



## L'analisi delle variabili di progetto nel processo di ottimizzazione del trinomio mobilità-economia-ambiente: l'impatto acustico nel caso ferroviario

### *Analysis of project variables in the process of optimising the mobility-economy-environment trinomial: the acoustic impact in the railway case*

Fabio FONTE<sup>(\*)</sup>  
 Sabrina LO BOSCO<sup>(\*\*)</sup>  
 Roberto PAGONE<sup>(\*\*\*)</sup>  
 Federica SURACI<sup>(\*\*\*\*)</sup>

**Sommario** - Un investimento pubblico nel settore delle reti di mobilità richiede la valutazione dello scenario completo *ante e post operam* ed una rigorosa analisi comparativa delle possibili alternative. Sulla base di appropriati indicatori tecnici, economici ed eco-sistemici, il project manager potrà definire con il team di progetto, quella particolare soluzione che massimizza i risultati dello scenario di vita utile dell'opera o, più in generale, del programma di interventi in studio. Nel presente lavoro, mediante l'analisi delle variabili si costruiscono apposite funzioni matematiche utili alla risoluzione del problema, ottimizzando il trinomio mobilità-economia-ambiente. Inoltre, vengono proposti degli abachi per realizzare opere a verde per la minimizzazione degli impatti infrastruttura-territorio, costruiti sulla base di uno studio eco-fito-sociologico. Tale strumento è utile per integrare l'infrastruttura nel paesaggio e per contrastare l'inquinamento acustico dovuto all'esercizio. Infine, è stata proposta un'apposita metodologia econometrica degli effetti negativi generati dal flusso dei veicoli ferroviari nell'area vasta, attraverso il calcolo della perdita del valore economico dei beni immobili ivi ricadenti; ciò al fine di internalizzare tale deficit nell'analisi benefici-costi per ciascuna soluzione alternativa esaminata in fase di progettazione.

**Summary** - A public investment in the mobility network sector requires the evaluation of the complete scenario before and after work and a rigorous comparative analysis of possible alternatives. On the basis of appropriate technical, economic and eco-systemic indicators, the project manager will be able to define that particular solution with the project team that maximises the results of the useful life scenario of the work or, more generally, of the interventions programme under study. Appropriate mathematical functions are built in this work through the analysis of variables, useful for solving the problem, optimising the mobility-economy-environment trinomial. In addition, schedules are proposed to create green works to minimise infrastructure-territory impacts, built on the basis of an eco-phytosociological study. This tool is useful for integrating the infrastructure into the landscape and for fighting noise pollution due to operation. Finally, a specific econometric methodology of the negative effects generated by the flow of railway vehicles in the vast area was proposed, through the calculation of the loss of the economic value of the immovable property falling therein; this in order to internalise this deficit in the benefit-cost analysis for each alternative solution examined in the design phase.

<sup>(\*)</sup> Ph.D. in Costruzione di Strade, Ferrovie ed Aeroporti.

<sup>(\*\*)</sup> Dottore in Economia Aziendale, Master in Gestione delle imprese e delle società.

<sup>(\*\*\*)</sup> Direttore Direzione Programmi Investimenti Direttrice Sud - Rete Ferroviaria Italiana SpA.

<sup>(\*\*\*\*)</sup> Dottoranda e Cultore della materia SSD "Strade, Ferrovie, Aeroporti" - Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria.

Gli autori hanno contribuito ugualmente alla stesura del presente lavoro.

<sup>(\*)</sup> Ph.D. in Construction of Roads, Railways and Airports.

<sup>(\*\*)</sup> Doctor of Business Economics, Master in Business and Company Management.

<sup>(\*\*\*)</sup> Director of Directorate for Investment Programmes for Southern Line - Rete Ferroviaria Italiana S.p.A.

<sup>(\*\*\*\*)</sup> PhD student and lecturer in the SSD "Roads, Railways, Airports" subject area - Mediterranean University Reggio Calabria.

The authors have equally contributed to the writing of this work.

## 1. La ricerca dell'alternativa ottima di progetto attraverso le funzioni multi-obiettivo

La pianificazione degli investimenti infrastrutturali e, più in generale, il complesso delle politiche di efficientamento dei servizi di trasporto di persone e merci hanno oggi più che mai un'importanza fondamentale per accelerare i processi di crescita socioeconomica delle macroaree di pertinenza, contribuendo a migliorare la qualità dell'offerta, la sicurezza ed a contenere l'impatto ambientale.

Con una domanda di mobilità in continua crescita, alcuni fattori quali la forte congestione, la scarsa qualità dell'aria, il rumore e le emissioni di inquinanti in atmosfera portano a dovere affrontare sfide cruciali per la società di oggi. Proprio per questo motivo, ad esempio, la Banca Europea degli Investimenti (BEI) ha promosso negli ultimi anni progetti eco-sostenibili nel settore dei trasporti, al fine di migliorare la qualità della vita ed incentivare uno sviluppo urbano ad impatto zero. Costruire, ampliare o riqualificare le infrastrutture di trasporto, investire nei veicoli a carburante alternativo e incoraggiare la creazione di reti di piste ciclabili e pedonali, progettare sistemi di gestione del traffico e di informazione *smart* per l'utenza, incentivare l'uso di sistemi di trasporto efficienti sul piano energetico, sono solo alcune delle possibili azioni per ottimizzare il legame esistente tra clima, sviluppo sostenibile e infrastrutture per contribuire agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (OSS) dell'UE [1]. In coerenza con tali linee-guida di pianificazione strategica degli interventi che competono ai diversi centri di spesa (opere pubbliche, servizio di trasporto pubblico collettivo, etc.), dal punto di vista operativo il relativo coordinamento dei lavori ed il controllo di attuazione rappresentano gli strumenti fondamentali per assicurare l'ottimizzazione del risultato complessivo a favore della collettività. Seguendo tale impostazione, nella moderna analisi sistematica di opere complesse, al fine di ottimizzare gli standard globali dei progetti e dei piani di investimento per l'intero ciclo di vita utile dell'infrastruttura, occorre analizzare una serie di variabili atte a descrivere compiutamente le differenti fasi di avvio delle attività, della costruzione e della gestione operativa fino alla dismissione o il rinnovo dell'opera. Inoltre, particolare cura si dovrà avere nella valutazione delle interferenze di contesto (sito ed area vasta) che l'azione programmata genererà non solo nei settori economici e produttivi direttamente o indirettamente interessati, ma anche nell'indotto durante l'intero periodo di vita utile dell'intervento. Fase fondamentale dell'analisi, successiva alla scelta degli obiettivi di progetto, è l'individuazione dei fattori di rischio relativi all'utente, all'ambiente ed al sistema veicolo-infrastruttura (nelle Tabelle 1 e 2 sono riportati rispettivamente quelli per un'infrastruttura ferroviaria e per una stradale).

Per garantire la sicurezza d'esercizio, occorre calcolare per ogni evento correlato alla realizzazione dell'opera il fattore di rischio  $\rho_i$  (con  $i = 1, \dots, n$ ) associato alla particolare opzione progettuale in studio fra le  $n$  poste a confronto, attraverso la valutazione specifica delle probabilità di

## 1. The search for the optimal design alternative through multi-objective functions

*The planning of infrastructure investments and, more generally, the complex of policies to improve the efficiency of transport services for people and goods today more than ever have a fundamental importance to accelerate the processes of socio-economic growth of the relevant macro-areas, helping to improve the quality of the offer, safety and to limit environmental impact.*

*With a growing demand for mobility, some factors such as heavy congestion, poor air quality, noise and emissions of pollutants into the atmosphere lead to having to face crucial challenges for today's society. Precisely for this reason, for example, the European Investment Bank (EIB) promoted eco-sustainable projects in the transport sector in recent years, in order to improve the quality of life and encourage urban development with zero impact. Building, expanding or upgrading transport infrastructures, investing in alternative fuel vehicles and encouraging the creation of cycle and pedestrian paths, designing traffic management and smart information systems for users, encouraging the use of energy-efficient transport are just some of the possible actions to optimise the link between climate, sustainable development and infrastructure to contribute to the EU Sustainable Development Goals (SDGs) [1]. Consistent with these strategic planning guidelines for the interventions that are the responsibility of the different cost centres (public works, collective public transport service, etc.), from an operational point of view the relative coordination of the works and the implementation control represent the fundamental tools to ensure optimisation of the overall result in favour of the community. Following this approach, in the modern systematic analysis of complex works, a series of variables apt to fully describe the different start-up phases of activities, construction and operational management up to the disposal or renewal of the work must be analysed in order to optimise the global standards of projects and investment plans for the entire useful life cycle of the infrastructure. Furthermore, particular care must be taken in the evaluation of contextual interference (site and vast area) that the planned action will generate not only in the economic and productive sectors directly or indirectly affected, but also in satellite activities during the entire useful life period of the intervention. A fundamental phase of the analysis, following the choice of the project objectives, is the identification of the risk factors relating to the user, the environment and the vehicle-infrastructure system (Tables 1 and 2 respectively show those for a railway and for a road infrastructure).*

*To guarantee operational safety, the risk factor  $\rho_i$  (with  $i = 1, \dots, n$ ) must be calculated for every event related to the implementation of the work associated with the particular project option under study among the  $n$  compared, through the specific assessment of the probability of occurrence ( $p_i$ ) and the severity of the events ( $g_i$ ) that for the work under study may occur in the entire useful life period  $[0, \dots, N]$ , as well as to the specific vulnerability ( $v_i$ ) of the site and the wide area concerned. In this sense, the degree of risk  $\vec{R}$  associated with the alternative under consideration can also be defined, pro-*

Tabella 1 – Table 1

Fattori di rischio per il comfort e la sicurezza d'esercizio per una infrastruttura ferroviaria  
*Risk factors for comfort and operational safety for a railway infrastructure*

| <b>Uomo</b><br><i>Mankind</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Ambiente</b><br><i>Environment</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>Sistema veicolo – infrastruttura</b><br><i>Vehicle - infrastructure system</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Conducente</b><br><i>Driver</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>Condizioni atmosferiche avverse</b><br><i>Adverse weather</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Carenze attribuibili ad opere tecnologiche ad apparati di linea e di stazione</b><br><i>Shortcomings attributable to technological works on line and station equipment</i>                                                                                                                                                                                                                           |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Problemi psico-fisici e/o errate valutazioni nella marcia;</li> <li>– Inosservanza dei segnali, di limitazioni o prescrizioni, etc.;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Psycho-physical problems and/or incorrect evaluations during operation;</i></li> <li>– <i>Non-observance of signals, limitations or prescriptions, etc.;</i></li> <li>– ...</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Neve, gelo, turbolenze, nebbia, etc.;</li> <li>– Escursioni termiche eccessive;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Snow, frost, turbulence, fog, etc.;</i></li> <li>– <i>Excessive thermal leaps;</i></li> <li>– ...</li> </ul>                                                                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Anomalie tecnologiche degli impianti fissi;</li> <li>– Inadeguatezza del materiale rotabile rispetto alle condizioni tipologiche della linea;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Technological anomalies of fixed installations;</i></li> <li>– <i>Inadequacy of rolling stock with respect to the typological conditions of the line;</i></li> <li>– ...</li> </ul> |
| <b>Personale addetto ed operatori</b><br><i>Staff and operators</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Eventi calamitosi ed altri imprevisti</b><br><i>Disasters and other unforeseen events</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>Dissesti ed ammaloramenti del corpo stradale</b><br><i>Disruptions and deterioration of the road</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Deficit manutentivi;</li> <li>– Carenza nelle procedure di esercizio ed operazioni connesse (inosservanza di norme, regolamenti, etc.);</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Maintenance deficits;</i></li> <li>– <i>Lack of operating procedures and related operations (failure to comply with rules, regulations, etc.);</i></li> <li>– ...</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Movimenti tellurici, smottamenti di terreno, frane, caduta di massi, etc.;</li> <li>– Presenza di ostacoli sulla linea, anche a seguito di raffiche di vento o di trombe d'aria, etc.;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Earthquakes, landslides, landfalls, falling rocks, etc.;</i></li> <li>– <i>Presence of obstacles on the line, also due to gusts of wind or tornadoes, etc.;</i></li> <li>– ...</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Problemi connessi alle tipologie costruttive dei manufatti, etc.;</li> <li>– Carenza di apposito protocollo manutentivo, etc.;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Problems related to the constructive typologies of the artefacts, etc.;</i></li> <li>– <i>Lack of a special maintenance protocol, etc.;</i></li> <li>– ...</li> </ul>                              |
| <b>Passeggeri</b><br><i>Passengers</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>Incendi nel territorio interessato ed altre cause esterne</b><br><i>Fires in the area concerned and other external causes</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Problemi di funzionamento degli equipaggiamenti fissi e mobili</b><br><i>Fixed and mobile equipment operation problems</i>                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Conseguenze derivanti da imprudenze, sabotaggi, etc.;</li> <li>– Trasporto di sostanze pericolose;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Consequences of imprudence, sabotage, etc.;</i></li> <li>– <i>Transport of dangerous substances;</i></li> <li>– ...</li> </ul>                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Vulnerabilità specifiche del territorio, etc.;</li> <li>– Pedologia e gestione agronomica dei suoli, etc.;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Specific vulnerabilities of the territory, etc.;</i></li> <li>– <i>Soil pedology and agronomic management, etc.;</i></li> <li>– ...</li> </ul>                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Deficit del materiale rotabile;</li> <li>– Affidabilità dei componenti del sistema di equipaggiamento e segnalamento per i distanziatori di linea, etc.;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Rolling stock deficit;</i></li> <li>– <i>Reliability of the components of the equipment and signalling system for the line spacers, etc.;</i></li> <li>– ...</li> </ul>  |

accadimento ( $p_i$ ) e della gravità degli eventi ( $g_i$ ) che per l'opera in studio possono verificarsi nell'intero periodo di vita utile  $[0, ..., N]$ , nonché alla specifica vulnerabilità ( $v_i$ ) del sito e dell'area vasta interessati. In tal senso, risulta anche definibile il grado di rischio  $\vec{R}$  associato all'alternativa in esame, fornito dall'espressione sotto riportata, costituita dai vettori colonna di ordine  $n$  di probabilità, gravità e vulnerabilità:

$$\vec{R} = \vec{P} \cdot \vec{G} \cdot \vec{V} \quad (1)$$

vided by the expression below, consisting of the vectors of order  $n$  of probability, gravity and vulnerability:

$$\vec{R} = \vec{P} \cdot \vec{G} \cdot \vec{V} \quad (1)$$

It will thus be possible to fully analyse every aspect of the problem and assess the relative levels of admissible risk on a case-by-case basis and the related measures designed to bring the calculated risk back within specific tolerable combinations of the probability-size combination of damage.

Tabella 2 – Table 2

Fattori di rischio per il comfort di marcia e la sicurezza d'esercizio per un'infrastruttura stradale  
*Risk factors for operation comfort and operational safety for a road infrastructure*

| <b>Uomo</b><br><i>Mankind</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>Ambiente</b><br><i>Environment</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Sistema veicolo – infrastruttura</b><br><i>Vehicle - infrastructure system</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Conducente</b><br><i>Driver</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>Condizioni atmosferiche avverse</b><br><i>Adverse weather</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>Deficit dell'infrastruttura</b><br><i>Infrastructure deficit</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Comportamenti a rischio, eccessiva velocità di guida, etc.;</li> <li>– Ridotte capacità psico-fisiche per stress, assunzione di alcolici, etc.;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Risk behaviours, excessive driving speed, etc.;</i></li> <li>– <i>Reduced psycho-physical abilities due to stress, alcohol intake, etc.;</i></li> <li>– ...</li> </ul>                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Presenza di pioggia, di neve, di gelo, di ghiaccio, ovvero di turbolenze, nebbia, etc.;</li> <li>– Escursioni termiche eccessive;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Presence of rain, snow, frost, ice, or turbulence, fog, etc.;</i></li> <li>– <i>Excessive thermal leaps;</i></li> <li>– ...</li> </ul>                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Caratteristiche funzionali inadeguate alle prestazioni richieste (aderenza, visibilità, tortuosità, pendenze);</li> <li>– Funzionalità ed efficienza in esercizio della pavimentazione (portanza, regolarità e rugosità);</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Functional characteristics inadequate for the required performance (grip, visibility, windingness, slopes);</i></li> <li>– <i>Functionality and efficiency of the paving during operation (carrying capacity, regularity and roughness);</i></li> <li>– ...</li> </ul> |
| <b>Enti gestori preposti ed operatori</b><br><i>Managing agencies in charge and operators</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>Eventi calamitosi ed altri imprevisti</b><br><i>Disasters and other unforeseen events</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Problemi di efficienza del veicolo</b><br><i>Vehicle efficiency problems</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Mancata o carente definizione di regolamenti per l'esercizio e/o di controllo della circolazione;</li> <li>– Carenza nelle politiche di controllo della domanda e nel protocollo di informazione per l'utenza;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Failure or deficient definition of regulations for the exercise and/or control of circulation; Lack in demand control policies and in the information protocol for users;</i></li> <li>– ...</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Dissesti idrogeologici del territorio, smottamenti di terreno, frane, caduta massi, etc.;</li> <li>– Movimenti tellurici;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Hydrogeological instability of the territory, landslides, landfalls, rock falls, etc.;</i></li> <li>– <i>Earthquakes;</i></li> <li>– ...</li> </ul>                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Condizione e qualità degli pneumatici;</li> <li>– Funzionalità ed efficacia dell'impianto frenante;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Condition and quality of tires; Functionality and effectiveness of the braking system;</i></li> <li>– ...</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Passeggeri</b><br><i>Passengers</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Incendi ed altre cause esterne</b><br><i>Fires and other external causes</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Carenze attribuibili alla segnaletica</b><br><i>Deficiencies attributable to signage</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Imprudenza durante la marcia;</li> <li>– Distrazioni del conducente, etc.;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Imprudence during operation;</i></li> <li>– <i>Driver distractions, etc.;</i></li> <li>– ...</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Elementi di rischio di incendio, specifica vulnerabilità del territorio;</li> <li>– Pedologia, gestione agronomica dei suoli ed intrusioni di fauna selvatica;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Elements of fire risk, specific vulnerability of the territory;</i></li> <li>– <i>Pedology, agronomic management of soils and wildlife intrusions;</i></li> <li>– ...</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Leggibilità della segnaletica;</li> <li>– Carenza nella gestione e nel controllo dell'efficienza e problemi di manutenzione della segnaletica;</li> <li>– ...</li> <li>– <i>Legibility of signage;</i></li> <li>– <i>Lack of management and efficiency control and signage maintenance problems;</i></li> <li>– ...</li> </ul>                                                                                                                                                                                                |

Sarà così possibile analizzare compiutamente ogni aspetto del problema e valutare caso per caso i relativi livelli di rischio ammissibile ed i correlati accorgimenti atti a ricondurre il rischio calcolato entro apposite combinazioni tollerabili del binomio probabilità-dimensione del danno.

Ai fini dell'ottimizzazione dei progetti di investimento, occorre sempre analizzare, tramite il processo di LCCA – Life Cycle Cost Analysis, i costi generati sull'utente

*For the purpose of optimising investment projects, it is always necessary to analyse the costs generated on the user and on the territory (environment, socio-economic structure, market, etc.) through the LCCA process - Life Cycle Cost Analysis and actualise the future ones at the time of the analysis, with the inevitable consequence of the need to proceed to the comparative evaluation of different possible implementation scenarios, in order to identify the optimal solution, through the analysis of different classes of both deterministic and probabilistic variables. Fig.1 shows a typical systematic analysis process as an example.*



e sul territorio (ambiente, struttura socio-economica, mercato, etc.) ed attualizzare quelli futuri al momento dell'analisi, con l'inevitabile conseguenza della necessità di procedere, mediante l'analisi di diverse classi di variabili di tipo sia deterministico che probabilistico, alla valutazione comparativa di diversi scenari possibili di attuazione, al fine di individuare la soluzione ottima. In Fig.1, è riportato a titolo d'esempio un tipico processo di analisi sistematica.

In base a tale approccio metodologico, qualunque sia il caso dell'investimento preso in esame dall'équipe multidisciplinare di studio (direzione societaria dedicata, economisti, ingegneri e tecnici di settore, etc.), a ciascuna alternativa compatibile analizzata potrà essere associato un apposito indicatore di utilità  $U_{g,i}$  che esprima, per l'intero sistema di variabili considerato, l'utilità globale relativa per la  $i$ -esima opzione in esame [2]. Tramite tale indicatore, generato dai flussi di utilità attualizzati<sup>(1)</sup> e di disutilità (fattori ambientali, finanziari, etc.) associati alla  $i$ -esima specifica alternativa progettuale esaminata  $a_i$  e rapportati all'ipotesi neutra (non intervento), potrà essere effettuato un opportuno confronto fra le diverse  $n$  soluzioni ( $a_n$ ). Tra le variabili che caratterizzano  $U_{g,i}$ , viene di seguito riportato il rapporto benefici equivalenti/costi equivalenti  $R_{b,c}$  esprimibile come:

$$R_{b,c} = \frac{\sum b_i(t) \left[ \frac{1}{(1+r)^t} \right]}{\sum c_i(t) \left[ \frac{1}{(1+r)^t} \right]} \pm V_{in} \left[ \frac{1}{(1+r)^N} \right] \quad (2)$$

con  $i = 1, \dots, n$ ;  $t = 1, \dots, N$ ; dove  $b_i(t)$  sono i benefici della  $i$ -esima alternativa all'anno  $t$ ,  $c_i(t)$  sono i costi della  $i$ -esima alternativa all'anno  $t$ ,  $N$  è la vita utile dell'opera,  $V_{in}$  è il valore iniziale del bene,  $r$  è il tasso di sconto e  $(1+r)^t$  il fattore di sconto. Nella formula (2) con  $V_{in} \left( \frac{1}{(1+r)^N} \right)$  si indica il valore residuo del bene oggetto dell'investimento (o somma dei beni necessari per realizzare l'opera pubblica in esame) al termine della sua vita utile (stimata pari a  $N$  anni), esso potrà essere positivo (vendita e/o reimpiego nel ciclo produttivo) oppure negativo (costo di dismissione). Un'alternativa si giudica conveniente quando  $R_{b,c}$  risulta maggiore di 1 [3].

È evidente che il sistema di variabili da esaminare per la ricerca della migliore soluzione progettuale con il valore più alto di  $U_g$ , dovrà essere prescelto in modo da riuscire a descrivere e valutare compiutamente lo scenario caratterizzante le differenti fasi dell'opera (sintetizzabili in

*Based on this methodological approach, whatever the case of the investment examined by the multidisciplinary study team (dedicated company management, economists, engineers and technicians, etc.), each compatible alternative analysed can be associated with a specific utility indicator  $U_{g,i}$  which expresses the relative global utility for the  $i$ -eth option in question [2], for the entire system of variables considered. Through this indicator, generated by discounted utility flows<sup>(1)</sup> and disutility (environmental, financial, factors etc.) associated with the  $i$ -eth alternative design solution examined  $a_i$  and compared to the neutral hypothesis (non-intervention), an appropriate comparison between the different  $n$  solutions ( $a_n$ ) can be made. Among the variables that characterise  $U_{g,i}$  the equivalent benefit/equivalent cost ratio  $R_{b,c}$  is shown below, which can be expressed as:*

$$R_{b,c} = \frac{\sum b_i(t) \left[ \frac{1}{(1+r)^t} \right]}{\sum c_i(t) \left[ \frac{1}{(1+r)^t} \right]} \pm V_{in} \left[ \frac{1}{(1+r)^N} \right] \quad (2)$$

*with  $i = 1, \dots, n$ ;  $t = 1, \dots, N$ ; where  $b_i(t)$  are the benefits of the  $i$ -eth alternative to the year  $t$ ,  $c_i(t)$  are the costs of the  $i$ -eth alternative to the year  $t$ ,  $N$  is the useful life of the work,  $V_{in}$  is the initial value of the asset,  $r$  is the discount rate and  $(1+r)^t$  the discount factor. In formula (2) with  $V_{in} \left( \frac{1}{(1+r)^N} \right)$ , the residual value of the asset to which the investment refers (or the sum of the assets needed to carry out the public works in question) is indicated at the end of its useful life (estimated to be  $N$  years), it may be positive (sale and/or re-use in the production cycle) or negative (cost of disposal). An alternative is considered convenient when  $R_{b,c}$  is greater than 1 [3].*

*It is evident that the system of variables to be examined for the search for the best design solution with the highest value of  $U_g$ , must be chosen in order to be able to describe and fully evaluate the scenario characterising the different phases of the work (which can be summarised in site, operation and renewal or disposal phases of the asset itself). To represent this system, one can resort to a mathematical interpretation of the problem, using multi-objective functions  $S_m(x^{-w_m})$  built through the multiple variables  $x$  (also of a random nature) each characterised by its relative weight  $w_m$ , analysed in the evaluation of the project alternatives  $a_n$  achieving:*

$$a_i = \{S1(x^{-w_1}), \dots, Si(x^{-w_i}), \dots, Sm(x^{-w_m})\} \quad (3)$$

*with*

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (4)$$

<sup>(1)</sup> In particolare, nel caso di effetti indotti su talune risorse ecosistemiche non risulta possibile fare riferimento all'usuale indicatore di scarsità e di utilità rappresentato dal prezzo di mercato; inoltre, nel caso di impatti (positivi o negativi) permanenti non è neanche applicabile il criterio classico dell'attualizzazione, basato sul ricorso alla nota formula dell'interesse composto  $\left[ \frac{1}{(1+r)^N} \right]$ , con  $r$  = tasso di sconto e  $N$  = periodo di vita utile. In tali circostanze, sarà pertanto necessario ricorrere ad appositi criteri "suppletivi del mercato", fondati sulle diverse teorie per il calcolo delle "esternalità".

