VALORIZAÇÃO DE PEGMATITOS LITINÍFEROS

Mini-Fórum CYTED-IBEROEKA
LNEG (auditório de Alfragide)
26 e 27 de Maio de 2011

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA GEOLÓGICA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

A MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

como ferramenta de apoio na

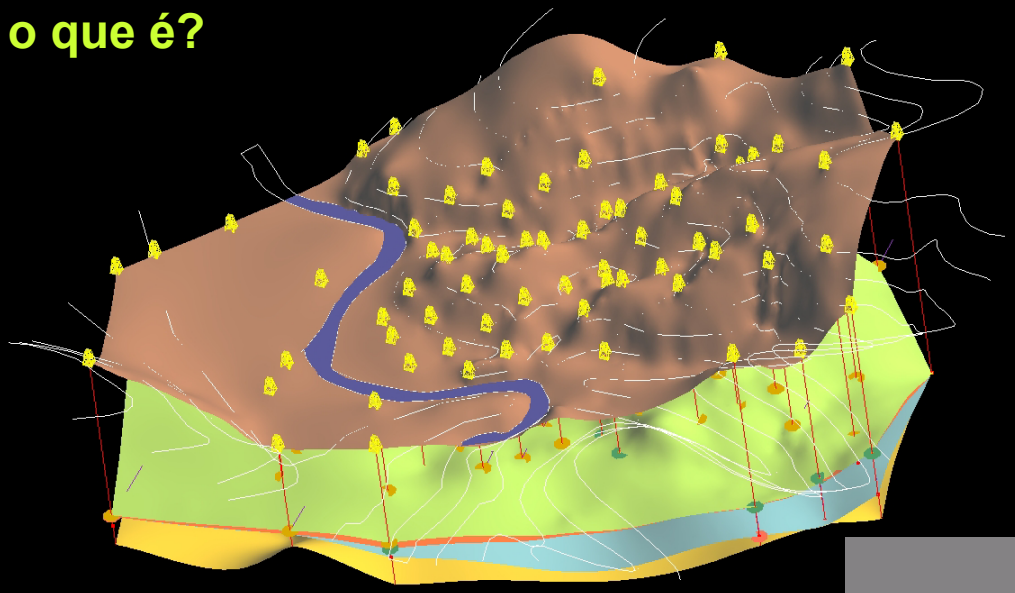
Prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS

António Miguel P. J. Ferreira
José A. Almeida

adi agência de inovação
Direcção Geral de Energia e Geologia
LNEG
CYTED

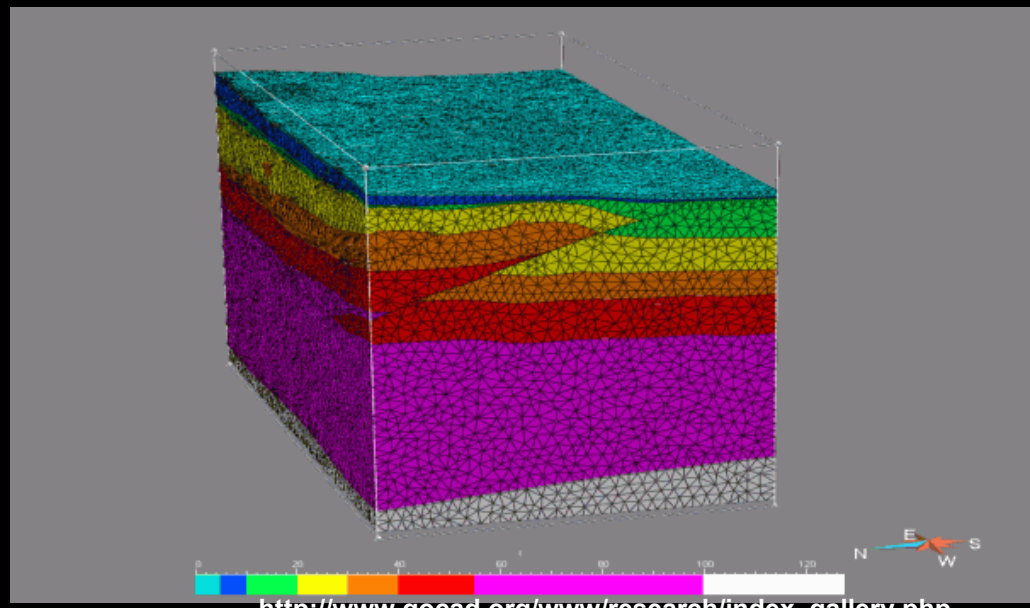
MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

o que é?



Modelo Geológico 3D:

representação tridimensional dos objectos geológicos observados e/ou inferidos num determinado volume.



http://www.gocad.org/www/research/index_gallery.php

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

para quê??...

- 1D – Poços, sondagens, ...
- 2D – Mapas geológicos, secções geológicas, ...

(uma pequena fatia de uma situação complexa...)

formação geológica ≡ polígono

falha ≡ linha

- MAS uma formação geológica REAL é delimitada por uma (ou mais) **superfície 3D**!!!... Isto pode-se representar nos **MG3D**!!!

... para finalmente desenhar a geologia como ela é!! a 3D!! ☺

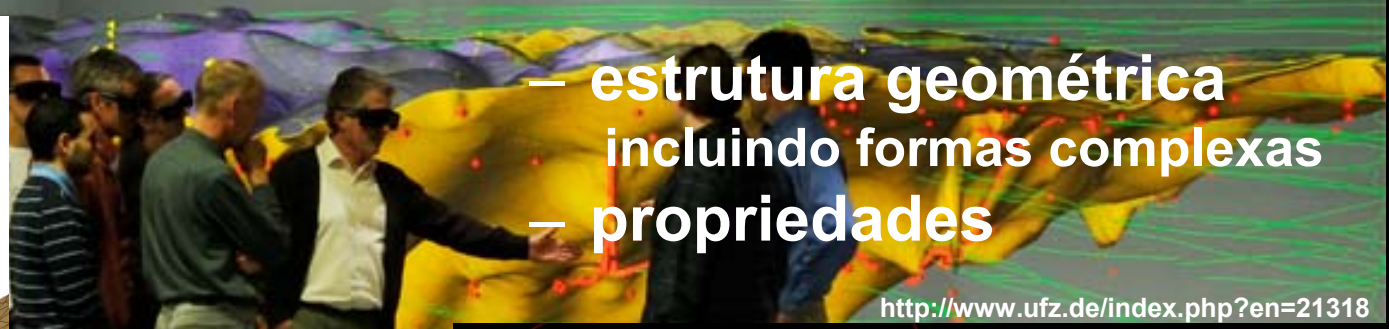
MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

como??...

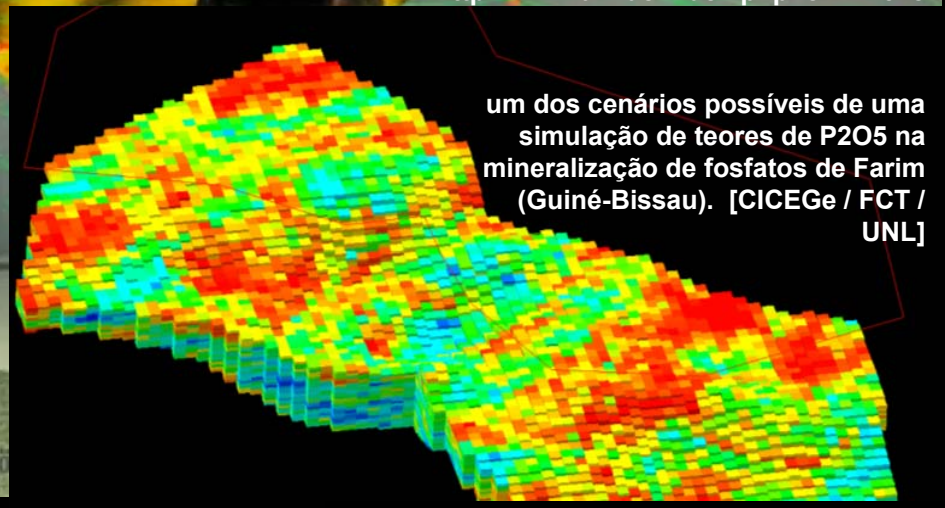
Devido ao desenvolvimento tecnológico e computacional verificado nas últimas décadas já é possível produzir e visualizar modelos geológicos digitais 3D representando:

- **estrutura geométrica**
  incluindo formas complexas
- **propriedades**

http://www.gocad.org/www/research/index_gallery.php



http://www.ufz.de/index.php?en=21318



um dos cenários possíveis de uma simulação de teores de P_2O_5 na mineralização de fosfatos de Farim (Guiné-Bissau). [CICEGe / FCT / UNL]

Simulação de Processos nos Modelos 3D
(fluxo de água, CO_2, …, propagação de ondas sísmicas, …)

com software prórpio para MG3D

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA GEOLÓGICA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

A. Ferreira
J. Almeida

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

Alguns *softwares* de modelação geológica tridimensional permitem **integrar** de uma forma coerente **diferentes tipos de dados**, sejam

- MDTs
- dados de cartografia geológica (e geoquímica) de superfície
- imagens de satélite / fotografia aérea
- mapas, perfis e 'cubos' de geofísica
  - sísmica, gravimetria, magnética, EM, RE, radar
- logs de sondagens (curtas e profundas)
  - Propriedades texturais, petrofísicas, geoquímicas, ...
- cortes geológicos,
- dados de ocorrência de sísmos
- geocronologia e litoestratigrafia
- etc...

Dados

Todos os que Há!!!

