WORKING PAPERS

W.P. 34

MODELLI PER LA DETERMINAZIONE DELLE AREE DI INTERVENTO DEI SERVIZI DI EMERGENZA

Paolo Toth (*)

ires ISTITUTO RICERCHE ECONOMICO - SOCIALI DEL PIEMONTE

[redacted]

W.P. 34

MODELLI PER LA DETERMINAZIONE DELLE AREE DI INTERVENTO DEI SERVIZI DI EMERGENZA

Paolo Toth (*)

Giugno 1984

(*) Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.

Lavoro svolto nell'ambito delle ricerche sui servizi di emergenza, coordinato da G.A. Rabino e facenti parte dello studio IRES "Predisposizione e prime sperimentazioni di metodologie per la ripartizione spazializzata delle risorse sanitarie", condotto per conto dell'Assessorato alla Sanità della Regione Piemonte (Fondo Ricerca Finalizzata)

1. INTRODUZIONE

La grande complessità di un moderno sistema territoriale (agglomerato urbano, provincia, regione) rende indispensabile per la sua stessa sopravvivenza il buon funzionamento dei servizi di emergenza (ambulanze, vigili del fuoco, polizia) che operano all'interno del sistema. I pianificatori di tali servizi si trovano pertanto a dover affrontare un compito di grande importanza, e di pari difficoltà, nel quale qualsiasi aiuto è ben accetto. Che tale ausilio possa essere reperito nei metodi della Ricerca Operativa appare naturale, ma un esame delle pubblicazioni specializzate rivela che solo negli anni settanta le ricerche nell'area dell'organizzazione dei servizi di emergenza hanno raggiunto un livello operativo. Ciò è dovuto principalmente alla notevole complessità del problema ed alla difficoltà di reperire l'enorme quantità di dati necessari per la risoluzione del problema. Una ampia panoramica sulla ricerca nell'area dell'organizzazione dei servizi di emergenza e sui problemi incontrati nella definizione dei relativi modelli matematici è riportata nella recente rassegna di Kolesar [14]. In tale rassegna si pone, tra l'altro, in evidenza che per sviluppare un modello matematico che tenda a razionalizzare un aspetto della logistica dei servizi di emergenza, si deve tener presente che il sistema allo studio è un sistema di tipo stocastico in cui ritardi apprezzabili tra richieste ed interventi sono intollerabili, in cui «clienti» e «fornitori» sono spazialmente distribuiti su vaste aree ed in cui sono i «fornitori» che devono andare dai «clienti».

Nel sistema in esame si possono inoltre rilevare sostanziali non stazionarietà nella distribuzione temporale delle richieste di servizio, unite alla presenza contemporanea di chiamate di diversa importanza mescolate in un flusso casuale e che richiedono l'intervento coordinato di diversi servizi che devono essere selezionati da un insieme generalmente ampio. Appare quindi evidente la difficoltà di definire un modello matematico sufficientemente accurato che possa tener conto contemporaneamente di tutti i fattori precedentemente menzionati. E' tuttavia possibile, focalizzandosi su particolari servizi, mettere a punto modelli matematici semplificati ed utilizzabili a livello operativo. Applicazioni di questo tipo sono riportate in [1], [2], [5], [6], [7], [9], [10], [13], [16], [18], [19], [20], [21], [22].

Nel presente lavoro si considererà il problema dell'organizzazione dei servizi di pronto soccorso in un sistema territoriale di grandi dimensioni. Prima di definire in maggior dettaglio i problemi che possono essere risolti nel contesto in esame, è meglio dare una descrizione delle entità che operano nel sistema territoriale e delle fasi in cui si articola ogni singola richiesta di servizio.

1.1. Descrizione del sistema territoriale

Il sistema territoriale allo studio è caratterizzato dalle seguenti entità:

– n «aree» geografiche (comprensori, comuni, agglomerati di quartieri, . . .) in cui possono verificarsi le richieste di servizio di pronto soccorso a causa di incidenti o di richieste di ricovero;

– m «centrali operative» sedi di pronto soccorso (dipartimenti di emergenza ed accettazione di primo o secondo livello), cioè centri sanitari con servizi continuati (24 ore su 24), attrezzature speciali e personale specializzato (medici, chirurghi, anestesisti, ostetrici, ortopedici, radiologi, analisti, . . .) in presenza attiva continuata, personale ultraspecializzato (pediatri, cardiologi, oculisti, urologi, . . .) facilmente reperibile (*);

– q «ospedali» non dipartimenti di emergenza ed accettazione, cioè centri

(*) I dipartimenti di secondo livello, generalmente in numero limitato, hanno servizi raddoppiati e più specializzazioni in presenza attiva rispetto ai dipartimenti di primo livello.

sanitari con servizi non continuati e con poche specializzazioni in presenza attiva,

— ℓ «sedi di ambulanze» cui fanno capo le ambulanze utilizzate per i servizi di pronto soccorso;

— una rete stradale costituita da un insieme di vertici (incroci, località, piazze, vie, . . .) collegati tra loro mediante archi (tronchi stradali).

Ciascuna «area» i (i = 1, . . ., n) è caratterizzata da:

— un baricentro a_i rappresentativo di tutta l'area geografica e localizzato in un vertice della rete stradale;

— un numero medio r_i di richieste giornaliere di intervento (servizio di pronto soccorso);

— un tempo medio d_i necessario per soddisfare una singola richiesta di intervento al pronto soccorso (centrale operativa o ospedale);

— un tempo medio τ_i per il trasbordo di un degente su un'ambulanza nel luogo in cui si è verificato l'incidente o la richiesta di ricovero.

Ciascuna «centrale operativa» j (j = 1, . . ., m) è caratterizzata da:

— un vertice c_j della rete stradale in cui è localizzata la centrale operativa;

— un tempo globale lavorativo giornaliero g_j (dato dalla somma dei tempi in cui sono disponibili nell'arco della giornata le varie specializzazioni);

— un tempo medio $\overline{\tau}_j$ per il trasbordo di un degente da un'ambulanza ai locali del pronto soccorso.

Ciascun «ospedale» h (h = 1, . . ., q) è caratterizzato da:

— un vertice o_h della rete stradale in cui è localizzato l'ospedale;

— un tempo globale lavorativo giornaliero u_h;

— una probabilità p_h di utilizzazione dell'ospedale da parte di una generica richiesta di intervento, con $0 < p_h < 1$ (*);

(*) Il valore di p_h potrebbe essere, ad esempio, calcolato mediante la relazione: p_h = (tempo di apertura giornaliero)/ giorno.

– un tempo medio $\tilde{\tau}_h$ per il trasbordo di un degente da un'ambulanza ai locali dell'ospedale.

Ciascuna «sede di ambulanze» k (k = 1, . . ., ℓ) è caratterizzata da:

– un vertice s_k della rete stradale in cui è localizzata la sede;

– un numero v_k di ambulanze disponibili presso la sede;

– un tempo medio lavorativo giornaliero e_k di una ambulanza facente capo alla sede;

– un tempo medio di allestimento α_k di un ambulanza presso la sede (tempo che intercorre tra l'istante in cui la sede riceve una richiesta di intervento e l'istante in cui un'ambulanza parte per la località in cui si è verificato l'incidente o la richiesta di ricovero).

