do topo dos sedimentos da Formação Corumbataí foi encontrado no mínimo a 13 m;
- iv) o material de empréstimo utilizado para cobrir as células de lixo constitui-se de sedimentos areno-argilosos;

### **Ensaio Realizados e Resultados Obtidos**

Na área do estudo foram executados ensaios de resistividade e polarização induzida utilizando as técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) com arranjo Schlumberger e caminhamento elétrico (CE)



## Modelagem de Pseudo-Seções de Resistividade e Polarizabilidade Aparentes – Estudo em uma Área de Disposição de Resíduos Urbanos

dipolo-dipolo. Nos ensaios de CE, foram utilizados espaçamentos entre os dipolos de 5 e de 10 metros, com cinco níveis de investigações, atingindo profundidades teóricas máximas de 15 e 30 metros, respectivamente. Os trabalhos de campo foram desenvolvidos utilizando-se um conjunto transmissor (TSQ-3) e receptor (IPR-12), de fabricação canadense da Scintrex, que permite a medida simultânea do parâmetro de polarização induzida no domínio do tempo (polarizabilidade aparente) e da resistividade aparente.

Informações de tipo litológico de solos e presença de resíduos em profundidades, obtidas por amostragens durante as sondagens SPT e informações das posições do nível freático em poços de monitoramento, auxiliaram na construção de um modelo inicial utilizado no processo de inversão das pseudo-seções.

As pseudo-seções foram interpretadas quantitativamente utilizando o programa computacional RESIX-IP2DI da Interpex Limited. O programa baseia-se no método de análise numérica elementos finitos, cuja premissa básica consiste em aproximar a região de definição da solução procurada, por um conjunto de células discretas retangulares que por sua vez são subdivididas em triângulos constituindo uma malha (Interpex, 1996).

Com o objetivo de determinar a estrutura do aterro e avaliar se a polarizabilidade seria sensível à presença dos resíduos, foi executada a linha CEIP(4) (Figura 1) ensaiada de fora para dentro do aterro. Nessa figura é mostrada as seções de CE ensaiadas (a) e (b) com as respectivas seções sintéticas (c) e (d), obtidas pelo modelo geoeletrico bidimensional.

Na Figura 1, observa-se do lado esquerdo das pseudo-seções (a) e (b), flancos de anomalias de resistividade e polarizabilidade aparentes associadas ao limite lateral da cava de resíduos, situado entre as posições de estacas de 20 e 25 metros. Do lado direito, sem muita definição nas pseudo-seções, inferiu-se o outro limite lateral da cava, conforme observação local. A anomalia esquerda melhor definida, separa a zona de altas resistividades aparentes (maiores que 300  $\Omega \cdot m$ ) associadas a baixos valores de polarizabilidades aparentes (menores que 10 mV/V) relativa do meio natural (solo areno-argiloso) da zona de baixas resistividades aparentes associadas a altas polarizabilidades aparentes que caracterizam a cava de resíduos. Os valores 300  $\Omega \cdot m$  e 10 mV/V foram escolhidos em função de outros ensaios de CE, posicionados fora da área do aterro. Quanto aos altos valores de polarizabilidade aparentes em relação aos encontrados fora da cava, refletem

provavelmente a presença de materiais polarizáveis dentro da mesma, como metais (latas), vidros cerâmicos e papel impresso que são materiais eletricamente carregáveis, normalmente presentes em resíduos urbanos (Vogelsang, 1995). Materiais de empréstimo utilizados na cobertura do aterro (sedimentos areno-argilosos) podem também estarem contribuindo para o aumento do efeito IP. As resistividades baixas encontradas na cava refletem as elevadas concentrações de íons cloreto ( $Cl^-$ ) e outros íons, tais como sódio ( $Na^+$ ), sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) e nitrato ( $NO_3^-$ ) que contribuem para o aumento da condutividade elétrica do percolado.

O modelo bidimensional evidencia a determinação dos limites da cava de resíduos (8  $\Omega \cdot m$  - 31 mV/V e 1  $\Omega \cdot m$  - 31 mV/V), alguns níveis de solo residual areno-argiloso (104  $\Omega \cdot m$  - 1,6 mV/V e 2015  $\Omega \cdot m$  - 4,7 mV/V) e a zona saturada (110  $\Omega \cdot m$  - 2,3 mV/V). O solo residual na parte direita do modelo com baixo valor de resistividade (1  $\Omega \cdot m$  - 4,4 mV/V) reflete a presença a contaminação ao redor da cava.

### Conclusões

Os resultados mostram que a resistividade e a polarizabilidade são sensíveis à presença dos resíduos urbanos, sendo possível determinar a estrutura do aterro (limites laterais e profundidade), através da modelagem bidimensional controlada pelo conhecimento das unidades litológicas e pelas informações obtidas de sondagem à percussão.

### Referências Bibliográficas

- Braga, A. C. O.; Malagutti F., W.; Dourado, J. C. & Elis, V. R., 1999, Métodos geoeletricos aplicados no estudo do lençol freático em área de disposição de resíduos industriais. Anais do VI Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro-RJ.
- Elis, V. R. & Zuquette, L. V., 1997, Determinação da estrutura do aterro sanitário de Ribeirão Preto –SP através de métodos geoeletricos. Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo – SP, pp. 417 – 420.
- Interpex Limited, 1997, 2D inversion for resistivity and IP data. IX - Interpretation PC software for the geophysics industry. Interpex Ltd. Golden, Colorado, U.S.A., 4p.



## **Modelagem de Pseudo-Seções de Resistividade e Polarizabilidade Aparentes – Estudo em uma Área de Disposição de Resíduos Urbanos**

Resixip2di v.3, 1996, Resistivity and induced polarization data interpretation software. User's manual. Golden, Colorado, U. S. A : Interpex limited. 280p.

Ross, H. P; Mackelprang, C.E. & Wright, P.M., 1990, Dipole-dipole electrical resistivity surveys at waste disposal study sites in Northern Utah, In: S. H. Ward, ed. Geotechnical and Environmental Geophysics ( Investigations in Geophysics n.5), vol. II: Environmental and Groundwater. Society of Exploration Geophysics, pp145-152.

Vogelsang, D, 1995, Environmental Geophysics. A practical guide. Springer - Verlag, Berlim, 172p.

Zaine, J. E, 1994, Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro - SP. Rio Claro. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNES - Campus de Rio Claro, 89p.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Departamento de Geologia Aplicada, do IGCE – UNESP, pelo apoio nos trabalhos de campo e a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado concedida para o primeiro autor.

# Modelagem de Pseudo-Seções de Resistividade e Polarizabilidade Aparentes – Estudo em uma Área de Disposição de Resíduos Urbanos

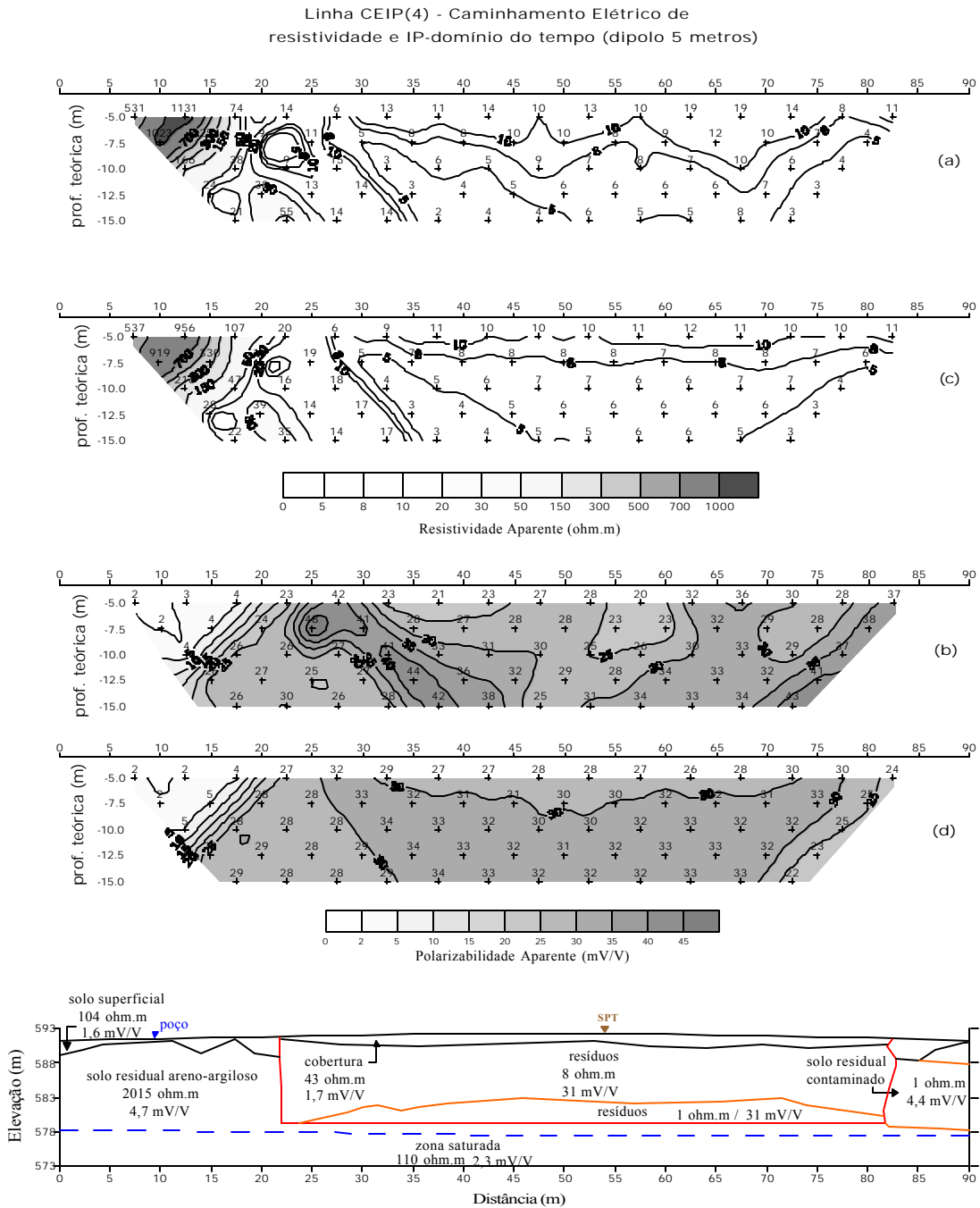


Figura 1 - (a) e (b) pseudo-seções de resistividade e polarizabilidade aparentes obtidas no aterro Rio Claro. (c) e (d) pseudo-seções sintéticas obtidas pelo modelo geoeletrico bidimensional.