+

Todos os que se puder arranjar!

tendo em conta os objectivos

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

Qual a informação a incluir num mapa 3D?
TODA a disponível

modelo digital de terreno

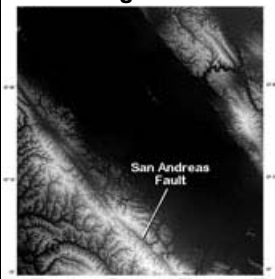
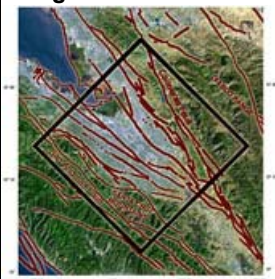
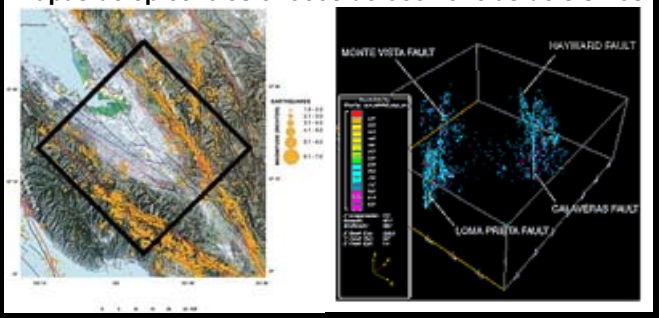


imagem satélite + falhas

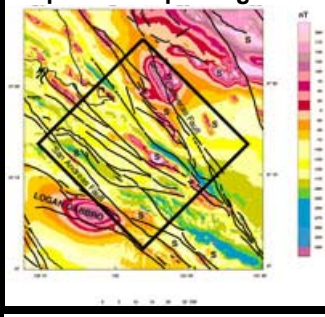


mapas de epicentros e focos de ocorrências de sismos

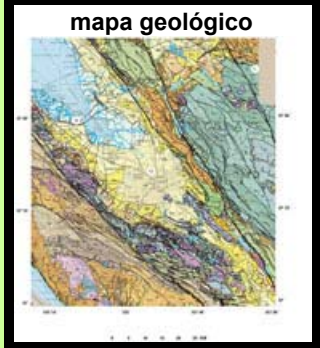


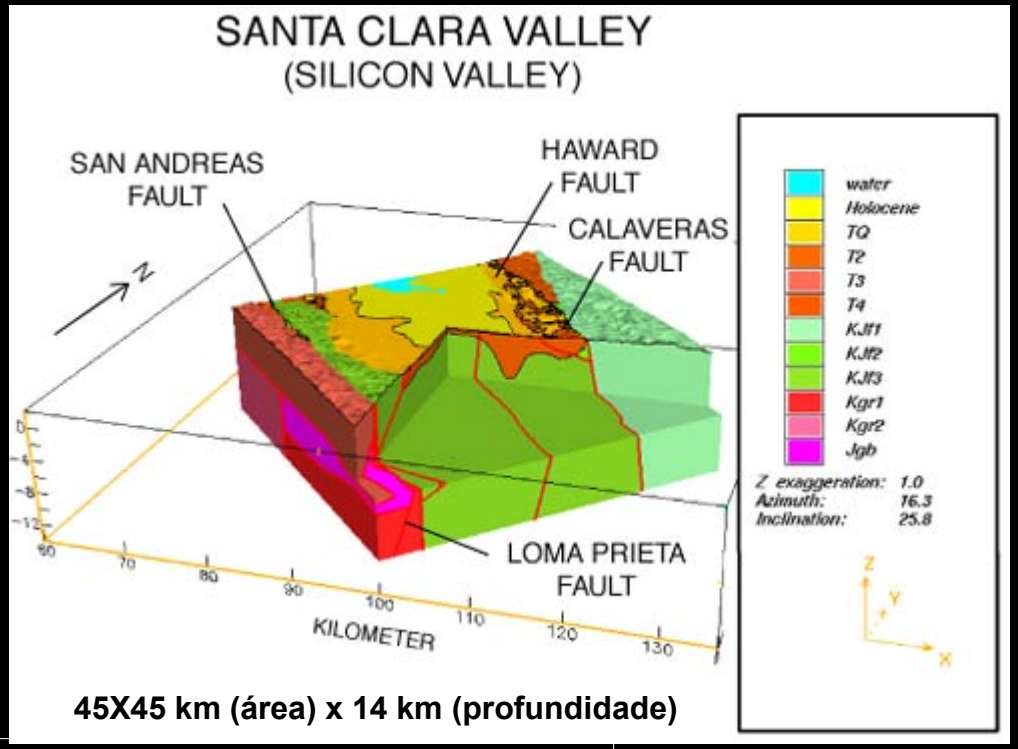
Perfis de sísmica e outros dados de geofísica

mapa do campo magnético



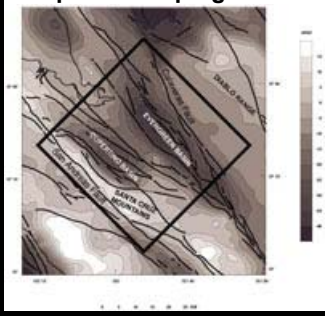
mapa geológico





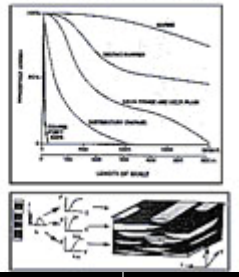
45X45 km (área) x 14 km (profundidade)

mapa do campo gravítico



Lithologic logs

Geologic models



Para modelar processos:
- fluxo de águas subt.,
- dispersão de contaminantes,
- tremores de terra,
- propagação de ondas sísmicas,
- acumulação de tensão tectónica

Logs litológicos, geofísicos, geoquímicos, isotópicos de furos de captação de água

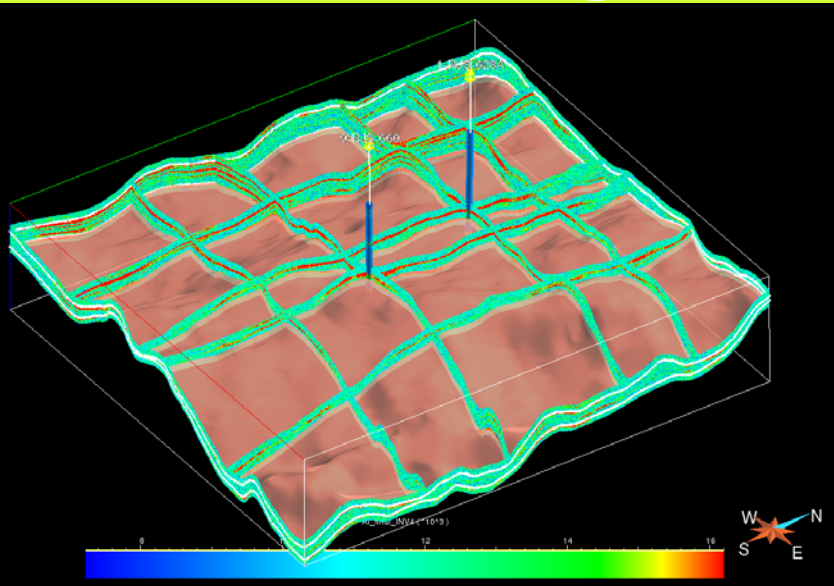
Conceitos fundamentais sobre ambientes deposicionais e arquitectura sedimentar

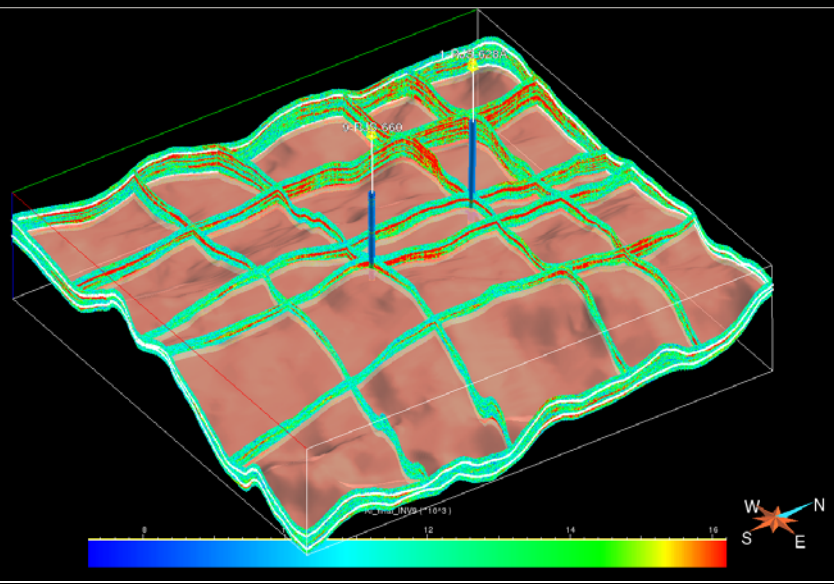
USGS

http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-223/jachens.html

FCT CENTRO DE INVESTIGAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA GEOLÓGICA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
A. Ferreira
J. Almeida

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D





Com esta capacidade de integração de dados e com o desenvolvimento de algoritmos apropriados ao 3D, torna-se possível **criar** e **testar vários cenários** com base em diferentes hipóteses geológicas, para chegar a um MG3D no qual melhor se **ajustam** os **dados** disponíveis com os **conceitos** geológicos, podendo assim servir de base para **melhorar a compreensão** sobre os fenómenos geológicos em questão.

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

onde começou?

