


 REPUBBLICA ITALIANA  
 Regione Siciliana  
 Assessorato dell'Industria  
 Assessorato Territorio ed Ambiente




*Termovalorizzazione degli RSU  
 le ragioni del SI, le ragioni del NO*

Enna, 13 giugno 2009

**L'incidenza del trasporto dei RSU nelle  
 fasi di avvio al trattamento e/o  
 smaltimento**

Università di Catania  
 Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

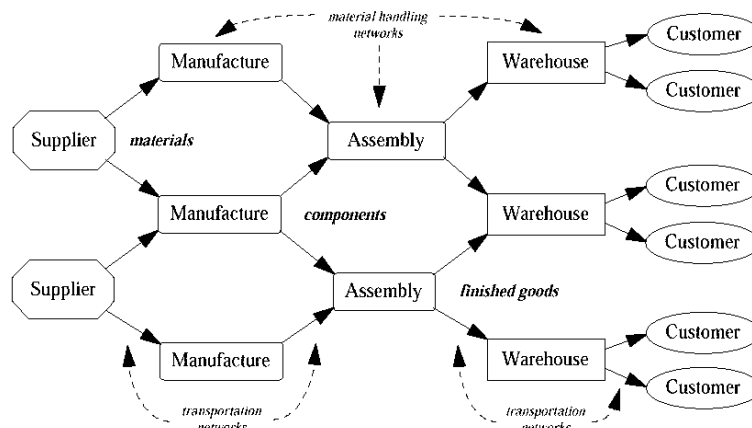

 Giuseppe Inturri  
 Giuseppe Mancini  
 Sebastiano Cassaniti  
 ginturri@dica.unict.it

## Il ruolo dei trasporti nella gestione dei rifiuti

- Se pensiamo ai rifiuti come **risorsa**, la produzione dei rifiuti non è diversa dalla produzione di un qualunque altro bene
- La gestione dei rifiuti può dunque essere trattata come un problema di **logistica**
- La logistica si occupa dell'insieme delle attività dedicate alla trasformazione e alla circolazione delle merci
  - la fornitura delle materie prime per la produzione
  - la funzione fondamentale di trasporto e distribuzione
  - la vendita all'ingrosso e di dettaglio
  - la consegna diretta delle merci alle residenze
  - la gestione dei flussi informativi.

## Catena logistica - Supply chain

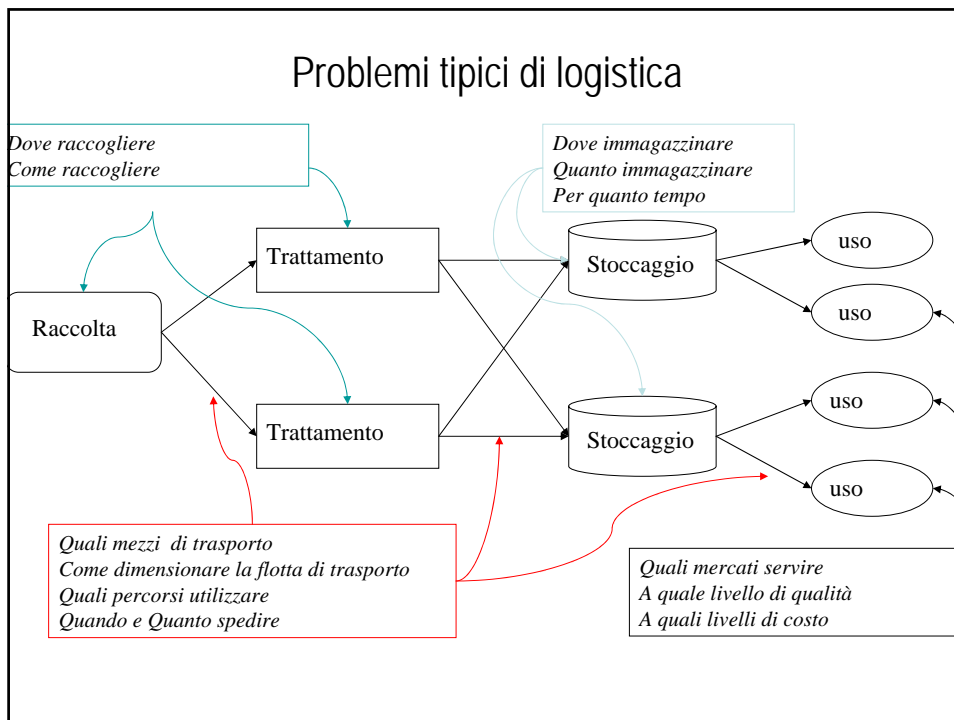
- Le **reti di trasporto** muovono le merci **tra** gli impianti; le **reti di movimentazione** dei materiali muovono le merci **all'interno** degli impianti



## Analogia tra logistica della produzione e logistica dei rifiuti

- |  |   |
|--|---|
| → Produzione materie prime   | → Raccolta dei rifiuti  |
| → <b>Trasporto</b> delle materie prime agli impianti produttivi                | → <b>Trasporto</b> e distribuzione agli impianti di trattamento                       |
| → Produzione   | → Trattamento   |
| → <b>Trasporto</b> dei prodotti finiti ai magazzini di distribuzione e vendita | → <b>Trasporto</b> e stoccaggio dei prodotti di trattamento (es. materiali riciclati) |

- Emerge il ruolo fondamentale dei **trasporti** all'interno della catena logistica



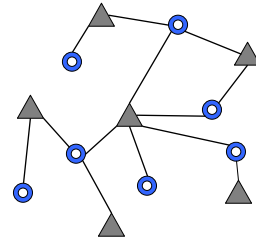
### Problemi tipici che possono essere affrontati con le tecniche della logistica