<sup>(1)</sup> In particular, in the case of effects induced on certain ecosystem resources it is not possible to refer to the usual indicator of scarcity and utility represented by the market price; furthermore, in the case of permanent (positive or negative) impacts, the classic discounting criterion based on recourse to the known compound interest formula is also not applicable  $\left[ \frac{1}{(1+r)^N} \right]$ , with  $r$  = discount rate and  $N$  = useful life period. In such circumstances, it will therefore be necessary to resort to specific "market substitute" criteria, based on the various theories for calculating "externalities".



Fig. 1 – Processo di analisi sistematica.  
Fig. 1 – Systematic analysis process.

fasi di cantiere, d'esercizio e di rinnovo o dismissione del bene stesso). Per rappresentare tale sistema, si può fare ricorso ad un'interpretazione matematica del problema, utilizzando  $m$  funzioni multiobiettivo  $S_m(x^{-w_m})$  costruite attraverso le molteplici variabili  $x$  (anche di natura aleatoria) caratterizzate ciascuna dal relativo peso  $w_m$ , analizzate nella valutazione delle alternative di progetto  $a_n$ , pervenendo a:

$$a_i = \{S_1(x^{-w_1}), \dots, S_i(x^{-w_i}), \dots, S_m(x^{-w_m})\} \quad (3)$$

con

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (4)$$

Alla  $i$ -esima soluzione alternativa  $a_i$  (fra tutte le quelle possibili, per  $i=1, \dots, n$ , rispettose dei diversi vincoli tecnici, economici ed ambientali, si può anche associare il grado di soddisfazione  $G(a_i)$  del cittadino interessato (come soggetto passivo o come utente), pervenendo alla seguente relazione matematica generale:

$$(a_i) = \min_{i=1, \dots, m} \{S_1(x^{-w_1}) \cdot p_1, \dots, S_i(x^{-w_i}) \cdot p_i, \dots, S_m(x^{-w_m}) \cdot p_m\} \cdot \rho_i \quad (5)$$

dove  $p_i$  è la probabilità di accadimento e  $\rho$  è il suddetto fattore di rischio connesso alle variazioni (positive e negative) generate nel territorio di pertinenza dell'opera.

Infine, seguendo tale approccio metodologico, risulta anche possibile individuare l'alternativa ottima secondo il grado di soddisfazione, indicando con  $a_*$  quella le  $n$  analizzate corrispondente all'argomento<sup>(2)</sup> di  $G(a_i)$ :

$$a_* = \arg \left\{ \max_{i=1, \dots, n} [G(a_i)] \right\} \quad (6)$$

Nonostante la presenza di numerosi modelli di aiuto decisionali stabiliti, il problema dell'analisi di un investimento nel settore della mobilità, a causa della molteplicità di variabili che intervengono per la sua ottimizzazione, deve essere sempre inquadrato, per le scelte finali che competono al decisore pubblico, in termini multicriteriali definendo le funzioni multiobiettivo caratteristiche di ordine tecnico, economico ed ambientale. In definitiva, la soluzione ottima di progetto sarà quella che nello scenario temporale analizzato, avrà il massimo valore di  $U_g$ , cioè di utilità globale, per l'intero sistema di variabili considerato.

## 2. La valutazione delle esternalità nel binomio infrastruttura-ambiente

La crescente domanda di mobilità di persone e merci che caratterizza le società ad economia avanzata, così come la consapevolezza della necessità di tutelare l'ambiente e la qualità della vita nelle aree urbane e metropolitane, hanno sempre più posto in evidenza nell'agenda politica europea e dei singoli Stati membri. Fondamentale, perciò,

*The  $i$ -eth alternative solution  $a_i$  (among all those possible, for  $i=1, \dots, n$ , respecting the different technical, economic and environmental constraints, it is also possible to associate the degree of satisfaction  $G(a_i)$  of the concerned citizen (as a taxable person or as a user), obtaining the following general mathematical relation:*

$$G(a_i) = \min_{i=1, \dots, m} \{S_1(x^{-w_1}) \cdot p_1, \dots, S_i(x^{-w_i}) \cdot p_i, \dots, S_m(x^{-w_m}) \cdot p_m\} \cdot \rho_i \quad (5)$$

*where  $p_i$  is the probability of occurrence and  $\rho$  is the aforementioned risk factor connected to the variations (positive and negative) generated in the territory pertaining to the work.*

*Finally, following this methodological approach, it is also possible to identify the optimal alternative according to the degree of satisfaction, indicating with  $a_*$  that the  $n$  analysed corresponding to the topic<sup>(2)</sup> of  $(a_i)$ :*

$$a_* = \arg \left\{ \max_{i=1, \dots, n} [G(a_i)] \right\} \quad (6)$$

*Despite the presence of numerous established decision-making aid models, the problem of analysing an investment in the mobility sector, due to the multiplicity of variables that intervene for its optimisation, must always be framed, for the final choices that compete with the public decision maker, in multi-criteria terms, defining multi-purpose functions that are technical, economic and environmental. Ultimately, the optimal solution of the project will be the one that in the time scenario analysed, will have the maximum  $U_g$  value, i.e. of global utility, for the whole system of variables considered.*

## 2. Evaluation of externalities in the infrastructure-environment combination

*The growing demand for mobility of people and goods that characterises advanced economy societies, as well as the awareness of the need to protect the environment and the quality of life in urban and metropolitan areas, have increasingly been highlighted in the European political agenda and of individual Member States. The ex ante evaluation of the effects generated by each infrastructure investment, both in the socio-economic and productive system and in the ecosystem, is fundamental, in order to guarantee optimal planning of the interventions<sup>(3)</sup>.*

<sup>(2)</sup> Mathematical attribute characterising the values assumed by the independent variable of the particular function considered.

<sup>(3)</sup> Depending on the extent of the time period considered and the consistency of the planned investments and independently of the territorial areas involved, we can also distinguish between strategic planning, extended over a long period of time and characterised by a significant incidence of the necessary investments; tactical planning, according to strategic planning but in the medium or short term with a limited investment commitment; operational planning, also referring to a long period of time but related to the best use of the existing means, this activity is the responsibility of the local authorities and of the participated companies and that sees the central political level however interested in issuing general containment norms of spending.

<sup>(2)</sup> Attributo matematico caratterizzante i valori assunti dalla variabile indipendente della particolare funzione considerata.



è la valutazione *ex ante* degli effetti generati da ogni investimento infrastrutturale, sia nel sistema socioeconomico e produttivo sia in quello ecosistemico, al fine di garantire un'ottimale pianificazione degli interventi<sup>(3)</sup>.

La rilevanza che ha assunto la questione ha portato ad una maggiore attenzione degli studiosi del settore verso l'analisi delle esternalità, cioè degli effetti che si producono quando un soggetto economico (pubblico o privato) compie un'azione che ha effetti sul benessere di altri consumatori, i quali li subiscono o ne beneficiano involontariamente, e per i quali tale soggetto non paga né riceve alcun compenso. In tale contesto, particolare interesse assume l'esame *ante-operam* delle utilità e dei costi globali generati dall'intervento programmato ad un primo livello decisionale di politica economica, effettuando, già nell'analisi di fattibilità, la contabilizzazione nel quadro economico generale anche dei costi esterni, mediante una loro internalizzazione; questo al fine di pervenire alla soluzione ottima di progetto, anche per gli aspetti di compatibilità ambientale. Si definiscono costi esterni gli effetti indiretti sull'ambiente naturale e sociale delle attività individuali di trasporto, di produzione o di consumo. Tali attività provocano effetti sulla salute e sulla vita dell'uomo (livelli di incidentalità, grado di rischio di malattie, etc.), sull'ambiente urbano (qualità dell'aria, rumore e vibrazioni), sull'ambiente naturale e sugli ecosistemi (piogge acide, effetto serra, etc.), sull'ambiente sociale e costruito (accessibilità delle aree, occupazione del suolo, intrusione visiva, etc.) e sulle variazioni del tempo di spostamento nelle relazioni origine-destinazione (livelli di congestione nei rami e/o nodi) [4].

Il decisore pubblico necessita, perciò, di un efficace strumento di valutazione economica delle esternalità ambientali per raggiungere due obiettivi-chiave:

- disporre di un valido supporto per operare le migliori scelte localizzative delle infrastrutture ad elevato impatto ambientale, basato su criteri affidabili ed oggettivi;
- dotarsi di un'idonea base conoscitiva per concordare nella fase di concertazione con gli enti locali coinvolti (conferenze di servizio, etc.), le eventuali misure compensative dei costi (o benefici) ambientali che gravano su (o avvantaggiano) una comunità, a seguito dell'intervento pianificato.

<sup>(3)</sup> A seconda dell'ampiezza del periodo di tempo considerato e della consistenza degli investimenti previsti ed indipendentemente dagli ambiti territoriali coinvolti, possiamo distinguere, inoltre, fra pianificazione strategica, estesa ad un lungo periodo di tempo e caratterizzata da una notevole incidenza degli investimenti necessari; pianificazione tattica, in accordo a quella strategica ma a medio o breve termine con un limitato impegno di investimenti; pianificazione operativa (di esercizio), riferita anche ad un lungo periodo di tempo ma relativa alla migliore utilizzazione dell'esistente, attività questa di competenza degli Enti locali e delle aziende partecipate e che vede il livello politico centrale comunque interessato ad emanare norme generali di contenimento della spesa.

*The relevance that the matter has assumed has led to a greater attention by academics in the sector towards the analysis of externalities, that is of the effects that are produced when an economic subject (public or private) performs an action that has effects on the welfare of others consumers, who suffer them or benefit from them unintentionally, and for whom that subject does not pay or receive any compensation. In this context, the ante-operam examination of the utilities and the global costs generated by the planned intervention at a first level of economic policy decision-making becomes of particular interest, carrying out the accounting in the general economic framework also of the external costs, already in the feasibility analysis, by internalising them; this in order to reach the optimal solution of the project, also as regards environmental compatibility. External costs are defined as the indirect effects on the natural and social environment of individual transport, production or consumption activities. These activities cause effects on human health and life (accident levels, degree of disease risk, etc.), on the urban environment (air quality, noise and vibration), on the natural environment and on ecosystems (acid rain, greenhouse effect, etc.), on the social and built environment (accessibility of the areas, occupation of the land, visual intrusion, etc.) and on variations in the time of displacement in the origin-destination connections (levels of congestion in the sectors and/or nodes) [4].*

*The public decision maker therefore needs an effective economic evaluation tool of environmental externalities to achieve two key objectives:*

- *have a valid support to operate the best location choices of infrastructures with high environmental impact, based on reliable and objective criteria;*
- *equip itself with a suitable knowledge base to agree in the consultation phase with the local bodies involved (service conferences, etc.), any compensatory measures of environmental costs (or benefits) that weigh on (or benefit) a community, following the planned intervention.*

*Positive and negative externalities can be distinguished. Among the positive externalities, for example, those that increase the commercial or residential value of areas or buildings affected by a new mobility axis (commercial activities or residential assets served by a new network infrastructure, or benefited from the entry into operation of a subway, etc.) can be included. The noise and vibrations caused by traffic on a new urban artery, which cause damage not only to people but also to the value of properties in the area, fall into the category of negative externalities; to eliminate or at least minimise the effects, appropriate impact containment works can be adopted as sound-absorbing or sound-insulating barriers, whose monetary cost is an additional project charge. Sometimes, however, barriers in the urban area cause visual intrusion problems (as will be better explained in chapter 3 of this study), with consequent damage to the built landscape, which must be evaluated with suitable econometric techniques. These types of externalities, together with other possible effects on the ecosystem, such as cli-*



È possibile distinguere esternalità positive e negative. Fra le esternalità positive possono annoverarsi, ad esempio, quelle che accrescono il valore commerciale o residenziale di aree o fabbricati interessati da un nuovo asse di mobilità (attività commerciali o beni residenziali serviti da una nuova infrastruttura a rete, ovvero avvantaggiati dall'ingresso in esercizio di una metropolitana, etc.). Rientrano, invece, nella categoria delle esternalità negative il rumore e le vibrazioni provocate dal traffico su una nuova arteria urbana, che producono danni non solo alle persone, ma anche al valore di immobili presenti nell'area; per eliminare o quantomeno minimizzarne gli effetti, potranno essere adottate apposite opere di contenimento dell'impatto come barriere fonoassorbenti o fonoisolanti, il cui costo monetario costituisce un onere aggiuntivo di progetto. Talvolta, però, le barriere in area urbana provocano problemi di intrusione visiva (come verrà meglio esplicitato nel capitolo 3 del presente studio), con conseguenti danni al paesaggio costruito, che occorre valutare con idonee tecniche econometriche. Queste tipologie di esternalità, assieme ad altri eventuali effetti sull'ecosistema, quali variazioni climatiche, inquinamenti di corsi d'acqua, di falde sotterranee, livelli di incidentalità, etc., presuppongono giudizi di valore che rientrano anche nella sfera soggettiva: per esse, l'identificazione degli effetti, dei danni relativi e la valutazione in termini monetari necessitano ricostruzioni e computi laboriosi, affetti talvolta da incertezze nel relativo calcolo [5]. In particolare, le esternalità di tipo estetico-culturale ed ecologico non sempre sono riconducibili a valutazioni esprimibili in termini monetari, ma sono misurabili o riferibili ad opportune scale ordinali, che sono sempre utili per riuscire ad effettuare la valutazione comparativa delle diverse alternative di progetto. In Fig. 2, sono schematizzate le principali esternalità relative ai sistemi di trasporto.

Disporre di elementi di valutazione economica di tutte le variazioni di scenario è, dunque, condizione necessaria

*matic variations, pollution of watercourses, underground aquifers, levels of accidents, etc., presuppose value judgments that also fall within the subjective sphere: for them, the identification of the effects, the relative damages and the evaluation in monetary terms require reconstructions and laborious calculations, sometimes affected by uncertainties in the relative calculation [5]. In particular, aesthetic-cultural and ecological externalities are not always ascribable to evaluations that can be expressed in monetary terms, but they are measurable or referable to appropriate ordinal scales, which are always useful to be able to carry out the comparative evaluation of the different project alternatives. Fig. 2 schematises the main externalities related to transport systems.*

*Therefore, having economic evaluation elements of all the variations of the scenario is a necessary condition to reach optimal global choices in the public interest: for example, the identification of the best site where to allocate a railway junction (passenger/freight station, interports, etc.) may in fact depend on environmental considerations (minimising atmospheric and acoustic pollution), geological considerations (characteristics of the grounds on which to construct the planned works), safety (minimising the risk to people and/or things), reducing of the generalised cost of transport (better accessibility of the area and interconnection with other network nodes, etc.) and other factors.*

*In this perspective of systematic analysis of the variables, the (positive and/or negative) effects induced by the infrastructural intervention in the multi-modal mobility system will have to be assessed, including those on the vehicular congestion of the nodes and branches of the road networks affected by the new modal distribution of the traffic flows generated by the new investment (for example, the construction of a railway implies a different configuration of the traffic load in the land network system, with additional quotas for rail transport). The congestion costs in Italy cause society*

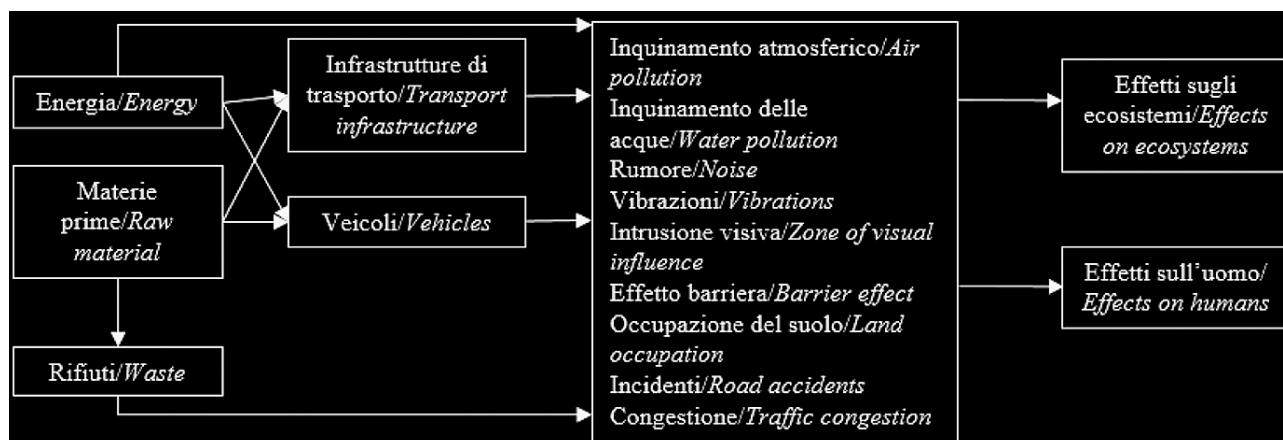


Fig. 2 – Esternalità dei sistemi di trasporto.  
Fig. 2 – Externalities of transport systems.

per pervenire a scelte globali ottimali nell'interesse pubblico: ad esempio, l'individuazione del sito migliore dove allocare un nodo ferroviario (stazione passeggeri/merci, interporto, etc.) può infatti dipendere da considerazioni ambientali (minimizzare l'inquinamento atmosferico ed acustico), geologiche (caratteristiche dei terreni su cui costruire le opere in progetto), di sicurezza (minimizzare il rischio per persone e/o cose), di riduzione del costo generalizzato del trasporto (migliore accessibilità dell'area ed interconnessione con altri nodi della rete, etc.) e da altri fattori ancora.

In quest'ottica di analisi sistematica delle variabili, andranno valutati gli effetti indotti (positivi e/o negativi) dall'intervento infrastrutturale nel sistema plurimodale della mobilità, fra cui quelli sulla congestione veicolare dei nodi e dei rami delle reti su gomma interessati dalla nuova distribuzione modale dei flussi di traffico generati dal nuovo investimento (ad esempio, la costruzione di una ferrovia implica una diversa configurazione del carico di traffico nel sistema a rete terrestre, con quote aggiuntive per il trasporto su rotaia). I costi di congestione in Italia causano alla società una perdita di produttività pari al 2% del PIL ed a livello globale dell'1% che equivale all'enorme importo di \$1,47 bilioni di dollari [6]: tale costo risulta esterno al singolo automobilista, ma penalizza la funzionalità e l'economicità dell'intero settore dei trasporti, risultando pertanto per quest'ultimo interno. Tale fattore di impatto rappresenta tecnicamente una esternalità di tempo, entrando nella funzione di produzione (o di consumo) di altri individui, e si riflette nell'economia degli Stati: in particolare, fa aumentare in modo anomalo il tempo di viaggio, soprattutto nell'ora di punta, con conseguente aggravio del costo globale di ogni spostamento O-D (Origine-Destinazione) per l'utenza, sia nel caso di uso del mezzo individuale privato sia di quello pubblico collettivo.

La congestione incide direttamente sulla qualità della vita nei territori e sui costi globali della mobilità (tempo, consumo di carburante, maggiore incidentalità, etc.) e, inoltre, provoca diverse diseconomie ambientali (emissioni di gas in atmosfera, inquinamento acustico, etc.). Con riferimento alla Fig. 3, che lega i costi ed i benefici marginali al traffico, si osserva che all'aumentare del flusso veicolare su una data infrastruttura viaria (tronco della rete o nodo), da un certo valore di soglia<sup>(4)</sup>  $T_0$  (rappresentante il livello di traffico socialmente ottimale) in poi, ogni veicolo aggiuntivo rispetto alla corrente di traffico non soltanto si

*a productivity loss equal to 2% of GDP and 1% at a global level which is equivalent to the enormous amount of \$1.47 billion dollars [6]: this cost is external to the individual driver, but penalises the functionality and economy of the entire transport sector, thus the latter resulting internal. This impact factor technically represents an externality of time, entering the function of production (or consumption) of other individuals, and is reflected in the economy of the Countries: in particular, it makes travel time increase abnormally, especially in the peak time, with a consequent increase in the overall cost of each O-D shift (Origin-Destination) for the user, both in the case of use of the private individual vehicle and of the public collective transport means.*

*Congestion directly affects the quality of life in the territories and the overall costs of mobility (time, fuel consumption, higher accident rate, etc.) and, moreover, causes various environmental diseconomies (gas emissions into the atmosphere, noise pollution, etc.). With reference to Fig. 3, which links the costs and the marginal benefits to traffic, it can be observed that with the increase of the vehicular flow on a given road infrastructure (trunk of the network or node), from a certain threshold value<sup>(4)</sup> onwards (representing the level of socially optimal traffic), each additional vehicle with respect to the traffic flow is not only operating at an increasingly higher cost, but it also causes an increase in every other element of the flow, generating a negative variation in the generalised transport cost. A "fork" is determined between the curve of private average marginal costs, named "MPC" and that of the social average marginal costs, bearing the acronym "MSC". Since the motorist considers only the private costs, and not the external costs that he imposes on other road users (passenger and freight traffic), there is an efficiency and loss of social welfare problem equal to the area of the ABE triangle, indicated in Fig. 3.*

*At the vertex E, the generated traffic level is represented by the value  $T^*$  on the abscissa axis, while the socially desirable one is provided by the  $T_s$  point: the actual flow tends to be therefore higher than the socially optimal one. To obtain the optimal flow, a tax equal to RP (road pricing) can be used, which reflects the difference between private and social marginal cost and makes the motorist aware of the slowdown that it imposes on other road users; with the re-course of the aforementioned tax all congestion is not eliminated, but only the economically excessive one [7].*

*In the applications of the method, if from the technical point of view it is sufficient to analyse the position and in-*

<sup>(4)</sup> La congestione dipende dalle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura (numero di corsie e loro larghezza, etc.), dalla tipologia e distribuzione del carico veicolare e dalla particolare relazione flusso-velocità; si ipotizza nel calcolo econometrico che la congestione si generi solo per valori superiori ad una certa soglia critica, che risulta una funzione caratteristica della capacità della strada. Tale soglia varia da caso a caso e dipende dal massimo flusso orario atteso per il trasporto di persone o veicoli in un punto o sezione (tronco) uniforme, durante un dato periodo, con condizioni prevalenti di circolazione e di tracciato.

<sup>(4)</sup> Congestion depends on the geometric characteristics of the infrastructure (number of lanes and their width, etc.), on the type and distribution of the vehicular load and on the particular flow-speed relationship; it is assumed in the econometric calculation that congestion is generated only for values above a certain critical threshold, which is a characteristic function of road capacity. This threshold varies from case to case and depends on the maximum expected hourly flow for the transport of people or vehicles in a uniform point or section (trunk), during a given period, with prevailing traffic and track conditions.

trova ad operare ad un costo sempre più elevato, ma ne provoca un aumento anche ad ogni altro elemento del flusso, generando una variazione negativa del costo generalizzato del trasporto. Si determina una “biforcazione” tra la curva dei costi marginali medi privati, denominata in figura “MPC” e quella dei costi marginali medi sociali, riportante l’acronimo “MSC”. Poiché l’automobilista considera solo i costi privati, e non i costi esterni che egli impone agli altri utenti stradali (traffico passeggeri e merci), si ha un problema di efficienza e di perdita di benessere sociale pari all’area del triangolo ABE, indicata in Fig. 3.

In corrispondenza del vertice E, il livello di traffico che si genera è rappresentato sull’asse delle ascisse dal valore  $T^*$ , mentre quello socialmente desiderabile risulta fornito dal punto  $T_s$ : il flusso effettivo tende ad essere quindi più elevato di quello socialmente ottimale. Per ottenere il flusso ottimale si può ricorrere ad un’imposta pari a RP (road pricing) che riflette la differenza tra il costo marginale privato e quello sociale e rende l’automobilista consapevole del rallentamento che impone agli altri utenti della strada; con il ricorso della suddetta imposta non si elimina tutta la congestione, ma solo quella economicamente eccessiva [7].

Nelle applicazioni del metodo, se dal punto di vista tecnico è sufficiente che per il corretto calcolo siano analizzate la posizione e l’inclinazione della curva dei costi marginali privati, dei benefici marginali privati e della curva dei costi marginali esterni, per la pratica attuazione dell’internalizzazione dei costi esterni occorre anche confrontarsi con la relativa accettabilità politica e sociale; questa, infatti, è stata finora quasi sempre limitata nel nostro Paese alla sola tariffazione dell’ingresso in particolari aree urbane (ZTL) o suburbane (tangenziali). Inoltre, sotto il profilo perequativo, assume rilevanza l’effetto redistributivo dell’imposta sia tra i cittadini consumatori (a pagare sarebbero soprattutto gli utenti del trasporto su strada), sia tra le modalità di spostamento e i settori produttivi interessati, in alcuni casi parzialmente risolvibile attraverso l’uso, direttamente o indirettamente, compensativo del gettito dell’imposta.