- É uma ferramenta chave na indústria petrolífera para a caracterização de campos petrolíferos
- Foi na sequência de problemas aqui encontrados que a MG3D começou a ser desenvolvida

modelo geológico realista

▼

programa de simulação de reservatório

▼

vários cenários de recuperação de hidrocarbonetos

▼

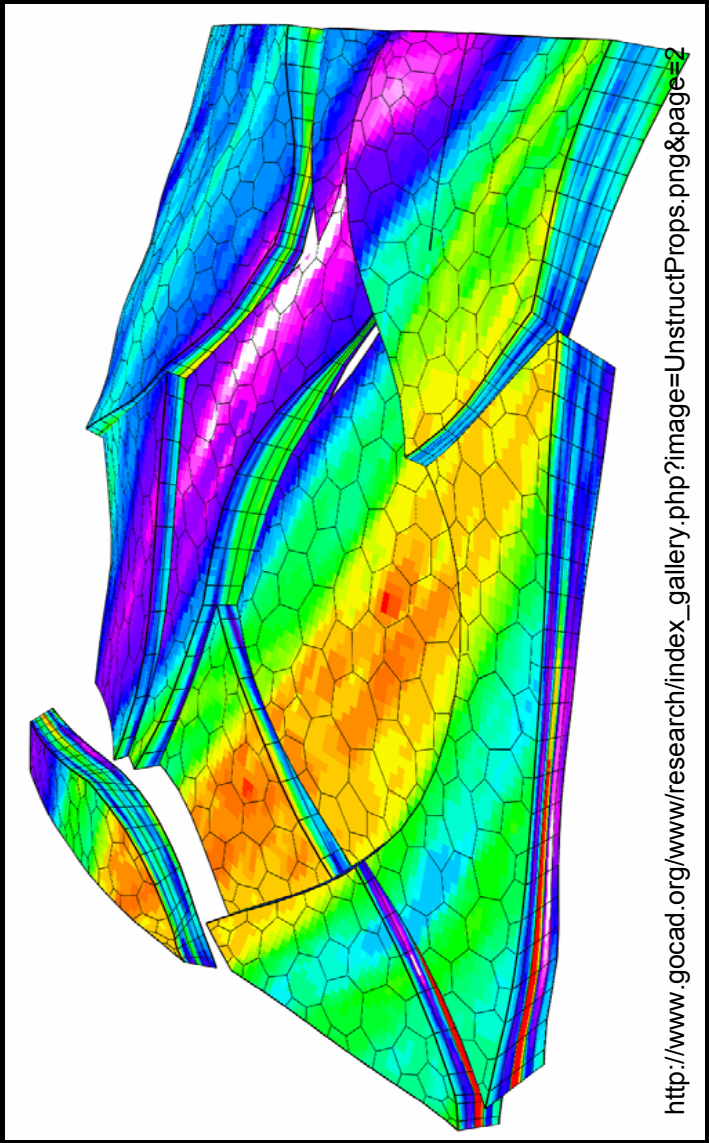
prever o comportamento das rochas

▼

decisão sobre qual o plano de desenvolvimento **mais seguro, económico, eficiente e eficaz** para um determinado reservatório, que só pode ser desenvolvido e produzido uma vez!!!

http://www.gocad.org/www/research/index_gallery.php

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D


http://www.gocad.org/www/research/index_gallery.php?image=UnstructProps.png&page=2

Apesar das óbvias vantagens e da existência de *softwares* adequados, a modelação 3D ainda não é - mas é-o cada vez mais!!! - uma ferramenta universalmente usada na investigação geológica, excepto na indútria petrolífera e nalguma (cada vez mais) indústria mineira nomeadamente na fase de planeamento e extracção.

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

na prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS

- é necessário *pensar e usar 3D* nas geociências pois
  - é mais realista,
  - permite integrar *todo* o tipo de geoinformação,
  - potencia a interpretação geológica e
  - simplifica a actualização do modelo
  - permite avaliar a incerteza do próprio modelo

- os MG3D também podem ser uma mais valia na prospecção de pegmatitos litiníferos, à medida que os diferentes tipos de dados vão sendo sucessivamente adquiridos ao longo das suas fases e integrados e analisados num ambiente 3D.

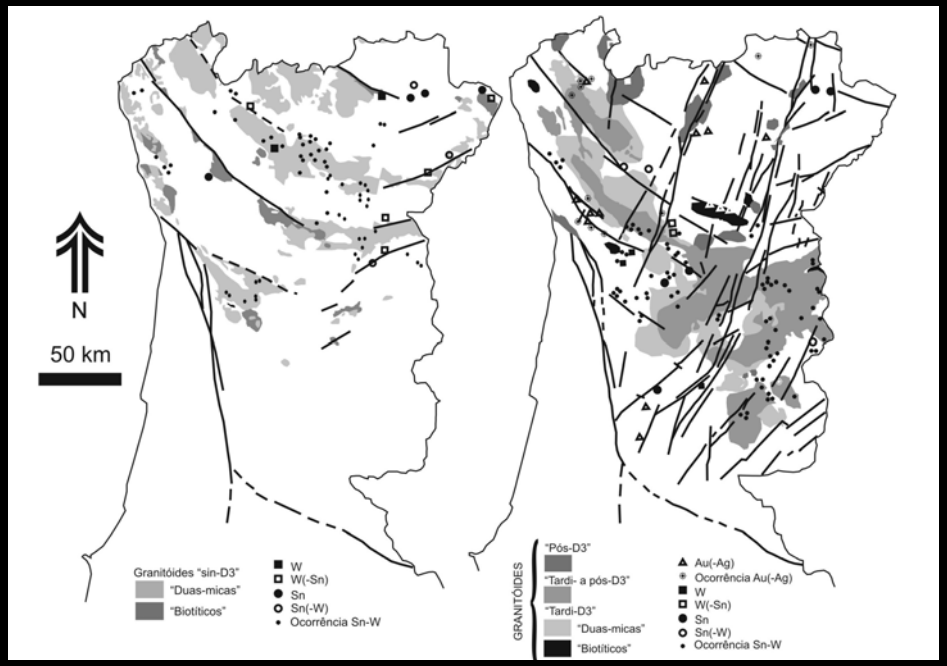
MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

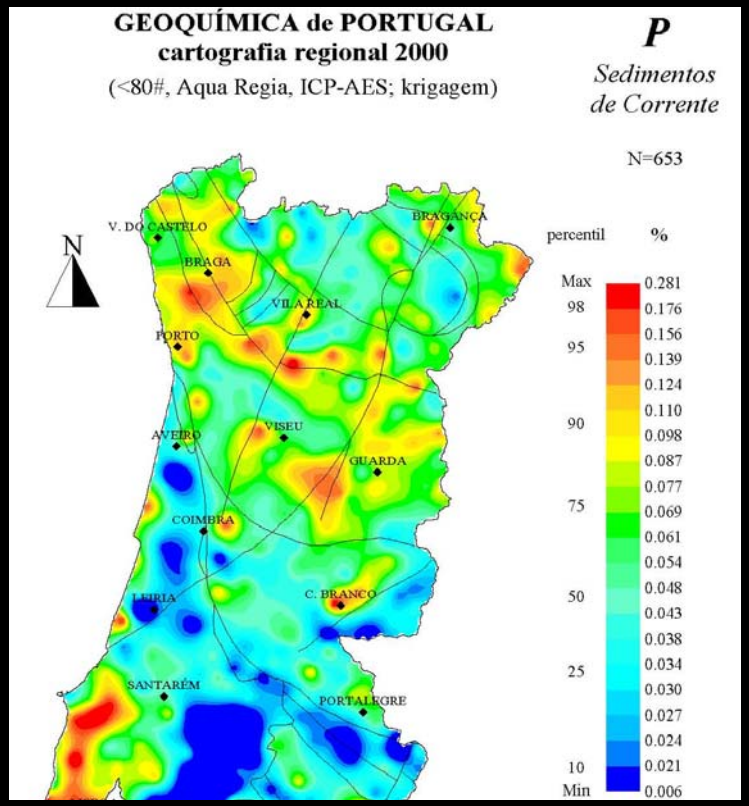
na prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS

Prospecção estratégica

Avaliação regional / Reconhecimento

Selecção do alvo

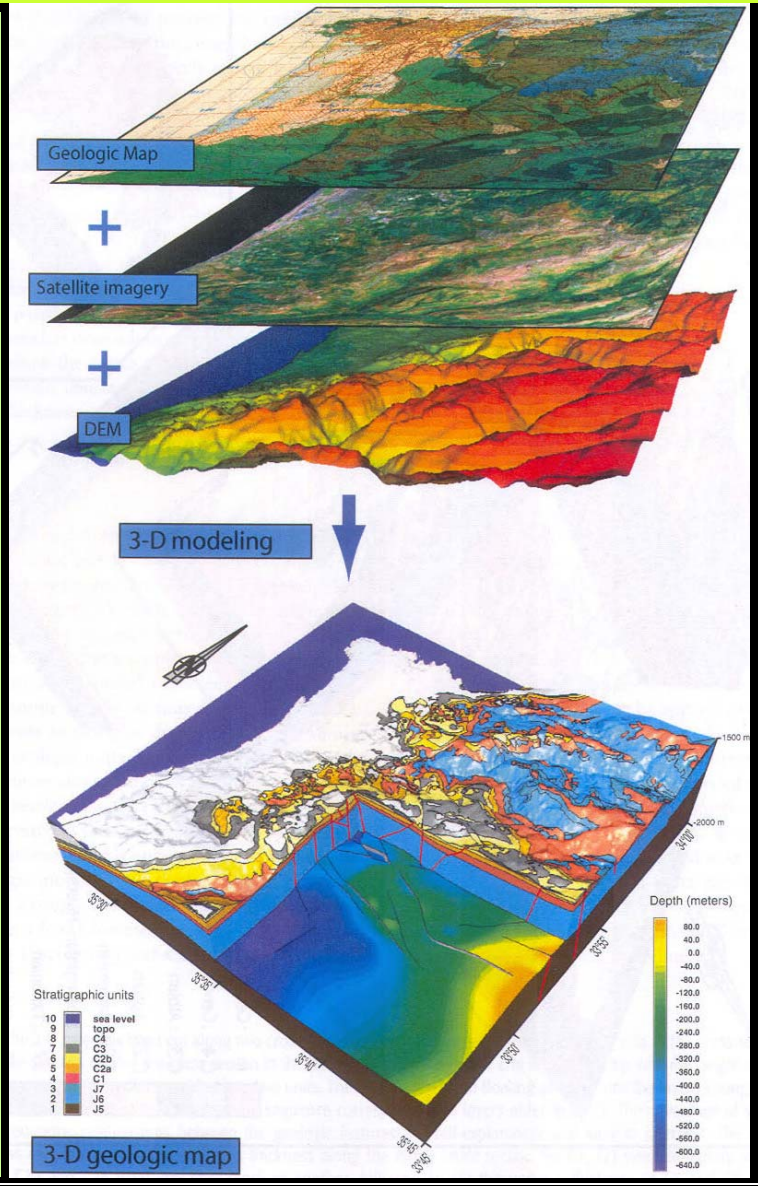


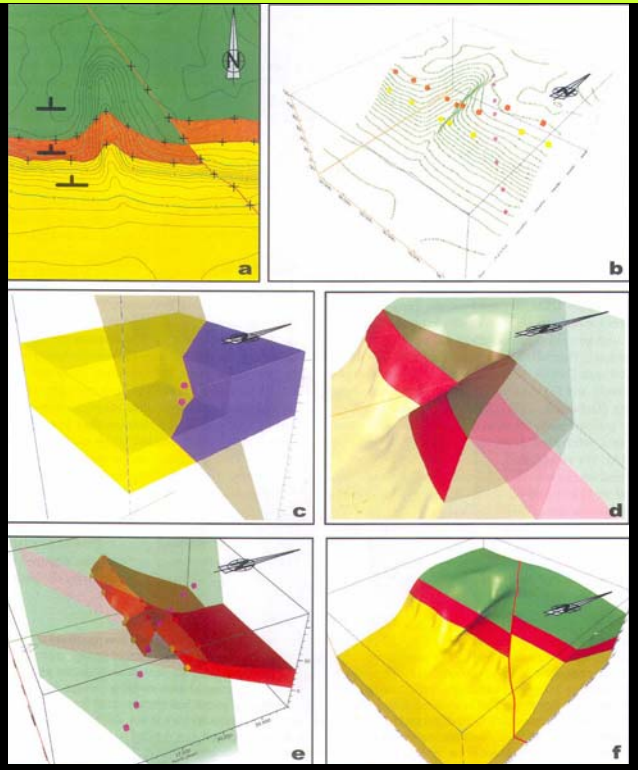


Começa-se por procurar e selecionar uma região / área potencial, idealmente um afloramento de granito peraluminoso, de preferência com uma zonação químico-mineralógica regional espacialmente associada ou um cortejo filoniano identificado.

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

na prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS



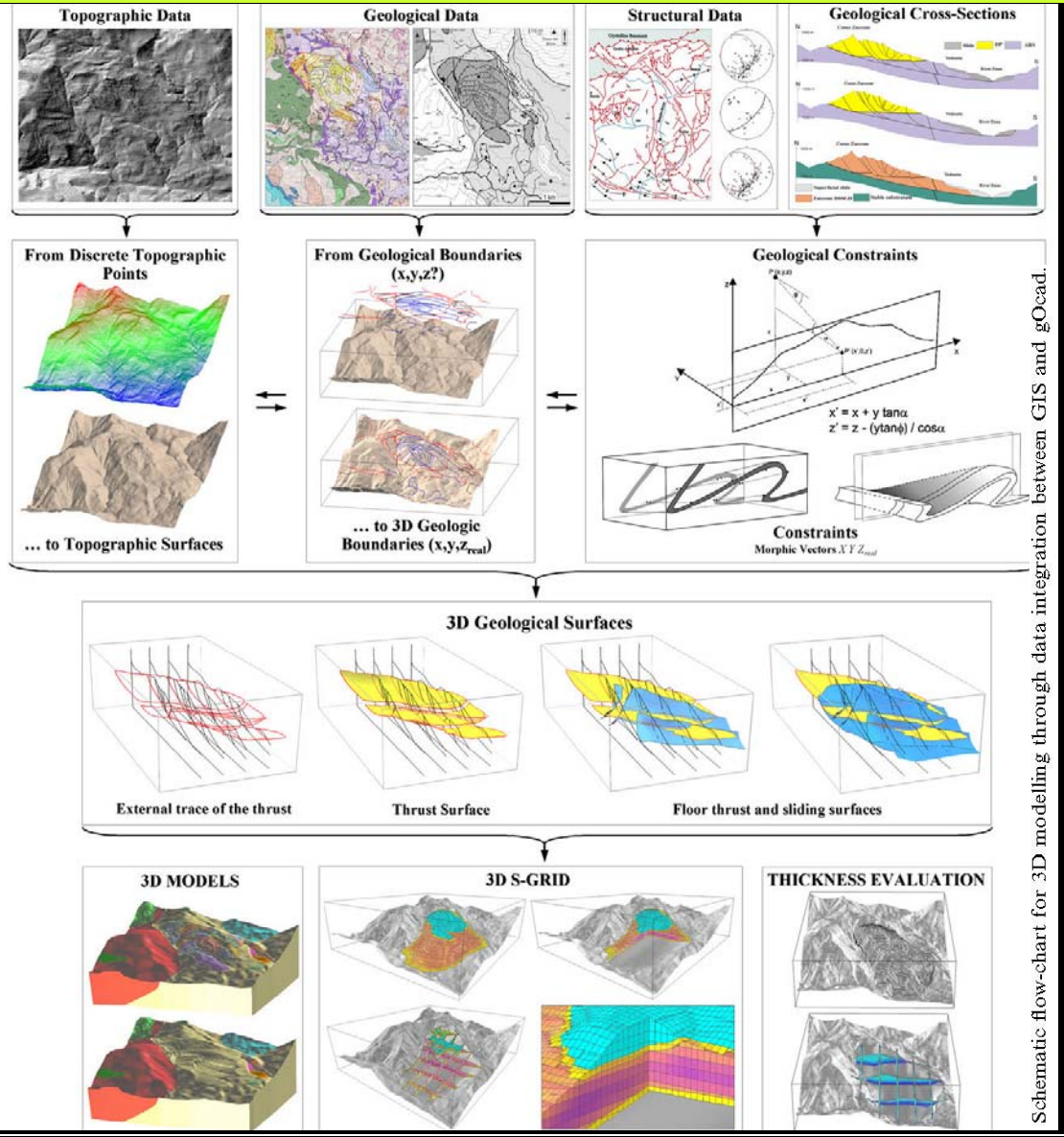


Figuras de: Dhont et al. 2005 – 3D modeling of geologic maps from surface data

Nesta fase um ambiente SIG 2D convencional poderá parecer suficiente. No entanto, com *software* adequado é possível construir uma primeira versão de um MG3D, baseado apenas em dados geológicos de superficie (1) linhas: limites geológicos, falhas e 2) pontos: dados estruturais pontuais com atitude de camadas e de falhas) **e num bom MDT.**

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

na prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS



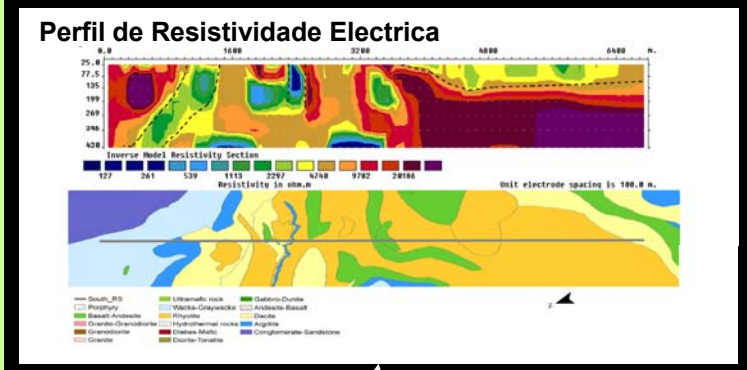
Schematic flow-chart for 3D modelling through data integration between GIS and gOcad.

Figura de: A. Zanchi et al. / Computers & Geosciences 35 (2009) 49–69

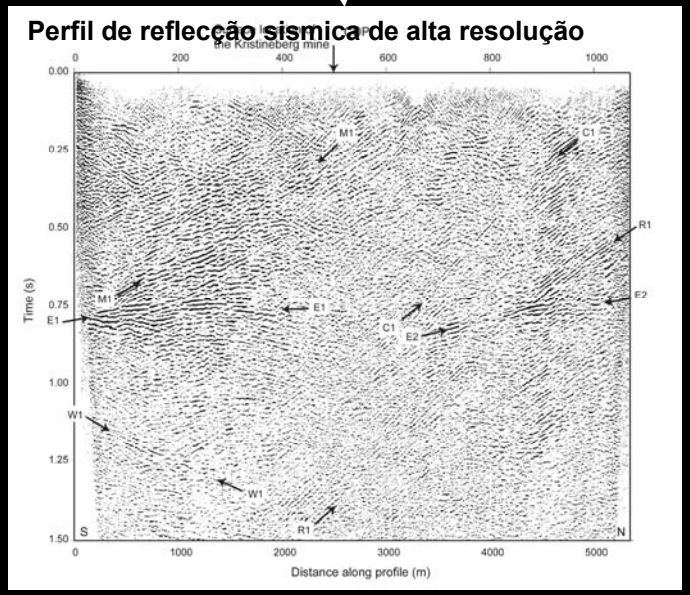
Nesta fase um ambiente SIG 2D convencional poderá parecer suficiente. No entanto, com *software* adequado é possível construir uma primeira versão de um MG3D, baseado apenas em dados geológicos de superficie (1) linhas: limites geológicos, falhas e 2) pontos: dados estruturais pontuais com atitude de camadas e de falhas) e num bom MDT.