- Localizzazione e dimensionamento degli impianti di trattamento
- Minimizzazione dei costi di trasporto dalle aree di raccolta agli impianti di trattamento
- Ambito ottimale delle aree di raccolta

## Esempio di problema di localizzazione degli impianti di trattamento

### DATI

- ▲ N impianti di trattamento
- M aree di raccolta
- $C_{ij}$  costo di trasporto
- $F_j$  costo di attivazione impianto



### TROVARE

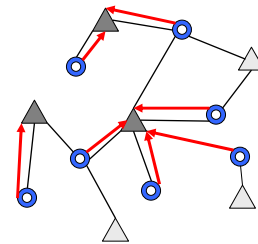
- Quali impianti attivare
- Assegnazione delle aree di raccolta agli impianti

### OBIETTIVO

- Minimizzare il costo di trasporto

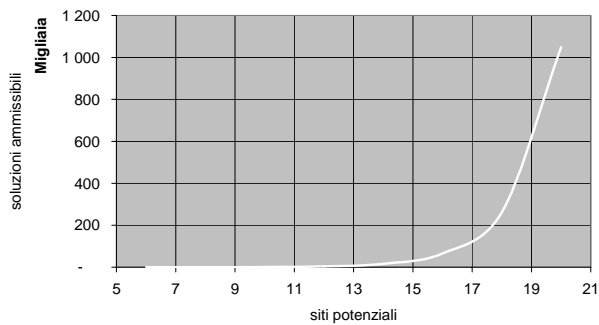
## Esempio di soluzione

- Si tratta di un problema complesso anche per un numero limitato di potenziali localizzazioni
- Ogni soluzione ha un costo diverso
- Dobbiamo trovare quella ottima, cioè con il costo minimo



$2^N$

localizzazione ottima degli impianti



| localizzazioni potenziali | soluzioni possibili |
|---------------------------|---------------------|
| 6                         | 64                  |
| 8                         | 256                 |
| 10                        | 1 024               |
| 12                        | 4 096               |
| 14                        | 16 384              |
| 16                        | 65 536              |
| 18                        | 262 144             |
| 20                        | 1 048 576           |
| 22                        | 4 194 304           |
| 24                        | 16 777 216          |
| 26                        | 67 108 864          |

## La Ricerca Operativa

- Per la soluzione di questi problemi esistono le tecniche consolidate della Ricerca Operativa
- Fornisce strumenti matematici di supporto alle attività decisionali in cui occorre gestire e coordinare attività e risorse limitate al fine di massimizzare o minimizzare una funzione obiettivo
- Soluzione di un problema con la RO
  - Formulazione del problema
  - Descrizione (semplificata) del problema mediante un modello matematico
  - Formulazione dell' algoritmo di risoluzione
  - Soluzione ottima

## Minimizzazione dei costi di trasporto nella gestione dei rifiuti

- Caso studio applicato alla Sicilia: **minimizzazione dei costi di trasporto dalle aree di raccolta agli impianti di trattamento**
- Il **problema del trasporto** in Ricerca Operativa in generale riguarda la distribuzione di qualunque tipo di merce da qualunque tipo di centri di offerta (nodi origine), a qualunque gruppo di centri di ricevimento (nodi destinazione), in modo da minimizzare il costo totale di distribuzione.

## Corrispondenza tra caso studio e problema generale del trasporto

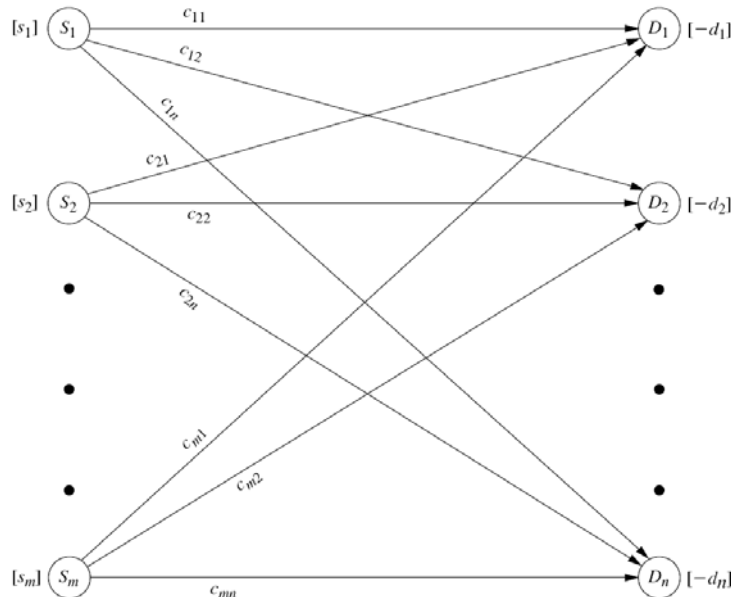
| Problema generale   | Caso studio  |
|---|--|
| Unità di una data merce   | Carichi di rifiuti raccolti  |
| $m$ origini   | Aree di raccolta   |
| $n$ destinazioni  | Impianti di trattamento  |
| Offerta $s_i$ dall'origine $i$  | Volumi di rifiuti prodotti nel centro di raccolta $i$                                  |
| Domanda $d_j$ nella destinazione $j$  | Assegnazione dei carichi agli impianti di trattamento $j$                              |
| Costo $c_{ij}$ per unità distribuita dall'origine $i$ alla destinazione $j$ | Costo di spedizione di un carico di rifiuti dall'area di raccolta $i$ all'impianto $j$ |