In economia, il valore di un bene dipende dalla soddisfazione che esso può dare ai fruitori (attuali e potenziali) ed è connesso alle utilità (positive e negative) da esso generate. Tuttavia, sul mercato i beni sono scambiati in base non ai valori specifici, intesi come qualcosa di soggettivo, ma ai loro prezzi che sono, invece, entità reali e grandezze oggettive. Esistono, però, dei particolari beni, come quelli ambientali, che, pur possedendo un valore, sono manchevoli di un prezzo, perché è impossibile determinare un rapporto preciso tra la disponibilità a pagare dei consumatori e la quantità di bene che costoro potranno acquistare, poiché per tali beni pubblici il consumo avviene in modo collettivo, senza che sia possibile determinare la quantità di bene consumato da ciascun individuo [8].

Nel caso particolare delle risorse ambientali, volendo tenere in conto tutte le possibili forme di interazione che si sviluppano tra uomo ed ambiente e tutte le utilità che il genere umano ne ricava, è necessario riferirsi al concetto

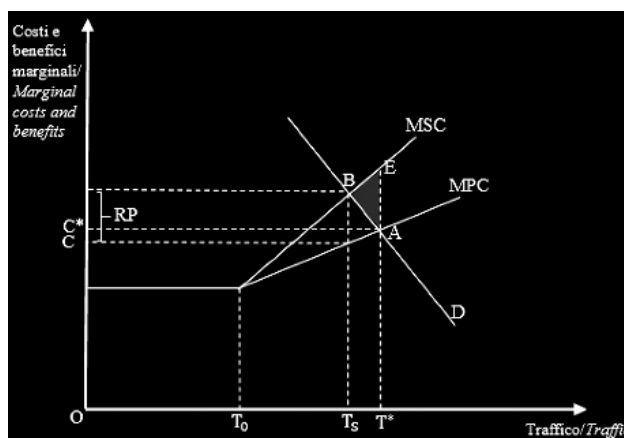


Fig. 3 – Stima del costo di congestione.  
Fig. 3 – Estimate of the congestion cost.

clination of the private marginal cost curve, the private marginal benefits and the external marginal cost curve, for the correct calculation, the relative political and social acceptability must also be compared for the practical implementation of the internalisation of external costs; this, in fact, has so far been almost always limited in our country to the single entry rate in particular urban (ZTL) or suburban (tangential) areas. Moreover, from an equalising point of view, the redistributive effect of the tax is relevant both among consumer citizens (to be paid mainly by road transport users), and between the displacement modes and the productive sectors involved, in some cases partially solvable through the direct or indirect use of the tax revenue.

In economics, the value of an asset depends on the satisfaction it can give to (current and potential) users and is connected to the (positive and negative) utilities it generates. However, goods are traded on the market based not on specific values, understood as something subjective, but on their prices which are, instead, real entities and objective magnitudes. However, there are particular assets, such as environmental ones, which, while possessing a value, are lacking in price, because it is impossible to determine a precise relationship between the willingness to pay of consumers and the quantity of assets that they can buy, since for such public assets, consumption takes place collectively, without it being possible to determine the amount of good consumed by each individual [8].

In the particular case of environmental resources, wanting to take into account all the possible forms of interaction that develop between man and the environment and all the utilities that mankind derives from them, it is necessary to refer to the fundamental concept of Total Economic Value, which represents the result of the aggregation of all types of value attributable to a specific asset, according to the following relation:

$$V_t = \sum_i u_i^{-w_i} + \sum_j n_j^{-w_j} \quad (7)$$



fondamentale di Valore Economico Totale  $V_t$ , che rappresenta il risultato dell'aggregazione di tutte le tipologie di valore riconducibili ad un determinato bene, secondo la seguente relazione:

$$V_t = \sum_i u_i^{-w_i} + \sum_j n_j^{-w_j} \quad (7)$$

con  $\begin{cases} u_i = \text{valore d'uso} \\ n_j = \text{valore di non uso} \\ w_i, w_j = \text{pesi attribuiti a ciascun componente dei due valori caratteristici} \end{cases}$

Il valore d'uso di un bene corrisponde al beneficio prodotto dallo stesso come conseguenza della fruizione da parte del soggetto economico, mentre il valore di non uso corrisponde al beneficio prodotto dallo stesso bene come conseguenza di predisposizioni e comportamenti del soggetto economico non direttamente legate all'uso del bene. Nello specifico, il valore  $u_i$  è legato all'utilità percepita dai consumatori in seguito alla fruizione del bene ambientale e si divide in valore d'uso diretto, nel caso in cui i beni possano essere consumati direttamente, e in valore d'uso indiretto, per i servizi che l'ambiente offre in maniera indiretta.

L'esigenza di quantificare il valore di un bene ambientale richiede implicitamente di procedere con la misurazione, attraverso un'unità di misura convenzionale, del suo livello di utilità e di soddisfacimento di determinati bisogni. All'interno dei sistemi economici il riferimento primario è la moneta: il valore di tutte le merci può essere espresso da un prezzo. In prima approssimazione, la valutazione monetaria coincide con la necessità di quantificare la somma di denaro con cui un bene può essere acquisito in un determinato luogo e tempo  $t$ : si definisce così il valore di scambio. Nel caso dei beni ambientali, si opera in assenza di mercato, come spesso avviene per i beni ambientali. In queste circostanze, il valore economico può essere espresso attraverso la quantità di moneta capace di fornire un'utilità pari a quella prodotta dal bene stesso. Per misurare questo parametro, viene proposto in letteratura il concetto di *surplus* del consumatore, definito come la differenza tra la quantità di denaro che i consumatori sono disposti a pagare per un bene (valore lordo) e la quantità di denaro che effettivamente spendono per il bene stesso (valore finanziario). Il concetto di *surplus* del consumatore applicato alla sfera dei beni pubblici si basa sul confronto tra l'utilità percepita attraverso la diretta fruizione e/o gli sforzi comunque necessari per acquisirla: il prezzo si determina in funzione della fatica, della spesa indiretta sopportata e del tempo investito per riuscire ad ottenere quel bene specifico. Riferendo la predetta nozione di *surplus* alla fattispecie dei beni economici ambientali si ricavano i necessari elementi per analizzare economicamente il danno ambientale, pervenendo ad una sua misura monetaria tramite la valutazione degli effetti indotti. Questi si possono tecnicamente caratterizzare come una variazione negativa del flusso di utilità generata dal bene a fruizione collettiva considerato, mediante il calcolo della somma necessaria a fornire un altro equivalente flusso di utilità sostitutivo rispetto ad esso. La ricercata misura monetaria corrisponde alla contrazione di *surplus* patita

with  $\begin{cases} u_i = \text{use value} \\ n_j = \text{non-use value} \\ w_i, w_j = \text{weight attributed to each component of the two characteristic values} \end{cases}$

*The use value of an asset corresponds to the benefit produced by the same as a consequence of the use by the economic subject, while the non-use value corresponds to the benefit produced by the same good as a consequence of predispositions and behaviours of the economic subject not directly linked to the use of the good. Specifically, the value is linked to the utility perceived by consumers following the use of the environmental good and is divided into direct use value, in the event that the goods can be consumed directly, and in indirect use value, for the services that the environment offers indirectly.*

*The need to quantify the value of an environmental asset implicitly requires proceeding with the measurement of its level of utility and satisfaction of certain needs, through a conventional unit of measurement. Within the economic systems the primary reference is currency: the value of all the goods can be expressed by a price. As a first approximation, monetary valuation coincides with the need to quantify the sum of money with which an asset can be acquired in a specific place and time  $t$ : the exchange value is thus defined. In the case of environmental assets, we act in the absence of a market, as often happens with environmental assets. In these circumstances, the asset itself can express the economic value through the quantity of money capable of providing a utility equal to that produced. To measure this parameter, the concept of consumer surplus is proposed in literature, defined as the difference between the amount of money consumers are willing to pay for a good (gross value) and the amount of money they actually spend on the good itself (financial value). The concept of consumer surplus applied to the sphere of public assets is based on the comparison between the utility perceived through direct use and/or the efforts necessary to acquire it: the price is determined on the basis of fatigue, indirect expenditure incurred and time invested to be able to obtain that specific good. Referring to the aforementioned notion of surplus to the case of environmental economic assets, the necessary elements are obtained to analyse the environmental damage economically, achieving a monetary measure through the evaluation of the induced effects. These can be technically characterised as a negative variation of the utility flow generated by the asset for the collective use considered, by calculating the sum necessary to provide another replacement equivalent utility flow with respect to it. The sought monetary measure corresponds to the contraction of surplus suffered by the users of the asset that is damaged, which can be expressed through a specific vector function  $\vec{S}_c$ :*

$$\vec{S}_c = f(\vec{v}_p, \vec{v}_a, \vec{r}_c) \quad (8)$$

*where the vector component expresses the level of utility perceived by the generic consumer and the other vector variables assume the following meaning:*

$\begin{cases} \vec{v}_p = \text{market price vectors of the assets} \\ \vec{v}_a = \text{available environmental assets quantity vector} \\ \vec{r}_c = \text{consumer income} \end{cases}$



dai fruitori del bene che risulta danneggiato, esprimibile attraverso un'apposita funzione vettoriale  $\vec{S}_c$ :

$$\vec{S}_c = f(\vec{v}_p, \vec{v}_a, \vec{r}_c) \quad (8)$$

dove la componente del vettore esprime il livello di utilità percepita dal generico consumatore e le altre variabili vettoriali assumono il seguente significato:

$$\begin{cases} \vec{v}_p = \text{vettore dei prezzi di mercato dei beni} \\ \vec{v}_a = \text{vettore delle quantità di beni ambientali disponibili} \\ \vec{r}_c = \text{reddito del consumatore} \end{cases}$$

Quindi, per far fronte a questa contrazione di surplus, presente a causa del danno ambientale subito, si ricorre al *surplus* compensativo che si caratterizza dunque come una grandezza in grado di rappresentare la disponibilità da parte di un soggetto economico ad accettare una compensazione monetaria per il danno subito. In tal modo, la ricercata soluzione estimativa al problema si configura nell'individuazione dell'aspetto economico più appropriato alla misura del danno subito, secondo i percorsi metodologici sintetizzati in Tabella 3.

Per quanto concerne, invece, i predetti valori di non uso, essi possono essere catalogati in tre macro-categorie economiche:

- valore di opzione: legato al desiderio di assicurarsi la disponibilità del bene ambientale anche nel futuro. Deriva dagli usi potenziali della risorsa, il consumatore non è solo disposto a pagare per consumare, ma anche per avere il diritto di accedere al consumo del bene ove decida nel futuro di farlo;
- valore di esistenza: misura l'utilità che la semplice consapevolezza dell'esistenza del bene procura agli individui. È connesso alla possibilità di preservare il bene ambientale da una possibile sua distruzione;
- valore di lascito: rapportato al desiderio di consentire alle generazioni future di potere usufruire di un determinato bene ambientale ritenuto di particolare pregio.

Per maggiore completezza di trattazione, nel paragrafo seguente sono enunciate le tecniche di valutazione dei valori di uso e non uso di un bene ambientale, con un approfondimento sui metodi di stima diretti ed indiretti del *surplus* del consumatore.

### 2.1. Criteri di stima del valore dei beni ambientali: i principali metodi indiretti e diretti

I metodi di valutazione dei valori d'uso e di non uso, possono essere classificati in base alla particolare

*So, to address this contraction of surplus, due to the environmental damage suffered, we resort to the compensatory surplus that is therefore characterised as a quantity capable of representing the willingness of an economic subject to accept a monetary compensation for the damage suffered. In this way, the sought-after estimate solution to the problem is configured in the identification of the most appropriate economic aspect to the extent of the damage suffered, according to the methodological paths summarised in Table 3.*

*As regards, instead, the aforementioned non-use values, they can be classified in three economic macro-categories:*

- *option value: linked to the desire to ensure the availability of the environmental good also in the future. It derives from the potential uses of the resource, the consumer is not only willing to pay to consume, but also to have the right to access consumption of the good if he decides to do so in the future;*
- *existence value: it measures the usefulness that the simple awareness of the existence of the good provides to individuals. It is connected to the possibility of preserving the environmental asset from its possible destruction;*
- *value of legacy: related to the desire to allow future generations to be able to take advantage of a particular environmental asset considered of particular value.*

*For greater comprehension, the following paragraph sets out the techniques for evaluating the values of use and non-use of an environmental asset, with an in-depth analysis of the direct and indirect estimation methods of the consumer surplus.*

Tabella 3 – Table 3

Percorsi metodologici di valutazione del danno  
*Methodological paths for damage assessment*

| Tipologia di bene danneggiato<br><i>Type of damaged asset</i>                    | Percorso metodologico di riferimento<br><i>Methodological reference path</i>                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Riproducibile<br><i>Reproducible</i>                                             | Nella fase di valutazione del danno devono essere considerati i costi diretti ed indiretti da sostenere per la ricostruzione della situazione iniziale.<br><i>In the damage assessment phase the direct and indirect costs to be incurred for the reconstruction of the initial situation must be considered.</i> |
| Irriproducibile e surrogabile<br><i>Irreproducible and substitutable</i>         | Nella fase di valutazione del danno devono essere presi in considerazione possibili beni pubblici sostitutivi e relativi costi.<br><i>In the damage assessment phase, possible substitute public assets and related costs must be taken into consideration.</i>                                                   |
| Irriproducibile e non surrogabile<br><i>Irreproducible and not substitutable</i> | La valutazione deve fare riferimento alla somma di denaro in grado di compensare la perdita subita.<br><i>The assessment must refer to the amount of money that can compensate for the loss suffered.</i>                                                                                                         |

unità di misura impiegata ed alla procedura utilizzata nella stima, come riportato nella Tabella 4 [9].

In particolare, per la stima monetaria del predetto *surplus del consumatore*, si distinguono metodi diretti ed indiretti (Tabella 5).

Per pervenire all'analisi estimativa del più probabile valore da attribuire al bene ambientale in esame, si possono utilizzare i seguenti metodi indiretti:

- Metodo del costo del viaggio (*Travel Cost Method*);
- Metodo del prezzo edonico (*Hedonic Price*);
- Metodo delle spese difensive.
- Mentre, tra i metodi diretti il più utilizzato risulta essere quello della valutazione contingente (*Contingent Evaluation - CE*).

#### 2.1.1. Metodo del costo del viaggio

Il criterio consiste nel valutare i costi sopportati dai singoli fruitori per accedere ad un bene ambientale (riserva naturale, parco, etc.) e nell'assumere che essi possano rappresentare un indicatore economico sostitutivo dei prezzi di accesso del bene collettivo, conducendo alla determinazione del valore del bene. Tale metodo, anche se risulta di difficile applicazione nel caso di viaggi a destinazione multipla (itinerari turistici) e nell'analisi degli spostamenti urbani compiuti dai residenti (un parco in città), costituisce un valido riferimento estimativo. Operativamente, occorre effettuare un'opportuna delimitazione dell'area interessata e la quantificazione del numero di visite annue (analisi dei periodi significativi), predisponendo delle interviste attraverso un questionario rivolto ad un campione qualificato di visitatori. Si costruisce la matrice origine-destinazione degli spostamenti, suddividendo gli stessi in curve di isodistanza rispetto al bene in studio, per ogni modalità di spostamento considerata. La perimetrazione a zone dell'area in studio sarà funzione sia della specifica distanza degli spostamenti O-D, sia delle particolari caratteristiche dell'offerta di mobilità, per le diverse opzioni modali interessanti gli intervistati. Perimetrazioni di tale genere possono essere utilmente rappresentate con schematizzazioni grafiche, quali a titolo d'esempio quella in Fig. 4 relativa ad una modalità di trasporto su gomma (studio tipo eseguito per la città di Roma).

Tabella 4 – Table 4

Classificazione dei metodi di valutazione del danno  
*Classification of damage assessment methods*

| Tipo di valutazione<br><i>Type of evaluation</i> | Unità di misura<br><i>Unit of measurement</i>                                           | Metodo di valutazione<br><i>Assessment method</i>                                                        |                                                                     |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Non monetaria<br><i>Non-monetary</i>             | Parametrici tecnici<br><i>Technical parameters</i>                                      | VIA<br><i>Environmental Impact Assessment</i>                                                            |                                                                     |
| Monetaria<br><i>Monetary</i>                     | Valori convenzionali<br><i>Conventional values</i>                                      | Coefficienti tecnici applicati a px di mercato<br><i>Technical coefficients applied to market prices</i> |                                                                     |
|                                                  | Prezzi di mercato (estimo tradizionale)<br><i>Market prices (traditional valuation)</i> | Valore di produzione<br><i>Production value</i>                                                          |                                                                     |
|                                                  |                                                                                         | Valore complementare<br><i>Complementary value</i>                                                       |                                                                     |
|                                                  |                                                                                         | Valore di surrogazione<br><i>Value of subrogation</i>                                                    |                                                                     |
|                                                  |                                                                                         | Valore di trasformazione<br><i>Value of transformation</i>                                               |                                                                     |
|                                                  | Surplus del consumatore<br><i>Consumer surplus</i>                                      | Indiretti<br><i>Indirect</i>                                                                             | Costo di viaggio (CTM)<br><i>Travel cost (CTM)</i>                  |
|                                                  |                                                                                         |                                                                                                          | Prezzo edonico (HPM)<br><i>Hedonic price (HPM)</i>                  |
|                                                  |                                                                                         |                                                                                                          | Spese difensive<br><i>Defensive expenses</i>                        |
|                                                  |                                                                                         | Diretti<br><i>Direct</i>                                                                                 | Valutazione contingente (CEM)<br><i>Contingent evaluation (CEM)</i> |

#### 2.1. Valuation criteria for the value of environmental assets: main indirect and direct methods

*The evaluation methods of use and non-use values can be classified according to the particular unit of measurement used and the procedure used in the estimate, as reported in Table 4 [9]. In particular, due to the monetary estimate of the aforementioned consumer surplus, direct and indirect methods can be distinguished (Table 5).*

*To achieve the estimative analysis of the most probable value to be attributed to the environmental asset in question, the following indirect methods can be used:*

- *Travel cost method (Travel Cost Method);*

Tabella 5 – Table 5

Metodi indiretti e diretti per la stima del valore dei beni ambientali  
Indirect and direct methods for estimating the value of environmental assets

|                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Indiretti – quelli che si riferiscono a mercati esistenti ed al comportamento reale del consumatore</b><br><i>Indirect - those that refer to existing markets and the real behaviour of the consumer</i>                                                                     | Costo di viaggio<br><i>Travel cost</i>                  | Permette la stima dell'aspetto ricreativo di risorse naturali quando il viaggio è la componente di costo fondamentale<br><i>It allows estimating the recreational aspect of natural resources when travel is the fundamental cost component</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Stimano solamente i valori d'uso ed operano con un approccio <i>ex-post</i> , sulla base del comportamento o delle scelte fatte dagli operatori<br><br><i>They only value the use values and operate with an ex-post approach, based on the behaviour or choices made by the operators</i>                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Prezzo edonico<br><i>Hedonic price</i>                  | Deriva il valore di aspetti ambientali locali dal valore o dal prezzo d'uso di immobili (fabbricati, terreni), e richiede l'esistenza di un mercato sufficientemente trasparente per reali beni<br><br><i>The value of local environmental aspects derives from the value or price of use of real estate (buildings, land), and requires the existence of a sufficiently transparent market for real assets</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Spese difensive<br><i>Defensive expenses</i>            | Permette la stima dei costi necessari a contrastare il degrado dei beni ambientali<br><i>It allows estimating the costs necessary to contrast the degradation of environmental assets</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Diretti – quelli che fanno astrazione dai comportamenti reali e chiedono direttamente le misure ricercate a potenziali consumatori</b><br><i>Direct - those that make abstraction from real behaviours and directly require the measures sought from potential consumers</i> | Valutazione contingente<br><i>Contingent evaluation</i> | Fanno riferimento a potenziali fruitori operando in assenza di mercati reali con un approccio <i>ex-ante</i> , aspetto che le rende più flessibili. Esse possono essere utilizzate per stimare misure di benessere in una pluralità di situazioni e si prestano particolarmente bene per valutare miglioramenti o peggioramenti (qualitativi) dell'offerta di risorse naturali<br><br><i>They refer to potential users operating in the absence of real markets with an ex-ante approach, an aspect that makes them more flexible. They can be used to estimate welfare measures in a variety of situations and lend themselves particularly well to assess (qualitative) improvements or deterioration in the supply of natural resources</i> | Adottando un approccio <i>ex-ante</i> , slegato dall'uso, esse sole si prestano alla stima di altri tipi di valore quale il valore d'opzione, il valore di esistenza<br><br><i>By adopting an ex-ante approach, independent from use, they alone lend themselves to the estimation of other types of value such as the option value, the existence value</i> |

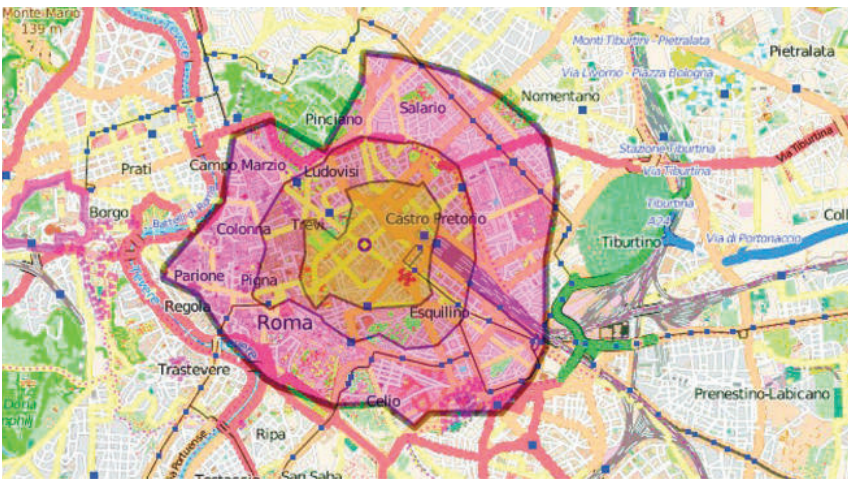


Fig. 4 – Esempio di perimetrazioni per la città di Roma.  
Fig. 4 – Example of perimeter delimitations for the city of Rome.

- Hedonic price method (Hedonic Price);
- Defensive expenditure method.

Whereas among the direct methods the most used is that of contingent evaluation (Contingent Evaluation - CE).

2.1.1. Travel cost method

The criterion is to evaluate the costs borne by individual users to access an environmental asset (nature reserve, park, etc.) and assuming that they can represent an economic indicator that replaces the access prices of the collective asset, leading to the determination of the value of the same. This method



Il costo medio del viaggio da ogni zona può essere così assunto come un indicatore del prezzo effettivamente pagato da ogni viaggiatore; occorre procedere al calcolo del saggio di frequenza relativa delle visite per ciascuna curva di isodistanza come sopra determinata (rapporto tra il numero delle visite e la popolazione residente in ogni zona) e, quindi, valutare la relazione tra i costi del viaggio per ciascuna curva ed il saggio di frequenza relativa (l'andamento sarà di tipo esponenziale negativo, visto che all'aumento dei costi dello spostamento corrispondono saggi decrescenti di frequenza). Si può così costruire la funzione di domanda per la fruizione del bene ambientale, operando un tipico incrocio *cross section* attraverso regressione multipla dei costi del viaggio con i saggi di frequenza calcolati. L'area sottesa dalla curva di domanda fornisce l'effettiva disponibilità a pagare (rendita del consumatore o utilità percepita) e capitalizzando l'utilità attraverso un appropriato saggio di interesse, si perviene infine alla stima del più probabile valore del bene ambientale esaminato.

Il criterio esposto, anche se fornisce uno strumento atto ad operare un'opportuna analisi sistematica del problema, presenta tuttavia dei limiti estimativi intrinseci nella metodologia di valutazione, dovuti a diversi elementi esemplificativi adoperati: l'aver assunto la curva di domanda uguale per tutte le aree territoriali O-D ed un rapporto tra costi e saggi di frequenza che non tiene conto delle specifiche condizioni socio-economiche. Infine, l'aver trascurato nell'analisi economica sia il valore di opzione che quello di esistenza del bene, entrambi indipendenti dalla reale fruizione attuale.

Il modello teorico alla base del metodo del costo di viaggio è un semplice problema di massimizzazione dell'utilità individuale, dove si assume che l'utilità dell'individuo dipenda dal tempo speso sul luogo, dalle caratteristiche del sito e da un indicatore  $X$  detto numerario<sup>(5)</sup>:

$$\text{Max } [U = f(X, v, a)] \quad (9)$$

$$\text{con } \begin{cases} X = \text{numerario} \rightarrow \text{acquisto di tutti gli altri beni, per dato budget} \\ v = \text{numero dei viaggi effettuato verso il luogo di destinazione} \\ a = \text{caratteristiche e qualità ambientali del luogo} \end{cases}$$

Il numero di visite  $v$  è inteso come una funzione crescente della variabile  $a$  rappresentativa delle caratteristiche del luogo dove insiste il bene pubblico da visitare e della sua qualità ambientale.

