

# Classificação do Comportamento Sísmico dos Solos da Cidade de Lisboa

Liliana Oliveira<sup>1</sup>

Paula Teves Costa<sup>1,2,3</sup>

Rui Carrilho Gomes<sup>4</sup>

Isabel Moitinho de Almeida<sup>3</sup>

Cláudia Pinto<sup>5</sup>

Carlos Ferreira<sup>6</sup>

<sup>1</sup>CERU - Centro Europeu de Riscos Urbanos / CML

<sup>2</sup>IDL – Instituto Dom Luiz da Universidade de Lisboa

<sup>3</sup>FCUL – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

<sup>4</sup>IST – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

<sup>5</sup>DMGP/DC - Direção Municipal de Gestão Patrimonial / Divisão de Cadastro - CML

<sup>6</sup>DSI/DGIG – Departamento de Sistemas de Informação / Divisão de Gestão de Informação Georeferenciada – CML



# Objectivo

- Caracterizar o comportamento sísmico dos terrenos de Lisboa com base na sua classificação de acordo com o EC8

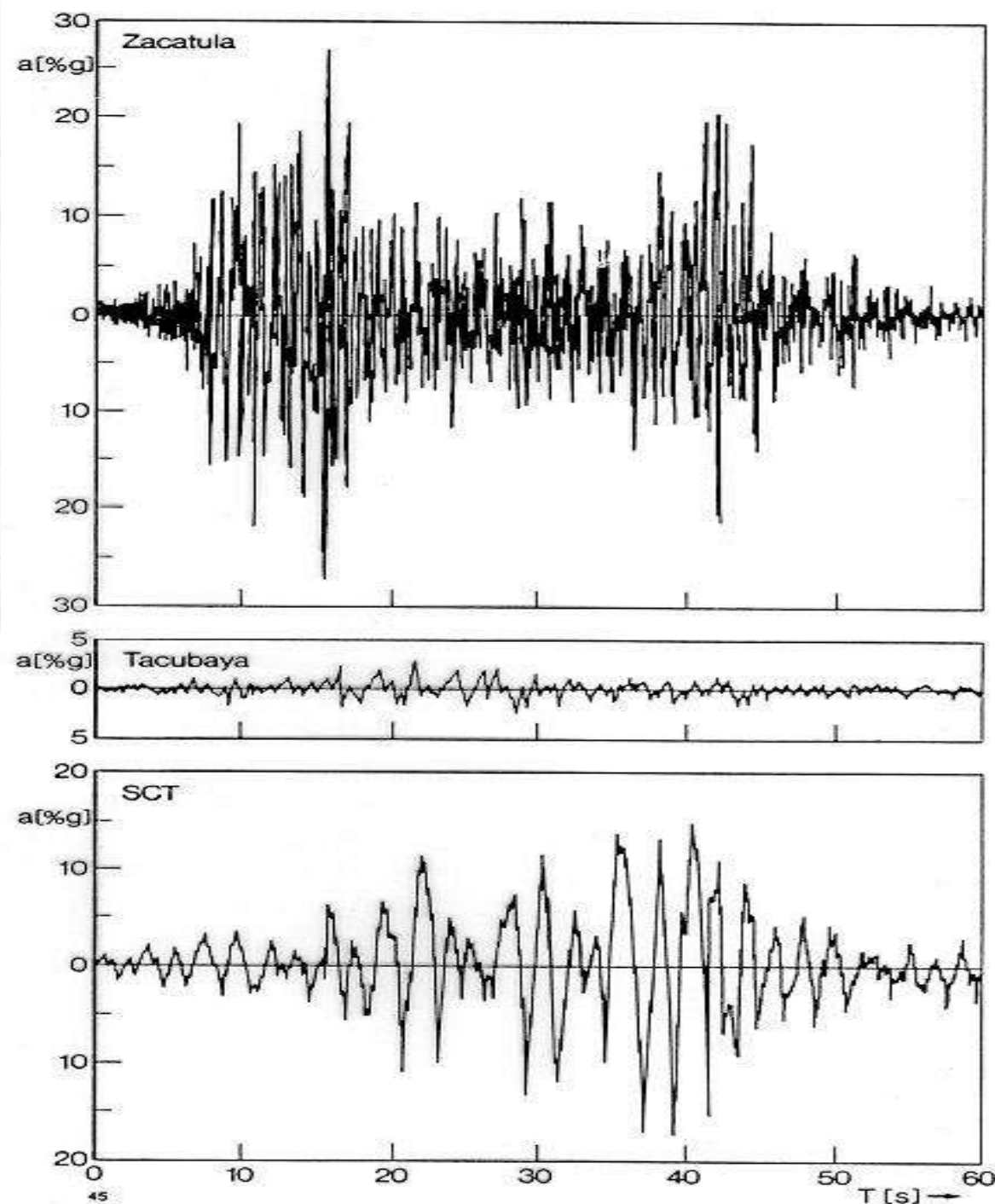
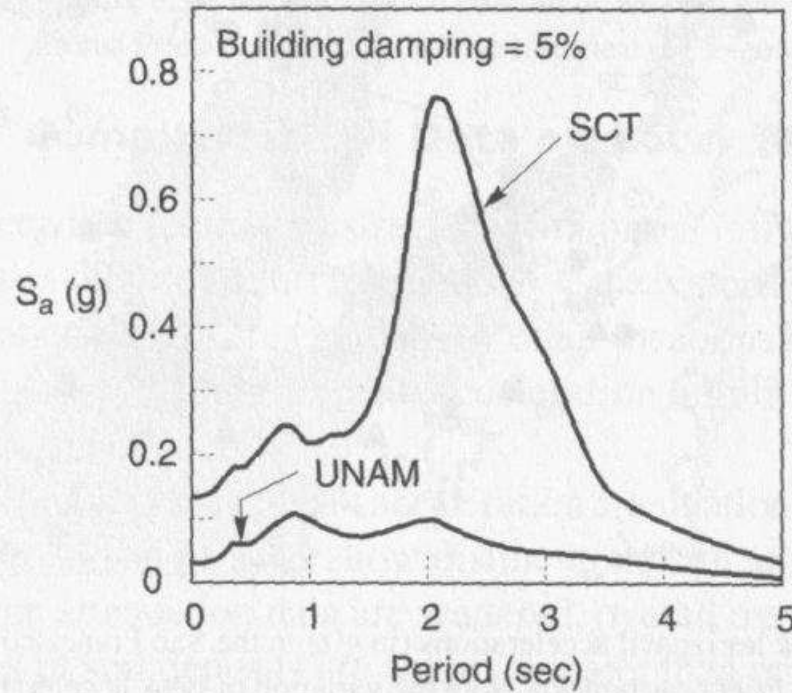
## Importância (?)



# Importância (?)

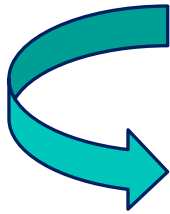
P.e., Sismo de Michoacan (México, 1985)

- Amplificação do movimento sísmico à superfície
- Concentração da energia em determinadas frequências (→ fenômenos de ressonância)



# Dados iniciais

- Classificação dos solos EC8 baseada em valores de  $V_{s,30}$  e de  $N_{SPT}$
- Carta geológica do Concelho de Lisboa 1:10 000



Quadro 3.1 – Tipos de terreno

Tipo de terreno	Descrição do perfil estratigráfico	Parâmetros		
		$v_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (palcadas/30 cm)	$c_u$ (kPa)
A	Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material mais fraco à superfície	> 800	–	–
B	Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade	360 – 800	> 50	> 250
C	Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixo (cascalho) ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Depósitos de solos não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura	< 180	< 15	< 70
E	Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial com valores de $v_s$ do tipo C ou D e uma espessura entre cerca de 5 m e 20 m, situado sobre um estrato mais rígido com $v_s > 800$ m/s			
$S_1$	Depósitos constituídos ou contendo um estrato com pelo menos 10 m de espessura de argilas ou siltes moles com um elevado índice de plasticidade ( $PI > 40$ ) e um elevado teor de água	< 100 (indicativo)	–	10 - 20
$S_2$	Depósitos de solos com potencial de liquefacção, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terreno não incluído nos tipos A – E ou $S_1$			

(2) O terreno deverá ser classificado de acordo com o valor da velocidade média das ondas de corte,  $v_{s,30}$ , se disponível. Caso contrário, deverá utilizar-se o valor de  $N_{SPT}$ .