## Parametri del modello

|        | Cost per Unit Distributed |          |       |          | Supply |
|--------|---------------------------|----------|-------|----------|--------|
|        | Destination               |          |       |          |        |
|        | 1                         | 2        | ...   | $n$      |        |
| 1      | $c_{11}$                  | $c_{12}$ | ...   | $c_{1n}$ | $s_1$  |
| 2      | $c_{21}$                  | $c_{22}$ | ...   | $c_{2n}$ | $s_2$  |
| ⋮      | .....                     | .....    | ..... | .....    | ⋮      |
| $m$    | $c_{m1}$                  | $c_{m2}$ | ...   | $c_{mn}$ | $s_m$  |
| Demand | $d_1$                     | $d_2$    | ...   | $d_n$    |        |

- la formulazione di un problema di trasporto richiede esclusivamente i dati contenuti in questa tabella
- in alternativa i parametri possono essere rappresentati con lo schema della figura seguente

## Rappresentazione grafica del modello



## Formulazione matematica

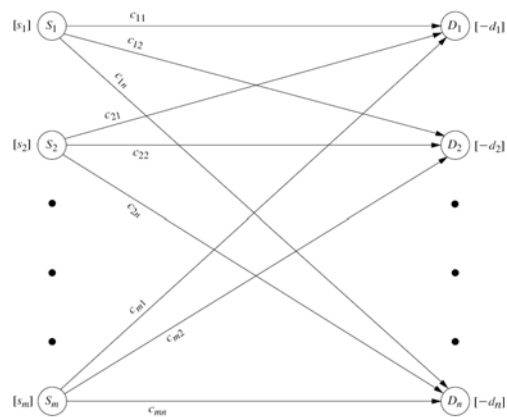
$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

**Vincoli**

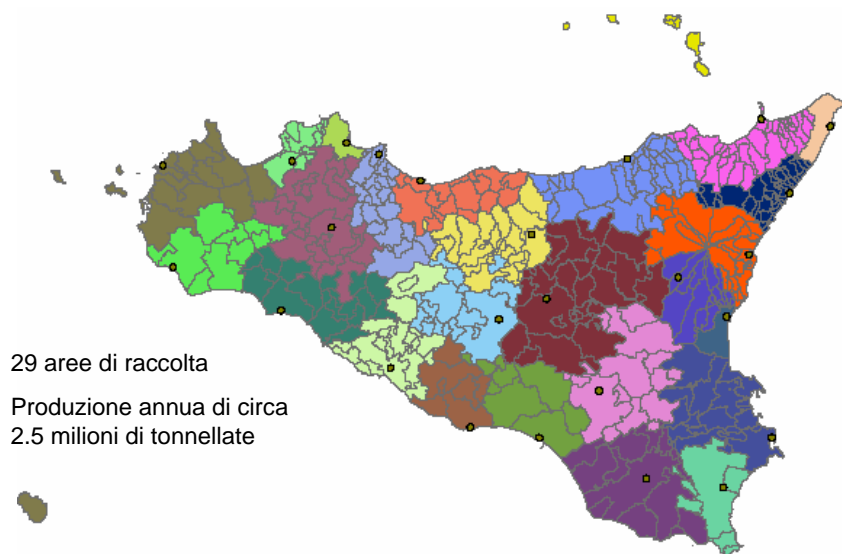
$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = s_i$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = d_j$$

