



# SUBSIDÊNCIA DE TERRENOS POR EXTRACÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA: APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO DA ZONA INDUSTRIAL DE VIALONGA

**João Paulo LOBO FERREIRA**  
Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC

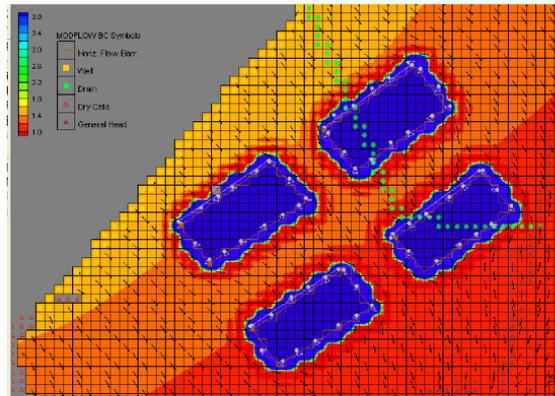
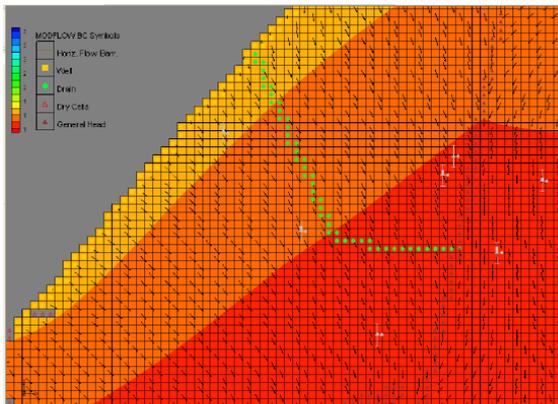
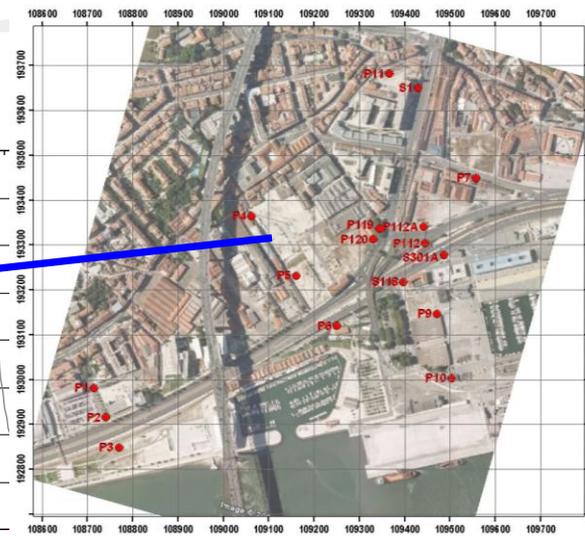
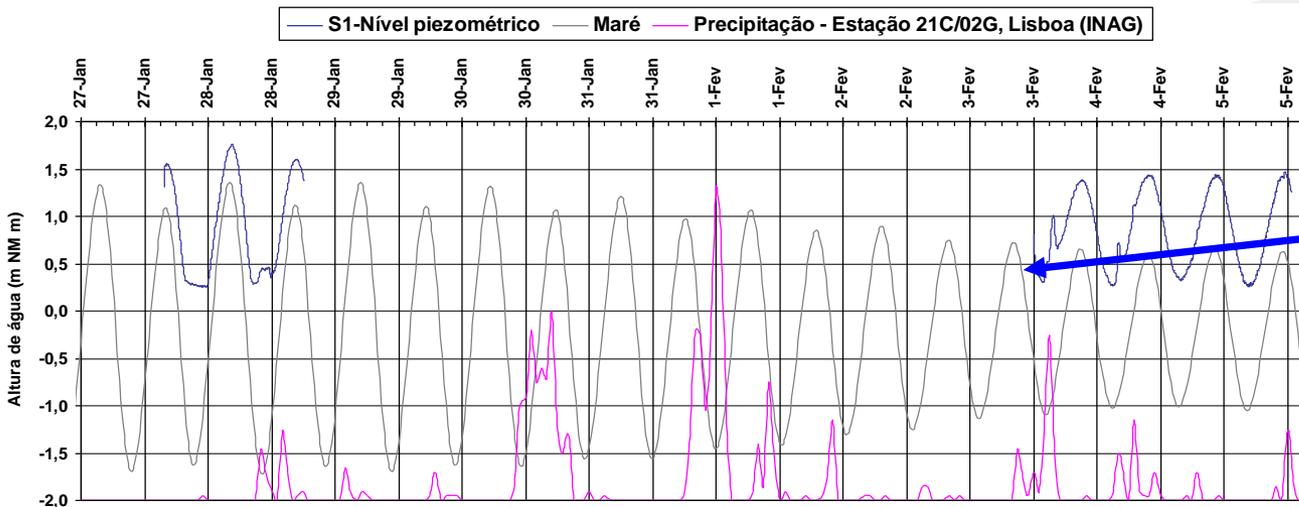
**Luís OLIVEIRA**  
Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC

**Sandra HELENO**  
Instituto Superior Técnico, ICIST

# Impacto de obras subterrâneas

**Oscilação do nível piezométrico na sondagem S1, variação da maré e precipitação, no período de 27 de Janeiro a 5 de Fevereiro de 2009**

Obras de engenharia e hidrogeologia urbana



*Oscilação do nível piezométrico no aquífero poroso devido à influência da maré*

Fig. 23 – Situação de cheia, sem edifícios (à esquerda) e Cenário 4

# Caracterização de parâmetros hidráulicos em meios urbanos

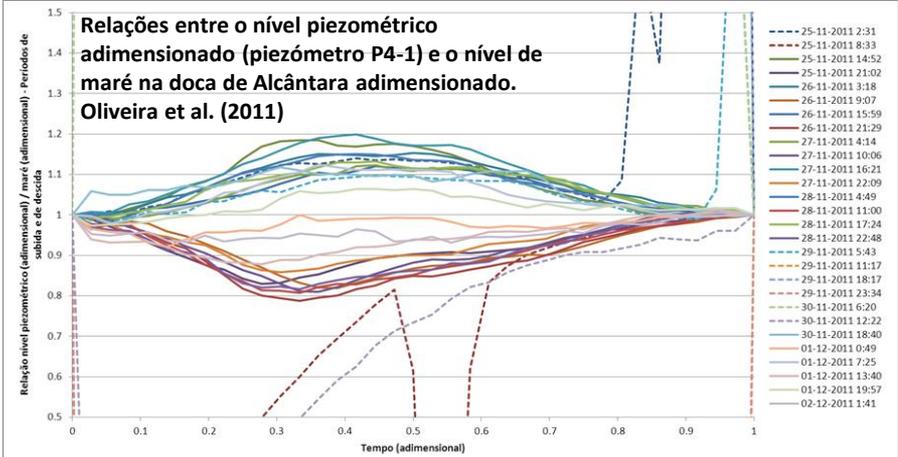
## Obras de engenharia e hidrogeologia urbana

