

# MODELAGEM GEOMÉTRICA 3D E ANÁLISE ESPACIAL DE SISTEMAS CÁRSTICOS COM O USO DE OPENGL E SQL

JOSÉ ANTONIO FERRARI<sup>1</sup>  
ALAIN MANGIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IG Instituto Geológico Av. Miguel Stefano 3900, 04301-903 São Paulo - SP Brasil  
ferrari@igeologico.sp.gov.br

<sup>2</sup>Laboratoire Souterrain du Centre National de Recherche Scientifique - Moulis 09200 - Saint Girons France

**Abstract.** This paper describes a system developed for geometrical modeling and analysis of karst systems. The program calculates the closure of loops in cave surveys by least square method, and provides the means to obtain query derived maps of the underground system. The software integrates OpenGL and Microsoft Jet database engine technologies to produce 3D visualization of cave passages and digital elevation models linked with database. Some examples produced with the system are presented.

**Resumo.** Este trabalho descreve um programa para a modelagem geométrica e análise de sistemas cársticos. O programa utiliza o método dos mínimos quadrados para calcular o fechamento de poligonais obtidas em levantamentos topográficos subterrâneos, e produz mapas a partir de pesquisas à base de dados. As tecnologias OpenGL e Microsoft Jet database engine são integradas para produzir visualizações 3D de cavernas e modelos de elevação digital, conectados a uma base de dados. Alguns exemplos elaborados pelo programa são apresentados.

## 1. Introdução

Pesquisas geocientíficas em terrenos cársticos muitas vezes utilizam informações distribuídas por uma rede intrincada de passagens subterrâneas. Nos estudos da dinâmica e estrutura desta paisagem, a integração dos dados subterrâneos com informações superficiais é conveniente. Ao estudar a geometria das rotas de fluxo subterrâneas, a distribuição de registros paleoclimáticos, ou no desenvolvimento de estudos ambientais, a visualização tridimensional do conjunto da paisagem (superfície e sistema subterrâneo), associada a uma base de dados, amplia o poder de análise do pesquisador.

Este trabalho apresenta uma descrição do sistema SIS (Sistema de Informações Subterrâneas) que integra a biblioteca gráfica *OpenGL* com o gerenciador de base de dados *Microsoft Jet database engine*. O programa calcula o fechamento de poligonais da topografia subterrânea, gerencia informações relativas aos diferentes segmentos da caverna e gera visualizações tridimensionais do sistema subterrâneo e das superfícies a ele associadas.

## 2. Visão geral do programa

O programa foi desenvolvido para a plataforma Windows com a linguagem VisualBasic 5. Foi empregada uma interface do tipo MDI (*multiple-document interface*), que permite ao usuário exibir vários documentos ao mesmo

tempo (cada documento em sua própria janela). Graças a esta interface, o usuário pode trabalhar com diferentes sistemas subterrâneos ou manipular várias informações de um mesmo sistema.

As informações obtidas no levantamento de campo são armazenadas numa tabela da base de dados. Os dados são processados (cálculo do fechamento de poligonais) e o resultado fica armazenado em outra tabela. Após este processamento, saídas gráficas podem ser geradas. As consultas (padrão SQL) que são feitas à base de dados, resultam em relatórios ou saídas gráficas (modelos tridimensionais). Também é possível executar consultas diretamente sobre a saída gráfica, neste caso, ao clicar o mouse sobre o objeto visualizado, sua identificação será exibida sobre o gráfico e o registro associado será iluminado numa tabela. A figura 1 ilustra o funcionamento geral do sistema.

## 3. Entrada de dados e estrutura da informação

A modelagem geométrica da caverna é obtida a partir dos dados da topografia subterrânea. O levantamento topográfico resulta num conjunto de visadas (linhas) que unem bases topográficas (pontos). Os atributos intrínsecos de uma visada são: base de partida, base de chegada, comprimento, direção e inclinação. Estas informações são inseridas no banco de dados através de planilhas. As medidas de largura e altura dos condutos,

obtidas em cada base, também são registradas, elas são utilizadas para dar volume ao sistema subterrâneo. Trabalhos sobre levantamentos topográficos em cavernas [1,2] discutem a metodologia de campo e a elaboração de plantas e perfis com detalhes de feições subterrâneas, este assunto não será abordado neste trabalho.