$$x_{ij} \geq 0$$

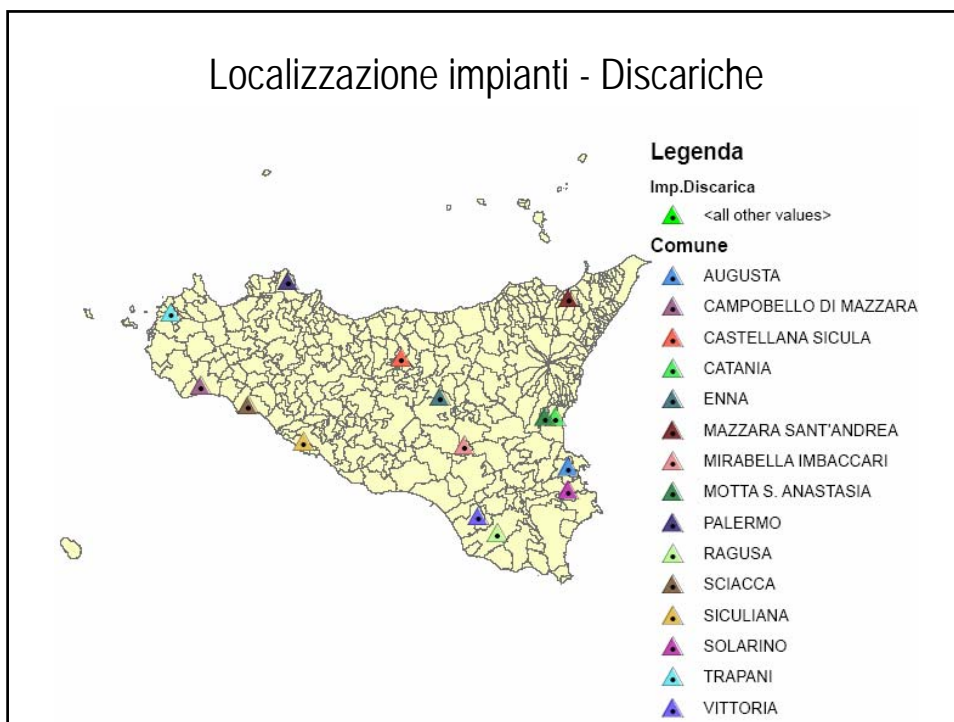


## Zonizzazione – Aree di raccolta

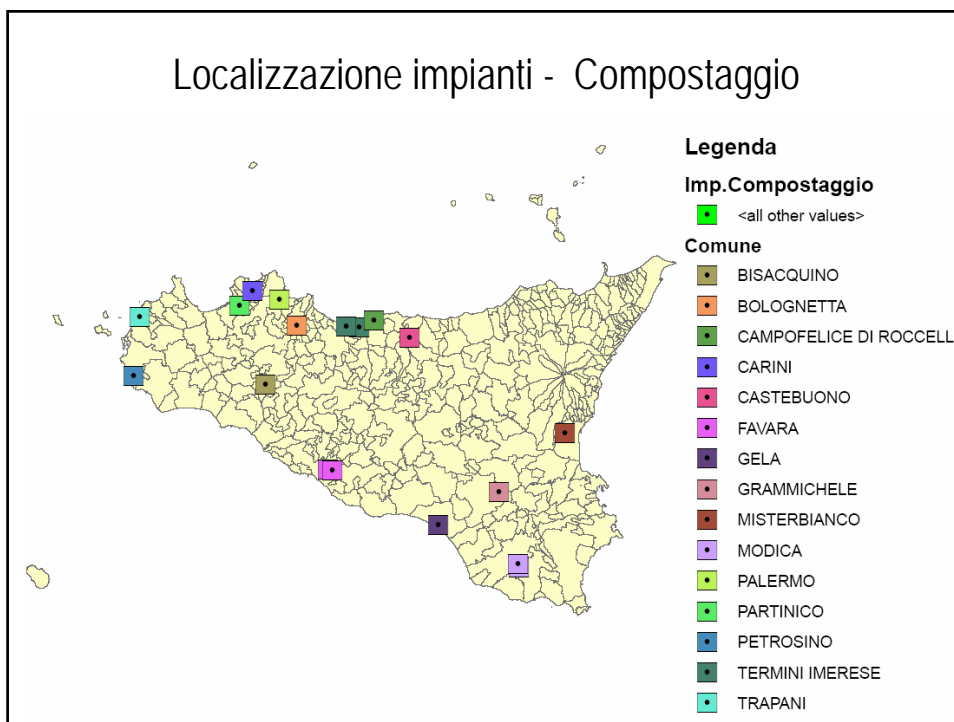


| AREA DI RACCOLTA        | ATO     | POPOLAZ. | R.S.U.<br>(T/ANNO) |
|-------------------------|---------|----------|--------------------|
| MESSINA                 | ME3     | 259156   | 123381             |
| GIARRE                  | CT1-CT2 | 275565   | 143626             |
| CATANIA                 | CT4     | 337862   | 231209             |
| SIRACUSA                | SR1     | 303847   | 157598             |
| NOTO                    | SR2     | 99782    | 39716              |
| RAGUSA                  | RG1     | 303451   | 139140             |
| CALTAGIRONE             | CT5     | 155201   | 53561              |
| ENNA                    | EN1     | 182927   | 69578              |
| CALTANISSETTA           | CL1     | 134114   | 56214              |
| GELA                    | CL2     | 148115   | 66472              |
| AGRIGENTO               | AG2     | 198422   | 95067              |
| LICATA                  | AG3     | 137226   | 54283              |
| TERMINI IMERESE         | PA5     | 106868   | 46650              |
| PALERMO                 | PA3     | 681103   | 374033             |
| PARTINICO               | PA1     | 117934   | 77144              |
| CORLEONE                | PA2     | 113083   | 50275              |
| MILAZZO                 | ME2     | 211028   | 85823              |
| SANT'AGATA DI MILITELLO | ME1     | 115129   | 42510              |
| SANTA TERESA RIVA       | ME4     | 78019    | 47986              |
| TRAPANI                 | TP1     | 291016   | 135178             |
| MAZZARRA DEL VALLO      | TP2     | 141468   | 104389             |
| BIANCAVILLA             | CT3     | 333971   | 164137             |
| GANCI                   | PA6     | 43088    | 22793              |
| SCIACCA                 | AG1     | 133387   | 48453              |
| BAGHERIA                | PA4     | 177298   | 86711              |