(3) A velocidade média das ondas de corte  $v_{s,30}$  deverá ser calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}}$$

# Carta geológica do Concelho de Lisboa 1:10 000

- Geologia superficial
- Composição litológica e idade das formações geológicas (litoestratigrafia)
- A maior parte dos terrenos são do Miocénico (areias, areolas, arenitos, argilas, calcários)
- Os terrenos mais antigos são constituídos por calcários e margas do Cretácico e pelo CVL (rochas vulcânicas)

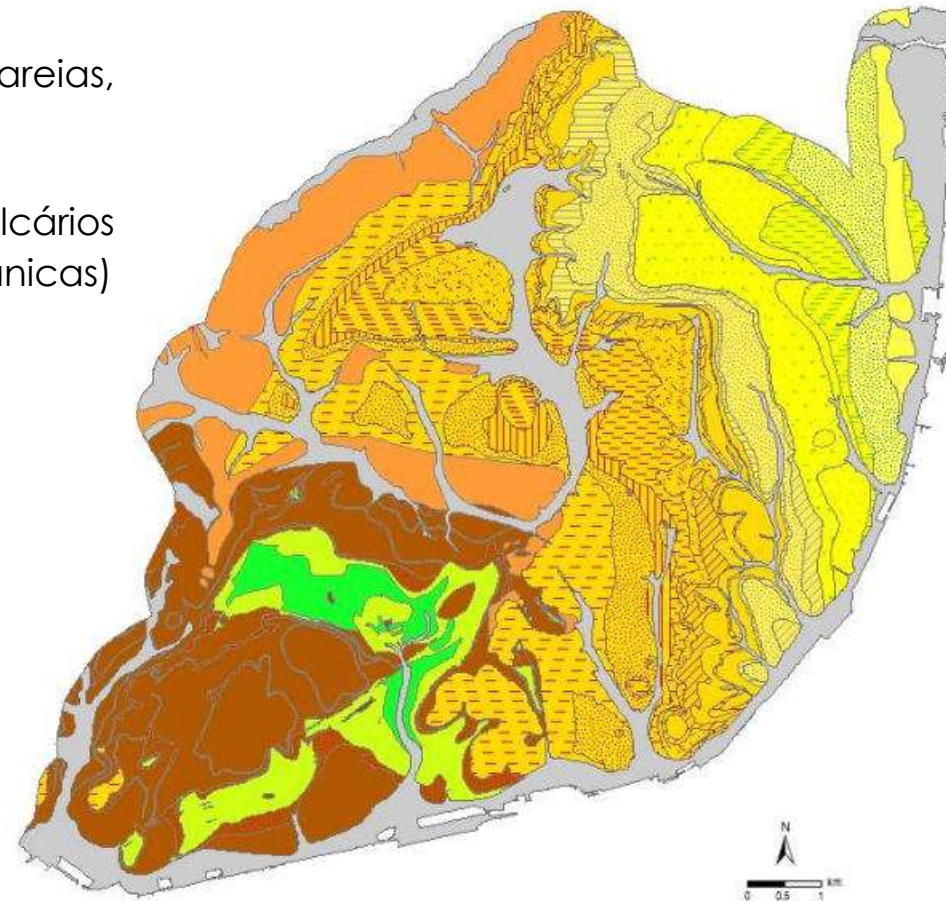
➔ Agrupamento das diferentes formações geológicas em formações de rocha dura, rochas brandas, solos rijos e formações de cobertura (aluviões e aterros)

↓  
Zonamento do terreno nas 4 classes do EC8 (A, B, C e D)

↓  
**Classificação preliminar dos solos (1ª Zonagem)**

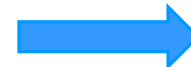
## Carta Geológica do Concelho de Lisboa

Escala 1:10 000



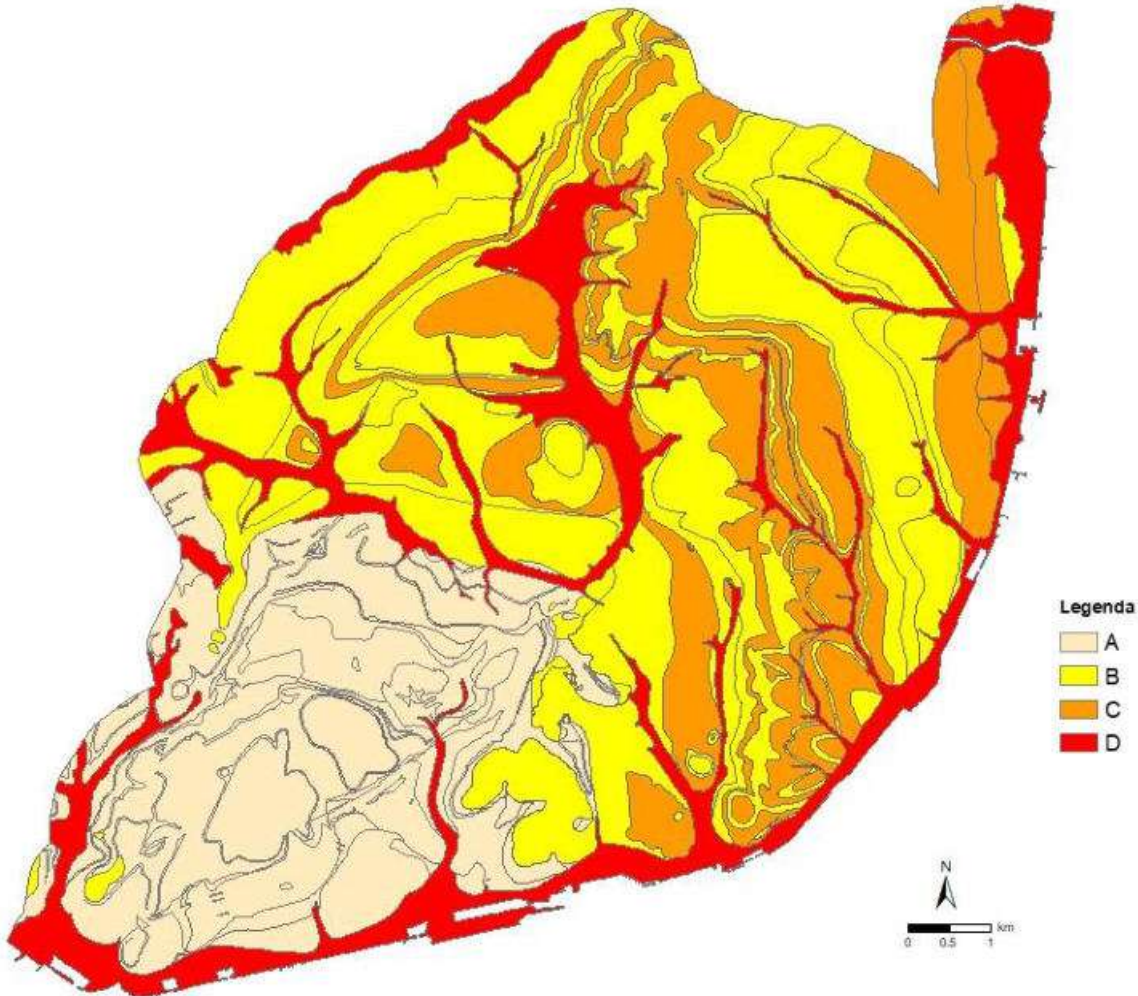
### Legenda

- Aluviões e/ou aterros
- Formação das Areolas de Cabo Ruivo (MVIt)
- Formação das Areolas de Braço de Prata (MVIta)
- Formação dos Calcários de Marvila (MVItc)
- Formação dos Grés de Grilos (MVItb)
- Formação das Argilas de Xabregas (MVIta)
- Formação dos Calcários de Quinta das Conchas (MVItc)
- Formação das Areias de Vale de Chelas (MVItb)
- Formação dos Calcários de Musgueira (MVIta)
- Formação das Areias com Placuna miocénica (MVIta2)
- Formação das Areias com Placuna miocénica (MVIta2): intercalações calcárias
- Formação dos Calcários de Casal Vistoso (MVIta1)
- Formação das Areias de Quinta do Bacalhau (MVItb)
- Formação das Argilas de Forno do Tijolo (MVIta)
- Formação dos Calcários de Entrecampos ("Banho Real") (MVItc)
- Formação das Areolas de Estefânia (MII)
- Formação das Argilas dos Prazeres (MI): argilites e calcários
- Formação de Benfica: conglomerados, arenitos e argilites
- Formação de Benfica: intercalações calcárias (Calcários de Alfornelos)
- Complexo Vulcânico de Lisboa
- Complexo Vulcânico de Lisboa: rochas piroclásticas
- Piões e chaminés de basalto
- Formação da Bica: calcários com rudistas
- Formação de Canegas: calcários, margas, arenitos e dolomitos



# Classificação preliminar – 1ª zonagem

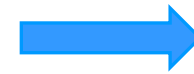
Classificação preliminar dos solos (1ª Zonagem)