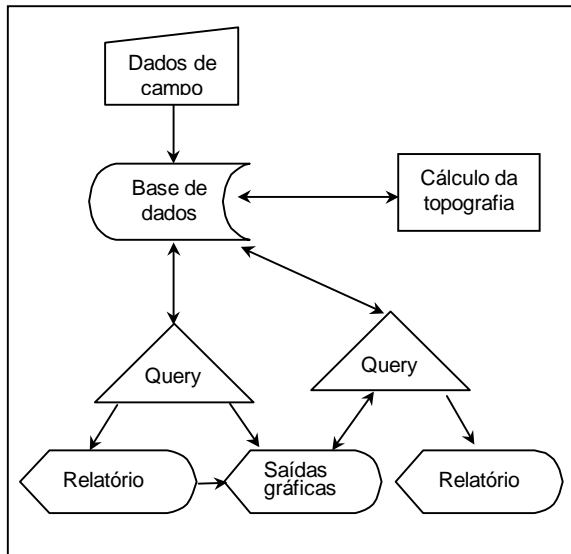


Figura 1. Visão geral do programa.

A evolução de uma caverna pode ser complexa, resultando em sistemas intrincados que apresentam vários andares ou níveis de desenvolvimento [3]. O SIS permite que os dados do mapeamento sejam distribuídos em diferentes setores, possibilitando o agrupamento de visadas em função de uma característica de interesse do pesquisador. A tabela para entrada de dados topográficos é a tabela padrão do programa. Nela estão armazenadas todas as visadas de todos os setores definidos pelo usuário. Para facilitar a manipulação dos dados, foram criados artifícios para a edição dos setores em tabelas independentes (uma janela para cada setor). O SIS possui todas as interfaces para a manipulação da base de dados.

Cada visada representa um segmento do sistema subterrâneo e seu comprimento depende da sinuosidade das passagens ou do interesse do topógrafo em destacar algum aspecto. O modelo relacional de banco de dados permite que além da tabela padrão (tabela de dados topográficos), várias tabelas de informação sejam associadas aos segmentos mapeados. A visada (base de partida e base de chegada) é a chave de ligação de um segmento da caverna com diferentes tabelas de informação. Os campos das tabelas podem ser definidos em função das necessidades do usuário, no entanto, os campos que estabelecem a ligação com o mapa (visada) são criados automaticamente e não podem ser excluídos.

As tabelas podem ser estruturadas com campos convencionais (numéricos, texto, booleanos e memo) e com campos (texto) que contêm o endereço de arquivos de imagem (bmp, jpg, gif, wmf ou emf) ou de texto (txt). Ao criar um campo que armazena o endereço de um arquivo, o usuário também define qual o aplicativo que será acionado para o abrir. O programa possui módulos nativos para exibir as imagens e o arquivo texto, mas é possível indicar um aplicativo externo para exibir os documentos. Neste caso, outros formatos de arquivo também podem ser escolhidos. Esta característica multimídia do sistema permite a interação de imagens, textos ou sons ao analisar segmentos da caverna. Por exemplo, pode-se visualizar fotos dos estratos e o croqui de um depósito sedimentar.

Esta capacidade do programa é útil em pesquisas que exploram registros sedimentares distribuídos ao longo de quilômetros de passagens subterrâneas, como os já executados no carste da Chapada Diamantina [4, 5], ou em estudos multidisciplinares voltados para o manejo turístico destes monumentos geológicos.

#### 4. Processamento dos dados topográficos

Em levantamentos topográficos, um problema bem conhecido é o do fechamento de poligonais. As imprecisões das medidas de campo levam a um erro durante o fechamento, impedindo a coincidência entre o ponto de partida e o ponto de chegada.

Quando se trabalha com apenas uma poligonal, não é difícil distribuir manualmente o erro entre as visadas. A correção manual torna-se impossível quando trabalhamos com sistemas complexos, onde um grande número de poligonais estão conectadas [6, 7]. Para eliminar a subjetividade na distribuição dos erros, utiliza-se o método dos mínimos quadrados, que pressupõe que os erros de medida são aleatórios e seguem uma distribuição gaussiana. Este método é adotado pelo SIS e segue o algoritmo de Taillard [7].

Durante o processamento, é gerada uma matriz de descrição do sistema, e são obtidas as componentes cartesianas das bases topográficas, ponderando os erros padrão que foram definidos para os instrumentos de medição (bússola, clinômetro e trena). As coordenadas x, y e z de uma base de origem (definida pelo usuário) são utilizadas para referenciar todo o sistema. Ao término do processo, as coordenadas de todas as bases topográficas são armazenadas numa tabela. Estas coordenadas são utilizadas na modelagem geométrica do sistema subterrâneo.