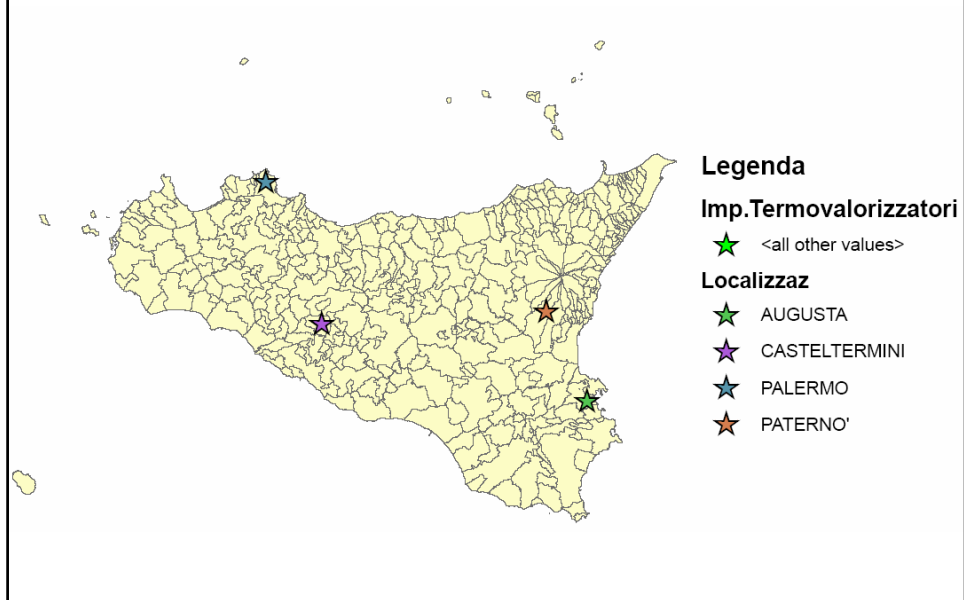
## Localizzazione impianti - Discariche



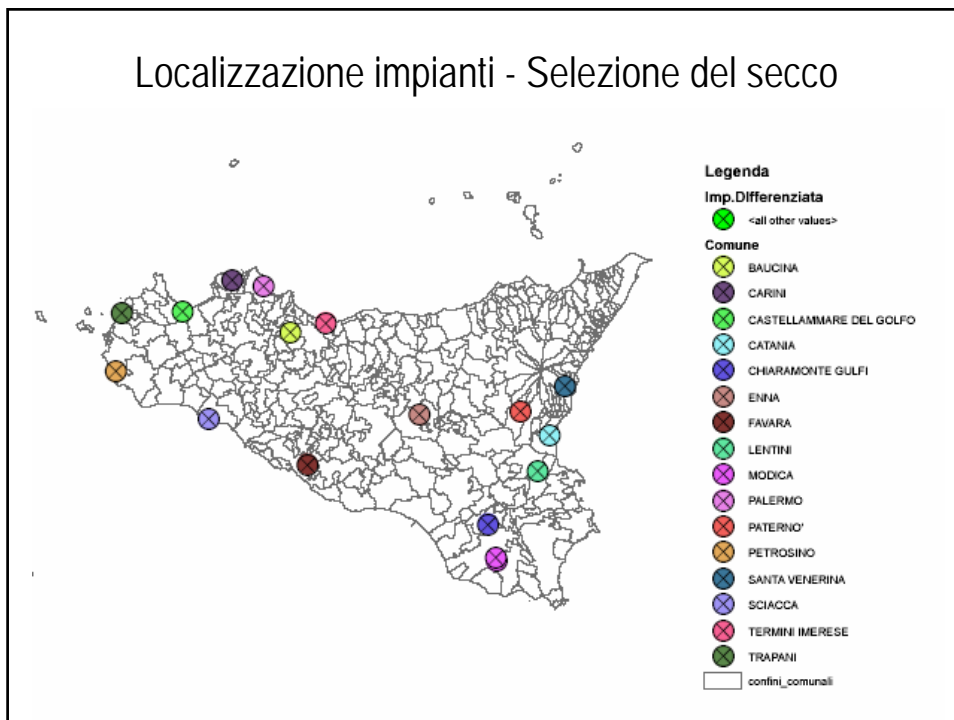
## Localizzazione impianti - Compostaggio



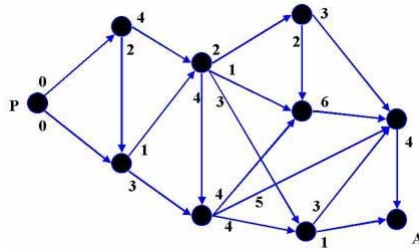
## Localizzazione impianti - Termovalorizzatori



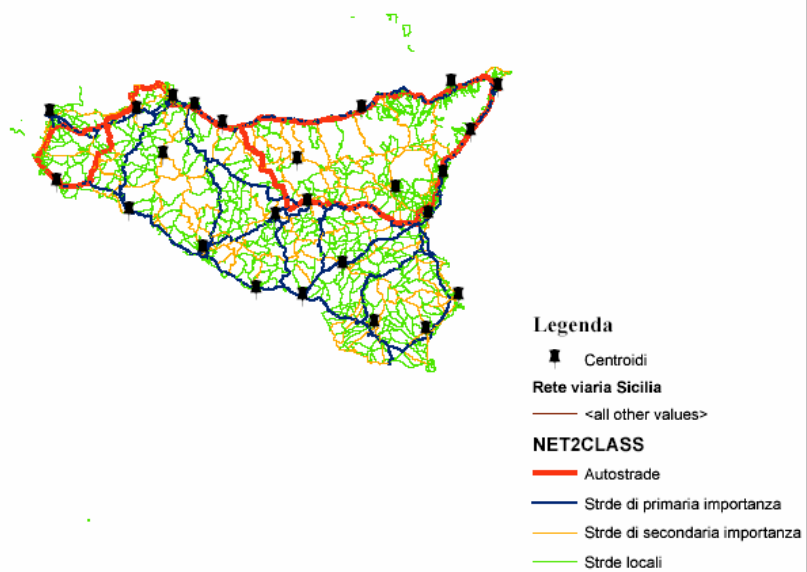
## Localizzazione impianti - Selezione del secco