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

na prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS



Figuras de: Bauer et al., 2010 – 4-D geological modelling of the Skellefte district, Sweden



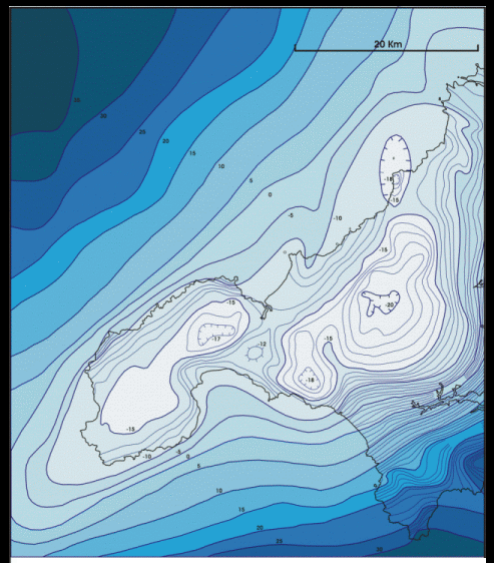
O MG3D beneficia caso exista info adicional de 1) detecção remota (para confirmação / detecção de contactos geológicos, de falhas e filões superficiais), de 2) geofísica ou de 3) sondagens...

Figuras de: http://www.ineti.pt/viewDoc.aspx?src=F40701FCDF8F9E97F00EC72747492CBA

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

na prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS

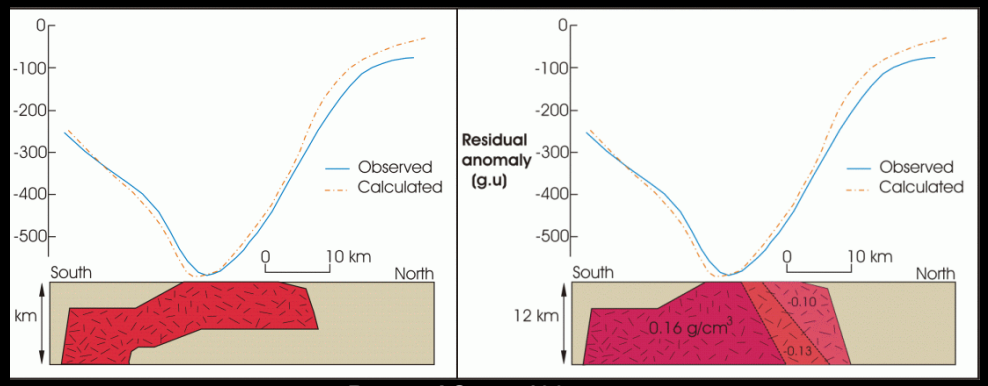
http://myweb.tiscali.co.uk/geologyofcornwall/batholith.htm



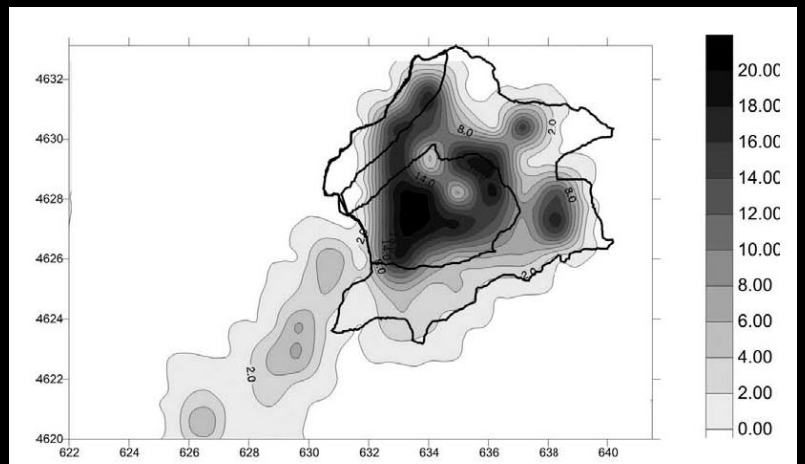
Anomalia de Bouger no SW Cornwall

Com base, por exemplo, em dados gravimétricos já interpretados pode-se modelar em 3D o contorno estrutural de um batólito granítico, enquanto levantamentos com outros métodos geofísicos poderão ser úteis para este fim ou para detectar falhas e/ou filões associados. Esta informação pode ser integrada, visualizada e analisada em ambiente 3D.

Dois possíveis modelos para o Granito de Bodmin Moor (SW Cornwall) com base na anomalia de Bouger e usando 1) densidade uniforme, com contraste entre o granito e o encaixante de 0.10 g/cm3 ou 2) admitinindo uma variação de densidade NS do granito.



Bott and Scott, 1964



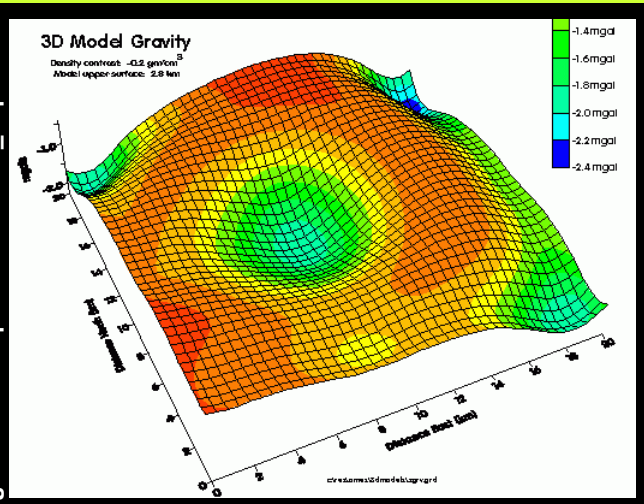
Contorno estrutural da base do granito de Águas Frias inferido por modelação inversa da anomalia gravimétrica de Bouger.

Figura de: Sant'Ovaia & Noronha, 2005 – Modelação da Anomalia Gravimétrica do maciço granítico pós-tectónico de Águas Frias – Chaves (Norte de Portugal)

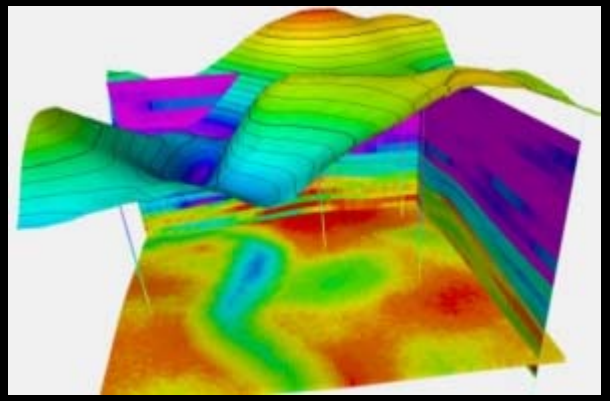
A. Ferreira
J. Almeida

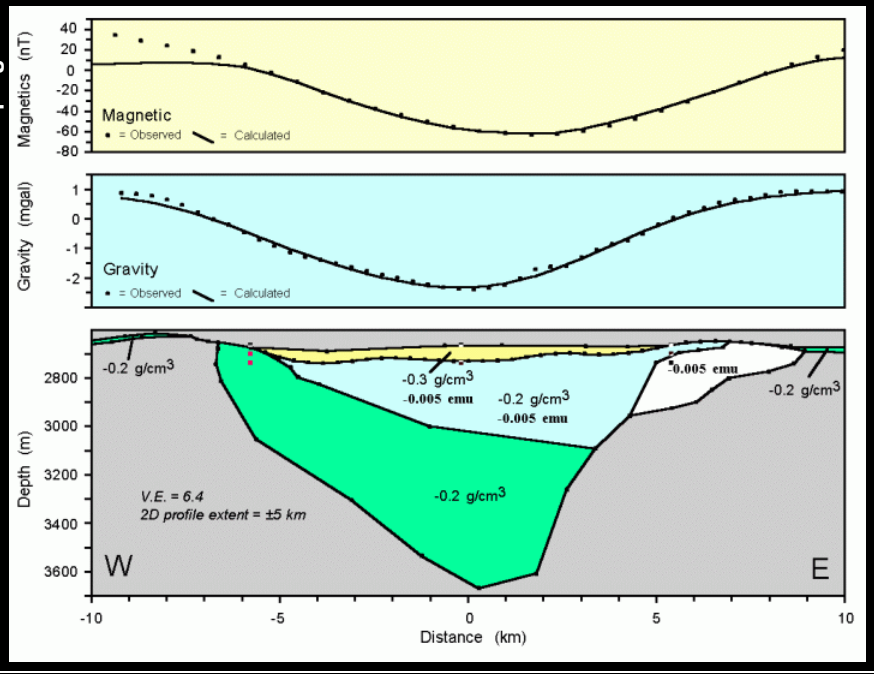
MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

http://gravmag.ou.edu/examples/ames/ames_impact.html



Já existem softwares para **modelação directa** e **inversa** em **3D** de dados de geofísica:





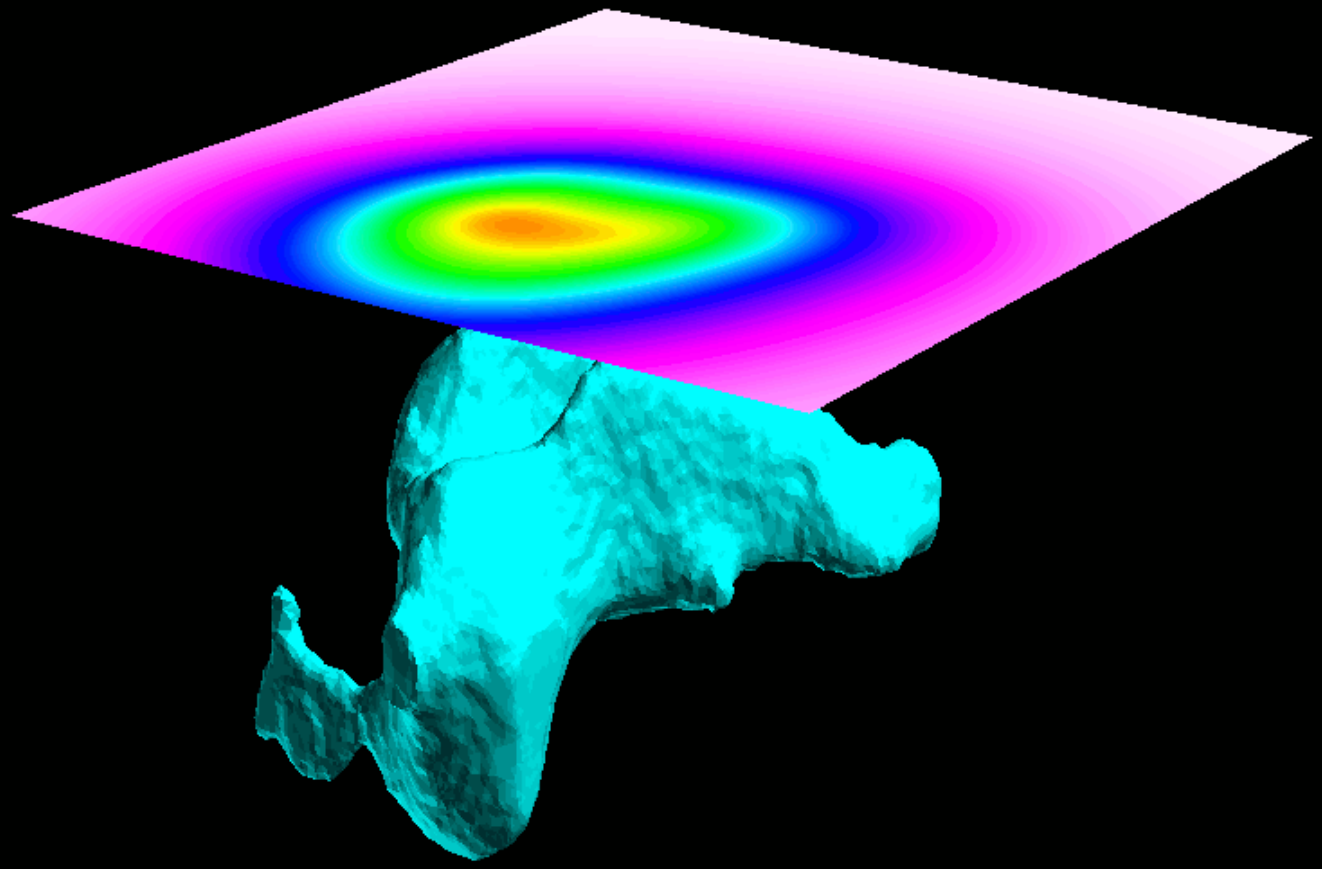
p.ex.:

modelação directa: criando um mapa sintético 2D de dados de gravimetria (magnética) a partir de um modelo de densidades (intensidade magnética) 3D e/ou

modelação inversa: que permite corrigir o modelo de densidades (intensidade magnética) 3D por forma a se ajustar ao mapa de dados reais de gravimetria (magnética)

processo iterativo

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

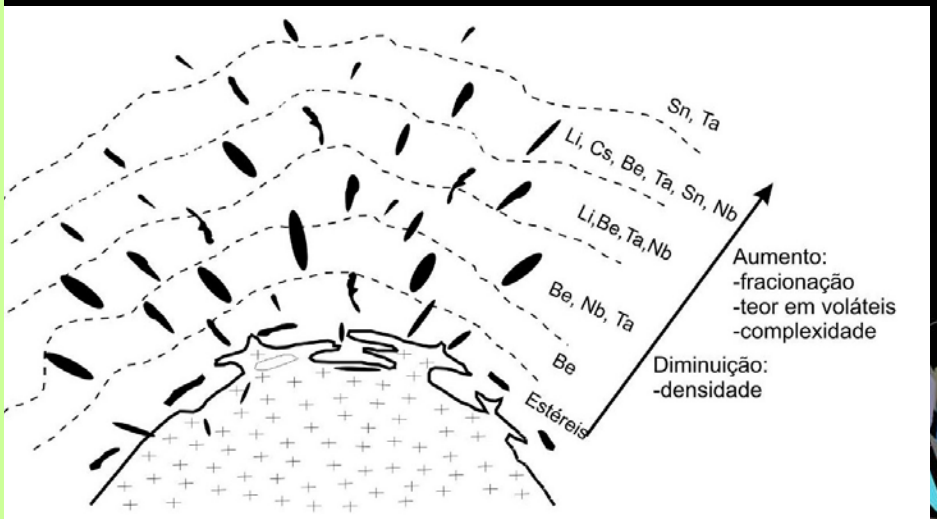


Several realizations of densities in a mineralized body, and the corresponding gravity anomaly. The computation is made on a tetrahedral volume [Foudil-Bey et al, 2007], and the realizations are obtained though Monte-Carlo sampling.

http://www.gocad.org/www/research/index_gallery.php?image=gravity_mtc00.gif&page=3

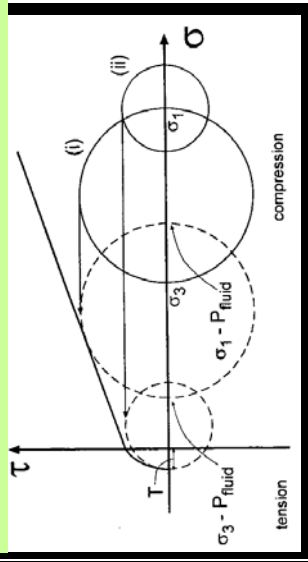
MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

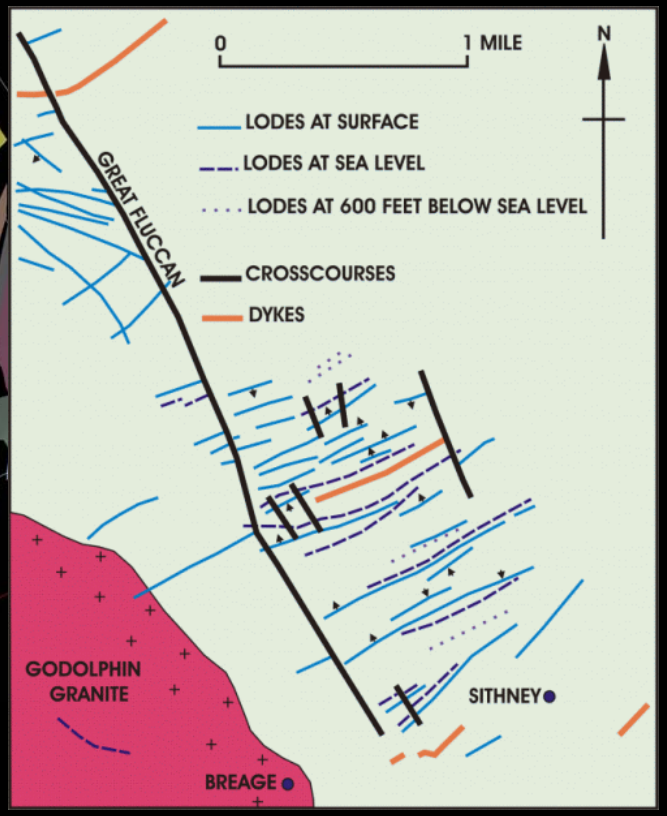
na prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS



Representação esquemática da zonação de um campo pegmatítico do tipo LCT (adaptado de Cerny, 1991)

Eventualmente 1) o **padrão de distribuição** e 2) as **características dos filões** detectados à superfície podem ser **extrapolados** para o volume 3D, por simulação,





tendo em conta:

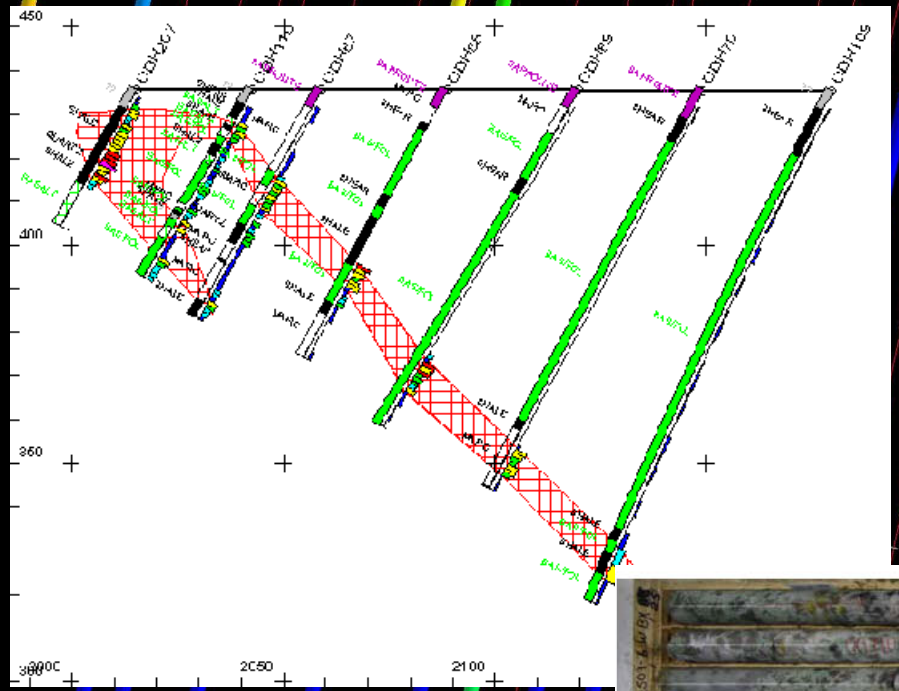
- a **proximidade** ao granitóide parental e a **zonação**
- o **campo de tensões** associado à instalação do granitóide e dos filões.

http://myweb.tiscali.co.uk/geologyofcornwall/mineralisation2.htm

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

na prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS

http://www.visidata.com.au/HTML/Interdex/Drilling.html



Para criar (melhorar) um modelo 3D de um cortejo filoniano pegmatítico a uma **escala mais local** é necessário aumentar a **informação directa**,

nomeadamente recorrendo a **trabalhos de detalhe** de prospecção geológica de superfície, seguido de uma campanha de **sondagens** e sanjas.