### REFER: Interpretação de ensaios de bombagem

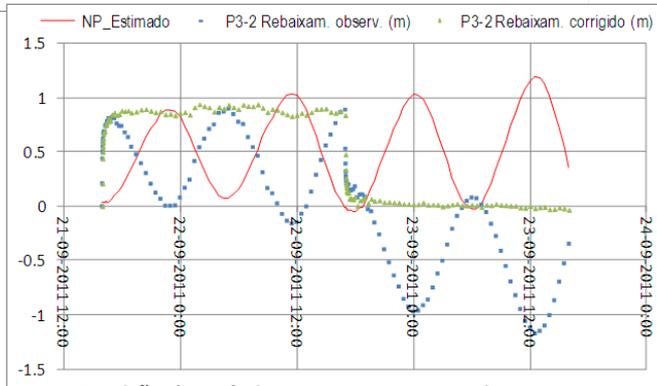
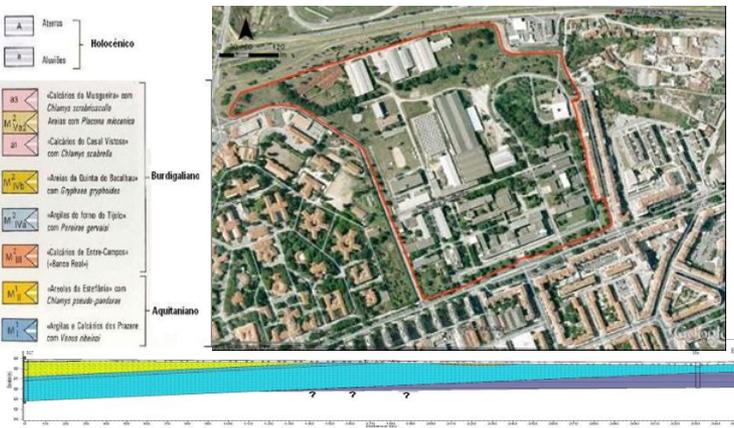
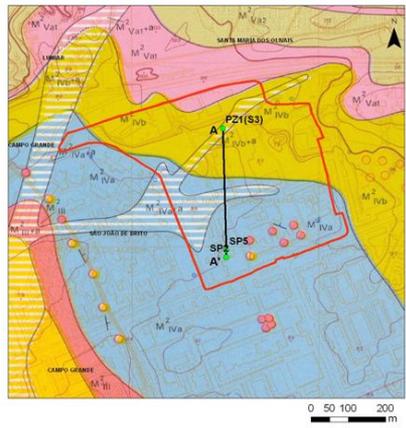
- Interpretação dos ensaios de bombagem: aquífero confinado (Theis e Jacob), aquífero livre (Boulton), aquífero semiconfinado (Hantush) e com efeito de barreira.
- Interpretação do ensaio “slug” (Bower & Rice e Hvorslev).
- Correção do efeito de maré nos rebaixamentos observados no ensaio de bombagem



Ensaio de bombagem para determinação de parâmetros hidráulicos (Alcântara). REFER



### LNEC: Estudo da viabilidade de utilização das águas subterrâneas do campus do LNEC, nomeadamente para abastecimento aos modelos físicos do DHA

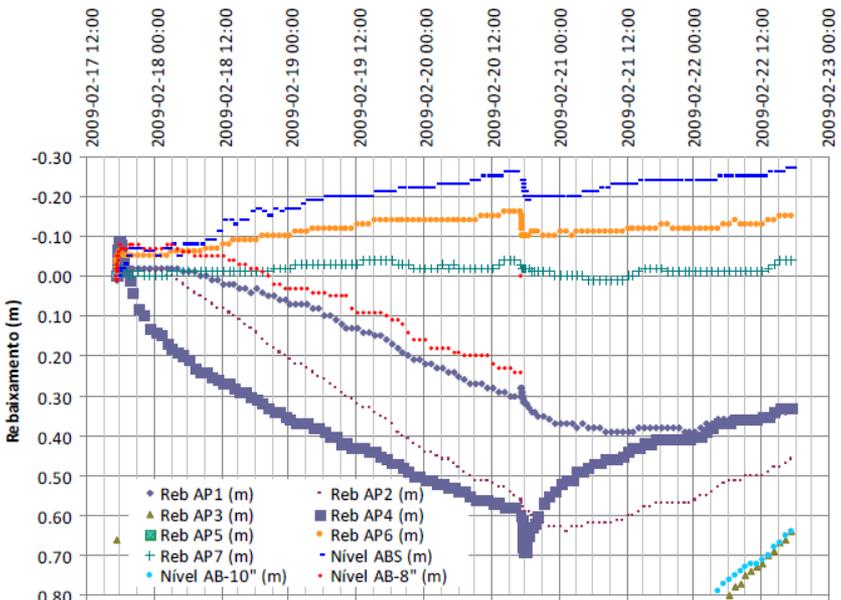


Previsão dos rebaixamentos que ocorreriam no piezômetro P3-2 se não houvesse efeito de maré. Oliveira et al. (2011)

# PIP 2009-2012: Instrumentação, ensaios *in-situ* e em laboratório para suporte à investigação do meio hídrico subterrâneo

## Estudos em sistemas aquíferos Multicamada (NAL, NAER)

- Instrumentação dos piezómetros com sondas de registo automático
- Monitorização de níveis piezométricos em diferentes camadas durante ensaio de bombagem
- Efeito de Noordbergum



Rebaixamento durante o ensaio de bombagem no troço intermédio do furo AB (Oliveira et al., 2009)