## Programa PAX-VÓBIS

Lúcia Maria da Costa e Silva, Departamento de Geofísica/UFPA – [lmcs@ufpa.br](mailto:lmcs@ufpa.br)

### Abstract

The Program **PAX-VÓBIS**, proposed by the Department of Geophysics of University Federal of Pará (UFPA) to the municipal government of Belém, has 4 new objectives to exercise of Geophysics: 1) environmental studies of cemetery of Tapanã, 2) monitoring Bengui cemetery, 3) revision of the law of implantation of cemeteries, 4) course about study impacts of cemeteries with geophysics. The project was demanded by the City hall, due to the repercussion obtained with the use of Geophysics in the investigation of cemeteries, that helped in the decision of the definitive closing of Bengui cemetery due to the inappropriate groundwater level in the region. The Program **PAX-VÓBIS** was hampered by the cut of resources because of the new law of fiscal responsibility. But nevertheless the first results already obtained with electroresistivity proved again that the Geophysics can give a very important contribution in the study of cemeteries.

### Introdução

Com o desenvolvimento explosivo das cidades, cemitérios, a princípio distantes, rapidamente foram abraçados pelos novos bairros. Foi a partir de então, que os cemitérios se tornaram efetiva fonte de contaminação do lençol freático, com tamanha carga patogênica que nem lixões, nem esgotos superam o espectro possível de seus possíveis efeitos.

Em São Paulo, Recife e Belém, estudos diversos de cemitérios constataram casos de contaminação das águas, tendo em Belém, com o auxílio da Geofísica, motivado o fechamento do cemitério do Bengui (Braz et al. 2000, Carvalho e Silva 1997). Ademais, serviram para ajudar na elaboração do primeiro *Termo de Referência para Elaboração de Estudos visando a Implantação ambientalmente Correta de Cemitérios Horizontais*, que faz menção especial ao uso de Geofísica para tais estudos (Damasceno et al. 1996). Também nos trabalhos pioneiros de Pacheco em São Paulo (Pacheco 1986), a Geofísica tem sido aplicada com êxito, é fundamental notar.

### Histórico

Neste contexto favorável à utilização da Geofísica, foi proposto pelo Departamento de Geofísica da UFPA, o Programa **PAX-VÓBIS**, cuja designação tomou emprestado a histórica expressão proveniente do latim "a paz, a harmonia esteja convosco", lembrando que ela data da Idade Média, quando a harmonia do indivíduo era também com o meio ambiente,

pois a relação homem-Terra situava esta como provedora e não objeto a ser dominado pelo homem.

O Programa foi demandado pela Prefeitura Municipal de Belém (PMB) e, então, proposto pelo UFPA de modo a envolver também a Secretaria Estadual de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente (SECTAM) com o objetivo de ampliar os técnicos com conhecimento sobre as especificidades relacionadas à implantação de cemitérios horizontais. O programa tem quatro metas:

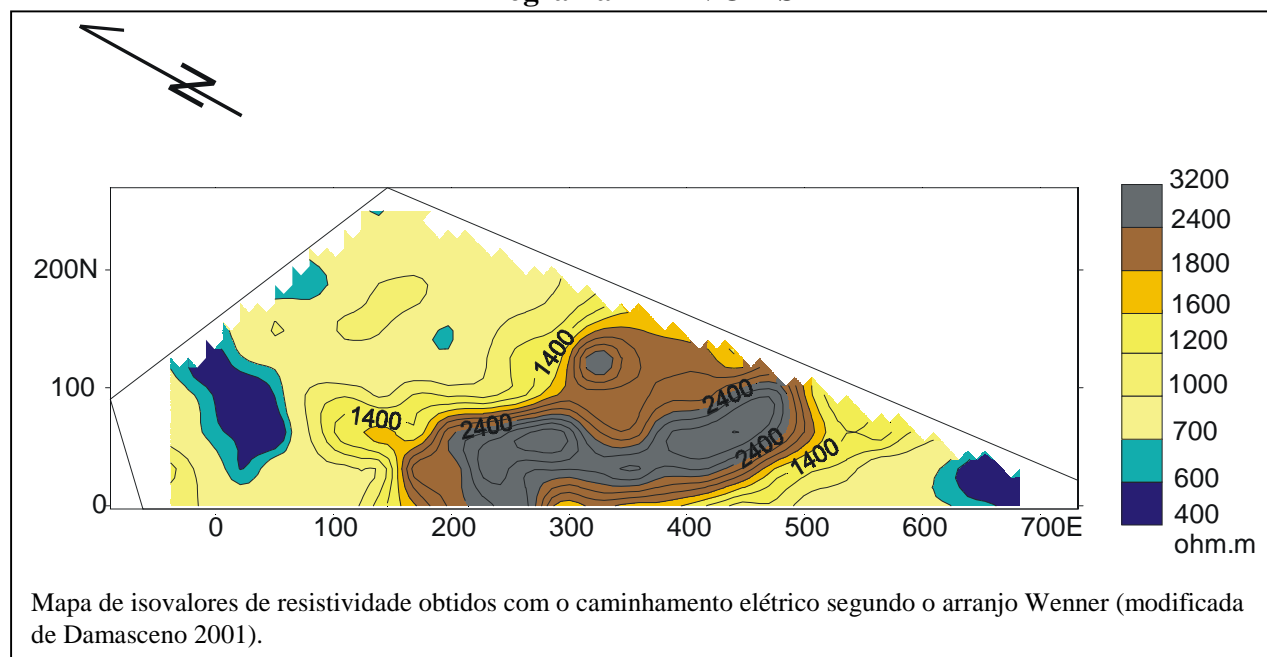
- 1) **Estudos Ambientais do Cemitério do Tapanã**, para sua legalização junto à SECTAM;
- 2) **Monitoração do Cemitério do Benguí**, conforme exige o Termo de Referência seguido pela SECTAM, quando do fechamento por contaminação ambiental comprovada;
- 3) **Revisão do Termo de Referência para a Implantação de Cemitérios Horizontais do Estado do Pará**, visando sua simplificação para impossibilitar a compreensão do estudo não sobre a ótica da Hidrologia, preferencialmente com o auxílio da Geofísica, mas da Geotécnica, como constatou-se que estava ocorrendo e motivou o cancelamento de convites para realização de estudos por firmas particulares, inclusive porque a interpretação técnica indevida resultou invariavelmente em valor orçado muito superior ao estimado;
- 4) **Curso Intensivo sobre o Estudo do Impacto de Cemitérios com o auxílio da Geofísica**, pela necessidade de multiplicação do conhecimento sobre a temática, inclusive como forma de responder à demanda que tem sido verificada.

A nova lei de responsabilidade fiscal dos prefeitos é responsável pela falta de investimentos generalizados pela PMB e atraso no repasse de recursos para vários programas, inclusive o Programa **PAX-VÓBIS**. Ainda assim, foi realizado levantamentos geofísicos diversos, dentre os quais destaca-se o caminhamento elétrico com eletrorresistividade, cujos resultados mostram, mais uma vez, a utilidade da Geofísica no estudo de cemitérios.

### O Cemitério do Tapanã

O cemitério municipal do Tapanã, que substitui atualmente o cemitério municipal do Bengui, entrou em operação pouco antes do fechamento deste, em 1997. Ao contrário do cemitério do Bengui, o cemitério do Tapanã foi projetado em local com critérios técnicos: a topografia é acentuada para o município de Belém, o que permite o escoamento fácil das águas

## Programa PÁX-VOBIS



pluviais bem como a aeração, condições que facilitam os fenômenos putrefativos, evitando sua intermitência com fenômenos conservativos (saponificação).

A despeito das condições vantajosas do Tapanã, sua legalização não foi realizada devido à descontinuidade do trabalho comum quando da troca de prefeitos. Por outro lado, havia dúvidas se a sua porção topograficamente mais baixa, situada na sua extremidade sul (vide figura acima), portanto, a porção que o nível do lençol freático pode se encontrar muito próximo da base das sepulturas, atendia os requisitos da lei.

Foi relatado, contudo, que, na sua porção mais ao norte, as águas pluviais superficiais não seguiam para sul e, ademais, no poço de visitação existe água.

O problema apresentado foi, portanto, localizar as áreas de interesse para investigação com sondagem mecânica bem como posicionar os futuros poços de verificação subsuperficial bem como de monitoração, estes muito mais dispendiosos, porém exigidos pela lei.

### Levantamento Geofísico do Cemitério do Tapanã

A área foi piqueteada segundo malha de 30mx30m, com lado paralelo a sua lateral de 700 m. Foi realizado caminhamento elétrico com o arranjo Wenner, mantendo 15 m como a distância entre pares contíguos de eletrodos, e saltos de 30 m, como usado no Cemitério do Bengui para permitir futuras comparações.

Os resultados obtidos e mostrados na figura evidenciam que a porção sul da área, a partir das imediações da estação 600E, possui resistividade relativamente muito baixa, compatível com nível hidrostático próximo da superfície. Atestam, portanto, a concordância da topografia superficial atual com a paleotopografia das camadas mais rasas da subsuperfície.

Essa porção seria, conseqüentemente, recomendada não só para a localização de poço de monitoração, por estar a jusante da topografia atual e da paleotopografia das camadas subsuperficiais, como também para a instalação não de covas, mas do ossário.