Il problema di massimizzazione dell'utilità è soggetto, inoltre, vincoli di bilancio e di tempo, espressi da due equazioni:

$$R_e + (p_w \cdot t_w) = X + (c \cdot v) \quad (10)$$

$$t^* = t_w + [(t_1 + t_2) \cdot v] \quad (11)$$

<sup>(5)</sup> Nella teoria dell'equilibrio economico generale, il numerario rappresenta un bene il cui prezzo è convenzionalmente posto pari a 1, in modo da definire quelli delle altre  $n-1$  merci come prezzi relativi.

*constitutes a valid estimation reference, even if it is difficult to apply in the case of multiple destination journeys (tourist itineraries) and in the analysis of urban displacements carried out by residents (a park in the city). Operationally, it is necessary to carry out an appropriate delimitation of the area concerned and the quantification of the number of annual visits (analysis of significant periods), arranging interviews using a questionnaire addressed to a qualified sample of visitors. The origin-destination (O-D) matrix of the displacements is created, dividing them into isodistance curves with respect to the asset under study, for each displacement mode considered. The perimeter delimitation of the area under study will be a function of both the specific distance of the O-D displacements, and the particular characteristics of the mobility offer, for the various modal options of interest to the interviewees. Perimeter delimitations of this kind can be usefully represented with graphical schematisations, such as by way of example that in Fig. 4 relative to a road transport mode (standard study carried out for the city of Rome).*

*The average cost of travel from each area can thus be taken as an indicator of the price actually paid by each traveller; the relative frequency rate of visits for each isodistance curve as determined above must be calculated (ratio between the number of visits and the population residing in each area) and, therefore, the evaluation the relationship between travel costs for each curve and the relative frequency rate (the trend will be of a negative exponential type, given that the increase in displacement costs corresponds to decreasing frequency rates). In this way, the demand function for the use of the environmental good can be built, by operating a typical cross section crossing through multiple regression of the costs of the journey with the calculated frequency rates. The area underlying the demand curve provides the actual willingness to pay (consumer income or perceived utility) and capitalising on utility through an appropriate rate of interest, the estimate of the most probable value of the environmental good examined is finally achieved.*

*The exposed criterion, even if it provides a tool capable of operating an appropriate systematic analysis of the problem, nevertheless has intrinsic estimate limits in the evaluation methodology, due to several illustrative elements used: having assumed the same demand curve for all the territorial O-D areas and a ratio between costs and rates of attendance that does not take into account the specific socio-economic conditions. Finally, having disregarded both the option value and the existence of the asset in the economic analysis, both independent of the current actual use.*

*The theoretical model underlying the travel cost method is a simple problem of maximising individual utility, where it is assumed that the utility of the individual depends on the time spent on the site, on the characteristics of the site and on an indicator called cash value<sup>(5)</sup>:*

<sup>(5)</sup> In the theory of general economic equilibrium, the number represents an asset whose price is conventionally set equal to 1, so as to define those of the other  $n-1$  commodities as relative prices.



dove:

$$\begin{cases} R_e = \text{reddito esogeno (di natura non salariale)} \\ p_w = \text{livello salariale} \\ t_w = \text{numero di ore lavorate} \\ c = \text{costo monetario di un viaggio} \\ t^* = \text{tempo individualmente disponibile per effettuare lo spostamento } O - D \\ t_1, t_2 = \text{tempo del viaggio di andata e di quello di ritorno} \end{cases}$$

Il vincolo temporale imposto dalla relazione (11) rappresenta il costo del tempo dedicato alle attività turistico-ricreative, sottratto ad altre attività, che può derivare dal livello salariale individuale. Dalle relazioni (10) e (11) si ottiene, infine:

$$R_e + (p_w \cdot t^*) = X + (p_v \cdot v) \quad (12)$$

dove con  $p_v$  si è indicata l'espressione

$$p_v = c + p_w(t_1 + t_2). \quad (13)$$

Il risultato del problema di massimizzazione in studio consente di definire la funzione di domanda individuale di visita al sito ambientale di interesse:

$$v = f(p_v, R_e, a) \quad (14)$$

L'equazione (14) indica che il numero delle visite  $v$  è funzione del prezzo pagato per la visita al sito di destinazione, del reddito individuale totale e dalla qualità ambientale del luogo. Dopo aver stimato la funzione di domanda si può ricavare il *surplus* del consumatore, che risulta fornito dall'area sottesa dalla curva di domanda marshalliana<sup>(6)</sup> e che corrisponde al valore ricreativo del bene considerato (a scenario *ceteris paribus*, anche con reddito e preferenze dell'individuo supposte costanti).

Il metodo descritto si basa sul fatto che l'individuo risponde ai cambiamenti dei costi sostenuti per il viaggio allo stesso modo di una variazione del prezzo di ingresso al sito; si assume che lo scopo del viaggio è unicamente quello ricreativo, legato alla fruizione del bene in esame che viene raggiunto dal visitatore, e che tutte le visite comportano uno stesso ammontare di tempo speso sul sito [10]. Infine, nelle pratiche applicazioni del criterio del *travel cost* si assume che non vi siano siti ricreativi alternativi disponibili per gli individui (la valutazione del costo opportunità si può poi effettuare assumendo quest'ultimo pari ad 1/3 del valore del salario orario).

### 2.1.2. Metodo del prezzo edonico (Hedonic Price)

Il prezzo di un bene pubblico o privato, secondo l'*Hedonic Price*, si determina in base alle caratteristiche del bene ambientale nel quale è inserito; pertanto, il prezzo che i consumatori sono disposti a pagare comprende anche gli elementi attrattivi intrinseci del bene stesso. Per esempio,

$$\text{Max } [U = f(X, v, a)] \quad (9)$$

with  $\begin{cases} X = \text{cash value} \rightarrow \text{purchase of all other assets, for a given budget} \\ v = \text{number of trips towards destination place} \\ a = \text{characteristics and environmental qualities of the place} \end{cases}$

The number of visits is intended as an increasing function of the variable representative of the characteristics of the place where the public good to visit is located and its environmental quality.

The problem of maximising utility is subject, moreover, to budget and time constraints, expressed by two equations:

$$R_e + (p_w \cdot t_w) = X + (c \cdot v) \quad (10)$$

$$t^* = t_w + [(t_1 + t_2) \cdot v] \quad (11)$$

where:

$$\begin{cases} R_e = \text{external income (non salary type)} \\ p_w = \text{salary level} \\ t_w = \text{number of hours worked} \\ c = \text{monetary cost of a trip} \\ t^* = \text{individual available time for travelling } O - D \\ t_1, t_2 = \text{outbound and inbound travel time} \end{cases}$$

The time constraint imposed by the relation (11) represents the cost of time dedicated to tourist-recreational activities, subtracted from other activities, which may derive from the individual wage level. Finally, from relations (10) and (11) we obtain:

$$R_e + (p_w \cdot t^*) = X + (p_v \cdot v) \quad (12)$$

where the  $p_v$  expression is indicated

$$p_v = c + p_w(t_1 + t_2). \quad (13)$$

The result of the study of the maximisation problem allows defining the individual demand function of for visiting the environmental site of interest:

$$v = f(p_v, R_e, a) \quad (14)$$

Equation (14) indicates that the number of visits  $v$  depends on the price paid for the visit to the destination site, the total individual income and the environmental quality of the place.

After estimating the demand function the consumer surplus can be derived, which is provided by the area underlying the Marshallian demand curve<sup>(6)</sup> and which corresponds to the recreational value of the considered good (a scenario *ceteris paribus*, also with income and preferences of the individual supposed constants).

The method described is based on the fact that the individual responds to changes in costs incurred for the trip in

<sup>(6)</sup> La curva Marshalliana mostra la quantità domandata dal consumatore ad ogni possibile variazione di prezzo del bene  $X$  a cui risulta interessato e può essere così indicata (caso generale di più beni):  $X^* = X(p_x, p_y, R_e)$ . Reddito, prezzi di altri beni ( $p_y$ ) e le preferenze individuali sono ipotizzati costanti. Se qualcuno di questi fattori cambia la curva di domanda trasla nel piano.

<sup>(6)</sup> The Marshallian curve shows the quantity demanded by the consumer at every possible price variation of the good  $X$  which it is interested in and can thus be indicated (general case of several goods):  $X^* = X(p_x, p_y, R_e)$ . Income, prices of other goods ( $p_y$ ) and individual preferences are assumed to be constant. If any of these factors change the demand curve translates into the plan.

il valore dell'aria, dell'acqua o dell'inquinamento acustico ha un impatto diretto sul valore immobiliare delle case.

Le applicazioni più comuni di questo metodo sono le indagini sul rumore, sulla qualità dell'aria e sulla sicurezza collegate alla disponibilità a pagare (DAP). Uno degli errori più frequenti a cui si può andare incontro con il criterio del prezzo edonico risulta quello che viene chiamato errore strategico: questo si verifica quando i soggetti intervistati credono di poter ottenere vantaggi di tipo personale in funzione delle risposte fornite sulla loro disponibilità a pagare. Questa evenienza potrebbe indurli a rispondere all'intervistatore in maniera strategica, al fine di ottenere il massimo risultato possibile. Si distinguono in letteratura economica due forme di comportamento strategico dell'intervistato: il *free riding* e il fenomeno dell'*overpledging*. Il *Free riding* si verifica quando il soggetto dichiara una DAP bassa per un bene pubblico perché si aspetta che gli altri paghino anche per lui. *Overpledging* si verifica, invece, quando l'individuo crede che il valore dichiarato possa influenzare l'offerta del bene in termini di prezzo, qualità o quantità ed è, quindi, portato a sovrastimarla o sottostimarla, a seconda della particolare situazione [11].

### 2.1.3. Metodo delle spese difensive

Il metodo si basa sulla stima dei costi sostenuti dai privati o dalla pubblica amministrazione per contrastare il degrado dei beni ambientali causato dalla modificazione dell'ambiente.

Per la stima di tali costi occorre individuare gli interventi rivolti alla conservazione del paesaggio, il tempo ad essi dedicato e il costo dei mezzi impiegati a tale scopo.

Esso rappresenta il criterio di valutazione monetaria diretta più semplice per calcolare il valore economico della qualità ambientale, che viene considerata come obiettivo di un processo produttivo nel quale, partendo da una determinata situazione, bisogna aumentare le spese per ottenere un aumento della qualità ambientale, ovvero, con l'aumentare del livello di qualità ambientale, si riducono le spese sostenute per difendersi dal livello di inquinamento corrispondente alla situazione di partenza.

L'identificazione delle spese consiste nella stima dei costi relativi ad ogni azione difensiva.

Occorre disaggregare dai dati contabili le singole spese difensive, distinguendo due tipologie:

- le spese correnti dai costi di investimento;
- le spese esclusivamente motivate dalla reazione al degrado ambientale dalle spese motivate da altre ragioni.

La stima del valore del bene consiste nella ricostruzione del suo valore ambientale, ottenuto sommando tutte le spese difensive individuate nel processo di analisi economica. Un tipico esempio applicativo risulta quello della valutazione del rumore da traffico veicolare, che costituisce una forma di deterioramento dell'ambiente per il quale i costruttori di strade ed i privati cittadini adottano accorgimenti tecnici atti a limitare gli effetti dell'inquina-

*the same way as a change in the price of entry to the site; it is assumed that the purpose of the trip is solely the recreational one, linked to the use of the property under examination that is reached by the visitor, and that all visits involve the same amount of time spent on the site [10]. Finally, in the practical applications of the travel cost criterion it is assumed that there are no alternative recreational sites available for individuals (the evaluation of the opportunity cost can then be made assuming the latter equal to 1/3 of the hourly wage value).*

### 2.1.2. Hedonic price method (Hedonic Price)

*The price of a public or private asset, according to the Hedonic Price, is determined based on the characteristics of the environmental good where it stands; therefore, the price that consumers are willing to pay also includes the intrinsic attractive elements of the good itself. For example, the value of air, water or noise pollution has a direct impact on the real estate value of homes.*

*The most common applications of this method are noise, air quality and safety investigations related to willingness to pay (WTP). One of the most frequent errors that can be encountered with the hedonic price criterion is what is called strategic error: this occurs when the subjects interviewed believe that they can obtain personal advantages based on the answers given on their willingness to pay. This possibility could lead them to answer the interviewer strategically in order to obtain the maximum possible result. Two forms of strategic behaviour of the interviewee are distinguished in economic literature: free riding and the overpledging phenomenon. Free riding occurs when the subject declares a low WTP for a public good because he expects others to pay for him too. On the other hand, overpledging occurs when the individual believes that the declared value can influence the supply of the good in terms of price, quality or quantity and is therefore inclined to overestimate or underestimate it, depending on the particular situation [11].*

### 2.1.3. Defensive expenditure method

*The method is based on the estimate of the costs incurred by private individuals or the public administration to counteract the degradation of environmental assets caused by the modification of the environment.*

*To estimate these costs, the interventions aimed at landscape conservation, the time dedicated to them and the cost of the means used for this purpose must be identified.*

*It represents the simplest direct monetary evaluation criterion for calculating the economic value of environmental quality, which is considered as the objective of a production process in which, starting from a given situation, it is necessary to increase expenses to obtain an increase in environmental quality, or, with the increase in the level of environmental quality, the expenses incurred for defence against the level of pollution corresponding to the starting situation are reduced.*

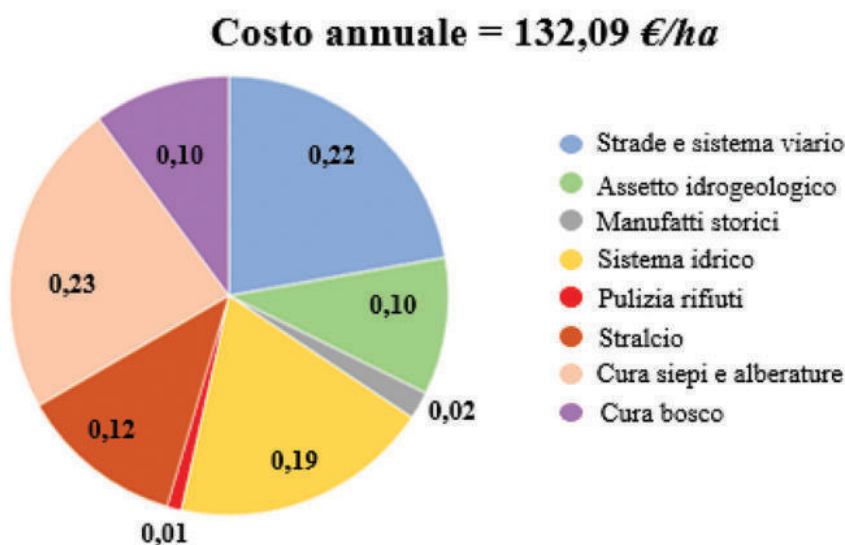


Fig. 5 – Schema di valutazione dei costi di conservazione di un paesaggio rurale.

Fig. 5 – Evaluation scheme of the conservation costs of a rural landscape.

mento acustico, sopportandone i relativi costi (barriere anti-rumore, infissi con vetri-camera, etc.). Il metodo in oggetto utilizza la sommatoria di queste spese come base di stima del danno ambientale provocato. In Fig. 5, a titolo d'esempio, è rappresentato uno schema di valutazione dei costi di conservazione di un paesaggio rurale, espresso in €/ha (costo annuale).

#### 2.1.4. Metodo della valutazione contingente

Il metodo della valutazione contingente (CE), propone la costruzione di mercati simulati, ovvero situazioni ipotetiche nelle quali un campione di individui è chiamato a esprimere la propria disponibilità a pagare (DAP) per un cambiamento dello *status quo*. Questo può essere positivo (es., un piano di difesa di una specie animale minacciata di estinzione da un'opera *in fieri*) o – eventualmente – negativo (es., la costruzione di una strada o di una ferrovia che comporterà la distruzione di un paesaggio naturale). Ciò comporta che i valori ottenuti sono “contingenti”, ossia dipendono dal mercato simulato [12]. La disponibilità a pagare, secondo la terminologia anglosassone, viene definita, come detto precedentemente, *Willingness to Pay* (WTP), mentre la disponibilità ad accettare viene definita *Willingness to Accept* (WTA). La WTP e la WTA corrispondono alle misure del consumatore compensate [13]. Diversamente dai metodi basati sulle preferenze rivelate<sup>(7)</sup>, con

The identification of the expenses consists in estimating the costs related to each defensive action.

The individual defensive expenses must be disaggregated from the accounting data, distinguishing two types:

- current expenses from investment costs;
- the expenses exclusively motivated by the reaction to environmental degradation from the expenses motivated by other reasons.

The estimate of the value of the asset consists in the reconstruction of its environmental value, obtained by summing all the defensive expenses identified in the economic analysis process. A typical application example is that of the evaluation of vehicular traffic noise, which is a form of environmental deterioration for which road

builders and private citizens adopt technical devices to limit the effects of noise pollution, bearing their relative costs (noise barriers, windows with double-glazing, etc.). The method in question uses the sum of these expenses as a basis for estimating the environmental damage caused. Fig. 5, as an example, shows a scheme for evaluating the conservation costs of a rural landscape, expressed in €/ha (annual cost).

#### 2.1.4. Contingent evaluation method

The contingent evaluation method (CE) proposes the construction of simulated markets, or hypothetical situations in which a sample of individuals is called to express its willingness to pay (WTP) for a change in the status quo. This can be positive (e.g., a defence plan for an animal species threatened with extinction from a work in progress) or - possibly - negative (e.g. the construction of a road or a railway that will involve the destruction of a natural landscape). This means that the values obtained are contingent, i.e. they depend on the simulated market [12]. Willingness to pay, according to Anglo-Saxon terminology, is defined, as mentioned above, *Willingness to Pay* (WTP), while willingness to accept is defined as *Willingness to Accept* (WTA). WTP and WTA correspond to compensated consumer measures [13]. Unlike the methods based on revealed preferences<sup>(7)</sup>, with the CE it is possible to estimate both the use

<sup>(7)</sup> Le preferenze rivelate fanno riferimento a metodi che cercano di stimare il valore di un bene ambientale, come il paesaggio, chiedendo direttamente ai fruitori o a coloro che sono comunque interessati alla sua conservazione a quale parte del loro reddito sarebbero disposti a rinunciare affinché sia realizzata una data azione di tutela in favore di quella risorsa ecosistemica.

<sup>(7)</sup> The revealed preferences refer to methods that try estimating the value of an environmental good, such as the landscape, directly asking the users or those who are interested in its conservation to which part of their income they would be willing to renounce for a given action of protection to be realised in favour of that ecosystem resource.



la CE e possibile stimare sia i valori d'uso sia di non uso. La CE è quindi uno strumento tecnicamente versatile e di semplice applicazione, che può essere utilizzato per valutare un'ampia categoria di beni. È applicabile alla valutazione delle risorse ambientali, il cui valore può presentare componenti "altruistiche" ed etiche rilevanti (valore di esistenza, valore di opzione) o un valore d'uso non esaurito dagli utilizzi commerciali.

Tramite il mercato contingente, in generale, si cerca di indurre un individuo ad esprimere:

- la disponibilità a pagare per evitare una riduzione della quantità di una risorsa o un suo peggioramento qualitativo;
- la disponibilità a pagare per aumentare la quantità di una risorsa o migliorarne la qualità;
- la disponibilità ad accettare un rimborso per una riduzione della quantità o un peggioramento della qualità;
- la disponibilità ad accettare un rimborso per rinunciare ad un aumento della quantità o a un miglioramento della qualità.

In letteratura scientifica vi è un certo consenso nel limitare l'uso della valutazione contingente a beni per i quali non è possibile riferirsi ai mercati reali (o non è opportuno considerarli), come nei casi del valore della vita umana (incidentali nei trasporti, inquinamenti interessanti la catena alimentare, etc.), del valore della protezione ambientale o della qualità del paesaggio.

Le tipologie applicative del metodo fanno riferimento a quattro modalità fondamentali:

### 1) Open-Ended method

Ai soggetti di un campione significativo opportunamente individuato per la stima del bene, viene chiesto di esprimere la somma massima che sarebbero disposti a pagare per mantenere lo stato attuale del bene - WTP (o ad accettare come misura compensativa alla rinuncia - WTA), senza con ciò fornire loro alcun suggerimento. Le caratteristiche del bene (danno cagionato) e la situazione, compresa l'eventuale modalità di pagamento, vanno descritte con precisione. Poiché tale approccio di analisi al problema può facilmente condurre a stime non attendibili da parte degli intervistati, tale metodo risulta nella pratica utilizzato esclusivamente ad integrazione di altri.

### 2) Scelte dicotomiche (Referendum)

Agli intervistati vengono imposte scelte dicotomiche (*dichotomous choice*), proponendo offerte del tipo "prendere o lasciare". Per ogni somma considerata, l'analista calcola la frequenza relativa e, con riferimento al diverso ammontare offerto, determina la distribuzione di frequenza campionaria, da cui risulta possibile ricavare la curva di domanda dell'individuo medio. Tale modo di procedere supera i problemi propri dell'*open-ended method*, derivanti dalla difficoltà per l'intervistato di stima iniziale del bene.

*and non-use values. The CE is therefore a technically versatile and simple application tool, which can be used to evaluate a wide category of goods. It is applicable to the assessment of environmental resources, the value of which can present "altruistic" and important ethical components (existence value, option value) or use value not consumed by commercial uses.*

*Through the contingent market, in general, an attempt is made to induce an individual to express:*

- *the willingness to pay to avoid a reduction in the quantity of a resource or its deterioration in quality;*
- *the willingness to pay to increase the quantity of a resource or improve its quality;*
- *the willingness to accept a refund for a reduction in quantity or a deterioration in quality;*
- *the willingness to accept a refund to forgo an increase in quantity or an improvement in quality.*

*In scientific literature there is a certain consensus in limiting the use of contingent evaluation to assets for which it is not possible to refer to real markets (or it is not appropriate to consider them), as in the cases of the value of human life (accident rates in transport, pollution involving the food chain, etc.), of the value of environmental protection or landscape quality.*

*The application types of the method refer to four fundamental methods:*

### 1) Open-Ended method

*The subjects of a significant sample appropriately identified for the estimation of the asset are asked to express the maximum sum they would be willing to pay to maintain the current status of the asset - WTP (or to accept as a compensatory measure for the waiver - WTA), without providing them with any suggestions with this. The characteristics of the asset (damage caused) and the situation, including any payment methods, must be described precisely. Since this analysis approach to the problem can easily lead to unreliable estimates by the interviewees, this method is used in practice exclusively to complement others.*

### 2) Dichotomous choices (Referendum)

*Interviewees are offered dichotomous choices (dichotomous choice), proposing offers such as "take or leave". For each sum considered, the analyst calculates the relative frequency and, with reference to the different amount offered, determines the sampling frequency distribution, from which the demand curve of the average individual can be derived. This way of proceeding overcomes the open-ended method problems, deriving from the difficulty for the interviewee in the initial estimate of the good.*

### 3) Auction

*The economist who has to analyse the asset simulates a real auction in which, after describing the resource object of the study and starting from an initial price determined by*



## 3) Asta

L'economista che deve analizzare il bene simula una vera e propria asta in cui, dopo aver descritto la risorsa oggetto dello studio e partendo da un prezzo iniziale da egli determinato, il prezzo del bene viene modificato iterativamente sulla base dell'accettazione o rifiuto dell'intervistato, fino a stabilire il prezzo massimo che quest'ultimo è disposto a pagare per "aggiudicarsi" il bene. Il criterio non risulta sempre affidabile, in quanto può essere inficiato da errore, ove l'interazione con l'intervistatore influenzi in qualche modo il soggetto interessato.

## 4) Carte di pagamento

Il metodo può fare riferimento a due particolari modalità operative, fra loro diverse:

- carte di pagamento con *tax prices*, dove l'intervistatore chiede di esprimere la disponibilità a pagare per un certo bene dopo aver presentato una "tabella delle tasse pagate, in corrispondenza degli stessi scaglioni di reddito degli intervistati, per un bene diverso da quello oggetto di valutazione";
- carte di pagamento con *range* di prezzi, in cui l'operatore "descrive una modifica nelle caratteristiche del bene, fornendo, poi, una carta che riporta contemporaneamente tutti i valori monetari che la risorsa può assumere. Infine, si chiede all'intervistato quanto è disposto a spendere per ottenere quella modifica".

In ogni caso, qualunque sia la tecnica utilizzata fra quelle sopra descritte, lo strumento attraverso il quale si manifesta la disponibilità a pagare è costituito da indagini campionarie (*survey*) basate a loro volta su interviste, dalla cui bontà di realizzazione dipenderà l'attendibilità dei risultati della stima. Infatti, il livello e la natura delle informazioni, fornite ai soggetti partecipanti attraverso la descrizione degli scenari ipotetici formulati, gioca un ruolo cruciale nella corretta applicazione del metodo. La tipologia e la modalità delle spiegazioni fornite agli intervistati e la "somministrazione" del questionario (intervista telefonica, postale, indagine diretta, *focus group*) possono, difatti, influenzare il risultato finale a cui si perviene, sia in senso positivo che negativo.

## 3. L'analisi dell'impatto acustico: soluzioni progettuali e valutazione dei relativi costi esterni

Come già esposto nei precedenti paragrafi, la valutazione degli investimenti pubblici mira all'obiettivo della massima efficienza allocativa, cioè migliore impiego delle risorse disponibili per conseguire la maggiore quantità di utilità aggiuntive per la collettività dell'intero sistema paese. In tale processo, il progettista ha il compito di analizzare ogni aspetto tecnico, economico ed ambientale del problema, confrontando lo scenario *post-operam* con quello dell'ipotesi neutra (non intervento) per individuare la migliore soluzione possibile, attraverso un'analisi com-

*him, the price of the asset is modified iteratively based on the acceptance or rejection of the interviewee, up to establishing the maximum price that the latter is willing to pay to "win" the good. The criterion is not always reliable, as it can be affected by error, where the interaction with the interviewer affects the interested party in some way.*

## 4) Payment Cards

*The method can refer to two particular operating modes, different from each other:*

- *payment cards with tax prices, where the interviewer asks to express willingness to pay for a certain good after presenting a "table of fees paid, in correspondence with the same income brackets as those interviewed, for a good other than the one covered by evaluation";*
- *payment cards with price ranges, in which the operator "describes a change in the characteristics of the asset, then providing a card that simultaneously reports all the monetary values that the resource can take. Finally, the interviewee is asked how much he is willing to spend to obtain that change".*

*In any case, whatever technique is used among those described above, the tool through which the willingness to pay is expressed consists of sample surveys (surveys) based in turn on interviews, from which the reliability of the implementation will depend from the estimation results. In fact, the level and nature of the information, provided to the participating subjects through the description of the hypothetical scenarios formulated, plays a critical role in the correct application of the method. The typology and the modality of the explanations provided to the interviewees and the "provision" of the questionnaire (telephone interview, postal, direct investigation, focus group) can, in fact, influence the final result, both in a positive and negative way.*

## 3. Acoustic impact assessment: design solutions and evaluation of the related external costs

*As already explained in the previous paragraphs, the evaluation of public investments aims at the maximum allocation efficiency, i.e. better use of the resources available to achieve the greater quantity of additional utilities for the community of the entire country system. In this process, the designer has the task of analysing every technical, economic and environmental aspect of the problem, comparing the post-operam scenario with that of the neutral hypothesis (non-intervention) to identify the best possible solution, through a comparative analysis of the utility/disutility flows associated with each alternative intervention solution. In this context, it is essential to quantify the external costs generated by the action in question in the vast area using specific econometric, supplementary market techniques, such as those described above. Among the most significant external costs, the impact of noise generated by air, rail and road traffic assumes particular importance due to the serious repercussions it can have on human health.*

parativa dei flussi di utilità/disutilità associati a ciascuna soluzione alternativa di intervento. In tale contesto, risulta essenziale procedere alla quantificazione dei costi esterni generati dall'azione in esame nell'area vasta ricorrendo ad apposite tecniche econometriche, suppletive del mercato, come quelle descritte precedentemente. Fra i costi esterni più significativi, particolare rilevanza assume l'impatto da rumore generato dal traffico aereo, ferroviario e stradale, per le gravi ripercussioni che può avere sulla salute dell'uomo.

Le emissioni sonore, oltre ad incidere gravemente sul sistema uditivo, favoriscono anche l'insorgere di malattie cardiovascolari, così come il rischio di infarto nelle nostre aree urbane aumenta del 4% ogni 10 decibel in più a cui le persone vengono sottoposte, a causa del sempre crescente livello di inquinamento. Il rumore da traffico amplifica anche il rischio di ipertensione e di insufficienza cardiaca e quello notturno, in particolare, provoca forti disturbi del sonno, generando stress, problemi di rendimento lavorativo e perfino il rischio di diabete. Infatti, i meccanismi all'origine di quest'ultimo fenomeno stimolano sia la secrezione cronica degli ormoni dello stress, che influenzano il metabolismo dell'insulina, sia gli effetti sul metabolismo che provocano i disturbi del sonno [14]. Inoltre, l'impatto acustico nelle aree urbane genera un decremento di valore dei beni immobili (aree edificabili, unità immobiliari, negozi, etc.) ed incide negativamente sulla vita sociale e produttiva delle città, con costi complessivi a carico della collettività dell'ordine di diversi miliardi di €/anno.

Dal punto di vista fisico, la propagazione del suono nell'aria avviene per onde sferiche di compressione e rarefazione; l'orecchio umano può percepire i contenuti in un certo intervallo di pressione sonora [20  $\mu$ Pa ÷ 100 Pa] e di frequenza [20 Hz ÷ 20.000 Hz] [15].

Al fine di misurare la sensazione sonora percepita dall'uomo, non si utilizza l'ampiezza della fluttuazione di pressione sonora espressa in Pascal, si usa invece convertire tale valore di pressione sonora nella scala logaritmica dei dB (decibel), definendo così il Livello di Pressione Sonora (SPL, Sound Pressure Level) di seguito riportato:

$$SPL = 10 \log (P/P_0)^2 \quad (15)$$

ove  $P_0$  rappresenta la pressione sonora di riferimento ( $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa, valore limite di percezione) e  $P$  quella dell'ambiente in esame.

L'impatto acustico sul ricevitore dipende dalla distanza dalla sorgente e dalle caratteristiche del terreno su cui incide l'onda di pressione. Il suolo si può considerare costituito da una superficie piana che, quando è colpita da un'onda sonora, la riflette. Il fenomeno si può rappresentare attraverso una sorgente virtuale, in posizione speculare al piano riflettente rispetto alla sorgente, sommando il contributo di quest'ultima al livello diretto, come schematizzato in Fig. 6.

Per calcolare il livello che arriva al ricevitore, considerando una sorgente puntiforme, è necessario sommare i due livelli diretto  $L_{DIR}$  e riflesso  $L_{RIF}$ .

*The noise emissions, besides seriously affecting the auditory system, also favour the onset of cardiovascular diseases, just as the risk of heart attack in our urban areas increases by 4% every extra 10 decibels to which people are subjected, due to the ever-increasing level of pollution. Traffic noise also amplifies the risk of hypertension and heart failure, and nocturnal noise, in particular, causes severe sleep disorders, generating stress, problems with work performance and even the risk of diabetes. In fact, the mechanisms behind this last phenomenon stimulate both the chronic secretion of stress hormones, which influence the metabolism of insulin, and the effects on the metabolism that cause sleep disorders [14]. Furthermore, the noise impact in urban areas generates a decrease in the value of real estate (building areas, real estate units, shops, etc.) and negatively affects the social and productive life of cities, with overall costs borne by the community of the order of several billion/year.*

*From the physical point of view, the propagation of sound in the air occurs through spherical waves of compression and rarefaction; the human ear can perceive the contents in a certain interval of sound pressure [20  $\mu$ Pa ÷ 100 Pa] and frequency [20 Hz ÷ 20.000 Hz] [15].*

*In order to measure the sound sensation perceived by man, the amplitude of the sound pressure fluctuation expressed in Pascal is not used, instead this sound pressure value is converted into the logarithmic scale of dB (decibel), thus defining the Sound Pressure Level (SPL) reported below:*

$$SPL = 10 \log (P/P_0)^2 \quad (15)$$

*where  $P_0$  represents the reference sound pressure ( $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa, perception limit value) and  $P$  that of the environment in question.*

*The acoustic impact on the receiver depends on the distance from the source and on the characteristics of the ground on which the pressure wave has an impact. The ground can be considered to consist of a flat surface that, when struck by a sound wave, reflects it. The phenomenon*

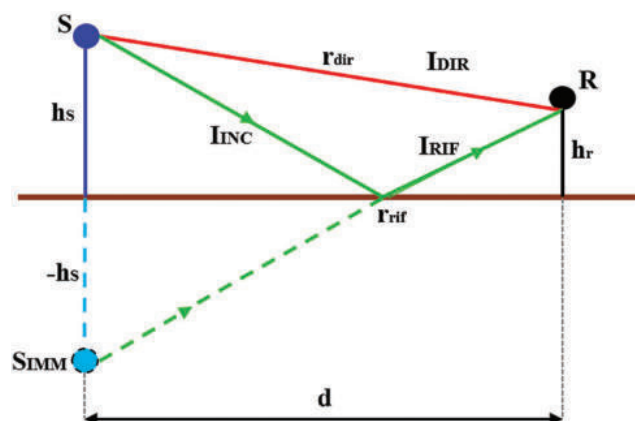


Fig. 6 – Riflessione del suono sul terreno.  
Fig. 6 – Reflection of sound on the ground.

$$L_{DIR} = L_W + 10 \log \frac{Q_{DIR}}{4\pi r_{DIR}^2} \quad (16)$$

$$L_{RIF} = L_W + 10 \log \frac{Q_{RIF}(1-\alpha)}{4\pi r_{RIF}^2} \quad (17)$$

$L_W$  è il livello di potenza della sorgente  $S$ ,  $Q_{DIR}$  e  $Q_{RIF}$  i coefficienti di direttività (se valgono entrambi 1 si ha una sorgente omnidirezionale),  $\alpha$  è il coefficiente acustico del terreno ( $\alpha$  è sempre  $<1$ , il terreno, infatti, porta ad una perdita di energia).  $Q_{DIR}$  e  $Q_{RIF}$  dipendono dal variare di  $r_{RIF}$  e  $r_{DIR}$ , determinabili in funzione di  $d$  (distanza in pianta tra la sorgente ed il ricevitore  $R$ ), di  $h_S$  (altezza della sorgente) e di  $h_R$  (altezza del ricevitore). Dalla Fig. 6, è evidente come, utilizzando il Teorema di Pitagora si ottiene:

$$r_{DIR} = \sqrt{d^2 + (h_S - h_R)^2} \quad (18)$$

$$r_{RIF} = \sqrt{d^2 + (h_S + h_R)^2} \quad (19)$$

Per sommare i due livelli sonori, diretto  $L_{DIR}$  e riflesso  $L_{RIF}$ , è necessario verificare se la sorgente è coerente o incoerente. Nell'ipotesi di sorgente incoerente (ovvero escludendo fenomeni di interferenza delle onde), si può sommare il contributo acustico mediante le formule seguenti, che consentono la determinazione del ricercato valore  $L_{TOT}$ :

$$L_{TOT} = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{DIR}}{10}} + 10^{\frac{L_{RIF}}{10}} \right) \rightarrow L_{TOT} = L_W + 10 \log \left( \frac{Q_{DIR}}{4\pi r_{DIR}^2} + \frac{Q_{RIF}(1-\alpha)}{4\pi r_{RIF}^2} \right) \quad (20)$$

Le norme che fissano le soglie accettabili di rumore in ambiente urbano fanno riferimento ai percentili di SPL, indicati con LN, ovvero ai valori di pressione superati solo nell' $N$  % del periodo di riferimento. I valori più usati sono i livelli di picco  $L_1$  e  $L_{10}$  (superati per l'1% e il 10% del tempo di osservazione) e quelli di fondo  $L_{90}$  e  $L_{99}$  (superati per il 90% e 99%).

Un altro importante indicatore caratteristico per valutare l'inquinamento acustico dovuto ai trasporti (a titolo d'esempio, in Tabella 6 sono riportate le sorgenti di rumore, causanti inquinamento acustico, di un veicolo a motore) è anche il livello di pressione sonora equivalente (che considera un rumore stazionario e continuo per l'intervallo di tempo considerato, energeticamente equivalente), definito dall'espressione:

$$L_{eq} = 10 \log \left[ 1/(t_2 - t_1) \int_{t_1}^{t_2} p^2(t)/P_0^2 dt \right] \quad (21)$$

can be represented through a virtual source, in a specular position with respect to the reflecting plane with respect to the source, adding the contribution of the latter to the direct level, as shown in Fig. 6.

To calculate the level that arrives at the receiver, considering a point source, the two direct  $L_{DIR}$  and  $L_{RIF}$  reflex levels must be summed.

$$L_{DIR} = L_W + 10 \log \frac{Q_{DIR}}{4\pi r_{DIR}^2} \quad (16)$$

$$L_{RIF} = L_W + 10 \log \frac{Q_{RIF}(1-\alpha)}{4\pi r_{RIF}^2} \quad (17)$$

$L_w$  is the power level of source  $S$ ,  $Q_{DIR}$  and  $Q_{RIF}$  the directivity coefficients (if both are worth 1 there is an omnidirectional source),  $\alpha$  is the acoustic coefficient of the ground ( $\alpha$  is always  $<1$ , the ground, in fact, leads to a loss of energy)  $Q_{DIR}$  and  $Q_{RIF}$  depend on the variation of  $r_{RIF}$  and  $r_{DIR}$ , which can be determined as a function of  $d$  (distance in plan between the source and the receiver  $R$ ), di  $h_S$  (height of the source) and of  $h_R$  (height of the receiver). From Fig. 6, it is evident how, using the Pythagorean Theorem we obtain:

$$r_{DIR} = \sqrt{d^2 + (h_S - h_R)^2} \quad (18)$$

$$r_{RIF} = \sqrt{d^2 + (h_S + h_R)^2} \quad (19)$$

To sum the two sound levels, direct  $L_{DIR}$  and  $L_{RIF}$  reflection, it is necessary to check whether the source is coherent or incoherent. In the hypothesis of an incoherent source (i.e. excluding wave interference phenomena), the acoustic contribution can be added using the following formulas, which allow the determination of the sought value  $L_{TOT}$ :

$$L_{TOT} = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{DIR}}{10}} + 10^{\frac{L_{RIF}}{10}} \right) \rightarrow L_{TOT} = L_W + 10 \log \left( \frac{Q_{DIR}}{4\pi r_{DIR}^2} + \frac{Q_{RIF}(1-\alpha)}{4\pi r_{RIF}^2} \right) \quad (20)$$

The standards that set the acceptable noise thresholds in urban environments refer to the percentiles of SPL, indicated with LN, or to the pressure values exceeded only in the  $N$ % of the reference period. The most commonly used values are the peak levels  $L_1$  and  $L_{10}$  (exceeded by 1% and 10% of the observation time) and the basic ones  $L_{90}$  and  $L_{99}$  (exceeded by 90% and 99%).

Another important characteristic indicator for assessing noise pollution due to transport (for example, in Table 6 the noise sources causing noise pollution of a motor vehicle are re-

Tabella 6 – Table 6

Sorgenti di rumore di un veicolo a motore  
Noise sources of a motor vehicle

|                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Motore</b><br><i>Motor</i>              | Sede di compressioni, scoppi e decompressioni. I livelli di emissione sonora dipendono da: caratteristiche costruttive, n. giri/min<br><i>Compressions, explosions and decompressions areas. Sound emission levels depend on: construction characteristics, n. rpm</i>                                                                                                           |
| <b>Rotolamento</b><br><i>Rolling</i>       | Rumore causato dall'intrappolamento/rilascio d'aria nelle cavità tra battistrada ed asfalto. Dipende dal disegno del battistrada e dalla tessitura e porosità del manto stradale<br><i>Noise caused by trapping/release of air into the cavities between the tyre tread and the tarmac. It depends on the tyre tread design and the texture and porosity of the road surface</i> |
| <b>Aerodinamica</b><br><i>Aerodynamics</i> | Rilevante esclusivamente per velocità $>130$ km/h<br><i>Relevant only for speeds <math>&gt;130</math> km/h</i>                                                                                                                                                                                                                                                                   |



con  $t_1$  e  $t_2$  estremi dell'intervallo temporale di riferimento,  $P_0$  pressione sonora di riferimento e  $P$  quella dell'ambiente.

I livelli di pressione sonora presenti nelle normative di riferimento sono espressi in una scala modificata dB(A), ovvero in decibel ponderato in scala A, per tener conto che la sensibilità dell'orecchio si riduce alle basse ed alle alte frequenze. Infatti, la curva di ponderazione "A" risulta quella che più si approssima all'inverso dell'isofonica dei 40 phon (il phon è l'unità di misura del livello di intensità soggettiva del suono), che meglio esprime la risposta dell'orecchio umano alle sollecitazioni acustiche.

Nel caso in cui l'opera del progettista riguardi anche la contestuale pianificazione urbanistica del territorio interessato dall'infrastruttura, un elemento essenziale di ottimizzazione dell'intervento riguarda la scelta della più opportuna correlazione asse di mobilità-edificato urbano. Infatti, risulta possibile intervenire *ante-operam* non solo sulle caratteristiche costruttive della strada, ma anche degli edifici (materiali ad assorbimento acustico per le facciate, etc.) e sulla stessa loro distribuzione nell'area (ad es., quelli destinati ad attività commerciali possono essere concepiti come schermo per i successivi da adibire a civile abitazione) come evidenzia lo schema esplicativo in Fig. 7, ovvero sulla destinazione d'uso degli spazi interni, tenendo sempre in considerazione i limiti di  $L_{eq}$  imposti dal DPCM 14/11/1997 [16] riportato in Tabella 7.

Per valutare l'incidenza dell'impatto dovuto all'esercizio delle diverse componenti di traffico che definiscono il complesso sistema della mobilità, si può fare riferimento alla già richiamata teoria economica concernente la disponibilità a pagare (*willingness to pay*, WTP), che rientra, nella letteratura scientifica, nel filone della cosiddetta economia del benessere.

La stima del costo esterno del rumore  $C_r$  può essere effettuata attraverso la WTP ricavata dagli studi di prezzi edonici applicati al valore delle abitazioni. Dal punto di visto operativo, la pratica applicazione del metodo richiede una serie di ipotesi esemplificative:

- il valore scelto si suppone corrisponda alla valutazione data al rumore da tutta la popolazione residente;
- il costo marginale del rumore si assume costante (la funzione è generalmente non lineare in quanto la WTP marginale aumenta all'aumentare del livello di rumore);
- il prezzo  $PE$  viene applicato indipendentemente dal valore dell'abitazione e del reddito dell'occupante;
- si trascura per semplicità di analisi l'effetto schermante dovuto a possibili interventi di riduzione

(*ported*) is also the equivalent sound pressure level (which considers a stationary and continuous noise for the time interval considered, energetically equivalent), defined by the expression:

$$L_{eq} = 10 \log \left[ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} P^2(t) / P_0^2 dt \right] \quad (21)$$

with  $t_1$  and  $t_2$  extremes of the reference time interval,  $P_0$  reference sound pressure and  $P$  that of the environment.

The sound pressure levels present in the reference standards are expressed in a modified dB(A) scale, or in decibels weighted in scale A, to take into account that the sensitivity of the ear is reduced at low and high frequencies. In fact, the "A" weighting curve is the one that is closest to the inverse of the 40 phon's isophone (the phon is the unit of measurement of the subjective intensity level of the sound), which best expresses the response of the human ear to acoustic stress.

In the case in which the designer's work also concerns the contextual urban planning of the area affected by the infrastructure, an essential optimisation element of the intervention concerns the choice of the most appropriate correlation of the mobility – urban built axis. In fact, it is possible to intervene *ante-operam* not only on the constructive characteristics of the road, but also of the buildings (sound-absorbing materials for facades, etc.) and on their distribution in the area (e.g. those destined for commercial activities can be conceived as a screen for the following to be used as a residential house) as shown in the explanatory diagram in Fig. 7, or on the intended use of the interior spaces, always taking into consideration the  $L_{eq}$  limits imposed by DPCM 14/11/1997 [16] reported in Table 7.

To assess the incidence of the impact due to the operation of the various traffic components that define the complex mobility system, reference can be made to the aforementioned economic theory concerning willingness to pay (WTP), which falls, in scientific literature, in the line of the so-called welfare economy.

The estimate of the external cost of noise can be made through the WTP obtained from studies of the hedonic

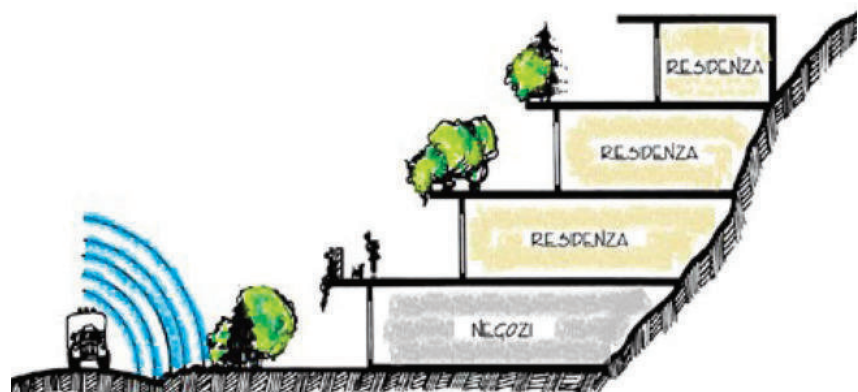


Fig. 7 – Distribuzione a terrazza delle unità costruttive.  
Fig. 7 – Terrace distribution of the construction units.



Tabella 7 – Table 7

Valori limiti di  $L_{eq}$   
Limit values of  $L_{eq}$

| Classi di destinazione di uso del territorio<br><i>Intended use classes of the territory</i> | Limiti massimi ( $L_{eq}$ in dB(A))<br><i>Maximum limits (<math>L_{eq}</math> in dB(A))</i> |                                   |                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
|                                                                                              | Periodo di riferimento<br><i>Reference period</i>                                           |                                   |                          |
|                                                                                              | Diurno<br><i>Day</i>                                                                        | Intermedio<br><i>Intermediate</i> | Notturmo<br><i>Night</i> |
| I – Aree particolarmente protette<br><i>I - Particularly protected areas</i>                 | 50                                                                                          | 45                                | 40                       |
| II – Aree prevalentemente residenziali<br><i>II - Predominantly residential areas</i>        | 55                                                                                          | 50                                | 45                       |
| III – Aree di tipo misto<br><i>III - Mixed type areas</i>                                    | 60                                                                                          | 55                                | 50                       |
| IV – Aree di intensa attività umana<br><i>IV - Areas of intense human activity</i>           | 65                                                                                          | 60                                | 55                       |
| V – Aree prevalentemente industriali<br><i>V - Mainly industrial areas</i>                   | 70                                                                                          | 65                                | 60                       |
| VI – Aree esclusivamente industriali<br><i>VI - Exclusively industrial areas</i>             | 70                                                                                          | 70                                | 70                       |

del rumore percepito (vetri camera nelle abitazioni, pavimentazioni stradali fonoassorbenti o barriere antirumore<sup>(8)</sup>).

Se indichiamo con  $i$  una generica area esposta ad un livello di rumore omogeneo  $L_p$ , in cui  $A_i$  rappresenta il numero delle abitazioni,  $P_i$  il loro valore annualizzato,  $PE_i$  il prezzo edonico che indica la perdita percentuale di valore dell'abitazione per unità di decibel di rumore e  $(L_{i,0} - L_{i,b})$  l'eccesso di rumore rispetto alla soglia base a cui è esposta l'area  $i$  ( $L_{i,0}$  = livello sonoro percepito dal ricevente,  $L_{i,b}$  = livello sonoro ammissibile – soglia base), il ricercato valore  $C_r$  può essere fornito dalla formula:

$$C_r = \sum (L_{i,0} - L_{i,b}) \cdot A_i \cdot P_i \cdot PE_i \quad (22)$$

Il prodotto del valore annualizzato delle abitazioni dell'area, moltiplicato per l'eccesso di rumore e per il decremento percentuale del prezzo dovuto al rumore, fornisce una stima della perdita di valore (e quindi del costo esterno) causato dal quadro acustico di riferimento. La sommatoria del valore così ottenuto per ciascuna delle aree  $i$  rappresenta il costo esterno totale da rumore per l'insieme delle aree considerate.

prices applied to the value of housing. From the operational point of view, the practical application of the method requires a series of example hypotheses:

- the chosen value is supposed to correspond to the evaluation given by the entire resident population to the noise;
- the marginal cost of the noise is assumed to be constant (the function is generally non-linear since the marginal WTP increases as the noise level increases);
- the HP price is applied regardless of the value of the home and the income of the occupant;
- for simplicity of analysis, the shielding effect due to possible interventions to reduce the perceived noise (double-glazing in homes, sound-absorbing road paving or noise barriers<sup>(8)</sup>) is neglected.

If we indicate with  $i$  a generic area exposed to a homogeneous noise level  $L_p$ , in which  $A_i$  represents the number of

dwellings,  $P_i$  their annualised value,  $HP_i$  the hedonic price that indicates the percentage loss of home value per unit of decibel of noise and  $(L_{i,0} - L_{i,b})$  the excess of noise with respect to the base threshold to which the area  $i$  is exposed ( $L_{i,0}$  = sound level perceived by the receiver,  $L_{i,b}$  = permissible sound level - base threshold), the wanted value can be provided by the formula:

$$C_r = \sum (L_{i,0} - L_{i,b}) \cdot A_i \cdot P_i \cdot PE_i \quad (22)$$

The product of the annualised value of the housing in the area, multiplied by the excess of noise and by the percentage decrease in the price due to noise, provides an estimate of the loss of value (and therefore of the external cost) caused by the reference acoustic framework. The sum of the value thus obtained for each of the areas  $i$  represents the total external cost of noise for all the areas considered.