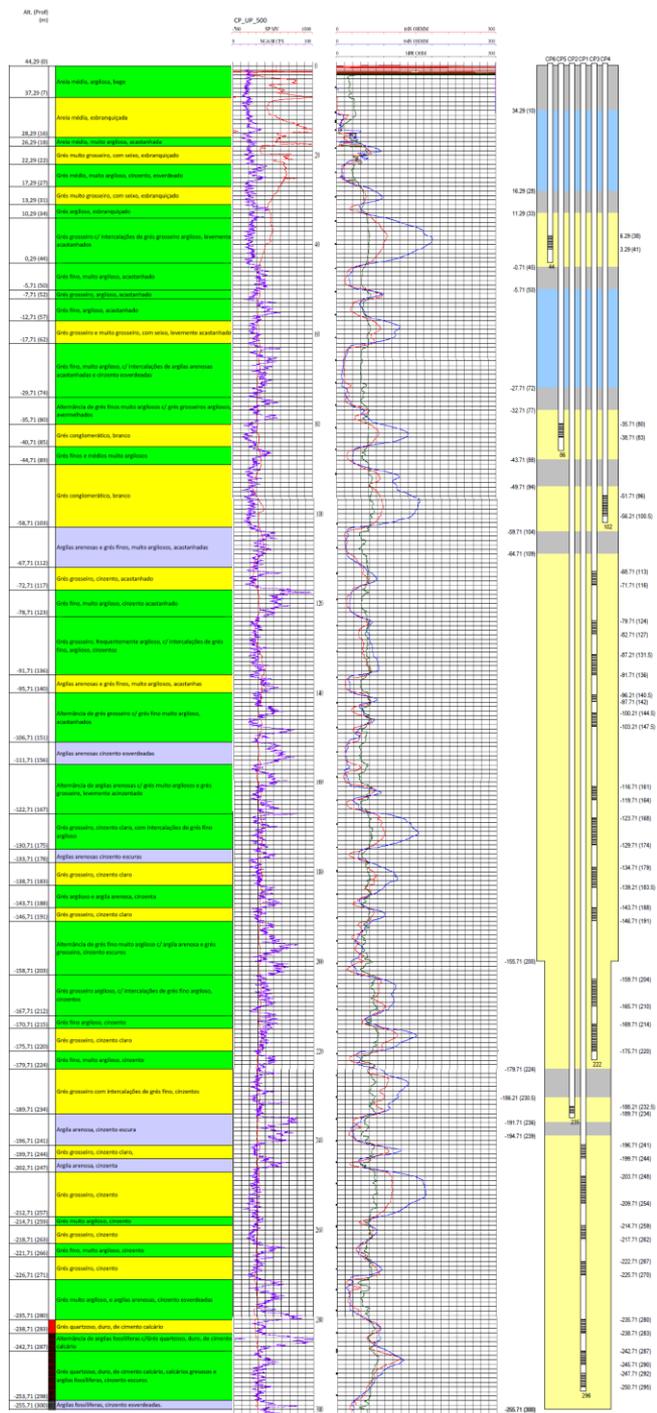
Sondas de registo automático



Aspetto final dos piezómetros AP



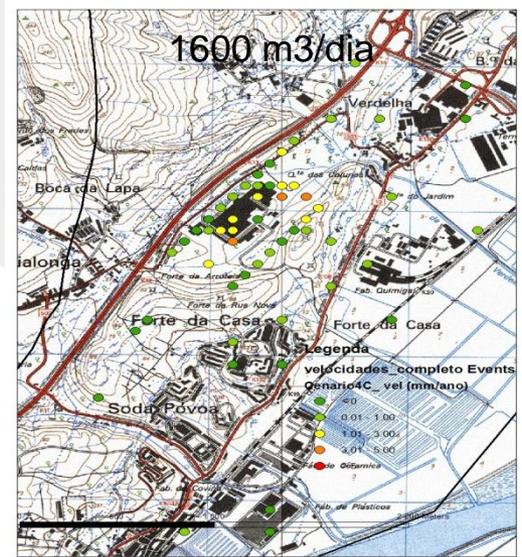
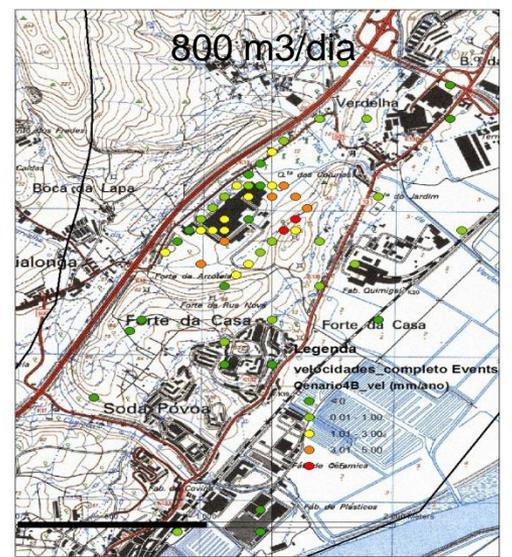
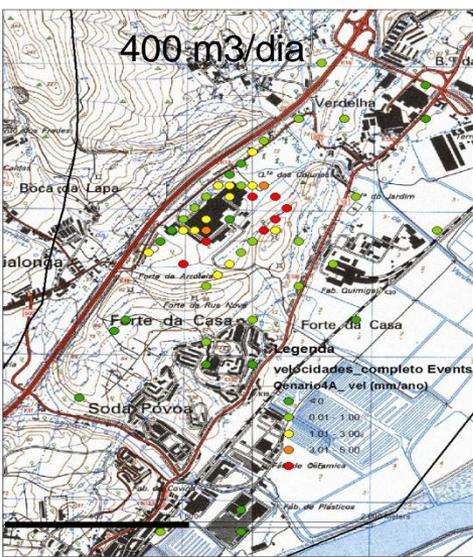
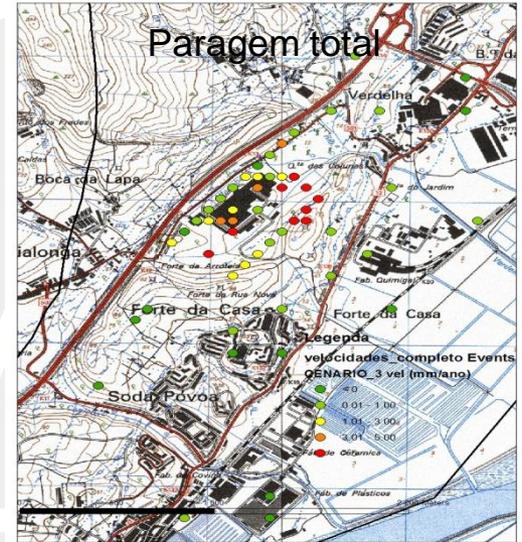
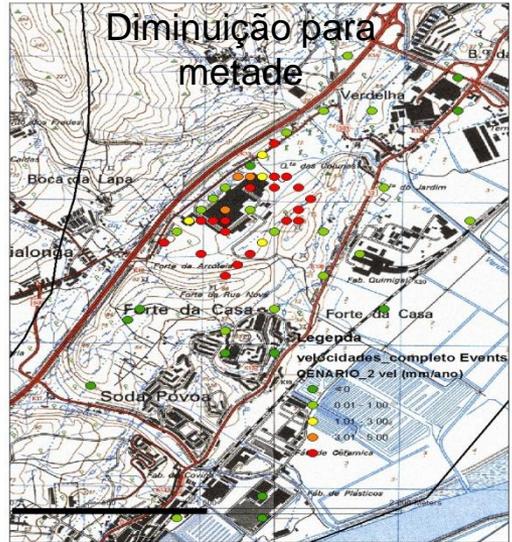
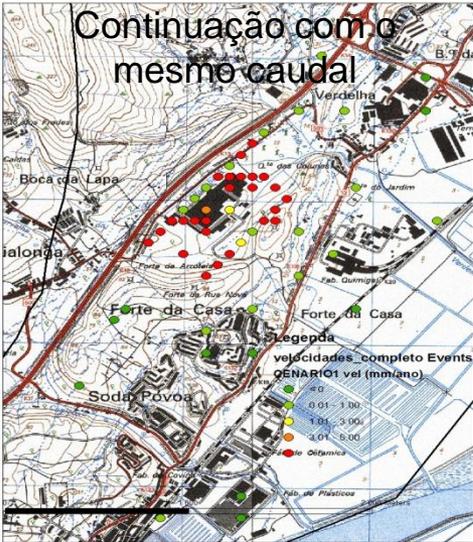
Perfil da sondagem CP com diagrfias e desenho final dos piezómetros (Oliveira et al., 2009)



# Subsidência de terrenos

Vialonga:  
Corrida em regime transitório no período de 2007 a 2015 (Cenários futuros)

## Obras de engenharia e hidrogeologia urbana



## Sumário

- > Introdução ao tema
- > Relação entre a extracção de água subterrânea e a subsidência de terrenos;
- > Apresentação do caso de estudo:
  - Subsidência de terrenos;
  - Extracção de água subterrânea;
  - Enquadramento hidrogeológico;
- > Modelação da piezometria e da subsidência;
- > Considerações finais

LNEC

## Introdução ao tema

- > Subsidência - Rebaixamento irreversível da superfície do terreno;
- > Um problema mundial (por exemplo, na Cidade do México a velocidade de subsidência é de 30 cm/ano);
- > Uma das suas principais causas é a exploração não sustentável de água dos sistemas aquíferos;
- > Possível de ser monitorizado (por exemplo, interferometria de imagem de radar de abertura sintética - InSAR convencional e PSInSAR) e modelado em modelação matemática (por exemplo, pacote SUB do programa MODFLOW).