Ocorre, contudo, que também a norte ocorrem valores relativamente baixos de resistividade, refletindo total discordância com o que seria o esperado a partir da topografia atual. Essa anomalia pode indicar situação de embaciamento ou, ainda, a presença de lente rica em argila dentre da litologia eminentemente areno-argilosa com níveis descontínuos de Grês-do-Pará. No primeiro caso, permitirá trazer o ossário para a porção mais ao norte, também a entrada do cemitério, como pela administração desejado. Deve, portanto, ser perfurada para constatação.

Finalmente, é interessante observar a resistividade elevada da porção central do cemitério, relacionada à presença da resistiva Grês-do-Pará.

### Conclusões

Este trabalho permitiu orientar as futuras perfurações, bem como mostrou a possibilidade de

## **Programa PÁX-VOBIS**

locar o ossário, com fundamento técnico a ser comprovado, à entrada do cemitério.

### **Referências Bibliográficas**

- Braz, V.; Beckmann, L. & Silva, L.M.C. 2000. Integração de Resultados Bacteriológicos e Geofísicos na Investigação da Contaminação de Águas por Cemitérios. 1<sup>st</sup> Joint World Congress on Groundwater. Ceará. CD. 8 p.
- Carvalho Jr., M.A.F. & Silva, L.M.C., 1997. SP e Eletrorresistividade aplicados ao Estudo Hidrogeológico de um Cemitério. In: 5º Congresso Internacional da SBGF. São Paulo. v.1, p.471-474.
- Damasceno, F. F., 2001, Levantamento Geofísico do Cemitério do Tapanã. Orientação L.M.C. Silva. Belém, DGF/CG/UFPA. TCC 27 p.
- Damasceno, F.G.; Silva, L.M.C.; Braz, V.N.; Fonseca, F.C.G.; Oliveira, W. 1996. Termo de Referência para a Implantação de Cemitérios. Esforço Conjunto SECTAM/UFPA/SEICOM. 1º Workshop de Geofísica aplicada ao Meio Ambiente. Belém, SBGF. Resumos Expandidos. p.77-80.
- Pacheco, A. - 1986 - Os Cemitérios como Risco Potencial para as Águas de Abastecimento. SPAM (Agosto): 25-37.

### **Agradecimentos**

Ao colega Ronaldo Lopes Rodrigues Mendes, pela troca de idéias sobre o projeto e o seu acompanhamento do mesmo.



## Prospecção do Contaminante (BHC) através da Eletrorresistividade

Eduardo Moraes, Geol., Consultor Coop.Prest.Serv.Amb.Ltda. e-mail [correio@oficiosdaterra.com.br](mailto:correio@oficiosdaterra.com.br)  
Patricia Grazinoli, Geol., MSc, Doutoranda COPPE-UFRJ e-mail [pat@geotec.coppe.ufrj.br](mailto:pat@geotec.coppe.ufrj.br);

### Abstract

This paper presents a case study in which the Resistivity method was used at a site known as Cidade dos Meninos, in the Municipality of Duque de Caxias, Rio de Janeiro, where the subsoil was contaminated by an organochlorine pesticide called HCH – Hexaclorocyclohexane, and by metabolites. A comparison between preliminary evaluation of this method and the Ground Penetrating Radar (GPR) has been presented elsewhere (Grazinoli et al., 1999). The contamination occurred by the disposal of a great quantity of HCH directly above the soil, without any protection. The Resistivity survey was carried out in order to help the determination of the site stratigraphy, and the detection of contamination processes that were taking place. Detailed geological and hydrogeological informations, as well as Ground Penetrating Radar (GPR) data were used to help the interpretation (Barreto, 1998; Grazinoli, 1997).

### Introdução

Este trabalho mostra os resultados obtidos em um experimento de campo onde o método da Eletrorresistividade foi aplicado como ferramenta auxiliar em uma investigação geo-ambiental efetuada em uma área denominada Cidade dos Meninos, localizada no Município de Duque de Caxias, Rio de Janeiro. Neste local, uma fábrica instalada em 1950 foi responsável pela contaminação do solo e água subterrânea em uma área de cerca de 20 m<sup>2</sup> – foco de contaminação – por grandes quantidades de HCH (hexaclorociclohexano), popularmente conhecido como BHC ou “pó-de-broca”. Em 1995, em uma tentativa de remediação, através de uma ação conjunta entre o Ministério da Saúde e a Prefeitura de Duque de Caxias, foi efetuada uma mistura entre cal (CaO) e o material superficial contaminado, em presença de água. A mistura foi realizada de forma inadequada, o que levou à contaminação generalizada por triclorobenzeno, produto da reação parcial entre a cal e o HCH, sais inorgânicos, e a não eliminação do HCH do solo, gerando uma mistura muito mais heterogênea que a anterior, aumentando o volume de material contaminado (FEEMA/GTZ, 1997).

### Área de estudo

A área de estudo está localizada na Baixada Fluminense, região compreendida entre o litoral e a

encosta da Serra do Mar, localmente denominada Serra dos Órgãos. A baixada é constituída por restingas e aluviões fluviais, tabuleiros (Gr. Barreiras), e peneplos pré-cambrianos. Comumente, encontram-se cordões arenosos junto ao mar, barrando planícies pantanosas para o interior e, frequentemente, interrompidas por formações rochosas que as apóiam (Antunes, 1978).

Na área, afloram sedimentos fluviais, compreendendo depósitos dispostos em camadas irregulares na forma, extensão e espessura, apresentando-se lenticulares, variando marcadamente em relação à sua constituição granulométrica. Tal variação ocorre em decorrência da variação rápida das condições de deposição. Quanto à composição mineralógica, observa-se uma estreita correlação dos depósitos da baixada com as rochas cristalinas da Serra dos Órgãos (Barreto, 1998).

A geologia da área do foco foi caracterizada a partir de perfis de sondagens, os quais serviram de suporte para a interpretação dos dados obtidos com a Eletrorresistividade, bem como com o Radar de Penetração no Solo (GPR). Estes dados mostram uma alternância entre solo arenoso e argiloso, em intercalações de espessuras irregulares, além da presença de lentes de um tipo de solo dentro de outro, sendo este ambiente típico de depósitos sedimentares de planície fluvial em regime de baixa energia.

### Metodologia

Medidas de Resistividade Elétrica utilizando-se as técnicas da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) – configuração Schlumberger, e do Caminhamento Elétrico (CE) – configuração Wenner, foram efetuadas.

A SEV consiste em uma série de determinações de resistividade aparente efetuadas com o mesmo tipo de arranjo e separação crescente entre os eletrodos de emissão e recepção de corrente elétrica, permitindo a observação dos valores de resistividade aparente, em um ponto fixo, a profundidades cada vez maiores. Já o CE caracteriza-se na obtenção da variação lateral de resistividade a profundidades constantes, fixando-se o espaçamento entre os eletrodos e caminhando-se com os mesmos ao longo de um perfil.



## Prospecção do Contaminante (BHC) através da Eletroresistividade

### Resultados

O mapa de localização da área da antiga fábrica (área de foco) com os levantamentos efetuados com a Eletroresistividade está apresentado na Figura 1.

Algumas seções geo-elétricas representativas estão mostradas nas Figuras seguintes. Todas as seções mostram nitidamente valores decrescentes de resistividade aparente à medida que estas se aproximam do foco de contaminação, ou seja, demonstram um caráter condutivo ao contaminante.

### Conclusões

A análise conjunta dos dados obtidos com a eletroresistividade, se considerados os resultados de sondagens e de GPR, mostra muita coerência, com raros locais onde ocorrem discrepâncias. Essas discrepâncias são compreensíveis, dada a complexidade das camadas do subsolo.

As anomalias condutivas na área do foco de contaminação podem ser devidas à presença da contaminação por triclorobenzeno e subprodutos da reação entre a cal e o pesticida, ocorrida em 1995 como tentativa de remediação.

Com base nos custos e na relativa simplicidade dos levantamentos geofísicos, pode-se concluir que estes possuem um enorme potencial para uso em investigações geo-ambientais, nos primeiros estágios e no monitoramento subsequente.

### Referências

Olhoeft, G. R. 1991 – Mapping Subsurface Organic compounds Noninvasively by their Reactions with Clays. Proc. 4<sup>th</sup> Toxic Substances Hydrology Technical Meeting, Monterey, CA.

Grazinoli, P. L. & da Costa, A. 1999 – Aplicações do GPR – Radar de Penetração no Solo em Geotecnia e Meio Ambiente. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 57 p.

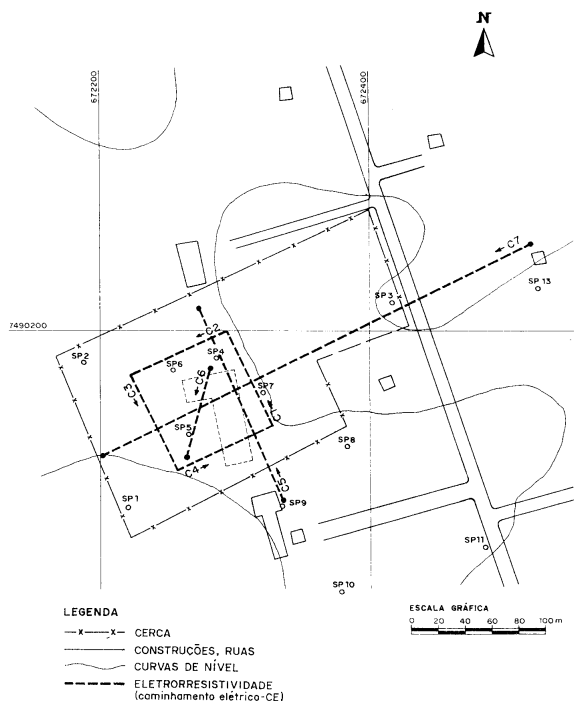


Figura 1 – Mapa de localização da área do foco com os levantamentos elétricos.

