



**TÉCNICO**  
LISBOA

II CONFERÊNCIA  
NACIONAL DE  
GEODECISÃO

12-13  
maio  
2016

Politécnico de Setúbal  
ESCOLA SUPERIOR  
DE TECNOLOGIA  
DO BARREIRO



# OTIMIZAÇÃO DE CIRCUITOS DE INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS: APLICAÇÃO À REDE RODOVIÁRIA NACIONAL

**Caso de Estudo: Infraestruturas de Portugal S.A.**

**Alexandre B. Gonçalves**, CERIS-ICIST

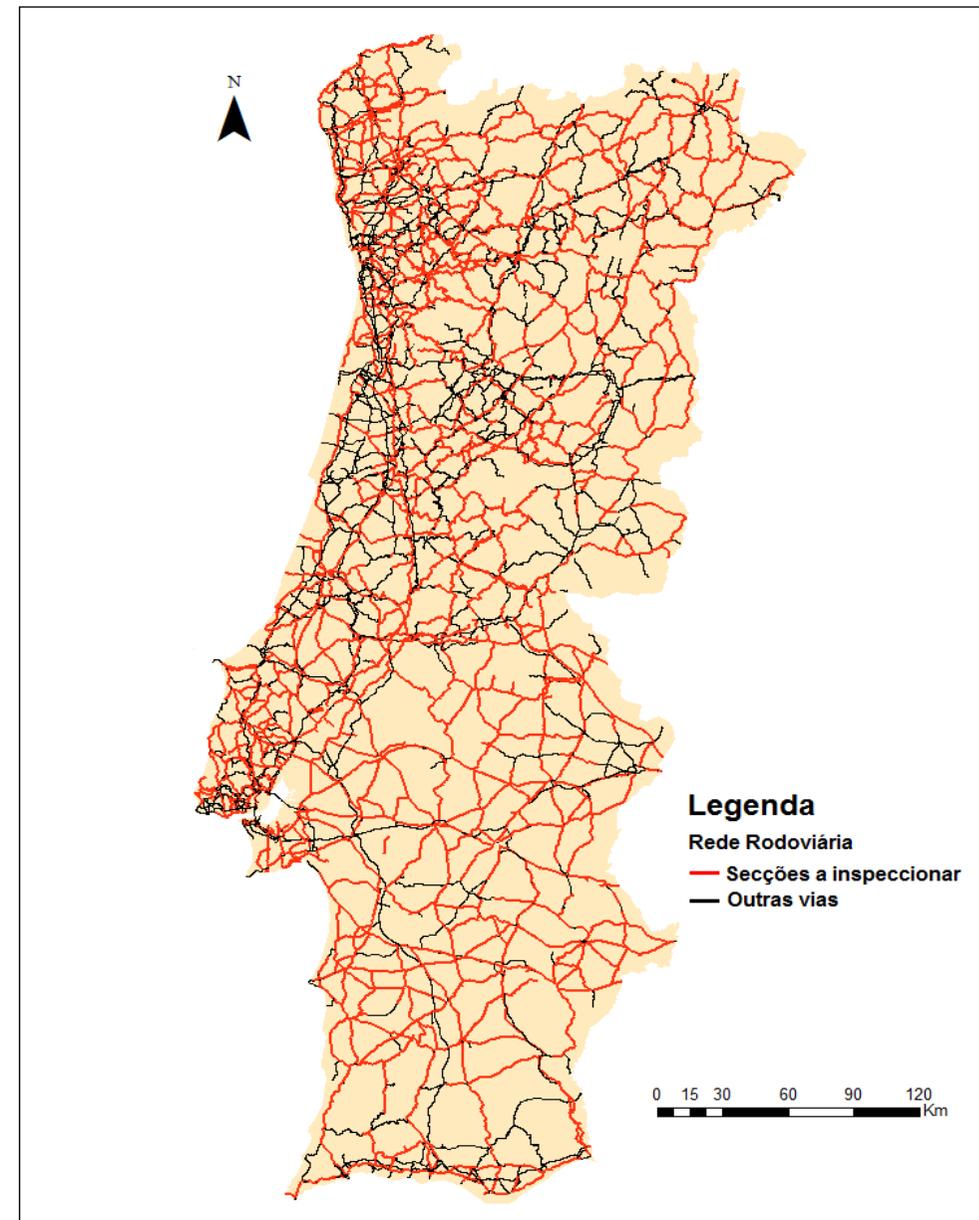
**Marta Castilho Gomes**, CERIS-CESUR

**Filipe F. Gomes**, Estudante de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial

Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

# Problema

- A IP é concessionária de 15253 km da Rede Rodoviária Nacional
  - 13664 km em gestão direta
  - 1589 km em sub-concessão
- Deve inspecionar anualmente a rede sob sua concessão



# Problema

- Inspeções anuais realizadas por um equipamento designado Perfilómetro Laser

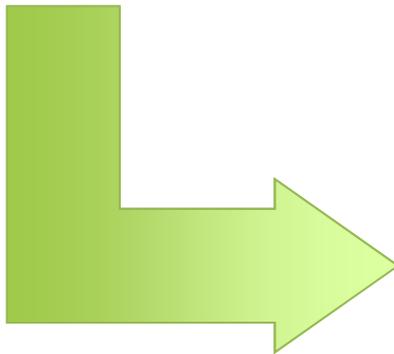


Processo dispendioso  
(ao nível temporal e monetário)

# Abordagem de Resolução

## Modelo de Otimização

- Apresenta o circuito ótimo a percorrer (menor distância)
- Respeita as restrições técnicas existentes