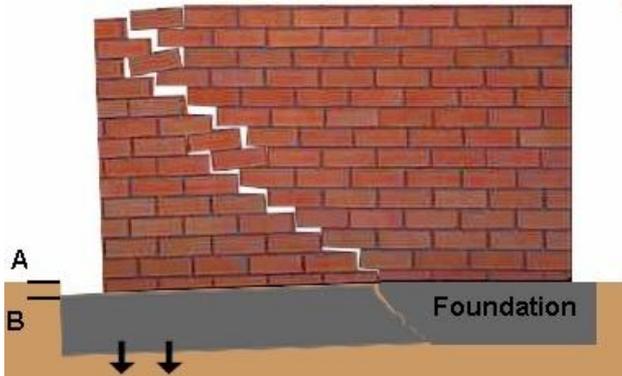


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

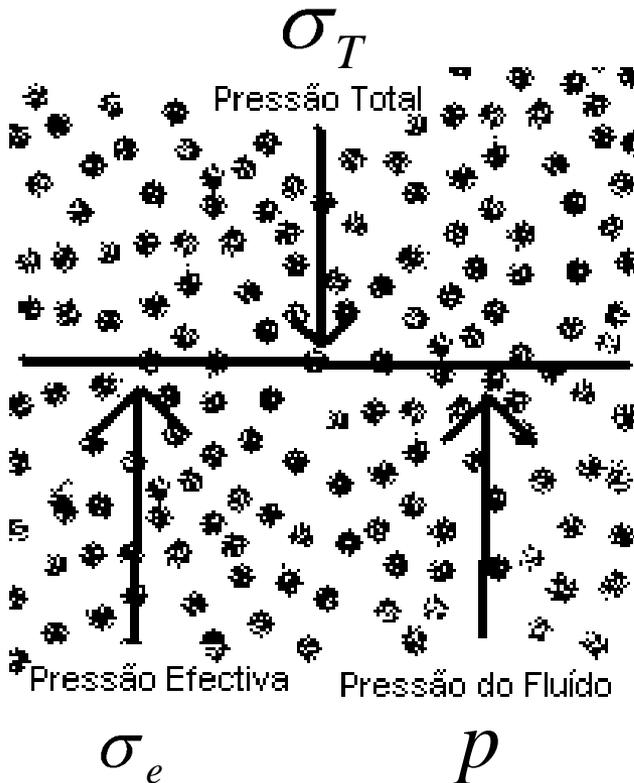


LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# Introdução ao tema



# Relação entre a extracção de água subterrânea e a subsidência de terrenos



$$\sigma_T = \sigma_e + p$$

$$p = \rho g \psi$$

Pressão de um fluido

$$d\sigma_T = 0$$

$$d\sigma_e = -dp = -\rho g d\psi = -\rho g dh$$

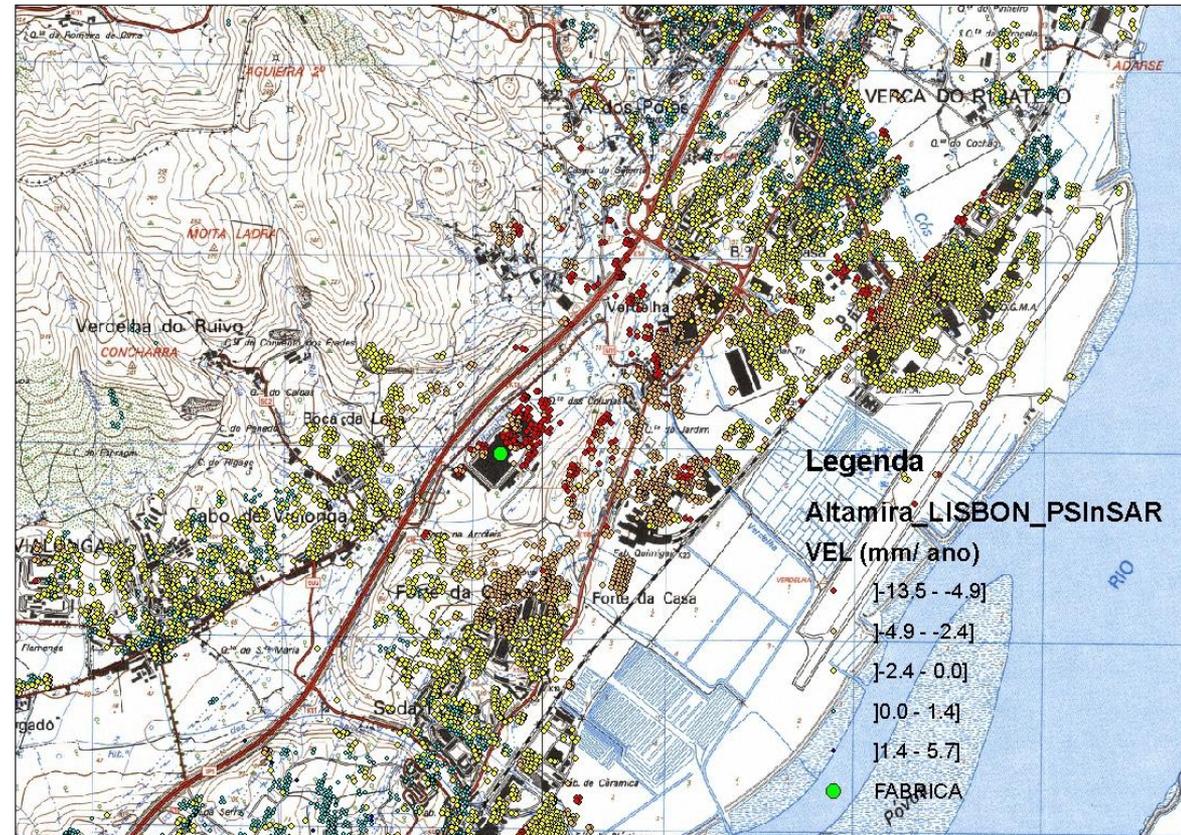
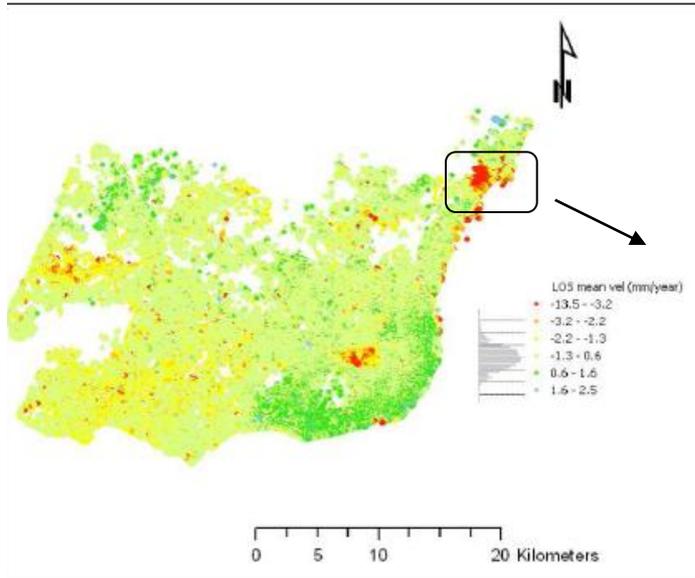
$$\alpha = \frac{-db/b}{d\sigma_e}$$

Compressibilidade de um material geológico

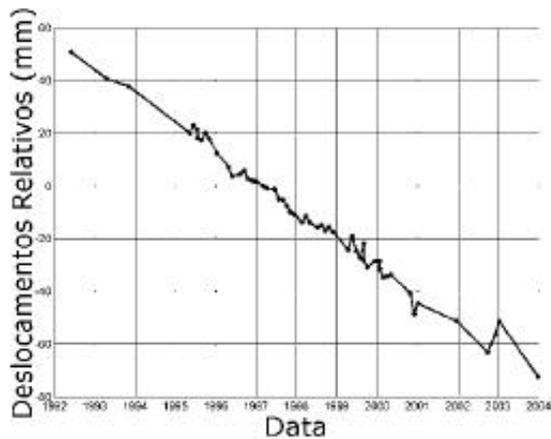
$$db = \alpha b d\sigma_e = \alpha b \rho g dh$$

Variacção espessura da camada

# Caso estudo – Zona industrial de Vialonga (Subsidência)



Fonte: Agência ALTAMIRA (período 1992-2006)



# Extracção de água subterrânea e rebaixamento do nível piezométrico

Extracção conjunta em 1997 das fábricas da

SCC + Solvay Portugal + CUF Adubos de Alverca foi de 1 400 000 m<sup>3</sup>

Fonte: Plano Bacia Hidrográfica do Rio Tejo (2000)