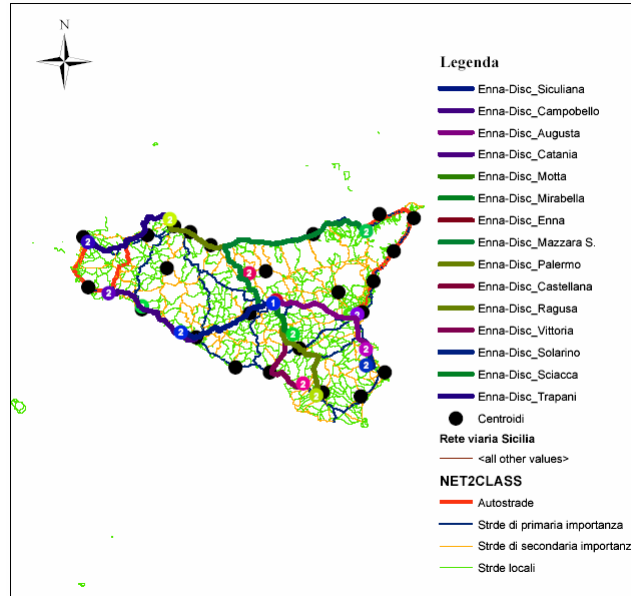
## Grafo della rete dei trasporti



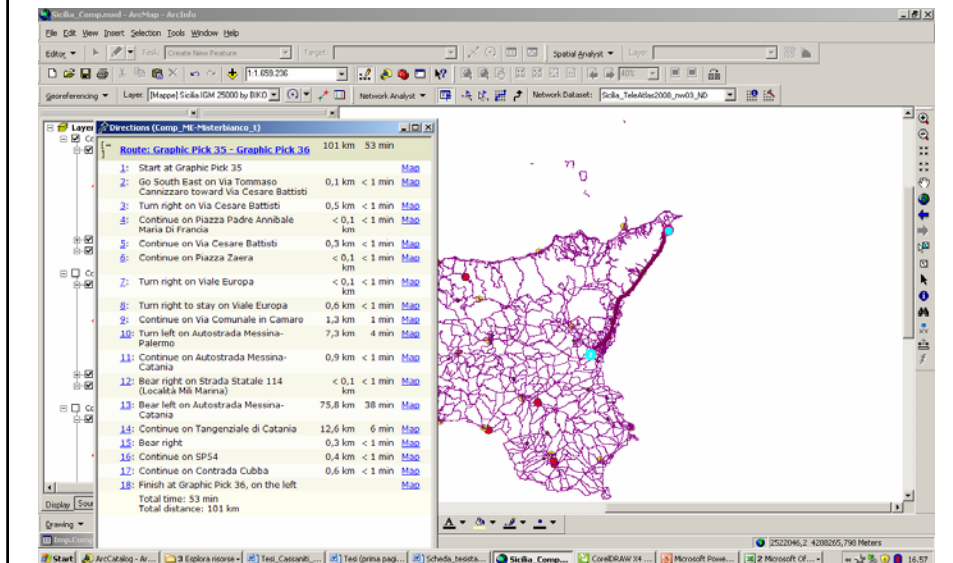
## Grafo della rete stradale siciliana



## Albero dei percorsi da ogni area di raccolta a tutti gli impianti disponibili



## Calcolo dei percorsi minimi per ogni coppia di nodi con procedura incorporata in ambiente GIS



## Calcolo dei costi unitari di trasporto

- Le principali voci che compongono il costo di smaltimento dei rifiuti sono:
  - costo di raccolta
  - costo di trasporto
  - costo di conferimento in discarica
  - Costi esterni (inquinamento atmosferico, clima, incidenti, rumore)
- Il costo di trasporto si compone di
  - costi operativi (carburante, manutenzione, ecc)
  - costo del personale (costo di manodopera dell'operatore a bordo)
- I costi di trasporto sono stati calcolati in termini unitari (€/ton) per ciascuna possibile relazione di collegamento tra centro di raccolta e impianto di trattamento

$$C\left[\frac{\text{€}}{t}\right] = C_{tr} + A + F + P + E + C_{conf} + C_{ester}$$

## Scenari analizzati

1. Scenario 'Tutto discarica'
2. Scenario 'Tutto discarica ottimizzato'
3. Scenario 'Tutto termovalorizzatori'
4. Scenario 'Tutto Termovalorizzatori ottimizzato'

## Applicazione del modello di programmazione lineare per la minimizzazione del costo di trasporto

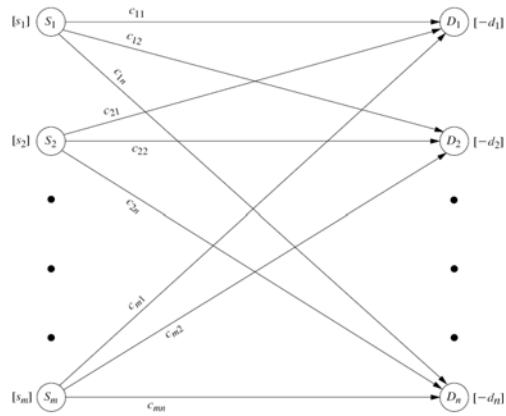
$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

**Vincoli**

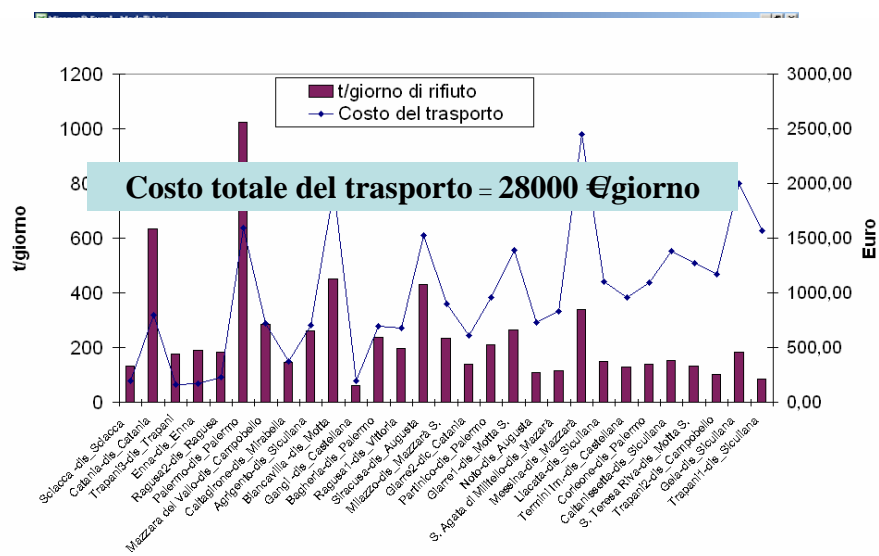
$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = s_i$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = d_j$$

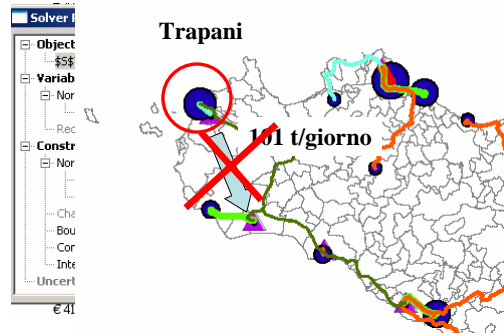
$$x_{ij} \geq 0$$



## Caso studio 'Tutto discarica'

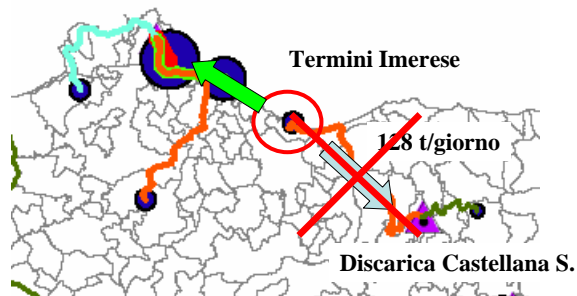


## Scenari 'Tutto discarica' ottimizzato



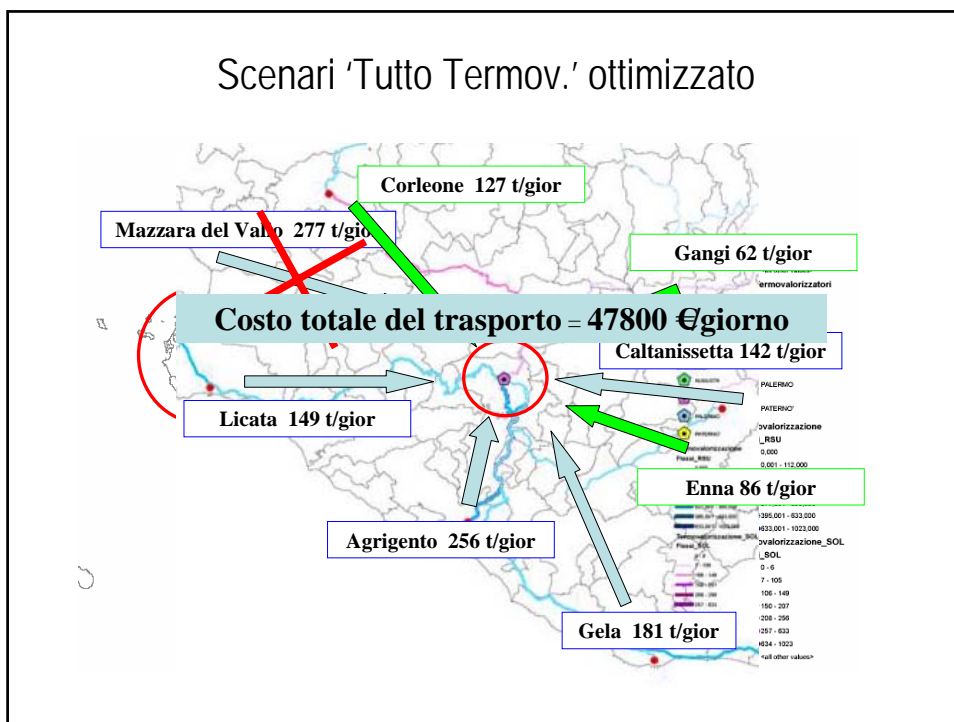
## Scenari 'Tutto discarica' ottimizzato

**Costo totale del trasporto = 24000 €/giorno**

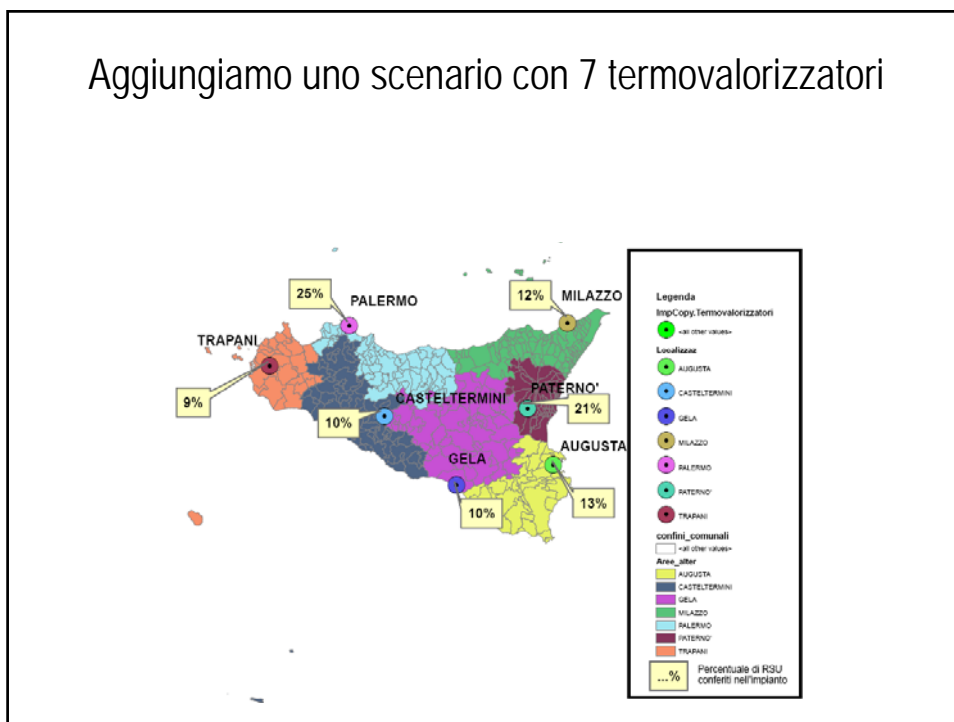




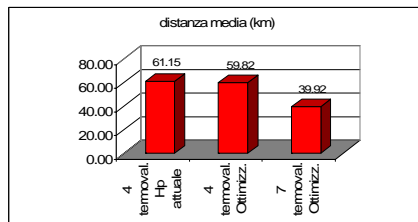
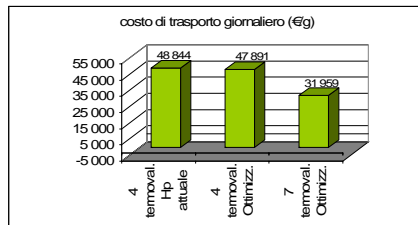
## Scenari 'Tutto Termov.' ottimizzato