Ciascun arco (tronco) della rete stradale è caratterizzato da:

– i vertici iniziale e finale del tronco stradale;

– la lunghezza del tronco;

– il tipo di strada del tronco (autostrada, strada a scorrimento veloce, strada a scorrimento lento, strada urbana, strada in montagna, . . .);

– il verso di percorrenza del tronco stradale (strada percorribile in un unico senso o in entrambi i sensi).

Mediante le informazioni relative a tutti gli archi della rete stradale è possibile determinare il «tempo previsto» di percorrenza $t_{w,z}$ tra due qualsiasi vertici w e z della rete. E' possibile infatti, in base alla lunghezza ed al tipo di strada di un arco, calcolare il tempo di percorrenza di ogni arco della rete nelle varie ore della giornata ipotizzando differenti condizioni di traffico. Utilizzando un algoritmo per la determinazione del cammino a costo minimo tra due vertici di un grafo (*Shortest Path Problem*), vedi ad esempio [11], si possono calcolare i tempi di percorrenza tra due vertici qualsiasi della rete stradale per ogni condizione di traffico e, di conseguenza, il tempo previsto $t_{w,z}$ mediante la relazione:

$t_{w,z}$ = (tempo medio di percorrenza dal vertice w al vertice z) + ϵ . (varianza del tempo di percorrenza dal vertice w al vertice z).

dove ϵ è una opportuna costante non negativa e il valore medio e la varianza sono calcolati relativamente alle differenti condizioni di traffico ipotizzate nelle varie orie della giornata.

Se il sistema territoriale in esame corrisponde ad una regione di grandi dimensioni, si devono considerare circa 1200 aree geografiche, 30 centrali operative, 20 ospedali non sedi di pronto soccorso e 150 sedi di ambulanze (*).

1.2. Fasi in cui si articola una richiesta di servizio

Ogni singola richiesta di intervento ordinario (servizio di pronto soccorso) si articola nelle seguenti fasi:

1) telefonata al soccorso urgente (centrali operative o centro di coordinamento a livello territoriale) per emergenze ordinarie di tipo traumatico (incidenti) o di tipo medico (richiesta di ricovero da parte del medico di famiglia o della guardia medica);

2) decisione, da parte degli addetti al soccorso urgente, della sede k da cui far arrivare un'ambulanza e del pronto soccorso j (centrale operativa o ospedale) in cui inviare il degente in base ai tempi di percorrenza ed al tipo di intervento richiesto;

3) allestimento di un'ambulanza facente capo alla sede k;

4) viaggio dalla sede k all'area i in cui si è verificato l'incidente o la richiesta di ricovero;

5) trasbordo del degente sull'ambulanza;

6) viaggio dall'area i al pronto soccorso j;

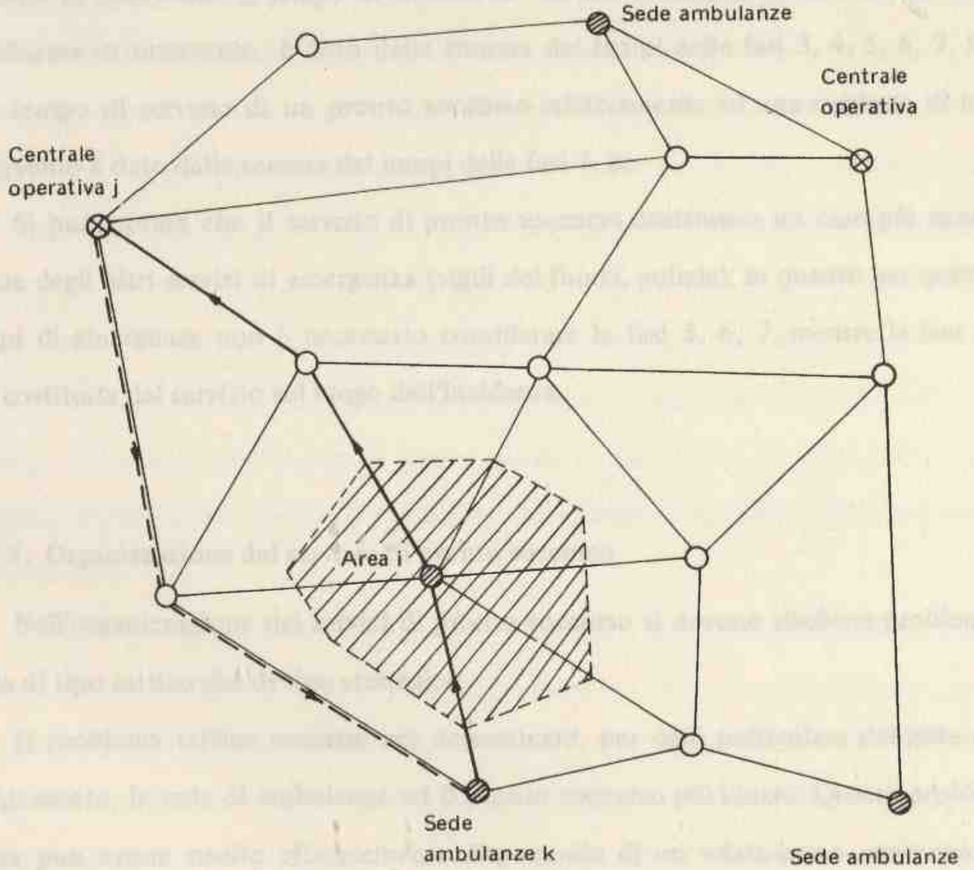
(*) I valori riportati si riferiscono alla regione Piemonte nell'ipotesi di considerare come area geografica un comune.

7) trasbordo del degente dall'ambulanza;

8) cura del degente;

9) viaggio dell'ambulanza dal pronto soccorso j alla sede k.

Un possibile percorso di un'ambulanza è riportato con tratto più marcato nella rete descritta nella figura 1; con tratto marcato tratteggiato si è indicato il viaggio di ritorno, senza degente, dal pronto soccorso j alla sede di ambulanze k (fase 9).



La scelta del pronto soccorso j in cui inviare il degente può essere effettuata, invece che alla fase 2, alla fase 5 qualora alla fase 2 non si avessero sufficienti informazioni sul tipo di intervento da eseguire. Inoltre la fase 8 potrebbe cominciare contemporaneamente alla fase 6 se l'ambulanza fosse un'unità mobile di rianimazione.

I tempi relativi alle fasi 1 e 2 sono molto piccoli rispetto ai tempi delle successive fasi e nel seguito saranno trascurati. Il *tempo di intervento* di una richiesta di servizio di pronto soccorso è dato dalla somma dei tempi delle fasi 3, 4, 5, 6, 7; va cioè dall'istante in cui arriva la comunicazione della richiesta di servizio all'istante in cui inizia la cura del degente. Obiettivo fondamentale di una buona organizzazione del servizio di pronto soccorso è quello di ridurre il più possibile i tempi di intervento. Il *tempo di servizio* di un'ambulanza, relativamente ad una richiesta di intervento, è dato dalla somma dei tempi delle fasi 3, 4, 5, 6, 7, 9. Il tempo di servizio di un pronto soccorso relativamente ad una richiesta di intervento è dato dalla somma dei tempi delle fasi 7, 8.