A produção de uma tonelada de um produto químico exige 7 m<sup>3</sup> de água

Cada litro de cerveja produzida = 5 a 7 litros de água

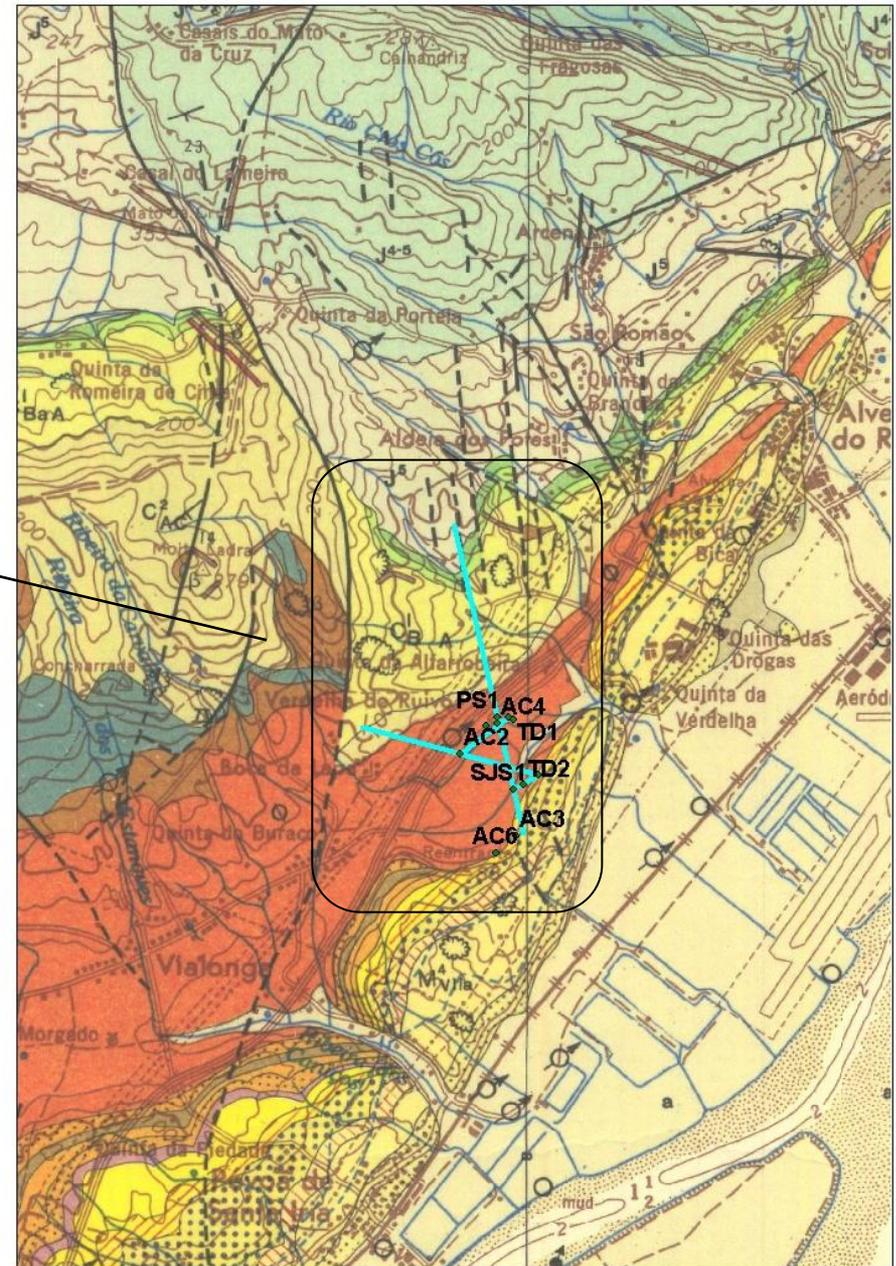
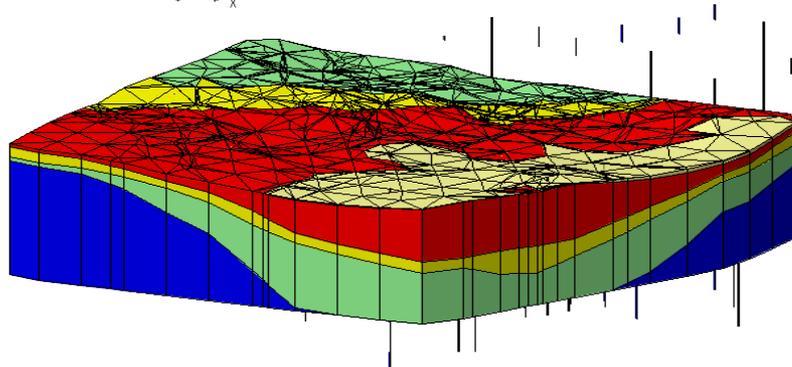
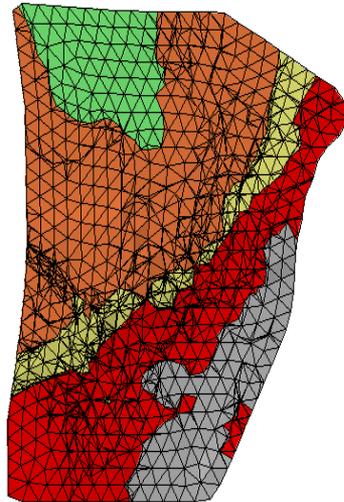
Furo	Ano	Nível piezométrico estático (m)
AC1	03-03-1978	5
AC3	27-06-1983	3,68
Fab1	28-08-1987	2,2
HO-1A	31-10-1989	-0,35

Furo	Ano	Nível piezométrico estático (m)
AC1	03-03-1966	21
	25-06-1993	-44
AC2	20-06-1966	22,2
	25-06-1993	-37,8
TD1	22-01-1981	9,5
	19-07-1983	-5
	25-06-1993	-35,3
TD2	10-08-1986	-10,7
	25-06-1993	-35 <sup>11/19</sup>



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

# Geologia do caso de estudo





## Falhas

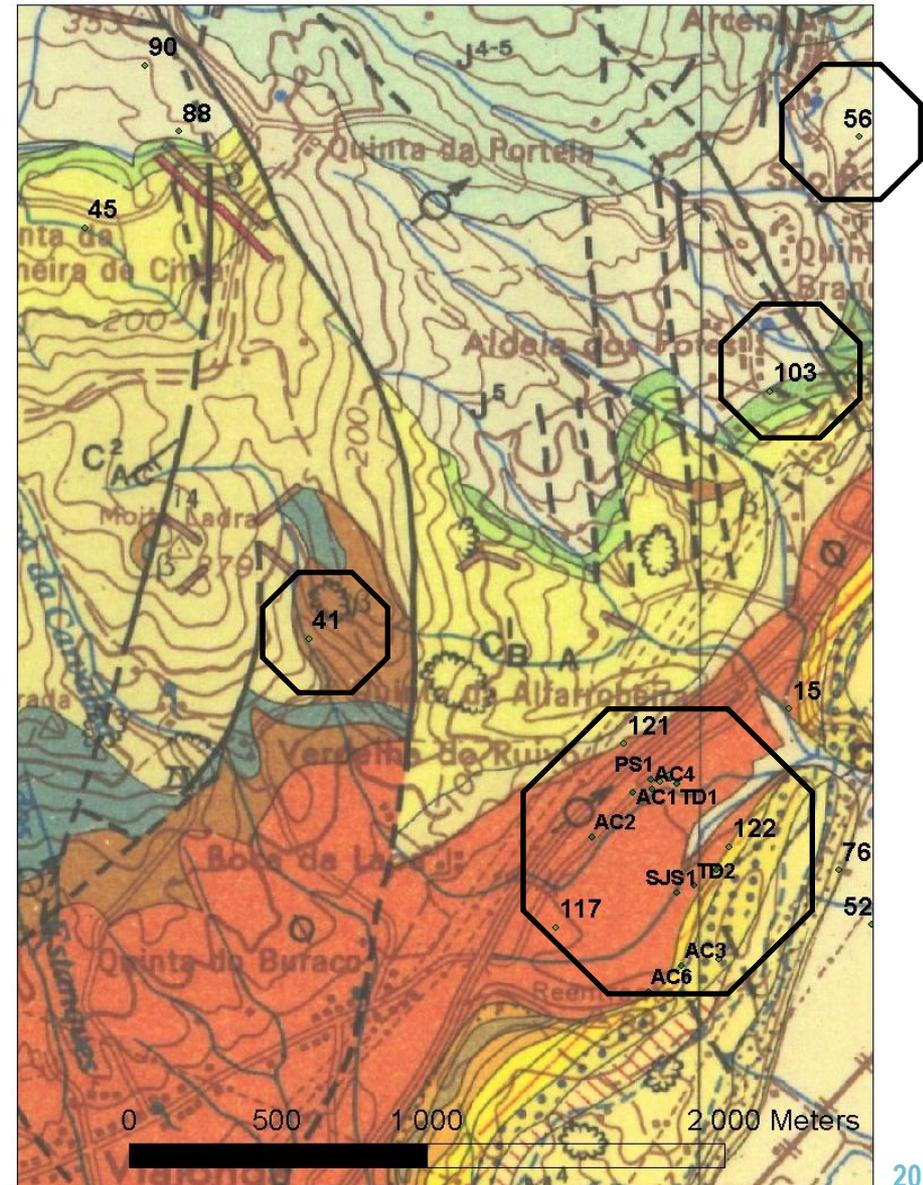
ID	Data	Prof_Furo (m)	Litologia captada	Nivel (m)
41	1995	103	Cretácico	124,9
AC1	1993	266	Cretácico	-40
AC2	1993	282	Cretácico	-37.8

ID	Data	Prof_Furo (m)	Litologia captada	Nivel (m)
56	2004	150	Jurássico	60
103	2001	150	Jurássico	-5
AC6	2001	670	Jurássico	-98

## Recarga

Considerou-se uma recarga média de 30 mm/ano.

(Precipitação média de 600 mm/ano, Evapotranspiração real de 480 mm/ano)





INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

# Metodologia de modelação



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

> Os passos seguidos na metodologia foram os seguintes:

- Desenvolvimento de um modelo conceptual simples do caso de estudo;
- Corrida do modelo em estado estacionário, utilizando o programa MODFLOW e a interface Visual MODFLOW;
- Corrida do modelo em estado transitório para os passos temporais previamente definidos (de 1966 a 1993 e de 1993 a 2007) com o programa atrás referido e o seu pacote de subsidência (SUB);
- Calibração do modelo com dados reais;
- Corrida do modelo em estado transitório para cenários futuros (de 2007 a 2015), com os programas atrás referidos.

