



Localizzazione ottimale degli stalli per il parcheggio delle biciclette: il caso studio della città di Palermo

Optimal location for bike parking lots: the case study of Palermo

Dott. Ing. Salvatore AMOROSO^(*)

Dott. Ing. Luigi CARUSO^(*)

Dott. Ing. Giovanni CASSATA^(*)

Dott. Ing. Luigi MARITANO^(*)

Sommario - Le carenze propositive e fisiche di spazi per il parcheggio delle biciclette in ambito urbano sono alcuni dei principali problemi che affliggono le città italiane. E' necessaria, dunque, una corretta pianificazione della rete di parcheggi per le bici al fine di ottimizzare l'intero sistema di mobilità urbano nonché l'offerta di trasporto. Questo articolo propone un'analisi step-by-step per la ricerca della localizzazione ottima degli stalli per il parcheggio delle biciclette all'interno del centro storico di Palermo. La metodologia di ottimizzazione si basa sull'uso dei modelli di Set Covering Location Problem (SCLP) e di Maximum Coverage Location Problem (MCLP). I dati utili per le simulazioni sono stati acquisiti per mezzo di indagini dirette ed indirette sulla popolazione dei ciclisti e implementati su un software GIS open source (QGIS). In particolare, sono state raccolte informazioni sulle destinazioni, sui tempi e sulle distanze percorse dai ciclisti. Come ultimo passo, è stata effettuata un'analisi costi-benefici a valle di un dimensionamento sommario degli stalli. La metodologia proposta può essere generalizzata e contestualizzata ad altri scenari, senza perdere di generalità, potendo essere utilizzata anche nella fase di valutazione ex-post dell'efficacia di soluzioni e reti già esistenti.

1. Premessa

Gli sforzi volti alla pianificazione corretta delle città dovrebbero trovare fondamento sul tema dello sviluppo sostenibile [1]. Un sistema di trasporto integrato ed efficiente costituisce la base di un processo di urbanizzazione con forti connotati di sostenibilità.

Questo è il motivo per cui il sistema dei trasporti dovrebbe essere progettato in modo tale da risultare conforme e co-

Summary - The lack of parking spaces for bicycles is one of the main issues that many cities face. A proper planning of a bike station network is necessary in order to optimize the whole urban system and the transport supply. In this work a step-by-step analysis is proposed to find the best location for the bicycle lots in the old town of Palermo. The optimization method includes the use of both a Set Covering Model and a Maximum Coverage Location Problem. The dataset for the simulations was collected by direct and indirect surveys on the population and implemented into Open source GIS software. In particular, data on the destinations, times and distances covered by the bicycles' users were included. Finally, a cost-benefit analysis was made after a sizing phase of the lots. The proposed methodology can be applied to other contexts without loss of generality. It can also be used for the ex-post evaluation of an already existing network.

1. Introduction

Every planning effort for cities should be placed on the framework of sustainable development [1]. An efficient transportation system is the basis for a sustainable urbanization process.

This is why transportation system should be designed so exactly that is coordinated with sustainable development criterions. In order to design a sustainable transportation network, it is necessary that the alternative situations of transportation are accessible [1].

Nowadays some cities face the problem of congestion especially in the centers and the old towns. This leads to a lack of live ability and usability of the urban spaces and a contextual decay in terms of environmental pollution.

^(*) Università degli Studi di Palermo/DICAM, Palermo, Italy.

^(*) Università degli Studi di Palermo/DICAM, Palermo, Italy.

ordinato con i criteri di sviluppo sostenibile. Al fine di progettare una rete di trasporto sostenibile è necessario assicurare una adeguata accessibilità alle diverse modalità [1].

Oggi alcune città nazionali ed europee sono interessate dal fenomeno della congestione specialmente in corrispondenza delle zone centrali e nei centri storici. Questa condizione sfocia spesso in una carenza di vivibilità e di fruizione degli spazi urbani nonché in uno scadente livello di qualità della vita, specialmente con riferimento all'inquinamento atmosferico.

La bicicletta è universalmente riconosciuta come il miglior compromesso per muoversi lungo le brevi e medie distanze. I fattori che incentivano il suo uso come mezzo di trasporto sono oggi posti sotto attenzione dai decisori politici e studiati dal mondo della ricerca per promuovere lo shift modale dai veicoli motorizzati verso la bicicletta. Sono state proposte diverse soluzioni e strategie per ottenere i risultati sperati, coinvolgendo diverse aree di competenza, dall'ingegneria dei trasporti alla psicologia [2].

D'altro canto, va sottolineato che una buona fetta dell'utenza potenziale è scoraggiata ad usare la bicicletta come mezzo di trasporto a causa della insufficiente offerta di aree di sosta adeguate a mobilità a due ruote non motorizzata.

Diverse città italiane, specialmente quelle del Sud, presentano caratteristiche orografiche favorevoli agli spostamenti in bicicletta in condizioni di sicurezza e comfort ma la totale assenza di una corretta pianificazione infrastrutturale e operativa riduce la propensione dei cittadini all'utilizzo dei velocipedi. Inoltre, l'elevato tasso di furti registrati nel settore ha contribuito, negli ultimi decenni, ad accrescere la difficoltà nella diffusione della "just culture" del muoversi utilizzando mezzi non motorizzati. Conseguentemente, la possibilità di ottenere soluzioni alternative che consentano all'utenza di parcheggiare in sicurezza la propria bici è spesso negata dalla non idonea gestione del problema da parte delle amministrazioni locali.

Al di là dei diversi aspetti prima considerati, trovare una soluzione ottima al problema della localizzazione dei nodi parcheggio per le biciclette può portare ad accrescere la quota di utenti che scelgono di muoversi con mezzi non motorizzati o a piedi. La diffusione della cultura e dell'uso della bicicletta può contribuire ad incrementare i livelli generali di benessere e a contenere l'inquinamento atmosferico e acustico. Ecco perché questo tema è considerato al centro delle più recenti ricerche da parte degli studiosi di mobilità e di pianificazione urbana [3].

Nella letteratura scientifica di settore si riscontrano differenti approcci per la trattazione del problema. Negli anni più recenti si è diffuso l'utilizzo di metodologie basate sui sistemi GIS, in particolar modo in seguito al rilascio delle licenze open source di alcuni software. Studi recenti hanno indirizzato l'approccio al problema verso tecniche di ottimizzazione Multi-Periodica [4], AHP e logica Fuzzy [5], analisi multi-criteria [6], Programmazione Lineare Mista [7].

The bicycle is widely recognized as the best compromise for moving along short and medium distances. The factors that increase the use of bicycle are currently being studied by policy makers and academic researchers in a search for measures to promote a modal shift from motorized transport to cycling. Numerous proposals have been put forward involving very different disciplines, ranging from urban and transportation planning to psychology [2].

On the other hand, a large amount of potential users are discouraged from moving by bike for the lack of parking supply.

Several Italian cities located in the South part of the peninsula are quite suitable for cycling but the total absence of a sustainable mobility Plan does not encourage citizens to move by bike. Moreover, the high rates of theft registered in the last decade increases the difficulty of spreading the "just culture" of moving by non-motorized means. So, the task of reaching a well-organized solution to give users the possibility of parking their bicycles is committed to the local governments. Finding the best location of bicycle station leads to better use of non-motorized vehicles such as bicycles and walking. The growth of bicycle culture among peoples not only increases their health and happiness, but also decreases air pollution and traffic. This is why that the issue of bicycle and its study has been considered as an important research field by authors and researchers [3]. Several approaches have been proposed in the literature.

The use of GIS-based methodology has spread in the recent years particularly with the release of open source licenses. Recent studies treated Multi-Periodic Optimization [4], AHP and Fuzzy approaches [5], multi-criteria approach [6], MILP methods [7] to solve the problem.

Most of these works are based on bike sharing planning programs. Anyhow they can be generalized to the bike stations case. Much of the literature on facility location modelling has not been directed to specific applications (i.e., case studies). Rather, it has been directed to formulating new models and modifications to existing models which have many potential applications, and to developing efficient solution techniques for existing or newly formulated models [8].

Here the authors propose a method which incorporates the combined use of GIS and two models from Operations Research. The method was firstly applied to a particular context (the old town in Palermo) but it could be widely applied without constraints of space. Anyway the size of the problem can affect the processing time especially when a large amount of bike stations are planned. The next section describes in details the steps of the analysis.

2. Methodology

The proposed methodology can be summarized into different steps:

- 1) zoning: identification of the study area;*
- 2) points of interest (POI) identification and classification;*

La maggior parte di questi lavori si basa su problemi di pianificazione e progettazione di soluzioni di bike-sharing. Ad ogni modo, tali problemi possono essere generalizzati anche con riguardo al caso di studio dei nodi per il parcheggio delle bici private. Gran parte della letteratura sulla modellazione della localizzazione delle infrastrutture non presenta riscontri o applicazioni relativi a casi reali. Piuttosto, sono rivolti alla proposta di nuovi modelli e metodologie o modifiche e correzioni di modelli già noti che hanno diverse applicazioni potenziali [8].

In questo articolo, gli autori fanno uso di una metodologia che unisce ai modelli della Ricerca Operativa il ricorso al GIS. Questo metodo è stato applicato in prima battuta ad un particolare contesto (il centro storico della città di Palermo) ma può essere esteso anche ad altre aree territoriali. Va però ricordato che la dimensione del problema di analizzare, specialmente in termini di numerosità dei vincoli, può condizionare fortemente e accrescere l'onere computazionale. Il paragrafo successivo descrive in dettaglio i passi dell'analisi.

2. Metodologia

La metodologia proposta può essere sintetizzata nei seguenti passi:

- 1) identificazione dell'area di studio e zonizzazione
- 2) identificazione e classificazione dei punti di interesse (POI);
- 3) prima ottimizzazione (Scenario 1): modello SCLP con costi unitari;
- 4) indagine sulla domanda di mobilità ciclistica;
- 5) seconda ottimizzazione (Scenario 2): modello MCLP
- 6) Valutazione dei costi;
- 7) terza ottimizzazione (Scenario 3): SCLP con costi prefissati
- 8) Scenario 4: indagine spaziale per ottenere la configurazione finale del sistema

Prima di entrare nel merito di ogni fase è fondamentale richiamare alcuni aspetti teorici sui due modelli di Ricerca Operativa utilizzati nell'ambito dell'analisi.

Il Set Covering Location Problem (SCLP) è stato proposto e pubblicato sulla rivista "Geographical Analysis" più di trent'anni fa da TOREGAS (1970) ed affinato da CHURCH e REVELLE nel 1976. Il problema consiste nell'identificare il numero minimo di infrastrutture (e la loro relativa localizzazione) in modo che queste possano soddisfare interamente una certa domanda entro una determinata distanza (o tempo), calcolata a partire dalle singole infrastrutture. Un problema siffatto è definito come "covering" in quanto si richiede che tutta la domanda sia "coperta" o "servita" all'interno di un determinato range. Un certo valore di domanda è considerato "servito" se una o più infrastrutture sono localizzate entro quella distanza (o tempo) prestabilita da esso. Il modello SCLP, nella sua

- 3) first optimization (Scenario 1): LSPC with unit costs;
- 4) bicycling demand survey;
- 5) second optimization (Scenario 2): MCLP;
- 6) cost evaluation;
- 7) third optimization (Scenario 3): LSPC with fixed costs;
- 8) scenario 4: spatial analysis to reach the final configuration.

Before deepening each phase, it is important to show some remarks on the two Operations Research (OR) models used in the analysis.

The Location Set Covering Problem (SCLP) was defined more than thirty years ago by Torgas (1970) and in the pages of Geographical Analysis by Torgas and ReVelle (1976). This location problem involves finding the smallest number of facilities (and their locations) such that each demand is no farther than a pre-specified distance or time away from its closest facility. Such a problem is called a "covering" problem because it requires that each demand be served or "covered within some maximum time or distance standard. A demand is defined as covered if one or more facilities are located within the maximum distance or time standard. The classical SCLP requires that each demand is covered at least once. The most common applications involve crew scheduling operations, routing problems and facility location problem. The classical formulation of the problem is the following:

Let S_1, S_2, \dots, S_n be a family of subsets of a set $S = \{1, 2, \dots, m\}$. A covering of S is a subfamily S_j for $j \in I$ such that $S = \bigcup_{j \in I} S_j$. Assume that each subset S_j has a cost $c_j > 0$ associated with it. We define the cost of a cover to be the sum of the costs of the subsets included in the cover.

The problem of finding a cover of minimum cost is of practical significance. As an integer program it can be specified as follows:

Define the $m \times n$ matrix $A = \|(a_{ij})\|$ by $a_{ij} = 1$ if $i \in S_j$ and $a_{ij} = 0$ otherwise

Let x_j be 0-1 variables with $x_j = 1$ (0) to mean set S_j is included (respectively not included) in the cover.

The problem is to:

$$\text{Minimise } \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1 \quad i=1, \dots, m \quad (2)$$

$$x_j = 0 \quad \forall j \quad (3)$$

The m inequality constraints have the following significance: since $x_j = 0$ or 1 and the coefficients a_{ij} are also 0 or 1 we see that $\sum_{j=1}^n (a_{ij} x_j)$ can be 0 only if $x_j = 0$ for all j such that $a_{ij} = 1$. In other words only if no set S_j is chosen such that $i \in S_j$. The inequalities are put in to avoid this. The Maximal Covering Location Problem (MCLP), instead, seeks the maximum population which can be served within a stated service distance or time given a limited number of facilities. Defined on a network of nodes and arcs, a mathematical formulation of this problem can be stated as follows:

formulazione classica, richiede che un punto in cui si considera concentrata la domanda, sia “coperto” almeno da una infrastruttura. Le applicazioni più comuni di questo modello riguardano problemi di *crew scheduling*, *routing* e localizzazione di infrastrutture.

La formulazione analitica del problema, nella sua forma classica, è la seguente:

Sia S_1, S_2, \dots, S_n un insieme di sottoinsiemi di $S = \{1, 2, \dots, m\}$. Un “covering” di S è un sottoinsieme S_j con $j \in I$ tale che $S = \bigcup_{j \in I} S_j$. Si assuma che ogni sottoinsieme S_j abbia un costo $c_j > 0$ ad esso associato. Si definisca il costo del “covering” come la somma dei costi dei sottoinsiemi in esso inclusi. Il problema consiste nel trovare una soluzione di minimo costo. Si può quindi definire il seguente problema di programmazione lineare intera:

Si definisca una matrice $m \times n$, $A = \|(a_{ij})\|$ con $a_{ij} = 1$ se $i \in S_j$ e $a_{ij} = 0$ altrimenti.

Sia x_j una variabile binaria con $x_j = 1$ (0) a seconda che il sottoinsieme S_j sia incluso (non incluso) nel “covering”.

Il problema è il seguente:

$$\text{Min } \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$x_j = 0 \vee 1 \quad (3)$$

Gli m vincoli di disuguaglianza hanno il seguente significato: se $x_j = 0$ o 1 ed i coefficienti a_{ij} assumono anch'essi 0 o 1 si ha che $\sum_{j=1}^n (a_{ij} x_j)$ può assumere valore nullo solo se $x_j = 0$ per tutti i valori j tali che $a_{ij} = 1$. Il secondo problema incluso nell'analisi è il Maximal Covering Location Problem (MCLP). A differenza del primo, questo ricerca la massima domanda “servibile” all'interno di un determinato range di distanza o tempo, dato un numero prestabilito di infrastrutture da realizzare. Definita una rete di infrastrutture, la formulazione analitica del problema è la seguente:

$$\text{Max } \sum_{i \in I} a_i y_i \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_j \geq y_i \quad i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (6)$$

$$x_j = 0 \vee 1 \quad j \in J \quad (7)$$

$$y_i = 0 \vee 1 \quad i \in I \quad (8)$$

dove:

$I =$ insieme dei nodi “domanda”;

$J =$ insieme delle infrastrutture;

$S =$ distanza oltre la quale un punto “domanda” è considerato “non servito” (il valore di S può essere definito diversamente per ogni punto di domanda);

$d_{ij} =$ la più piccola distanza tra i e j ;

$x_j =$ (1 se l'infrastruttura j è realizzata, 0 altrimenti);

$N_i = \{j \in J \mid d_{ij} \leq S\}$;

$a_i =$ popolazione (o numero di utenti) da servire al nodo di domanda i ;

$$\text{Maximise } \sum_{i \in I} a_i y_i \quad (4)$$

$$\text{Subject to } \sum_{j \in N} x_j \geq y_i \quad i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (6)$$

$$x_j = 0 \vee 1 \quad j \in J \quad (7)$$

$$y_i = 0 \vee 1 \quad i \in I \quad (8)$$

where:

$I =$ denotes the set of demand nodes;

$J =$ denotes the set of facility sites;

$S =$ the distance beyond which a demand point is considered “uncovered” (the value of S can be chosen differently for each demand point if desired);

$d_{ij} =$ the shortest distance from node i to node j ;

$x_j =$ (1 if a facility is allocated to site j , 0 otherwise);

$N_i = \{j \in J \mid d_{ij} \leq S\}$;

$a_i =$ population to be served at demand node i ;

$P =$ the number of facilities to be located;

N_i is the set of facility sites eligible to provide “cover” to demand point i .

A demand node is “covered” when the closest facility to that node is at a distance less than or equal to S . A demand node is “uncovered” when the closest facility to that node is at a distance greater than S . The objective is to maximize the number of people served or “covered” within the desired service distance. The solution of this problem specifies not only the largest amount of population that can be covered but the p facilities that achieve this maximal coverage.

Both problems can be easily solved with Linear Programming techniques and heuristic approaches [9]. After a zoning phase, useful to identify the area into which plan the system, all the points of interest that can be considered as important mobility attractors have to be identified and classified (i.e. public services, offices, schools, transport terminals, places of worship, museums, cultural and archaeological sites etc.). These represent the points of mobility generation and attractions, where displacements can take place. To plan an efficient system of bike stations it is necessary to consider the physical effort made by the users to reach the parking lots. Several models are presented in the scientific literature.

Here we considered an average user weighing 70 kg and with a transported load of 1.5 kg. To overcome a path length of 300 m, at a constant speed equals to 1.2 m/s (in plan) he must provide a power of approximately 14 W, or 12 kcal/h, the equivalent of driving a car for 15 minutes. So, in relation to the road paths and the orography of the study area, the analyst must choose the best “catchment area” of each node. Generally a distance of 300 m between a parking lot and a POI can be considered as a good compromise. A plausible simplification about this issue is the following: if the analyst considers a circular shape buffer, then a lower value of the distance must be considered to take into account that the total length of the roads is generally greater than the buffer radius. Otherwise, a shortest path algorithm must be

N_i è l'insieme delle localizzazioni delle infrastrutture candidate a servire i punti di domanda i .

Un nodo di domanda è considerato "servito" quando l'infrastruttura più vicina al nodo si trova ad una distanza minore o uguale a S . Altrimenti, il nodo non è servito se si trova ad una distanza maggiore di S . L'obiettivo consiste nel massimizzare la popolazione servita all'interno delle distanze prefissate. La soluzione ottima non fornisce solamente il valore più elevato della popolazione servita ma anche le infrastrutture e le relative localizzazioni.

Entrambi i problemi possono essere risolti con tecniche di programmazione lineare binaria o tramite euristiche [9]. A valle della fase di zonizzazione, utile ad identificare l'area all'interno della quale si esauriscono gli effetti degli interventi di pianificazione del sistema di nodi parcheggio per le biciclette, sono stati identificati e classificati tutti i punti generatori e attrattori di domanda di mobilità (servizi pubblici, uffici, scuole, terminali di trasporto, luoghi di culto, musei, siti culturali e archeologici ecc.). Questi rappresentano i centroidi da cui si dipartono e in cui terminano gli spostamenti nel centro storico.

Al fine di pianificare una rete di nodi parcheggio efficiente, è necessario considerare l'accessibilità al sistema e quindi lo sforzo che si richiede agli utenti per raggiungere, a piedi, i nodi stessi. Nella letteratura scientifica di settore sono presenti diverse teorie al riguardo.

Nel caso in questione, si è considerato un utente medio del peso di 70 kg con un carico di 1,5 kg. Per percorrere un sentiero di 300 m in piano, ad una velocità costante di 4 km/h gli è richiesta una potenza di circa 14 W (o 12 kcal/h). In questo modo, in relazione alle caratteristiche geometriche delle strade e all'orografia dell'area di studio, l'analista deve scegliere la migliore "catchment area" per ogni nodo. In linea generale, si può ritenere accettabile una distanza di 300 m tra il nodo parcheggio e la destinazione/origine dello spostamento. Una semplificazione analitica del concetto è la seguente: si considera un buffer circolare a partire da ogni nodo, caratterizzato da un percorso radiale inferiore al percorso reale che l'utente deve compiere a piedi per raggiungere il nodo parcheggio. Evidentemente, una metodologia più rigorosa dovrebbe includere una analisi di approssimazione con il calcolo dello scarto massimo che si ottiene considerando i due casi.

Per gli scopi dell'analisi si è scelto di adottare un buffer di 250 m per tenere conto di questa approssimazione. La prima ottimizzazione ha riguardato l'identificazione del numero minimo di nodi parcheggio sotto il vincolo che tutti i POI fossero serviti. In prima approssimazione, si è considerata una rete in cui le possibili localizzazioni coincidono con i POI. Prendendo in considerazione, quindi, un buffer a partire da ogni punto di interesse, sotto l'ipotesi di costi unitari assegnati ad ogni nodo (ovvero che la realizzazione di ogni nodo parcheggio comporti un costo di uguale valore indipendentemente dalla localizzazione scelta), il problema consiste nel ricavare l'insieme con il minor numero di nodi in grado di servire tutti i POI. Il mo-

applied. The first optimization concerns the identification of the minimum number of bike stations under the constraint that each POI is served. We considered firstly the bike stations coincident with the POI. So, considering a buffer for each of the POI, under the initial hypothesis that all the bike stations have a unitary cost, the problem is to find the smallest group (and which nodes) that are able to serve all the POI. The model used to solve this problem is a SCLP. The solution is a subset L of POI. This first configuration is the basis for the further steps of the analysis and we call it "Scenario 1". In order to refine the network's topology it is important to know the actual mobility behaviors of the bike users. For this reason, a survey by questionnaire is needed to get at least the destinations of the cyclists within the study area. Other useful information for further analysis can be gained: for instance, the respondents can be asked about their socio-economics status, the income range, the mobility habits (reason, time, means etc.). Once reached the destination points inside the study area, these can be organized into a database and handled by using GIS software. Then, the second optimization can be run. Now the problem is to find the maximum population (i.e. the greatest number of cyclists) that can be "served" (parking service) within a stated service distance (or, which is the same, a stated service time) given a limited number of facilities. The problem is a MCLP. Here the number of facilities (initially coincident with the POI) is fixed and defined by the analyst. So, different simulations (one for each of the facility) must be run to identify the maximum number of facilities beyond which the population served does not vary. We call the results of this second simulation "Scenario 2" and the subset of facilities M . At this point we have the two subsets L and M .

Let define $H = L \cup M$. Now is possible to assign a cost to the facilities included into H . The cost assignment procedure is made by a "lot desig" for each facility: that is, to assign a number of lots according to the demand that the single node can accommodate. This is possible doing a "buffer analysis": from each of the nodes included into H , a buffer of approximately 250-300 m will encompass a given number of demand points. As previously said, these points resulted from the questionnaire survey. In order to plan properly the lots, a projection of the demand onto the whole population is essential. For this reason, data on the use of the bicycle as a transport mean, on the modal split and on the peak hour movements must be collected. So an extrapolation and a proportional analysis starting from the survey data are necessary to reach the final number of lots per facility. Once reached this number, a cost per each node can be assigned in relation to the typology chosen for the lot (inverted U, with/without shelter, racks etc.). A further optimization using a LSCP with the costs calculated in the previous phase will return the final configuration. The nodes with a high potential attraction for the demand must be activated anyhow. The last Scenario ("Scenario 4") can be obtained from a localization phase: the initial POI can't be generally considered coincident with the real locations of the parking lots. So a detailed spatial analysis will return the final points' locations as function of the availability of space in the urban

dello utilizzato per questa prima ottimizzazione è il SCLP. La soluzione è un sottoinsieme L di POI. La configurazione finale di questa fase costituisce la base per le fasi successive ed è stata designata come "Scenario 1". Per affinare la topologia della rete di parcheggi ottenuta è fondamentale conoscere le abitudini di mobilità dei ciclisti. Per questo motivo, è stata condotta un'indagine a mezzo questionario per conoscere le destinazioni dei ciclisti all'interno dell'area di studio. Altre informazioni acquisite riguardano le caratteristiche socio-economiche della popolazione, la fascia retributiva, le abitudini di mobilità (motivo, orari, mezzi ecc.). I centroidi ottenuti dai risultati delle indagini sono stati archiviati in una database ed implementati sul software GIS. A questo punto è stata avviata la seconda ottimizzazione. L'obiettivo del secondo modello è quello di ricavare la massima popolazione "servibile" (ossia il maggior numero di ciclisti), in termini di offerta di sosta, all'interno di una certa distanza (o tempo) prestabilito. Il problema è un MCLP. In questo caso, il numero di infrastrutture da realizzare, inizialmente coincidente con i POI, è fissato a priori dall'analista. Possono dunque essere effettuate più simulazioni al variare del numero di infrastrutture, in modo da ricavarne il numero massimo oltre il quale non si ottiene un ulteriore incremento nella domanda servibile. Il risultato della seconda simulazione è stato definito come "Scenario 2" e il sottoinsieme delle infrastrutture come M. A questo punto sono stati ottenuti due sottoinsiemi, L ed M, rispettivamente dalla prima e dalla seconda ottimizzazione.

Si definisca $H=LUM$. Nello step conseguente è possibile assegnare un costo alle infrastrutture incluse nell'insieme H. La procedura di assegnazione dei costi può effettuarsi tramite una progettazione degli stalli per ogni nodo: vale a dire, assegnare un numero di stalli in relazione alla domanda che ogni singolo nodo può accogliere. Ciò è possibile attraverso un'analisi "buffer": a partire da ogni nodo incluso in H, un buffer del raggio di 250 m includerà un determinato numero di centroidi, ricavati dal risultato dell'indagine precedentemente descritta. In un'ottica di corretta pianificazione del sistema a lungo termine, è necessario considerare una proiezione della domanda in scenari futuri. Per questo motivo è necessario acquisire informazioni sullo share modale a favore della bicicletta e sulla stratificazione della domanda nell'arco della giornata. Ciò può dedursi da un'extrapolazione a partire dai dati tratti fuori dall'indagine con l'obiettivo di ricavare il numero finale di stalli per ogni nodo.

Una volta ottenuto il numero di stalli per ogni nodo, il costo può essere raggiunto in relazione alla tipologia costruttiva scelta (U invertita, rastrelliera, con o senza pensilina ecc.). Una ulteriore ottimizzazione SCLP con costi fissi e pari a quelli determinati nello step precedente consentirà di ottenere la configurazione finale. I nodi con un elevato potenziale attrattivo in termini di domanda servibile andrebbero attivati comunque. L'ultimo scenario (Scenario 4) è ottenuto a valle di un'analisi spaziale: non si possono, infatti, considerare i POI come reali siti di rea-

context. In this phase, further consideration can be made on the structural typology with regards on the dimension-space relation. The next paragraph shows a simplification through an instance regarding an application of the methodology to the old town of Palermo. This case would be just an example to understand the proposed methodology: anyway it could be applied to different cases and contexts.

3. Case Study

The study area (fig. 1) chosen for the application is the old town in Palermo. It consists of a surface of about 2.5 km² and it is divided into four districts called "Mandamenti" (Castellammare, Monte di Pietà, Tribunali and Palazzo Reale). It matches the whole urban area of Palermo in the 18th Century. The old town is one of the main attractions of the city for tourism, leisure, cultural and work interests: it is also one of the biggest and richest in Europe. Unfortunately, the high congestion levels along with the lack of intermodal supply affect the quality of life into this area nullifying its benefits. Moreover, there is a total absence of safely pedestrian paths and bike lanes. Since 2001 the major and the city council are working to improve the sustainability and the mobility inside the old town. Several proposals and plans have been released but nowadays the issue is still remarkable.

The application presented here suggests a *modus operandi* to enhance the quality of the mobility and to promote the intermodal transport within the study area. The first step was the POI identification and localization. Totally 192 POI (fig. 2) were identified as significant for the attraction of mobility. These were clustered in three classes: public services and offices, cultural and leisure sites and mobility nodes (such as transport terminals).

The further step was the first optimization by considering the whole set of 192 POI as possible bike stations. As described in the previous paragraph, in this phase the costs of the facilities were assumed unitary. The result is the Scenario 1 with the subset L consisting of 17 nodes. With this configuration is possible to reach all the other nodes by feet within a distance of nearby 300 m (fig. 3). Then it was considered the result of the survey and the destinations of the cyclist interviewed by the questionnaire. In particular, an online survey was administered and the results were imported into a GIS database and mapped. As a whole the sample was made of 1,140 respondents, about the 8.9% of the cyclist in that city, considering that the population of Palermo is about 680,000 and the cyclist are nearby 10,000. The destinations located within the old town were in total 347 (fig. 4).

Then, the second optimization was run. The model used in this phase was the MCLP. The adjacency matrix was a 192 × 347. So, here we were searching for the optimal configuration, starting from the 192 POI, which ensure the maximum population served. Here the number of facilities to be activated is fixed by the analyst. In order to obtain the maximum number of facilities beyond which the population served does not vary, 192 simulations (one for each of the POI) were run. The results were plotted into a curve showing

lizzazione degli stalli ma si dovrà studiare ogni singola area con l'obiettivo di individuare gli spazi necessari alla realizzazione dei parcheggi. In questa fase possono essere espresse ulteriori considerazioni sulla tipologia strutturale da adottare in relazione alla disponibilità di spazio. Il paragrafo successivo descrive l'applicazione della metodologia appena illustrata al caso studio del centro storico di Palermo. Questa applicazione può essere di aiuto al lettore per chiarire i concetti descritti: ad ogni modo, la metodologia è molto flessibile e adattabile ad altri casi e applicazioni.

3. Caso studio

Come già accennato, l'area di studio (fig. 1) scelta per l'applicazione è il centro storico della città di Palermo. La sua superficie è pari a circa 2,5 km² e l'intera area è divisa in 4 zone dette "Mandamenti" (Castellammare, Monte di Pietà, Tribunali e Palazzo Reale) individuate dalle due direttrici "Corso Vittorio Emanuele" e "Via Maqueda". Questa zona coincideva nel XVIII secolo con l'intero sviluppo urbano della città. Il centro storico di Palermo, che è uno

the population served as a function of the number of nodes activated (fig. 5).

It resulted that beyond 19 nodes the population served is equal to the total. So we assumed the subset M made of 19 bike stations (fig. 6). Some of them are the same included into the subset L, other are different. The Scenario 2 is similar to the Scenario 1 since some nodes are very close to each other. Finally, the subset H (Scenario 1+2) is made of 30 nodes (fig. 7). Now the whole old town is uniformly covered and both the POI and the destinations are supplied.

The next step is the cost analysis and the related design of the lots. So buffer areas with a radius of 250 m starting from each of the 30 nodes were considered. The number of destination points belonging to each buffer was calculated (fig. 8). The results obtained refer only to the surveyed population that represents just a portion of potential cyclists. It is therefore necessary to make a projection to the entire population.

As described, the survey sample is made of 347 respondents. Considering the actual modal split of 1,5%, the projection was made by assuming the parameters showed in table 1.

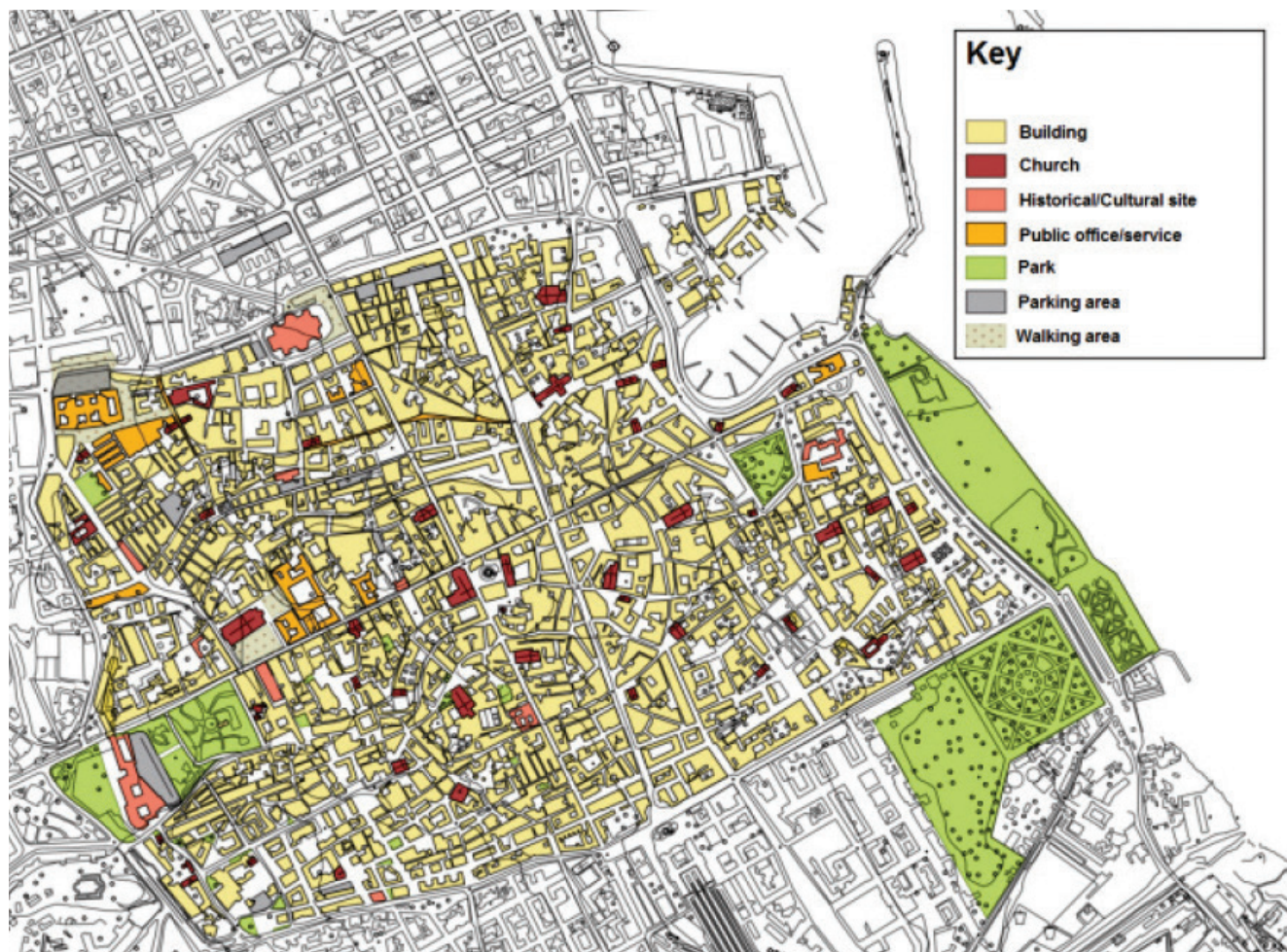


Fig. 1 - Centro storico di Palermo.
Fig. 1 - Old town of Palermo.

dei più estesi, in termini territoriali, d'Europa, è la zona di maggior interesse per scopi turistici, ricreativi, culturali, come pure sede di diversi servizi e uffici. Di contro, i livelli di congestione elevati e la carenza di un'offerta di trasporto intermodale adeguata penalizza la fruizione delle diverse attività in esso insediate. Inoltre, la scarsità di itinerari pedonali e la totale assenza, di percorsi ciclabili non invogliano l'utente a muoversi al suo interno con mezzi di trasporto non motorizzati. Dal 2001, il Comune sta lavorando per incentivare queste modalità di trasporto e per migliorare la mobilità all'interno del centro storico: diverse proposte di Piano per la mobilità dolce e della ciclabilità sono state avanzate ma ad oggi il problema è ancora tangibilmente irrisolto.

L'applicazione vuole suggerire un "modus operandi" per incrementare la qualità della mobilità nel centro storico e per incentivare il trasporto multimodale e integrato al suo interno.

Il primo step ha riguardato l'identificazione e la classificazione dei POI. Sono stati identificati in totale 192 POI (fig. 2) come poli attrattori e generatori di domanda. Questi sono stati clusterizzati in tre classi: servizi pubblici e uffici, strutture culturali e terminali di trasporto

The result of this designing phase is the number of lots per node. In particular, this number ranges from 80 (node 4 – Massimo Theatre) to 4 (node 23 – Saint Xavier Church). In order to evaluate the actual construction costs, an investigation comparing the different types of parking lots was carried out. The solution that best fit for this case is the "inverted U". This one makes it possible to park two bicycles a lot. The unitary construction and installation cost of an inverted U is approximately of € 80.

The installation cost results from the multiplication of the number of lots and the unitary cost. As a whole it was found a cost of the project of nearly € 33,000. The table 2 shows the number of parking lots per node and the related cost.

The last phase concerns the third optimization: after the cost evaluation, a new SCLP model can be applied by attributing a fixed monetary value to the nodes included into H. Here the 6 nodes with a number of lots greater than 20 (in dark in table 2) were considered to be realized anyhow. This optimization returned a subset of 19 nodes and allows to achieve savings for € 10,000. So, the final cost of the project is of € 23,000.

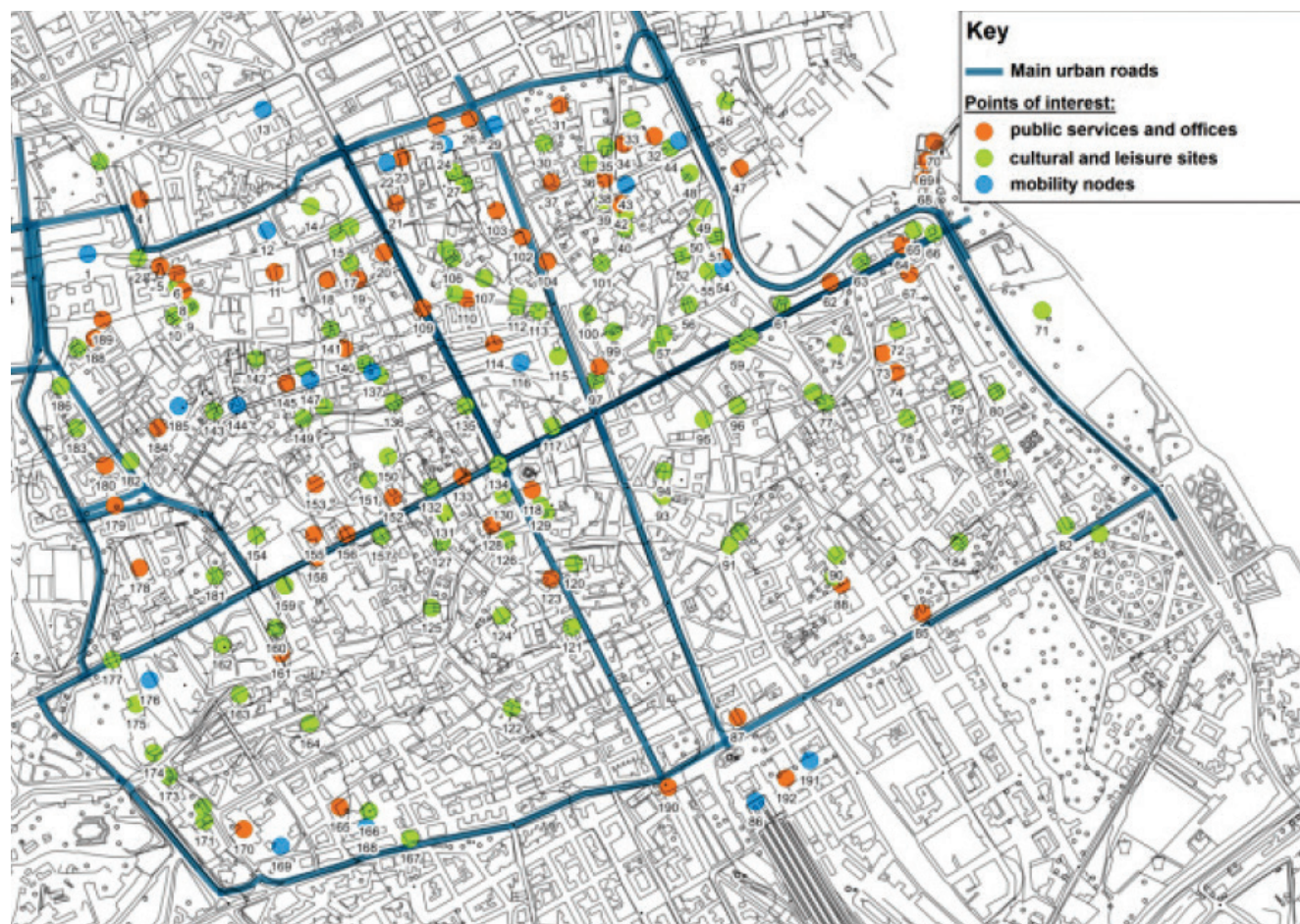


Fig. 2 - Punti di interesse (POI): identificazione e classificazione
Fig. 2 - Points of interest identification and classification

Lo step successivo è consistito nella prima ottimizzazione considerando i 192 POI come possibili localizzazioni dei nodi parcheggio per le biciclette. Così come descritto al paragrafo precedente, in questa fase il costo delle infrastrutture è stato fissato come unitario

Il risultato coincide con lo Scenario 1 e l'insieme dei nodi risultati dal processo di ottimizzazione è costituito da 17 elementi. Con questa configurazione, è possibile raggiungere, entro un range di 300 m, tutti gli altri nodi a partire dai 17 realizzati (fig. 3). Come proseguimento della procedura applicata, sono stati presi in esame i risultati dell'indagine svolta e, dunque, delle destinazioni indicate dagli utenti della mobilità ciclistica intervistati. Il complesso delle risposte ricavate dal questionario è stato organizzato in un database e, successivamente, implementato in GIS. Il campione è risultato costituito da 1.140 rispondenti, pari a circa l'8,9% della popolazione di ciclisti di Palermo (circa 10.000). Le destinazioni localizzate all'interno del centro storico sono state quantificabili nel complesso in 347 aree di sosta (fig. 4).

Come passo successivo è stato eseguito il secondo processo di ottimizzazione. Il modello utilizzato in questa fase è quello identificato come MCLP. La matrice di adiacenza in questo caso è risultata composta da 192 righe e 347 colonne. L'obiettivo era la ricerca di una configurazione ottimale di nodi, partendo dai 192 POI già identificati, che permettesse di servire la maggiore domanda possibile. Nell'ambito di questa fase il numero di infrastrutture è fissato dall'analista. Sono state eseguite 192 simulazioni differenti al variare di questo parametro. Il risultato è stato riassunto in una curva che fornisce la popolazione servita al variare del numero di nodi attivati (fig. 5)

E' emerso che, andando al di là del valore di 19 nodi, la popolazione servita non cresce ulteriormente. Così si è assunto l'insieme M costituito da 19 nodi (fig. 6). Alcuni di essi coincidono con quelli individuati nella fase precedente e, dunque, contenuti in L, mentre altri sono differenti. Si osserva che gli Scenari 1 e 2 sono molto simili in termini di numerosità degli elementi. L'insieme H (Scenario 1+2) risulta essere costituito da 30 elementi (fig. 7). Con questa configurazione, l'intero centro storico è risultato essere servito e sia i POI che le destinazioni essere "coperti".

Lo step successivo ha riguardato l'analisi economica e la relativa progettazione degli stalli. Si sono considerati buffer circolari di raggio 250 m a partire dai 30 nodi inclusi in H. Si è calcolato, quindi, il numero di destinazioni comprese in ognuno dei 30 buffer (fig. 8). I risultati ottenuti si riferiscono solamente ad una fetta della popolazione dei ciclisti e rappresentano, quindi, un valore parziale degli utenti potenziali. E' stato, conseguentemente, necessario effettuare una proiezione sull'intera popolazione di ciclisti.

Come descritto, il campione dei rispondenti è costitu-

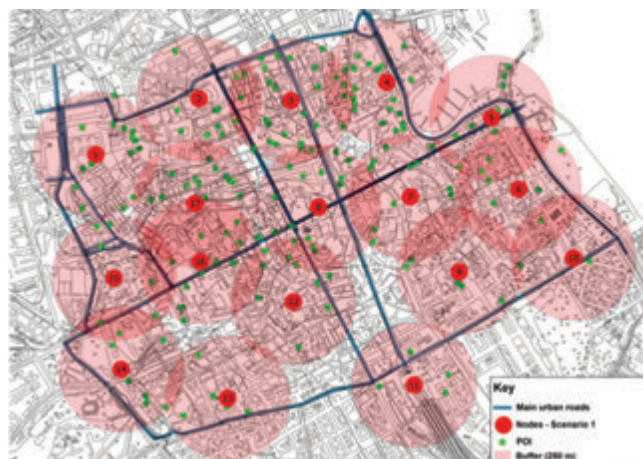


Fig. 3 - Scenario 1.

Fig. 3 - Scenario 1.



Fig. 4 - Risultati dell'indagine sulla mobilità ciclistica nel centro storico della città di Palermo.

Fig. 4 - Bicycling demand survey results.

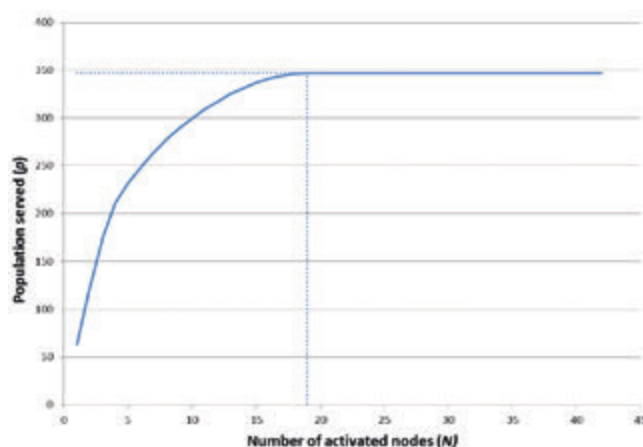


Fig. 5 - Curva N-p nelle diverse simulazioni MCLP.

Fig. 5 - MCLP simulations.

The final configuration (fig. 9) was obtained after the localization phase: the spatial analysis shifted some of the 19 nodes to reach the final location in relation to the avail-

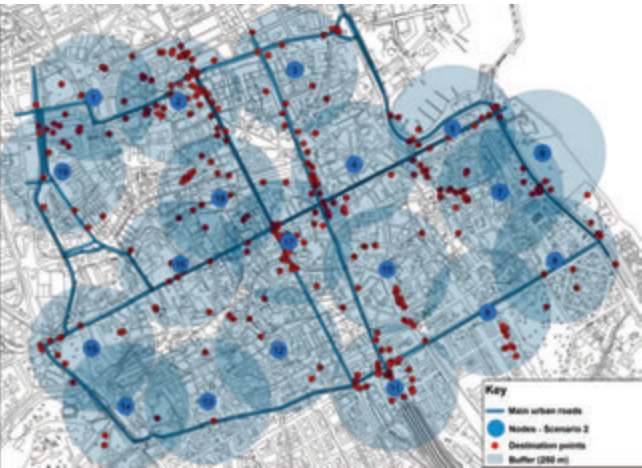


Fig. 6 - Scenario 2.
Fig. 6 - Scenario 2.

ito da 347 unità. Considerando lo split modale a favore della bicicletta nella città di Palermo (1,5%), la proiezione è stata effettuata assumendo i parametri riassunti in tabella 1.

Il risultato di questa fase progettuale rappresenta il numero di stalli per ogni nodo, in funzione della potenziale domanda che gli utenti della mobilità ciclistica possono esprimere area per area. Questo numero è variato da un massimo di 80 (Teatro Massimo) ad un minimo di 4 (Chiesa di San Francesco Saverio). La valutazione dei costi di realizzazione reali è stata effettuata ricorrendo ad un'indagine di mercato per comparare differenti tipologie costruttive. La soluzione che meglio si è ritenuto adattarsi al caso in questione risulta essere la "U invertita". Questa tipologia, che consente di parcheggiare due bici per elemento costruttivo, è caratterizzata da un costo unitario di costruzione e installazione prossimo ad 80 €.

Il costo totale, dato dal prodotto del costo unitario per il numero di stalli, è stato valutato pari a 33,000 €. La tabella 2 mostra il numero di stalli per nodo parcheggio e il relativo costo.

L'ultima fase della procedura svolta ha riguardato la terza ottimizzazione: a valle dell'analisi economica, un nuovo modello SCLP è stato implementato attribuendo un costo monetario ad ogni nodo incluso nell'insieme H. I 6 nodi con un numero di stalli maggiore di 20 (evidenziati in scuro nella tabella 2) sono da realizzarsi in ogni caso. Questa ottimizzazione ha restituito un insieme di 19 nodi e consente di ottenere un risparmio pari a 10.000 €. Il costo finale dell'intero progetto è stimato in 23.000 €.

La configurazione finale del sistema di nodi parcheggio (fig. 9) è venuta fuori dallo step dedicato ad un'analisi spaziale che ha consentito di localizzare in maniera ottimale alcuni dei 19 nodi trovati dai problemi di Ricerca Operativa in relazione alla disponibilità di spazio. Ulteriori considerazioni possono farsi relativamente alla



Fig. 7 - Scenario 1+2.
Fig. 7 - Scenario 1+2.

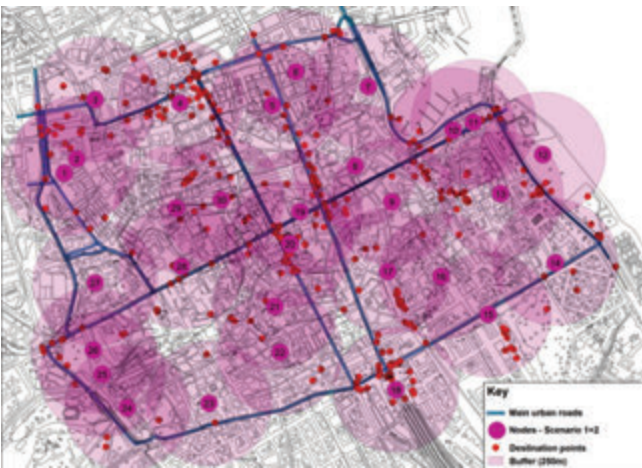


Fig. 8 - Analisi economica.
Fig. 8 - Cost analysis.

TABELLA 1 – TABELLA 1
DATI PER L'ANALISI ECONOMICA
DATASET FOR THE COST ANALYSIS

Popolazione Population	678.412
Share modale bici (2014) Bicycle modal share (2014)	1,5%
Numero medio di ciclisti Average number of bicycle users	10,176
Campione Survey sample	1,140
Campione (come percentuale di ciclisti) Sample as a percentage of the cyclists	8,93%
Spostamenti nell'ora di picco (percentuale) Peak hour movements (as a percentage)	67,9%
Massimo numero di stalli per parcheggio Maximum number of lots per station	80

bility of space. Further consideration could be made on the choice of the structural type (shelter, lot type etc.).



Fig. 9 - Configurazione final
Fig. 9 - Final configuration.

scelta della tipologia strutturale da adottare (pensilina, struttura ecc.).

4. Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro presentato in questo articolo è basato su una possibile soluzione per l'ottimizzazione della localizzazione di un insieme di infrastrutture di parcheggio per le biciclette in ambito urbano. L'applicazione della metodologia applicata al caso del centro storico della città di Palermo ha permesso di illustrare nel dettaglio i vari passi della stessa, al fine di ottenere la configurazione finale della rete. Va sottolineato che questo approccio è una proposta, che gli autori ritengono suscettibile di modifiche ed integrazioni al fine di trovare soluzioni ottimali per il miglioramento della mobilità urbana e, indirettamente, della qualità di vita del cittadino. Evidentemente la contestualizzazione della metodologia ad altri scenari deve tenere conto dei vincoli geografici e politico/amministrativi del caso. Il presente lavoro può essere esteso e approfondito, con la possibilità di:

- allargare l'applicazione all'intero centro abitato, considerando anche criteri di accessibilità differenti quali ad esempio la distanza dei nodi rispetto alle fermate del trasporto pubblico locale o la localizzazione delle residenze;
- integrare la metodologia con dati più dettagliati circa la domanda di mobilità ciclistica, approfondendo le indagini;
- applicare la metodologia anche al caso del bike-sharing, integrando i dati di input con indagini origine-destinazione e conducendo uno studio per indagare sul numero di mezzi disponibili durante le ore della giornata;
- effettuare analisi di intermodalità tra le componenti pedonale e ciclistica, anche per scopi turistici, applicando modelli di TSP (Traveling Salesman Problem) per individuare percorsi minimi che consentano agli utenti di visitare i POI o un sottoinsieme di essi e di ritornare al luogo di partenza.

TABELLA 2 – TABELLA 2

ANALISI ECONOMICA COST ANALYSIS SUMMARY

ID	Numero di "U invertite" Number of "inverted U"	Costo Cost	ID	Numero di "U invertite" Number of "inverted U"	Costo Cost
4	40	€ 3,200	16	12	€ 960
19	37	€ 2,960	21	11	€ 880
20	30	€ 2,400	29	11	€ 880
18	25	€ 2,000	12	11	€ 880
13	21	€ 1,680	11	9	€ 720
8	20	€ 1,600	28	9	€ 720
3	19	€ 1,520	26	8	€ 640
6	16	€ 1,280	25	7	€ 560
10	16	€ 1,280	15	7	€ 560
30	15	€ 1,200	14	6	€ 480
5	14	€ 1,120	22	5	€ 400
9	14	€ 1,120	7	4	€ 320
17	13	€ 1,040	27	4	€ 320
1	12	€ 960	24	3	€ 240
2	12	€ 960	23	2	€ 160
Costo totale - Total cost € 33.040					

4. Conclusions and further work

The work presented in this paper concerned a possible way for optimizing a network of bike stations. The application of the methodology to the old town in Palermo allowed explaining in detail all the steps to reach the final configuration. This approach is merely a proposal drawn up by the authors and can be extended or adjusted in order to find a better solution to improve the whole urban and mobility system. Clearly each application of this methodology must be carried out considering the case, the availability of space and the political/administrative constraints.

The proposed work can be deepened with the possibility to:

- extend the procedure to the entire city by integrating the methodology, considering other factors that influence the location as the distance from the cycle network and the possibility of modal shift with the alternatives proposed by the public transport;
- integrating the methodology with more detailed data about the demand arising from the instruments of statistics;
- apply the proposed procedure also to the case of bike-sharing by integrating the input data with an investigation on the origin as well as on the destination of the single displacements and also by performing a study on the balance of the number of bicycles available for each station during the different hours of a day;
- perform an analysis of pedestrian and cycle paths connecting with the points of attractors and between the nodes themselves, through models as the Traveling Salesman Problem.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] G. RYBARCZYK, C. WU, "Bicycle facility planning using GIS and multi-criteria decision analysis", *Applied Geography*, 30, 282-293, 2010.
- [2] J.C. GARCÍA-PALOMARES, J. GUTIÉRREZ, M. LATORRE, "Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach", *Applied Geography*, Volume 35, Issues 1-2, 235-246, 2012.
- [3] M. GHANDEHARI, V. HAMIDI POUYANDEH, M.H. MOSHREF JAVADI, "Locating of Bicycle Stations in the City of Isfahan Using Mathematical Programming and Multi-Criteria Decision Making Techniques", *International Journal of Academic Research in Accounting, Finance and Management Sciences*, Vol. 3, No.4, pp. 18-26, 2013.
- [4] G.K.D. SAHARIDIS, A. FRAGKOGIOS, E. ZYGOURI, "A Multi-Periodic Optimization Modeling Approach for the Establishment of a Bike Sharing Network: a Case Study of the City of Athens", in *Proc. of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2014*, Vol. II, 2014.
- [5] L. HU, Fuzzy Comprehensive Evaluation in Site Selection of Public Bicycle Stations Based on AHP Method, 2010.
- [6] Z. YING, H. ZHENG DONG, Performance Evaluation of Bike Sharing System in Wuchang Area of Wuhan, China, 2012.
- [7] L.M. MARTINEZ, L. CAETANO, T. EIRÓ, F. CRUZ, "An optimisation algorithm to establish the location of stations of a mixed fleet biking system: an application to the city of Lisbon", in *EWGT 2012 Proc.*, 2012.
- [8] J. CURRENT, M. DASKIN, D. SCHILLING, "Discrete Network Location Models", *Facility Location: Applications and Theory*, 2001.
- [9] R. CHURCH, C. REVELLE, The maximal covering location problem, 1971.

Sommaire

LOCALISATION OPTIMUM DES SUPPORTS POUR LE PARKING DES VÉLOS: LE CAS D'ÉTUDE DE LA VILLE DE PALERME

La carence d'emplacements pour le parking des vélos en ville est un des problèmes principaux qui affligent les villes italiennes. Une correcte planification du réseau de parkings pour vélos est donc nécessaire afin d'optimiser le système entier de mobilité urbaine ainsi que l'offre de transport. Cet article propose une analyse étape par étape pour la recherche de la localisation optimum des supports pour le parking des vélos à l'intérieur du centre ville historique de Palerme. La méthodologie d'optimisation se base sur l'emploi de modèles de "Set Covering Location Problem" (SCLP) et de "Maximum Coverage Location Problem" (MCLP). Les données utiles pour les simulations ont été acquises à travers des investigations directes et indirectes sur la population des cyclistes qui utilisent un logiciel "GIS open source" (OGIS). En particulier, les informations sur les destinations, sur les temps et sur les distances parcourues par les cyclistes ont été récoltées. Comme dernière étape, une analyse coûts - bénéfices a été réalisée après un dimensionnement sommaire des supports à vélos. La méthodologie proposée peut être généralisée et contextualisée à d'autres scénarios sans perte de généralité, et elle peut aussi être utilisée dans la phase d'évaluation à posteriori de l'efficacité des solutions et des réseaux déjà disponibles.

Zusammenfassung

OPTIMALE LOKALISIERUNG DER PARKSITZEN FÜR FAHRER. STUDIENFALL PALERMO

Der Raummangel an Fahrradparksitzen ist für italienischen Städten ein bemerkenswertes Problem. Es ist dann notwendig ein Fahrradsitzparkplan um das ganze Beweglichkeit- und Transportsystem zu optimieren. Hier wird ein Verfahren zur optimalen Lokalisierung der Fahrradparkplätze im Stadtzentrum von Palermo vorgestellt. Das Verfahren benutzt einige Modellen wie "Set Covering Location Problem" (SCLP), "Maximum Coverage Location Problem" (MCLP) und GIS (OGIS). Die Simulation-Daten wurde aus gezielten Befragungen der Bevölkerung und Fabrikbesitzer gewonnen. Zum Schluss wurde eine Kosten-Nutzen Analyse einer annähernden Sitz park Planung gezeigt. Das ganze Verfahren kann in verschiedenen Fällen und Bedingungen brauchbar sein, ohne Verlust an Verallgemeinerung, z.B. für existierende Anlage.