Si può notare che il servizio di pronto soccorso costituisce un caso più generale degli altri servizi di emergenza (vigili del fuoco, polizia), in quanto per questi tipi di emergenze non è necessario considerare le fasi 5, 6, 7, mentre la fase 8 è costituita dal servizio sul luogo dell'incidente.

1.3. Organizzazione del servizio di pronto soccorso

Nell'organizzazione dei servizi di pronto soccorso si devono risolvere problemi sia di tipo tattico che di tipo strategico.

Il problema tattico consiste nel determinare, per ogni particolare richiesta di intervento, la sede di ambulanze ed il pronto soccorso più idonei. Questo problema può essere risolto efficacemente disponendo di un «data-base» contenente tutte le informazioni, aggiornate in tempo reale, relative allo stato della rete stradale (interruzioni, intensità del traffico, . . .), alla disponibilità delle ambulanze nelle varie sedi, alle specializzazioni in presenza attiva nelle varie centrali operative e nei vari ospedali.

I problemi strategici consistono nella localizzazione ottimale delle centrali operative, degli ospedali e delle sedi di ambulanze, nel dimensionamento ottimale di tali entità (numero e tipo di specializzazioni in presenza attiva presso i pronti soccorsi, numero e tipo delle ambulanze disponibili presso le sedi, . . .), nell'assegnazione ottimale delle aree geografiche alle centrali operative ed alle sedi di ambulanze, nell'aggregazione ottimale degli ospedali alle centrali operative. I primi due tipi di problemi strategici (localizzazione e dimensionamento ottimali), anche se di fondamentale importanza per un buon funzionamento del servizio di emergenza, sono in genere irrisolubili da un punto di vista globale, in quanto una riorganizzazione che coinvolge lo spostamento di strutture ospedaliere già esistenti è praticamente irrealizzabile. Eventuali riorganizzazioni in questo senso potrebbero al più comportare il conglobare più sedi di ambulanze in una sola, il trasformare un ospedale non pronto soccorso in una centrale operativa o viceversa, il trasformare un dipartimento di primo livello in uno di secondo livello o viceversa; cioè piccole variazioni piuttosto che una riorganizzazione globale. Gli ultimi due tipi di problemi (associazione di aree ed aggregazione di ospedali in modo ottimale) possono invece essere risolti da un punto di vista globale in quanto comportano una riorganizzazione del sistema di tipo esclusivamente amministrativo.

Nel presente lavoro verranno pertanto esaminati questi ultimi tipi di problemi; per ciascuno di essi verrà definito il corrispondente modello matematico e verranno proposti i possibili algoritmi risolutivi sia di tipo esatto che di tipo euristico. I problemi proposti verranno risolti indipendentemente l'uno dall'altro, anche se ovviamente essi interagiscono tra loro in modo non trascurabile e sarebbe quindi meglio, dal punto di vista dell'ottimizzazione globale, risolverli insieme. Ciò non è tuttavia possibile a causa delle eccessive dimensioni del problema considerato nel suo insieme. I problemi in esame verranno risolti nel seguente ordine: aggregazione degli ospedali alle centrali operative, associazione delle aree alle centrali operative, associazione delle aree alle sedi di ambulanze.

2. DETERMINAZIONE DEGLI OSPEDALI DA AGGREGARE ALLE CENTRALI OPERATIVE

Per esigenze di tipo amministrativo, ogni ospedale h non pronto soccorso ($h = 1, \ldots, q$) deve essere *aggregato* ad una ed una sola centrale operativa λ_h ($1 \leqslant \lambda_h \leqslant m$). Ciò significa che ogni ospedale h può essere utilizzato esclusivamente per servire richieste di intervento che si verificano nelle aree geografiche associate alla centrale operativa λ_h cui l'ospedale h è stato aggregato.

Aggregando un ospedale ad una centrale operativa si altera in generale l'insieme delle aree associate a tale centrale, in quanto si aumenta il tempo globale lavorativo giornaliero disponibile per la centrale (si aumenta cioè il numero di servizi di pronto soccorso che la centrale può fornire e quindi il numero di aree che possono essere servite dalla centrale) e si diminuiscono i tempi medi di intervento delle aree associate alla centrale. I tempi medi di intervento diminuiscono in quanto, nei periodi della giornata in cui un ospedale è attivo, è possibile trasportare il degente dall'area in cui si è verificata la richiesta di intervento alla corrispondente centrale operativa o all'ospedale a seconda dei relativi tempi di percorrenza, scegliendo cioè la struttura per cui il tempo di trasferimento è minore.

Nel seguito viene proposto un algoritmo per l'aggregazione ottimale degli ospedali alle centrali operative che tende a minimizzare il tempo medio globale di intervento relativamente a tutte le aree geografiche che possono usufruire di ciascun ospedale. In tale algoritmo non si considerano le implicazioni delle aggregazioni sul tempo globale lavorativo giornaliero disponibile per le centrali operative. L'algoritmo proposto è pertanto di tipo euristico, non assicura cioè che non possano esistere soluzioni migliori di quella ottenuta dall'algoritmo.

L'algoritmo è composto dai seguenti passi:

1. Per ogni area i ($i = 1, \ldots, n$) calcola:

γ_i = centrale operativa più «vicina» all'area i, cioè tale che:

$$t_{a_i,c_{\gamma_i}} + \bar{\tau}_{\gamma_i} = \min\{t_{a_i,c_j} + \bar{\tau}_j : j = 1, \ldots, m\};$$

ϑ_i = ospedale più vicino all'area i, cioè tale che:

$$t_{a_i,o_{\vartheta_i}} + \tilde{\tau}_{\vartheta_i} = \min\{t_{a_i,o_h} + \tilde{\tau}_h : h = 1, \ldots, q\}.$$

2. Per ogni centrale operativa j (j = 1, . . ., m) calcola:

A_j = insieme delle aree la cui centrale operativa più vicina è j =

$$= \{i : i = 1, \ldots, n; \gamma_i = j\}.$$

3. Per ogni ospedale h (h = 1, . . ., q) esegui i seguenti passi:

3.1. Calcola:

$\bar{A}_h$ = insieme delle aree che possono usufruire vantaggiosamente dell'ospedale h =

= insieme delle aree la cui centrale operativa più vicina è più lontana dell'ospedale h e per cui l'ospedale h è il più vicino degli ospedali =

$$= \{i : i = 1, \ldots, n; t_{a_i,o_h} + \tilde{\tau}_h < t_{a_i,c_{\gamma_i}} + \bar{\tau}_{\gamma_i}; \vartheta_i = h\};$$

C_h = insieme delle centrali operative cui l'ospedale h può essere aggregato vantaggiosamente =

$$= \{j : j = 1, \ldots, m; A_j \cap \bar{A}_h \neq \phi\}.$$

3.2. Per ogni area $i \in \bar{A}_h$ e per ogni centrale operativa $j \in C_h$ calcola:

$\bar{t}_{i,j}$ = tempo medio di trasferimento dall'area i ad un pronto soccorso, corrispondente all'aggregazione dell'ospdale h alla centrale operativa j =

$$= \min\{(t_{a_i,o_h} + \tilde{\tau}_h)\, p_h + (t_{a_i,c_j} + \bar{\tau}_j)(1 - p_h),\ t_{a_i,\gamma_i} + \bar{\tau}_{\gamma_i}\}$$