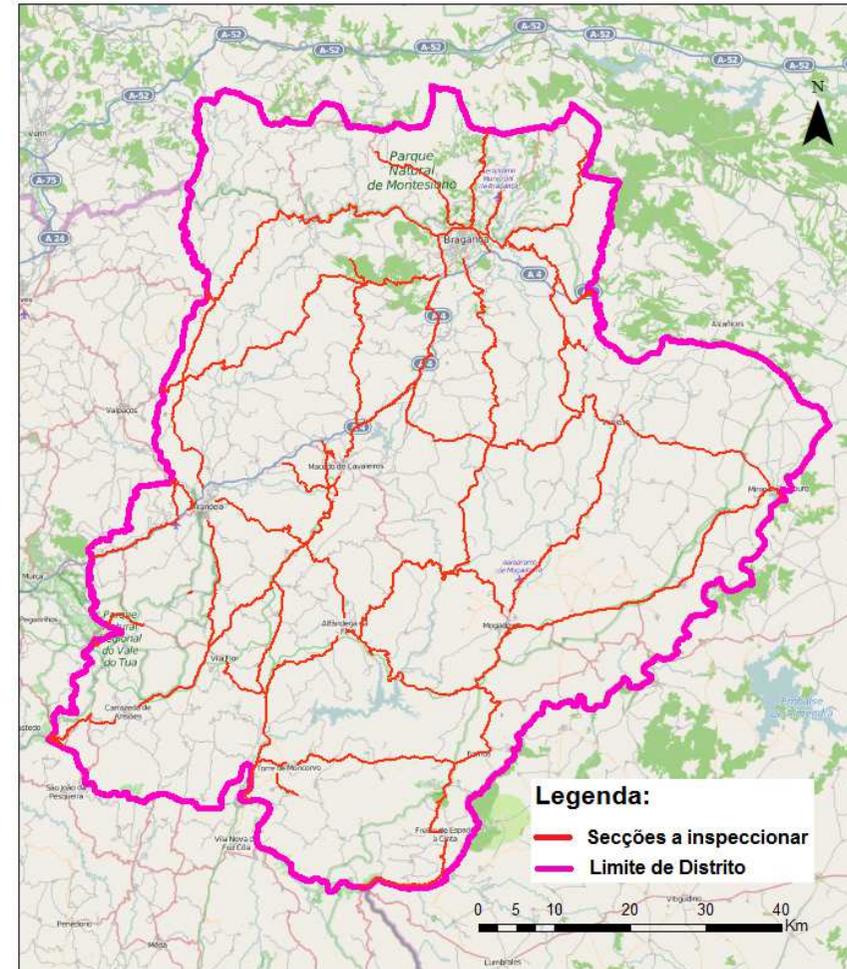


## Análise de Custos

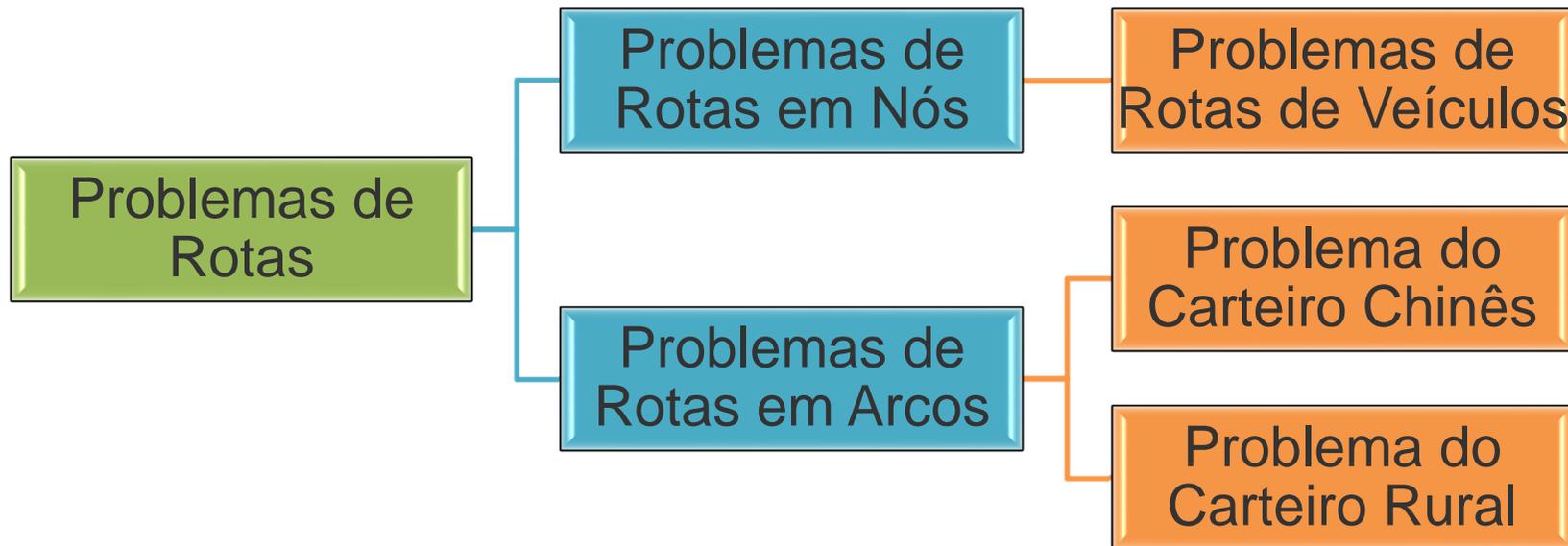
- Comparação entre os vários cenários possíveis