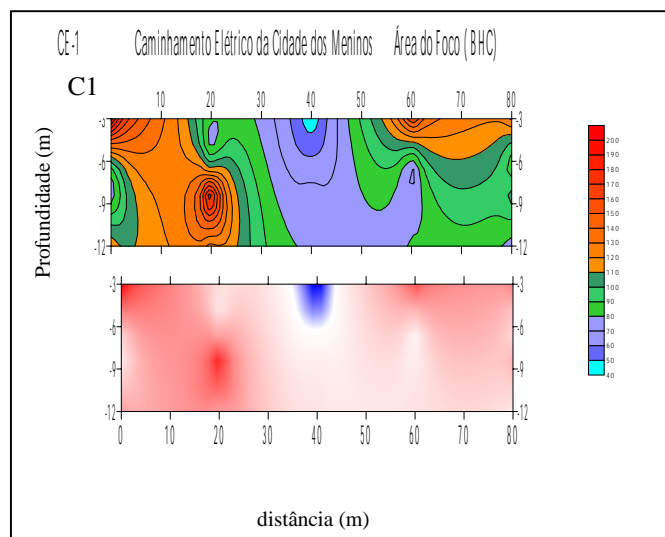


Figura 2 – Seção geo-elétrica C1 (ohm.m) dentro da área de foco

## Prospecção do Contaminante (BHC) através da Eletroresistividade

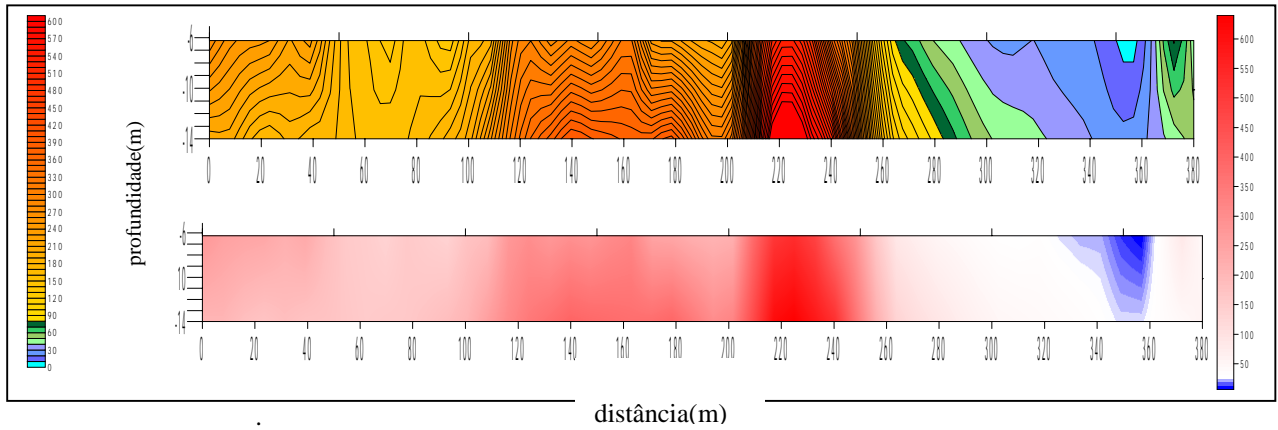


Figura 3 – Seção geo-elétrica C7 (detecção da anomalia condutiva dentro da área de foco)

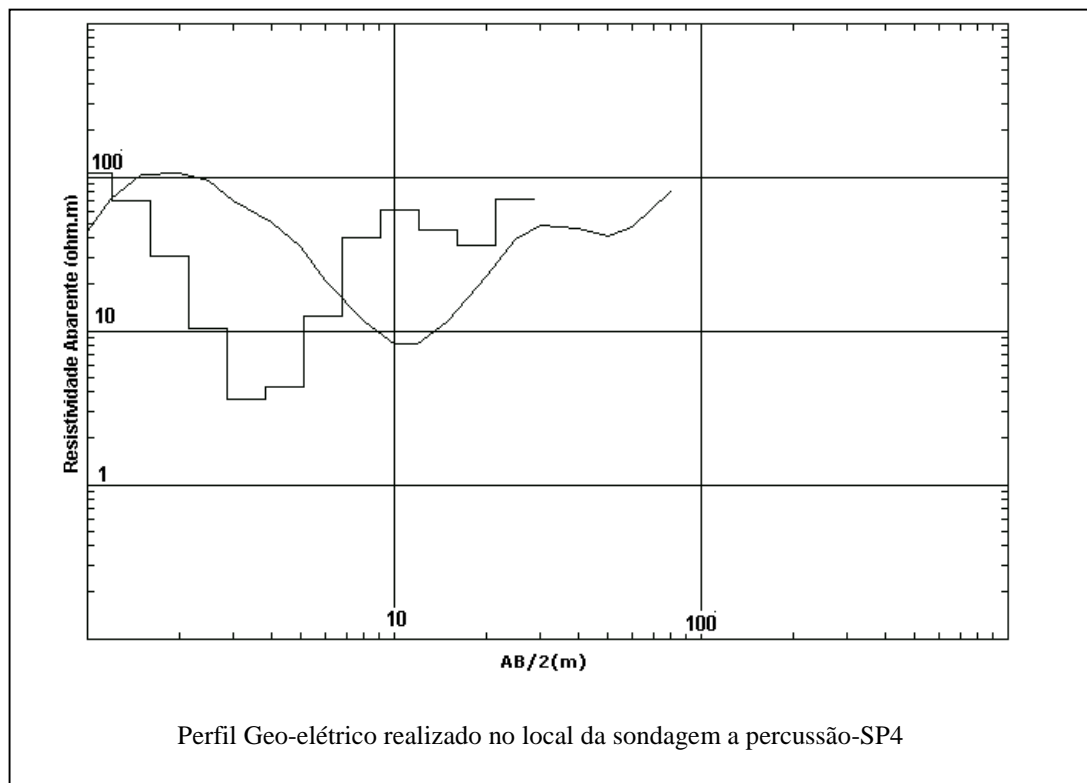


Figura4- Perfil Geo-elétrico dentro da área do foco (resistividades baixas = BHC)



## **Tópicos sobre metodologias passíveis para a determinação do pé do talude continental conforme a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar.**

*Luiz Carlos Torres, Grupamento de Navios Hidroceanográficos, luiz\_torres@hotmail.com*

*Izabel King Jeck, Centro de Hidrografia da Marinha, 311e@chm.mar.mil.br*

*Ana Angélica Ligiero Alberoni, Centro de Hidrografia da Marinha, 311e@chm.mar.mil.br*

*Isa Brehme, Universidade Federal Fluminense, Isa@igeo.uff.br*

### **ABSTRACT**

This work aims at presenting some topics about the methodology employed by Brazil in order to determine the foot of the continental slope and another one that would be developed from stratigraphical studies for the same intention in accordance to United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS). Just to exemplify, the method was applied in the Brazilian Southern Margin. The Brazilian's methodology was developed as established on 76 article, line b, UNCLOS: "...the foot of continental slope (FCS) is the point of the maximum change in gradient in its base". In the same area were carried out data from core samples and their results may be considered as an alternative method to FCS determination, in terms of: "In the absence of evidence in contrary, ...", as establishes the same convention. When both results were plotted, it could be noticed that Brazilian's methodological results presents a reasonable coherence and consistence, and even, may not be considered "aggressive" in terms of territorial demands.

### **Introdução**

A Convenção das Nações Unidas Sobre o Direito do Mar (CNUDM) define no parágrafo primeiro do seu artigo 76, que a plataforma continental de um Estado Costeiro compreende o leito e o subsolo das áreas submarinas que se estendem além do seu mar territorial, em toda a extensão do prolongamento natural do seu território terrestre, até o bordo exterior da margem continental, ou até uma distância de 200 milhas náuticas das linhas de base a partir das quais se mede o mar territorial, nos casos que o bordo exterior da margem continental não atinja esta distância. O mesmo artigo em seu parágrafo terceiro estabelece que a margem continental compreende o prolongamento submerso da massa terrestre do Estado Costeiro e é constituído pelo leito e subsolo da plataforma, talude e elevação continental. A plataforma continental como definido no parágrafo primeiro, em termos geomorfológicos, corresponde à margem continental do Estado Costeiro: já no parágrafo terceiro, a plataforma citada corresponde exatamente à feição geológica na acepção da palavra. No sentido de minimizar confusão, é cada dia mais freqüente denominar a plataforma continental definida no artigo primeiro como plataforma jurídica (legal shelf). O parágrafo quarto do mesmo artigo, em sua alínea a, preconiza que para fins da Convenção, o Estado Costeiro deve estabelecer o bordo exterior da margem continental (plataforma jurídica), quando esta exceder a distância de 200 milhas náuticas contadas a partir das linhas de base. As definições para a delimitação da plataforma jurídica apresentam o pé do talude continental como o

ponto de referência, segundo o qual é procedido o estabelecimento do bordo exterior da margem continental. A alínea b do mesmo artigo 76 estabelece: "salvo prova em contrário, o pé do talude continental deve ser determinado como o ponto de variação máxima do gradiente na sua base". Dessa forma, considerando a variação do gradiente foi desenvolvida a metodologia do Brasil para a determinação do pé do talude continental.

### **Metodologia**

A margem continental brasileira em virtude da sua extensão, associada ao conjunto de processos ocorridos e que ainda ocorrem na contribuição de sua formação, apresenta elevada complexidade, como pode ser verificado pelos registros perpetuados em sua geomorfologia. A despeito de ser classificada como uma margem do tipo passiva ou atlântica, na qual, segundo a literatura técnica, seria de se esperar uma divisão razoavelmente comportada, individualizando plataforma, talude e elevação continental, a expectativa, via de regra, não é confirmada. Intrusões magmáticas representadas por montes submarinos ou cadeias de montanhas além de platôs marginais, muitas vezes descaracterizam o talude continental. Como consequência imediata, a razão 1/40, média mundial aceita para a inclinação dos taludes continentais, nem sempre pode ser considerada para a margem continental brasileira. No caso específico da margem continental brasileira, verifica-se uma ampla variação em torno deste valor. Algumas vezes a justificativa para ocorrência de índices inferiores ao de referência pode estar associada a elevadas

taxas de sedimentação locais, que em alguns casos podem apresentar alcance regional e como consequência suavizar sobremaneira o fundo oceânico. Em outras ocasiões, valores maiores que os estabelecidos para a referência podem estar associados estruturas fisiográficas tais como escarpamentos, os quais normalmente apresentam elevados valores de inclinação. Essas singularidades entre outras de ordem fisiográfica, aliadas ao fato que a natureza não pode ser integralmente reproduzida por meio de ferramentas matemáticas simplificadoras, contribuem para que a determinação do pé do talude continental como o ponto de maior variação do talude na sua base, nem sempre corresponde a um único ponto de máxima inclinação ao longo de todo o perfil batimétrico compreendendo plataforma continental, talude e elevação continental. A fim de determinar a solução para este complicador, análise da distribuição espacial da inclinação torna-se uma ferramenta fundamental, apresentando a variação da inclinação em mapa (Jeck et al., 1999). O Estado Brasileiro valeu-se de dados geofísicos (batimetria, gravimetria, magnetometria e sísmica) coletados ao longo de toda sua margem continental por dez anos. Sendo empregados quatro navios da Marinha do Brasil (Félix, 1997 e Rangel, 1999).