### 3.1. The railway case

The growing sensitivity of public opinion towards environmental problems has highlighted the need to guarantee an adequate rail-territory relationship, promoting appropriate acoustic rehabilitation plans for the existing network and guaranteeing, ex ante optimisation, for new work, through

<sup>(8)</sup> Per tale ipotesi di lavoro, quando il costo di queste opere all'interno delle unità immobiliari è inglobato nel prezzo stesso dell'abitazione (riduzione del valore per la necessità dei doppi vetri) non risulta esserci distorsione.

<sup>(8)</sup> For this working hypothesis, when the cost of these works within the real estate units is included in the price of the house itself (reduction in value due to the need for double glazing), there is no distortion.

## 3.1. Il caso ferroviario

La crescente sensibilità dell'opinione pubblica verso i problemi ambientali ha posto in evidenza la necessità di garantire un adeguato rapporto ferrovia-territorio, promuovendo per la rete esistente appositi piani di risanamento acustico e garantendone, per le nuove opere, l'ottimizzazione *ex ante*, mediante accurati studi di minimizzazione dell'impatto da rumore finalizzati all'individuazione della scelta ottima di progetto.

Sotto il profilo legislativo, all'interno del D. Lgs. 42/2017 [17] è esplicitato come la valutazione dell'impatto acustico di infrastrutture lineari di trasporto, già in sede progettuale, deve tenere conto dei casi di pluralità di infrastrutture che concorrono all'immissione di rumore nell'area territoriale in studio (analisi integrata del sistema della mobilità). Inoltre, la richiamata legge quadro, all'articolo 10 comma 5, prevede che le società e gli Enti gestori di servizi pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture, ove si accerti il superamento dei valori limite previsti dalla vigente normativa, debbano presentare all'Autorità competente un Piano di contenimento ed abbattimento del rumore, per garantire il giusto equilibrio del rapporto infrastruttura-ambiente e tutelare al meglio la pubblica salute e la qualità della vita nell'ecosistema urbano.

D'altro canto, il settore dei trasporti su rotaia ha subito nel corso degli anni rilevanti trasformazioni tecnologiche e si è dotato di apparati funzionali al contenimento del rischio ambientale, sia per i convogli che per l'infrastruttura. Basti pensare alla scomparsa delle vetuste locomotive a vapore, alle concezioni più moderne e di elevata qualità delle carrozze passeggeri ed all'alta velocità, con dispositivi innovativi anche per la costruzione e la manutenzione.

In tale contesto, i piani di investimento per l'ottimizzazione della rete impongono la valutazione preventiva dell'impatto acustico da traffico ferroviario, analizzando, caso per caso, sia la specifica fonte di emissione del rumore, sia la sensibilità e la vulnerabilità del territorio, considerando per il primo aspetto il contributo energetico (intensità del suono e frequenza di emissione) fornito dalle diverse sorgenti al rumore percepito dal ricevente:

- rumore della motrice;
- impatto da rotolamento;
- rumore aerodinamico (rilevante in ingresso/uscita da gallerie);
- inquinamenti accidentali (fenomeno della frenatura, etc.).

L'apporto di rumore della motrice, a parte la componente dovuta al suo rotolamento, dipende fortemente dal tipo di propulsione adottato. Inoltre, per analizzare l'effettivo scenario acustico generato, bisogna considerare altri aspetti significativi del fenomeno, quali le vibrazioni dei pistoni, il movimento degli ingranaggi e dei ventilatori, l'iniezione del carburante.

Per quanto riguarda i convogli a trazione elettrica, che rappresentano ormai la quasi totalità sulle linee europee

*careful noise impact minimisation studies aimed at identifying the optimal project choice.*

*From the legislative point of view, within Legislative Decree 42/2017 [17] it is explained how the evaluation of the acoustic impact of linear transport infrastructures, already in the planning stage, must take into account the cases of plurality of infrastructures that contribute to the introduction of noise into the territorial area under study (mobility system integrated analysis). Furthermore, the aforementioned framework law, in article 10 paragraph 5, provides that the companies and Entities managing public transport services or related infrastructures, where the limit values set by the current legislation are ascertained, must submit a Noise reduction plan to the competent Authority to guarantee the right balance of the infrastructure-environment relationship and to better protect public health and the quality of life in the urban ecosystem.*

*On the other hand, the rail transport sector has undergone significant technological changes over the years and has equipped itself with functional equipment for limiting environmental risk, both for trains and infrastructure. Just think of the disappearance of the ancient steam locomotives, the more modern and high quality concepts of passenger wagons and high speed trains, with innovative devices also for construction and maintenance.*

*In this context, the investment plans for optimising the network require the prior assessment of the noise impact from railway traffic, analysing, case by case, both the specific noise emission source and the sensitivity and vulnerability of the territory, considering for the first aspect the energy contribution (sound intensity and emission frequency) provided by the different sources to the perceived noise of the receiver:*

- engine noise;
- rolling impact;
- aerodynamic noise (important in entering/exiting tunnels);
- accidental pollution (braking phenomenon, etc.).

*The noise contribution of the motor, apart from the component due to its rolling, depends strongly on the type of propulsion adopted. Furthermore, to analyse the actual acoustic scenario generated, other significant aspects of the phenomenon must be considered, such as the vibrations of the pistons, the movement of the gears and the fans, the injection of fuel.*

*With regard to electric-powered trains, which now represent almost all on European and international lines, the motor is no longer the main source of noise, the emission due to rolling (rail-wheel impact) resulting dominant<sup>(9)</sup>. This, espe-*

<sup>(9)</sup> The protection of a tunnel, where the absorbent aspect is fundamental, requires different products than the containment of the railway-town impact, in which the sound-insulating power of the barrier is more important. In the latter case, particular attention must be paid to the design analysis of the device's resistance to wind, its own weight, the action of fire and other specific risk factors (weather-climatic conditions, any physical, chemical agents, etc.).

ed internazionali, la motrice non costituisce più la sorgente principale di rumore, risultando dominante l'emissione dovuta al rotolamento (impatto ruota-rotaia)<sup>(9)</sup>. Questo, soprattutto nel caso di elevate velocità d'esercizio, maschera completamente sia la componente dovuta al fenomeno della magnetostrizione del motore (deformazione causata dalla magnetizzazione) che il contributo acustico fornito dal contatto linea aerea-pantografo.

Il rumore da rotolamento del veicolo ferroviario è emesso dalla ruota, che si comporta come una sorgente estremamente direttiva (dipolo acustico). La potenza acustica emessa dalla ruota, indicando con  $V$  la velocità del convoglio e con  $F$  la forza trasmessa della ruota alla rotaia, si può approssimativamente esprimere nel modo seguente:

$$L_w = 30 \log V + 20 \log F + C_{te} \quad (24)$$

Le ruote maggiormente caricate del convoglio (motrice) sono generalmente le più rumorose e l'emissione da rotolamento dipende dalla natura e dalle caratteristiche del binario. In rapporto, ad esempio, ad una lunga rotaia saldata in acciaio duro, un binario tradizionale emette un rumore da 5 a 15 dB superiore, a seconda del suo stato di mantenimento in esercizio. Le case costruttrici dei convogli, li hanno ormai dotati di elementi strutturali e meccanici innovativi che contribuiscono *ex ante* a intervenire sulle principali sorgenti (ruota e freni) con materiali ad impatto minimo (come, ad esempio, ruote silenziate con materiale viscoelastico o polimerico, ovvero con assorbitori - mostrati in Fig. 8, freni a ceppi di materiale composito che riducono già da soli di circa 10 dB(A) l'inquinamento rispetto a quelli in ghisa, etc.).

Il rumore aerodinamico, trascurabile alle velocità tabellari classiche, può diventare invece preponderante alle grandi velocità ( $V > 200$  km/h), in quanto cresce circa con la sesta potenza, come mostrato in Fig. 9.

Infine, la frenatura può provocare un livello sonoro particolarmente elevato su certi materiali, a causa della messa in risonanza della ruota o eventualmente del disco di frenatura (importante è anche l'ammortizzamento della ruota) [18].

In termini di propagazione, un treno può essere assimilato ad una sorgente lineare finita che irradia fronti d'onda emis cilindrici: un osservatore che si allontana progressivamente dall'asse del binario, sarà interessato da condizioni di decadimento del livello sonoro teoricamente definibili come segue:

<sup>(9)</sup> In molti casi, come sui ponti in ferro, non è tanto l'interazione ruota-rotaia che genera la componente principale di rumore, ma piuttosto la vibrazione dell'intero complesso che sostiene i binari. Pertanto, occorre intervenire sulla sovrastruttura, concepando e dimensionando quest'ultima in modo tale da minimizzare l'impatto in esercizio. Ad esempio, si potrebbe intervenire realizzando il binario su platea flottante, ovvero una platea prefabbricata "immersa" in materiale resiliente in grado di assorbire le vibrazioni.



Fig. 8 – Ruota silenziata con assorbitori acustici.  
Fig. 8 – Silenced wheel with acoustic absorbers.

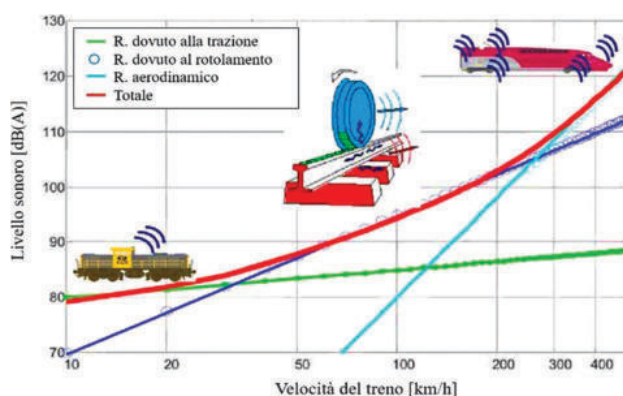


Fig. 9 – Relazione funzionale tra livello di pressione sonora e velocità d'esercizio.

Fig. 9 – Functional relation between sound pressure level and operation speed.

cially in the case of high operating speeds, completely masks both the component due to the phenomenon of motor magnetostriction (deformation caused by magnetisation) and the acoustic contribution provided by the overhead line – pantograph contact.

The rolling noise of the railway vehicle is emitted by the wheel, which acts as an extremely directive source (acoustic dipole). The sound power emitted by the wheel, indicating with  $V$  the speed of the train and with  $F$  the force transmitted by the wheel to the rail, can be roughly expressed as follows:

$$L_w = 30 \log V + 20 \log F + C_{te} \quad (24)$$

The most heavily loaded wheels of the train (motor) are generally the noisiest and the rolling emission depends on the nature and characteristics of the track. In relation, for example, to a long welded hard steel rail, a traditional track emits a noise from 5 to 15 dB higher, depending on its maintenance conditions. Manufacturers of trains have now equipped them with innovative structural and mechanical elements that contribute *ex ante* to work on the main sources (wheel and brakes) with minimal impact materials



- 3 dB per ogni raddoppio della distanza fino a distanze inferiori o uguali ad  $L/\pi$ , dove  $L$  è la lunghezza del treno;
- 6 dB per ogni raddoppio della distanza per distanze dell'osservatore superiori a tale valore.

Grazie all'indagine svolta da ROMANI e VENTURA [19], la suddetta teoria è verificata sperimentalmente in condizioni di propagazione in campo libero ed in assenza di ostacoli e di attenuazioni aggiuntive consistenti. I risultati dei rilievi affermano che i valori ottenuti si allineano ottimamente con le previsioni. Al fine di prevedere i livelli sonori a varie distanze dalle linee ferroviarie, sono state messe a punto varie formule, tutte desunte da elaborazioni degli stessi dati sperimentali.

Per avere un utile riferimento nelle stime previsionali dell'impatto acustico ambientale per la progettazione di una nuova linea ferroviaria o per la pianificazione residenziale di un'area nelle adiacenze di un'opera già esistente, si può determinare il livello sonoro massimo dovuto al passaggio di un convoglio attraverso la formula:

$$L_{max} = L_0 + 30 \log \frac{V}{V_0} - K \log \frac{D}{D_0} \quad (25)$$

In tale formula  $L_0$  è il livello sonoro in dB(A) misurato alla distanza  $D_0$  che, per convenzione internazionale, risulta pari a 25 m dall'asse-binario.

Si può assumere nei calcoli il valore  $L_0 = 85$  dB(A) per un treno passeggeri che viaggia alla velocità  $V_0 = 140$  km/h, mentre  $K$  è una costante che ha valori compresi tra  $K = 10$  (propagazione cilindrica perfetta per treni molto lunghi) e  $K = 20$  (propagazione sferica per motrici o convogli cortissimi).

Partendo dal livello massimo in dB(A) così calcolato è noto il tempo di durata che può essere ricavato dalla seguente espressione:

$$t_s = \frac{L}{V} + \frac{6D}{100} \quad (26)$$

con:

$L$  = lunghezza del treno;

$V$  = velocità del convoglio;

$D$  = distanza ricettore-ferrovia.

risulta allora possibile calcolare il livello equivalente continuo  $L_{eq}$  per il passaggio di un treno all'ora, mediante la relazione:

$$L_{eq} = \log \left( \frac{t_s}{3600} \times 10^{\frac{L_{max}}{10}} \right) \quad (27)$$

Il livello equivalente complessivo  $L_{eq(n)}$ , cioè il livello sonoro per il passaggio di  $n$  treni dello stesso tipo in un'ora, si ottiene come segue:

$$L_{eq(n)} = L_{eq} + 10 \log n \quad (28)$$

Se, invece, i treni sono di diverso tipo e viaggiano a diverse velocità, si sommano i differenti  $L_{eq}$  calcolati per ogni singolo caso.

(such as, for example, silenced wheels with viscoelastic or polymeric material, or with absorbers - shown in Fig. 8, brake pads of composite material that already reduce pollution by about 10 dB(A) compared to those in cast iron, etc.).

The aerodynamic noise, which is negligible at classic table speeds, can instead become predominant at great speeds ( $V > 200$  km/h), as it grows approximately with the sixth power, as shown in Fig. 9.

Finally, braking can cause a particularly high sound level on certain materials, due to the resonance of the wheel or possibly the braking disk (the cushioning of the wheel is also important) [18].

In terms of propagation, a train can be assimilated to a finite linear source that radiates semi-cylindric wave fronts: an observer that progressively moves away from the track axis, will be affected by sound level decay conditions theoretically definable as follows:

- 3 dB for each doubling of the distance up to distances less than or equal to  $L/\pi$ , where  $L$  is the length of the train;
- 6 dB for each doubling of the distance for observer distances greater than this value.

Thanks to the investigation carried out by ROMANI and VENTURA [19], the aforementioned theory is experimentally verified in free field propagation conditions and in the absence of obstacles and substantial additional attenuations. The results of the surveys state that the values obtained are very well in line with the forecasts. In order to foresee sound levels at various distances from the railway lines, various formulas have been developed, all derived from elaborations of the same experimental data.

In order to have a useful reference in the forecast estimates of the environmental acoustic impact for the design of a new railway line or for the residential planning of an area adjacent to an already existing work, the maximum sound level due to the passage of a convoy can be determined through the formula:

$$L_{max} = L_0 + 30 \log \frac{V}{V_0} - K \log \frac{D}{D_0} \quad (25)$$

In this formula  $L_0$  is the sound level in dB(A) measured at distance  $D_0$  which, by international convention, is equal to 25 m from the centre-line of the track.

In the calculations we can assume the value  $L_0 = 85$  dB(A) for a passenger train travelling at the speed  $V_0 = 140$  km/h, while  $K$  is a constant that has values between  $K = 10$  (perfect cylindrical propagation for very long trains) and  $K = 20$  (spherical propagation for very short vehicles or trains).

Starting from the maximum level in dB(A) thus calculated and knowing the duration time that can be obtained from the following expression:

$$t_s = \frac{L}{V} + \frac{6D}{100} \quad (26)$$

with:

Per quanto attiene l'impatto da rumore, ha rilevanza anche la frequenza di emissione del suono da parte della sorgente: per frequenze inferiori a 630÷800 Hz, i livelli di pressione sonora dei treni merci superano quelli dei treni passeggeri e, per entrambi i tipi di convogli, le componenti più elevate si attestano tra i 500 ed i 2000 Hz.

In ogni caso, come noto, fin dalla fase progettuale risulta possibile agire per minimizzare, con opportuni accorgimenti costruttivi dei materiali costituenti l'infrastruttura, l'impatto acustico nel territorio, anche in ottemperanza al Decreto 29 Novembre 2000 [20], che stabilisce un ordine di priorità secondo il quale occorre intervenire prima di tutto sulla sorgente, poi eventualmente sulla linea di propagazione del suono e, in ultima analisi, sul recettore sensibile. In tal senso, un elemento di ottimizzazione progettuale potrebbe consistere nell'adozione di appositi smorzatori alla rotaia, prevedendo per un tratto più o meno esteso del gambo del binario delle strisce di materiale resiliente, in genere composto da un polimero, opportunamente sostenuto da una sorta di telaio in materiale metallico, ovvero immergendovi tutta la rotaia.

Inoltre, recentemente si è cercato anche di valutare la possibilità di intervenire anche sulla stessa geometria della rotaia, conformandola in modo da ottenere il ricercato effetto di mitigazione del rumore, adoperando particolari profili sperimentali, come quello rappresentato in Fig. 10 e riportante la denominazione VA71b, rispetto alla classica forma UIC60.

Spesso, tuttavia, il rilevante grado di inquinamento acustico e la sensibilità dei recettori presenti nell'area territoriale interessata dall'opera ferroviaria impone la necessità di raggiungere particolari livelli di attenuazione che richiedono soluzioni che agiscano soprattutto sulla propagazione. Per tale finalità, ove le caratteristiche della linea e lo sviluppo plano-altimetrico del tracciato lo consenta, l'opzione progettuale di prevedere il passaggio della linea ferroviaria

$L$  = train length;

$V$  = train speed;

$D$  = receptor-rail distance.

it is then possible to calculate the continuous equivalent level  $L_{eq}$  for the passage of a train per hour, through the relation:

$$L_{eq} = \log \left( \frac{t_s}{3600} \times 10^{\frac{L_{max}}{10}} \right) \quad (27)$$

The overall equivalent level  $L_{eq(n)}$ , i.e. the sound level for the passage of  $n$  trains of the same type in an hour, is obtained as follows:

$$L_{eq(n)} = L_{eq} + 10 \log n \quad (28)$$

If, on the other hand, the trains are of different types and travel at different speeds, the different  $L_{eq}$ s calculated for each individual case are added.

As regards the noise impact, the frequency of sound emission from the source is also relevant: for frequencies below 630 ÷ 800 Hz, the sound pressure levels of freight trains exceed those of passenger trains and, for both types of trains, the highest components are between 500 and 2000 Hz.

In any case, as is known, from the planning stage it is possible to act to minimise the acoustic impact in the territory, with appropriate construction solutions of the infrastructure materials, also in compliance with the Decree of 29 November 2000 [20], which establishes a priority order according to which it is necessary to intervene first of all on the source, then possibly on the sound propagation line and, ultimately, on the sensitive receptor. In this sense, a design optimisation element could consist in the adoption of suitable dampers on the rail, providing for a more or less extended portion of the web of the rail of resilient material, generally composed of a polymer, suitably supported by a kind of frame in metallic material, that is immersing all the rail therein.

Moreover, recent attempts have also been made to evaluate the possibility of intervening also on the geometry of the rail itself, conforming it so as to obtain the sought-after noise mitigation effect, using particular experimental profiles, such as the one shown in Fig. 10 and bearing the name VA71b, compared to the classic UIC60 shape.

Often, however, the significant degree of noise pollution and the sensitivity of the receptors present in the territorial area affected by the railway work imposes the need to reach particular levels of attenuation that require solutions that act above all on propagation. For this purpose, where the characteristics of the line and the plano-altimetric development of the route allow it, the project option to provide for the

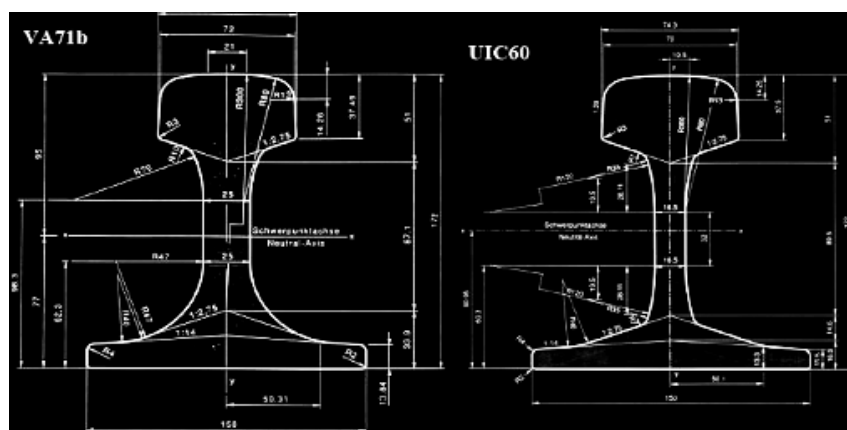


Fig. 10 – Confronto fra una rotaia con profilo “antirumore” e la UIC60.  
Fig. 10 – Comparison between a rail with “anti-noise” profile and the UIC60.

in trincea sarebbe l'accorgimento preferenziale per ottenere i suddetti benefici di protezione acustica: uno sterro di 2 m o una scarpata costituiscono già un eccellente schermo che può portare fino ad 8÷10 dB(A) di attenuazione dell'onda di pressione sonora emessa dai convogli in transito.

L'installazione di schermi artificiali per l'ottimizzazione della correlazione ferrovia-ambiente deve costituire, fra le scelte di progetto, l'ultima soluzione da attuare: non solo per i costi di realizzazione, ma soprattutto per la disarmonia architettonica che un manufatto artificiale crea nel contesto paesaggistico di pertinenza. Occorre semmai preferire – compatibilmente con il budget e la disponibilità degli spazi *in situ* – il ricorso a barriere vegetali.

Recentemente, per minimizzare i problemi di inquinamento paesaggistico dovuto alle barriere acustiche, in ambito ferroviario ha trovato opportuna applicazione l'impiego degli schermi bassi (Fig. 11) che funzionano esattamente secondo il principio delle barriere, ma tendono a schermare solo le ruote del convoglio. Visto che il rumore da rotolamento presenta un'emissione limitata entro i 30° sopra e sotto il piano del ferro, schermando tale diffusione nelle immediate vicinanze del binario è possibile ottenere già una buona attenuazione. Tali barriere hanno, però, un carattere puntuale e risultano efficaci solo in punti singolari del tracciato, come curve strette o in presenza di recettori sensibili localizzati.

Tutti i dispositivi per la riduzione del rumore devono essere progettati in funzione dell'effettiva prestazione acustica da conseguire in esercizio e del particolare punto del tracciato dove devono essere collocati<sup>(10)</sup>, al fine di riuscire a dimensionare al meglio ogni relativa caratteristica tipologica e costruttiva, nonché dei materiali compositivi e delle loro qualità, quali assorbimento, isolamento acustico ed efficacia acustica. Inoltre, la resa acustica del manufatto dipende dal sistema di montaggio e posa in opera, visto che ogni eventuale intercapedine creata nel dispositivo può essere sfruttata dal segnale sonoro per propagarsi, rendendo così inefficace il sistema di protezione.

Si suole distinguere tra barriere acustiche naturali, costituite da terrapieni, fasce alberate o ostacoli naturali, e barriere acustiche artificiali, formate da pannelli verticali di spessore limitato, realizzati con vari materiali. Le prime hanno un ottimo impatto paesaggistico, ma necessitano di grandi spazi e richiedono tempi notevoli per la crescita delle specie arboree. Le barriere artificiali a pannello sono invece caratterizzate dalla leggerezza, dal limitato ingombro e della immediata operatività, ma hanno un impatto visivo notevole.



Fig. 11 – Esempio di barriere acustiche basse.  
Fig. 11 – Example of low acoustic barriers.

*passage of the railway line in the cutting would be the preferential arrangement for obtaining the aforementioned benefits of acoustic protection: a cutting of 2 m or an embankment already constitute an excellent screen that can bring up to 8÷10 dB(A) of attenuation of the sound pressure wave emitted by trains in transit.*

*The installation of artificial barrier for the optimisation of the railroad-environment correlation must constitute, among the design choices, the last solution to be implemented: not only for the construction costs, but above all for the architectural disharmony that an artificial artefact creates in the relevant landscape context. If anything, it is preferable to use plant barriers - compatibly with the budget and the availability of the spaces in situ.*

*Recently, in order to minimise the problems of landscape pollution due to acoustic barriers, in the railway sector the use of low barriers (Fig. 11) that work exactly according to the principle of barriers, but tend to shield only the wheels of the train, has been opportune. Since the rolling noise has a limited emission within 30° above and below the upper surface of the rail, a good attenuation can already be obtained by shielding this diffusion in the immediate vicinity of the track. However, these barriers have a precise character and are effective only in singular points of the route, such as tight curves or in the presence of localised sensitive receptors.*

*All noise reduction devices must be designed according to the actual acoustic performance to be achieved in operation and to the particular point of the route where they must be located<sup>(10)</sup>, in order to be able to best size each related typological and constructive feature, as well as constituent materials and their qualities, such as absorption, acoustic insulation and acoustic effectiveness. Furthermore, the acoustic performance of the product depends on the assembly and installation system, since any cavity created in the*

<sup>(10)</sup> La protezione di una galleria, dove l'aspetto assorbente è fondamentale, richiede prodotti diversi rispetto al contenimento dell'impatto ferrovia-centro abitato, in cui è più importante il potere fonoisolante della barriera. In quest'ultimo caso, particolare attenzione dovrà porsi all'analisi progettuale della resistenza del dispositivo al vento, al peso proprio, all'azione del fuoco e ad altri fattori di rischio specifico (meteo-climatici, eventuali agenti fisici, chimici, etc.).