> Os cenários futuros adoptados:

- a) Os furos não param e mantêm-se os mesmos valores de caudal de extracção;
- b) Os furos diminuem a sua extracção para metade e há um isolamento dos ralos nas zonas mais afectadas pela compactação;
- c) Todos os furos param de extrair;
- d) Os furos param de extrair e existe uma injeção por recarga artificial na zona mais afectada pelo problema (fábrica da SCC).

**Programa utilizado para modelação  
matemática de fluxo de água subterrânea :**

**MODFLOW 2000 (interface Visual MODFLOW)**

**Programa utilizado para modelação  
matemática de subsidência:**

**SUB (interface Visual MODFLOW)**

15/19

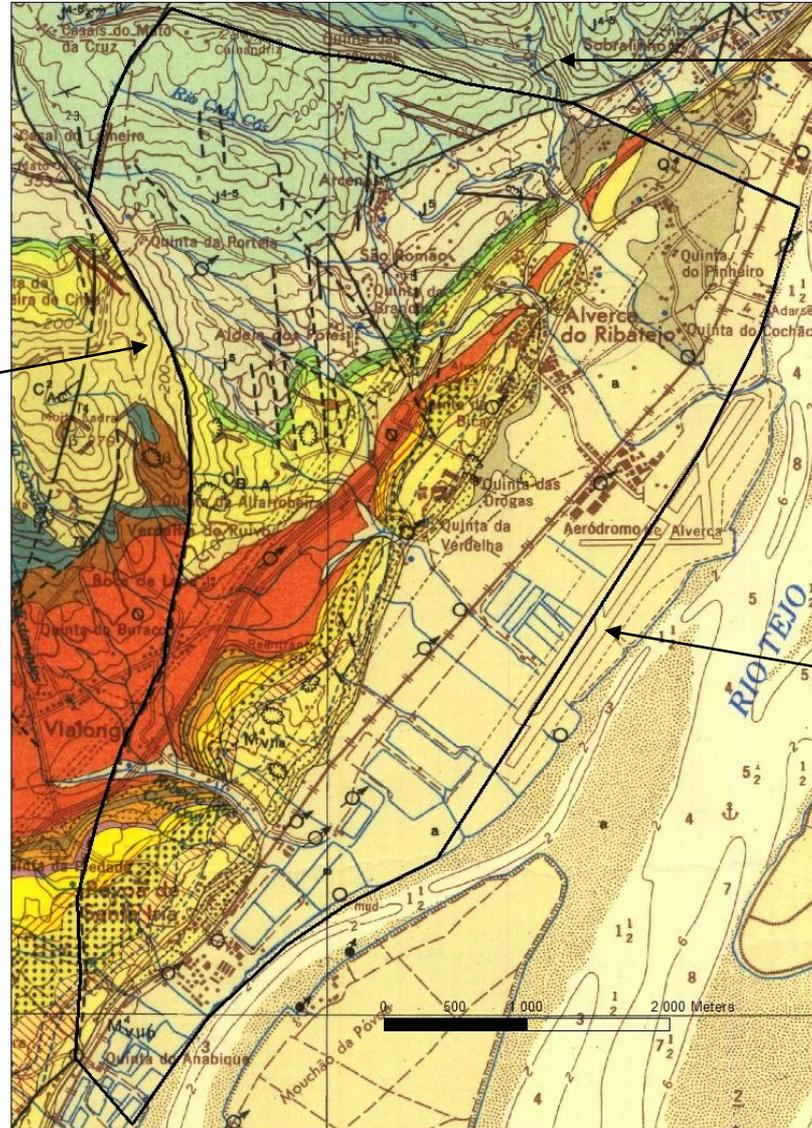
# Modelação – Estrutura do modelo

Falha

## Malha MODFLOW

Área modelada:  
22,74 km<sup>2</sup>, que foi  
dividida em 94 linhas e 75  
colunas.

6 camadas com  
espessura variável

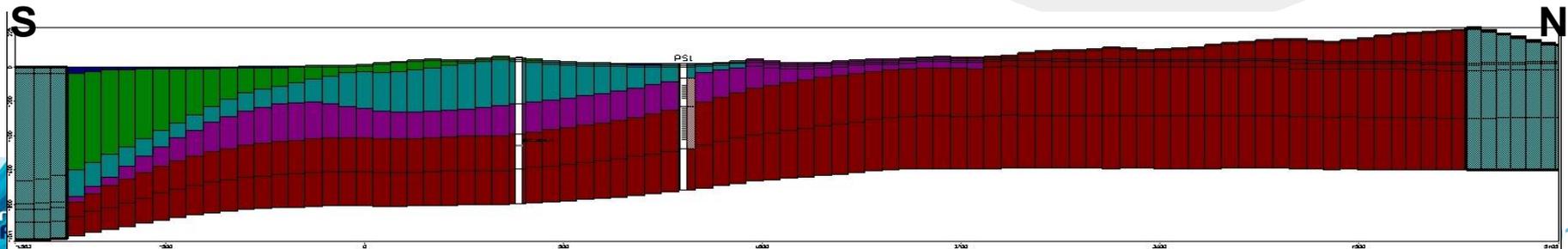


Cumeada

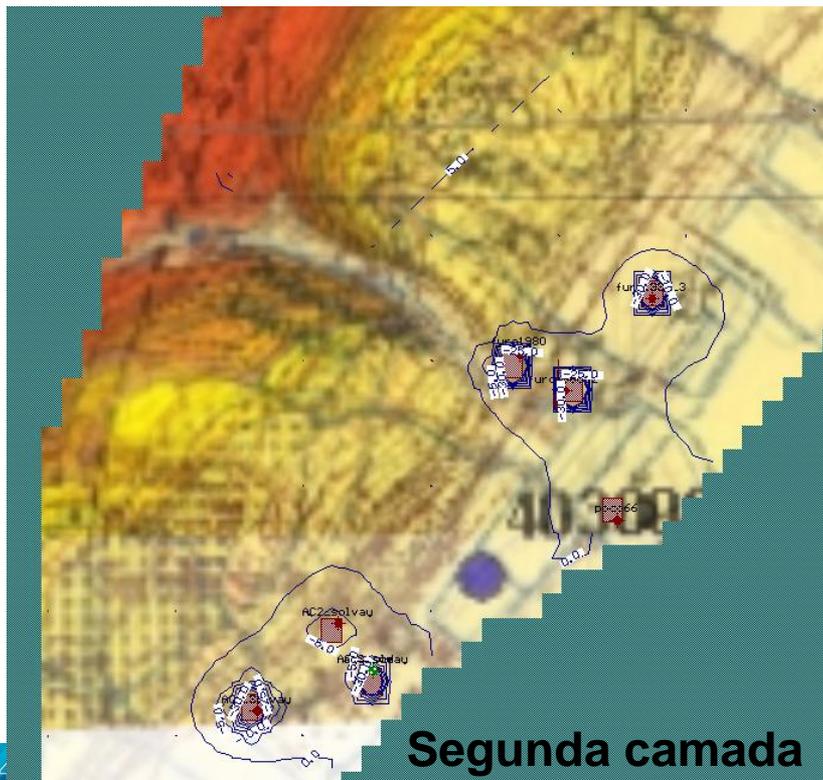
Falha identificada por  
sísmica de reflexão  
(Carvalho *et al.*, 2008)