3.3. Per ogni centrale operativa $j \in C_h$ calcola:

$\tilde{t}_j$ = tempo medio globale di trasferimento dalle aree che possono usufruire vantaggiosamente dell'ospedale h ad un pronto soccorso, corrispondente all'aggregazione dell'ospedale h alla centrale operativa j =

$$= \frac{1}{|\bar{A}_h|} \sum_{i \in \bar{A}_h} \bar{t}_{i,j}$$

3.4. Aggrega l'ospedale h alla centrale operativa λ_h per cui il tempo medio globale di trasferimento $\tilde{t}_{\lambda_h}$ è minimo, cioè tale che:

$$\tilde{t}_{\lambda h} = \min \{ \tilde{t}_j : j \in C_h \}$$

Se le aree che possono usufruire vantaggiosamente dell'ospedale h hanno tutte come centrale operativa più vicina la stessa centrale $\bar{j}$ (cioè se $|C_h| = 1$ e $\bar{j} \in C_h$), l'ospedale h viene ovviamente aggregato a tale centrale operativa (cioè si ha $\lambda_h = \bar{j}$) e non si eseguono quindi per l'ospedale h i passi 3.2, 3.3 e 3.4 dell'algoritmo.

Si noti inoltre che l'aggregazione degli ospedali alle centrali operative fa diminuire i tempi medi di intervento delle aree associate alle centrali, ma non i corrispondenti tempi massimi, in quanto in questo caso si deve tener conto del caso peggiore e cioè del caso in cui la richiesta di intervento si verifichi in periodi della giornata in cui gli ospedali non sono attivi.

Una volta eseguite tutte le aggregazioni degli ospedali alle centrali operative, è possibile aggiornare il tempo globale lavorativo giornaliero delle centrali ed i tempi medi di trasferimento dalle aree alle centrali corrispondenti alle aggregazioni eseguite:

– sia H_j l'insieme degli ospedali aggregati alla centrale operativa j (j = 1, . . ., m), cioè:

$$H_j = \{ h : h = 1, \ldots, q ; \lambda_h = j \},$$

– il tempo globale lavorativo giornaliero della centrale j (j = 1, . . ., m) è dato da:

$$g_j^* = g_j + \sum_{h \in H_j} u_h ,$$

– il tempo medio di trasferimento (comprensivo del tempo di trasbordo del degente al pronto soccorso) dall'area i (i = 1, . . ., n) alla centrale j (j = 1, . . ., m) è dato da:

$$t_{ij}^* = \min\{t_{a_i,c_j} + \bar{\tau}_j, \min_{h \in H_j} \{(t_{a_i,o_h} + \bar{\tau}_h)\, p_h + (t_{a_i,c_j} + \bar{\tau}_j)(1 - p_h)\}\}.$$

3. DETERMINAZIONE DELLE AREE DA ASSOCIARE ALLE CENTRALI OPERATIVE

Per esigenze di tipo organizzativo ogni area i (i = 1, . . ., n) deve essere *associata* amministrativamente ad una ed una sola centrale operativa f_i ($1 \leq f_i \leq m$). Ciò significa che una richiesta di intervento che si verifica nell'area geografica i fa capo alla centrale operativa j; cioè all'atto dell'incidente o della richiesta di ricovero viene data comunicazione alla centrale j ed, in generale, il degente viene trasportato alla centrale j o ad un ospedale aggregato a tale centrale. Ciò non esclude ovviamente che, qualora se ne vedesse la necessità o la convenienza per motivi contingenti e temporanei, il degente possa essere trasportato ad un'altra centrale operativa.

Il *tempo di intervento* in un'area geografica da parte di una centrale operativa è dato dalla somma del tempo di percorrenza dall'area alla centrale e del tempo di trasbordo del degente dall'ambulanza presso la centrale.

Due tipi di obiettivo possono essere fissati nell'associazione delle aree geografiche alle centrali operative:

Obiettivo 1: minimizzare, nel rispetto di tutti i vincoli, il tempo medio di intervento relativamente a tutte le aree e a tutte le centrali operative;

Obiettivo 2: minimizzare, nel rispetto di tutti i vincoli, il tempo massimo di intervento relativamente a tutte le aree e a tutte le centrali operative.

I due obiettivi possono essere combinati tra loro in modo da cercare di minimizzare sia il tempo medio che il tempo massimo. In generale non è possibile minimizzare entrambi i tempi contemporaneamente, in quanto i due obiettivi proposti sono spesso in conflitto; si cercherà quindi di ottenere una soluzione di compromesso che tenga conto di entrambe le esigenze. Un possibile modo per ottenere ciò è quello di considerare l'obiettivo 1 imponendo però un vincolo sul valore massimo del tempo di intervento relativamente ad una generica area ed alla centrale operativa cui l'area viene associata. Nel seguito tale valore massimo sarà rappresentato dal parametro φ.

E' ovvio che se non imponessimo altri vincoli sul sistema in esame, la soluzione ottima del problema sarebbe ottenibile molto semplicemente associando ogni area i alla centrale operativa j ad essa più «vicina». Si avrebbe cioè (vedi il primo passo dell'algoritmo riportato al paragrafo 2) $f_i = \gamma_i (i = 1, \ldots, n)$ per l'obiettivo 2 (*) ed f_i tale che

$$t^*_{i,f_i} = \min \{ t^*_{i,j} : j = 1, \ldots, m \}$$

per l'obiettivo 1.

Se un tempo di intervento superasse il valore massimo φ, il problema in esame non avrebbe alcuna soluzione ammissibile; sarebbe pertanto necessario o diminuire il valore di φ o aggiungere al sistema territoriale nuove centrali operative o nuovi ospedali.

In realtà è necessario introdurre un vincolo sul tempo globale giornaliero necessario per eseguire presso ogni centrale operativa j le cure relative alle richieste di in-

---

(*) Si ricordi che l'aggregazione degli ospedali alle centrali operative non altera i tempi massimi di trasferimento.

tervento provenienti dalle aree associate alla centrale. Tale tempo non deve infatti superare il tempo globale lavorativo giornaliero g_j^* della centrale operativa j e di tutti gli ospedali h ad essa aggregati ($h \in H_j$). Il vincolo può essere reso più lasco o più rigido moltiplicando il valore di g_j^* per un opportuno «coefficiente di utilizzazione» σ. Se σ è maggiore di 1 il vincolo viene reso più lasco, cioè non si dà molta importanza al tempo globale lavorativo giornaliero g_j^*, presupponendo quindi che, in caso di necessità, il personale addetto al pronto soccorso possa essere rinforzato da altro personale operante presso le unità sanitarie. Se σ è minore di 1 il vincolo viene reso più rigido; in questo modo si può tener conto delle eventuali sovrapposizioni temporali dei servizi richiesti alla centrale, cioè del fatto che possono arrivare contemporaneamente al pronto soccorso più degenti di quelli che possono essere curati simultaneamente dalla centrale o dagli ospedali ad essa aggregati (non uniformità del carico di lavoro richiesto alla centrale nelle varie ore della giornata).

Un modello matematico del problema in esame può essere ottenuto nel modo seguente.

Si consideri la variabile binaria $x_{i,j}$ definita da:

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{se l'area } i \text{ viene associata alla centrale operativa } j \text{ (cioè se } f_i = j), \\ 0 & \text{altrimenti,} \end{cases}$$

$$i = 1, \ldots, n; j = 1, \ldots, m.$$

La funzione da ottimizzare per l'obiettivo 1 è data da:

$$\text{(1)} \qquad \min z_1 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} r_i t_{i,j}^* x_{i,j}$$

La funzione da ottimizzare per l'obiettivo 2 è data da:

$$(1') \qquad \min z_2 = \max \{(t_{a_i, c_j} + \bar{\tau}_j)\, x_{i,j} : i = 1, \ldots, n; j = 1, \ldots, m\}$$

Le condizioni che devono essere soddisfatte, per entrambi gli obiettivi, sono:

$$(2) \qquad \sum_{j=1}^{m} x_{i,j} = 1 \qquad i = 1, \ldots, n$$

$$(3) \qquad \sum_{i=1}^{n} r_i\, d_i\, x_{i,j} \leqslant \sigma \cdot g_j^* \quad j = 1, \ldots, m$$

$$(4) \qquad x_{i,j} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \ldots, n; \quad j = 1, \ldots, m$$

La (1) rappresenta, a meno di una costante di proporzionalità, il tempo medio globale di intervento relativamente a tutte le aree; ogni area i viene «pesata» proporzionalmente al corrispondente numero giornaliero di richieste r_i. La condizione (2) impone che ogni area geografica i sia associata ad una ed una sola centrale operativa.

Il modello matematico proposto corrisponde ad un Problema di Programmazione Lineare Intera. Più precisamente, il problema definito dalle relazioni (1), (2) (3) e (4) (obiettivo 1) è un caso particolare (*) del *Problema dell'Assegnamento Generalizzato min-sum* (GAP da Generalized Assignment Problem). Tale problema appartiene alla classe dei problemi «NP-hard» (vedi ad esempio [12]). Il problema definito dalle relazioni (1′), (2), (3) e (4) è invece un caso particolare del *Problema dell'Assegnamento Generalizzato min-max* (BGAP da Bottleneck Generalized Assignment Problem); anche tale problema è NP-hard.

Se si considera l'obiettivo 1 con il vincolo aggiuntivo che il massimo tempo di intervento non superi il valore limite φ (combinazione degli obiettivi 1 e 2), è

(*) Nella versione più generale del GAP i coefficienti del primo membro della relazione (3) dipendono da j oltre che da i.

necessario introdurre una nuova condizione rappresentata dalla relazione:

(5) $$(t_{a_i,c_j} + \bar{\tau}_j)\, x_{i,j} \leqslant \varphi \qquad i = 1, \ldots, n; j = 1, \ldots, m$$

Il problema definito dalle relazioni (1), (2), (3), (4) e (5) non è più un GAP; può tuttavia essere ricondotto facilmente a tale problema notando che il vincolo (5) equivale a definire a priori il valore della variabile $x_{i,j}$ ($i = 1, \ldots, n; j = 1, \ldots, m$) uguale a zero se si verifica la condizione:

$$t_{a_i,c_j} + \bar{\tau}_j > \varphi,$$

mentre nessun vincolo, oltre alle relazioni (2), (3) e (4), è imposto sulla variabile $x_{i,j}$ in caso contrario (cioè se $t_{a_i,c_j} + \bar{\tau}_j \leqslant \varphi$). L'introduzione del vincolo (5) fa quindi conservare al modello matematico la struttura di un GAP in cui il valore di alcune variabili è noto a priori, ciò riduce in generale la difficoltà di risoluzione del problema.

Gli algoritmi, sia di tipo esatto che di tipo euristico, per la risoluzione del GAP e del BGAP saranno considerati nel paragrafo 5.

La possibilità di determinare la soluzione ottima, o quasi-ottima, del problema allo studio anche quando il numero delle aree e delle centrali è elevato, e quindi per situazioni reali, consente di riorganizzare in modo ottimale l'associazione delle aree geografiche alle corrispondenti centrali operative. Il modello matematico proposto può inoltre essere utilizzato come uno strumento per «simulare» politiche alternative per la riorganizzazione globale del sistema territoriale. Si possono cioè considerare differenti politiche corrispondenti a differenti configurazioni di aree geografiche, di centrali operative e di ospedali ed a differenti distribuzioni delle risorse disponibili tra le varie centrali. La «bontà» delle varie politiche può poi essere valutata quantitativamente mediante il valore della funzione obiettivo calcolata in corrispondenza della soluzione ottima del relativo modello matematico.

Altri modelli matematici relativi a problemi di servizi di emergenza riconducibili al Problema dell'Assegnamento Generalizzato sono riportati in [1] e [13].

4. DETERMINAZIONE DELLE AREE DA ASSOCIARE ALLE SEDI DI AMBULANZE

E' conveniente che ogni sede di ambulanze operi in un sottoinsieme prefissato di aree geografiche, in modo da garantire una buona conoscenza delle strade di accesso ai punti in cui si verificano le richieste di intervento ed ai pronti soccorsi. E' quindi necessario associare ogni area geografica ad una o più sedi di ambulanze in modo permanente. Anche in questo caso naturalmente, qualora se ne vedesse la necessità, un'area potrebbe essere servita da una sede di ambulanze alla quale non è stata associata in modo permanente. In generale è consentito che una sede di ambulanze possa servire aree geografiche associate a centrali operative diverse; infatti il numero di tali centrali è limitato e non si hanno quindi problemi per quanto riguarda la conoscenza delle corrispondenti strade di accesso.

Il *tempo di intervento* in un'area da parte di una sede di ambulanze è dato dalla somma del tempo di allestimento dell'ambulanza presso la sede e del tempo di percorrenza dalla sede all'area geografica.

Il *tempo di servizio* necessario per eseguire un intervento in un'area da parte di un'ambulanza di una determinata sede è dato dalla somma del tempo di allestimento dell'ambulanza presso la sede, del tempo di percorrenza dalla sede all'area, del tempo di trasbordo del degente sull'ambulanza, del tempo di percorrenza dall'area geografica al pronto soccorso (centrale operativa o ospedale) cui l'area è stata associata, del tempo di trasbordo del degente dall'ambulanza e del tempo di percorrenza dal pronto soccorso alla sede dell'ambulanza.

Anche per questo problema si possono fissare due tipi di obiettivo nell'associazione delle aree geografiche alle sedi di ambulanze:

Obiettivo 1: minimizzare, nel rispetto di tutti i vincoli, il tempo medio di intervento relativamente a tutte le aree e a tutte le sedi di ambulanze;

Obiettivo 2: minimizzare, nel rispetto di tutti i vincoli, il tempo massimo di intervento relativamente a tutte le aree e a tutte le sedi di ambulanze.

Considerazioni analoghe a quelle fatte nel precedente paragrafo possono essere fatte relativamente alla combinazione dei due obiettivi ed alla soluzione immediata del problema se non si imponessero altri vincoli sul sistema in esame.

In realtà è necessario introdurre un vincolo sul tempo globale giornaliero di servizio necessario per eseguire tutti gli interventi richiesti, nell'arco di una giornata, alle ambulanze di una determinata sede da parte delle aree geografiche ad essa associate. Tale tempo non deve infatti superare il tempo globale lavorativo giornaliero di tutte le ambulanze presenti presso una sede, cioè $v_k \cdot e_k$ per ogni sede k ($k = 1, \ldots, \ell$). Il vincolo può essere reso più rigido moltiplicando il valore di $v_k \cdot e_k$ per un opportuno «coefficiente di sovrapposizione» $\bar{\sigma}$, con $\bar{\sigma} \leqslant 1$; in questo modo si può tener conto delle eventuali sovrapposizioni temporali degli interventi richiesti alle ambulanze.

Si consideri dapprima il caso in cui ogni area geografica possa essere associata ad una ed una sola sede di ambulanze, non si ammetta cioè la suddivisione di una area tra più sedi.

Un modello matematico del problema in esame può essere ottenuto nel modo seguente.

Si consideri la variabile binaria $y_{i,k}$ definita da:

$$y_{i,k} = \begin{cases} 1 \text{ se l'area } i \text{ viene associata alla sede di ambulanze } k, \\ 0 \text{ altrimenti,} \end{cases}$$

$$i = 1, \ldots, n; k = 1, \ldots, \ell.$$

La funzione da ottimizzare per l'obiettivo 1 è data da:

$$(6) \qquad \min b_1 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{\ell} r_i \, (t_{s_k, a_i} + \alpha_k) \, y_{i,k}$$

La funzione da ottimizzare per l'obiettivo 2 è data da:

$$(6') \qquad \min b_2 = \max \{(t_{s_k, a_i} + \alpha_k) \, y_{i,k} : i = 1, \ldots, n; k = 1, \ldots, \ell\}$$

Le condizioni che devono essere soddisfatte, per entrambi gli obiettivi, sono:

$$(7) \qquad \sum_{k=1}^{\ell} y_{i,k} = 1 \qquad i = 1, \ldots, n$$

$$(8) \qquad \sum_{i=1}^{n} r_i(\alpha_k + t_{s_k, a_i} + \tau_i + t^*_{i,f_i} + \hat{t}_{f_i,k}) \, y_{i,k} \leqslant \bar{\sigma} \, v_k e_k \qquad k = 1, \ldots, \ell$$

ove $\hat{t}_{j,k}$ = tempo medio di percorrenza dalla centrale operativa j, o da uno degli ospedali h ($h \in H_j$) ad essa aggregati, alla sede di ambulanze k =

$$= \min \{t_{c_j, s_k}, \min_{h \in H_j} \{t_{o_h, s_k} \, p_h + t_{c_j, s_k} (1 - p_h)\}\}$$

$$(9) \qquad y_{i,k} \in \{0, 1\} \qquad i = 1, \ldots, n; \quad k = 1, \ldots, \ell$$

La (6) rappresenta, a meno di una costante di proporzionalità, il tempo medio globale di intervento relativamente a tutte le aree. La condizione (7) impone che ogni area geografica i sia associata ad una ed una sola sede di ambulanze.

I Problemi di Programmazione Lineare Intera definiti dalle relazioni (6), (7), (8), (9), e (6'), (7), (8), (9) sono, rispettivamente, un GAP ed un BGAP.

Se si considera l'obiettivo 1 con il vincolo aggiuntvo che il massimo tempo di intervento non superi un valore limite prefissato $\bar{\varphi}$ (combinazione degli obiettivi 1 e 2), è necessario introdurre una nuova condizione rappresentata dalla relazione:

(10) $\qquad (t_{s_k, a_i} + \alpha_k)\, y_{i,k} \leqslant \overline{\varphi} \quad i = 1, \ldots, n;\ k = 1, \ldots, \ell.$

Anche in questo caso, l'introduzione del vincolo aggiuntivo (10) non altera la struttura del problema, che rimane quindi un GAP, in quanto provoca esclusivamente la determinazione a priori del valore di alcune variabili (si ha infatti $y_{i,k} = 0$ se $t_{s_k, a_i} + \alpha_k > \overline{\varphi}$).

Se si considera il caso in cui ogni area geografica possa essere associata a più sedi di ambulanze anzichè ad una sola, se si ammette cioè la suddivisione di una area tra più sedi, è necessario definire un nuovo modello matematico del problema allo studio.

La variabile $y_{i,k}$ non è più una variabile binaria, ma una variabile continua compresa tra 0 e 1 che rappresenta la frazione dell'area i associata alla sede k (uguale a zero se l'area i non è in alcun modo servita dalla sede k, uguale a uno se l'area i è servita esclusivamente dalla sede k). Il vincolo (9) deve quindi essere sostituito dalla condizione:

(11) $\qquad y_{i,k} \geqslant 0 \quad i = 1, \ldots, n;\ k = 1, \ldots, \ell.$

Non è necessario imporre che $y_{i,k}$ sia minore o uguale ad 1, a causa della presenza della condizione (7) che, in questo caso, assicura che l'area geografica i sia completamente servita da una o più sedi di ambulanze. Gli altri vincoli, cioè (8) ed eventualmente (10), rimangono inalterati sia formalmente che come significato fisico.

Il problema definito da (6), (7), (8) e (11) (con o senza il vincolo aggiuntivo (10)) è un Problema di Programmazione Lineare Continua. Tale problema non è NP-hard ma bensi polinomiale, può pertanto essere risolto «facilmente» mediante algoritmi esatti anche per valori elevati di n ed ℓ. Qualsiasi algoritmo per la soluzione di problemi di programmazione lineare continua può essere usato in modo efficiente (ad esempio il metodo del simplesso).

Se si considera l'obiettivo 2, è necessario introdurre una nuova variabile intera

$\overline{y}_{i,k}$ (con $i = 1, \ldots, h$ e $k = 1, \ldots, \ell$) che vale 0 se la corrispondente variabile continua $y_{i,k}$ è uguale a 0, e vale 1 in caso contrario, cioè per qualsiasi valore di $y_{i,k}$ diverso da 0 (associazione totale o parziale dell'area i alla sede k). Tale variabile intera $\overline{y}_{i,k}$ deve inoltre sostituire la variabile continua $y_{i,k}$ nella funzione obiettivo (6'). Il nuovo modello matematico sarebbe quindi definito da:

$$(12) \qquad \min \overline{b}_2 = \max \{(t_{s_k, a_i} + \alpha_k)\, \overline{y}_{i,k} : i = 1, \ldots, n; k = 1, \ldots, \ell\}$$

con i vincoli (7), (8), (11) e

$$(13) \qquad \overline{y}_{i,k} \geqslant y_{i,k} \quad i = 1, \ldots, n; \quad k = 1, \ldots, \ell$$

$$(14) \qquad \overline{y}_{i,k} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \ldots, n; \quad k = 1, \ldots, \ell.$$

Tale modello corrisponde ad un Problema di Programmazione Lineare Mista di tipo generale, cioè non un BGAP, appartenente alla classe dei problemi NP-hard.

Anche i modelli matematici proposti in questo paragrafo possono essere utilizzati come strumenti per simulare politiche alternative per la riorganizzazione globale del sistema territoriale (differenti configurazioni di sedi di ambulanze, differenti distribuzioni delle ambulanze disponibili tra le varie sedi).

5. METODI DI SOLUZIONE

I modelli matematici proposti nei paragrafi 3 e 4 corrispondono, a parte gli ultimi due modelli del paragrafo 4, a problemi di programmazione lineare intera del tipo GAP (Problema dell'Assegnamento Generalizzato min-sum) o BGAP (Problema dell'Assegnamento Generalizzato min-max). In questo paragrafo verranno considerati alcuni algoritmi di tipo esatto ed euristico per la soluzione di questi problemi.

Il GAP può essere risolto in modo «esatto» utilizzando algoritmi di tipo «branch and bound». Gli algoritmi più efficienti apparsi nella letteratura internazionale sono quelli proposti da Ross e Soland nel 1975 [17], da Martello e Toth nel 1981 [15] e da Fisher, Jaikumar e Van Wassenhove nel 1983 [8].

Utilizzando tali algoritmi si possono risolvere, in generale, problemi aventi $n \leqslant 200$ ed m o $\ell \leqslant 20$ con tempi di calcolo ed occupazioni di memoria non eccessivi. Per problemi di dimensioni maggiori, come quelli corrispondenti ai modelli matematici proposti nei paragrafi 3 e 4 ($n = 1200$, $m = 30$ o $\ell = 150$), gli algoritmi esatti precedentemente menzionati potrebbero essere inutilizzabili da un punto di vista pratico. Le prestazioni di questi algoritmi dipendono tuttavia in modo rilevante dai particolari valori dei dati di ingresso dei problemi che devono essere risolti, è pertanto possibile poter utilizzare gli algoritmi esatti anche per i problemi allo studio.

E' prevedibile, ad esempio, che le «procedure di riduzione», utilizzate da molti autori (vedi ad esempio [15]) per fissare a priori, cioè prima di iniziare l'esecuzione dell'algoritmo branch and bound, il maggior numero possibile di variabili $x_{i,j}$ o $y_{i,k}$ ai valori 0 o 1, risultino particolarmente efficienti, siano cioè in grado di eliminare dal problema un numero elevato di variabili, rendendo così il problema ridotto di più facile soluzione. Si ha infatti che alcune associazioni di aree geografiche a centrali operative sono praticamente forzate (ad esempio quando un'area è troppo «lontana» da tutte le centrali tranne che da una), mentre altre sono praticamente escluse (quando ad esempio un'area è troppo lontana da una centrale).

Qualora i metodi esatti non potessero essere utilizzati a causa di tempi di calcolo od occupazioni di memoria eccessivi, sarebbe necessario ricorrere a metodi «euristici», ad algoritmi cioè che determinano «buone» soluzioni del problema, senza però assicurare l'ottimalità della soluzione trovata. I metodi euristici utilizzabili per il problema in esame possono essere di vario tipo:

a. ottenuti dagli algoritmi branch and bound imponendo un limite massimo prefissato sul numero dei nodi dell'albero decisionale esaminati durante l'esecuzione dell'algoritmo, e considerando come soluzione del problema la miglior soluzione trovata fino all'istante dell'interruzione (a volte tale soluzione è ottima, ma non è stato possibile dimostrarne l'ottimalità in quanto non si sono considerati tutti i nodi dell'albero decisionale);

b. ottenuti suddividendo con regole euristiche il problema globale in più sottoproblemi di dimensioni limitate e risolvendo ciascun sottoproblema indipendentemente dagli altri utilizzando un algoritmo esatto di tipo branch and bound;

c. utilizzando algoritmi polinomiali ad una o più fasi che sfruttano la particolare struttura del problema (vedi, ad esempio, gli algoritmi proposti in [15]).

Le soluzioni ottenute con questi metodi possono essere ulteriormente migliorate utilizzando procedure finali di raffinamento che cercano di migliorare la soluzione attuale mediante opportuni scambi di aree tra le centrali operative o tra le sedi di ambulanze. Non si può tuttavia prevedere di quanto le soluzioni ottenute dalle procedure euristiche si discostino dal valore della corrispondente soluzione ottima, anche se precedenti esperienze computazionali indicano in generale scarti massimi relativi dell'ordine del 2 o 3 percento.

Per la soluzione del BGAP è necessario fare considerazioni diverse, in quanto nella letteratura internazionale non si hanno algoritmi nè esatti nè euristici proposti per tale problema. E' tuttavia possibile modificare gli algoritmi esatti di tipo branch and bound, euristici di qualsiasi tipo e le procedure di riduzione proposti per il GAP (problema min-sum) in modo da tener conto della differente funzione obiettivo del BGAP (problema min-max). I risultati ottenibili con gli algoritmi adattati non sono in alcun modo prevedibili, in quanto non esiste alcuna esperienza computazionale sull'argomento. Si può tuttavia notare che, in generale, i problemi di tipo min-max sono più «facili» da risolvere dei corrispondenti problemi min-sum (vedi, ad esempio, i problemi del Commesso Viaggiatore e dell'Assegnamento Lineare considerati in [3] e [4]).

Desidero ringraziare i Professori S. Bertuglia, G. Rabino e R. Tadei, il Signor Rivetti e l'Ing. R. Trizio per l'aiuto datomi nella impostazione di questo articolo.

BIBLIOGRAFIA

[1] BERTOLAZZI P., BIANCO L., RICCIARDELLI S.: «A Method for Determining the Optimal Districting in Urban Emergency Services», *Computers and Operations Research*, 1977.

[2] CARBONE R., MEHREZ A.: «Single Facility Minimax Distance Problem under Stochastic Location of Demand», *Management Science*, 1980.

[3] CARPANETO G., MARTELLO S., TOTH P.: «Algorithm for the Bottleneck Travelling Salesman Problem», *Operations Research*, 1984.

[4] CARPANETO G., TOTH P.: «Algorithm for the Solution of the Bottleneck Assignment Problem», *Computing*, 1981.

[5] CHAIKEN J.M., LARSON R.C.: «Methods for Allocating Urban Emergency Units: a Survey», *Operations Research*, 1972.

[6] CHELST K.R., BARLACH Z.: «Multiple Unit Dispatches in Emergency Services: Models to Estimate System Performance», *Operations Research*, 1981.

[7] ERMOLIEV Y., LEONARDI G.: «Stochastic Facility Location Models», *Sistemi Urbani*, 1981.

[8] FISHER M., JAIKUMAR R., VAN WASSENHOVE L.: «A Multiplier Adjustment Method for the Generalized Assignment Problem», Tech. Rep., University of Pennsylvania, Philadelphia, 1983.

[9] FITZSIMMONS J.A.: «Emergency Ambulance Deployment (a Methodology)», *Management Science*, 1973.

[10] FITZSIMMONS J.A., SULLIVAN R.S.: «Establishing the Level of Service for Public Emergency Ambulance Systems», *Socio-Economic Planning Science*, 1979.

[11] GALLO G., PALLOTTINO S., STORCHI G.: «Il Problema dei Cammini Minimi: Metodi ed Algoritmi», Monografia CNR, Progetto Finalizzato Informatica, Obiettivo SOFMAT, 1984.

[12] GAREY M.R., JOHNSON D.S.: «Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness», Freeman, 1979.

[13] KLASTORIN T.D.: «Maximal Covering Location Problem and Generalized Assignment Problem», *Management Science*, 1979.

[14] KOLESAR P.: «Ten Years of Research on the Logistics of Urban Emergency Services», *Operation Research*, 1981.

[15] MARTELLO S., TOTH P.: «An Algorithm for the Generalized Assignment Problem», dal libro *Operational Research 81* (a cura di J.P. Brans), North Holland, 1981.

[16] REVELLE L., COHON J., SHOBRYS D.: «Multiple Objective Facility Location», *Sistemi Urbani,* 1981.

[17] ROSS G.T., SOLAND R.M.: «A Branch and Bound Algorithm for the Generalized Assignment Problem», *Mathematical Programming,* 1975.

[18] SHIER D.R., DEARING P.M.: «Optimal Location for a Class of Nonlinear Single-Facility Location Problems on a Network», *Operations Research,* 1983.

[19] SLATER P.J.: «Locating a Facility to Serving Areas within a Network», *Operations Research,* 1981.

[20] SWERSEY A.J.: «Markovian Decision Model for Fire Companies Dispatching», *Management Science,* 1982.

[21] TANSEL B.C., FRANCIS R.L., LOWE T.J.: « Biobjective Multifacility Minimax Location Problem on a Tree Network», *Transportation Science,* 1982.

[22] THOMAS J.W., GRIFFITH J.R., DURANCE P.: «Defining Hospital Clusters and Associated Service Communities in Metropolitan Areas», *Socio-Economic Planning Science,* 1981.

[15] MARTELLO S., TOTH P.: «An Algorithm for the Generalized Assignment Problem», in *Operational Research 81* (ed. J.P. Brans), North Holland, 1981.

[16] REVELLE L., Cohon J., Shobrys D.: «Multiple Objective Facility Location», *Sistemi Urbani* 1981

[17] ROSS G.T., SOLAND R.M.: «A Branch and Bound Algorithm for the Generalized Assignment Problem», *Mathematical Programming*, 1975

[18] SHIER D.R., DEARING P.M.: «Optimal Locations for a Class of Nonlinear Single-Facility Location Problems on a Network», *Operations Research*, 1983

[19] SLATER P.J.: «Locating a Facility to Service Areas within a Network», *Operations Research*, 1981.

[20] SWERSEY A.J.: «Markovian Decision Model for Fire Companies Dispatching», *Management Science*, 1982.

[21] TANSEL B.C., FRANCIS R.L., LOWE T.J.: «Biobjective Multifacility Minimax Location Problems on a Tree Networks», *Transportation Science*, 1982.

[22] THOMAS J.W., GRIFFITH J.R., DURANCE P.: «Defining Hospital Clients and Associated Service Communities in Metropolitan Areas», *Socio-Economic Planning Sciences*, 1981.

WORKING PAPERS

*1 "Un modello urbano a larga scala per l'area metropolitana di Torino", *gennaio 1984*

*2 "Metodologie per la pianificazione dei parchi regionali", *gennaio 1981*

*3 "A Large Scale Model for Turin Metropolitan Area", *maggio 1981*

4 "An Application to the Ticino Valley Park of a Mathematical Model to Analyse the Visitors Behaviour", *luglio 1981*

5 "Applicazione al parco naturale della Valle del Ticino di un modello per l'analisi del comportamento degli utenti: la calibrazione del modello", *settembre 1981*

6 "Applicazione al parco naturale della Valle del Ticino di un modello per l'analisi del comportamento degli utenti: l'uso del modello", *settembre 1981*

*7 "Un'analisi delle relazioni esistenti tra superficie agricola utilizzata ed alcune principali grandezze economiche in un gruppo di aziende agricole piemontesi al 1963 e al 1979", *settembre 1981*

8 "Localizzazione ottimale dei servizi pubblici, con esperimenti sulle scuole dell'area torinese", *settembre 1981*

9 "La calibrazione di un modello a larga scala per l'area metropolitana di Torino", *ottobre 1981*

10 "Applicazione al parco naturale della Valle del Ticino di un modello per l'analisi del comportamento degli utenti: l'individuazione di un indicatore di beneficio per gli utenti ed una analisi di sensitività su alcuni parametri fondamentali", *ottobre 1981*

11 "La pianificazione dell'uso ricreativo di aree naturali: il caso del parco della Valle del Ticino", *novembre 1981*

*12 "The Recreational Planning of Country Parks: the Case Study of the Ticino Valley Park", *marzo 1982*

13 "Alcuni aspetti della calibrazione di un modello dinamico spazializzato: il caso del modello dell'area metropolitana torinese", *settembre 1982*

*14 "L'applicazione di un modello dinamico a larga scala per l'area metropolitana di Torino: la calibrazione", *novembre 1982*

15 "Modello commerciale Piemonte", *novembre 1982*

16 "Resource allocation in multi-level spatial health care systems: benefit maximisation", *dicembre 1982*

17 "Relazione sulla struttura e sulla dinamica del settore elettromeccanico piemontese", *dicembre 1982*

18 "Evoluzione della finanza locale in Piemonte e in Italia 1977 - 1981", *febbraio 1983*

19 "Un metodo per l'analisi di scenari multidimensionali in ordine alle relazioni tra domanda di trasporto e variabili strutturali dei sistemi economici e territoriali", *febbraio 1983*

20 "Modello commerciale Piemonte", *marzo 1983*

21 "Calibrating the residential location submodel of the simulation moder for the Turin metropolitan area", *giugno 1983*

22 "Dinamiche spaziali dell'area metropolitana di Torino negli ultimi tre decenni", *giugno 1983*

23 "Struttura economica delle imprese del dettaglio alimentare in Piemonte — prime valutazioni", *luglio 1983*

24 "The dynamics of Turin metropolitan area: a model for the analysis of the processes and for the policy evaluation", *agosto 1983*

25 "Un'analisi, con il modello RAMOS, della struttura spaziale del servizio sanitario regionale: il caso del Piemonte", *settembre 1983*

26 "Manuale per l'uso del modello RAMOS (Resource Allocation Model Over Space)", *settembre 1983*

27 "The spatial dynamics of the Turin metropolitan area: an analysis of the last three decades", *ottobre 1983*

28 "Un modello del sistema urbano di Torino: alcune valutazioni di un'esperienza modellistica", *novembre 1983*

29 "Il conto economico dei comparti manifatturieri piemontesi, 1980 — Elaborazioni su dati rilevati dall'ISTAT sul Prodotto Lordo delle imprese manifatturiere con sede sociale in Piemonte", *novembre 1983*

30 "Interrelazioni tra localizzazioni e trasporti: stato dell'arte e possibili linee di sviluppo futuro", *gennaio 1984*

31 "Fondamenti per un approccio unificante all'analisi del comportamento della domanda in un sistema localizzazioni-trasporti", *gennaio 1984*

32 "Location-transport relationships: state-of-the-art, unifying efforts and future developments", *maggio 1984*

33 "Modelli di allocazione spaziale delle risorse sanitarie: la ricerca in corso all'IRES di Torino", *maggio 1984*

---

* *Esaurito*

ires ISTITUTO RICERCHE ECONOMICO - SOCIALI DEL PIEMONTE
VIA BOGINO 21 10123 TORINO