

# Modelli di ottimizzazione per piani di evacuazione

Eliseo Clementini<sup>1</sup>, Antinisca Di Marco<sup>2</sup>,  
Evans E. Howard<sup>3</sup>, Ghulam Mudassir<sup>3</sup>,  
Lorenza Pasquini<sup>3</sup>, Giovanni Stilo<sup>1</sup>, **Claudio Arbib**<sup>1</sup>

[claudio.arbib@univaq.it](mailto:claudio.arbib@univaq.it)

(<sup>1</sup>) Dip. Ingegneria Industriale e dell'Informazione, ed Economia

(<sup>2</sup>) Dip. Ingegneria/Scienze dell'Informazione e Matematica

(<sup>3</sup>) Territori Aperti



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DELL'AQUILA



1-2 febbraio 2024

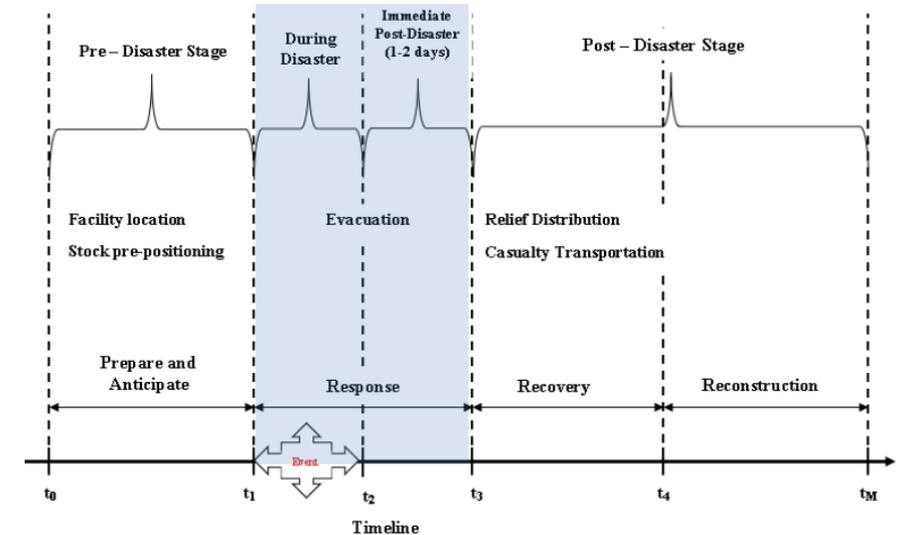


COMUNE DELL'AQUILA

# Pianificazione dell'evacuazione

- Pianificare l'evacuazione che sarà messa in atto durante il disastro e nelle ore immediatamente successive è essenziale per la sua riuscita
- La pianificazione richiede fra l'altro di
  - identificare i **luoghi sicuri**
  - identificare le **vie di fuga**
  - predisporre i **servizi** di supporto
  - progettare e realizzare l'**infrastruttura** (anche informativa) necessaria alle fasi operative
- Le informazioni raccolte, quali
  - topografia dei **luoghi** e loro relazioni spaziali (rete da dati GIS)
  - capacità stimata e livello di rischio delle **vie di fuga**
  - **popolazione** coinvolta: quanti, chi e dove

concorrono a formare un modello complessivo del sistema, sulla cui base progettare l'intervento



Topografia e  
relazioni  
spaziali



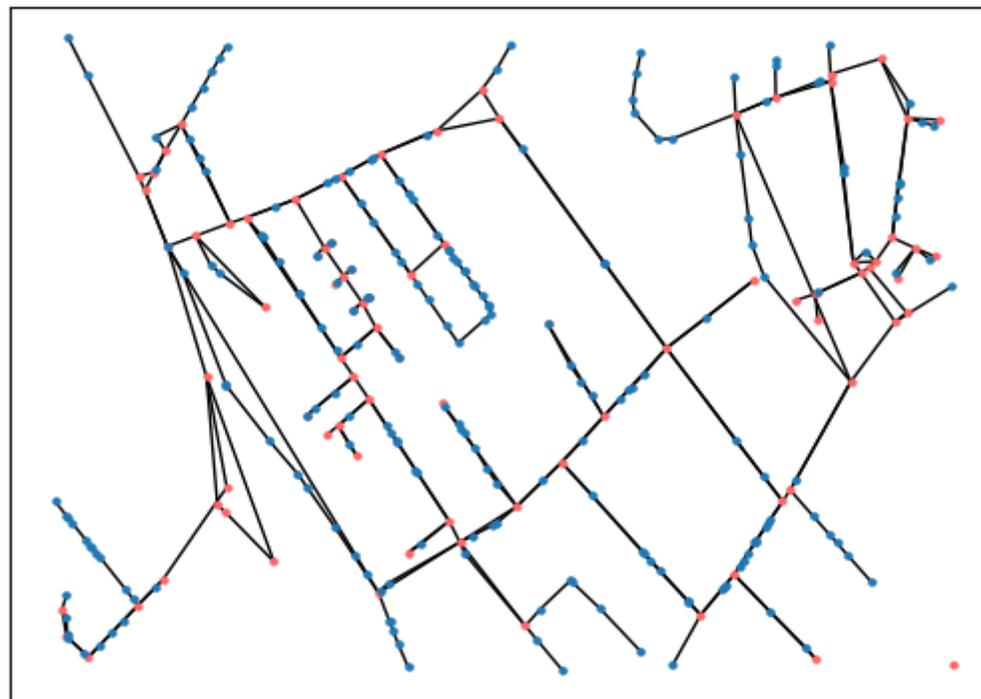
Istantanea satellitare (Google Earth)

# Topografia e relazioni spaziali



*Shapefile* derivato: edifici, loro accessi, incroci, strade

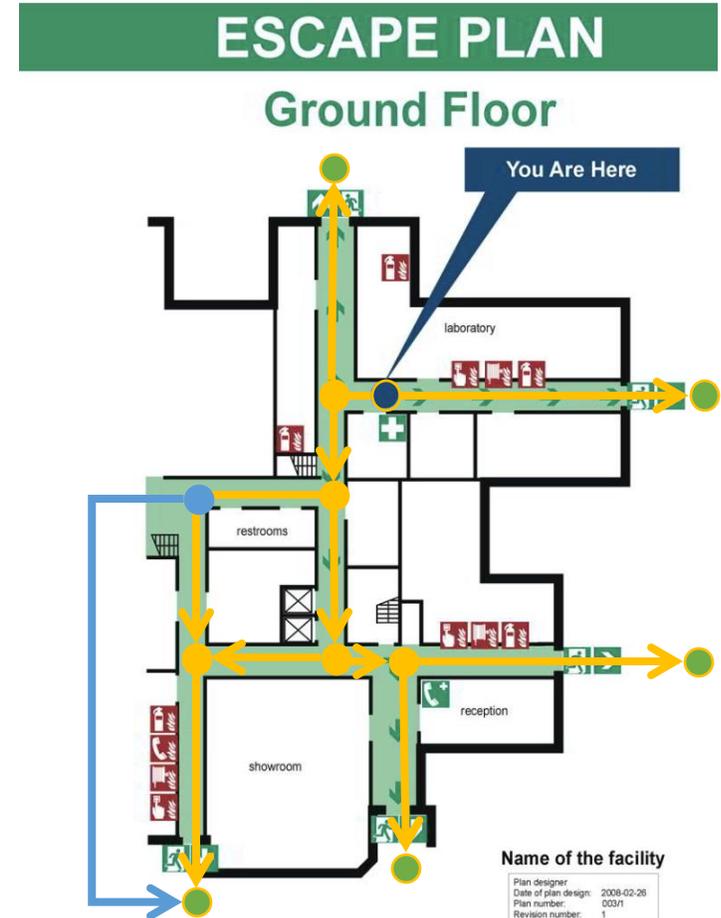
# Topografia e relazioni spaziali



Rete risultante: accessi di edifici, incroci, connessioni stradali

# Il piano di evacuazione

- Mostra le vie più brevi per raggiungere le **uscite di sicurezza**
- Queste formano una struttura ramificata chiamata «**grafo dei cammini minimi**»
- Posizioni iniziali diverse corrispondono a grafi diversi, ma molte posizioni **insistono su lunghi tratti comuni**
- In caso di emergenza, se tutti utilizzano le stesse vie d'uscita può crearsi **congestione**
- Come scegliere dei percorsi che **minimizzino il tempo di evacuazione totale**?