# Abordagem de Resolução

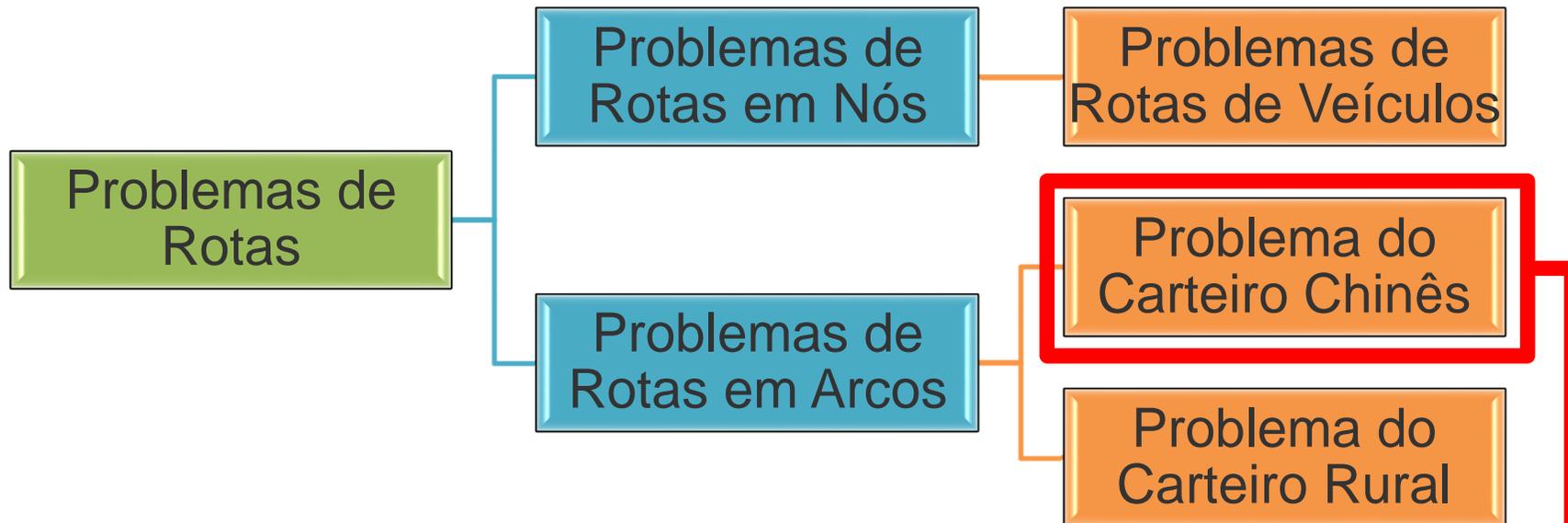
Caso de Estudo  
Distrito de Bragança



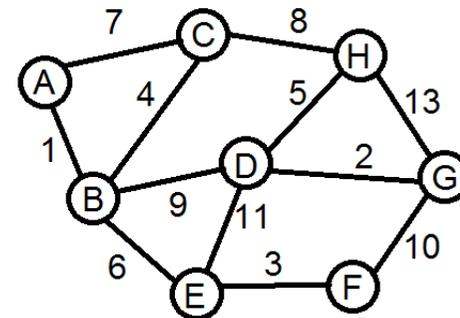
# Problemas de Rotas



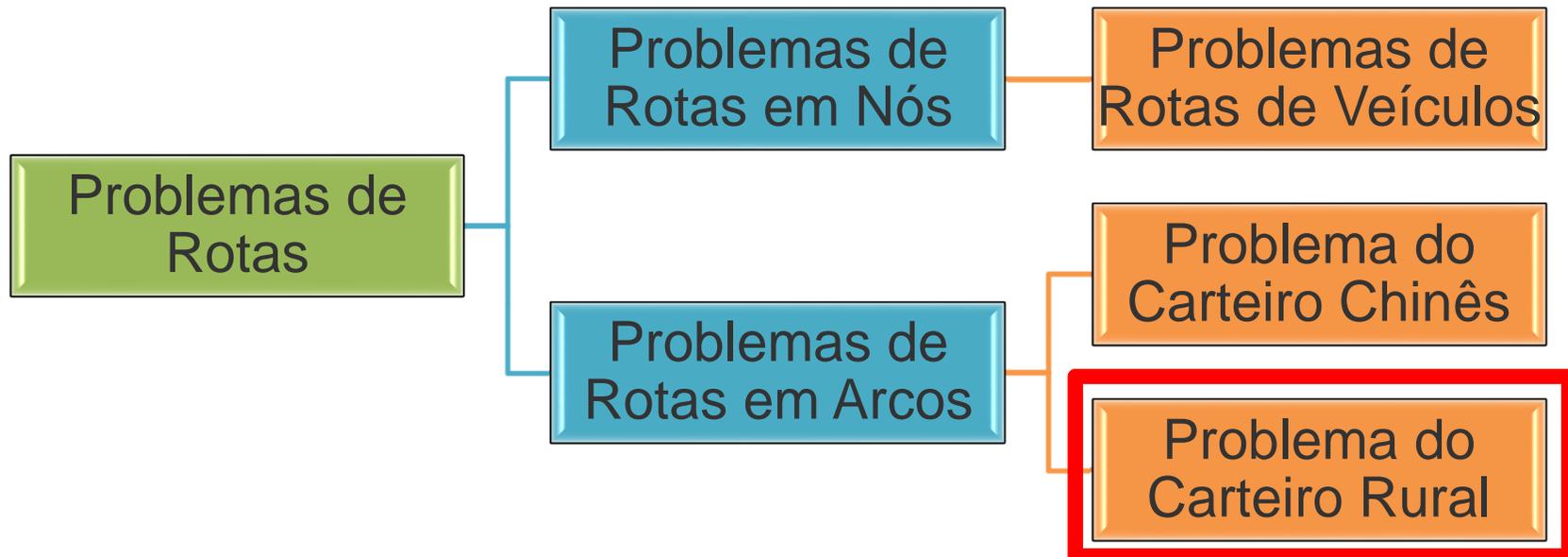
# Problemas de Rotas



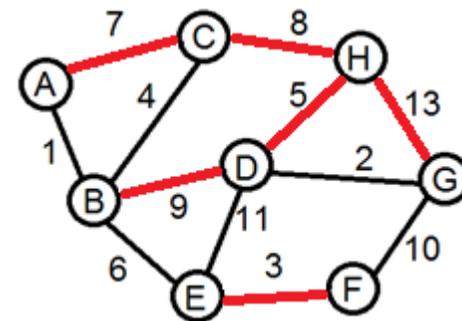
*Criar um caminho fechado de custo mínimo que visite todas as arestas do grafo.*



# Problemas de Rotas



*Criar um caminho fechado de custo mínimo, que visite as arestas pretendidas, podendo utilizar ou não as restantes.*





# Modelo Desenvolvido

- Problema pouco abordado na literatura mas com muitas aplicações práticas:



# Modelo Desenvolvido

## Problema do Carteiro Rural



Direcionado

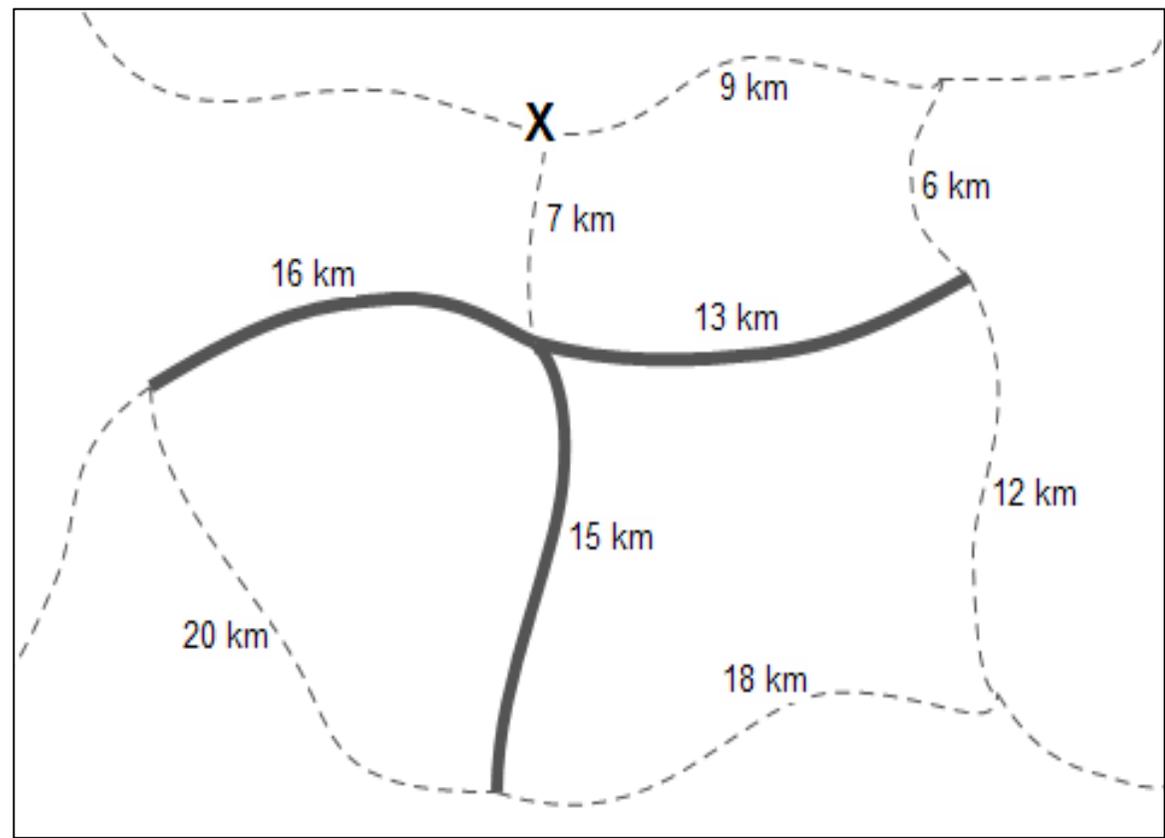


Não Direcionado

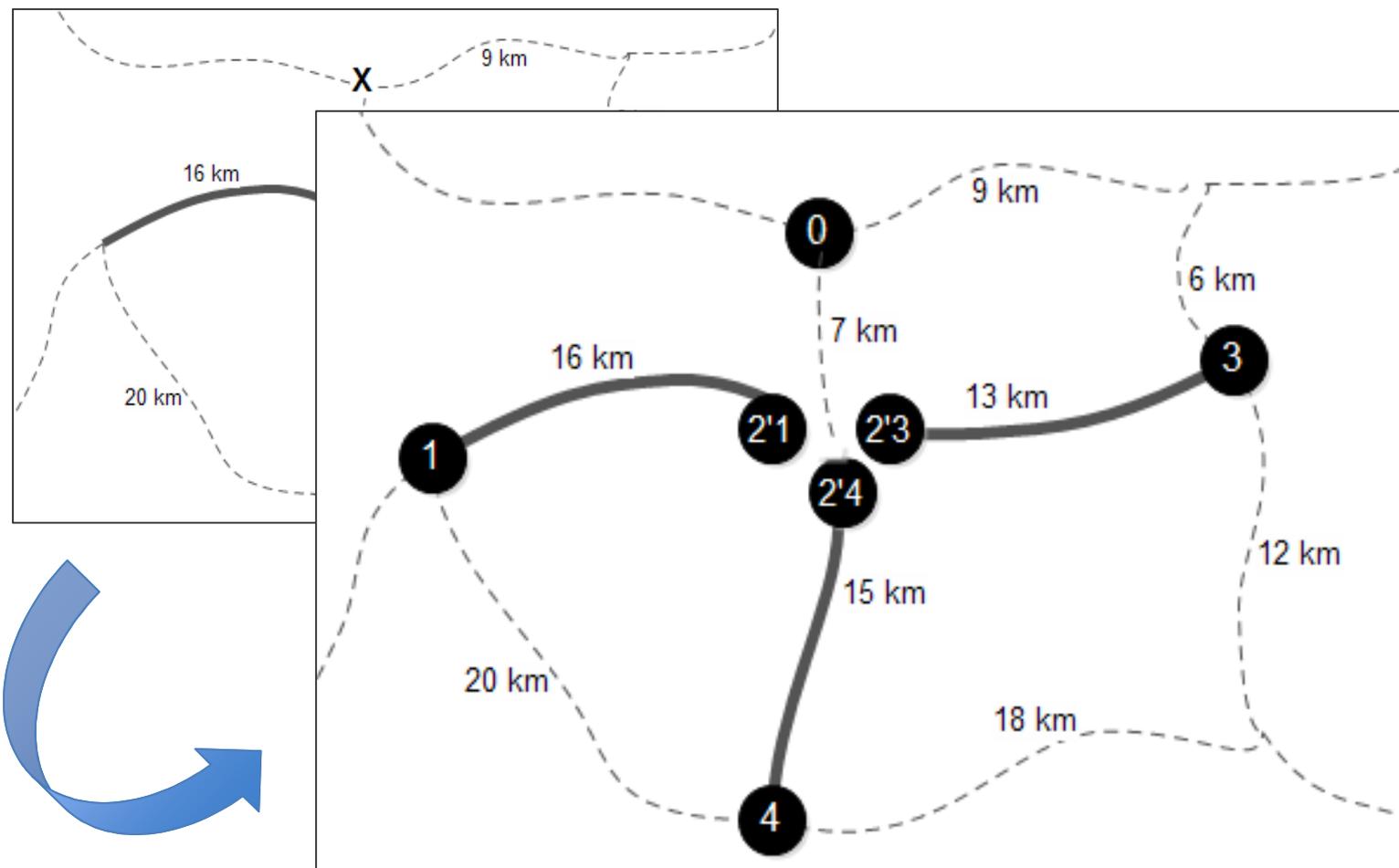


Misto

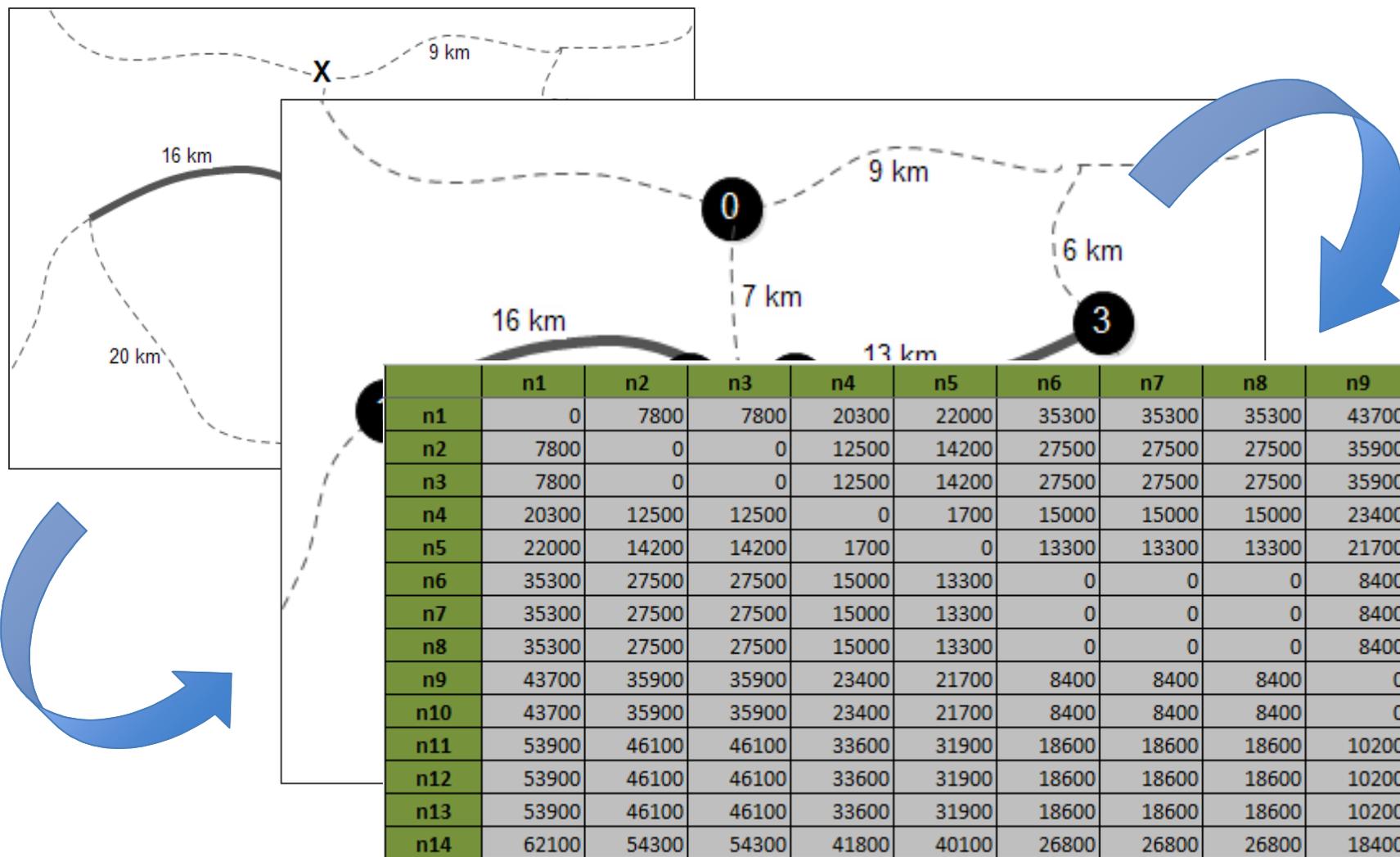
# Modelo Desenvolvido



# Modelo Desenvolvido



# Modelo Desenvolvido



# Modelo Desenvolvido

- O modelo de programação matemática é baseado na formulação de:

Monroy-Licht *et al.* (2014)

- Modelo de base

Miller *et al.* (1960)

- Eliminação de sub-rotas

# Descrição do Modelo

## a) Índices

- $i, j$  – Vértices

## b) Parâmetros

- $c_{ij}$  – Custo de deslocação entre os vértices  $i$  e  $j$
- $n$  – Número total de vértices
- $R$  – Subconjunto de arestas pretendido

## c) Variáveis

- $x_{ij}$  – Variável de decisão que assume o valor 1 se o vértice  $j$  é visitado após o vértice  $i$ , ou 0 no caso contrário.