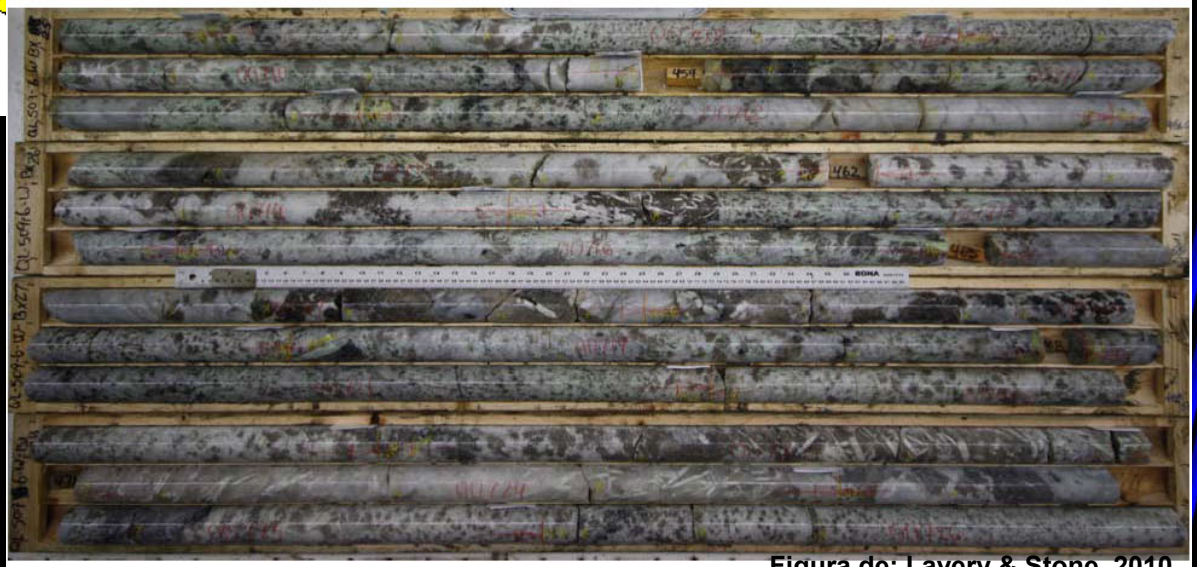
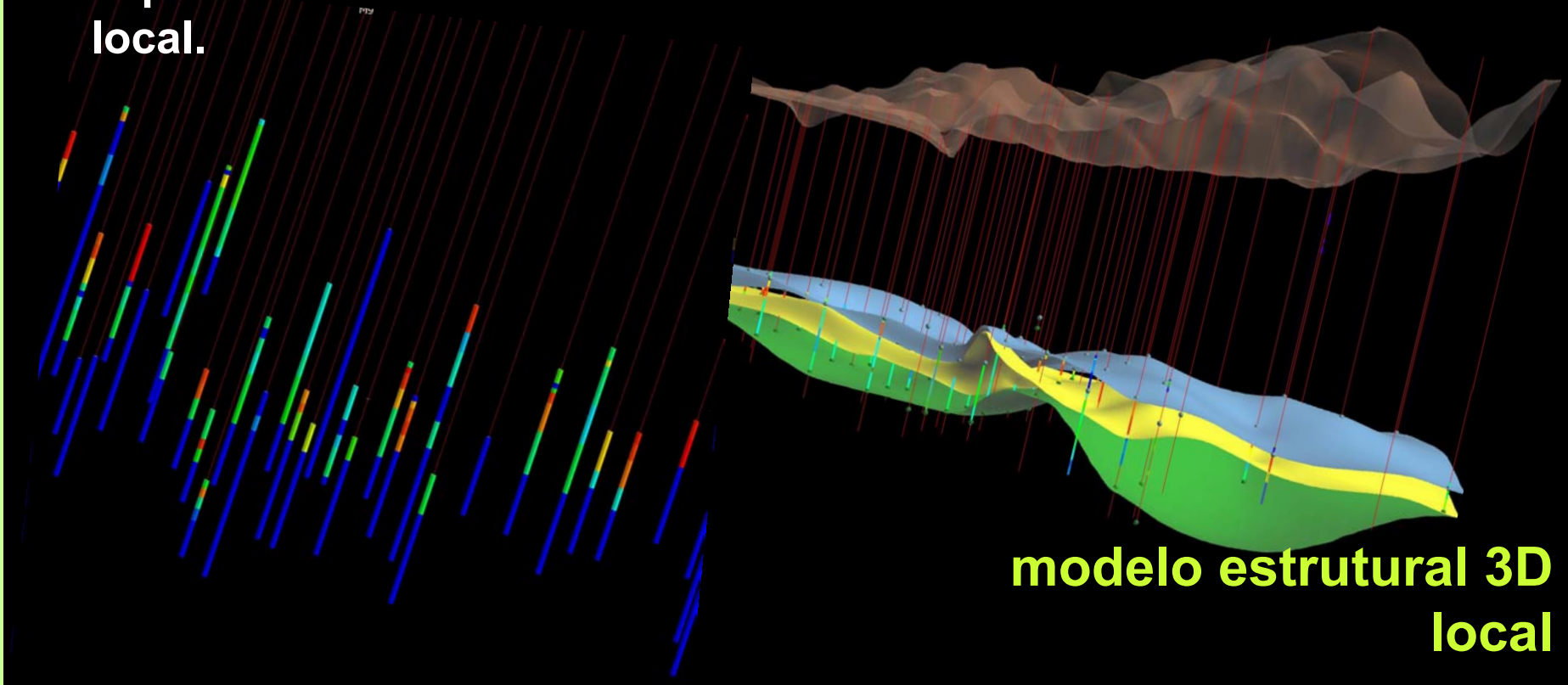


Figura de: Lavery & Stone, 2010

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

na prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS

Com informação geológica e estrutural directa e detalhada, quer superficial (incluindo sanjas) quer proveniente de sondagens, como os contactos geológicos e a atitude das falhas, a densidade de filões e a forma, direcção, inclinação e espessura de cada filão constrói-se um modelo estrutural 3D local.



modelo estrutural 3D local

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA GEOLÓGICA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
A. Ferreira
J. Almeida

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

na prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS

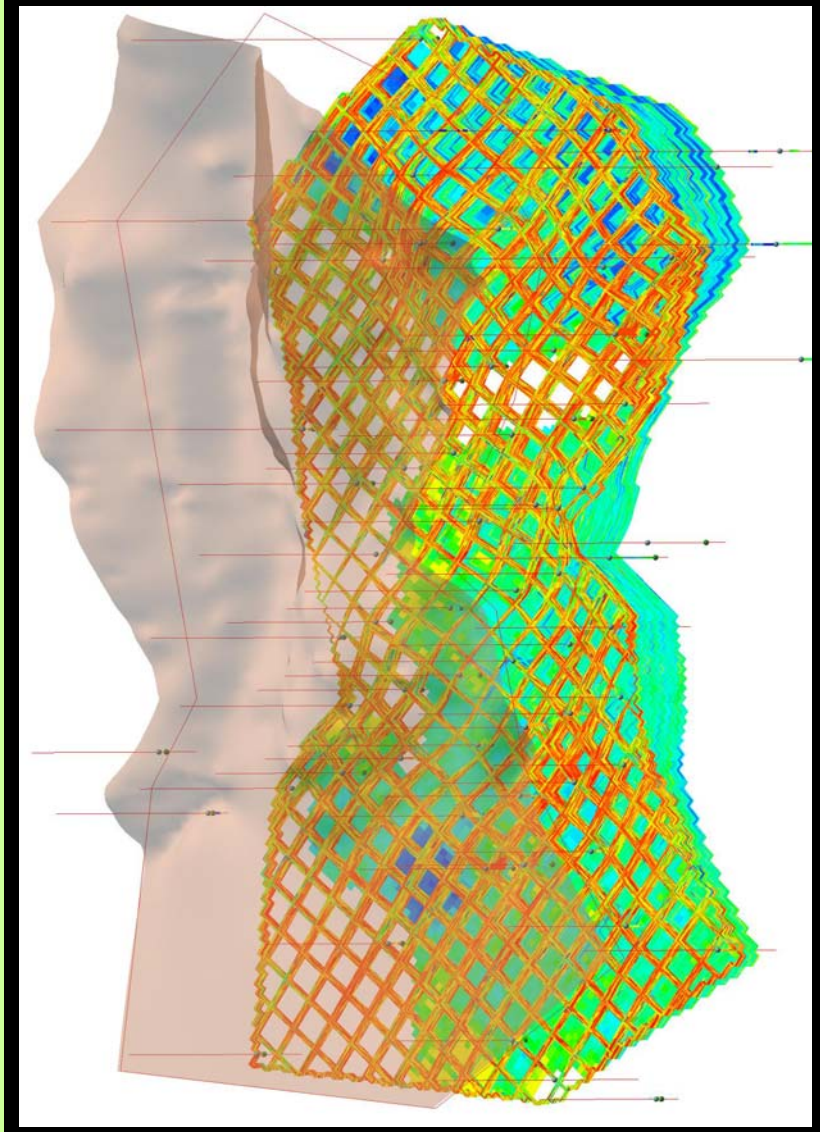
A informação mineralógica e de teores observada nos filões e no encaixante (interceptados pelas sondagens) permitirá estimar / simular essas propriedades (p.ex.: lítio) no espaço 3D (previamente subdividido em células tridimensionais), recorrendo a ferramentas geostatisticas.