<sup>(10)</sup> The protection of a tunnel, where the absorbent aspect is fundamental, requires different products than the containment of the railway-town impact, in which the sound-insulating power of the barrier is more important. In the latter case, particular attention must be paid to the design analysis of the device's resistance to wind, its own weight, the action of fire and other specific risk factors (weather-climatic conditions, any physical, chemical agents, etc.).



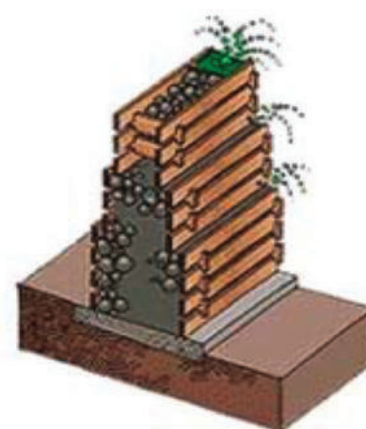


Fig. 12 – Esempi di barriera a verde e di biomuro.  
Fig. 12 – Examples of green barriers and ecological wall.

Le barriere naturali possono essere messe in pratica realizzando fasce alberate, biomuri o muri verdi, (composti da una struttura a gabbia metallica riempita con una miscela di terra nella quale viene seminata vegetazione rampicante).

Le fasce alberate con funzione antirumore sono costituite da filari di alberi, di specie diverse, che formano una barriera vegetale che si oppone al trasferimento del suono, mentre i biomuri sono formati da elementi portanti in cemento armato, legno o altri materiali che contengono la terra, nella quale vengono piantate le essenze vegetali (Fig. 12). Queste ultime devono essere scelte in relazione alle caratteristiche climatiche, edafiche, floristiche e di dinamismo vegetazionale delle fasce vegetazionali del territorio interessato, per armonizzare l'opera con il paesaggio agrario e per garantire il necessario fabbisogno irriguo.

Le opere a verde, per inserirsi opportunamente nel contesto ecosistemico e riuscire a colonizzare i microambienti di pertinenza, devono efficacemente integrarsi con la specifica fascia vegetazionale del territorio e con le associazioni vegetali caratterizzanti. A tal fine, come utile strumento operativo di ausilio alla pratica progettazione delle barriere, possono essere utilizzate apposite tabelle di riferimento, in cui sono riportate le due principali zone climatiche della penisola italiana (mediterranea e medioeuropea), con le relative associazioni vegetali di appartenenza (Tabella 8).

device can be exploited by the sound signal to propagate itself, thus making the protection system ineffective.

Tabella 8 – Table 8

Zone climatiche ed associazioni vegetali  
Climatic zones and plant associations

|                                           | Fascia<br>Area                       | Temperatura Media<br>Average temperature | Associazioni vegetali<br>e piante<br>Plant and vegetable associations                                                                       |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zona medioeuropea<br>Middle European area | Alpica<br>Alp                        | 1°C                                      | Curvuletum e Festucetum halleri<br><i>Curvuletum and Festucetum halleri</i>                                                                 |
|                                           | Boreale<br>Boreal                    | 4°C                                      | Boschi di Conifere-Pinus cerubra,<br>Mugo, Sylvestris e Nigra<br><i>Woods of Conifers-Pinus cerubra,<br/>Mugo, Sylvestris and Nigra</i>     |
|                                           | Subatlantica<br>Sub-Atlantic         | 8°C                                      | Boschi di faggi<br><i>Beech woods</i>                                                                                                       |
|                                           | Medioeuropea<br>Middle European area | 11-13°C                                  | Boschi misti a dominanza di<br>Querce<br><i>Mixed woods dominated by oaks</i>                                                               |
| Zona mediterranea<br>Mediterranean zone   | Altomontana<br>High mountain         | 1°C                                      | Praterie a Sesleria e Care<br><i>Sesleria and Carex prairies</i>                                                                            |
|                                           | Irano-Nevadese<br>Irano-Nevadese     | 5°C                                      | Arbusti emisferici spinosi<br><i>Spherical hemispherical shrubs</i>                                                                         |
|                                           | Sannitica<br>Samnite                 | 11-13°C                                  | Foresta mista a prevalenza di<br>Querce, Aceri, Ontani, Prunus<br><i>Mixed forest with a prevalence of<br/>Oaks, Maples, Alders, Prunus</i> |
|                                           | Colchica<br>Colchicum                | 8°C                                      | Bosco misto sempreverde<br><i>Mixed evergreen forest</i>                                                                                    |
|                                           | Temperata<br>Temperate               | 15°C                                     | Quercetum ilicis-Olivo-Lentisco-<br>Pinus halepensis<br><i>Quercetum ilicis-Olive-Lentisco-<br/>Pinus halepensis</i>                        |
|                                           | Arida<br>Dry                         | 18°C                                     | Oleo-Ceratonion-Olivo, Mandorlo,<br>Carrubo<br><i>Oleo-Ceratonion-Olive, Almond,<br/>Carob</i>                                              |

Tabella 9 – Table 9

Zone climatiche ed associazioni vegetali per il sud Italia e le isole  
Climatic areas and plant associations for southern Italy and the islands

| Fascia Area                              | Altitudine Altitude                    | Temperatura Media Average temperature | Raggruppamento Fitosociologico Phytosociological grouping | Specie caratteristiche Characteristic species                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mediterranea Arida<br>Mediterranean Arid | 0-200 m s.l.m.<br>0-200 a.s.l.         | 18°C                                  | Oleo-Ceratonion                                           | <i>Olee olester</i><br><i>Cerantonia silliqua</i><br><i>Anagitis foetida</i><br><i>Rhamnus oleoides</i><br><i>Artemisia arborescens</i><br><i>Myrtus communis</i><br><i>Pistacia lentiscus</i><br><i>Juniperus phoenicea</i> |
| Mediterranea<br>Mediterranean            | 200-900 m s.l.m.<br>200-900 m a.s.l.   | 15°C                                  | Quercion-Ilicis                                           | <i>Quercus ilex</i><br><i>Laurus nobilis</i><br><i>Quercus suber</i><br><i>Erica arborea</i><br><i>Rhamnus alaternus</i><br><i>Rosa sempervirens</i><br><i>Arbutus unedo</i><br><i>Spartium junceum</i>                      |
| Sannitica<br>Sannite                     | 900-1400 m s.l.m.<br>900-1400 m a.s.l. | 10-13°C                               | Quercion-Pubescenti<br>Petraeae                           | <i>Quercus cerris</i><br><i>Quercus pubescens</i><br><i>Quercus virgiliana</i><br><i>Quercus congesta</i><br><i>Castanea sativa</i><br><i>Acer pseudoplatanus</i><br><i>Buxus sempervirens</i>                               |

Inoltre, per le aree del Sud e quelle insulari, si è realizzato un ulteriore screening fitosociologico di maggiore dettaglio, considerando anche l'altitudine ed indicando alcune delle specie caratteristiche del paesaggio agrario da impiegare nell'impianto (Tabella 9).

Nelle aree del mezzogiorno, oltre al paesaggio dell'Aremonio-Fagion, con dominanza del Faggio che riguarda solo alcune ristrette zone di montagna, le formazioni vegetali sono essenzialmente caratterizzati dai tre paesaggi-tipo dell'Oleo-Ceratonion, del Quercion-Ilicis e del Quercion-Pubescenti-Petraeae.

Quando le barriere acustiche vegetali non possono trovare adeguata applicazione per risolvere i problemi di impatto da rumore ferroviario, si può comunque ricorrere a quelle artificiali [21]. Tali manufatti vengono classificati in base all'altezza ed in funzione del materiale con cui sono costruiti: essi si distinguono in barriere di piccola altezza (fino a 2 m), di media altezza (da 2 a 6 m) e di grande altezza (maggiore di 6 m). In base alla tipologia del materiale utilizzato, esistono barriere in lamine metalliche di alluminio, in pannelli di legno, in pannelli misti legno-alluminio, in calcestruzzo armato portante ed argilla espansa, in calcestruzzo alleggerito in piastre, in lastre in polimetilmetacrilato, vetro o policarbonato, etc.

Per meglio caratterizzare il problema in studio, in Fig. 13, è mostrato un esempio di comportamento acustico (da risultanze sperimentali [19]) di uno schermo di 1,5 m di

Natural acoustic barriers, consisting of embankments, tree-lined strips or natural obstacles are usually distinguished from artificial acoustic barriers, formed by vertical panels of limited thickness, made of various materials. The former have an excellent impact on the landscape, but require large spaces and considerable time for the growth of tree species. Artificial panel barriers, on the other hand, are characterised by lightness, limited space and immediate operation, but have a noticeable visual impact.

Natural barriers can be put into practice by creating tree-lined strips, ecological wall or green walls, (composed of a metal cage structure filled with a mixture of earth in which climbing vegetation is sown).

The tree-lined strips with anti-noise function are made up of rows of trees, of different species, which form a plant barrier that contrasts the transfer of sound, while the ecological wall are formed by load-bearing elements in reinforced concrete, wood or other materials that contain the earth, in which plant essences are planted (Fig. 12).

The latter must be chosen in relation to the climatic, edaphic, floristic and vegetation dynamism of the vegetation areas of the territory concerned, to harmonise the work with the agricultural landscape and to guarantee the necessary irrigation requirements.

For the green works to fit appropriately in the ecosystem context and succeed in colonising the relevant micro-environments, they must effectively integrate with the specific vegetation area of the territory and with the characteristic plant associations. To this end, specific reference tables can be used as a useful operating tool to aid the practical design of the barriers, which show the two main climatic zones of the Italian peninsula (Mediterranean and Middle-European), with the relative plant associations to which they belong (Table 8).

Furthermore, for the southern and island areas, a further phytosociological screening was carried out in greater detail, considering also the altitude and indicating some of the characteristic species of the agricultural landscape to be used in the system (Table 9).

In the areas of the south, in addition to the landscape of the Aremonio-Fagion, with dominance of the Beech that concerns only some restricted mountain areas, the vegetation is essentially characterised by the three typical Oleo-Ceratonion, Quercion-Ilicis and Quercion-pubescent-Petraeae landscapes.

When acoustic plant barriers cannot find adequate application to solve the problems of impact from railway

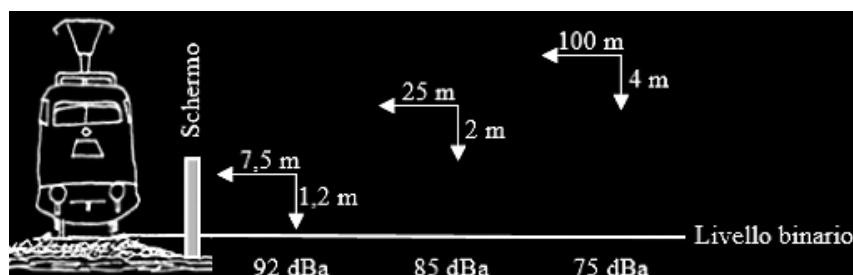


Fig. 13 – Comportamento acustico di uno schermo.  
Fig. 13 – Acoustic behaviour of a screen.

altezza posto a ridosso di una linea ferroviaria. Le misure del livello di potenza sonora sono state effettuate a distanze ed altezze crescenti e durante il passaggio di un treno con velocità di 250 km/h.

Rilevante importanza assume la progettazione sia della conformazione della barriera che dei suoi elementi compositivi, visto che anche il disegno costruttivo può fornire un ulteriore contributo per migliorare il contenimento dell'impatto acustico della ferrovia sul territorio, come dimostra lo schema del dispositivo riportato in Fig. 14, che presenta dogature orizzontali con possibilità di riflettere il rumore generato dal treno verso il basso, utilizzando così la capacità fonoassorbente del *ballast* della piattaforma ferroviaria.

### 3.2. La progettazione di uno schermo acustico

Da un punto di vista fisico, il principio secondo il quale uno schermo agisce quando viene interposto su un percorso di propagazione sonora, è quello della diffrazione. In pratica, nella zona retrostante allo schermo, si modifi-

noise, it is however possible to resort to artificial ones [21]. These artefacts are classified according to their height and according to the material they are made of: they are divided into small height (up to 2 m), medium height (from 2 to 6 m) and great height barriers (greater than 6 m). Depending on the type of material used, there are barriers in aluminium metal foil, in wood panels, in mixed wood-aluminium panels, in reinforced concrete and expanded clay, in lightened concrete in plates, in polymethylmethacrylate, glass or polycarbonate sheets, etc.

To better characterise the problem under study, an example of acoustic behaviour is shown in Fig. 13, (from experimental results [19]) of a 1.5 metre high screen placed near a railway line. The sound power level measurements were made at increasing distances and heights and during the transit of a train running at 250 km/h.

The design of both the conformation of the barrier and its compositional elements is of great importance, given that even the construction design can provide a further contribution to improving the containment of the acoustic impact of the railway on the territory, as shown by the layout of the device shown in Fig. 14, which has horizontal slats with the possibility of reflecting downwards the noise generated by the train, thus using the sound-absorbing capacity of the ballast of the railway platform.

### 3.2. Design of an acoustic barrier

From a physical point of view, the principle according to which a screen acts when it is interposed on a sound propagation path is that of diffraction. In practice, in the area be-

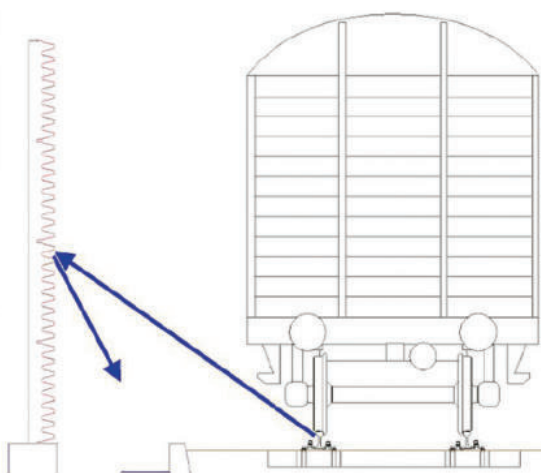


Fig. 14 – Barriera acustica con dogatura orizzontale.  
Fig. 14 – Acoustic barrier with horizontal slats.



cano le condizioni di propagazione a seguito della creazione di zone di ombra acustica differenziate secondo le varie frequenze del suono incidente. In assoluto, l'efficienza di uno schermo, intesa come estensione dell'attenuazione, è rilevante per le frequenze medio-alte e scarsa per le basse frequenze.

La presenza di un ostacolo tra sorgente e ricevitore attenua la propagazione dell'onda acustica. In generale infatti un'onda acustica, interagendo con una superficie, viene in parte riflessa, in parte assorbita ed in parte trasmessa; quindi, agendo allora sulle dimensioni dell'ostacolo si può intervenire fino ad annullare la trasmissione acustica.

Le interazioni infrastruttura-veicolo-ambiente dipendono, tuttavia, da diversi elementi al contorno, caratterizzabili attraverso una serie di fattori che influenzano la propagazione del rumore e, di conseguenza, l'impatto acustico da minimizzare, quali:

- tipo di sorgente (treno passeggeri, convoglio merci e caratteristiche relative);
- distanza sorgente-ricevente;
- tipologia della sezione (trincea, rilevato, mezzacosta, viadotto, etc.);
- assorbimento acustico-atmosferico<sup>(11)</sup>;
- vento, temperatura e gradiente termico;
- ostacoli (barriere o fabbricati) ed assorbimento del suolo;
- riflessioni dell'onda sonora;
- umidità, precipitazioni e fenomeni di inversione termica in atmosfera.

Le soluzioni, pertanto, dovranno essere individuate caso per caso, analizzando il relativo grado di rischio per la popolazione e, più generalmente, tutta la componente biotica interessata (fauna avicola, etc.), nonché valutando il complesso di diseconomie generate nell'area vasta, anche per la diminuzione del valore dei beni immobili ivi ricadenti.

Le barriere vengono realizzate con materiale compatto, con massa superficiale almeno pari a 20 kg/m<sup>2</sup>, in modo che possa essere trascurata l'energia sonora che si trasmette attraverso la barriera. Tuttavia, se la lunghezza d'onda del rumore incidente è paragonabile con le dimensioni dell'ostacolo o con le dimensioni delle asperità presenti sulla sua superficie, si innesca il fenomeno della diffrazione; ogni punto in cui si ha diffrazione diventa allora origine di onde acustiche che si propagano nel mezzo. In questo caso l'onda acustica aggira l'ostacolo per cui, anche se la sorgente ed il ricevitore non sono mutuamente visibili, parte dell'energia acustica raggiunge il ricevitore. La presenza di una barriera acustica limita la trasmissio-

*hind the barrier, the propagation conditions change following the creation of acoustic shadow areas differentiated according to the various frequencies of the affecting sound. In absolute terms, the efficiency of a screen, understood as an extension of the attenuation, is relevant for medium-high frequencies and scarce for low frequencies.*

*The presence of an obstacle between the source and receiver reduces the propagation of the acoustic wave. In fact generally an acoustic wave, interacting with a surface, is partly reflected, partly absorbed and partly transmitted; therefore, acting then on the size of the obstacle it is possible to intervene until the acoustic transmission is cancelled.*

*However, infrastructure-vehicle-environment interactions depend on different surrounding elements, which can be featured by a number of factors that influence the propagation of noise and, consequently, the acoustic impact to be minimised, such as:*

- *type of source (passenger train, freight train and related characteristics);*
- *source-receiver distance;*
- *type of section (cutting, embankment, hillside, viaduct, etc.);*
- *acoustic-atmospheric absorption<sup>(11)</sup>;*
- *wind, temperature and thermal gradient;*
- *obstacles (barriers or buildings) and soil absorption;*
- *sound wave reflections;*
- *humidity, precipitation and thermal inversion phenomena in the atmosphere.*

*The solutions, therefore, will have to be identified case by case, analysing the relative degree of risk for the population and, more generally, all the biotic component involved (poultry fauna, etc.), as well as evaluating the complex of diseconomies generated in the vast area, also for the decrease in the value of the immovable property falling therein.*

*The barriers are made of compact material, with a surface mass of at least 20 kg/m<sup>2</sup>, so that the sound energy transmitted through the barrier can be ignored. However, if the wavelength of the incident noise is comparable with the size of the obstacle or with the dimensions of the asperities present on its surface, the phenomenon of diffraction is triggered; every point in which there is diffraction then becomes the origin of acoustic waves that propagate in the medium. In this case the acoustic wave bypasses the obstacle so that, even if the source and the receiver are not mutually visible, part of the acoustic energy reaches the receiver. The presence of an acoustic barrier limits the transmission of acoustic energy, but it cannot completely cancel the level at the receiver, because the phenomenon of diffraction is triggered*

<sup>(11)</sup> L'indice di assorbimento dell'aria (A) si misura in dB/Km e dipende dalla frequenza f e dall'Umidità Relativa (U.R.); la norma UNI ISO 9613-2:2006 [22] stabilisce i valori di A in funzione di f e U.R.

<sup>(11)</sup> The air absorption index (A) is measured in dB/Km and depends on frequency f and Relative Humidity (RH); the UNI ISO 9613-2: 2006 [22] standard establishes the values of A as a function of f and R. U.

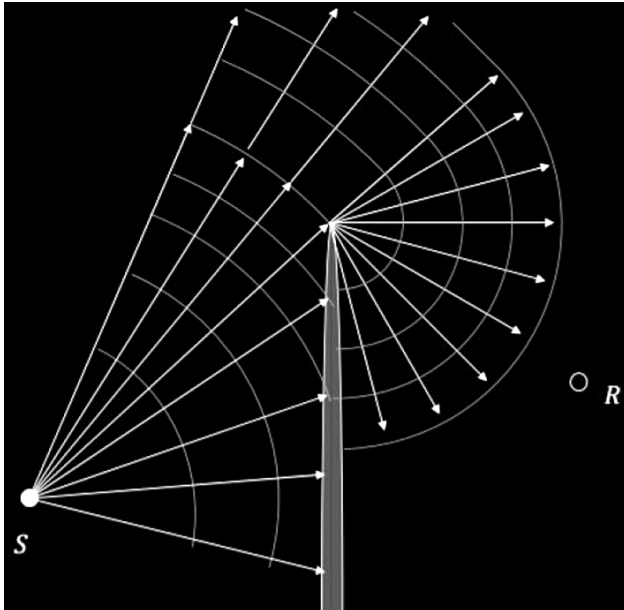


Fig. 15 – Fenomeno della diffrazione in una barriera acustica.  
Fig. 15 – Phenomenon of diffraction in an acoustic barrier.

ne dell'energia acustica, ma non può completamente annullare il livello al ricevitore, perché si innesca il fenomeno della diffrazione che consente all'onda sonora di "scalcare" la barriera (Fig. 15).

L'efficacia acustica di una barriera può essere valutata tramite un indicatore specifico, definito perdita per inserzione (*Insertion Loss*), indicato con  $IL$ , che rappresenta la differenza tra il livello acustico *ante operam* che si ha al ricevitore in assenza della barriera,  $L_a$ , e quello *post operam*, cioè a seguito della costruzione della barriera,  $L_b$ :

$$IL = L_a - L_b \quad (29)$$

Tuttavia, per una valutazione rigorosa dell'attenuazione prodotta da una barriera artificiale occorre fare riferimento a più complesse formulazioni matematiche basate sulla teoria della diffrazione di Fresnel-Kirchhoff, ovvero ad altri metodi scientifici riportati in letteratura tecnica di settore. Di seguito è illustrato, a titolo esemplificativo, il metodo di Kurze ed Anderson [23], secondo cui l'attenuazione  $K$  di una barriera acustica semi infinita viene valutata con la seguente relazione (valida per sorgenti puntiformi e per  $N > 0,2$ ):

$$K = 20 \log \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} + 5 \quad (30)$$

con  $N$  numero di Fresnel pari a:

$$N = \pm \frac{2}{\lambda} (A + B - d) \quad (31)$$

which allows the sound wave to "climb over" the barrier (Fig. 15).

The acoustic effectiveness of a barrier can be evaluated by means of a specific indicator, defined insertion loss, indicated with  $IL$  which represents the difference between the ante operam noise level that occurs at the receiver in the absence of the barrier,  $L_a$ , and the post operam one, i.e. following the construction of the barrier,  $L_b$ :

$$IL = L_a - L_b \quad (29)$$

However, for a rigorous evaluation of the attenuation produced by an artificial barrier it is necessary to refer to more complex mathematical formulations based on the Fresnel-Kirchhoff diffraction theory, or to other scientific methods reported in the sector technical literature. By way of example, the Kurze and Anderson method [23] is shown below, according to which the attenuation  $K$  of a semi-infinite acoustic barrier is evaluated with the following relation (valid for point sources and for  $N > 0.2$ ):

$$K = 20 \log \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} + 5 \quad (30)$$

with  $N$  number of Fresnel equal to:

$$N = \pm \frac{2}{\lambda} (A + B - d) \quad (31)$$

where  $\lambda$  represents the wavelength of the sound at the various frequencies considered, while  $A$ ,  $B$  and  $d$  are geometrical quantities indicated in Fig. 16. The parameter  $(A + B - d)$  is indicated as path difference.

In practice, it should be remembered that to calculate the characteristics of a screen to be placed to protect from traffic noise, it is necessary to bear in mind that the source is of an incoherent linear type, and that the barrier must have sufficient length to avoid the phenomenon of lateral penetration; moreover, it must be verified that it is capable of offering effective acoustic insulation, in relation to the project requirements.

An acoustic barrier is designed on the basis of the sound attenuation to be achieved in the external environment con-

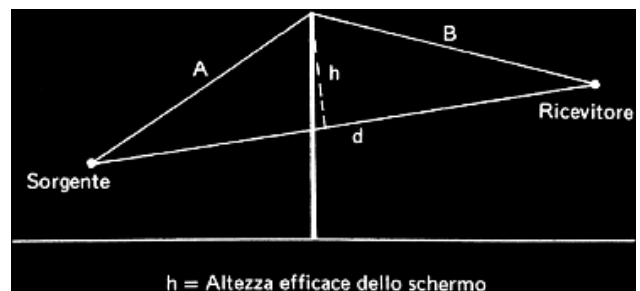


Fig. 16 – Elementi geometrici per il calcolo acustico di una barriera.

Fig. 16 – Geometric elements for the acoustic calculation of a barrier.

dove  $\lambda$  rappresenta la lunghezza d'onda del suono alle varie frequenze considerate, mentre A, B e d sono grandezze geometriche indicate in Fig. 16. Il parametro  $(A + B - d)$  viene indicato come differenza di percorso.