- $u_i$  – Variável auxiliar inteira
- $v_j$  – Variável auxiliar inteira

# Descrição do Modelo

## d) Função Objetivo

Minimização

$$\sum_{i,j} c_{ij} \times x_{ij}$$

Minimização do custo total da inspeção

# Descrição do Modelo

## e) Restrições

$$x_{ij} + x_{ji} = 1 \quad \forall (i, j) \in R$$

$$\sum_{j \in N_1, j \neq i} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N_1$$

$$\sum_{i \in N_1, i \neq j} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in N_1$$

Cada aresta só é inspecionada uma vez (num dos sentidos)  
 Cada vértice só é inspecionado uma vez

# Descrição do Modelo

## f) Restrições (eliminação sub-rotas)

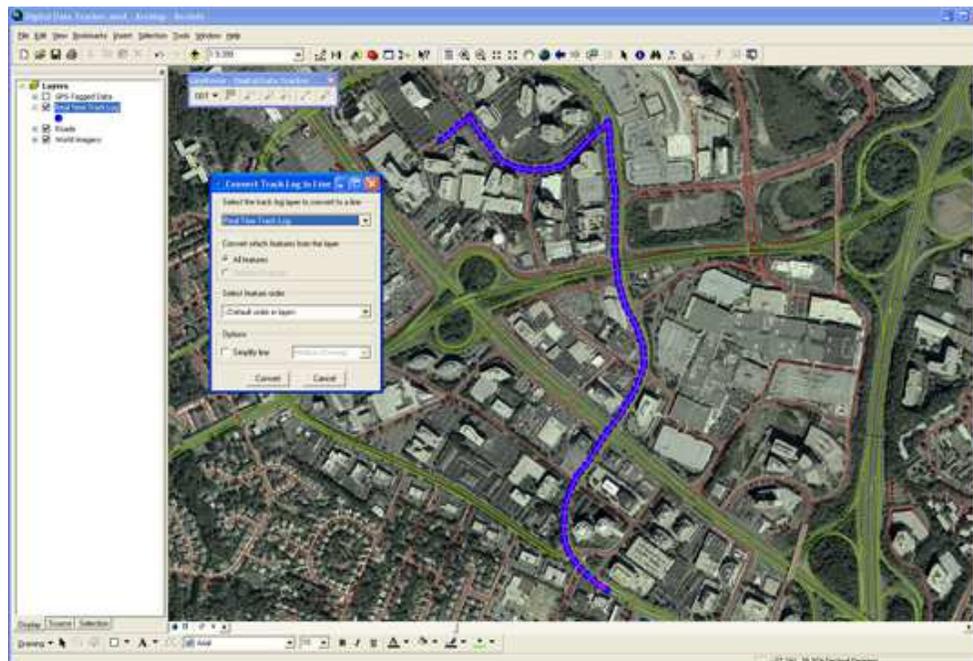
$$u_1 = 1$$

$$2 \leq u_i \leq n, \quad \forall i \neq 1$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (n - 1)(1 - x_{ij}),$$
$$\forall i \neq 1, \forall j \neq 1$$