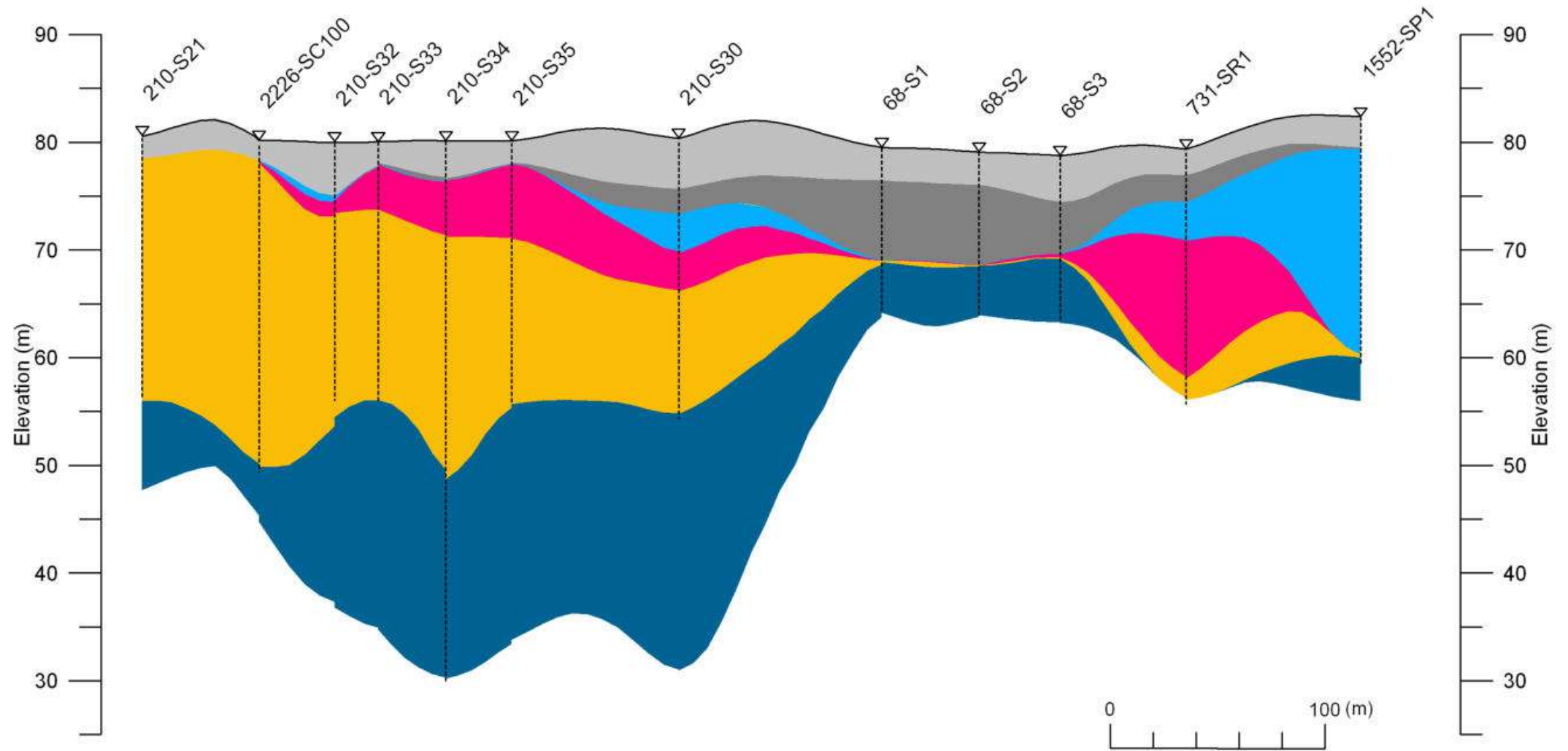


## Limitações

- Só fornece informação sobre a geologia superficial
  - Não contempla a grande heterogeneidade litológica e a variabilidade de ponto.
  - Não caracteriza o perfil de terreno EC8 (composição e estrutura do terreno até 30 m de profundidade – desconhecimento de valores de Vs)

P.e.



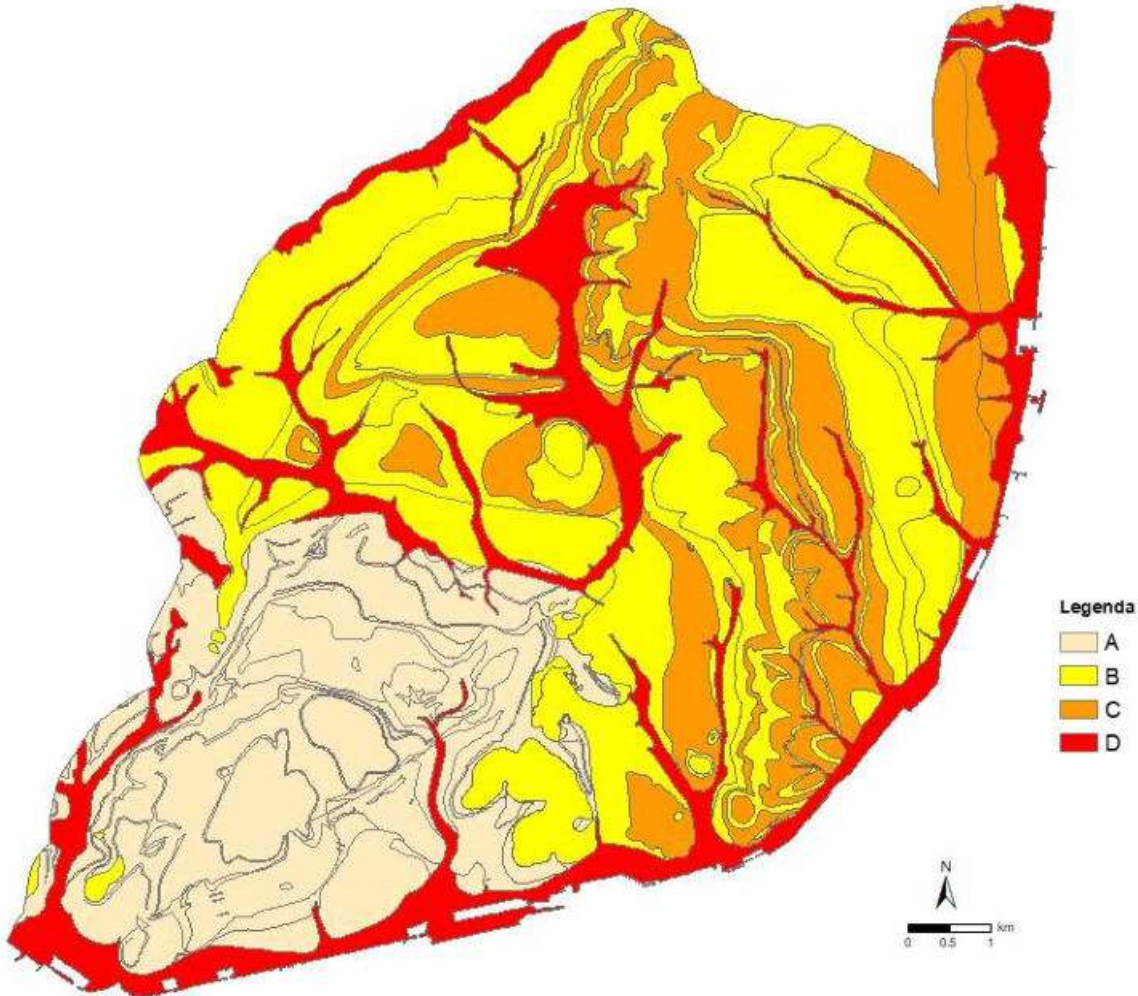


## Corte geológico exemplificativo



# Classificação preliminar – 1ª zonagem

Classificação preliminar dos solos (1ª Zonagem)



## Limitações

- Só fornece informação sobre a geologia superficial
  - Não contempla a grande heterogeneidade litológica e a variabilidade de ponto.
  - Não caracteriza o perfil de terreno EC8 (composição e estrutura do terreno até 30 m de profundidade – desconhecimento de valores de Vs)
- A cartografia das formações superficiais (aluviões e aterros) está limitada ao traçado das antigas ribeiras de Lisboa e à zona ribeirinha
  - Não contempla as alterações devidas às construções urbanas nem identifica a existência de aterros (ou escavações) devidos à exploração de antigas pedreiras e areiros