Nella pratica, è bene ricordare che per calcolare le caratteristiche di uno schermo da porre a protezione del rumore da traffico, occorre tener presente che la sorgente è di tipo lineare incoerente, e che la barriera deve avere lunghezza sufficiente per evitare il fenomeno della penetrazione laterale; inoltre, bisogna verificare che sia capace di offrire un efficace isolamento acustico, in relazione alle esigenze di progetto.

Una barriera acustica si progetta sulla base dell'attenuazione sonora che si vuole conseguire nell'ambiente esterno considerato, determinandone l'altezza  $h$  e la lunghezza  $l$ , con riferimento alla posizione della sorgente e del ricevente. Utilizzando i simboli indicati in Fig. 17 si perviene all'espressione:

$$h = h_{min} + h_{eff} = h_s + \frac{h_R - h_s}{A+B} \cdot A + h_{eff} \quad (32)$$

con  $\begin{cases} h_{min} = \text{altezza minima atta ad ostruire la vista sorgente - ricevente} \\ h_{eff} = \text{altezza efficace} \end{cases}$

La variabile  $h_{eff}$  si calcola attraverso appositi abachi di seguito riportati (Fig. 18), individuando un apposito parametro  $X$  dato dalla relazione:

$$X = \frac{1}{A} + \frac{1}{B} \quad (33)$$

Una volta ricavata l'altezza efficace  $h_{eff}$  in base al valore di  $X$  e dell'attenuazione del rumore ipotizzata in progetto  $\Delta L$ , si

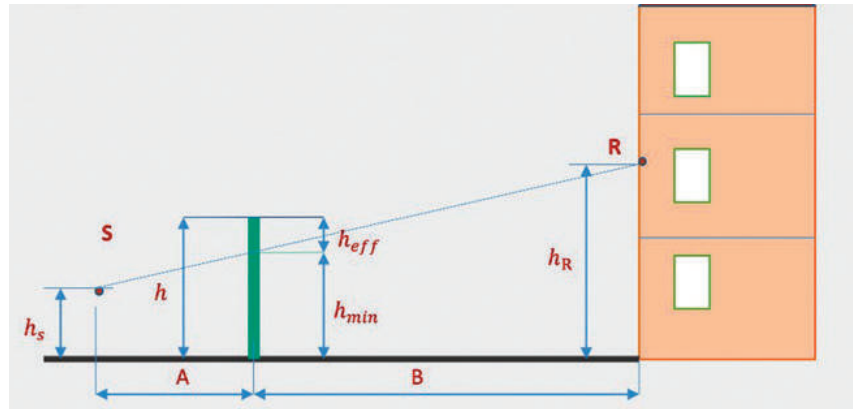


Fig. 17 - Dimensionamento geometrico di un dispositivo antirumore.  
Fig. 17 - Geometric sizing of an anti-noise device.

sidered, determining its height and length  $l$ , with reference to the position of the source and of the receiver. Using the symbols shown in Fig. 17 we obtain the expression:

$$h = h_{min} + h_{eff} = h_s + \frac{h_R - h_s}{A+B} \cdot A + h_{eff} \quad (32)$$

with  $\begin{cases} h_{min} = \text{minimum height suitable to obstruct the source - receiver view} \\ h_{eff} = \text{efficient height} \end{cases}$

The variable  $h_{eff}$  is calculated through the appropriate charts shown below (Fig. 18), identifying a specific parameter  $X$  given by the relation:

$$X = \frac{1}{A} + \frac{1}{B} \quad (33)$$

Once the effective height  $h_{eff}$  based on value  $X$  and of the attenuation of the noise assumed in the design  $\Delta L$ , the parameter  $K$  and therefore the half-width  $\frac{1}{2}$  barrier, given by the

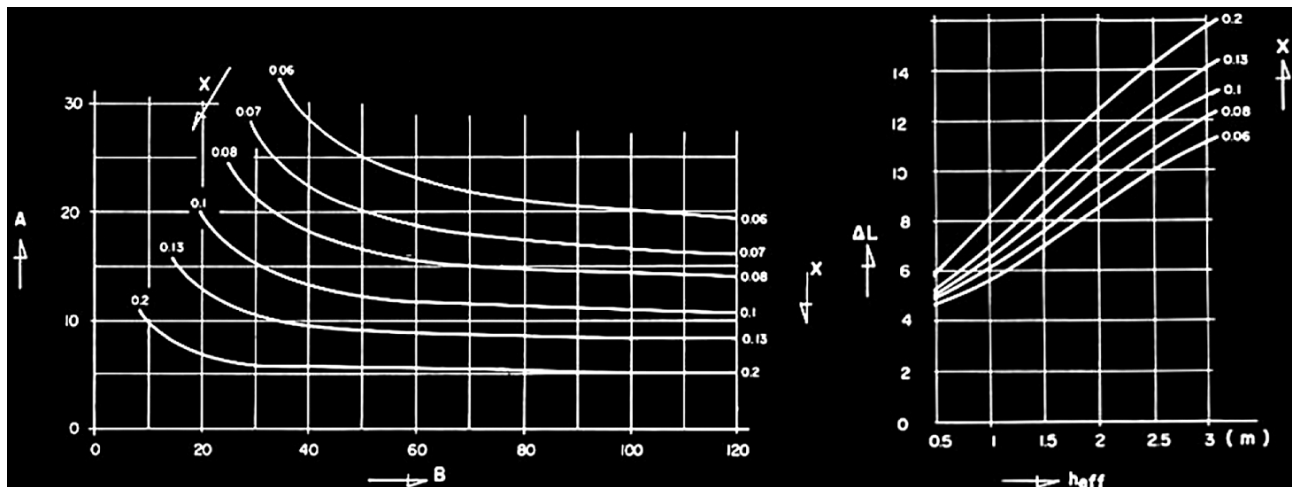


Fig. 18 - Abachi per determinare  $h_{eff}$ .  
Fig. 18 - Charts to determine  $h_{eff}$ .



può determinare dall'abaco in Fig. 19 il parametro  $K$  e quindi la semiampiezza  $\frac{l}{2}$  della barriera, data dalla formula  $\frac{l}{2} = K \cdot B$ , da cui si ottiene la ricercata lunghezza del dispositivo:

$$l = 2 \cdot K \cdot B \quad (34)$$

### 3.3. Il costo esterno dell'inquinamento acustico-vibrotorio ferroviario

L'impatto da rumore da traffico ferroviario, stradale ed aeroportuale, come esplicitato precedentemente, ha anche un significativo impatto economico: difatti, oltre ai danni sulla salute, i beni immobili esposti a fonti di rumore subiscono un deprezzamento, le zone soggette ad inquinamento perdono la loro attrattività come luogo di abitazione e di lavoro e le conseguenze sul piano del turismo sono parimenti rilevanti.

In particolare, per la stima della perdita del valore percentuale delle abitazioni interessate dal decadimento della qualità della vita per effetto dell'inquinamento dovuto all'esercizio di una infrastruttura ferroviaria, può farsi riferimento alla già enunciata formula (22), considerando però la tipologia di disturbo  $j$  nell'area omogenea  $i$ :

$$C = \sum_j \sum_i \Delta L_{ij} \cdot A_{ij} \cdot P_{ij} \cdot \frac{\Delta V_{ij}}{100} \quad (35)$$

con:

- $C$  è una stima del costo esterno dell'inquinamento acustico-vibrotorio;
- $j$  si riferisce alla tipologia di disturbo (vibrotorio o acustico);
- $i$  all'area omogenea considerata;
- $\Delta L_{ij}$  è l'eccesso di disturbo rispetto alla soglia normativa di riferimento, considerando il contributo di mitigazione dello stesso disturbo, fornito dalle soluzioni progettuali precedentemente esposte;
- $A_{ij}$  rappresenta il numero delle abitazioni per l'area  $i$ -esima per il disturbo  $j$ -esimo;
- $P_{ij}$  è l'indicatore del valore medio del costo delle abitazioni dell'area  $i$ -esima, con riguardo alla discretizzazione effettuata nell'analisi del disturbo  $j$ -esimo;
- $\Delta V_{ij}$  rappresenta la perdita di valore percentuale del bene.

Nel caso dell'analisi del solo disturbo acustico (trascurando l'impatto vibrotorio):

- $\Delta L_{ij}$  è l'eccesso di livello sonoro rispetto alla soglia normativa, valutato, per esempio, in termini di livello equivalente continuo ( $L_{eq}$ );
- $\Delta V_{ij}$  può assumere valori del range  $[0.4 \div 1.3]$  (%) [24].

Considerando, invece, gli effetti nocivi sulle persone, la discretizzazione dovrà essere riferita a domini caratteristici dell'indicatore di disturbo acustico ( $L_{eq}$ ) o vibrotorio:

$$C^* = \sum_j A_{ij} \sum_i C_{ij} \cdot N_{ij} \quad (36)$$

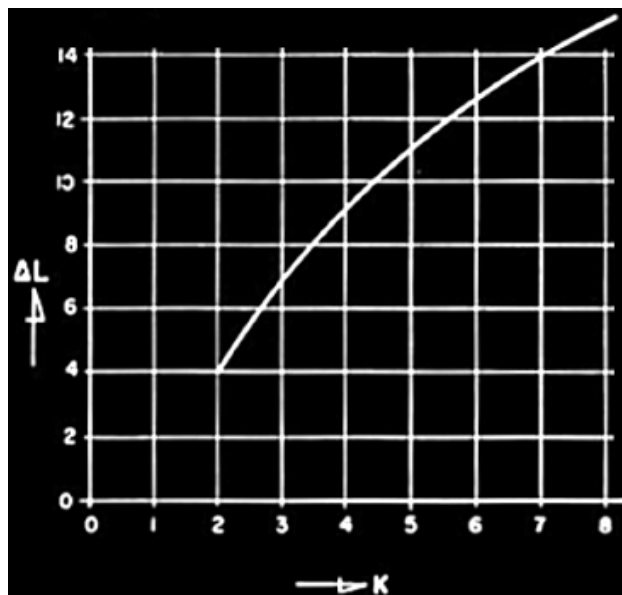


Fig. 19 – Abaco per determinare il parametro  $K$ .

Fig. 19 – Chart for determining parameter  $K$ .

formula  $\frac{l}{2} = K \cdot B$ , can be determined from the chart in Fig. 19, from which the sought device length is obtained:

$$l = 2 \cdot K \cdot B \quad (34)$$

### 3.3. External cost of railway noise and vibration pollution

The noise impact from rail, road and airport traffic, as explained above, also has a significant economic impact: in fact, in addition to health damage, real estate exposed to noise sources is depreciated, areas subject to pollution lose their attractiveness as a place to live and work and the consequences for tourism are equally important.

In particular, to estimate the loss of the percentage value of the houses affected by the deterioration of the quality of life due to pollution deriving from the operation of a railway infrastructure, reference can be made to the already stated formula (22), considering however the typology of disturbance  $j$  in the homogeneous area  $i$ :

$$C = \sum_j \sum_i \Delta L_{ij} \cdot A_{ij} \cdot P_{ij} \cdot \frac{\Delta V_{ij}}{100} \quad (35)$$

with:

- $C$  is an estimate of the external cost of acoustic-vibration pollution;
- $j$  refers to the type of disturbance (vibration or acoustic);
- $i$  to the homogeneous area considered;
- $\Delta L_{ij}$  is the excess of disturbance with respect to the reference normative threshold, considering the mitigation contribution of the same disturbance, provided by the previously described design solutions;

Tabella 9 – Table 9

Tabella del valore di  $C_{ij}$  in funzione di  $L_{eq}$ .  
Table of  $C_{ij}$  value as a function of  $L_{eq}$

| $L_{eq}$ [dB (A)] | $C_{ij}$ (€/persona-anno)<br>$C_{ij}$ (€/person-year) |
|-------------------|-------------------------------------------------------|
| 55-60             | 55                                                    |
| 60-65             | 219                                                   |
| 65-70             | 547                                                   |
| 70-75             | 1095                                                  |
| >75               | 2065                                                  |

dove:

- $C^*$  è un'altra stima del costo esterno dell'inquinamento acustico e vibratorio;
  - $j$  si riferisce alla tipologia di disturbo considerato (vibratorio o acustico);
  - $i$  al dominio i-esimo dell'indicatore di disturbo  $j$ ;
  - $A_{ij}$  è il fattore d'attualizzazione del costo annuo;
  - $C_{ij}$  rappresenta il costo unitario per persona/anno, per quel dominio i-esimo dell'indicatore j-esimo;
  - $N_{ij}$  è il numero delle persone esposte alla classe i-esima dell'indicatore j-esimo.
- Nell'ipotesi esemplificativa di solo disturbo acustico:
- $C^*$  è la stima del costo esterno dell'inquinamento acustico;
  - $j$  si riferisce al disturbo acustico ed  $i$  al dominio i-esimo dell'indicatore di rumore;
  - $A_{ij}$  può essere stimato intorno a 18-20, assumendo un tasso d'attualizzazione tra il 5 e il 6% e considerando un periodo di 40 anni, ovvero una cosiddetta *perpetuity*;
  - $C_{ij} \equiv \left[ \frac{\text{€}}{\text{persona-anno}} \right]$ , può considerarsi variabile secondo quanto rappresentato in Tabella 9.

#### 4. Conclusioni

Nel presente lavoro si è analizzata la relazione mobilità-economia-ambiente, proponendo un approccio matematico al problema in studio, attraverso appositi modelli di analisi sistematica delle variabili, utili a consentire la massimizzazione dei differenti flussi di utilità associati al suddetto trinomio, tenendo conto dei diversi vincoli caratterizzanti il problema in studio, espressi con apposite equazioni atte a definirli. Per lo screening delle interazioni opera-territorio sono state altresì sviluppate delle specifiche metodologie di valutazione econometrica per pervenire alla migliore scelta fra le  $n$  alternative di progetto; ciò, tenendo pure conto dell'uso di risorse non regolate dai tradizionali meccanismi di mercato ed in

- $A_{ij}$  represents the number of dwellings for the  $i$ -eth area for the  $j$ -eth disturbance;
  - $P_{ij}$  is the indicator of the average value of the cost of dwellings in the  $i$ -eth area, with regard to the discretisation performed in the analysis of the  $j$ -eth disturbance;
  - $\Delta V_{ij}$  represents the percentage loss in value of the asset.
- In the case of the analysis of acoustic disturbance only (neglecting the vibratory impact):
- $\Delta L_{ij}$  is the excess of sound level with respect to the normative threshold, evaluated, for example, in terms of continuous equivalent level ( $L_{eq}$ );
  - $\Delta V_{ij}$  can take values in the range  $[0.4 \div 1.3](\%)$  [24].

On the other hand, considering instead the harmful effects on people, the discretisation must be referred to characteristic domains of the acoustic or ( $L_{eq}$ ) vibratory disturbance indicator:

$$C^* = \sum_j A_{ij} \sum_i C_{ij} \cdot N_{ij} \quad (36)$$

where:

- $C^*$  is another estimate of the external cost of noise and vibration;
  - $j$  refers to the type of disturbance considered (vibration or acoustic);
  - $i$  to the  $i$ -eth domain of the disturbance indicator  $j$ ;
  - $A_{ij}$  is the discounting factor for the annual cost;
  - $C_{ij}$  represents the unit cost per person/year, for that  $i$ -eth domain of the  $j$ -eth indicator;
  - $N_{ij}$  is the number of people exposed to the  $i$ -eth class of the  $j$ -eth indicator.
- In the example hypothesis of acoustic disturbance only:
- $C^*$  is the estimate of the external cost of noise pollution;
  - $j$  refers to the acoustic disturbance and  $i$  to the  $i$ -eth domain of the noise indicator;
  - $A_{ij}$  can be estimated around 18-20, assuming a discount rate between 5 and 6% and considering a period of 40 years, or a so-called *perpetuity*;
  - $C_{ij} \equiv \left[ \frac{\text{€}}{\text{person-year}} \right]$ , can be considered variable according to what is shown in Table 9.

#### 4. Conclusions

In this work the mobility-economy-environment relationship has been analysed, proposing a mathematical approach to the problem under study, through specific models of systematic analysis of the variables, useful to allow the maximisation of the different utility flows associated with the aforementioned trinomial, taking into account the different constraints characterising the problem under study, expressed with appropriate equations designed to define them. For the screening of work-territory interactions, specific econometric assessment methods have also been de-

particolare della variabile acustico-vibrazionale e di quella paesaggistica.

Come esplicitato nel primo e nel secondo capitolo, un oculato ricorso ad opportuni criteri matematici consente di riuscire, in relazione alle caratteristiche peculiari del caso in studio, ad internalizzare nel calcolo economico anche le esternalità dovute al complesso degli impatti generati sul sito e sull'intera area vasta interessata dall'intervento, pervenendo così ad un quadro completo degli elementi necessari per assumere le decisioni più appropriate per l'ottimizzazione dell'investimento programmato.

Nel terzo capitolo sono state analizzate alcune importanti opere di minimizzazione degli impatti ambientali tipicamente prodotti da un'infrastruttura lineare di trasporto. In particolare, si è approfondita la rilevante tematica del rumore da traffico stradale e ferroviario, pervenendo all'interpretazione del problema tramite modelli previsionali, in funzione della velocità d'esercizio e delle variabili sorgente-territorio. Inoltre, per valutare le migliori opzioni costruttive dell'opera e per la sua armonizzazione nel paesaggio circostante, si sono schematizzati alcuni possibili interventi a verde utili ad accrescere la qualità del risultato progettuale, anche per gli aspetti di economia dell'ambiente e di salute pubblica. In tal senso, risulta centrale pure la scelta della vegetazione atta a colonizzare i siti di riferimento: essa potrà essere effettuata, caso per caso, sulla base di uno studio eco-fitosociologico del paesaggio agrario di pertinenza. Al fine di facilitare tale analisi, nello stesso capitolo sono indicate le principali zone climatiche del paese e le specie vegetative più rappresentative dei territori esaminati, le quali sono state individuate in base all'altitudine, alla temperatura media ed al particolare raggruppamento fitosociologico di riferimento. Mediante l'uso di apposite tabelle sopra riportate, il progettista potrà dunque agevolmente individuare le associazioni vegetali caratterizzanti la zona di interesse e scegliere così le piantumazioni più appropriate per potere migliorare efficacemente la correlazione infrastruttura-paesaggio, fatto essenziale soprattutto in presenza di aree ad elevata sensibilità ambientale.

Una volta dimensionate le barriere (o l'intervento risolutivo scelto) più idonee all'area di riferimento e considerato il loro contributo di mitigazione, è necessario calcolare, così come esplicitato nel precedente paragrafo, il costo esterno dovuto al disturbo considerato.

In definitiva, la soluzione ottima di progetto sarà quella che in base a valutazione di ordine tecnico, economico ed ambientale avrà, nello scenario temporale di vita utile analizzato, il massimo valore del modulo del vettore  $\vec{U}_g$  che rappresenta, per l'intero sistema di variabili  $S$  considerato (costi esterni, benefici/costi, rischi, fasi di progetto), l'utilità globale per le diverse alternative  $a_n$  poste a confronto, tutte rispettose dei vincoli  $\vec{v}$  che il problema in studio prefigura (budget, tempi di realizzazione previsti, normative tecniche ed ambientali di riferimento, programma d'esercizio, etc.).

*veloped to achieve the best choice among the  $n$  design alternatives; this, also taking into account the use of resources not regulated by traditional market mechanisms and in particular the acoustic-vibrational variable and the landscape one.*

*As explained in the first and second chapter, a judicious use of appropriate mathematical criteria allows, in relation to the peculiar characteristics of the case under study, to succeed in internalising also the externalities due to the complex of impacts generated on the site and on the whole vast area involved in the intervention in the economic calculation, thus achieving a complete picture of the elements necessary to make the most appropriate decisions for optimising the planned investment.*

*In the third chapter, some important works to minimise the environmental impacts typically produced by a linear transport infrastructure were analysed. In particular, the important issue of road and rail traffic noise was examined in depth, leading to the interpretation of the problem through forecasting models, depending on the operating speed and the source-territory variables. Furthermore, some possible green interventions have been schematised useful to increase the quality of the project result to evaluate the best construction options of the work and its harmonisation in the surrounding landscape, also for the environmental economics and public health aspects. In this sense, the choice of vegetation suitable for colonising the reference sites is also a key issue: it can be done, case by case, on the basis of an eco-phytosociological study of the relevant agricultural landscape. In order to facilitate this analysis, in the same chapter the main climatic zones of the country and the most representative plant species of the examined territories are indicated, which have been identified based on altitude, average temperature and the particular phytosociological grouping of reference. Through the use of special tables above, the designer can therefore easily identify the plant associations that characterise the area of interest and thus choose the most appropriate tree planting in order to effectively improve the infrastructure-landscape correlation, an essential fact especially in the presence of high environmental sensitivity areas.*

*Once the barriers (or the decided intervention chosen) that are most suitable for the area of reference have been sized and their mitigation contribution considered, the external cost due to the disturbance considered must be calculated, as explained in the previous paragraph.*

*Ultimately, the optimal solution for the project will be the one that, based on a technical, economic and environmental assessment, will have the maximum value of the vector module  $\vec{U}_g$  that it represents, in the analysed time frame of the useful life, for the entire system of  $S$  variables considered (external costs, benefits/costs, risks, project phases), the global utility for the different alternatives compared, all respecting the  $\vec{v}$  constraints that the problem under study envisages (budget, expected realisation times, reference technical and environmental regulations, operating programme, etc.).*



## BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] *Sustainable development in the European Union. Monitoring report on progress towards the SDGS in an EU context. 2017 edition* - European Commission documents (2017).
- [2] LO BOSCO S., *“Un criterio matematico per l'analisi dell'utilità Globale di un intervento pubblico sulle reti di mobilità”* – Ed. ARACNE, Roma (2018).
- [3] PENNISI G., SCANDIZZO P., *“Valutare l'incertezza, l'analisi costi benefici nel XXI secolo”*, G. Giappichelli Editore, Torino (2003).
- [4] TURNER G., HANDLEY D., NEWCOMBE J., OZDEMIROGLU E., *“Valuation of the external costs and benefits to health and environment of waste management options”*, final report for Defra by Enviros Consulting Limited in association with EFTEC (2004).
- [5] MAYERES I., OCHELEN S., PROOST S., *“The Marginal External Costs of Urban Transport”*, Transportation Research D, 1, p. 111-130 (1996).
- [6] *“Smart Mobility: Muoversi meglio per vivere meglio”*, The European House Ambrosetti per Finmeccanica (2012).
- [7] DANIELIS R., *“La teoria economica e la stima dei costi esterni dei trasporti”*, ANFIA-ACI (2001).
- [8] HAAB T.C., MCCONNELL K.E., *“Valuing environmental and natural resources: the econometrics of non-market valuation”*, Edward Elgar Publishing, Cap. 6,7,8 (2002).
- [9] GALLERANI V., ZANNI G., VIAGGI D., *“Manuale di estimo”*, McGraw Hill, Milano (2004).
- [10] WARDMAN M., *“The value of travel time”*, Journal of Transport Economics and Policy, 32 (3), p. 285-316 (1998).
- [11] SOGUEL N., *“Evaluation monétaire des atteintes à l'environnement: une étude Hédoniste et contingente sur l'impact des transports”*, Edes, Neuchâtel (1994).
- [12] GIOS G., NOTARO S., *“La valutazione economica dei beni ambientali: introduzione al metodo della valutazione contingente”*, Cedam, Padova (2001).
- [13] HANEMANN M.W., *“Willingness to pay and willingness to accept: how much can they differ?”*, American Economic Review (1991).
- [14] NUCARA A., PIETRAFESA A., RODONÒ G., SCACCIANOCE G., *“Valutazione dei livelli di rumore da traffico veicolare in differenti contesti urbani per mezzo di modelli analitici e reti neurali artificiali”*, 29° Convegno Nazionale Associazione Italiana di Acustica, 12-14 Giugno, Ferrara, 002, p. 117-122 (2002).
- [15] CAMMARATA G., *“Fisica tecnica ambientale”*, McGraw-Hill Education (2007).
- [16] DPCM 14/11/1997 – *“Valori limite delle sorgenti sonore”*.
- [17] D. Lgs. 42/2017 – *“Disposizioni in materia di armonizzazione della normativa nazionale in materia di inquinamento acustico”*.
- [18] PRESCIANI P., BONACCI G., *“Impiego di soole del freno in materiale composito per l'abbattimento del rumore di rotolamento dei carri merci”*, Ingegneria Ferroviaria (2000).
- [19] ROMANI P., VENTURA F., *“La rumorosità ambientale: il ruolo delle barriere acustiche”*, Pitagora Editrice Bologna Edizione (1992).
- [20] DECRETO 29/11/2000 – *“Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture, dei piani degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore”*.
- [21] EVANGELISTA L., VITTOZZI A., SILVESTRI G. – *“Valutazione teorico-sperimentale del comportamento delle barriere anti-rumore su linee ad alta velocità”*, Ingegneria Ferroviaria (2009).
- [22] UNI ISO 9613-2:2006 - Acustica - Attenuazione sonora nella propagazione all'aperto - Parte 2: Metodo generale di calcolo.
- [23] KURZE U.J., ANDERSON G.S. *“Sound attenuation by barriers”*, Appl. Acoust., 4, 35-53 (1971).
- [24] *“I costi esterni del trasporto”*, Ferrovie dello Stato-Amici della Terra (2002).