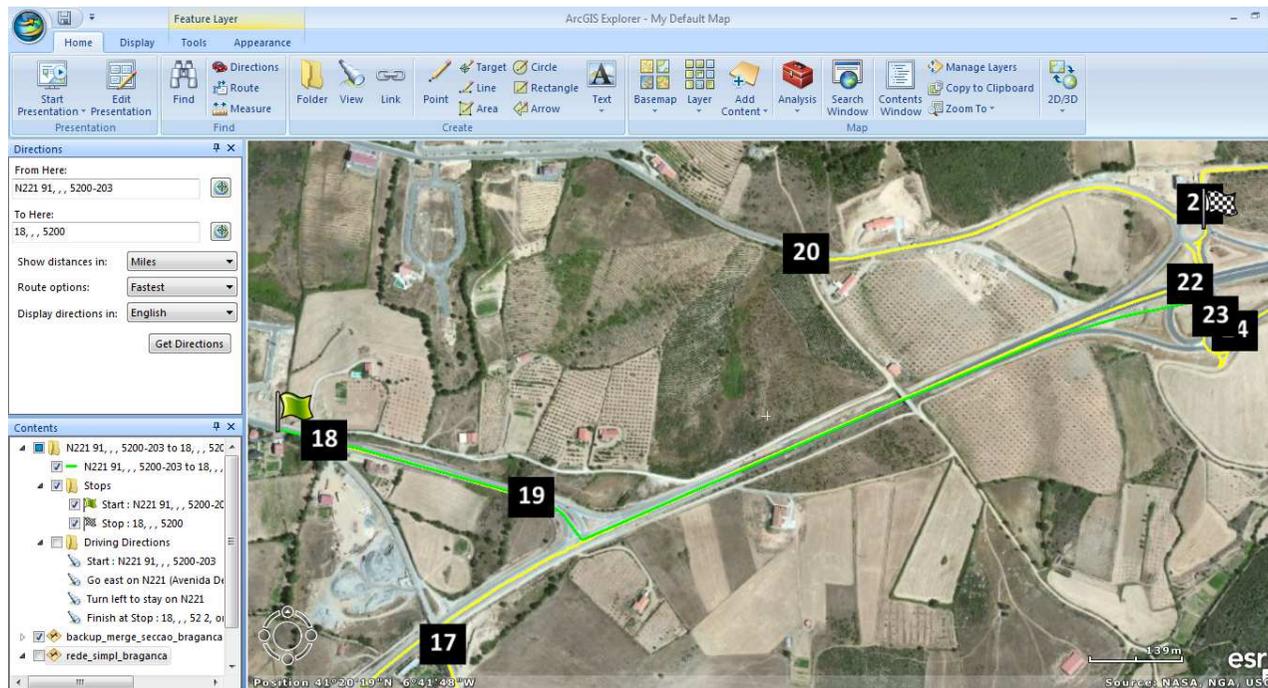
# Tratamento de Dados

- Dados cedidos pela EP
  - Informação geográfica
  - Diário de operações
- Pré-tratamento em ArcGIS



# Tratamento de Dados

- Levantamento manual de coordenadas
- Criação da matriz OD em ArcGIS  
(264 nós x 264 nós = 69696 arestas)



# Tratamento de Dados

	A	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR
28	412017"N 6 3905"W	6300	6600	4100	3500	7700	3400	3200	3750	500	0	14000	14000	24000	24000	30800	31200	31200	31200	33200	33200	38900	38900	38900	43000	42100
29	412202"N 6 2948"W	20400	20800	18200	17700	21900	17500	17500	17950	14500	14000	0	0	9700	9700	18700	19100	19100	19100	21100	21100	26800	26800	26800	30900	30000
30	412202"N 6 2948"W	20400	20800	18200	17700	21900	17500	17500	17950	14500	14000	0	0	9700	9700	18700	19100	19100	19100	21100	21100	26800	26800	26800	30900	30000
31	412437"N 6 2420"W	30500	30800	28300	27700	31900	27500	27500	27950	24500	24000	9700	9700	0	0	8200	8000	8000	8000	10600	10600	16200	16200	16200	20300	21100
32	412437"N 6 2420"W	30500	30800	28300	27700	31900	27500	27500	27950	24500	24000	9700	9700	0	0	8200	8000	8000	8000	10600	10600	16200	16200	16200	20300	21100
33	412823"N 6 2154"W	37300	37600	35100	34600	38700	34400	34400	34850	31300	30800	18700	18700	8200	8200	0	250	250	250	2900	2900	8500	8500	8500	12600	12700
34	412817"N 6 2147"W	37700	38000	35500	35000	39200	34800	34800	35250	31700	31200	19100	19100	8000	8000	250	0	0	0	2650	2650	8250	8250	8250	12350	12450
35	412817"N 6 2147"W	37700	38000	35500	35000	39200	34800	34800	35250	31700	31200	19100	19100	8000	8000	250	0	0	0	2650	2650	8250	8250	8250	12350	12450
36	412817"N 6 2147"W	37700	38000	35500	35000	39200	34800	34800	35250	31700	31200	19100	19100	8000	8000	250	0	0	0	2650	2650	8250	8250	8250	12350	12450
37	412834"N 6 2002"W	39700	40000	37500	37000	41200	36800	36800	37250	33700	33200	21100	21100	10600	10600	2900	2650	2650	2650	0	0	5600	5600	5600	9800	19100
38	412834"N 6 2002"W	39700	40000	37500	37000	41200	36800	36800	37250	33700	33200	21100	21100	10600	10600	2900	2650	2650	2650	0	0	5600	5600	5600	9800	19100
39	413001"N 6 1705"W	45400	45700	43200	42600	46800	42400	42400	42850	39400	38900	26800	26800	16200	16200	8500	8250	8250	8250	5600	5600	0	0	0	4100	13500
40	413001"N 6 1705"W	45400	45700	43200	42600	46800	42400	42400	42850	39400	38900	26800	26800	16200	16200	8500	8250	8250	8250	5600	5600	0	0	0	4100	13500
41	413001"N 6 1705"W	45400	45700	43200	42600	46800	42400	42400	42850	39400	38900	26800	26800	16200	16200	8500	8250	8250	8250	5600	5600	0	0	0	4100	13500
42	412922"N 6 1551"W	49500	49800	47300	46700	50900	46600	46600	46950	43500	43000	30900	30900	20300	20300	12600	12350	12350	12350	9800	9800	4100	4100	4100	0	17700
43	413305"N 6 2422"W	48600	48900	46400	45900	50100	45700	45700	46150	42600	42100	30000	30000	21100	21100	12700	12450	12450	12450	19100	19100	13500	13500	13500	17700	0
44	413305"N 6 2422"W	48600	48900	46400	45900	50100	45700	45700	46150	42600	42100	30000	30000	21100	21100	12700	12450	12450	12450	19100	19100	13500	13500	13500	17700	0