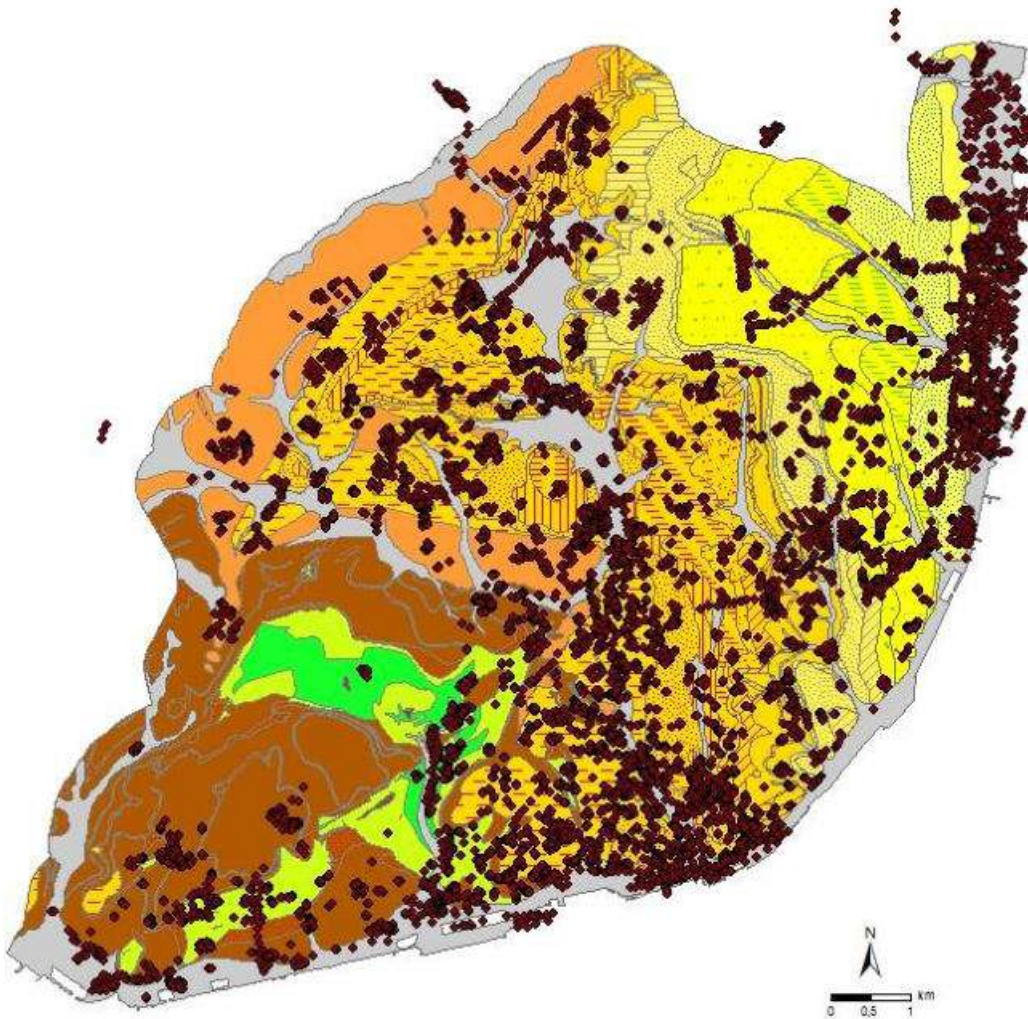
**Necessidade de pesquisar informação adicional**





# Metodologia → Recurso à Base de Dados Geotécnicos da CML

Base de dados geotécnicos da CML  
(8792 sondagens 1935-2016)



➔ **Desenvolveu-se um algoritmo para estimar  $N_{SPT30}$  (proxy de  $V_{S30}$ ) e classificar os terrenos de Lisboa**

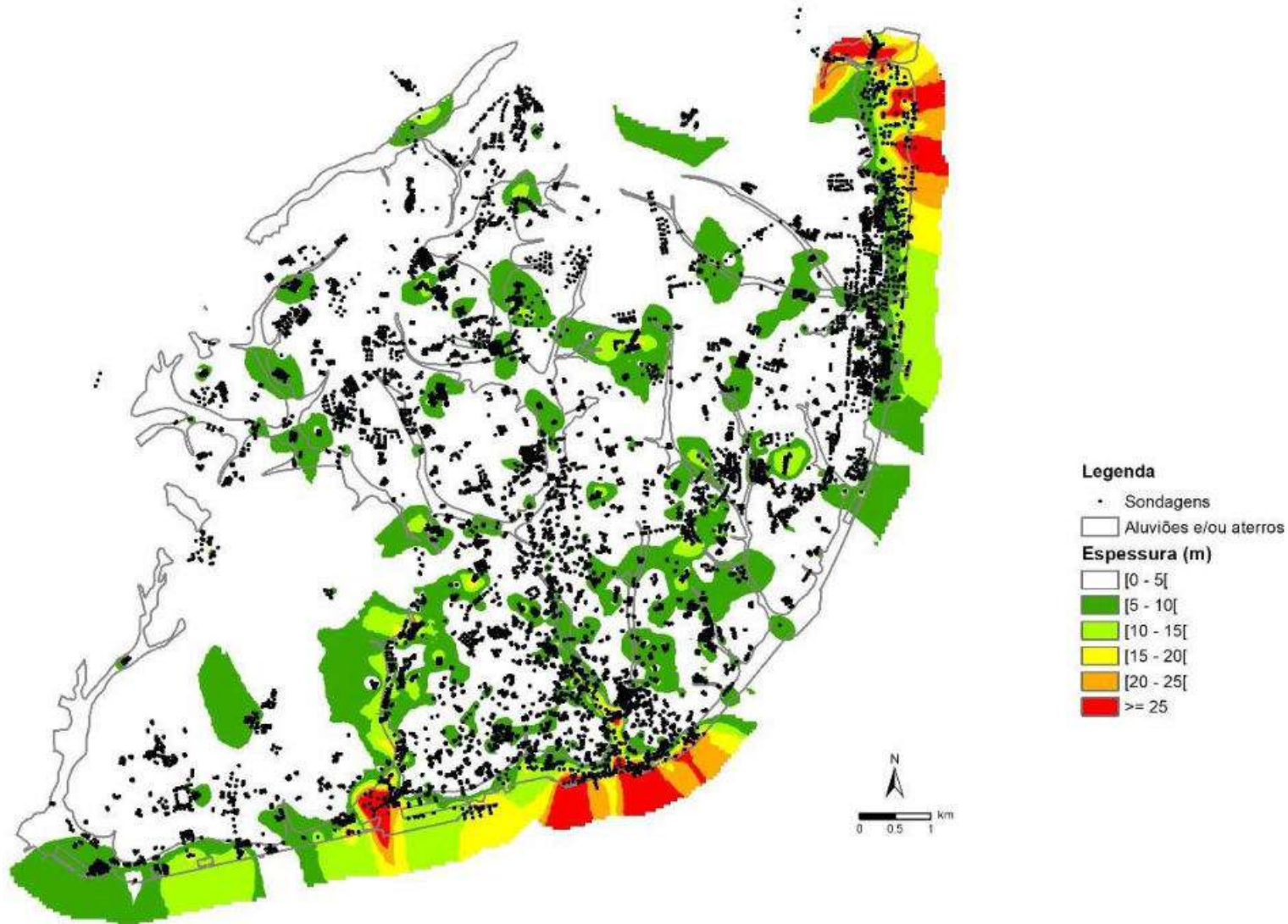
## Limitações

- Distribuição espacial heterogénea das sondagens (zonas sombra)
- Apenas 5% das sondagens atingem 30 m (e apenas 44% excedem 15 m)
- Grande variabilidade na espessura e distribuição dos depósitos de cobertura não cartografados na carta geológica