# Modelação - Características das camadas do modelo

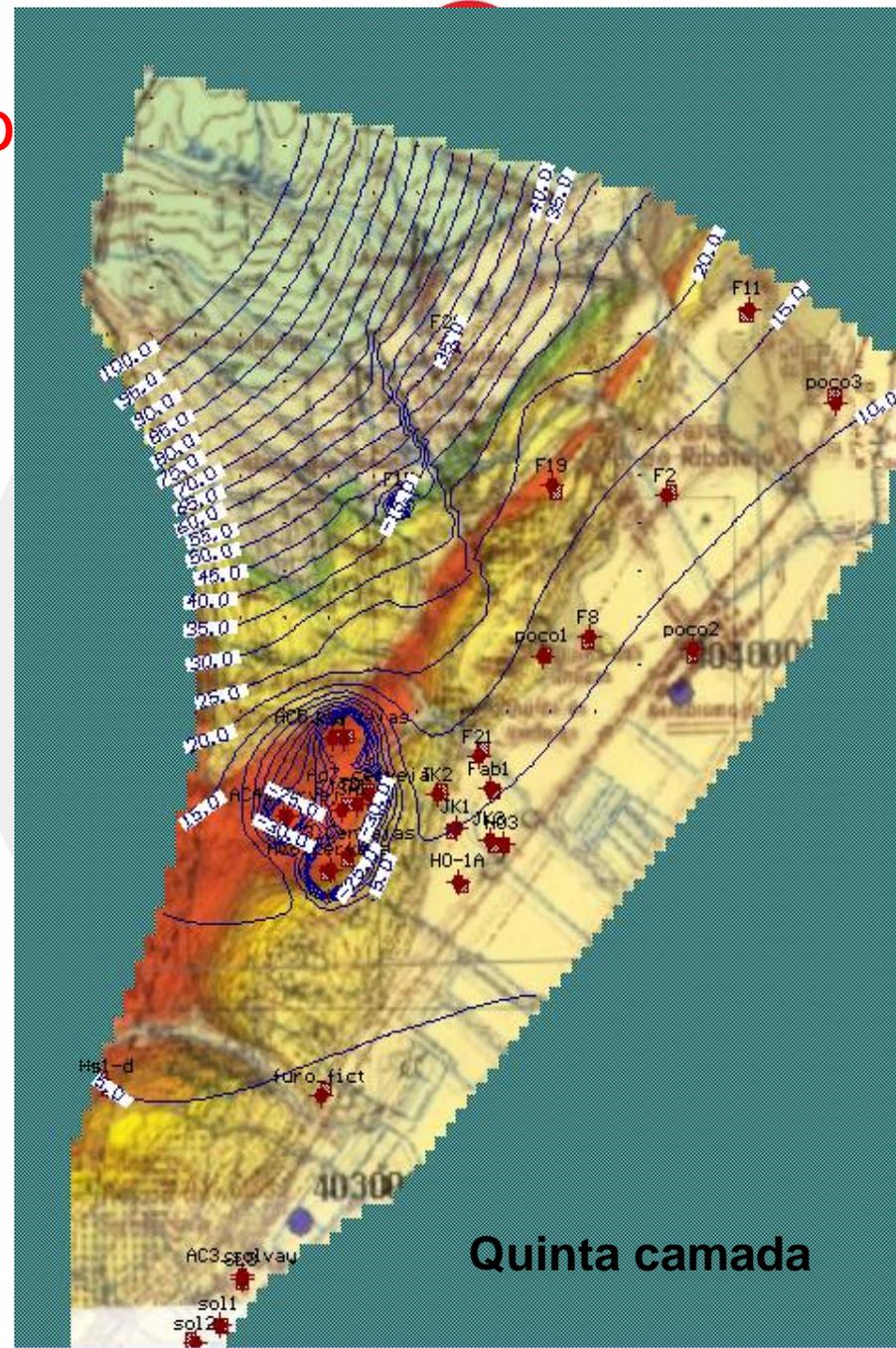
Unidades geológicas identificadas	Nome designado e considerado no modelo	Condutividade Hidráulica Horizontal (m/ dia)	Coefficiente de armazenamento específico elástico (m/dia)
<b>Secundário</b> Urgoniano Jurássico	Jurássico	5,5 E -1	5,4 E -5
<b>Secundário</b> Aptiano – Albiano	Aptiano/Albiano	5,0 E -2	1,2 E -7
<b>Secundário</b> Cenomaniano <b>Terciário</b> Oligocénico	Oligocénico	1,0 E -6	4,9 E -6
<b>Terciário</b> Miocénico	Miocénico	5,0 E -1	1,2 E -6
<b>Quaternário</b>	Quaternário	1,0 E 1	9,8 E -8



# Resultados – Regime transitório no período de 1993 a 2007 (período de dados PSInSAR) Piezometria



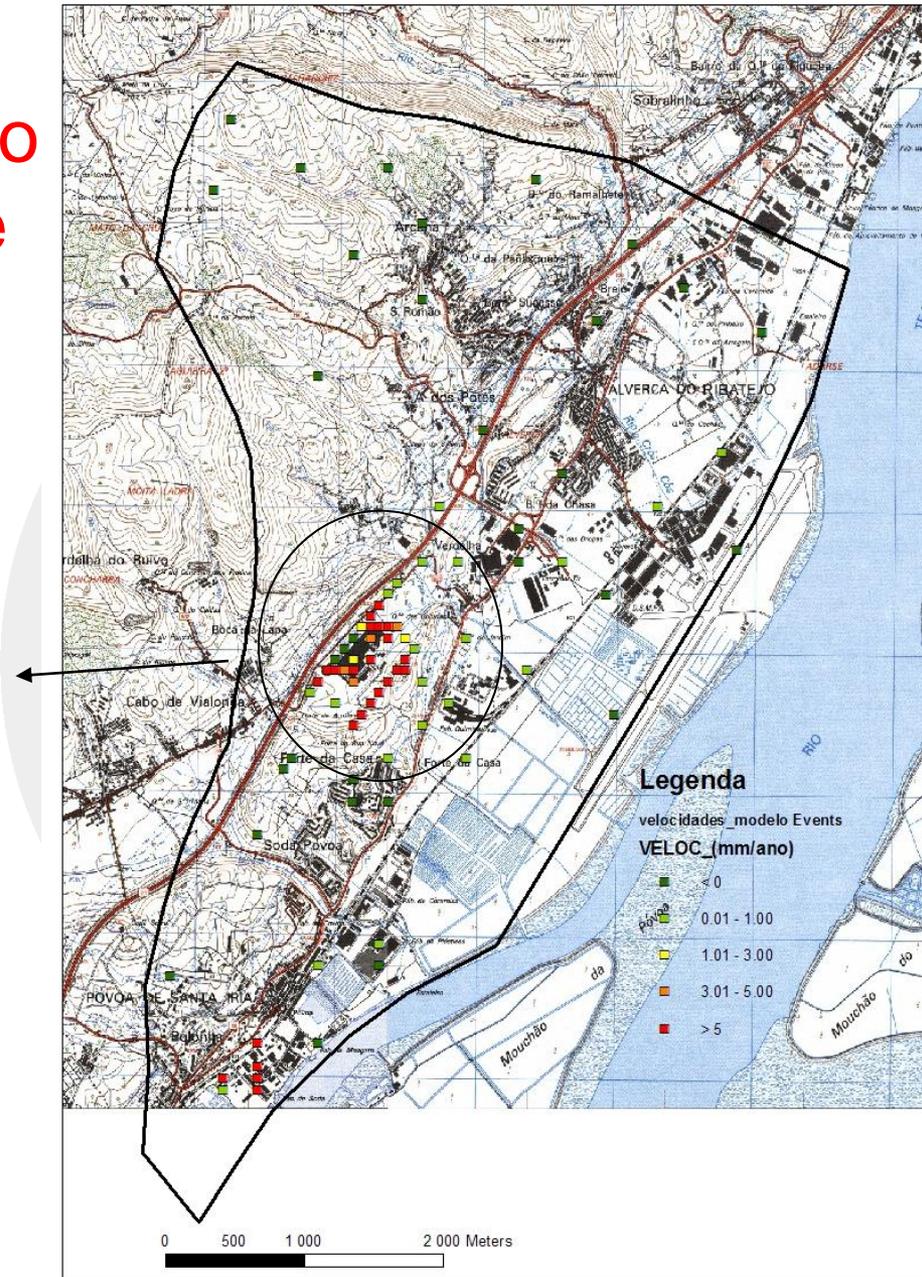
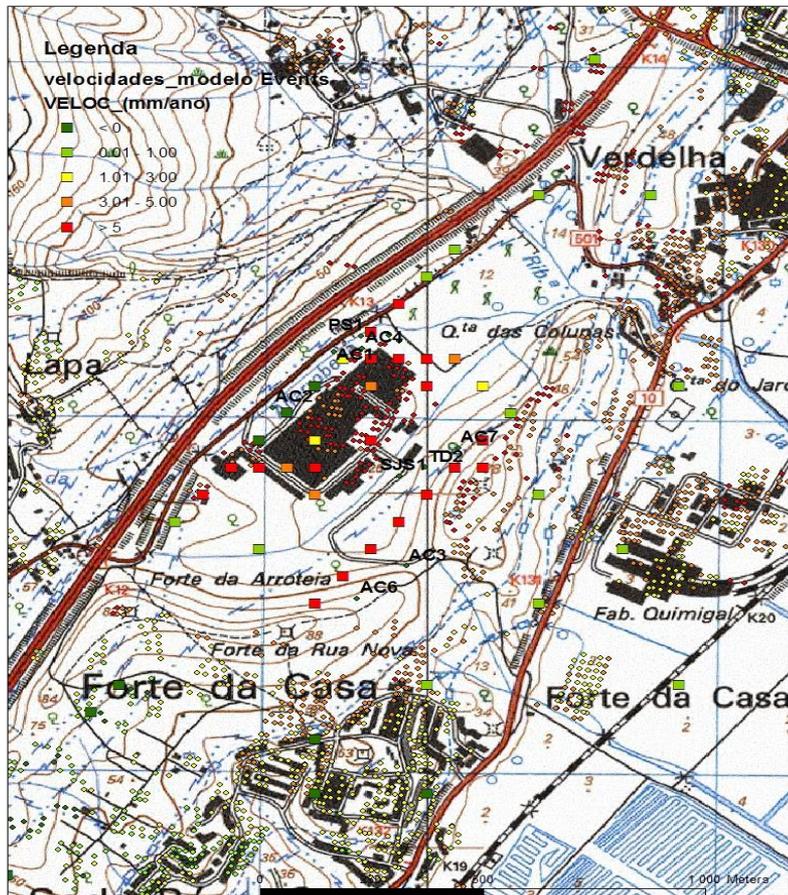
**Segunda camada**



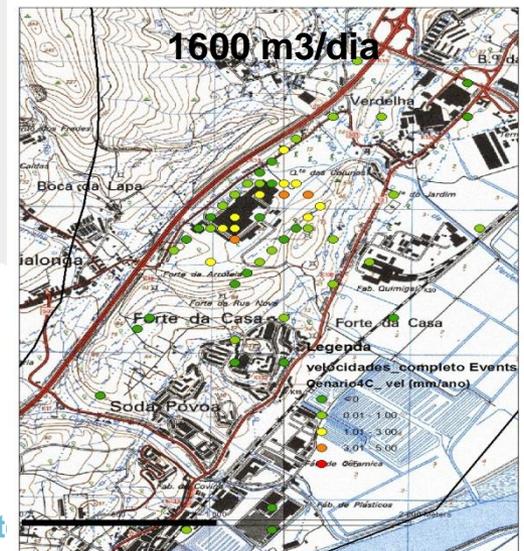
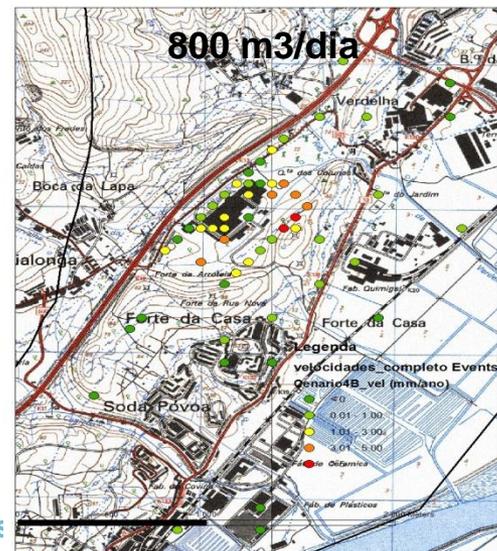
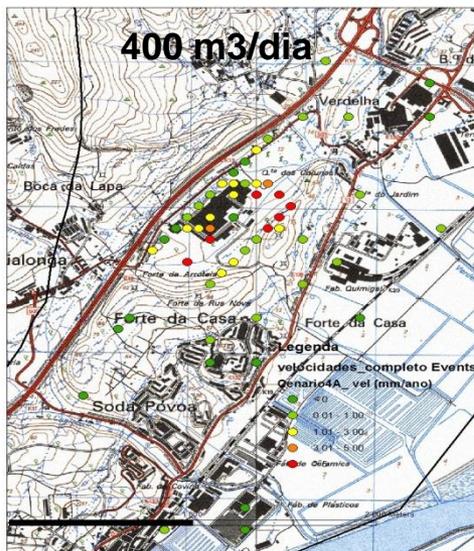
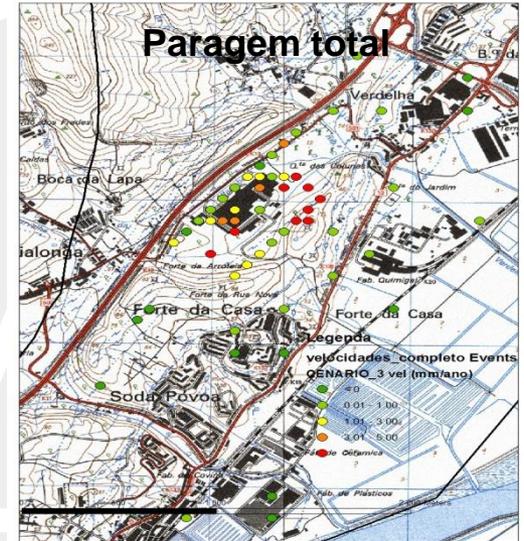
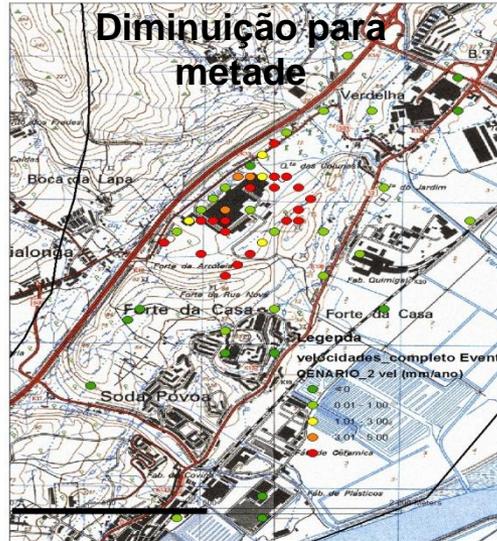
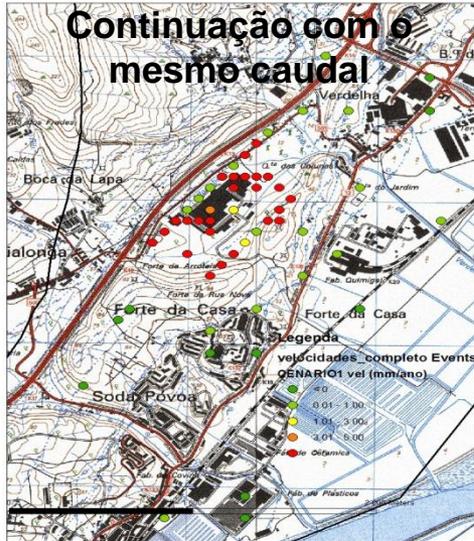
**Quinta camada**



# Resultados – Regime transitório no período de 1993 a 2007 (período de dados PSInSAR) Subsidência



## Corrida em regime transitório no período de 2007 a 2015 (Cenários futuros)



**Em relação à modelação do fluxo e subsidência do caso de estudo em Vialonga verifica-se que:**

- > Durante a calibração obtiveram-se valores de condutividade hidráulica horizontal diferentes dos esperados;
- > Os valores de subsidência modelados são aproximadamente iguais aos valores obtidos por PSInSAR;
- > A subsidência abranda com a paragem total da extracção e, como tal, tem de ser a medida considerada prioritária para uma análise mais pormenorizada.

**Como passos a seguir para o problema apresentado destaca-se os seguintes:**

- > Continuação da monitorização: a) da subsidência e b) dos níveis de água subterrânea;
- > Melhoramento do modelo através de dados mais precisos sobre as características dos materiais geológicos, nomeadamente relativos: a) à condutividade hidráulica, b) à porosidade, c) aos coeficientes de armazenamento.

**Destaca-se que o estudo efectuado pela componente das águas subterrâneas do projecto SUBSIn, um estudo metodológico, irá permitir auxiliar outros estudos ou projectos que envolvam a modelação de subsidência de terrenos devido à exploração não sustentável de água subterrânea.**

# Obrigado pela vossa atenção

## AGRADECIMENTOS

- Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento no âmbito da qual se desenvolveu, no LNEC e IST, o trabalho que se apresenta nesta comunicação.
- Agradece-se a colaboração da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR – Lisboa e Vale do Tejo) pelos dados fornecidos da região de Vialonga.
- Agradece-se ao Doutor João Carvalho do INETI o fornecimento dos dados de sísmica de reflexão e, ainda, da sua tese de Doutoramento em formato PDF.