#### Dados empregados

No período de 05 de outubro a 12 novembro de 1998 o R/V Knorr, de bandeira americana, realizou pesquisas científicas na Margem Continental Sul Brasileira entre os paralelos 25°S e 35°S e o meridiano 40°W e a costa brasileira. O objetivo da pesquisa consistiu em coletar amostras sedimentológicas do leito marinho e amostras da massa líquida a fim de realizar estudos de alta resolução da paleoceanografia da área de pesquisa. O interesse nas amostras sedimentológicas visava principalmente fornecer registros que permitissem a reprodução do ambiente marinho pretérito. Assim efetuaram-se 36 estações oceanográficas nas quais foram coletadas amostras geológicas por meio da aplicação de pelo menos três tipos de testemunhadores, a saber: multicorer, gravity corer e giant gravity corer. A área de interesse teve a sua geomorfologia determinada por meio da varredura de um ecobatímetro multifeixe fabricado pela Seabeam que produzia em tempo real o mapa batimétrico da área de estudo. As informações em sub-superfície eram determinadas por meio do emprego de um ecobatímetro (Line Scan Recorder Raytheon) que operava na

frequência de 3,5 khz. Para atender os objetivos da pesquisa, procurava-se coletar amostras em locais com gradientes batimétricos reduzidos e baixa energia.

#### Análise dos testemunhos

Os testemunhos obtidos antes de serem abertos, eram submetidos à análise do equipamento Multi sensor Core Logger, fabricado pela Geo Tek. Com uma velocidade constante em relação a um sensor fixo, o testemunho era deslocado, sendo medidos os seguintes parâmetros: velocidade das ondas p, susceptibilidade magnética e atenuação gamma.

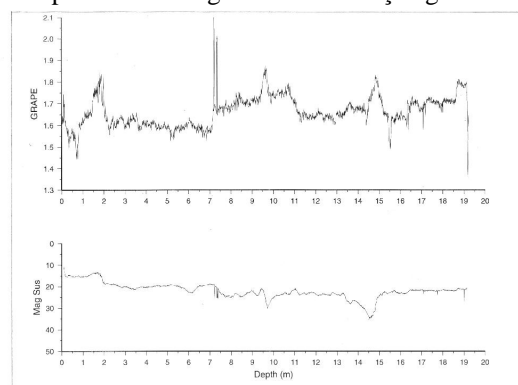


Figura 1 – Medições das características físicas dos testemunhos pelo Geo Tek. A curva superior corresponde as medições de atenuação gama e a inferior as de susceptibilidade magnética, ambas medidas ao longo do comprimento do testemunho.

A figura anterior mostra a análise dos resultados de um dos testemunhos plotados na área representada na figura 2. Como a sedimentação pelágica se caracteriza por apresentar partículas de reduzido diâmetro, espera-se um comportamento “retilíneo” paralelo ao eixo da abscissa, só se apresentando picos em regiões preenchidas por partículas com diâmetros maiores, provavelmente relacionadas a material proveniente do continente, que redundaria em menor “resistência” à atenuação gamma. Sedimentos pelágicos, compostos principalmente por lamas de origem silicosa ou carbonática apresentam baixa susceptibilidade magnética, quando expostas à ação do campo magnético. Dessa forma, valores elevados de susceptibilidade deverão estar associados a sedimentos de origem continental com algumas características ferro-magnéticas. Como é de conhecimento usual, as correntes de turbidez transportam sedimentos por grandes distâncias, depositando-os, muitas vezes, em locais muito afastado da área fonte. Pelo menos nesta área de estudo, parece bastante razoável inferir que uma parcela apreciável dos sedimentos

responsáveis pelos “picos” verificados nos gráficos representativos da atenuação gamma e da susceptibilidade magnética sejam provenientes da região de talude continental da área de estudo, visto a instabilidade do seu talude em função das variações acentuadas de inclinação. A tabela 1 lista as coordenadas dos seis testemunhos plotados na figura 2.

Tabela I - Localização dos testemunhos

Teste munho	Lat WGS-84	Long. WGS-84	Prof. (m)
1	29°47,3623'S	043°55,4225'W	3894
2	27°05,9549'S	045°15,3791'W	3468
3	28°28,9231'S	046°08,3790'W	3368
4	28°48,1004'S	044°26,5461'W	3705
5	29°32,1031'S	043°20,1590'W	4001
6	28°34,6350'S	045°13,8707'W	3355

A análise dos seis testemunhos, coletados em profundidades que variaram de 3355m a 4001m, assinalados na figura 2, registrou a presença de episódios próprios de ocorrerem em ambiente de talude continental ou pelo menos indubitavelmente a ele associados. A interpretação dos resultados da análise dos testemunhos, bem como estudos aprofundados da sua estratigrafia podem dar suporte para o desenvolvimento de uma possível metodologia para determinação do PTC, segundo a interpretação de salvo prova em contrário (uma outra forma para determinar o PTC que não por meio da determinação máxima do gradiente na sua base), como previsto na UNCLOS.

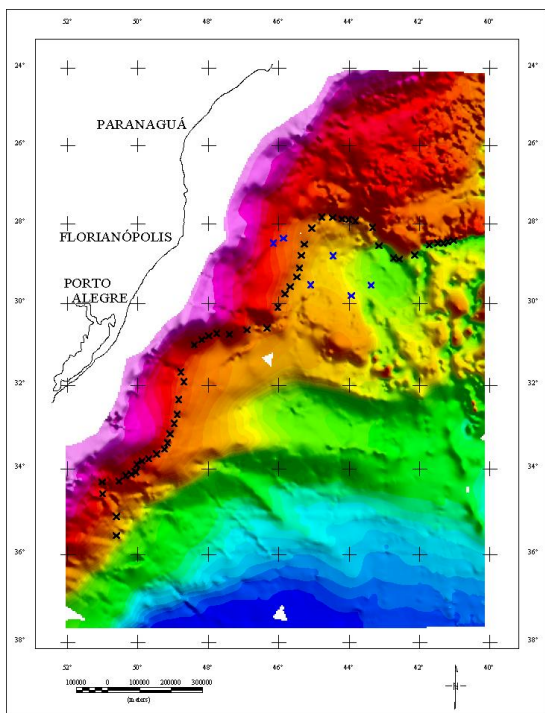


Figura 2 – Mapa Batimétrico da Margem Continental Sul Brasileira. Os “x” em preto, correspondem aos pontos de PTC, preliminares, determinados pelo Brasil. Os “x”, em azul, refere-se aos testemunhos coletados.

### Conclusões

A comparação de metodologias, por si só, já predispõe que os resultados obtidos a partir da mesma massa de dados apresentarão diferenças. Neste teste, não poderia ser diferente, até porque apesar da área ser a mesma, as massas de dados utilizadas eram bastante distintas. O mérito da comparação entre os resultados da metodologia empregada pelo Brasil com a possível metodologia desenvolvida por meio das características físicas e estratigráficas de amostras, corresponde ao fato que os resultados, pelo menos para esta região, apresentaram razoável coerência e consistência. (Embora os propósitos das coletas sedimentológicas visassem “fugir” dos turbiditos, a análise dos resultados para os testemunhos pode ser visto como um oportuno parâmetro para testar resultados obtidos de acordo com o que preceitua a alínea b) do artigo 76 (determinação do pé do talude continental por meio da variação máxima da inclinação na sua base com o critério de salvo prova em contrário da utilização da variação do gradiente). Pela posição dos testemunhos em relação à “linha” que liga os pontos de PTC determinados com base na variação máxima do gradiente na sua base, é possível verificar a coerência e a consistência apresentada pela metodologia utilizada pelo Estado Brasileiro. Secundariamente, é possível induzir, pelo menos para esta região, que a metodologia brasileira, não deve ser considerada “agressiva” em termos de pretensões territoriais.

### Bibliografia

RANGEL, A. A., 1999. Brasil Além das 200 Milhas náuticas. Congresso Brasileiro de Cartografia, Recife. Anais, Sociedade Brasileira de Cartografia.

FELIX, L. A., 1997. Planejamento Cartográfico e Linhas de Base adotados para o Levantamento da Plataforma Continental brasileira. Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro. Anais. Sociedade Brasileira de Cartografia

JECK, I. K. , ALBERONI, A. A. L. e TORRES, L. T. , 1999. Relatório preliminar de processamento e interpretação dos dados batimétricos para a determinação do pé do talude

continental e da isóbata de 2500m na margem leste brasileira – Comissão LEPLAC XII. Rio de Janeiro, DHN (**Relatório Interno**), 41p.

TORRES, L. C., 1998. Cruzeiro 159-5 R/V Knorr - Margem Continental Sul Brasileira Período de 05 outubro a 12 de novembro de 1998. Rio de Janeiro, DHN (**Relatório Interno**), 67p.

UNCLOS - United Nations Convention on the Law of the Sea, 1982. United Nations, New York, United States of America, 294p.





## Utilização integrada de métodos elétricos e do GPR na análise ambiental do Aterro Sanitário de Jundiaí – SP

*João Carlos Dourado, IGCE-Unesp, [jdourado@rc.unesp.br](mailto:jdourado@rc.unesp.br)*

*Walter Malagutti Filho, IGCE-Unesp, [malaguti@rc.unesp.br](mailto:malaguti@rc.unesp.br)*

*Antonio Celso de Oliveira Braga, IGCE-Unesp, [acobraga@rc.unesp.br](mailto:acobraga@rc.unesp.br)*

*José Cláudio Rodrigues Lourenço Júnior, graduando em Geologia, IGCE-Unesp*

### Abstract

This paper reports the results of a geophysical research in the waste disposal located at Jundiaí-SP. This site is typified by waste cells, which have significant quantities of material above the water table. The main objectives were: to characterize the structure of the waste disposal in subsurface, to determine the depth of the water table, the direction of the groundwater flow and to map the contamination plume. Vertical electrical sounding (VES), electrical profiling and ground penetrating radar (GPR) were used in an integrated way. Based on the VES resistivity values, it was possible to identify the contaminants in the sediments and the depth to the water table. The results of the electrical profiling integrated to the GPR allowed for the mapping of conductivity lateral variation, with higher conductivity zones interpreted as more contaminated sites or fractured zones in the bedrock. As a final product, a potentiometric map indicates the preferential groundwater flow.

### Introdução

O emprego de métodos geofísicos no subsídio ao diagnóstico e gestão de impactos ambientais, ocasionados em áreas de disposição de resíduos, constitui-se num campo de estudos que se encontra em franco desenvolvimento, mas carece ainda de acúmulo de experiência e normalização metodológica.

Quando utilizados em estudos ambientais e particularmente para o mapeamento e monitoramento de áreas de disposição de rejeitos urbanos e industriais, os métodos geofísicos proporcionam uma amostragem do material, em subsuperfície, por meio do emprego de técnicas não danosas e que complementam as eventuais informações pontuais de testemunhos de furos de sondagens ou de amostras de poços de água subterrânea, necessários em empreendimentos dessa natureza.

Dessa forma, a finalidade principal deste trabalho foi a de fazer uma avaliação do aterro sanitário da

cidade de Jundiaí – SP, através dos seguintes produtos:

- determinação da espessura do material disposto no aterro;
- determinação da profundidade do lençol freático e elaboração de um mapa potenciométrico das águas subterrâneas;
- identificação da eventual pluma de contaminantes;
- avaliação da resposta dos métodos na definição das diferentes camadas presentes e no posicionamento da base do Aterro, bem como a determinação do nível d'água no local;
- integração de resultados dos métodos geofísicos, com informações de sondagens e dados geológicos de superfície;

### Localização e geologia da área do estudo

O aterro sanitário localiza-se no Município de Várzea Paulista, SP e é operado desde 1986 pelo Consórcio Intermunicipal para Aterro Sanitário – CIAS, atualmente, formado pelos municípios de Cajamar, Campo Limpo Paulista, Jarínú, Jundiaí, Louveira, Várzea Paulista e Vinhedo.

A geologia do município da cidade de Jundiaí, segundo Batista et. al.(1986), constitui-se de:

- rochas do Grupo Itapira, composto por domínios de gnaisses, migmatitos estromáticos, xistos, quartzitos, e anfíbolitos;
- filitos do Grupo São Roque;
- rochas intrusivas de composição química-mineralógica diversas também ocorrem na região;
- arenitos conglomeráticos e sedimentos inconsolidados do Subgrupo Itararé.

Na área específica do aterro sanitário o embasamento é constituído de gnaisses, migmatitos estromáticos, xistos, quartzitos, e anfíbolitos. Este conjunto rochoso encontra-se alterado por processos intempéricos e, em parte, lixiviados. Constituem rochas que em porções mais alteradas produzem solos argilosos o que implica em melhores condições para a impermeabilidade do solo, característica importante para dificultar a contaminação do subsolo. Localmente, ocorrem veios de quartzo associados a porções caulínicas, oriundas do processo

## Geofísica no aterro sanitário de Jundiá - SP

evolutivo de alteração do conjunto rochoso. Rochas máficas aparecem no perfil observado ao sul do aterro sanitário. A presença, na área, de planos de fraturamentos, famílias de falhas e a própria xistosidade das rochas, são de extrema importância no escopo desse trabalho, pois constituem planos que possibilitam a percolação e o escoamento de fluidos.

### Ensaio realizado

Os ensaios geofísicos se desenvolveram por toda área do aterro ao longo de cinco linhas. Foram executadas 12 sondagens elétricas verticais (SEV), com espaçamento máximo entre os eletrodos de corrente de 200 metros. Esta técnica foi utilizada com o objetivo de caracterizar a geologia em subsuperfície e determinar a profundidade do nível d'água.

Nas linhas denominadas 1C, 2C, 3C e 4C, foram executados ensaios com a técnica do caminhamento elétrico (CE), com espaçamento entre os dipolos de 20 metros (com exceção da linha 4C, cujo espaçamento foi de 10 metros), tendo sido amostrados quatro níveis teóricos de investigação. O objetivo principal do emprego desta técnica foi o de determinar as variações laterais nas resistividades dos materiais em subsuperfície, que poderiam estar associadas com a presença de chorume.

O levantamento com o radar de penetração no solo (GPR) foi executado ao longo de seis linhas de investigação, denominadas de 1R, 2R, 3R, 4R, 5R e 6R. As linhas 1C e 4R, 4C e 6R e 2C e 5R, são coincidentes. O arranjo empregado nos ensaios GPR foi o *common offset*, tendo sido ainda realizados 2 ensaios com o arranjo CMP, sobre as linhas 1R e 3R, visando amostrar as velocidades do pacote do aterro.

### Análise dos resultados

#### *Sondagem Elétrica Vertical – Modelo Geoelétrico*

Na definição do modelo geoelétrico final, resultante dos dados de campo obtidos, as SEV's foram agrupadas em dois grupos: (1) executadas fora da área de disposição de lixo, e (2) executadas em área de disposição de lixo.

O modelo obtido para as SEV's executadas fora da área de disposição de lixo (SEV – 01, 03, 07, 08, 09 e 10) foi definido nos seguintes estratos geoelétricos, com seus respectivos valores de resistividade:

- Sedimentos superficiais: 42 - 781
- Sedimentos saturados com pouco ou nenhum chorume:

arenosos: 47 - 94

areno-argilosos: 22 - 34

- Sedimentos conglomerados: 235 - 323

- Sedimentos saturados com chorume:

arenosos e/ou areno-argilosos: 6 - 9

sedimentos. Conglomerados: 78 - 99

O modelo para as SEV's executadas na área de disposição de lixo (SEV – 02, 04, 05, 06, 11 e 12) foi definido nos seguintes estratos geoelétricos com seus respectivos valores de resistividade:

- Resíduos e/ou sedimentos superficiais: 15 - 78

- Resíduos e/ou sedimentos arenosos e/ou areno-argilosos:

- saturados com chorume: 2 - 15

- saturados com pouco chorume: 22 - 31

- Resíduos e/ou sedimentos arenosos saturados com pouco ou nenhum chorume: 32 - 61

Em todas as SEV's foi definido, ainda, um estrato geoelétrico denominado de *embasamento cristalino – rocha sã*. Este estrato é associado à presença de rocha granítica, que apresenta baixa porosidade, com praticamente, nenhuma saturação em água, resultando em altos valores de resistividade (536 - 7.101 ohm.m)

#### *Caminhamento Elétrico – CE*

Na interpretação qualitativa das seções de resistividades aparentes, as diferentes anomalias identificadas foram agrupadas em:

*Anomalia tipo 1:* interpretada como provável fraturamento na rocha cristalina associada com a presença de chorume;

*Anomalia tipo 2:* interpretada como provável fraturamento na rocha cristalina; e

*Anomalia tipo 3:* contato entre dois tipos litológicos distintos.

Cabe destacar as anomalias identificadas entre 180 e 220m (provável extensão lateral até 250m) na linha 1C e entre 60 e 70m (provável extensão lateral até 55m e 85m) na linha 4C, as quais apresentaram grande extensão lateral, com a profundidade variando da superfície do terreno até os últimos níveis investigados (FIGURA 1).

Entre 35 e 45m, da linha 4C, identificou-se uma anomalia muito condutora com pequena extensão lateral, ocorrendo a partir do segundo nível de investigação, contrastando com uma cobertura de material com resistividade relativamente alta.

#### *Ground Penetrating Radar (GPR)*

O objetivo da utilização do GPR neste estudo foi o de detectar a presença de eventuais refletores relacionados à estrutura subsuperficial do aterro, e

## Geofísica no aterro sanitário de Jundiá - SP

variações laterais na condutividade elétrica, causadas por concentrações anômalas do chorume.

No caso do aterro em questão, seu projeto construtivo, previu a disposição do lixo na forma de células com espessura média de 5m, separadas entre si por camadas de solo, através do qual o chorume produzido seria conduzido para drenos.

A alta condutividade elétrica dessa pluma atenua muito as ondas eletromagnéticas do radar, não permitindo sua propagação abaixo desse nível, podendo ocasionar “zonas de sombra” nas seções.

De forma geral, para todos os radargramas gerados nessa pesquisa, nos ensaios localizados sobre o aterro, esse modelo prevaleceu, ou seja, nas porções superiores da seção foi registrada uma sequência de refletores paralelos, que se relacionam com diferentes camadas de resíduos e na profundidade próxima a 5 metros observa-se um forte refletor gerado pela percolação do chorume no material, tornando-o bastante condutivo.

A partir dessa profundidade o sinal fica bastante atenuado, não se observando reflexões significativas. Nas seções executadas fora da área do aterro, é observado de forma característica, um refletor contínuo na profundidade em torno de 6 metros, que coincide com o topo do estrato arenoso que pode conter algum chorume, encontrado nas SEVs executadas sobre essas linhas.

Em alguns locais observa-se logo abaixo desse refletor, uma “zona de sombra” ou seja, uma forte atenuação do sinal, relacionado à anomalias condutoras encontradas também no caminhamento elétrico, refletindo um provável fraturamento da rocha com percolação de chorume. Esse fato pode ser observado na seção GPR mostrada na FIGURA 2 na qual ocorre uma “zona de sombra”, abaixo de 6 metros de profundidade, entre as distâncias 200 e 300 metros que coincide aproximadamente com a anomalia condutora observada na seção de caminhamento da linha 1C entre as distâncias 200 a 260 metros.

### Mapa Potenciométrico

Um Mapa Potenciométrico, foi obtido através da determinação da profundidade do lençol freático em cada uma das SEVs realizadas e também aquelas obtidas em algumas seções GPR. Conhecidas a cota de cada SEV e do ponto do GPR utilizado e a profundidade do nível d'água (N.A), determinou-se a cota do lençol freático no ponto. Posteriormente foram

traçadas as isolinhas do N.A, gerando o Mapa Potenciométrico.

Nesse mapa estão determinadas as direções preferenciais do fluxo d'água subterrâneo, indicadas por setas e demarcado um divisor de águas subterrâneo.

De um modo geral, observa-se que o fluxo subterrâneo está condicionado pela topografia do terreno direcionando-se das cotas mais altas para as mais baixas

### Considerações finais

A avaliação dos dados obtidos nos levantamentos geofísicos executados no Aterro Sanitário de Jundiá permite as seguintes conclusões:

a profundidade do lençol freático (NA) está situada entre 0.97 m e 17.31m com o fluxo das águas subterrâneas orientado a partir das cotas altas para as cotas mais baixas, acompanhando aproximadamente a topografia local. A profundidade do substrato rochoso sob a área do aterro varia entre 11.94m a 40.95m.

foram detectadas nas linhas 1C e 4R zonas muito condutoras no caminhamento e zonas de sombra no radar que se relacionam a fraturamentos da rocha, com provável percolação do chorume.

com base nos resultados do modelo geoelétrico da SEV 9 localizada fora da área do aterro, a jusante, não há indicação da presença do chorume naquele local

### Bibliografia

- BATISTA, J.J.; SIMÕES, L.S.A.; OLIVEIRA, M.A.F.; SOUZA FILHO, E.E. – 1986 – Carta Geológica do Estado de São Paulo (1:50.000) – Folha Jundiá. Rio Claro, Convênio SICCT (Pró-Minério) – UNESP, Relatório final, volume I, 136p.
- DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. – 1989 – Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. Geophysical Prospecting, v.37, n.5, pp.531-551.
- WARD, S. H. –1990 – Resistivity and Induced Polarization Methods. Geotechnical and Environmental Geophysics. Series ins Geophysics N. 5. Ed. Stanley H. Ward - Tulsa - Society of Exploration Geophysicists - Vol I – Review and tutorial. - pp 147-185.

## Geofísica no aterro sanitário de Jundiá - SP

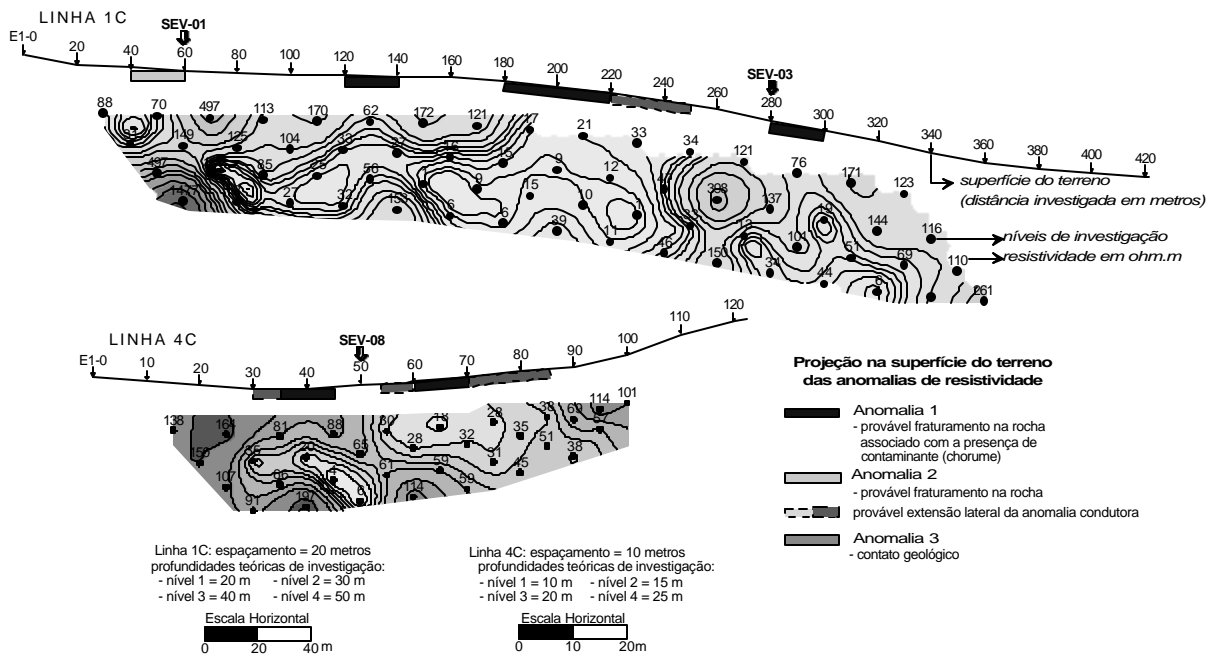


FIGURA 1 – Seções de caminhamento elétrico das linhas 1C e 4C

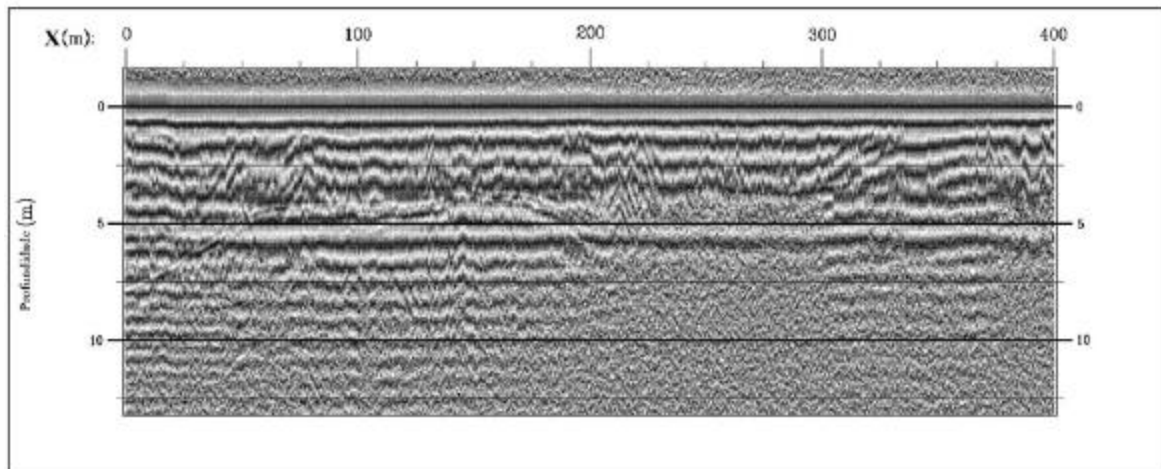


FIGURA 2 – Seção GPR executada na linha 4R



## Valores de Resistividade Elétrica em um Latossolo do Distrito Federal

*Carlos Tadeu Carvalho do Nascimento, Universidade de Brasília, Brazil*

*Renato Figueiro Varella, Universidade do Estado de Mato Grosso, Brazil*

*Augusto César Bittencourt Pires, Universidade de Brasília, Brazil*

*Roberto Ventura Santos, Universidade de Brasília, Brazil*

### Abstract

The electrical resistivity geophysical method is fairly used in geological and groundwater studies, as well as environmental monitoring activities. This method has high sensibility for moisture variations, and in the soils, this kind of variation can be correlated with structural and textural aspects. Therefore, seems to be possible to use electrical resistivity measurements to estimate variations in physical properties of soils. In this work, electrical resistivity measurements were used for evaluate the lateral variation of texture in a latosol. The study area is located at Distrito Federal, in the central region of Brazil.

### Resumo

O método geofísico da resistividade elétrica é largamente utilizado em estudos geológicos, hidrogeológicos e também naqueles relacionados com monitoramento ambiental. Esse método responde rapidamente à variações de umidade, e nos solos, a variação de umidade freqüentemente se relaciona com aspectos de textura e estrutura. Desse modo, existe a possibilidade de se utilizar a resistividade elétrica para diagnosticar, de maneira indireta, variações nas propriedades físicas dos solos. Nesse trabalho utilizou-se a resistividade elétrica como meio de visualizar a variação espacial da textura de um latossolo. O local estudado situa-se no Distrito Federal, região central do Brasil.

### Introdução

Métodos geofísicos são largamente utilizados na prospecção mineral, mapeamento geológico, hidrogeologia e em estudos relativos à conservação ambiental. O método da resistividade elétrica faz uso de correntes contínuas para investigar a subsuperfície. Variações laterais e verticais da condutividade elétrica e da sua inversa, a resistividade, podem ser determinadas como função da corrente aplicada, de um potencial medido e do arranjo de eletrodos utilizado (Telford et al. 1985).

A utilização da resistividade elétrica em estudos pedológicos é pouco difundida, devido principalmente à dificuldade de correlacionar as variações dessa propriedade com aspectos físicos e

químicos do solo. No entanto, alguns aspectos do solo como a textura, a estrutura e o conteúdo de material orgânico, guardam uma relação bastante estreita com o conteúdo de umidade, sendo que a resistividade em solos é bastante sensível à variações no conteúdo de água (Rhoades e Ingvalson, 1971; Robain et al. 1996; Banton et al. 1997). Nesse trabalho procura-se demonstrar esse aspecto por meio da correlação entre medidas de resistividade elétrica e volumes percentuais de argila e silte em uma área de latossolo vermelho escuro.

### Materiais e Métodos

A área de estudo localiza-se na região central do Brasil, no Distrito Federal, entre as cidades de Sobradinho e Planaltina, e é gerenciada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Trata-se de uma área de pastagem, com relevo plano cuja cobertura vegetal compõem-se de gramíneas.

O solo desse local é caracterizado pela cor vermelha escura, pela textura argilosa a argilo-siltosa e pela estrutura granular forte. Sua formação foi controlada pelo processo de latossolização, marcado pela remoção de cálcio, magnésio, sódio e potássio e concentração de ferro e alumínio. A composição mineral do latossolo estudado consiste essencialmente de quartzo, caulinita, gibbsita, goethita e hematita (EMBRAPA, 1978; Cardoso et al. 1998; EMBRAPA, 1999).

No local de estudo, delimitou-se uma área, medindo 10 metros por 50 metros. As medidas de resistividade foram obtidas a cada metro, ao longo das linhas de 50m que delimitam a área. Posteriormente, os dados foram interpolados de modo a se obter um mapa medindo 10 X 50m, bem como uma pseudoseção elétrica transversal à área. As medições de resistividade foram realizadas em agosto de 2000, período que corresponde à época de seca na região central do Brasil.

O resistímetro utilizado opera com um cabo do tipo multieletrodo, que permite a conexão simultânea e independente de 25 eletrodos. Um microcomputador portátil controla o funcionamento do cabo, de forma a simular o deslocamento de 4 eletrodos com o arranjo de Wenner sobre o terreno. Os espaçamentos utilizados variaram de 1 a 6 metros e a corrente empregada em todas as medições foi de 1 miliampere.

## Valores de Resistividade Elétrica em um Latossolo do Distrito Federal

Na pseudoseção considerou-se a profundidade de cada medida como sendo igual à metade do espaçamento entre 2 eletrodos consecutivos (Barker, 1989).

Concluindo-se as medições de resistividade, procedeu-se à amostragem do solo do local. Utilizou-se um trado manual de 4 polegadas de diâmetro para obter 11 amostras, distanciadas 5 metros uma da outra e coletadas ao longo da zona central, em paralelo com os limites maiores da área. Todas as amostras foram retiradas a 1 metro de profundidade e foram utilizadas para determinação da variação textural e do teor de umidade do solo nesse perfil de 50m. Os procedimentos para execução dessas análises são descritos em EMBRAPA (1997).

### Resultados e Discussão

O mapa de resistividade mostra uma anomalia condutiva no lado direito do local de estudo, enquanto o lado esquerdo apresenta maiores valores de resistividade (Figura 1). A pseudoseção mostra que a porção mais resistiva é bastante superficial e que a anomalia condutiva prolonga-se em subsuperfície, posicionando-se sob a porção mais resistiva do terreno. Os valores da resistividade do solo variaram de 4000 Ohm.m, na porção mais condutiva até 16000 Ohm.m, na porção mais resistiva.

As análises granulométricas mostram que a região resistiva coincide com a porção mais arenosa do terreno, ao passo que a anomalia condutiva coincide com a porção onde predominam as frações silte e argila (Figuras 2 e 3).

Observou-se uma relação diretamente proporcional entre a fração argila + silte e o teor de umidade (Figura 4). Esse aspecto pode ser explicado mediante o fato de que num solo de textura mais fina, as dimensões dos poros são mais reduzidas, e portanto a retenção da umidade se dá de forma mais intensa. Com mais umidade, o solo fica menos resistivo eletricamente, causando o surgimento de anomalias condutivas.

Um aspecto que deve ser ressaltado é o fato de que a variação textural no perfil de 50m é relativamente pequena (cerca de 10%), inviabilizando, por exemplo, que as duas porções da área sejam classificadas pedologicamente como unidades distintas. No entanto, as medidas de resistividade tiveram sensibilidade suficiente para detectar essa mudança, sugerindo seu potencial como ferramenta para estudo de solos.

Outra vantagem observada em relação à utilização da geofísica foi a rapidez na aquisição de dados. Em um dia de trabalho foram obtidas 348

medidas de resistividade, as quais possibilitaram a construção do mapa e da pseudoseção.

As análises granulométricas de apenas 11 amostras demandaram praticamente o mesmo tempo, e para as determinações de umidade ainda foram necessárias cerca de 24 horas para secagem das amostras em estufa. Soma-se a isso o tempo necessário para a amostragem do terreno.

Os resultados obtidos sugerem o potencial desse método geofísico como técnica para estudo de solos. Deve ser ressaltado que as medidas de resistividade possibilitaram discriminar zonas mais ou menos úmidas do terreno. Indiretamente essas medidas também possibilitaram discriminar as porções com textura argilosa ou arenosa. Contudo, não foi possível estimar os percentuais de argila, areia e umidade a partir das medidas de resistividade.

Acredita-se que medidas de resistividade possam ser utilizadas para estimar os valores de alguns parâmetros físicos dos solos, em áreas relativamente grandes e em pouco tempo. Mas essas estimativas estariam obrigatoriamente relacionadas aos resultados de análises físicas convencionais, mediante um processo de calibração.

### Conclusões

O método geofísico da resistividade elétrica foi utilizado para delinear variações texturais em um latossolo vermelho escuro. Esse método é bastante sensível às variações de umidade da subsuperfície e, nos solos, esse tipo de variação frequentemente se relaciona com aspectos texturais. As porções com textura mais argilosa, e com maior conteúdo de umidade foram facilmente diferenciadas das porções mais arenosas e mais secas. A variação textural no local estudado foi relativamente pequena, cerca de 10%, mas mesmo assim foi possível individualizar as duas porções do terreno por meio das medidas de resistividade elétrica.

### Referências

- Banton, O.; Seguin, M. K.; Cimon, M. A. 1997. Mapping field scale physical properties of soil with electrical resistivity. *Soil Science Society of America Journal*, 61:1010-1017.
- Barker, R. D. 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54:1031-1037.
- Cardoso, F. B. F.; Martins, E. S.; Carvalho, J. C. 1998. A evolução pedogeoquímica e sua influência nas propriedades físicas dos solos profundamente



## **Valores de Resistividade Elétrica em um Latossolo do Distrito Federal**

intemperizados do Distrito Federal. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11, Brasília, Anais, 1:51-58.

EMBRAPA. 1978. Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Rio de Janeiro, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 455p.

EMBRAPA. 1997. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 212p.

EMBRAPA. 1999. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 1.ed. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 412p.

Rhoades, J. D.; Ingvalson, R. D. 1971. Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. Soil Science Society of America Proceedings, 35:54-60.

Robain, H.; Descloitres, M.; Ritz, M.; Atangana, Q. Y. 1996. A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. Journal of Applied Geophysics, 34:237-253.

Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E.; Keys, D. A. 1985. Applied Geophysics. Cambridge, Cambridge University Press, 860p.

## Valores de Resistividade Elétrica em um Latossolo do Distrito Federal

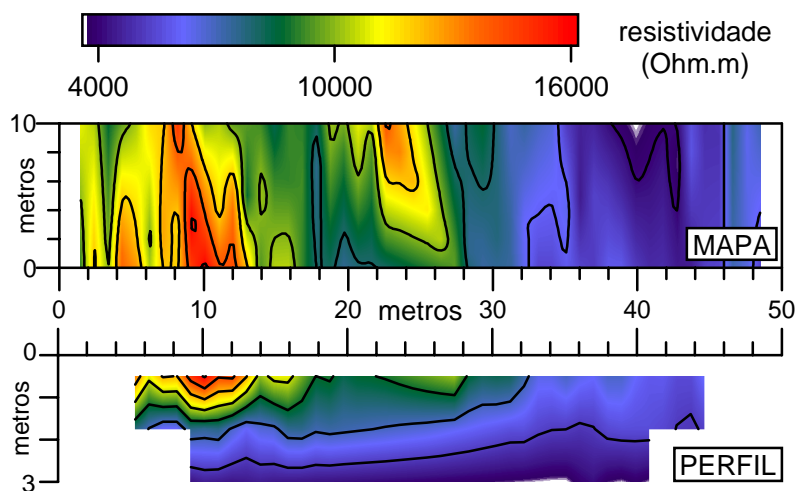


Figura 1 – Mapa e pseudoseção de resistividade elétrica da área de trabalho.

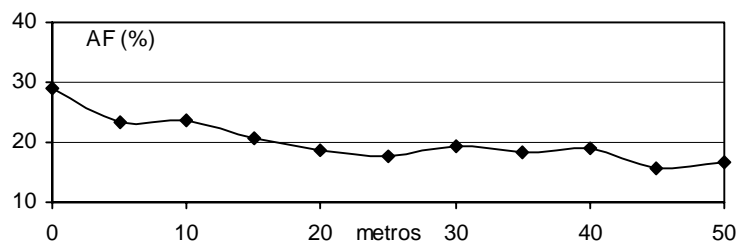


Figura 2 – Variação percentual da fração granulométrica areia fina (0,2 – 0,05mm) na pseudoseção de resistividade.

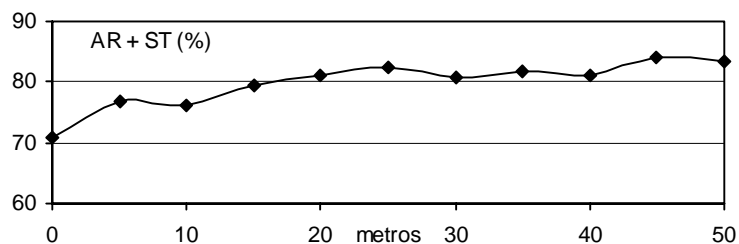


Figura 3 – Variação percentual da fração argila + silte (menor que 0,05mm) na pseudoseção de resistividade.

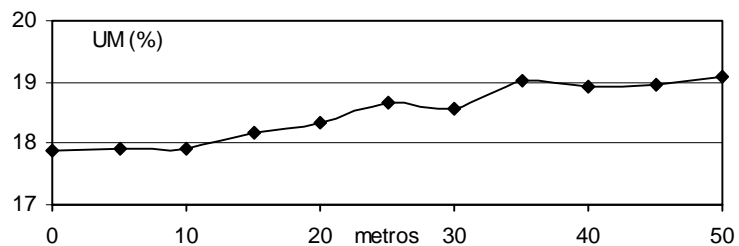


Figura 4 – Variação percentual de umidade na pseudoseção de resistividade.