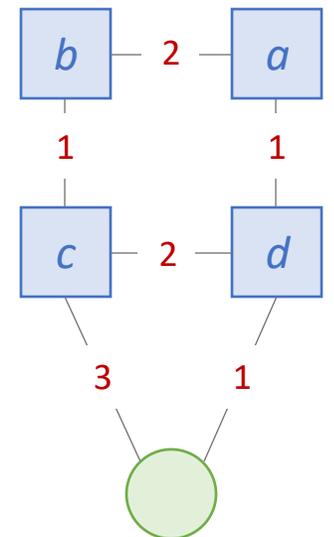
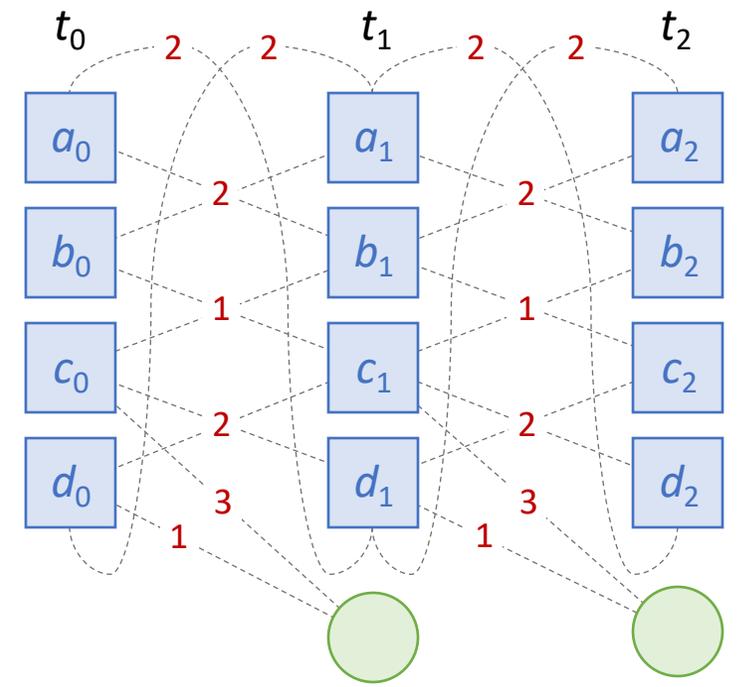




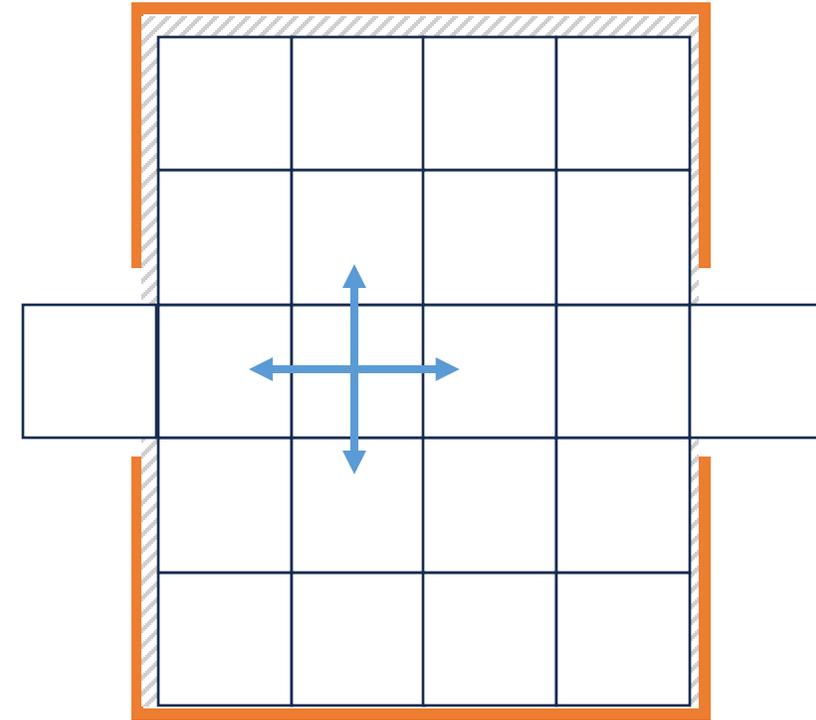
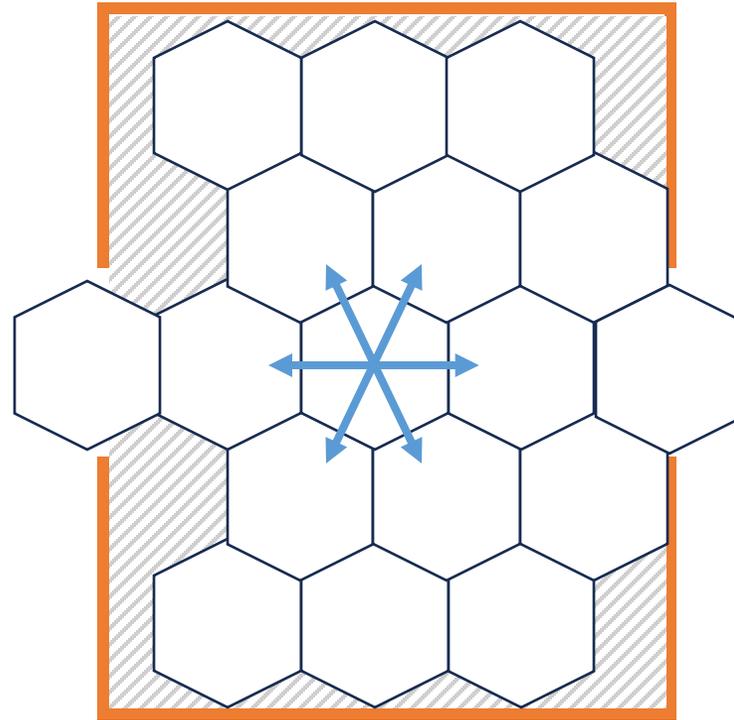
# Il piano di evacuazione

Per rispondere alla domanda dobbiamo costruire un modello di **flusso** su una «**rete dinamica**»

- 1958 L.R. Ford Jr., D.R. Fulkerson
- 1979 G.N. Berlin
- 1982 L.G. Chalmet, R.L. Francis, P.B. Saunders
- 2000 B. Hoppe, E. Tardos
- 2011 T. Hadzic, K.N. Brown, C.J. Sreenan
- 2019 H. Muccini, C. Arbib, P. Davidsson, M.T. Moghaddam  
C. Arbib, D. Arcelli, J. Dugdale, M.T. Moghaddam,  
H. Muccini
- N. Kamiyama
- 2021 M. Schlöter, M. Skutella, K.V. Tran

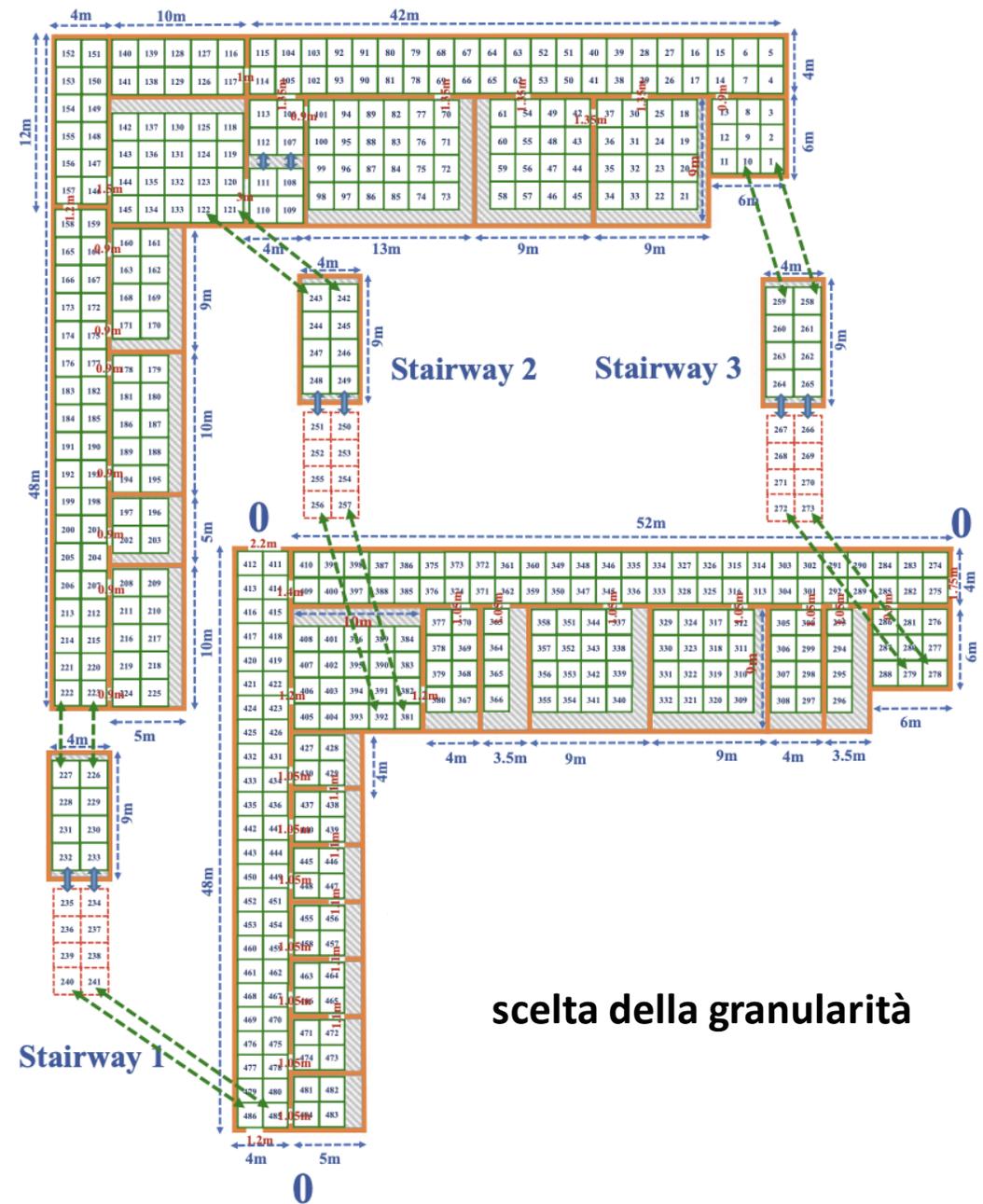


Modello  
(*transshipment*)



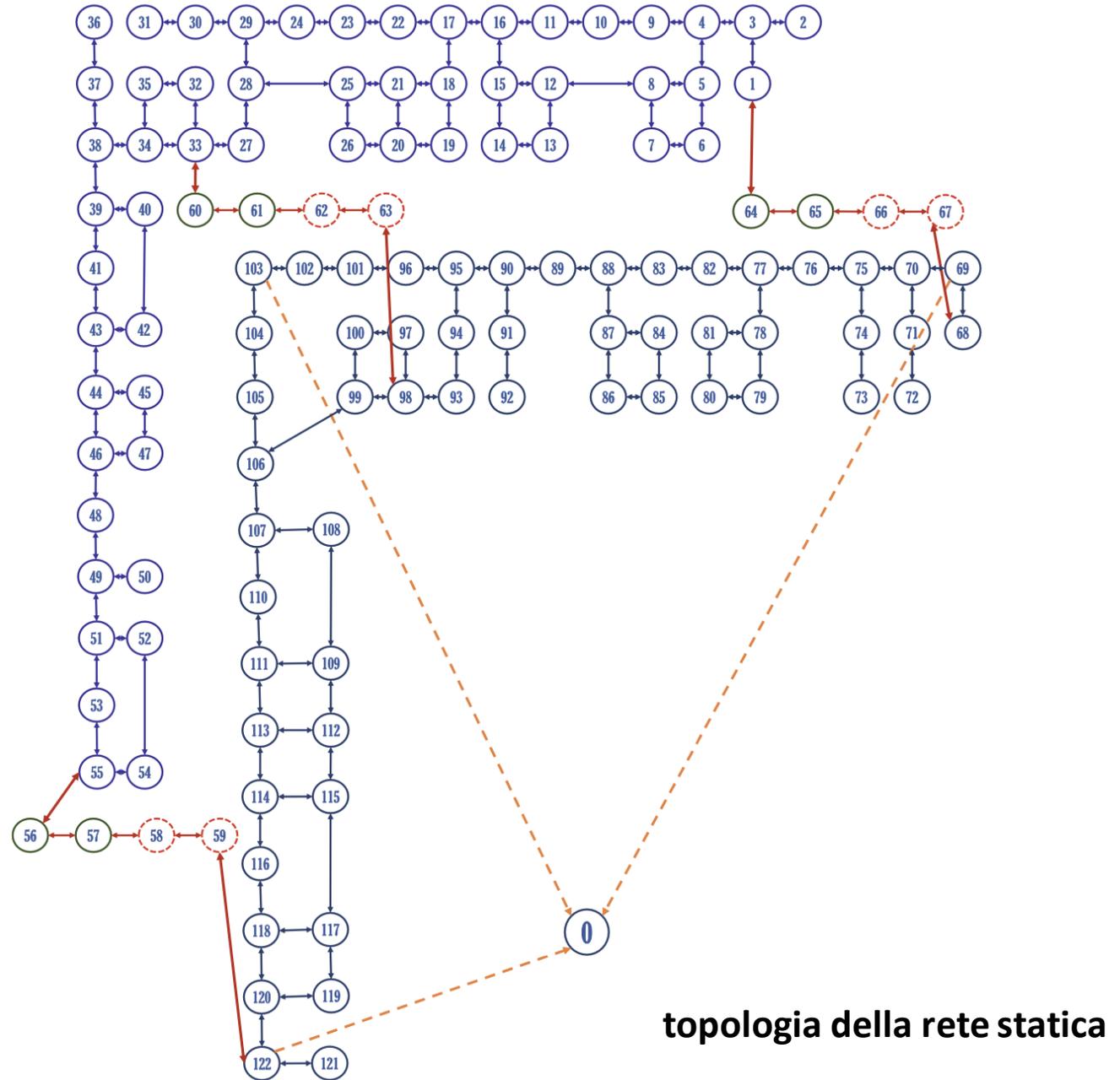
**sceita della tassellatura**

# Modello (transshipment)





# Modello (*transshipment*)



Modello  
(*transshipment*)

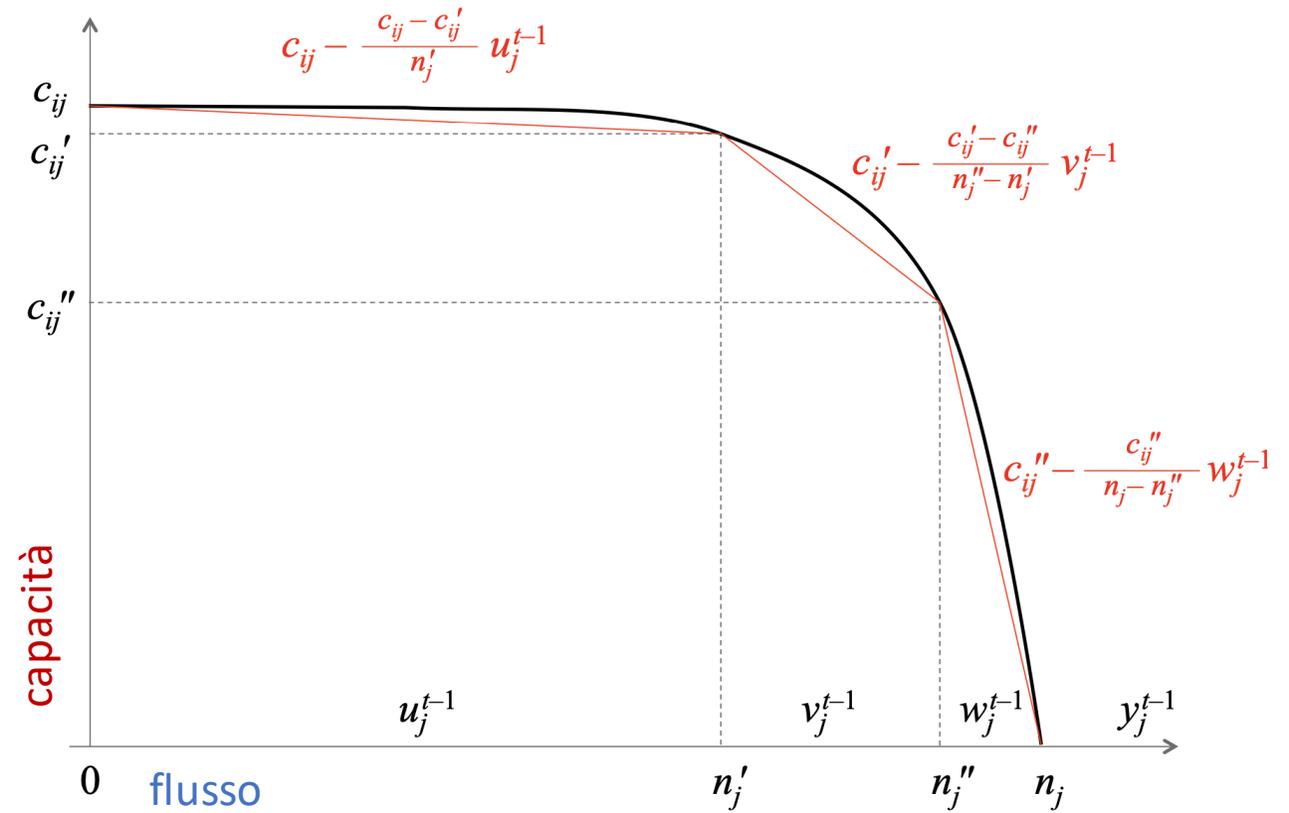
## Velocità pedonale

(da cui deriviamo il passo temporale)

in piano (m/s)		riferimento
under 65	over 65	
1.360		Fruin (1971)
1.360		Weidmann (1993)
1.250	0.970	Knoblauch et al. (1996)
$1.275 \pm 0.233$	$0.986 \pm 0.094$	<i>TranSafety</i> Inc. (1997)
1.200		Ye et al. (2008)
su scala (m/s)		riferimento
in salita	in discesa	
0.560	0.650	Fruin (1971)
0.610	0.690	Weidmann (1993)
$0.800 \pm 0.190$		Kratchman (2007)
0.590	0.760	Jiang et al. (2009)
$0.810 \pm 0.130$		Fang et al. (2012)
0.830	0.860	Patra et al. (2017)

Modello  
(transshipment)

### capacità degli archi vs. affollamento



persone evacuate entro  $\tau$

max  $y_0^\tau$

persone che si muovono da  $i$  a  $j$   
nell'intervallo  $(t-1, t]$

$$y_j^t - y_j^{t-1} - \sum_{i:ij \in A} x_{ij}^{t-1} + \sum_{i:ji \in A} x_{ji}^{t-1} = 0 \quad j \in V, t \in T, t > 0$$

persone che si  
trovano in  $j$  al tempo  $t$

$$0 \leq x_{ij}^t + x_{ji}^t \leq c_{ij} \quad t \in T, ij \in A$$

$$0 \leq y_i^t \leq n_i \quad t \in T, i \in V$$

$$y_i^{t-1} = u_i^{t-1} + v_i^{t-1} + w_i^{t-1} \quad x_{ij}^t = \phi_{ij}^t + \chi_{ij}^t + \psi_{ij}^t$$

$$u_i^{t-1} \leq n'_i \quad v_i^{t-1} \leq n''_i - n'_i \quad w_i^{t-1} \leq n_i - n'_i$$

$$0 \leq \phi_{ij}^t \leq c_{ij} - \frac{c_{ij} - c'_{ij}}{n'_j} u_j^{t-1}$$

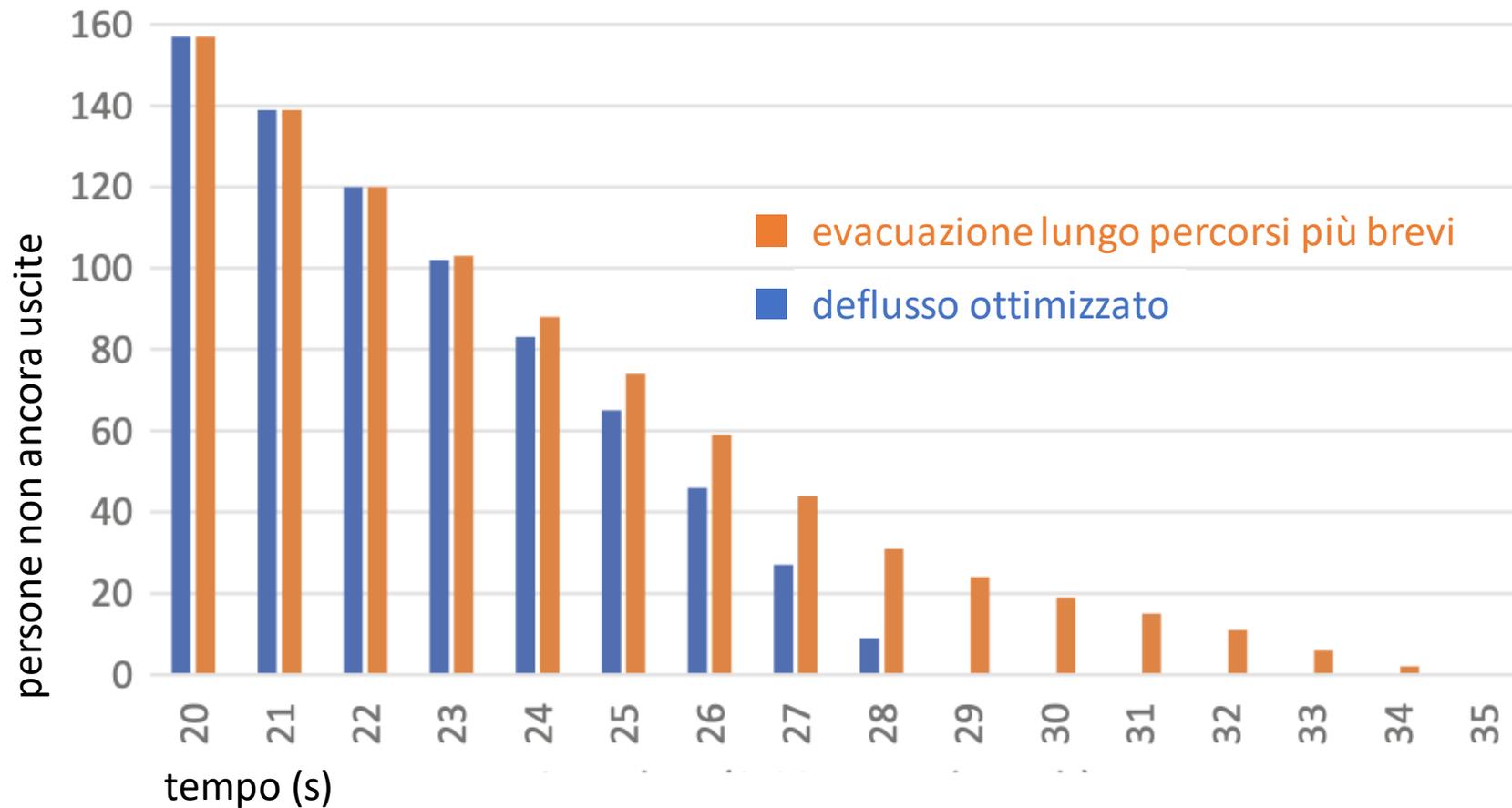
$$0 \leq \chi_{ij}^t \leq c'_{ij} - \frac{c'_{ij} - c''_{ij}}{n''_j - n'_j} v_j^{t-1}$$

$$0 \leq \psi_{ij}^t \leq c''_{ij} - \frac{c''_{ij}}{n_j - n''_j} w_j^{t-1}$$

Formulazione  
matematica

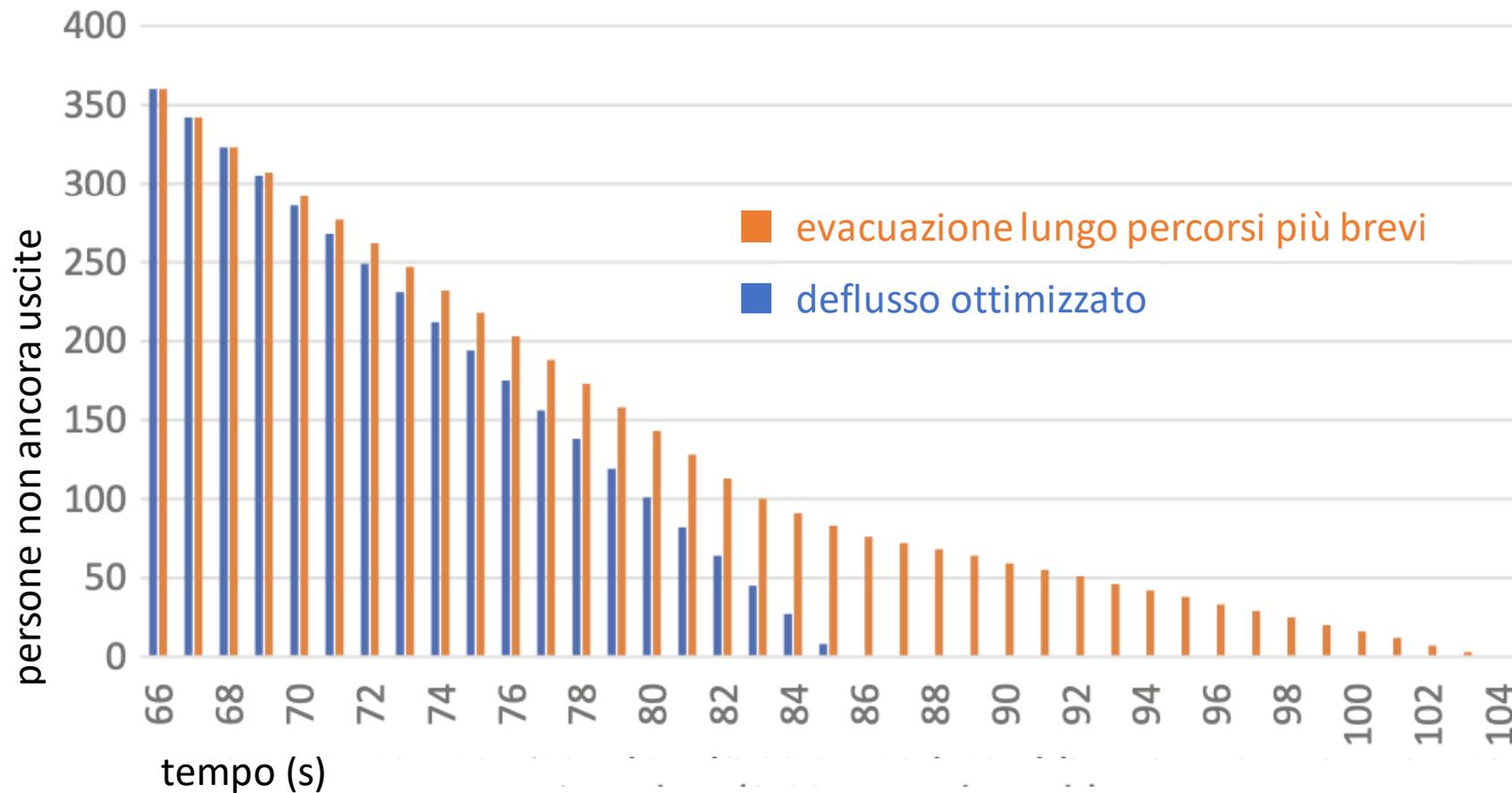
# Una simulazione (Palazzo Camponeschi, AQ)

528 persone

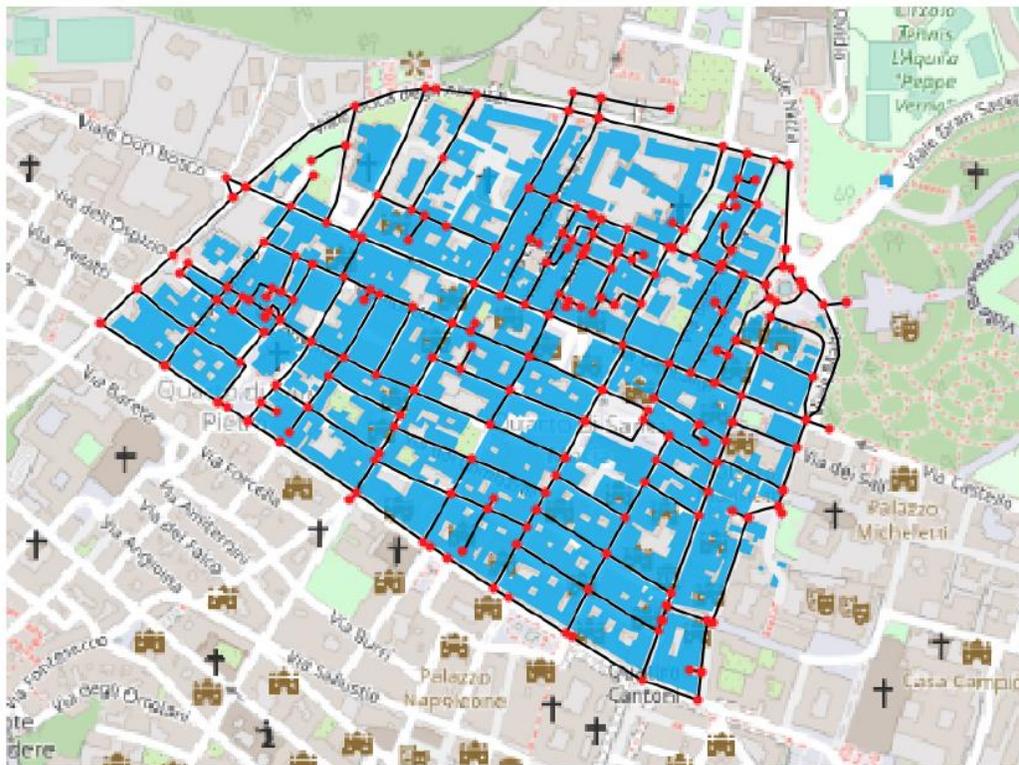


# Una simulazione (Palazzo Camponeschi, AQ)

1584 persone

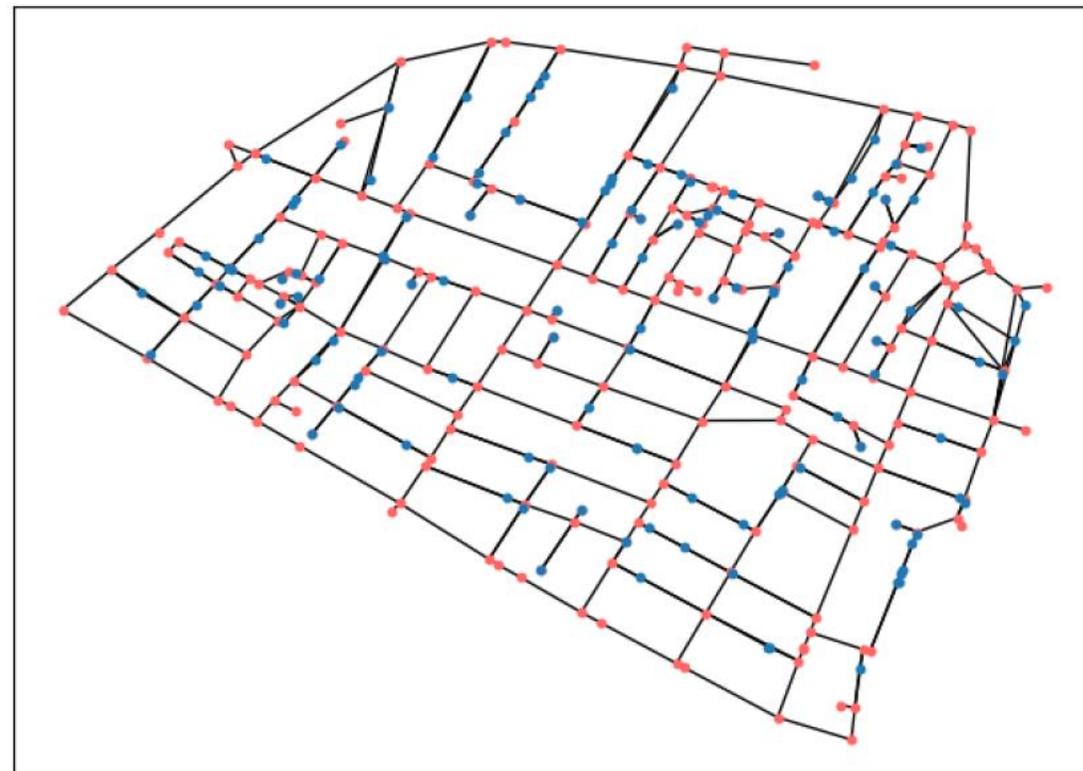


# Dall'edificio all'area urbana: L'Aquila



## Planimetria:

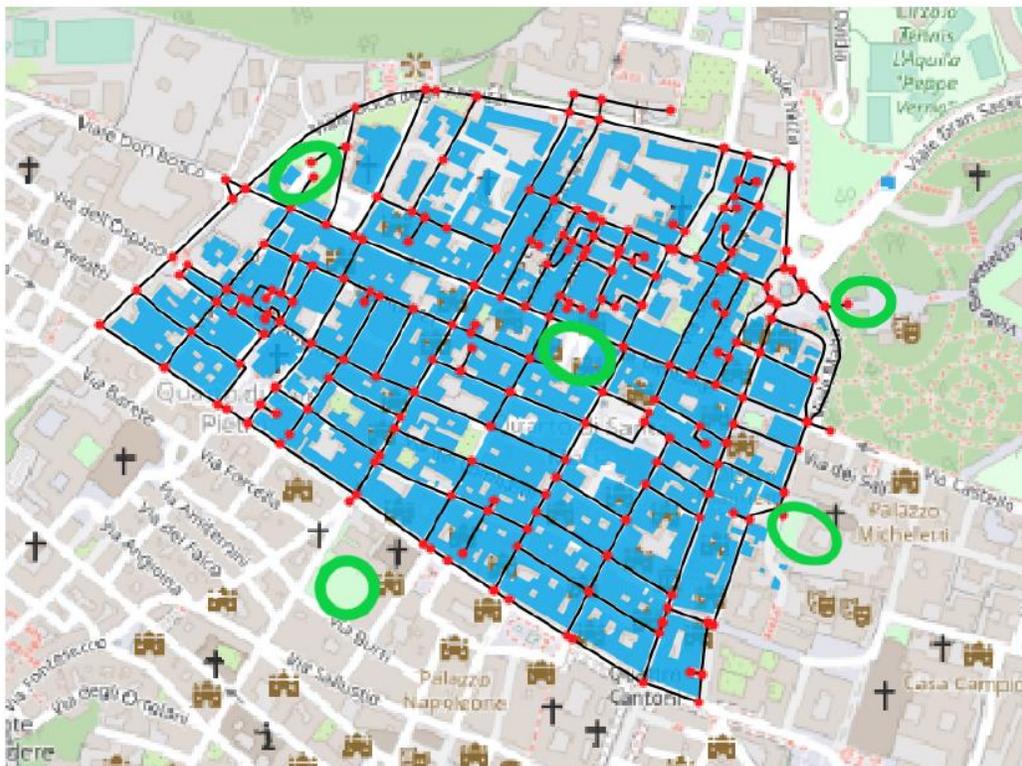
- Superficie 246,684.28 m<sup>2</sup>
- 133 edifici, 297 strade, 216 incroci



## Rete statica arricchita:

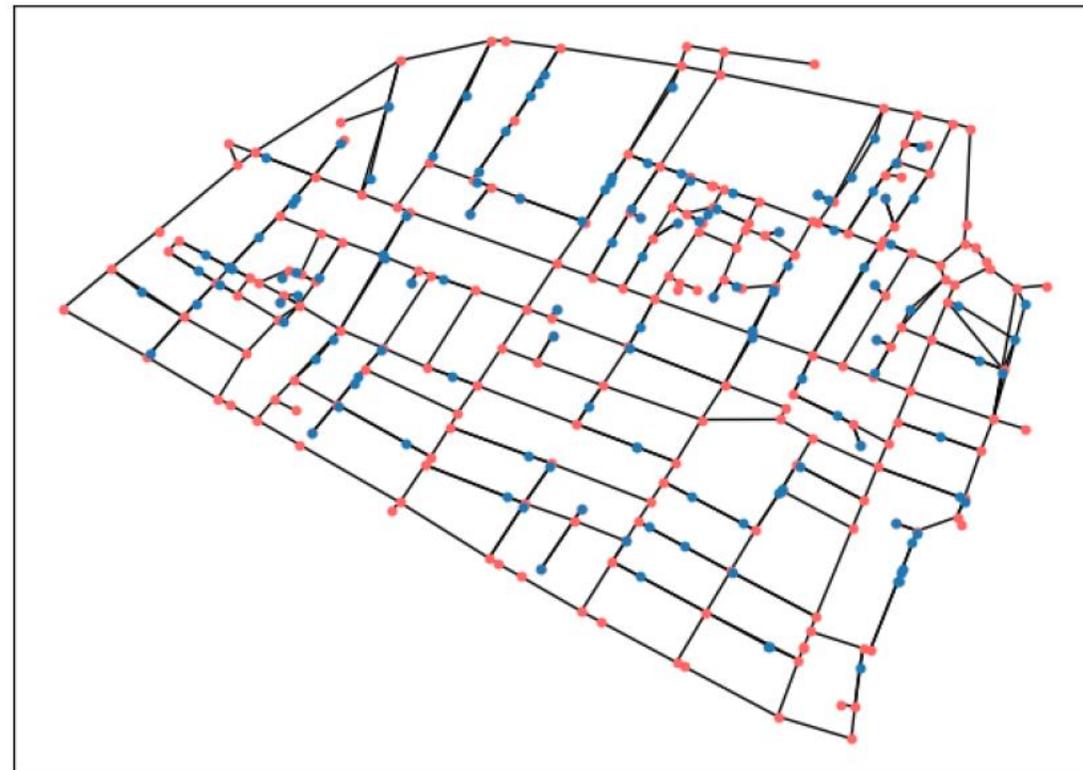
- 349 nodi (216 incroci + 133 edifici)
- 533 archi

# Dall'edificio all'area urbana: L'Aquila



Planimetria:

- Localizzazione dei luoghi sicuri



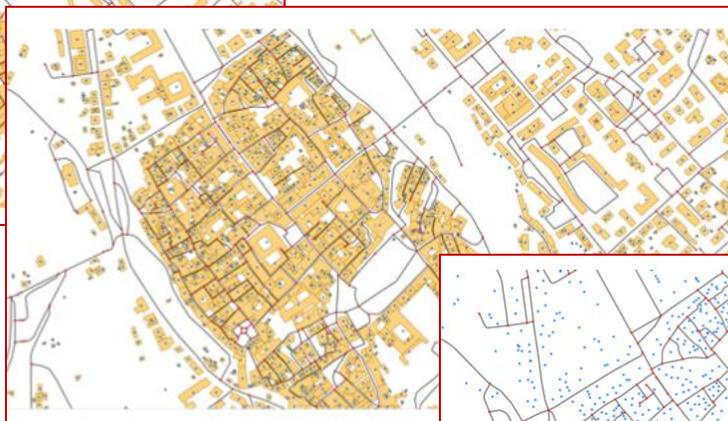
Altri attributi (OpenData):

- Larghezza strade
- Occupanti per edificio

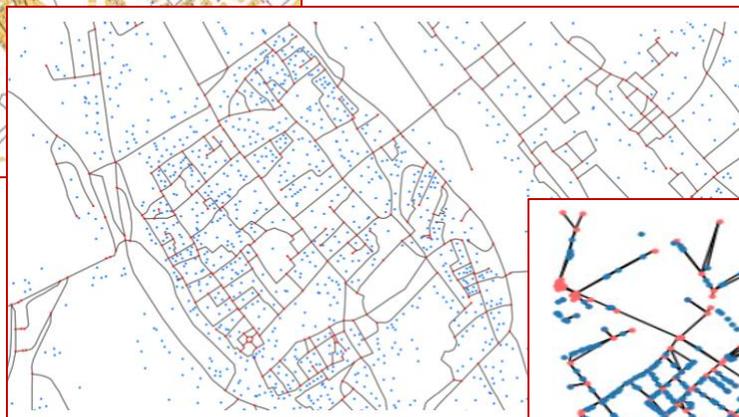
# Dall'edificio all'area urbana: Sulmona



planimetria GIS

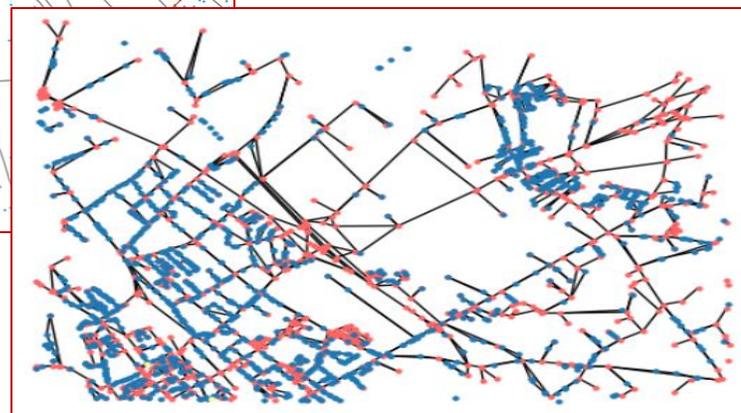


centroidi degli edifici



centroidi e rete urbana

rete statica arricchita: 12.675 nodi, 25.892 archi

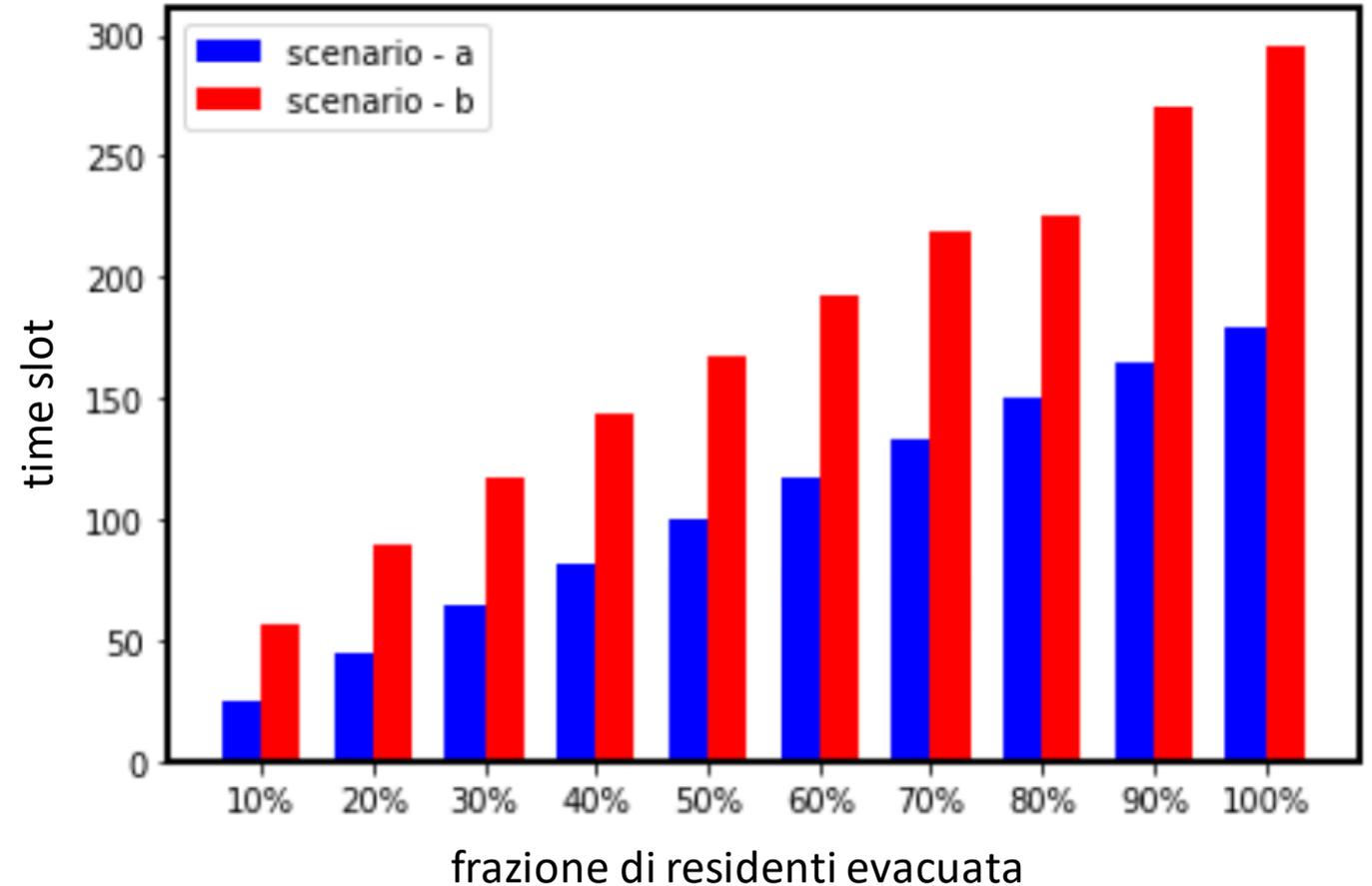


# Dall'edificio all'area urbana: Sulmona

Residenti da evacuare: 26.050

Scenario a: 30 luoghi sicuri

Scenario b: 15 luoghi sicuri

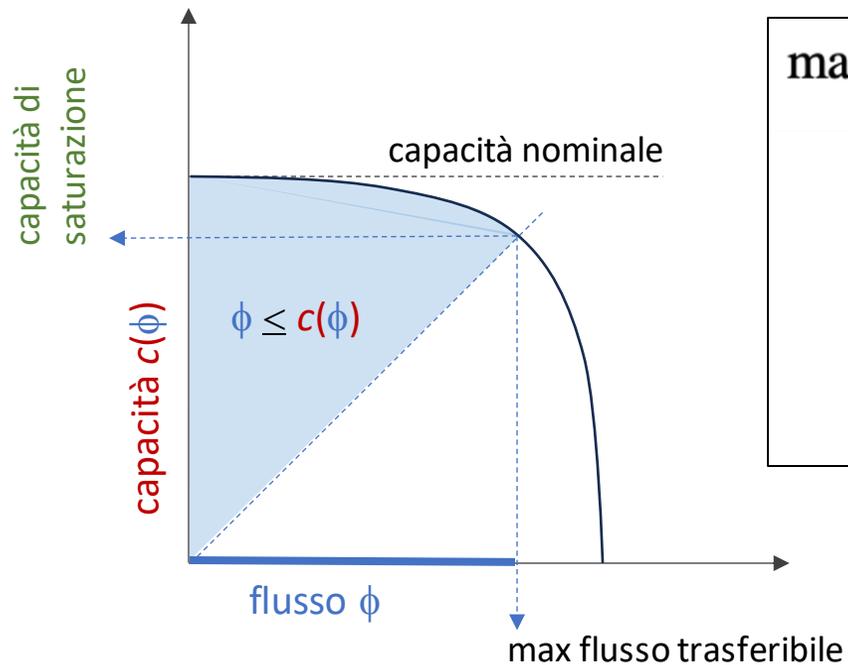


# Dall'edificio all'area urbana

Problemi di

- Scalabilità

A pari granularità, la complessità di un modello a rete dinamica cresce sensibilmente con le **dimensioni** → **capacità di saturazione**



$$\max y_0^\tau$$

$$y_j^t - y_j^{t-1} - \sum_{i:ij \in A} x_{ij}^{t-1} + \sum_{i:ji \in A} x_{ji}^{t-1} = 0$$

$$0 \leq x_{ij}^t + x_{ji}^t \leq c_{ij}$$

$$0 \leq y_i^t \leq n_i$$

$$j \in V, t \in T, t > 0$$

$$t \in T, ij \in A$$

$$t \in T, i \in V$$

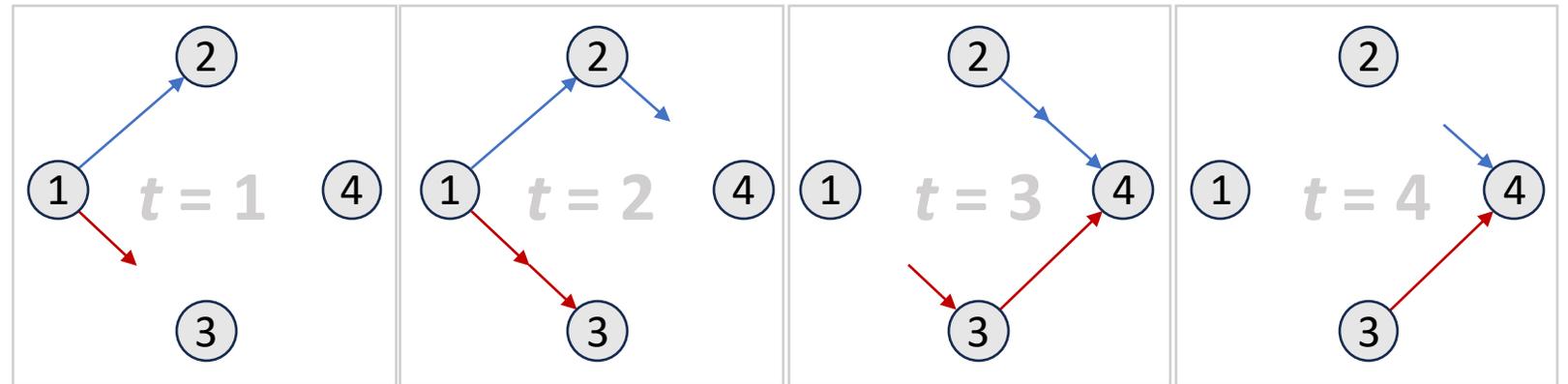
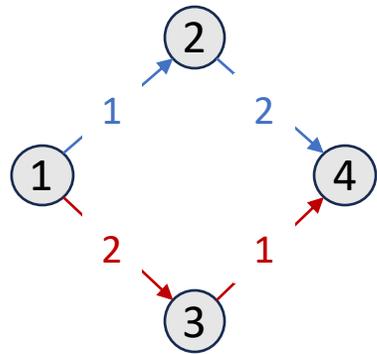
modello meno complicato

# Dall'edificio all'area urbana

Problemi di

- Scalabilità

A pari granularità, la complessità di un modello a rete dinamica cresce sensibilmente con le **dimensioni** → *chain-decomposable flows* (Hoppe and Tardos, 2000)



Massimo (1, 4)-flusso con capacità unitarie  
decomposto in due flussi-catena  
(pesi sugli archi = tempi di percorrenza)

deflusso di  $F = 4$  persone ripetuto nel tempo

# Dall'edificio all'area urbana

## Problemi di

- Scalabilità

A pari granularità, la complessità di un modello a rete dinamica cresce sensibilmente con le **dimensioni** → *chain-decomposable flows* (Hoppe and Tardos, 2000)

- Informazione incompleta

A differenza dei partecipanti a un evento, collocazione e caratteristiche degli abitanti di un'area urbana sono note solo **staticamente** e **approssimativamente** (dai registri anagrafici)

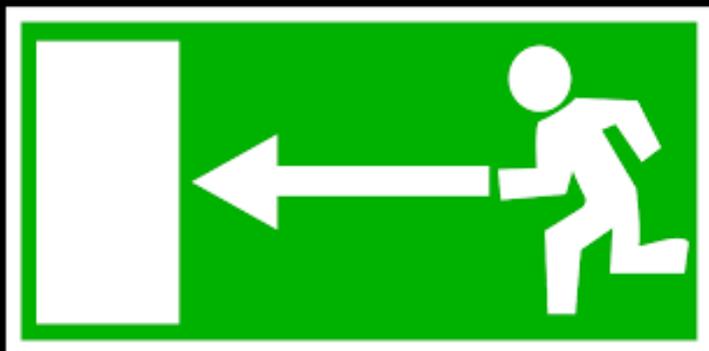
- Implementazione operativa

E' difficile concepire un'infrastruttura informativa **dinamica** (e.g., una app) per dirigere i flussi

Applicazione: simulazione del **tempo minimo** di evacuazione

# C'è ancora da fare...

- Calibrare i modelli: **tassellatura**, **granularità**, **capacità** di saturazione, **lunghezza** dei tratti stradali, **velocità** di percorrenza
- Migliorare l'**efficienza** del metodo per trattare grandi dimensioni in **tempo reale**
- Utilizzare informazioni di deflusso ottimo nella **gestione** in tempo reale dell'evacuazione:
  - segnalazione fissa
  - protocolli di segnalazione durante l'evacuazione
  - gestione del personale di assistenza
- Test «in vivo»: **esercitazione**



**Grazie dell'attenzione**

# Modelli di ottimizzazione per piani di evacuazione

Eliseo Clementini, Antinisca Di Marco,  
Evans E. Howard, Ghulam Mudassir,  
Lorenza Pasquini, Giovanni Stilo, **Claudio Arbib**

[claudio.arbib@univaq.it](mailto:claudio.arbib@univaq.it)



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DELL'AQUILA



1-2 febbraio 2024



COMUNE DELL'AQUILA