## 5. Modelagem geométrica das passagens subterrâneas e superfícies associadas

A visualização da modelagem geométrica das passagens subterrâneas e superfícies associadas é obtida com o uso do sistema gráfico OpenGL. Trata-se de um conjunto de funções gráficas 3D, desenvolvidas nos anos 80 para as estações de trabalho da Silicon Graphics. Tornou-se disponível para usuários de computadores pessoais quando a Microsoft incluiu uma implementação da API para o Windows NT 4.0 e, posteriormente para o Windows 95/98. Em essência, OpenGL renderiza polígonos e fornece algumas ferramentas para rotacionar, escalar e movimentar os objetos gráficos, no entanto, todo o trabalho para definir iluminação, criar e carregar modelos, desenvolver códigos para exibição e otimização depende do programador.

Para visualizar as passagens subterrâneas, as coordenadas cartesianas tridimensionais obtidas no processamento dos dados topográficos são transformadas para o plano 2D com o auxílio de uma projeção ortográfica. Os objetos 3D são construídos agrupando-se primitivas como linhas e polígonos. O volume do sistema é obtido considerando as medidas de largura e altura dos condutos. Neste caso, polígonos planares são utilizados para compor as laterais, o teto e o assoalho das passagens. As seções dos condutos são definidas nas bases topográficas e são representadas por retângulos. A direção da seção em cada base é obtida considerando a bissetriz do ângulo entre duas visadas. A figura 2 apresenta o método utilizado para dar volume ao sistema.

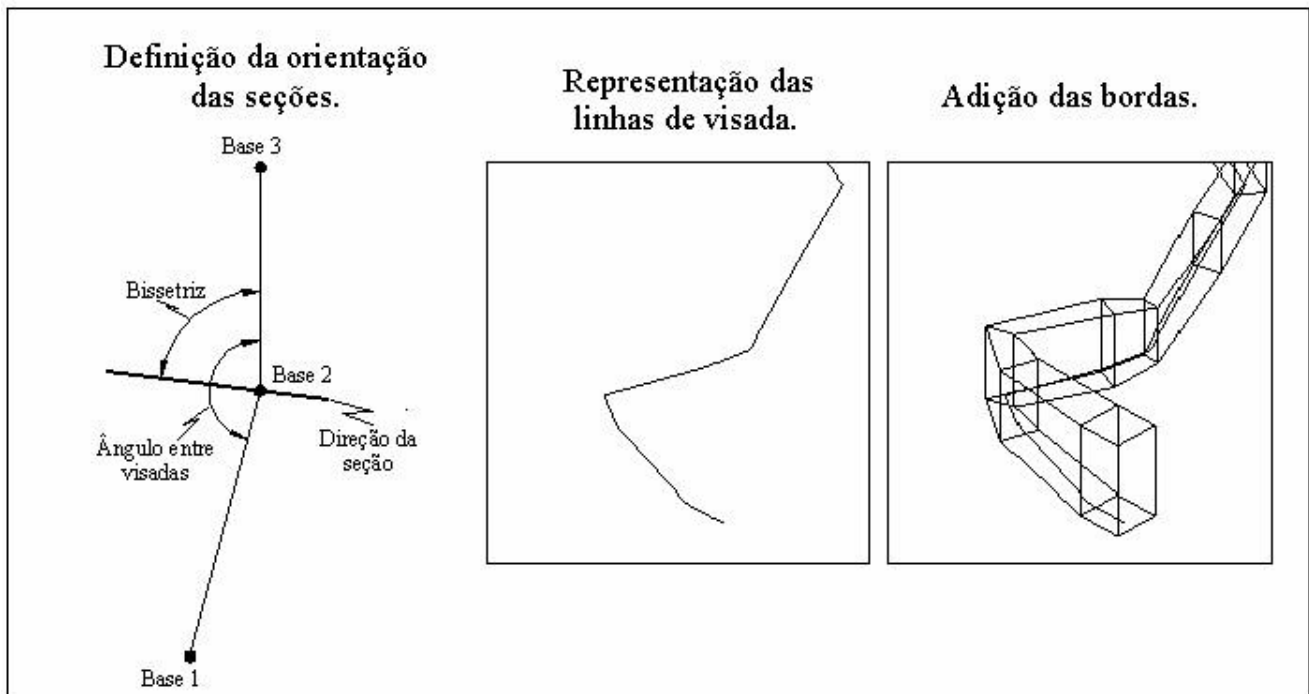


Figura 2. Modelagem das passagens subterrâneas

Superfícies geradas no programa Surfer [8] podem ser importadas e exibidas em conjunto com o sistema subterrâneo. A representação das superfícies é feita utilizando triângulos ou retângulos, cujos vértices são definidos pelas coordenadas dos nós do *grid* importado. A cor do polígono representa a média dos valores de *z* dos vértices.

Para iluminar e sombrear objetos 3D, o sistema gráfico necessita do vetor normal (vetor perpendicular ao

plano) de cada polígono desenhado. A representação da superfície com o uso de retângulos não permite que todas as possibilidades de renderização sejam utilizadas, pois raramente estes polígonos possuem um único plano no sistema cartesiano 3D. Neste caso, o objeto deve ser exibido em estrutura de arame. A representação triangular não apresenta este tipo de problema, pois os triângulos sempre são planares.

## 6. Manipulação das saídas gráficas

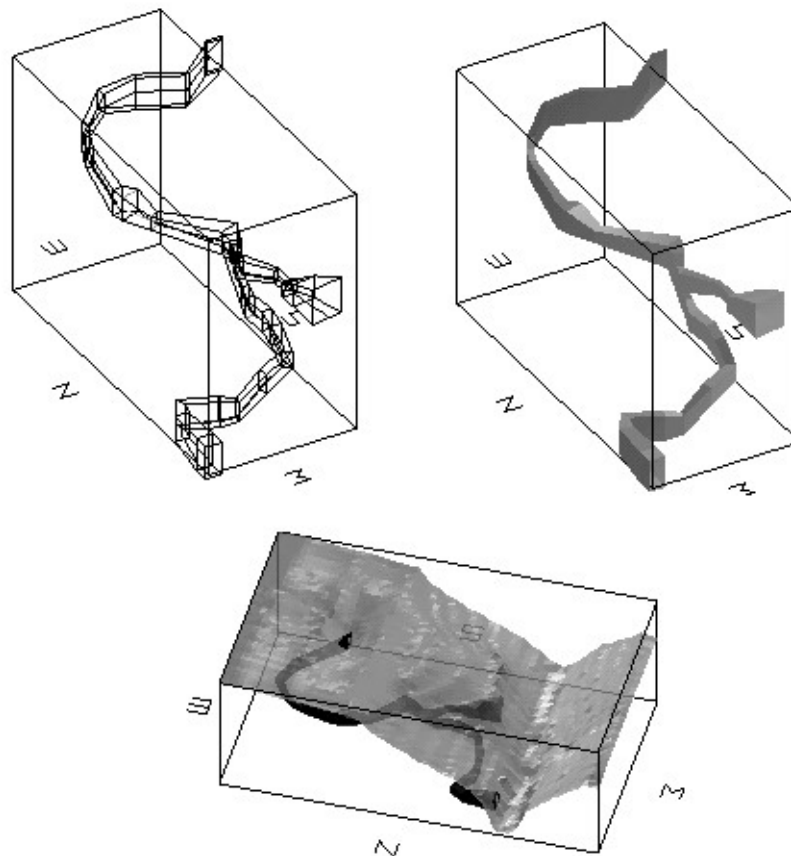
Foram desenvolvidas interfaces para explorar os recursos oferecidos pela API OpenGL. Ao gerar uma saída gráfica, alguns dos atributos das cenas são válidos para todos os objetos visualizados, no entanto, existem atributos que podem ser manipulados individualmente para cada objeto.

A posição do observador pode ser modificada interativamente. Uma interface com posições pré definidas e barras de rolagem permitem que os objetos sejam observados de qualquer ângulo. A cena pode ser rotacionada automaticamente nos eixos x, y ou z, com intervalos angulares variados.

As saídas gráficas geradas pelo programa contam com 3 pontos de iluminação, localizados na superfície de uma esfera imaginária que circunscreve os objetos 3D. Interfaces possibilitam a definição independente dos seus azimutes, inclinações e cores. Cada ponto possui 3 tipos

de luz (ambiente, difusa e especular). Os índices dos componentes RGB de cada tipo podem ser modificados. Estas propriedades são importantes para a composição das cores dos objetos. Neste ambiente gráfico, a cor é definida pela interação entre as propriedades da luz e as propriedades do material que compõem o objeto. No SIS, o usuário também pode alterar as propriedades do material.

As propriedades dos polígonos que compõem os objetos 3D de uma cena podem ser modificadas de forma independente. Numa mesma cena, pode-se observar uma superfície em estrutura de arame e uma caverna solidificada, ou uma superfície sombreada e transparente para permitir a visão do objeto subterrâneo. As paletas de cores associadas a cada objeto 3D também podem ser editadas. A figura 3 apresenta algumas possibilidades de exibição.



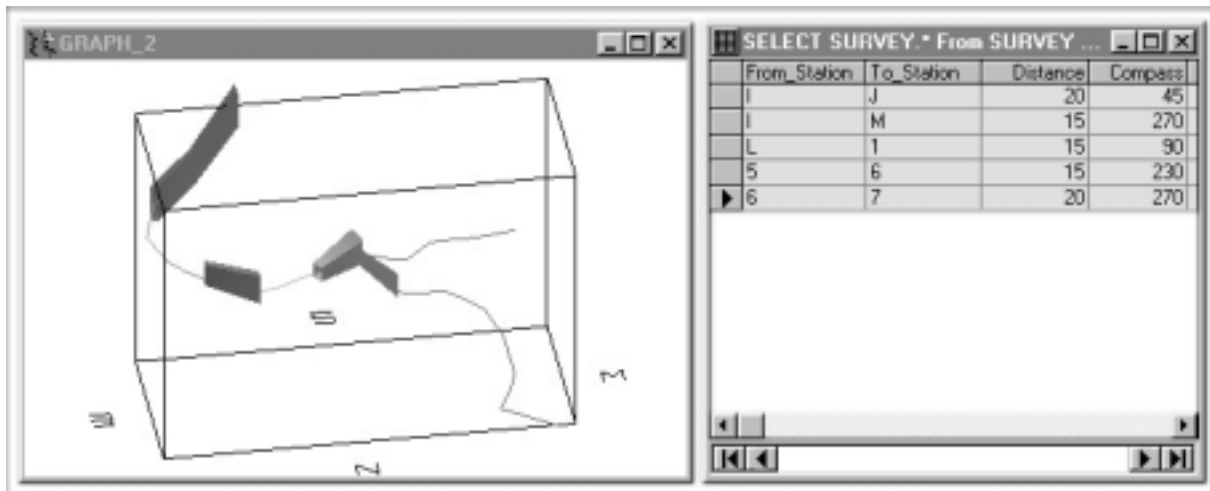
**Figura 3.** Sistema subterrâneo em estrutura de arame, com os polígonos preenchidos e sob uma superfície sombreada e transparente.

## 7. Análise espacial

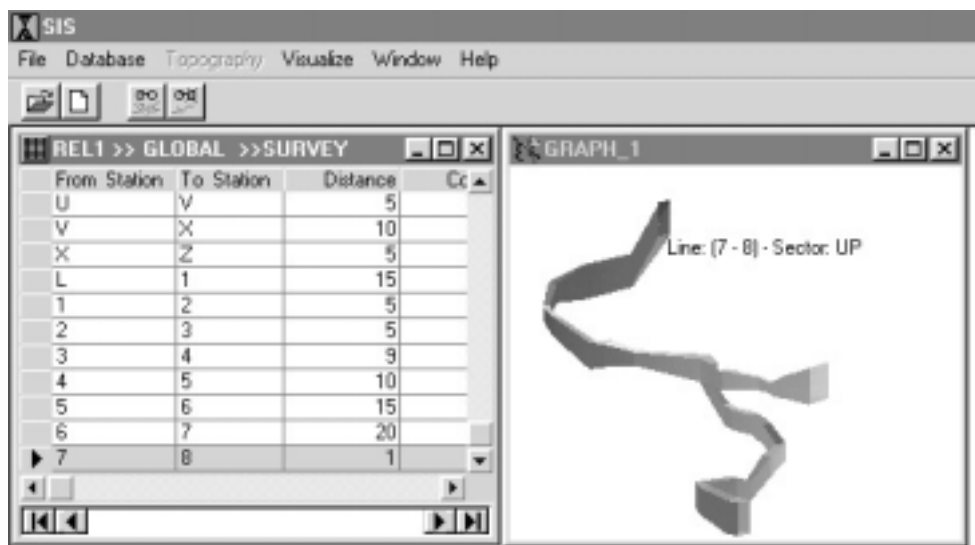
A interface MDI utilizada no SIS permite que um mesmo sistema subterrâneo seja observado simultaneamente em diferentes janelas, com atributos e pontos de vista diferenciados. Esta característica propicia ao pesquisador uma ferramenta de análise por inspeção visual da caverna e das superfícies associadas.

Aliada à interface MDI, a base de dados possibilita a realização de pesquisas a partir de critérios definidos pelo usuário. Um editor foi desenvolvido para a elaboração de

questões estruturadas. Pode-se perguntar ao sistema onde existem depósitos fossilíferos, ou onde existem colônias de morcegos no interior da caverna. Também é possível realizar pesquisas, cruzando várias informações. Existem muitas possibilidades de análise, entretanto, dependentes da estrutura da base de dados desenvolvida para o projeto. Ao executar uma pesquisa, a resposta vem em forma de tabela; o programa permite sua conversão em um mapa, destacando os segmentos que representam a resposta. Na figura 4, podemos observar um mapa resultante de uma pesquisa.



**Figura 4.** Os segmentos da caverna que apresentam volume, correspondem ao resultado da pesquisa à base de dados (segmentos com comprimento  $\geq 15$  metros). As linhas mostram as passagens da caverna que não respondem à indagação.



**Figura 5.** Ao clicar sobre mapa sobre a caverna, o setor é identificado na saída gráfica e na tabela. Caso a tabela contenha textos ou figuras associadas ao segmento, estes documentos podem ser exibidos.

É possível consultar informações relacionadas a determinado segmento da caverna, clicando sobre o objeto 3D. Foram desenvolvidas subrotinas para identificar cada primitiva (polígono ou linha) associada aos objetos 3D. Ao clicar sobre o mapa, o sistema OpenGL retorna o identificador (o número) da primitiva. Um arquivo de acesso aleatório, previamente criado, contém a chave de ligação do identificador com a base de dados. O arquivo é lido, e a partir daí o registro da base de dados é automaticamente posicionado, colocando a disposição do usuário as informações relativas ao segmento selecionado. Ao clicar sobre uma superfície, o valor médio da célula selecionada é encontrado no arquivo de acesso aleatório e exibido na tela. A figura 5 apresenta um exemplo de consulta sobre o mapa.

## 8. Exemplos de aplicação

As aplicações com o uso do SIS estão em seu estágio inicial. O programa vem sendo utilizado em estudos geocientíficos para compreender a evolução e dinâmica de paisagens cársticas.

Na figura 6, podemos observar resultados parciais da representação do sistema Coumo d'Hyouenedo, localizado nos Pirineus franceses. Este sistema possui 94.843 metros de desenvolvimento, e foi mapeado por exploradores franceses. O mapa apresentado resulta de uma pesquisa [9] que vem sendo desenvolvida pelo CNRS.

Um exemplo com a exibição de linhas de visada e superfície do terreno pode ser observado na figura 7. Este mapeamento [10] foi realizado no carste de Itaetê - BA, região da Chapada Diamantina. A superfície do terreno foi obtida a partir de levantamento topográfico, utilizando bússola, trena e clinômetro.

A figura 8 apresenta a distribuição das visadas do sistema Areias (Iporanga -SP). O mapa foi elaborado com o objetivo de compreender a gênese das cavernas [11]. Na mesma figura, podemos observar o modelo digital do terreno da superfície cárstica da região do sistema Areias [12]. O modelo foi elaborado a partir da digitalização de cartas topográficas na escala 1:10.000.

## 9. Considerações finais e perspectivas

Os resultados obtidos mostram que a combinação da API OpenGL com o gerenciador de base de dados *Microsoft Jet database engine*, dentro de uma interface tipo MDI, possibilita o desenvolvimento de sistemas para visualização científica e análise espacial de informações em sistemas subterrâneos.

O programa continua em evolução. Serão desenvolvidos módulos para a análise estatística das informações, módulos para a visualização 3D de

estruturas geológicas associadas ao sistema subterrâneo e o aperfeiçoamento da modelagem geométrica das passagens, visando uma melhor representação da complexidade morfológica dos condutos.

O sistema pode ser adquirido no site [http://www.geocities.com/karst\\_map](http://www.geocities.com/karst_map)

Este projeto foi desenvolvido com o apoio da FAPESP Proc.No 97/6329-0.

Agradeço as valiosas recomendações dos revisores.

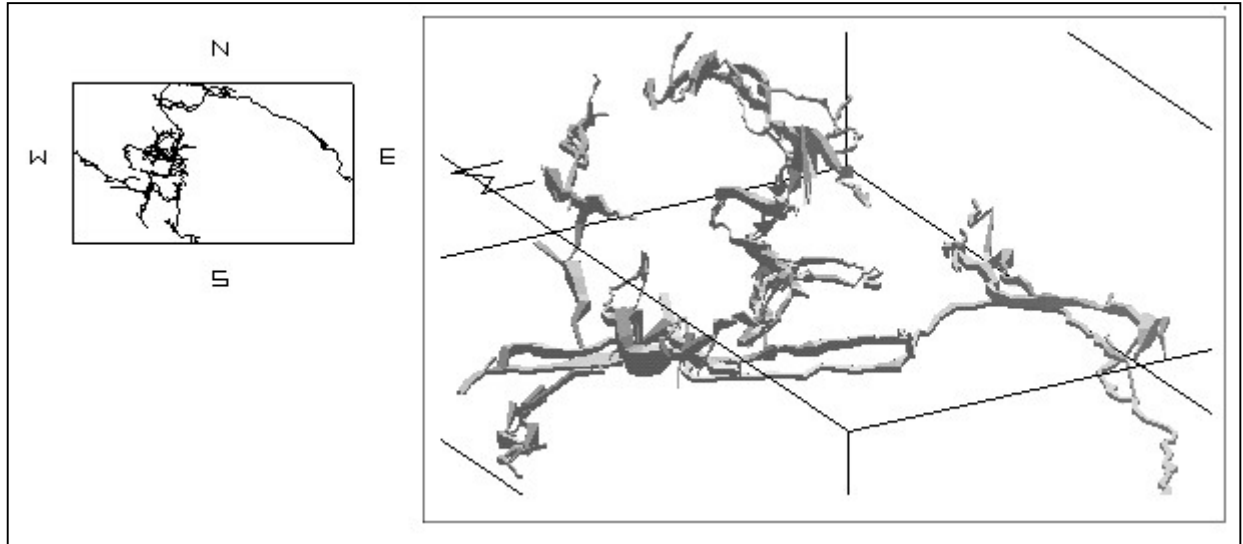
## Referências

- [1] Grossenbacher, Y. (1991) Topographie souterraine. Cours Société Suisse de Spéléologie, 4, 105 p.
- [2] Thomson, K.C & Taylor, R.L (1991) The Art of Cave Mapping. Journal of the Missouri Speleological Survey . Vol. 31 (1-4): 182 p.
- [3] Palmer, A. N. (1981) Cave levels and their interpretation. National Speleological Society Bulletin, 49(2): p. 50-66.
- [4] Ferrari, J.A (1992) Interpretação de feições cársticas na região de Iraquara - Bahia. Dissertação de Mestrado IG - UFBA. 93 p.
- [5] Laureano, F.V (1998) O registro sedimentar clástico associado aos sistemas de cavernas Lapa Doce e Torrinhã, Município de Iraquara, Chapada Diamantina (BA). Dissertação de Mestrado, IG-USP. 98 p.
- [6] Schmidt, V. A. & Schelleng, J. H. (1970) The application of the method of least squares to the closing of multiply connected loops in cave or geological surveys. Bulletin of the National Speleological Society, 32(3): 51-58
- [7] Taillard, E. (1991) Un calcul de boucles en topographie souterraine. Actes du 9<sup>o</sup> Congrès National de la Société Suisse de Spéléologie, 1991. p. 245 – 247.
- [8] Golden Software (1993) Surfer, Surface Map System, Golden Colorado. <http://www.goldensoftware.com/>
- [9] Viorel, H.(2000) L'influence de la geologie sur le karst. Etude comparative entre la zone d'Arbas (Haute-Garonne, France) et la zone Obarsia Closani - Piatra Mare (Mehedinti - Roumanie). Tese de doutoramento em desenvolvimento. Laboratoire Souterrain du Centre National de Recherche Scientifique
- [10] Pereira, R.G.F..A. (1998) .Caracterização geomorfológica e geoespeleológica do carste da bacia do rio Una, Borda leste da Chapada Diamantina, BA. Dissertação de mestrado, IG- USP, 95 p.
- [11] Souza, M.A. e Karmann, I. (1996) Caracterização morfológica e aspectos genéticos do sistema de cavernas

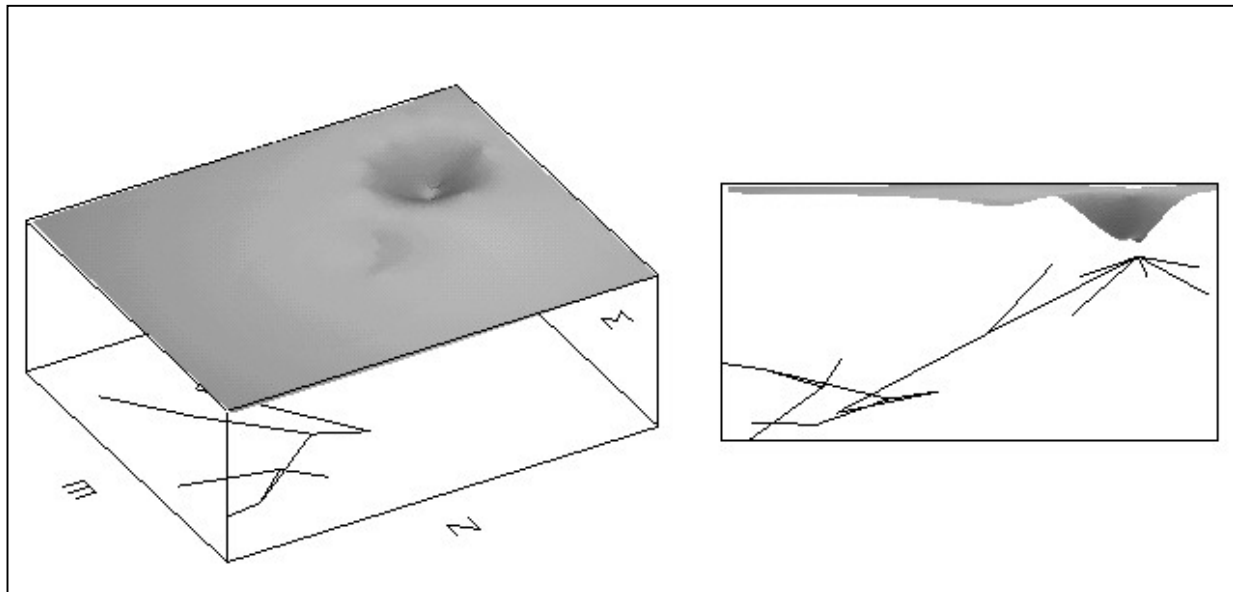
areias, Iporanga, SP. XXXIX Cong. Bras. de Geologia, Anais, vol. 4 pp 586-590.

[12] Genthner, C. (2000) Aplicação do traçador fluorescente Rhodamina-WT no estudo geohidrológico do

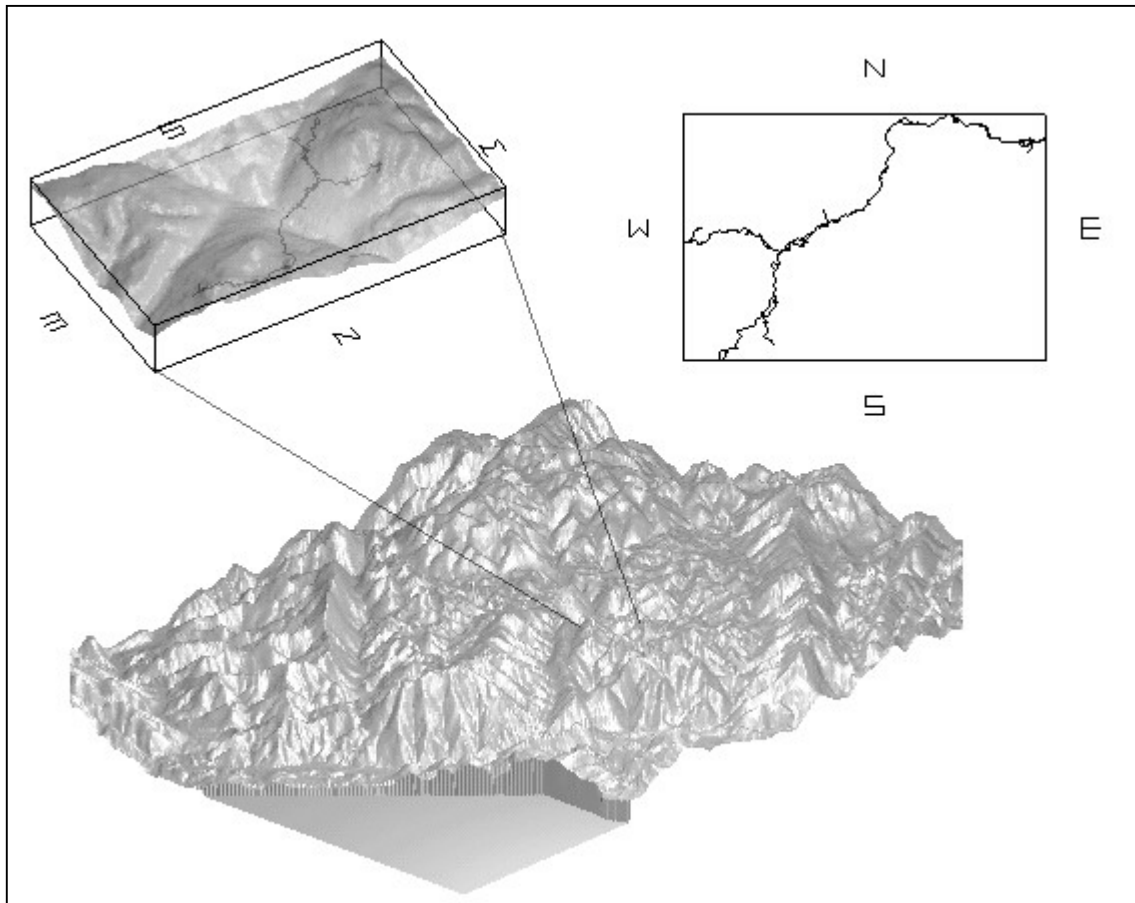
sistema cárstico do Lajeado - Vale do Betari, Iporanga - SP. Dissertação de mestrado em desenvolvimento Instituto de Geociências -USP.



**Figura 6.** Sistema Coumo d'Hyuenedo. Vista em planta e detalhe em 3D.



**Figura 7.** Linhas de visada e superfície do terreno, Gruta do Baixão, Itaetê - BA.



**Figura 8.** Planta das linhas de visada do Sistema Areias e superfícies topográficas.