Esta estimação / simulação pode ter em conta a relação espacial dos teores com a zonação químico-mineralógica superficial e ser devidamente enquadrada no modelo estrutural 3D, o qual pode ser usado como informação secundária.

modelo 3D de propriedades da mineralização

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

na prospecção de PEGMATITOS LITINÍFEROS



Um MG3D assim desenvolvido permitirá

1) uma **avaliação de reservas realista**, incluindo vários cenários com diferentes teores de corte

3) ser rapida e facilmente **actualizado** sempre que sejam obtidos mais dados

4) avaliar a **incerteza**

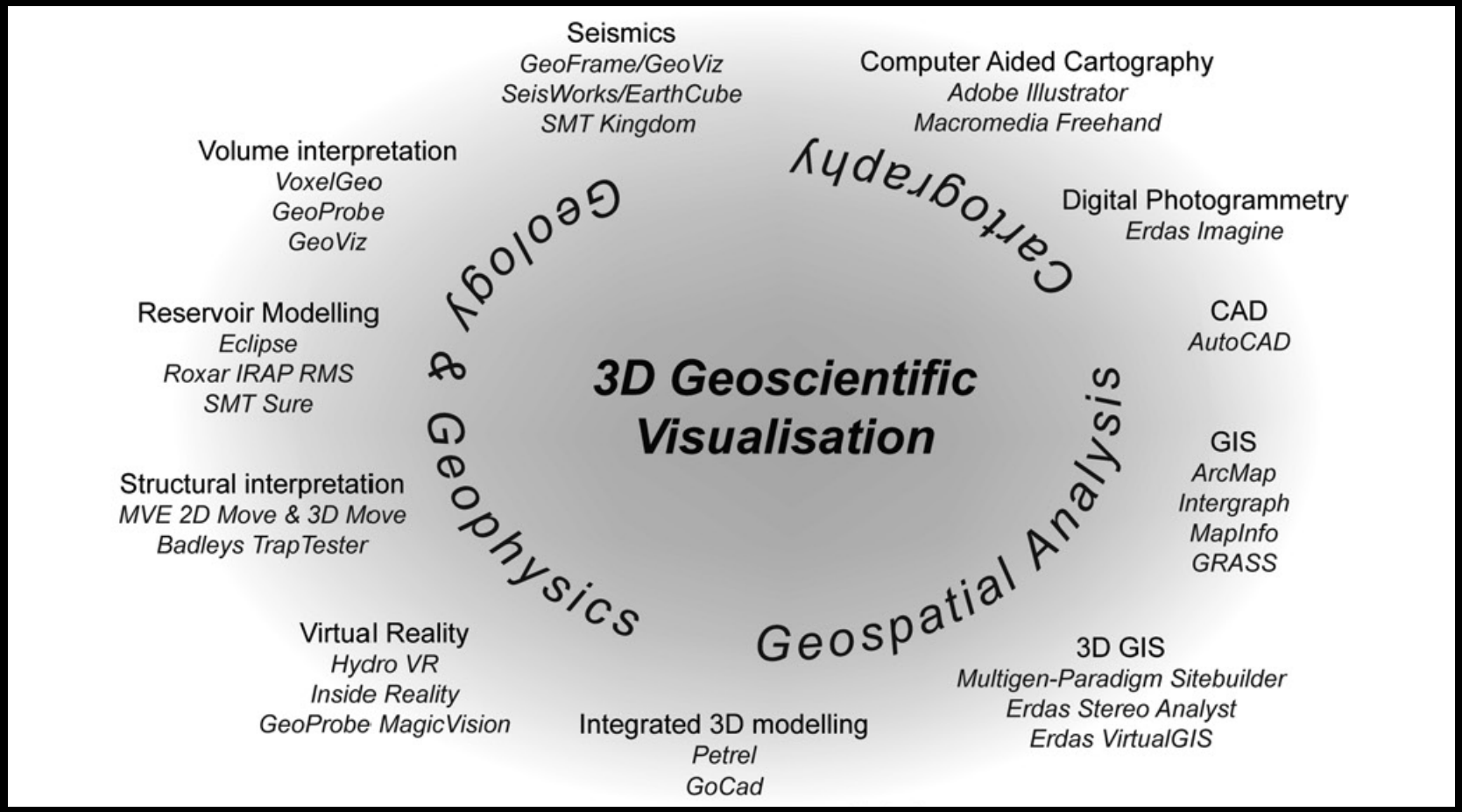
MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

Em conclusão

- **Aproximar** a cartografia geológica da **realidade**
- **Confrontar e integrar geodados** de virtualmente todos os tipos e origens
- **Melhorar o conhecimento** sobre processos geológicos e testar a validade de hipóteses geológicas
- **Simular processos geológicos** (fluxo de água , gás, ..., propagação de ondas sismicas, ...)
- Desenvolver **modelos 4D** de análise, predição e / ou paleo-reconstrução de estruturas e processos geológicos, tectónicos e hidrogeológicos.
- Melhorar a **razão custo-benefício** na área dos recursos minerais e na resolução de problemas ambientais

❖ O **futuro** do conhecimento, prospecção e exploração de **PEGMATITOS LITINÍFEROS terá que** passar pela modelação 3D... (como já acontece p.ex.: no Canadá e na Escandinávia)

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

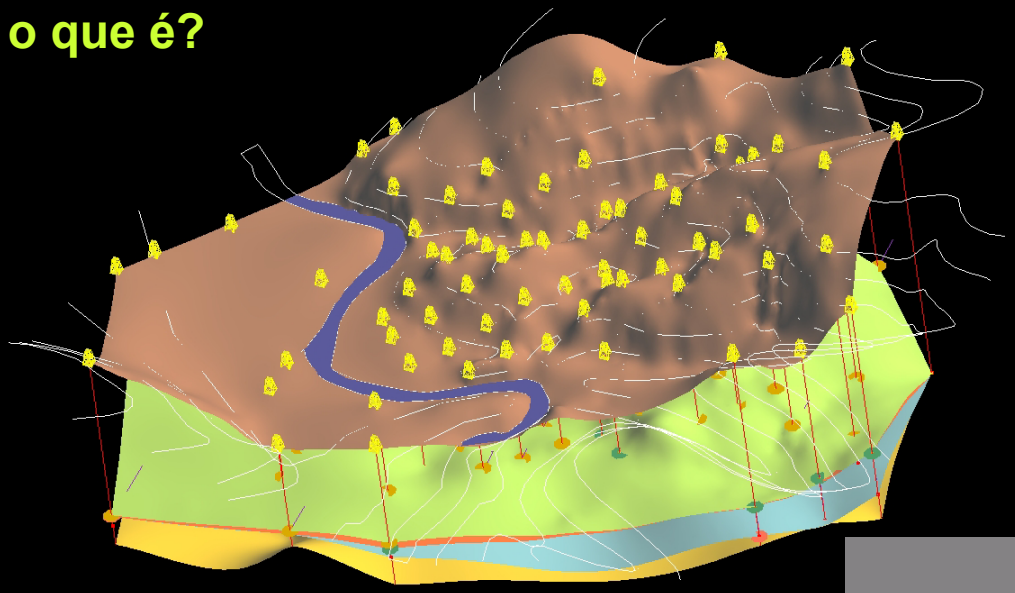


Key types of application software that have influenced development of 3D visualisation in geosciences. Only a few examples of specific programs are given, though many others exist. Progressive convergence of software now means that different types of program often have overlapping functionality.

R.R. Jones, K.J.W. McCaffrey, P. Clegg,R.W.Wilson, N.S. Holliman, R.E. Holdsworth, J. Imber, S.Waggott. 2009. Integration of regional to outcrop digital data: 3D visualisation of multi-scale geological models. *Computers & Geoscieces*, 35

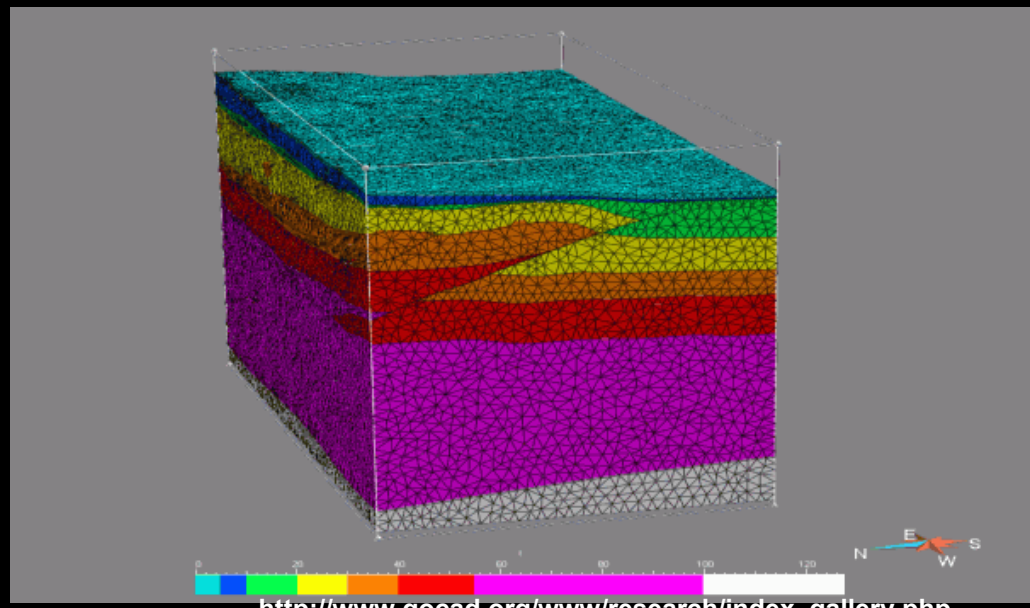
MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D

o que é?



Modelo Geológico 3D:

representação tridimensional dos objectos geológicos observados e/ou inferidos num determinado volume.



http://www.gocad.org/www/research/index_gallery.php