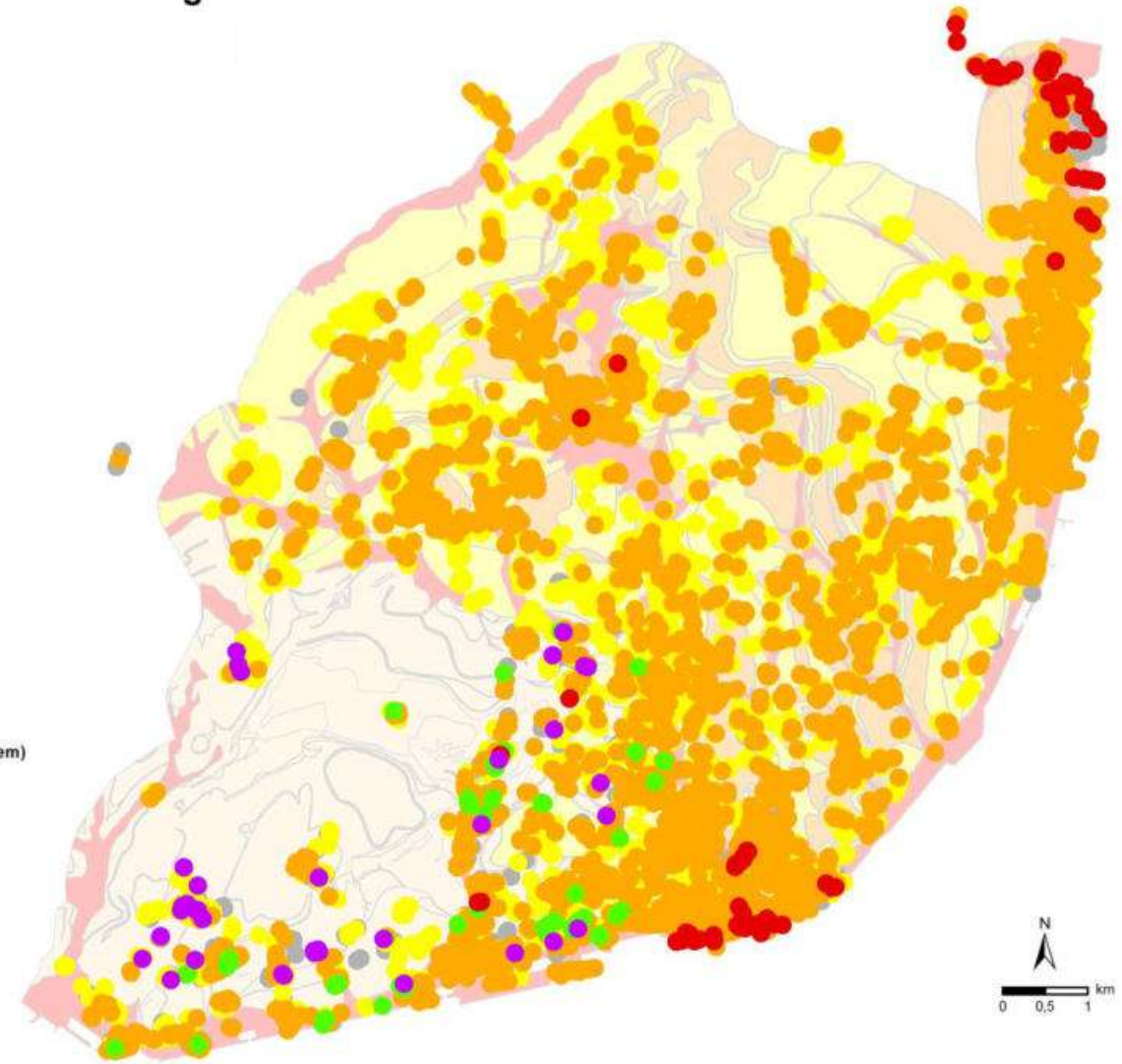
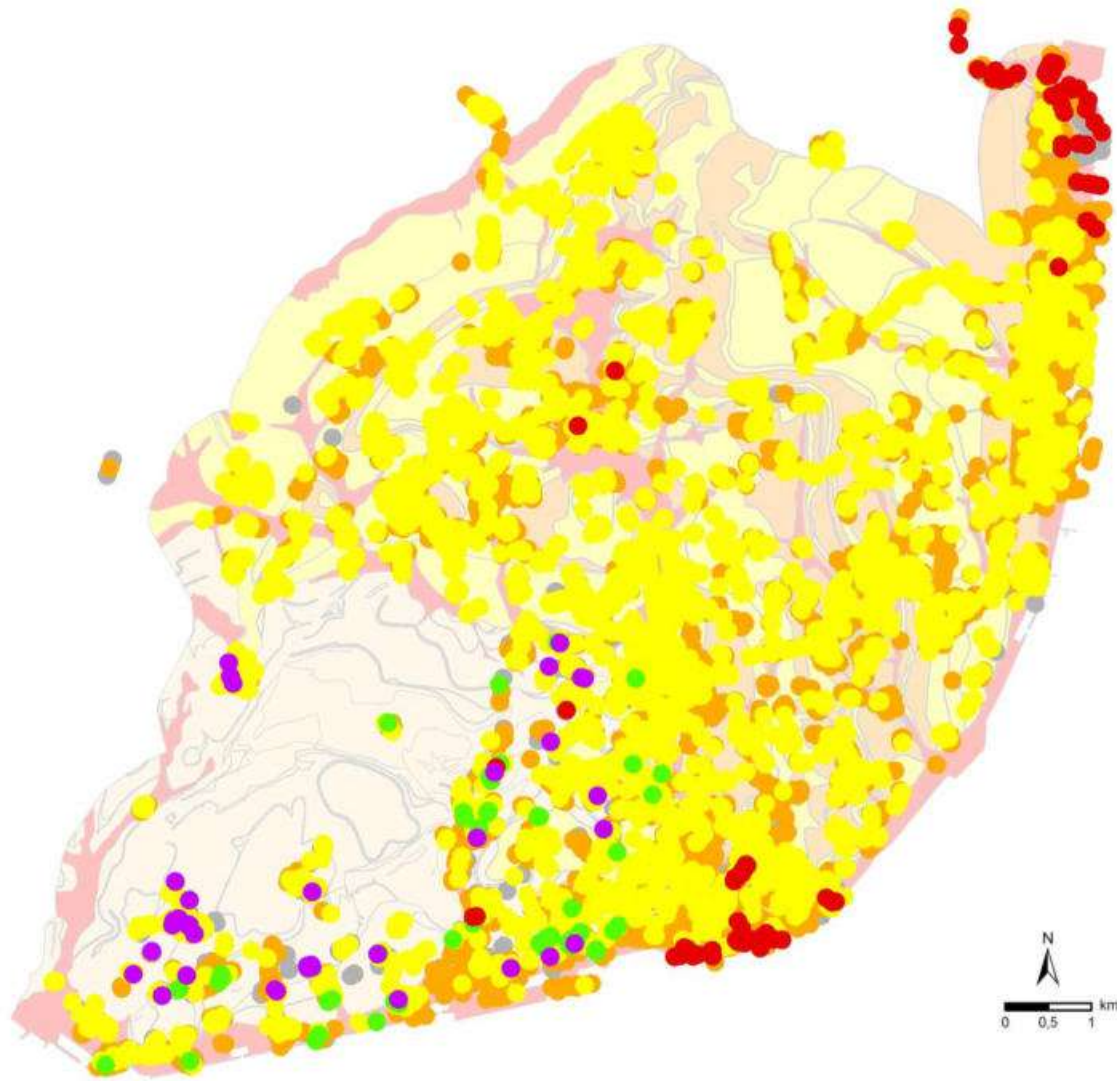
# Metodologia → Recurso à Base de Dados Geotécnicas da CML

Identificação de locais com  
formações de cobertura (7938  
pontos → interpolação)



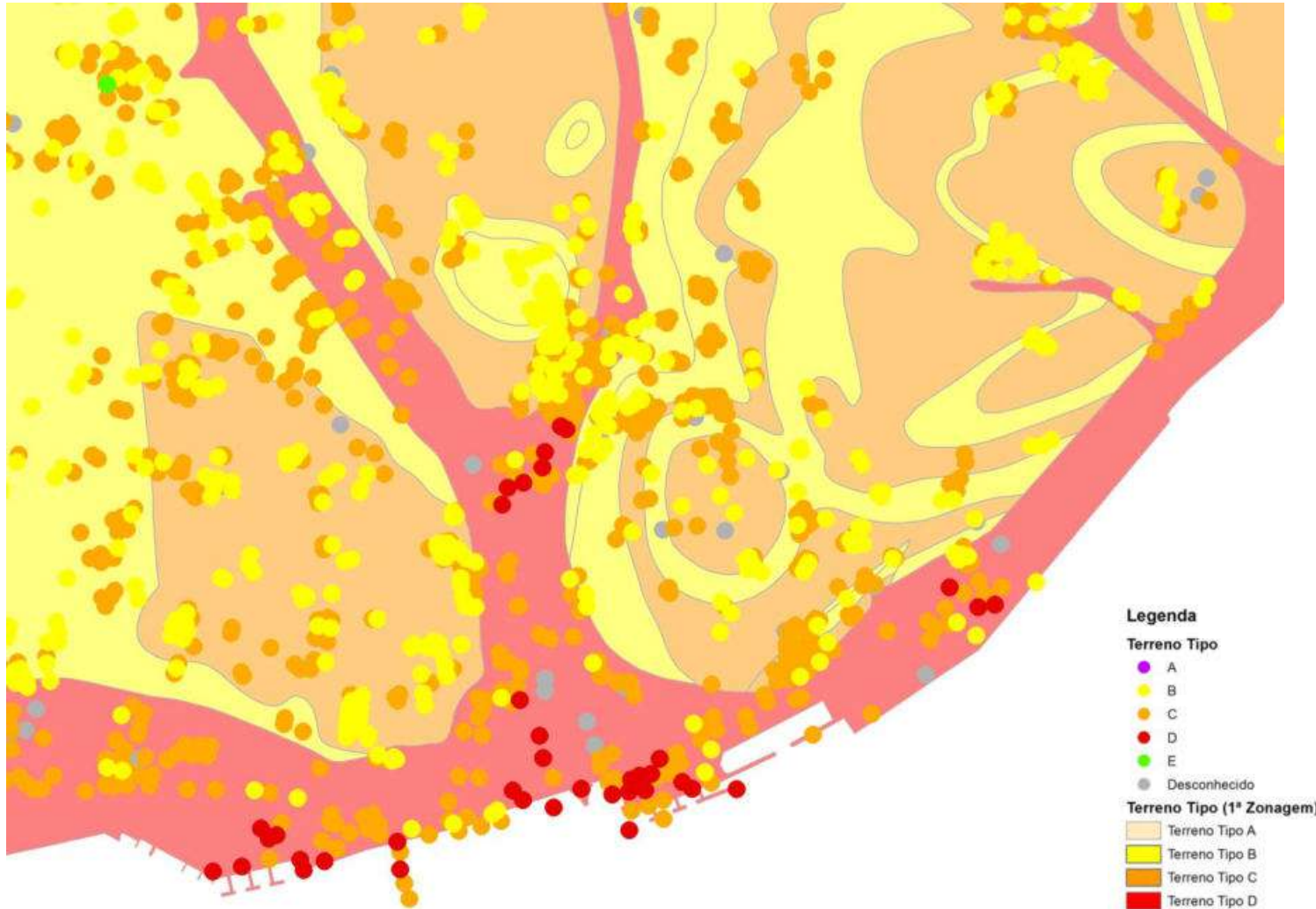
# Resultados (1)

Terrenos Tipo no Concelho de Lisboa  
Resultados do Algoritmo



zoom

# Resultados (1)



## Objectivo



A partir da classificação para cada sondagem **definir o zonamento**

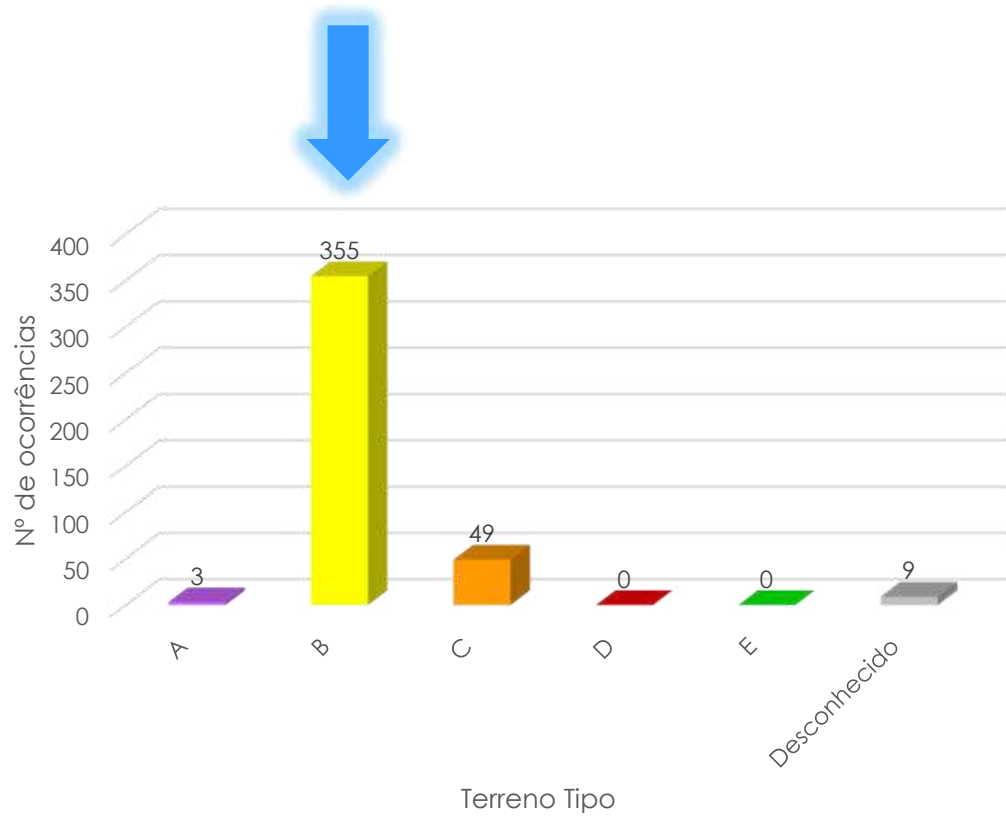
## Limitações



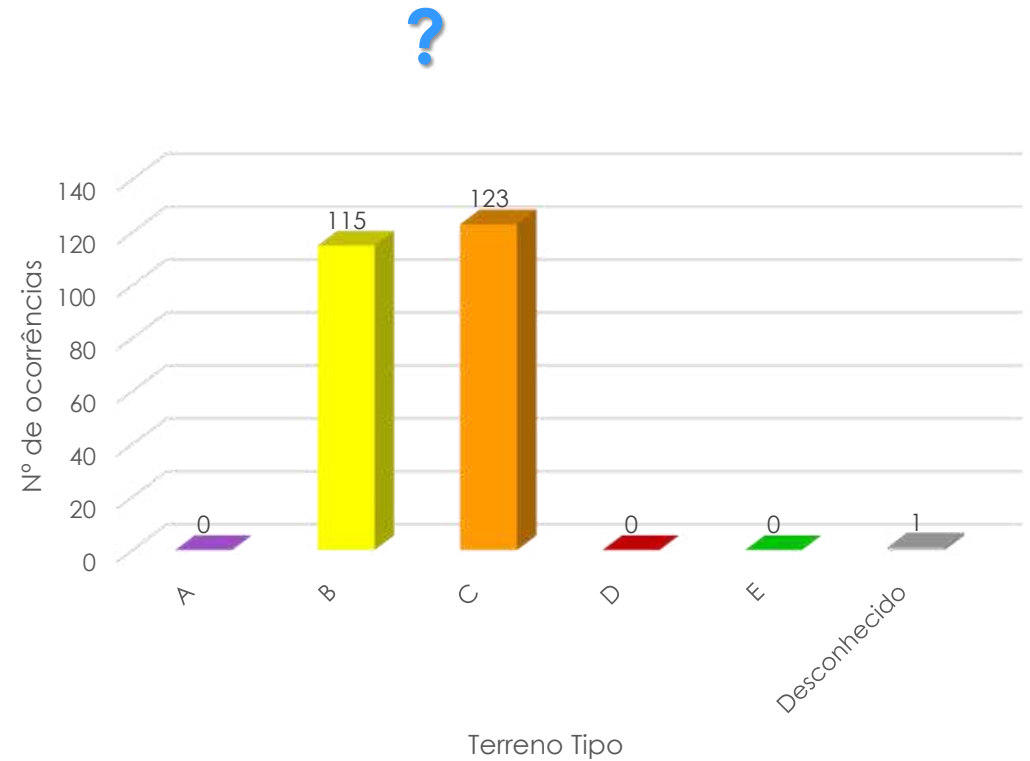
- **Elevada variabilidade** lateral do perfil de terreno
- **Distribuição irregular** das sondagens

# Resultados (1)

## Formação de Benfica



## Areolas de Cabo Ruivo



# Resultados (2)

Definição de uma nova classe de solo para formações geológicas com comportamento intermédio