45	413533"N 6 3113"W	38200	38500	38500	39100	39600	39200	39200	39350	43000	42500	42100	42100	33100	33100	24800	24550	24550	24550	31200	31200	25500	25500	25500	29700	12100
46	413458"N 6 3159"W	36500	36800	36800	37400	37900	37500	37500	37650	41300	40800	38700	38700	34800	34800	26400	26150	26150	26150	32900	32900	27200	27200	27200	31400	13700
47	413458"N 6 3159"W	36500	36800	36800	37400	37900	37500	37500	37650	41300	40800	38700	38700	34800	34800	26400	26150	26150	26150	32900	32900	27200	27200	27200	31400	13700
48	412949"N 6 3314"W	25800	26100	26100	26700	27200	26900	26900	26950	30600	30100	28100	28100	25400	25400	20100	19850	19850	19850	22400	22400	28100	28100	28100	32300	20700
49	412949"N 6 3314"W	25800	26100	26100	26700	27200	26900	26900	26950	30600	30100	28100	28100	25400	25400	20100	19850	19850	19850	22400	22400	28100	28100	28100	32300	20700
50	412614"N 6 3732"W	14900	15200	15200	15800	16300	16000	16000	16050	19700	19200	19900	19900	30500	30500	31000	30750	30750	30750	33300	33300	39000	39000	39000	43200	31600
51	412614"N 6 3732"W	14900	15200	15200	15800	16300	16000	16000	16050	19700	19200	19900	19900	30500	30500	31000	30750	30750	30750	33300	33300	39000	39000	39000	43200	31600
52	412133"N 6 4200"W	3200	3500	3500	4100	4600	4200	4200	4350	8000	7500	22200	22200	32100	32100	38900	38650	38650	38650	41200	41200	46900	46900	46900	51100	49900
53	412128"N 6 4249"W	3300	3600	3600	4200	4700	4400	4400	4450	8100	7600	22300	22300	32300	32300	39000	38750	38750	38750	41300	41300	47000	47000	47000	51200	50000
54	412403"N 6 4820"W	19000	19300	19300	19900	20400	20100	20100	20150	23800	23300	38000	38000	48000	48000	54700	54450	54450	54450	57000	57000	62700	62700	62700	66900	65700
55	412403"N 6 4820"W	19000	19300	19300	19900	20400	20100	20100	20150	23800	23300	38000	38000	48000	48000	54700	54450	54450	54450	57000	57000	62700	62700	62700	66900	65700
56	412403"N 6 4820"W	19000	19300	19300	19900	20400	20100	20100	20150	23800	23300	38000	38000	48000	48000	54700	54450	54450	54450	57000	57000	62700	62700	62700	66900	65700
57	412925"N 6 4639"W	32800	33100	33100	33700	34200	33900	33900	33950	37600	37100	51800	51800	61800	61800	68500	68250	68250	68250	70800	70800	64900	64900	64900	69100	51400
58	412925"N 6 4639"W	32800	33100	33100	33700	34200	33900	33900	33950	37600	37100	51800	51800	61800	61800	68500	68250	68250	68250	70800	70800	64900	64900	64900	69100	51400
59	413336"N 6 4341"W	43200	43500	43500	44100	44600	44300	44300	44350	48000	47500	62200	62200	72100	72100	53800	53550	53550	53550	60200	60200	54600	54600	54600	58800	41100
60	413336"N 6 4341"W	43200	43500	43500	44100	44600	44300	44300	44350	48000	47500	62200	62200	72100	72100	53800	53550	53550	53550	60200	60200	54600	54600	54600	58800	41100
61	413336"N 6 4341"W	43200	43500	43500	44100	44600	44300	44300	44350	48000	47500	62200	62200	72100	72100	53800	53550	53550	53550	60200	60200	54600	54600	54600	58800	41100
62	413336"N 6 4341"W	43200	43500	43500	44100	44600	44300	44300	44350	48000	47500	62200	62200	72100	72100	53800	53550	53550	53550	60200	60200	54600	54600	54600	58800	41100