## Aggiungiamo uno scenario con 7 termovalorizzatori



## Scenari tutto termovalorizzatori



- L'assegnazione ottima dei flussi nello scenario a 4 termovalorizzatori determina risparmi di costo di trasporto non elevatissimi
- Se si usano 7 termovalorizzatori, il costo si riduce di 1/3, soprattutto per la riduzione della distanza media

## Costi esterni dei trasporti

- Gli economisti chiamano **esternalità** l'insieme dei costi non trovati corrispondenza nel prezzo dei beni scambiati in un dato mercato
- I trasporti generano esternalità, cioè costi non sostenuti né da chi gestisce i servizi di trasporto né dagli utenti, ma dalla collettività e dall'ambiente.

## Esempi di esternalità

Incidenti



Inquinamento atmosferico



Cambiamento climatico



Inquinamento acustico e congestione



## Internalizzazione dei costi esterni

- Internalizzare i costi esterni all'interno delle valutazioni di convenienza
  - aumenta l'efficienza nell'uso delle risorse
  - favorisce lo sviluppo sostenibile
  - migliora la qualità della gestione integrata dei rifiuti

# Valutazione dei costi esterni

- Esistono valutazioni economiche delle esternalità ormai consolidate e riconosciute in Europa

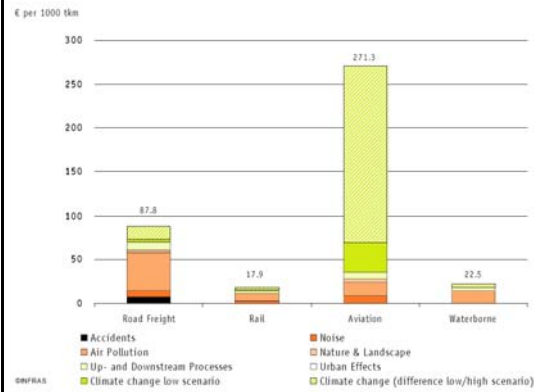


**Febbraio 2008**

**Handbook on estimation of external costs in the transport sector**

Produced within the study  
Internalisation Measures and Policies  
for All external Cost of Transport  
(IMPACT)

**AVERAGE EXTERNAL COSTS: FREIGHT 2000 (EXCLUDING CONGESTION COSTS)**

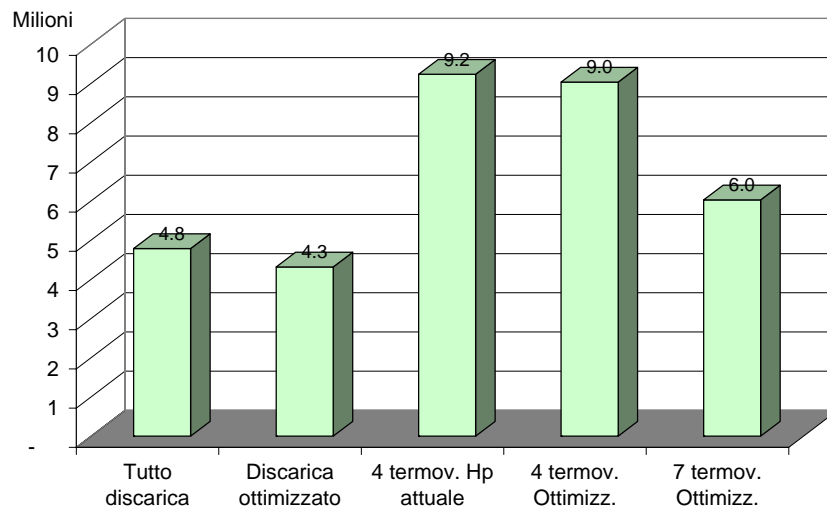


| Esternalità              | €/1000t*km |
|--------------------------|------------|
| Incidenti                | = 4,8      |
| Rumori                   | = 4,9      |
| Inquinamento atmosferico | = 38,3     |
| Clima                    | = 12,8     |

**circa 60 €1000 t-km**

## Costo annuo per costi esterni del trasporto dei rifiuti

Esternalità €/anno



## Conclusioni e ulteriori approfondimenti

- È necessario trovare il giusto compromesso tra i benefici legati alla termovalorizzazione e i crescenti costi di trasporto conseguenti (sia interni che esterni)
- È dunque opportuno approfondire il tema della localizzazione degli impianti (numero, posizione e potenzialità)
- Lo strumento modellistico messo a punto consente di analizzare come cambia la localizzazione ottima degli impianti (problema strategico) e l'assegnazione ottima dei flussi dei carichi dei rifiuti (problema tattico), quando muta la produzione totale di rifiuti e/o la loro ripartizione nelle diverse frazioni oggetto di trattamento nei diversi impianti
- Lo strumento può essere utile anche ad una eventuale ridefinizione del perimetro delle aree di raccolta e al dimensionamento della flotta dei veicoli necessaria
- È opportuno incorporare i costi esterni del trasporto nelle valutazioni di convenienza