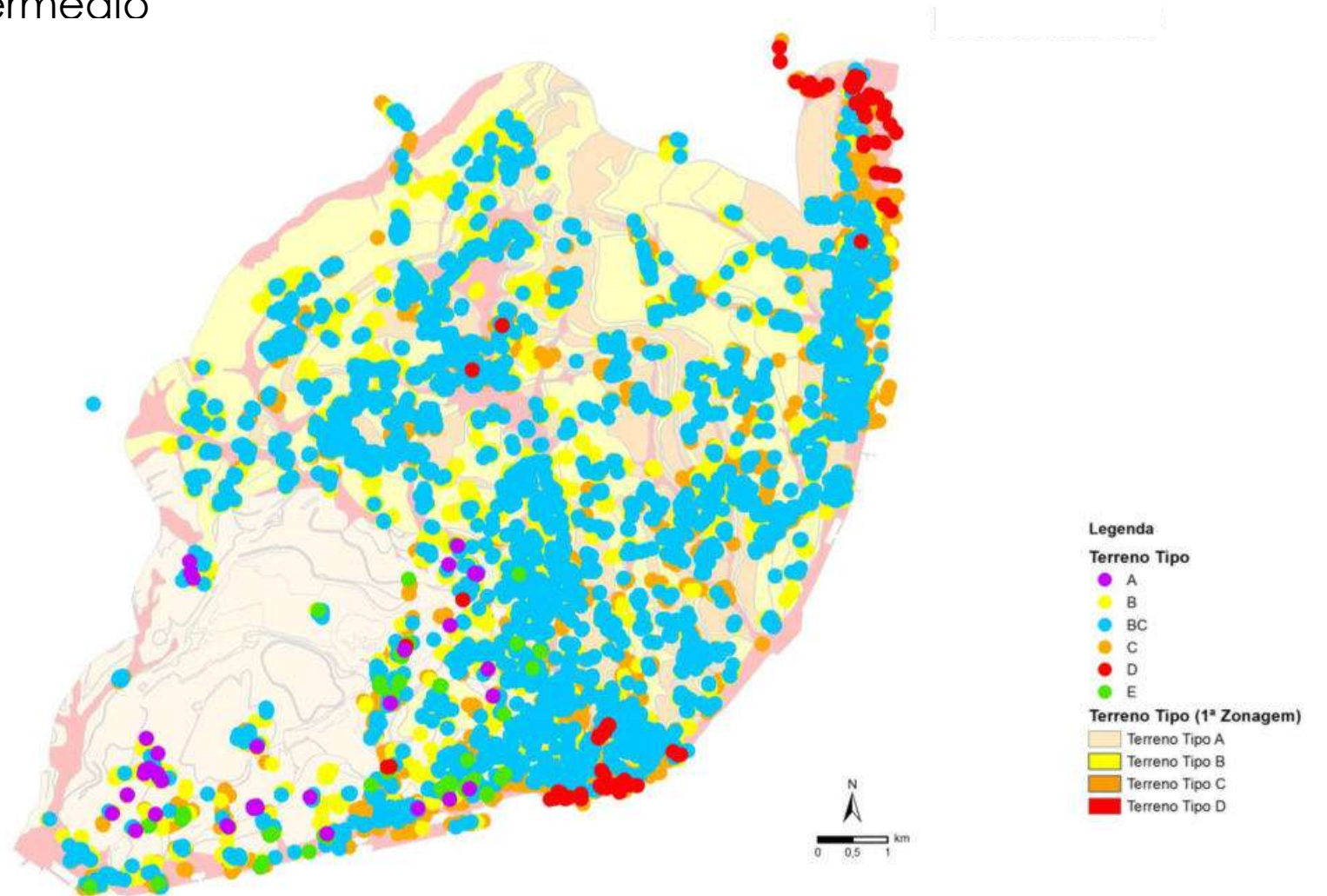


Classe de solo intermédia BC

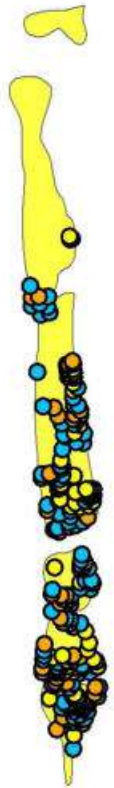
Terreno tipo BC

Sondagens com classificação de terreno tipo B ou C e  $40 \leq N_{SPT30} \leq 70$

Terrenos Tipo no Concelho de Lisboa  
Resultados do Algoritmo  
(classe intermédia)



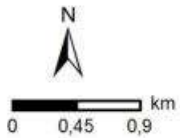
# Resultados (2)



## Legenda

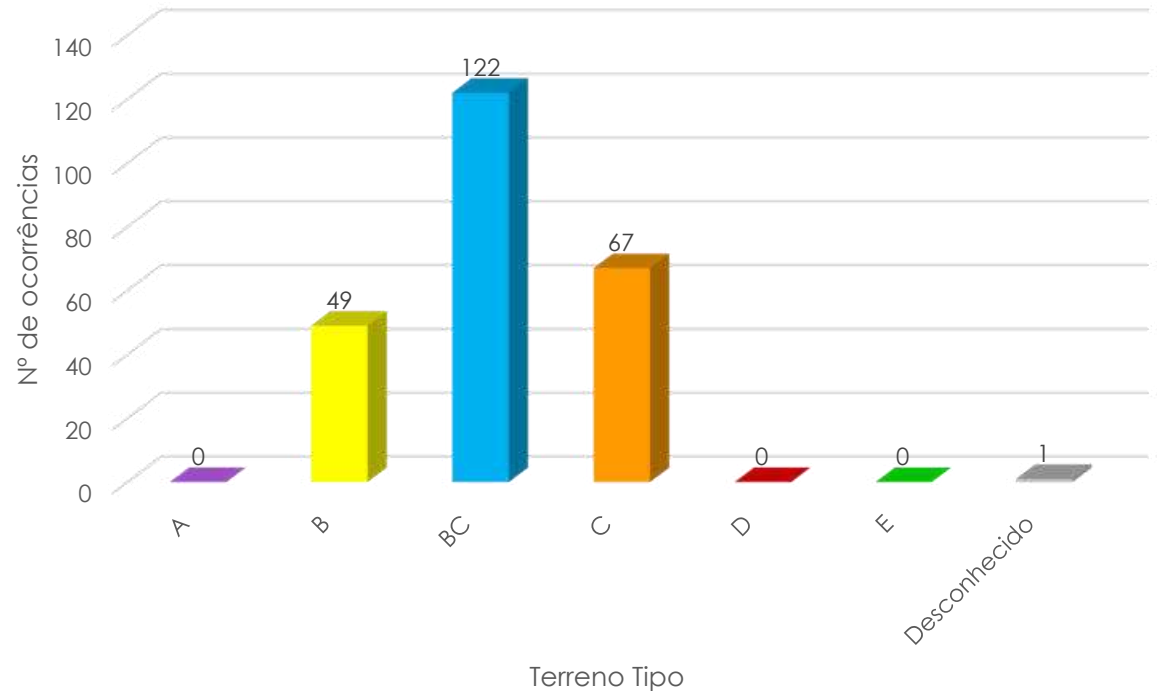
### Terreno Tipo

- A
- B
- BC
- C
- D
- E



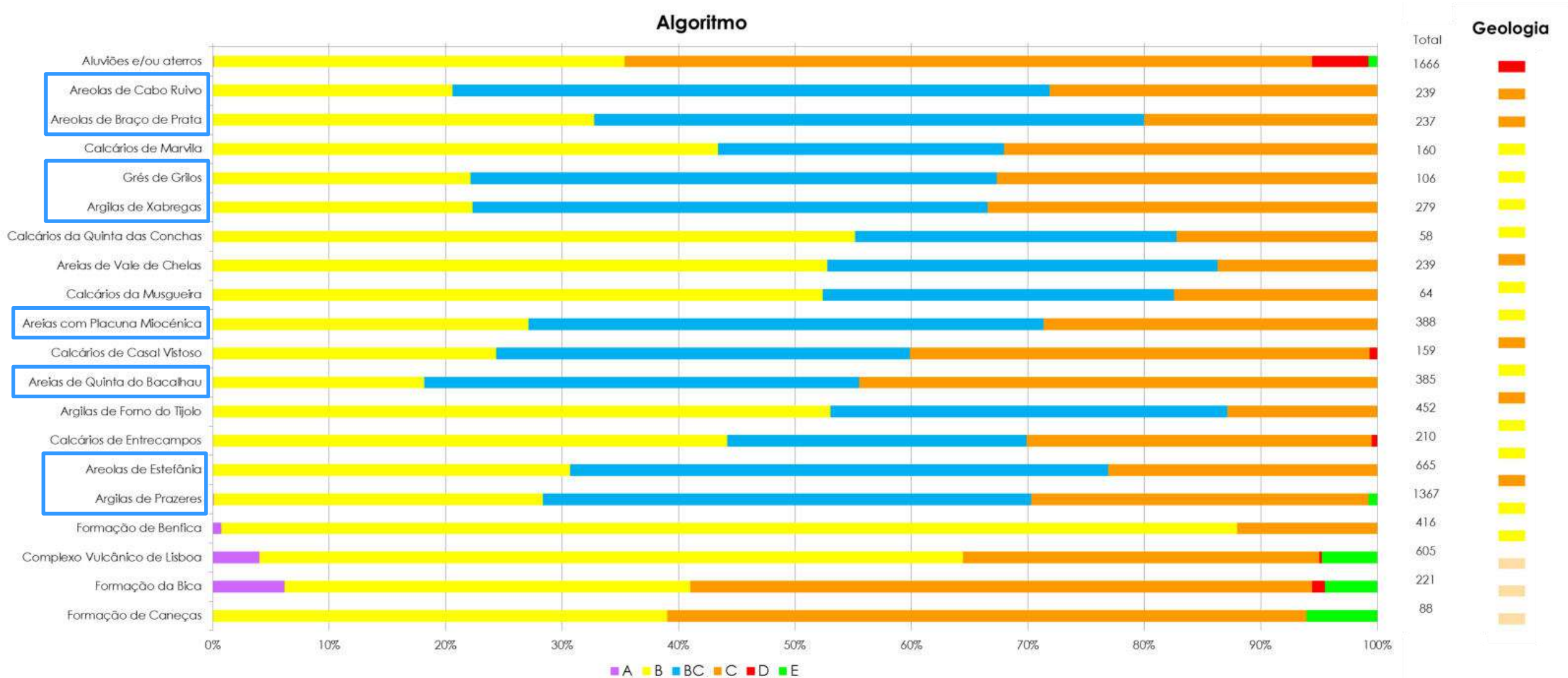
## Areolas de Cabo Ruivo

### Terreno Tipo BC



# Resultados (2)

## Algoritmo



8/15 Formações miocénicas



# Resultados (3)

## Introdução de uma classe de AB

### Formações geológicas do cretácico

- Complexo Vulcânico de Lisboa
- Formação da Bica
- Formação de Caneças



Esperava-se **elevado número de sondagens** classificadas como terreno tipo **A**

No entanto...

Apenas as duas primeiras apresentam terrenos tipo A sendo, contudo, **predominantes as sondagens** classificadas como **terrenos tipo B ou C**

## Causas prováveis

- **Número e distribuição espacial** das sondagens
- **Não realização** de **ensaios SPT em rocha** (terreno tipo A)



Definição de um segundo **tipo de terreno intermédio – AB**

## Classe de terreno BC

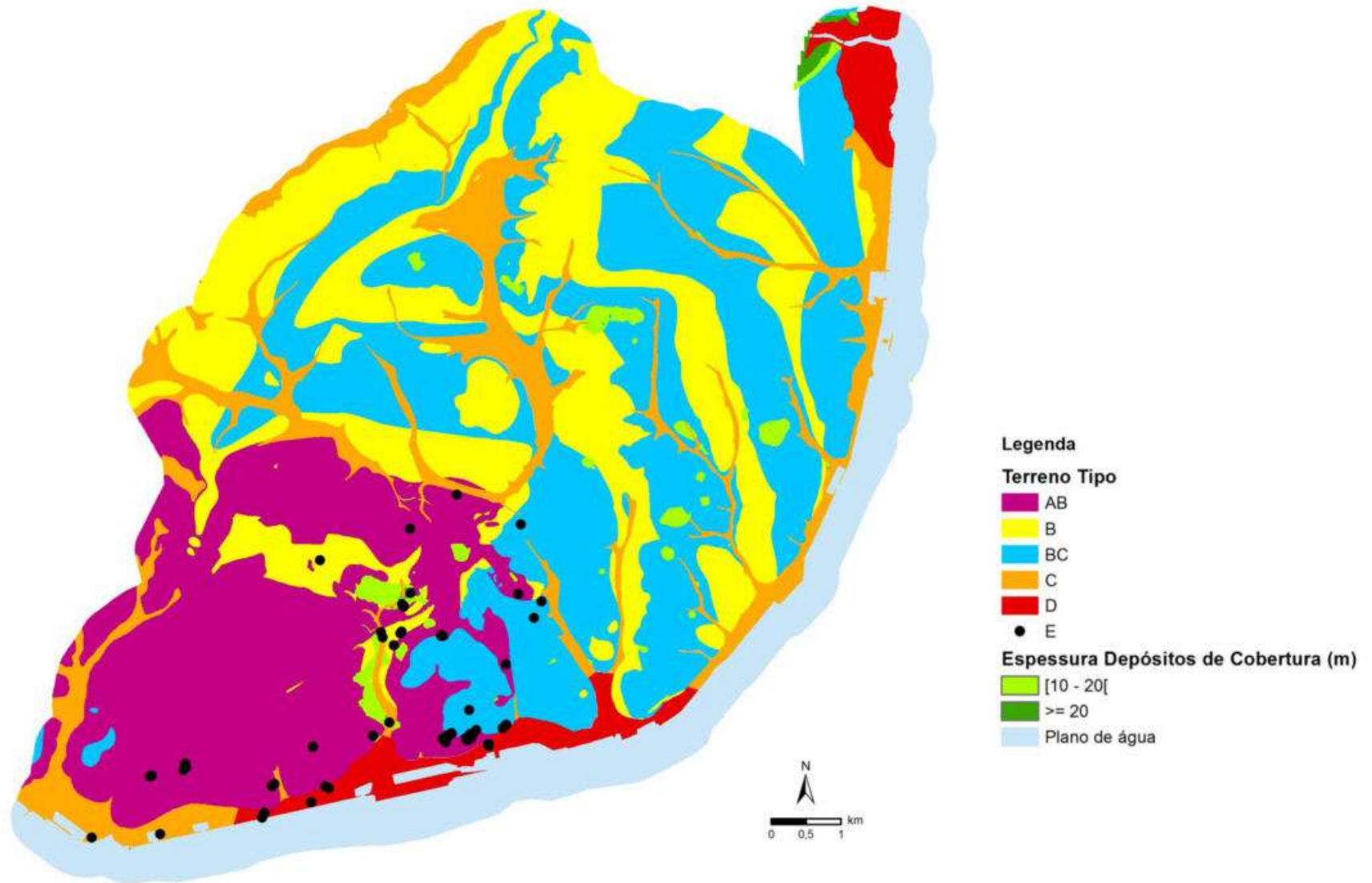
É atribuída às formações que apresentam

- um **comportamento intermédio entre as duas classes de terreno principais;**
- um **grande número de sondagens dos dois tipos de terreno** (B e C) → grande variabilidade lateral do perfil de solo.

Classes de terreno tipo: A, AB, B, BC, C, D e E

# Classificação final dos solos de Lisboa

## Carta de Classificação dos Solos do Concelho de Lisboa



# Considerações finais

---

## Justificação e validação das opções / aproximações consideradas

### **Nova geração do EC8 (em discussão)**

- Introdução de classes intermédias (p.e., Pitilakis et al., 2013)
- Definição de 6 classes de tipo de solo A-F (Paolucci et al., 2021)
- Introdução de parâmetros adicionais para caracterizar os perfis de solo
  - período próprio de vibração dos terrenos
  - profundidade do *bedrock* sísmico (rocha firme)

### **Aquisição de dados complementares e simulações (efectuadas neste trabalho)**

- Aquisição de medidas de vibrações ambientais para estimar o período próprio dos terrenos
- Realização de modelações numéricas para testar (e/ou validar) as opções tomadas

## Limitações

- Falta de informação sobre os valores de  $V_s$  nas diferentes formações geológicas (ensaios geofísicos)
- Heterogeneidade espacial na distribuição das sondagens
- Número muito limitado de sondagens que atingem os 30 m de profundidade (apenas 5%)

# Considerações finais

---

O zonamento foi efetuado à escala da cidade de Lisboa, recorrendo à informação contida na base de dados de sondagens geotécnicas existente na CML, complementada pela informação presente na Carta geológica do Concelho de Lisboa 1:10 000, e pelos resultados de alguns ensaios geofísicos (perfis sísmicos e registos de vibrações ambientais).

Devido à falta de informação sobre as velocidades de propagação das ondas transversais nas diferentes formações geológicas, foi decidido utilizar o parâmetro  $N_{SPT30}$ , um proxy de  $V_{S30}$ , também mencionado no EC8.

Contudo foi a primeira vez que se utilizou este tipo de abordagem para realizar um zonamento de terrenos pelo que este método deverá ser validado, em particular através de discussão no âmbito da comunidade científica.

É importante salientar que o zonamento sísmico realizado identifica apenas a classe de terreno predominante numa determinada zona. O objectivo inicial era de classificar os terrenos nas classes definidas no EC8 (A, B, C, D, E).

Contudo, devido às heterogeneidades dos terrenos observou-se a necessidade de introduzir duas classes intermédias (BC e AB).

**A análise, interpretação e/ou qualquer utilização da carta de zonamento deve ter em conta a metodologia e as aproximações e opções adoptadas, assim como os constrangimentos observados.**

# Considerações finais

---

## Recomendações para trabalho futuro

- Continuar a compilação dos dados das sondagens geotécnicas. Sempre que possível, solicitar que estas sondagens atinjam, pelo menos, a profundidade de 30m
- Realizar ensaios sísmicos sobre as diferentes unidades litológicas para determinar  $V_s$  em cada formação geológica, identificar perfis de terreno tipo com respectivo valor de  $V_{s30}$
- Realizar medidas de vibrações ambientais para determinar os períodos de vibração próprios ( $T_0$ ) de cada tipo de terreno
- Realização de modelação numérica para validar as opções tomadas e os resultados obtidos
- Nova geração do EC8 ?
  - **O zonamento apresentado reflete o estado actual de conhecimentos**

**Muito obrigada pela vossa atenção**



**Equipa de trabalho**

Universidade de Lisboa

- Liliana Oliveira
- Paula Teves Costa
- Rui Carrilho Gomes
- Isabel Moitinho de Almeida

Câmara Municipal de Lisboa

- Cláudia Pinto
- Carlos Ferreira