# Modelo Desenvolvido

## Problema do Carteiro Rural

### Direcionado

- Otimização mantendo os sentidos utilizados atualmente pela IP

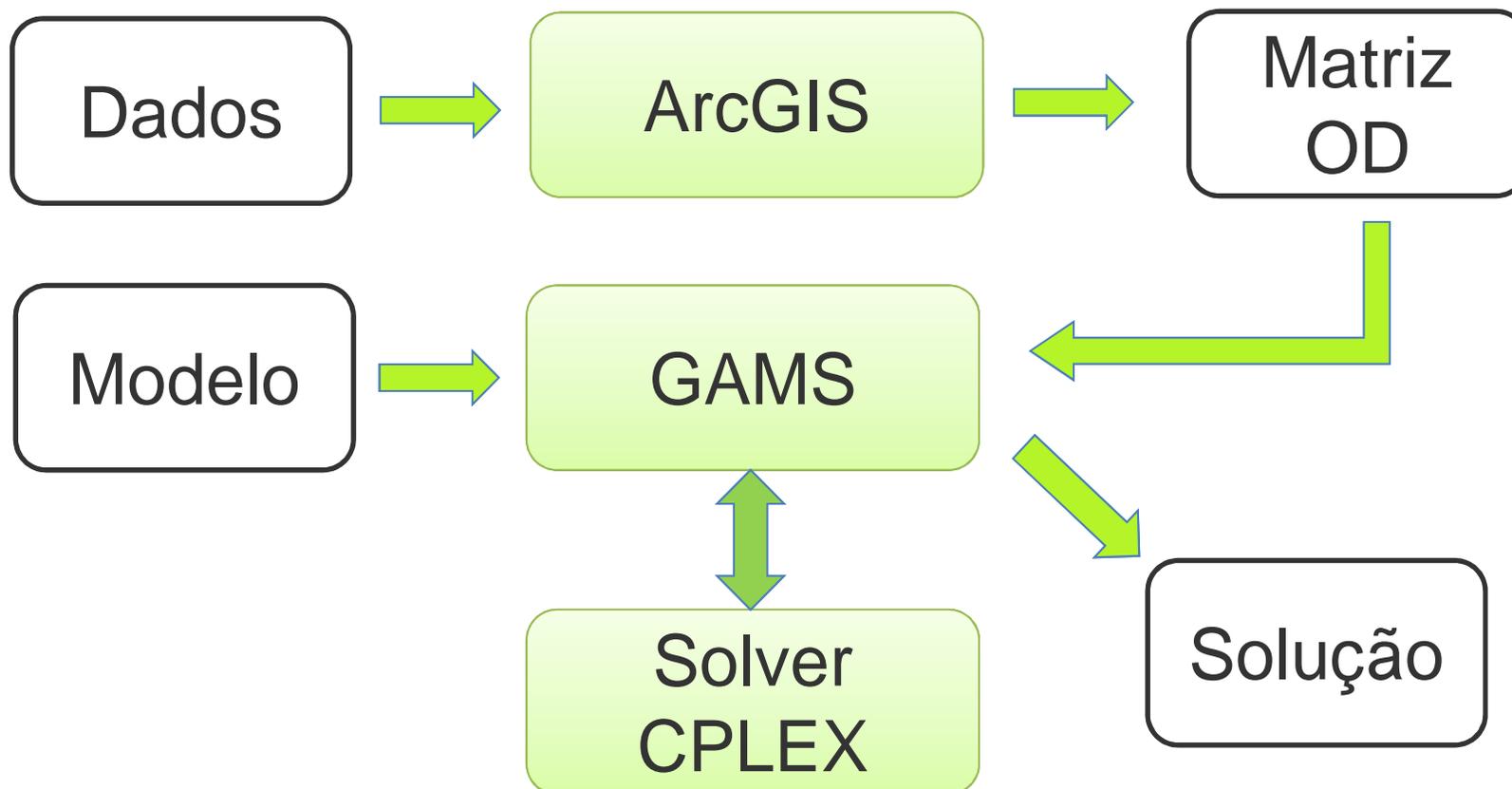
### Não Direcionado

- Otimização sem sentidos predefinidos

### Misto

- Otimização com autoestradas e sem sentidos predefinidos

# Diagrama



# Dimensão do Modelo - GAMS

Limite Máximo CPU (min)	Relative Gap	Absolute Gap (km)	Número de Iterações	Número de Variáveis	Número de Equações
2	27,39%	530	8 128	70 225	71 148
10	7,88%	123	39 348		
30	6,00%	92	147 303		
60	1,11%	16	765 369		

**GAMS (versão 24.4.3)**  
**CPLEX (versão 12.6.1.0)**

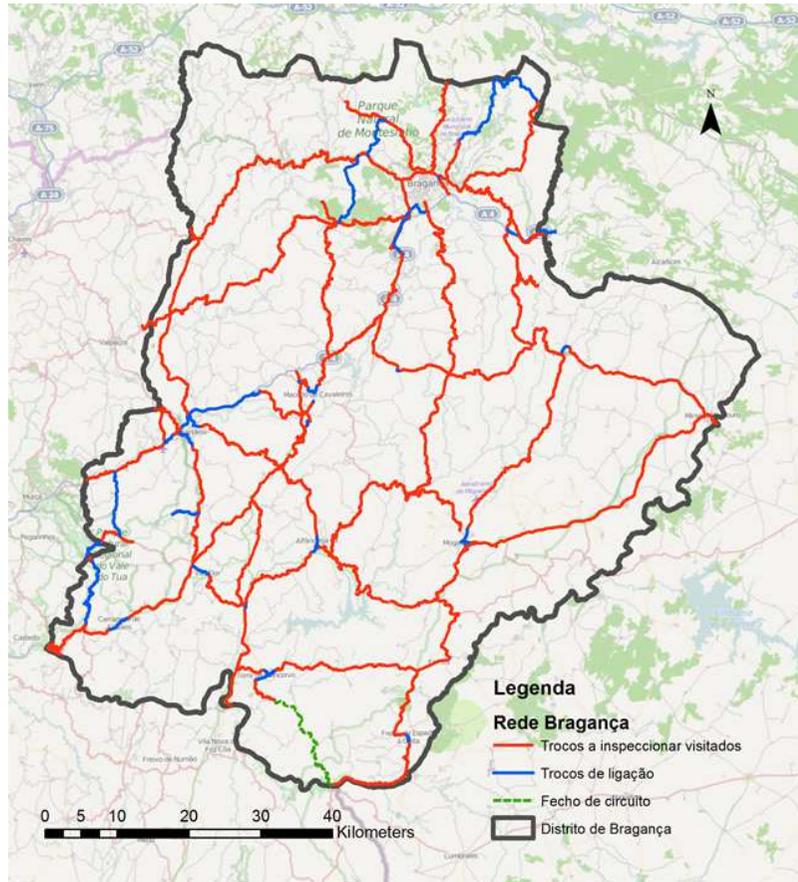
# Resultados

<b>Dados Gerais</b>	
<b>Velocidade Média da Inspeção</b>	55 km/h
<b>Velocidade Média Movimentações Auxiliares</b>	70 km/h
<b>Consumo Médio Veículo</b>	10 L/100 km
<b>Preço Médio Gasóleo</b>	1,3 €/L
<b>Salário Diário (por pessoa)</b>	50 €
<b>Preço Estadia/Dormida (por pessoa)</b>	20 €

# Resultados

	Circuito Fechado ("Teórico")		Opção de Voltar a Coimbra		Opção de Dormir em Bragança		% Redução
	km	€	km	€	km	€	%
<b>Solução Empírica da EP</b>	2777	361	11747	3188	3281	1308	0
<b>Modelo Direcionado</b>	1552	202	6565	1782	1834	731	44
<b>Modelo Misto</b>	1454	189	6150	1669	1718	685	48

# Solução Ótima



# Conclusão

- Utilizando os sentidos de inspeção atuais da EP - redução de 44% (km e €)
- Utilizando os sentidos de inspeção de forma livre - redução de 48% (km e €)
- A opção de dormir em Bragança, face à opção de voltar a Coimbra, reduz o total de kms em 72% e os custos em 59%

# Conclusões

- Foi desenvolvido um novo modelo na área dos Problemas do Carteiro Rural, com base nos modelos apresentados por:
  - Monroy-Licht *et al.* (2014)
  - Miller *et al.* (1960)
- Apresentação de uma proposta com o potencial de redução de custos e otimização do processo de inspeção da RRN
- O modelo é um primeiro passo para o desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão

# Desenvolvimentos Futuros

- Reformulação do modelo
  - Incorporar restrições que o aproximem da realidade (por exemplo, criação de planos diários de operação)
  - Integrar com a atual tecnologia utilizada pela IP
- Melhoria do processo de recolha e tratamento de dados
- Aplicação do modelo à totalidade da Rede Rodoviária Nacional



**TÉCNICO**  
LISBOA

II CONFERÊNCIA  
NACIONAL DE  
GEODECISÃO

12-13  
maio  
2016

Politécnico de Setúbal  
ESCOLA SUPERIOR  
DE TECNOLOGIA  
DO BARREIRO



# OTIMIZAÇÃO DE CIRCUITOS DE INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS: APLICAÇÃO À REDE RODOVIÁRIA NACIONAL

**Caso de Estudo: Infraestruturas de Portugal S.A.**

**Alexandre B. Gonçalves**, CERIS-ICIST

**Marta Castilho Gomes**, CERIS-CESUR

**Filipe F. Gomes**, Estudante de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial  
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa