Rassegna dei metodi di analisi della sostenibilità applicabili alle misure di mitigazione sonora

Patrizia Bellucci[a]* | Francesca Ciarallo[a] | Laura Peruzzi[a]

[a] ANAS SpA,
Centro di Ricerca e Sperimentazione Stradale,
Via della Stazione di Cesano, 311, 00123 Roma
* Autore di riferimento:
p.bellucci@stradeanas.it

Ricevuto: 15/3/2024
Accettato: 9/8/2024

DOI: 10.3280/ria2-2024oa17502
ISSNe: 2385-2615

Negli ultimi anni, il tema della sostenibilità ha assunto grande importanza in ogni campo, inclusa la mitigazione del rumore, e le parti interessate si sono trovate a fare i conti con tecniche ancora in evoluzione e incerte per valutare gli aspetti sociali, economici e ambientali correlati. Questo in relazione al fatto che la valutazione della sostenibilità può essere effettuata utilizzando metodi diversi e innumerevoli indicatori. Per chiarire il problema e identificare metodologie adatte a valutare la sostenibilità delle soluzioni di mitigazione del rumore per le strade, il comitato italiano PIARC TC 3.4.2 ha intrapreso uno studio approfondito sulle tecniche più consolidate, dalla Valutazione della Sostenibilità del Ciclo di Vita al più recente protocollo ENVISION. Questo studio ha implicato uno sforzo ampio e mirato per definire il significato di sostenibilità, che ha tenuto conto delle prospettive dei gestori delle infrastrutture stradali, degli utenti e della popolazione. Nell'ambito dello studio sono stati identificati criteri e indicatori per descrivere le performance delle soluzioni di mitigazione del rumore e sono state individuate le metodologie che maggiormente si adattano per valutarne la relativa sostenibilità.
Parole chiave: rumore, mitigazione, sostenibilità

Review of sustainability analysis methods suitable to noise mitigation measures
In recent years, sustainability has become a critical issue across various sectors, including the domain of noise mitigation. Stakeholders face challenges in evaluating the social, economic, and environmental impacts of noise mitigation measures due to the evolving and uncertain nature of available assessment techniques. There exists a plethora of methods and indicators for conducting sustainability assessments, leading to confusion and complexity in determining the most effective approach. To address these challenges, the Italian PIARC committee TC 3.4.2 embarked on a comprehensive study to identify and analyse the most reliable techniques for assessing the sustainability of noise mitigation solutions for roads. This study ranged from exploring Life Cycle Sustainability Assessment methods to examining the newer ENVISION protocol. It aimed at defining sustainability from the viewpoints of infrastructure managers, users, and the general population, and at identifying specific criteria and indicators for evaluating the performance of noise mitigation solutions, as well as the methodologies suitable to their sustainability assessment.
Keywords: noise, mitigation, sustainability

1 | Introduzione

Il traffico stradale rappresenta la principale fonte di inquinamento acustico in Europa, con livelli di rumore che si prevede aumenteranno nelle aree urbane e rurali nel prossimo decennio a causa della crescita urbana e della crescente richiesta di mobilità. Sebbene l'Unione Europea raccomandi di evitare esposizioni prolungate a livelli di rumore superiori a 55 dB(A), si stima che nella maggior parte dei paesi europei, oltre il 50% della popolazione residente nelle aree urbane sia esposto a livelli di rumore stradale superiori a 55 dB(A). Per contrastare questa tendenza, gli Stati Membri dell'UE hanno pianificato l'adozione di una varietà di azioni per ridurre e gestire i livelli di rumore, in conformità con le norme stabilite dalla Direttiva Europea sul Rumore Ambientale 2002/49/CE e i rispettivi regolamenti nazionali. Tuttavia, non è ancora chiaro quale siano l'efficacia e la sostenibilità delle misure di mitigazione del rumore concretamente applicabili nei diversi ambiti. Ragione per cui sono necessari ulteriori studi per approfondire gli impatti legati ai tre pilastri della sostenibilità (ambientale, sociale ed economica).

Negli ultimi anni, il tema della sostenibilità ha assunto grande importanza in ogni campo, inclusa la mitigazione del rumore, e le parti interessate si sono trovate a fare i conti con tecniche ancora in evoluzione e incerte per valutare gli aspetti sociali, economici e ambientali correlati. Questo in virtù del fatto che la valutazione della sostenibilità può essere effettuata applicando metodi diversi e un'infinità di indicatori.

Per affrontare questo problema e identificare metodologie adeguate a valutare la sostenibilità delle soluzioni di mitigazione del rumore stradale, il comitato italiano PIARC TC

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

3.4.2 [1] ha avviato uno studio approfondito sulle tecniche più consolidate, dalla Valutazione della Sostenibilità del Ciclo di Vita al più recente protocollo ENVISION.

2 | Il Comitato Tecnico PIARC TC 3.4.2

Il Comitato Tecnico TC 3.4.2 è una commissione istituita da PIARC, l'Associazione Mondiale della Strada, con un focus specifico sulla sostenibilità ambientale delle infrastrutture e dei trasporti stradali. Questa commissione tecnica aggrega un insieme eterogeneo di figure professionali, che spazia dai gestori di infrastrutture stradali, a professionisti, accademici e operatori del settore di elevato prestigio. La commissione riflette gli obiettivi e l'ambito operativo del corrispondente comitato internazionale, includendo tra le sue prerogative l'identificazione di fattori e criteri per la selezione di soluzioni mitigative, allineati ai principi di sviluppo sostenibile.

Nel suo ruolo, il Comitato italiano funge da rappresentante di PIARC a livello nazionale, per promuovere e facilitare la diffusione capillare dei risultati degli studi intrapresi e delle raccomandazioni emerse a livello europeo. In questo contesto, il Comitato ha prodotto un rapporto che descrive lo stato dell'arte in materia di misure di mitigazione del rumore, che include ricerche sul campo, indagini scientifiche, analisi di casi studio e revisioni della letteratura esistente. Il documento offre una panoramica delle tecniche di progettazione, realizzazione e manutenzione delle infrastrutture stradali, oltre a fornire delle indicazioni pratiche sui criteri da adottare per l'identificazione delle soluzioni maggiormente sostenibili.

3 | Metodi di valutazione della sostenibilità applicabili alle misure di mitigazione sonora

Le misure di mitigazione del rumore sono progettate per ridurre l'inquinamento acustico e il suo impatto sull'ambiente e sulla salute umana. Pertanto, già in relazione alla loro funzione intrinseca, esibiscono attributi ambientalmente sostenibili. Tuttavia, le misure di mitigazione del rumore possono definirsi effettivamente sostenibili se progettate per essere efficaci a lungo termine dal punto di vista non solo ambientale, ma anche economico e sociale.

In letteratura sono stati descritti numerosi metodi per valutare la sostenibilità in diversi campi di applicazione. I metodi più interessanti e maggiormente impiegati sono i seguenti:

- Metodi basati sugli standard ISO 14040 e ISO 14044, che fanno riferimento alla valutazione del ciclo di vita attraverso un'analisi dettagliata degli impatti ambientali (LCA), la stima dei costi (LCC o LCCA) e gli impatti sociali (SLCA). Valutazioni che poi confluiscono nell'analisi di sostenibilità dell'intero ciclo di vita (LCSA).
- Il Protocollo ENVISION, maggiormente focalizzato su progetti di largo respiro di ingegneria civile, incluse le infrastrutture di trasporto, energetiche, idriche e di comunicazione.

3.1 | Life Cycle Sustainability Assessment

La Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) si riferisce alla valutazione degli impatti e benefici di carattere ambientale, sociale ed economico che caratterizzano un prodotto durante tutto il suo ciclo di vita. Questo tipo di valutazione consente di fornire un quadro completo sugli impatti positivi e negativi di un prodotto, supportando le imprese e gli attori della catena del valore nell'identificazione dei punti deboli e delle azioni da intraprendere per rendere il proprio prodotto maggiormente sostenibile. Parimenti, i risultati di questa valutazione costituiscono un utile ausilio nelle fasi decisionali di investimento e/o scelta dei prodotti stessi.

La valutazione di sostenibilità di un prodotto deve, quindi, tenere conto di tutte le fasi del ciclo di vita, a partire dall'estrazione dei materiali componenti il prodotto stesso, alla sua manifattura ed impiego, fino alla sua dismissione. In questo modo è possibile individuare il peso di ciascuna fase nelle varie dimensioni della sostenibilità (ambientale, sociale ed economica) ed apportare eventualmente dei correttivi al processo, qualora si evidenzino carichi ambientali, sociali o economici non equilibrati.

Ad oggi le tecniche utilizzate per valutare le tre dimensioni della sostenibilità si basano sull'approccio delineato dalle ISO 14040 e ISO 14044. In particolare, la dimensione ambientale è analizzata con la tecnica LCA (Life Cycle Assessment), mentre quella economica con la LCC (Life Cycle Cost). Infine, la dimensione sociale è trattata con la S-LCA (Social Life Cycle Assessment).

Fu Walter Klopffer che nel 2008 introdusse il concetto di Life Cycle Sustainability Assessment, suggerendo di combinare i risultati di queste tre valutazioni per ottenere una visione integrata ed omnicomprensiva della sostenibilità dei prodotti:

$$LCSA = LCA + LCC + SLCA \quad (1)$$

Nei paragrafi successivi sono descritte le tecniche adottate per valutare l'LCA, LCC ed S-LCA ed infine gli algoritmi e le tecniche impiegate per la loro combinazione.

3.1.1 | Life Cycle Assessment

L'analisi LCA, acronimo di Life Cycle Assessment, è un metodo standardizzato a livello internazionale utilizzato per valutare i potenziali impatti ambientali di un prodotto nel corso del suo intero ciclo di vita (Wenzel et al., 1997). I primi studi in materia risalgono a fine anni Sessanta, inizio anni Settanta, ma è solo con la pubblicazione della norma ISO 14040 nel 1994 che si pone fine alla proliferazione di approcci diversificati e si avvia la fase di standardizzazione, attraverso la definizione della terminologia e di metodi di valutazione condivisi. In sintesi, la metodologia LCA consente la valutazione analitica dell'impatto ambientale potenziale associato ad un prodotto, eseguita in quattro fasi specifiche che sono alla base delle norme ISO 14040 "Principi e quadro di riferimento" [5] e ISO

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

14044 “Requisiti e linee guida” [6]. La prima sintetizza a livello teorico in che cosa si sostanzia una corretta valutazione LCA, mentre la seconda guida l’operatore verso una corretta esecuzione.

Le quattro fasi consequenziali (Fig. 1) introdotte dalla norma si sostanziano nelle seguenti azioni:

1. Definizione dello scopo e degli obiettivi della valutazione.
2. Inventario delle risorse e delle emissioni.
3. Valutazione degli impatti.
4. Interpretazione dei risultati.

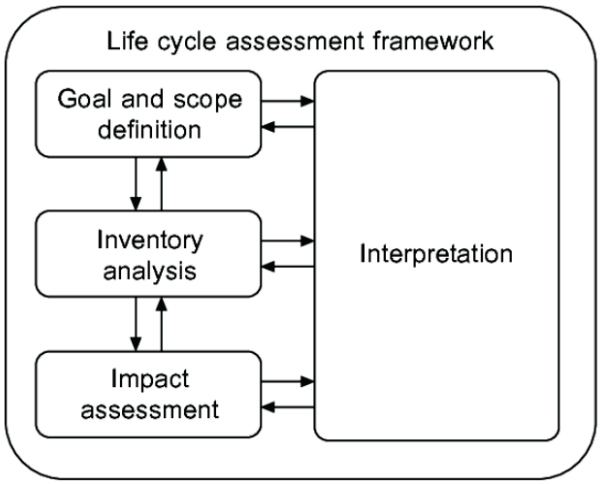


Fig. 1 – Struttura dello studio relativo all’analisi del ciclo di vita [4]
Structure of the life cycle analysis [4]

La prima fase definisce il campo di applicazione dell’analisi, ossia l’ambito e il livello di dettaglio che si vuole ottenere. Essa tiene conto dell’unità funzionale rispetto alla quale si vogliono rapportare i risultati e le categorie di impatto ambientale da considerare: cambiamento climatico, scarsità idrica, consumo di risorse, ecc.

In questa fase deve essere definito il sistema, ovvero l’insieme elementare di unità di processo, tra loro connesse, che perseguono una o più funzioni e la scelta delle categorie di impatto ambientale sulle quali effettuare le valutazioni.

Nella fase successiva la norma prevede un’analisi delle componenti in ingresso (risorse) e in uscita (emissioni) dal sistema oggetto di valutazione, la definizione delle modalità di raccolta e di analisi dati, e la loro allocazione nelle diverse unità di processo.

Per convertire i dati di inventario in un insieme di potenziali impatti, occorre effettuare un’analisi delle conseguenze che derivano dall’uso delle risorse e dalle emissioni prodotte nelle varie fasi del ciclo di vita.

Nella Fig. 2 è riportato lo schema UNEP/SETAC (ove UNEP significa United Nations Environment Programme), che lega i dati di inventario con i potenziali impatti e le categorie di danno. In questa valutazione si considerano tipicamente 3 categorie di danno riferite agli impatti sulla salute, all’uso delle risorse e alla qualità dell’ecosistema.

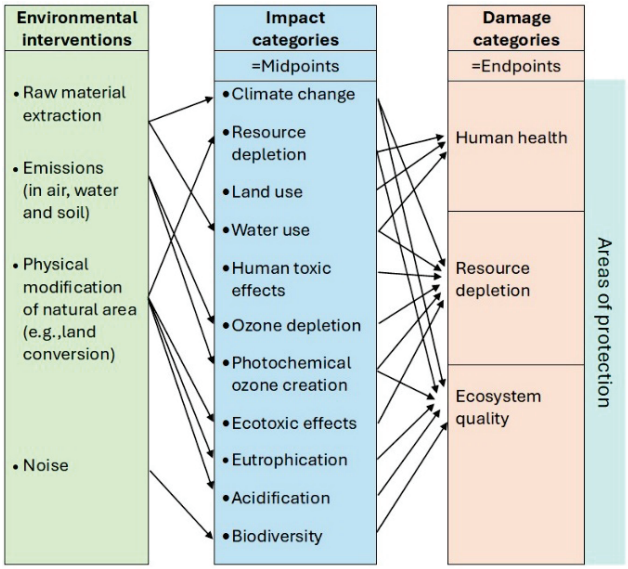


Fig. 2 – Schema generale UNEP/SETAC che collega i dati di inventario con gli impatti e le categorie di danno [4]
UNEP/SETAC general scheme linking inventory data with impacts and damage categories [4]

Su queste tre grandi categorie convergono un insieme di fattori di impatto, come illustrato in Fig. 2. A loro volta i fattori di impatto sono determinati dall’uso di materiali grezzi e dalle emissioni generate dal sistema nel corso del suo ciclo di vita, come dalle analisi di inventario. Gli impatti devono essere quantificati mediante degli indicatori e rapportati alle categorie di danno attraverso opportuni modelli.

Le norme di riferimento contemplano anche una successiva elaborazione facoltativa dei risultati ottenuti, che comprende le operazioni di normalizzazione, raggruppamento e ponderazione. La prima consente di migliorare la comprensione degli indicatori ottenuti e di facilitarne il confronto.

Il raggruppamento invece è una procedura di riordino e classificazione delle categorie di impatto, che dipende dall’obiettivo e dal campo di applicazione dello studio. Più nello specifico, le categorie di impatto possono essere riordinate su base nominale, in relazione alle emissioni, o alle risorse o su scala spaziale, o ancora sulla base di una gerarchia, per esempio di priorità. È evidente che tale operazione, sulla quale deve essere garantita trasparenza, può essere condotta in maniera differente da individui e società, per cui diversi possono essere i risultati ottenuti a parità di indicatori normalizzati. Con la ponderazione, i risultati di un indicatore sono pesati utilizzando dei fattori numerici o di ponderazione, scelti tramite un procedimento di assegnazione.

La fase finale, della procedura LCA, contempla la valutazione dei risultati, che vengono riepilogati e discussi, in relazione agli obiettivi e al campo di applicazione, per fornire un set di conclusioni e raccomandazioni (Fig. 3).

La valutazione LCA seppur schematica, varia sensibilmente a seconda di quelli che sono gli obiettivi, pertanto può essere condotta in modo iterativo e può portare a valutazioni differenti a seconda dell’approccio utilizzato. Inol-

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

tre, è importante ricordare che restituisce valori di impatto potenziale e non reali su quanto succede in un sistema, dipendenti fortemente anche dal grado di dettaglio e dagli intervalli di tempo considerati.

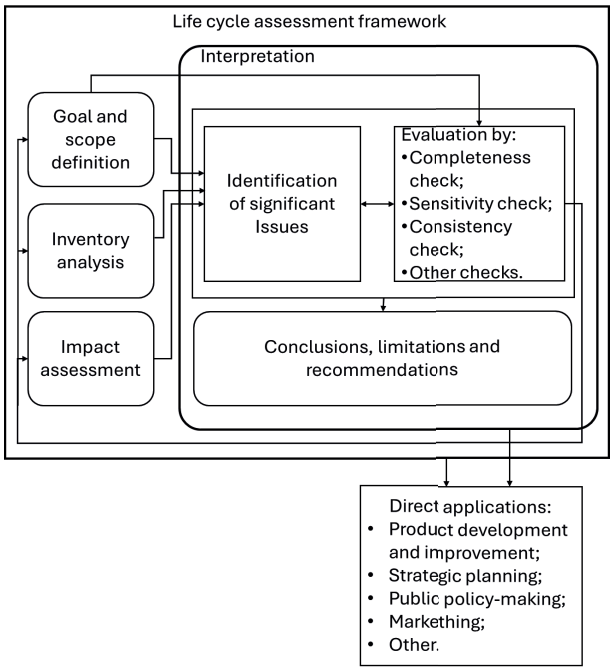


Fig. 3 – Relazione tra gli elementi nella fase di interpretazione [5]
Relationship between the elements in the interpretation phase [5]

3.1.2 | Life Cycle Costing

Delle tre dimensioni che compongono la LCSA quella economica è la più datata tra le analisi applicate.

Attualmente la LCC è regolamentata dalle norme ISO 15686 e ISO 14040 e analizza il costo totale di un processo o di parte di esso nell'arco della sua vita, includendo i costi di pianificazione, progettazione, acquisizione, gestione, manutenzione e dismissione, meno il valore residuo del prodotto al termine della vita utile [16]. Dunque, è una valutazione economica in cui si considerano tutti i costi che sono originati dall'opera in un periodo determinato di analisi.

Come per la LCA si esplica in quattro fasi:

1. Ambito e definizione degli obiettivi.
2. Analisi dei costi.
3. Aggregazione dei costi per categoria.
4. Interpretazione dei dati.

Definiti l'ambito e gli obiettivi della valutazione, con modalità analoghe a quelle indicate dalla norma per la LCA, si passa alla seconda fase in cui si effettua un'analisi dei costi.

I costi del ciclo di vita (Direttiva 2014/24/CE art. 68) comprendono i costi diretti e indiretti. I primi sono quelli sostenuti direttamente dalla stazione appaltante o da altri utilizzatori. La direttiva identifica quattro categorie di costo: costi relativi all'acquisizione, all'utilizzo, alla manutenzione e al fine vita.

I costi indiretti invece, sono quelli non direttamente sostenuti da chi usufruisce del bene e dunque imputati a esternalità ambientali legate ai prodotti, servizi o lavori nel corso del ciclo di vita. Essi si calcolano computando le quantità di input (materiali, energia, acqua) e di output (emissioni in aria, acqua, suolo e rifiuti) del sistema prodotto. Si definisce poi l'inventario che viene valutato secondo una o più categorie d'impatto e attraverso l'utilizzo di fattori di monetizzazione si trasformano i risultati delle categorie d'impatto in valore.

Tale analisi può essere svolta in parallelo alla LCA, per ampliare la valutazione, o in modo sequenziale. In quest'ultimo caso i risultati dell'una diventano il punto di partenza dell'altra. Qualsiasi sia l'approccio, l'obiettivo finale è quello di ottenere una migliore sostenibilità economica del prodotto o del servizio.

3.1.3 | Social Life Cycle Assessment

L'ultimo pilastro dell'analisi di sostenibilità del ciclo di vita di un prodotto riguarda la valutazione sociale (S-LCA), Social Life Cycle Assessment. Questa metodologia analizza gli impatti reali o potenziali in ambito sociale che i prodotti o servizi generano durante il loro ciclo di vita. Le prime discussioni su come affrontare la tematica iniziarono negli anni '80 quando si riconobbe la necessità di integrare i criteri sociali nelle analisi LCA. Fu l'UNEP nel 2009, congiuntamente con il SETAC, a pubblicare le prime linee guida sulla valutazione degli impatti sociali [4]. Le linee Guida hanno introdotto 5 categorie di stakeholder che possono essere impattati da un prodotto o servizio: lavoratori, attori della catena del valore, comunità locali, consumatori e società.

Ciascuna di queste corrisponde ad una o ad un gruppo di persone coinvolte nella catena del sistema del prodotto o comunque influenzata dalle attività correlate durante il ciclo di vita. Per valutare i potenziali impatti sociali e socioeconomici, sono state definite 31 sottocategorie di impatto sociale descritte in una serie complementare di schede metodologiche pubblicate nel 2013 (Benoît et al. 2013). Le sottocategorie di impatto sono elementi o attributi sociali e socioeconomici che descrivono come ciascuna categoria può essere influenzata dai potenziali impatti sociali e socioeconomici del sistema di prodotti. Queste vengono valutate attraverso diversi indicatori di tipo quantitativo, semiquantitativo e qualitativo. In ogni caso l'approccio metodologico alla S-LCA segue, come per la LCA, le quattro fasi standardizzate della ISO 14040, ma incentrate sugli aspetti sociali. Infatti, se nella LCA il sistema di prodotto, identificato nella prima fase, era dato dai processi che caratterizzano i diversi livelli del ciclo di vita del prodotto, dall'estrazione delle materie prime allo smaltimento finale, nella SLCA la prima fase è incentrata nella individuazione delle imprese coinvolte nel ciclo di vita all'interno delle quali hanno luogo i diversi processi industriali. Dunque, nella Social LCA l'analisi non va più effettuata a livello di processo ma bensì di imprese coinvolte nel ciclo di vita e più precisamente, si concentra sul comportamento di quest'ultime nei confronti degli sta-

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

keholders. Inoltre, va considerato che, molti impatti sociali non hanno relazione con i processi che compongono il sistema di prodotto o di servizio, ma con il comportamento dell'impresa che segue il processo stesso; ciò significa che il legame causale non può essere, come nell'LCA, tra processo e impatto, ma tra condotta dell'impresa e impatto. Pertanto, analizzare gli impatti a livello di impresa anziché di prodotto risulta essere più ostico. Bisogna infatti pensare che, nella sfera ambientale essi hanno accezione negativa mentre nell'ambito sociale possono essere negativi o positivi rispetto ad un determinato valore o standard normativo sancito o imposto dalla società. Inoltre, se la LCA basa la sua analisi su aspetti naturali per lo più prevedibili e misurabili la S-LCA indaga su fenomeni sociali, che sono influenzati, per loro natura, da molteplici fattori. Ne consegue che correlare le due analisi può risultare molto più complesso.

3.1.4 | Life Cycle Sustainability Assessment

Anche per la Life Cycle Sustainability Assessment l'approccio generale segue quello già definito dalla norma ISO 14040 delle quattro fasi: (i) definizione dell'ambito e degli obiettivi, (ii) analisi dell'inventario, (iii) valutazione degli impatti e (iv) interpretazione dei risultati. Poiché la LCSA deve combinare le tre valutazioni precedentemente illustrate (LCA, LCC e S-LCA), per ognuna delle quali ambito e obiettivi sono stati definiti, occorre individuare un terreno comune di valutazione, ossia definire un ambito ed obiettivi, inclusa l'unità funzionale di riferimento, validi per le tre valutazioni.

La valutazione LCSA deve, inoltre, contenere tutte le unità funzionali individuate nei tre sottoprocessi, alcune delle quali possono risultare condivise, come illustrato in Fig. 4.

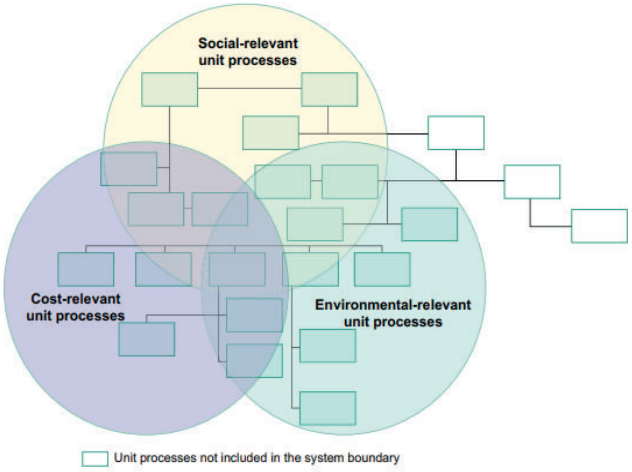


Fig. 4 – Individuazione dell'ambito della LCSA [4]
Identification of the scope in the LCSA [4]

Questa fase include anche l'identificazione degli impatti singolarmente individuati nell'ambito delle tre valutazioni.

Nella fase di raccolta dati che caratterizza l'analisi di inventario, occorre tenere conto di tutte le informazioni riferite alle tre valutazioni (LCA, LCC e S-LCA) per ciascuna delle unità di processo di cui si compone il sistema.

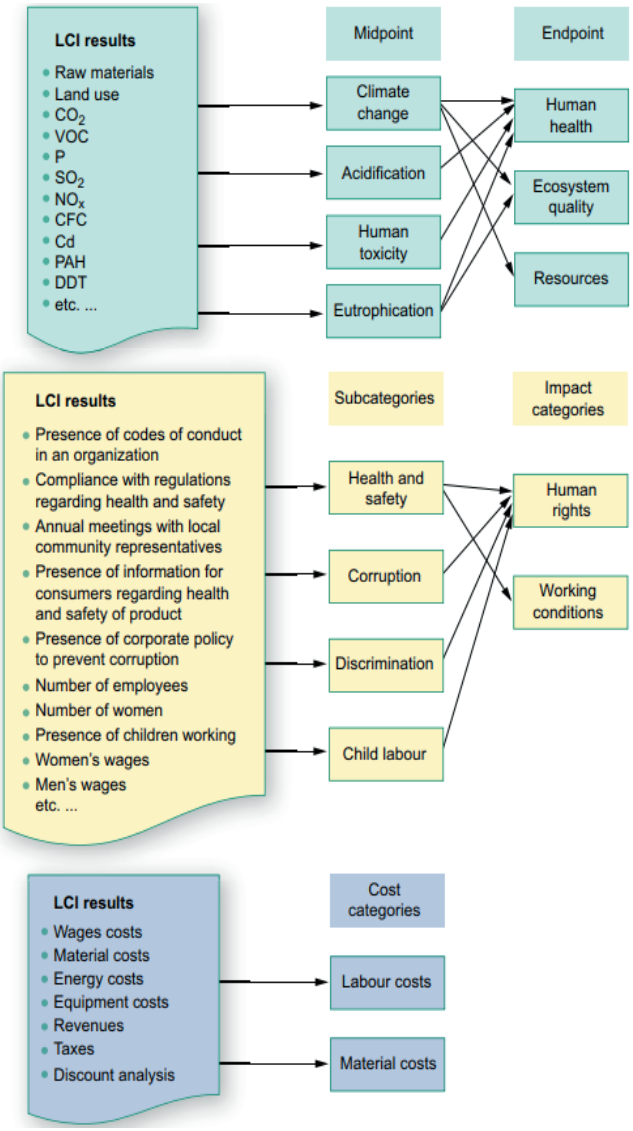


Fig. 5 – Esempio di classificazione ed assegnazione delle categorie di impatto nella LCSA [4]
Example of classification and allocation of impact categories in the LCSA [4]

Gli impatti elencati nella fase precedente di inventario sono poi classificati ed assegnati a categorie di impatto. Poiché le categorie di impatto si diversificano nelle tre valutazioni, conviene mantenere questo step separato nelle tre componenti, come illustrato a titolo esemplificativo, nella Fig. 5.

Nell'ultima fase di valutazione si procede con l'interpretazione dei risultati in maniera combinata, tenendo conto della presenza contemporanea di benefici ed aspetti critici riferiti alle tre dimensioni della sostenibilità: economica, ambientale e sociale.

Questo tipo di analisi consente di individuare quelle parti del processo che possono essere migliorate dal punto di vista della sostenibilità. Parimenti, qualora utilizzata per comparare prodotti che manifestino le stesse funzionalità, è di supporto nell'individuazione delle soluzioni maggiormente sostenibili.

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

3.1.5 | Analisi multicriteria

L'integrazione e successiva interpretazione dei risultati ottenuti attraverso le tre analisi (LCA, LCC e S-LCA) può essere effettuata applicando uno dei metodi decisionali multicriteria (MCDM) ad oggi disponibili. I metodi decisionali multicriteria trovano generalmente applicazione nei problemi dove è richiesto di prendere delle decisioni che coinvolgono un numero finito di alternative. I metodi multicriteria maggiormente utilizzati si possono classificare in tre categorie principali che si basano sull'approccio impiegato:

- Approccio finalizzato all'ottenimento di un punteggio finale. In questo tipo di approccio, tutti gli attributi disponibili sono considerati una sola volta e viene selezionata un'alternativa con la massima utilità o punteggio. Un esempio di questo approccio è il metodo SAW.
- Approccio finalizzato al compromesso. Questo approccio prevede la selezione di alternative che hanno la distanza minima dalla soluzione ideale e la distanza massima da quella non ideale. Appartiene, per esempio, a questa categoria il metodo TOPSIS.
- Approccio finalizzato alla concordanza. In questo tipo di approccio la selezione dell'alternativa si basa sull'organizzazione di una serie di preferenze che soddisfano una misura di concordanza adottata. Questo tipo di approccio è applicato, per esempio, nel metodo ELECTRE.

In funzione del metodo multicriteria selezionato per l'analisi, i dati riferiti a ciascun criterio di sostenibilità vengono normalizzati, pesati ed aggregati per calcolare un indice numerico globale rappresentativo del prodotto/servizio analizzato.

Il processo di normalizzazione ha lo scopo di rendere possibile l'aggregazione dei risultati associati ai criteri valutati con diversi indicatori e differenti unità di misura, attraverso la conversione delle grandezze riferite agli indicatori utilizzati in unità adimensionali variabili in una scala da 0 a 1.

L'operazione di pesatura introduce dei coefficienti che rispecchiano soggettivamente l'importanza assegnata ai vari criteri in funzione degli obiettivi della valutazione e dei valori ottimali verso i quali i prodotti dovrebbero tendere.

Una volta normalizzati e pesati, i vari attributi sono aggregati per fornire un indice di sostenibilità che valuta complessivamente e classifica le varie alternative analizzate.

Tuttavia, i metodi multicriteria presentano delle criticità legate alla soggettività con cui alcuni parametri sono definiti. In primis, i coefficienti di pesatura, definiti in base agli obiettivi della valutazione. I coefficienti sono, pertanto, individuati dagli stessi decisori e quindi, a parità di scenario, possono condurre a risultati diversi. È importante, quindi, definire delle modalità univoche con cui attribuire i coefficienti peso ai vari attributi.

Risultati diversi si possono ottenere anche a seguito dell'utilizzo di differenti metodi MCDM, per cui è prassi comune ripetere la valutazione di sostenibilità utilizzando più modelli per suffragare la decisione finale.

Un altro elemento a cui occorre porre attenzione riguarda la presenza o meno di alternative dominanti rispetto ad altre per uno o più attributi. Al fine di orientare la valutazione verso alternative comparabili, il confronto dovrebbe essere eseguito tra alternative non dominanti. Le alternative non dominanti possono essere individuate attraverso particolari tecniche, come il metodo "Dominance", nel quale le varie alternative vengono comparate a coppie, una alla volta, e scartate quelle che via via risultano dominate per un qualche attributo.

I risultati di queste valutazioni possono anche essere affetti da errori derivanti dall'utilizzo di indicatori non indipendenti, ossia di indicatori in qualche modo legati ad altri indicatori. In questo caso è opportuno suddividere l'indicatore in una serie di sotto-indicatori indipendenti che non contribuiscono ad accrescere o decrescere in maniera anomala il valore finale dell'indice di sostenibilità.

Infine, occorre considerare il grado di incertezza associato ai dati di input utilizzati nella valutazione ed effettuare un'analisi di sensibilità per valutare quanto la variabilità del dato possa influire sul risultato finale. È ovvio che quanto maggiore è l'incertezza associata ai dati e quindi al risultato finale, tanto maggiore è la complessità del processo decisionale che segue l'esito del metodo MCDM adottato.

3.1.6 | Il modello QUIESTT per le barriere antirumore

Il progetto europeo QUIESST (QUIetening the Environment for a Sustainable Surface Transport) [8], cofinanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro (FP7/2007-2013), si è posto come obiettivo lo sviluppo di una procedura di analisi della sostenibilità delle barriere antirumore impiegate per le infrastrutture di trasporto. I dispositivi sono stati valutati dal punto di vista dell'impatto sociale, ambientale, economico e tecnico durante le fasi di progettazione, costruzione, esercizio, manutenzione e smantellamento a fine vita.

Il metodo proposto in QUIESST [8] prevede la valutazione della sostenibilità attraverso un percorso logico che presuppone l'applicazione di un processo valutativo che si compone di diversi step, partendo dalla scelta del modello più idoneo al raggiungimento degli obiettivi prefissati:

- Selezione del metodo di analisi multicriteria da utilizzare.
- Selezione dei criteri di valutazione.
- Selezione dei valori ottimali e dei pesi da assegnare ai diversi criteri.
- Pesatura e normalizzazione dei valori associati a ciascun criterio.
- Calcolo dell'indice di sostenibilità.

In generale, è abbastanza raro reperire un database di criteri di sostenibilità sviluppato ad hoc per uno specifico progetto e/o prodotto (ad esempio, ponti, dighe, autostrade, edifici, aeroporti, ospedali, ecc.).

In QUIESST la raccolta dei dati e la generazione delle informazioni hanno portato alla definizione di un database che comprende 141 criteri di valutazione, di cui 92 misurabili direttamente, specifici per le barriere antirumore che descrivono una serie di caratteristiche di prodotto riconducibili ai

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

quattro aspetti fondamentali della sostenibilità e a tutte le fasi di vita del sistema.

I dati contenuti nel database rappresentano in definitiva i valori più probabili/medi/generici/indicativi che possono essere ottenuti per le diverse tipologie di barriere antirumore, e che quindi possono essere utilizzati per confrontare le prestazioni di un particolare tipo di barriera o per condurre valutazioni indicative di sostenibilità.

La valutazione dei prodotti in merito ai diversi criteri e agli indicatori ad essi riconducibili richiede che siano inoltre assegnati dei coefficienti peso per modulare l'importanza di ciascun criterio in funzione degli obiettivi della valutazione e dei valori ottimali verso i quali i prodotti dovrebbero tendere.

Una volta selezionati i criteri di interesse, per ciascuno di essi è necessario individuare i Key Performance Indicators (KPI), cioè gli indicatori con relativa unità di misura. Per alcuni criteri la scelta è relativamente semplice: per quelli tecnici si può fare riferimento alle Norme tecniche armonizzate, per quelli economici i costi capitali che concorrono al Life Cycle Cost (LCC) sono in genere rapportati all'unità di superficie della barriera antirumore (€/mq). Per altri indicatori è invece necessario condurre delle analisi più approfondite: per alcuni criteri di tipo ambientale, ad esempio, il calcolo dell'indicatore presuppone il ricorso ad algoritmi codificati nell'ambito di norme tecniche specifiche. Infine, per i criteri di tipo sociale l'indicatore è più di carattere qualitativo, misurabile attraverso una valutazione diretta, con un giudizio espresso su scala tipo Likert (Likert R) o con valutazioni del tipo "on/off". È il caso, ad esempio, della valutazione dell'impatto paesaggistico e di tutti gli aspetti correlati: disegno architettonico della barriera, possibilità di oscuramento delle aree residenziali o di accumulo di rifiuti in prossimità della barriera stessa.

La valutazione dei prodotti in merito ai diversi criteri e agli indicatori ad essi riconducibili richiede che siano assegnati dei coefficienti peso per modulare l'importanza di ciascun criterio in funzione degli obiettivi della valutazione e dei valori ottimali verso i quali i prodotti dovrebbero tendere.

Il metodo prevede anche un'operazione di normalizzazione dei valori associati a ciascun criterio su una scala da 0 (bassa sostenibilità) a 1 (alta sostenibilità) per poter comparare tra loro criteri con unità di misura diverse. Nell'ambito del progetto QUIESST sono indicati sei tipi di criteri applicabili per la misurazione e la normalizzazione dei criteri di sostenibilità dei sistemi di riduzione del rumore.

In generale la valutazione della sostenibilità di un prodotto o di una soluzione è frutto di un processo di analisi combinata di una serie di criteri, ritenuti idonei alla valutazione, da attuarsi attraverso processi decisionali multi-criteria (MCDM). Per i sistemi antirumore, nell'ambito del progetto QUIESST sono stati individuati alcuni modelli di analisi ritenuti idonei per il caso specifico. La valutazione della sostenibilità è un problema di analisi multicriteria (MCA) in quanto comporta la selezione e la valutazione di molteplici criteri di sostenibilità dei dispositivi di riduzione del rumore in conflitto.

In funzione del metodo multicriteria selezionato per l'analisi, i dati riferiti a ciascun criterio di sostenibilità vengono normalizzati, pesati ed aggregati per calcolare un indice numerico globale rappresentativo del prodotto analizzato. Tuttavia, va notato che l'ottimizzazione di un particolare criterio isolatamente, ad es. costi e prestazioni tecniche, non aumenta necessariamente la sostenibilità dei progetti dei dispositivi di riduzione del rumore.

In effetti, è la combinazione del risultato di tutti i criteri misurati in relazione tra loro in modo equo all'interno del quadro di sostenibilità definito che mostra la relativa sostenibilità del progetto nel suo insieme. Gli strumenti di analisi multicriteria (MCA) offrono un approccio fattibile per valutare più criteri di sostenibilità in combinazione tra loro in modo imparziale per generare un valore dell'indice in grado di denotare le prestazioni di sostenibilità complessive.

3.2 | Il protocollo ENVISION

ENVISION [9] è un protocollo che consente la valutazione e misurazione del grado di sostenibilità di progetti infrastrutturali, attraverso l'intera gamma di indicatori sociali, economici e ambientali. ENVISION è concepito come un sistema olistico di valutazione della sostenibilità applicabile a tutti i tipi e dimensioni di infrastrutture pubbliche e private. Lo scopo di ENVISION è quello di promuovere progetti maggiormente sostenibili e di supportare le parti interessate nello sviluppo ed implementazione di soluzioni resilienti e sostenibili nel lungo termine.

Il protocollo ENVISION è costituito da un sistema flessibile di criteri e obiettivi prestazionali finalizzati all'identificazione di approcci sostenibili durante le varie fasi del ciclo di vita di un progetto. Consta di 64 indicatori di sostenibilità e resilienza, chiamati «crediti», organizzati intorno a cinque pilastri fondamentali: qualità della vita, leadership, allocazione delle risorse, natura, clima e resilienza. A loro volta, questi comprendono aspetti quali il benessere umano, la mobilità, lo sviluppo della comunità, la collaborazione, la pianificazione, l'economia, i materiali, l'energia, l'acqua, l'ubicazione, la conservazione, l'ecologia, le emissioni e la resilienza, che, nel loro insieme contribuiscono a valutare il grado di sostenibilità dei progetti (Fig. 6).

Ciascuno dei 64 crediti ha più livelli realizzativi che rappresentano lo spettro dei possibili obiettivi di performance, dal leggero miglioramento oltre la pratica convenzionale, alla conservazione e al ripristino di comunità e ambienti. Valutando il raggiungimento di ciascuno dei 64 crediti, i team di progetto possono stabilire in che misura il progetto è sostenibile rispetto ai diversi aspetti valutati e su quali parametri eventualmente intervenire per migliorarne le prestazioni di sostenibilità.

Il protocollo ENVISION prevede, in aggiunta all'autovalutazione, anche la possibilità di certificare il grado di sostenibilità del progetto da parte di un soggetto terzo, fornendo, in questo modo, un riconoscimento pubblico delle prestazioni esibite.

Il protocollo ENVISION può essere applicato nelle diverse fasi del ciclo di vita di un progetto, dalla pianificazione fino alla dismissione a fine vita di un'infrastruttura. Quanto più precoce è la sua applicazione, tanto più efficace ed efficiente risulta il perseguimento degli obiettivi di sostenibilità.

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.



Fig. 6 – Infrastrutture oggetto di valutazione del protocollo ENVISION

Infrastructure assessed under the ENVISION Protocol

3.2.1 | Utilizzo del protocollo ENVISION nelle varie fasi del ciclo di vita delle infrastrutture

Nella fase di pianificazione del progetto, ENVISION può essere utilizzato per valutare i desiderata della comunità, coinvolgere le parti interessate e creare consenso attorno alla migliore soluzione progettuale. Può, inoltre, essere utilizzato per definire l'ambito di un progetto, l'assegnazione di priorità a un elenco di progetti e per effettuare il confronto delle alternative progettuali.

Nella fase di progettazione, ENVISION, attraverso il processo di valutazione per crediti, guida verso l'identificazione dei possibili margini di miglioramento da attuare al progetto per incrementarne la sostenibilità.

Nella fase di costruzione, il grado di sostenibilità del progetto viene misurato nel concreto, documentato e confrontato con quello individuato in fase di progettazione. In questa fase è inoltre possibile misurare l'impatto dei crediti sul processo di costruzione e sui costi. Durante la fase di esercizio e manutenzione, ENVISION fornisce indicatori chiave di prestazione che possono essere monitorati durante la vita del progetto.

3.2.2 | Valutazione delle componenti di sostenibilità

Nel protocollo ENVISION alle tre dimensioni della sostenibilità (sociale, economico e ambientale) è stata aggiunta una quarta dimensione riferita ai cambiamenti climatici e alla resilienza delle infrastrutture ad eventi estremi.

Componente sociale. Per quanto concerne la componente sociale occorre considerare tutti quegli aspetti che possano garantire equità e giustizia sociale. Per esempio, una infrastruttura può essere migliorata dal punto di vista ambientale ed economico, ma al contempo indurre fenomeni di congestione o espansione urbana.

L'equità e la giustizia sociale si riferiscono alla responsabilità di una società di garantire uguaglianza, nonché la preservazione e tutela dei diritti civili e umani. Questi aspetti sono particolarmente rilevanti per lo sviluppo delle infrastrutture, che spesso implicano vantaggi ed impatti potenzialmente significativi. ENVISION affronta l'equità e la giustizia sociale incoraggiando il coinvolgimento attivo delle parti interessate della comunità durante l'intero ciclo di vita del progetto, incoraggiando i team di progetto a sviluppare una comunicazione bidirezionale con le comunità interessate, consentendo loro di esaminare in modo olistico gli impatti di un progetto da ogni angolazione.

Componente ambientale. Il ripristino delle risorse naturali e dei servizi ecosistemici è un obiettivo esplicito del protocollo ENVISION. Sebbene il miglioramento delle prestazioni sostenibili di un'infrastruttura sia un obiettivo essenziale e immediato, i progetti dovrebbero tendere nel lungo termine al ripristino delle condizioni ambientali, ove possibile. Ciò ha lo scopo di rafforzare il concetto che, per contribuire alla sostenibilità, i progetti devono fare di più che mitigare gli impatti negativi. La mitigazione è importante, ma non contribuisce al ripristino delle condizioni economiche, ambientali e sociali a livelli sostenibili.

Componente economica. Lo sviluppo economico condotto senza esaurire le risorse sociali e naturali è un target essenziale dello sviluppo sostenibile. Sebbene non tutti i progetti infrastrutturali siano direttamente collegati alla crescita economica, è comunque presente in qualche modo anche la dimensione economica.

Il ritorno sull'investimento e i costi di capitale iniziali sono spesso i fattori chiave nelle decisioni di pianificazione, che, tuttavia, non tengono conto dei costi del ciclo di vita del progetto, dei rischi e dell'incertezza, o degli impatti più ampi sull'ambiente e sulla società. ENVISION quantifica anche questi aspetti per evitare di trascurare i ritorni sostenibili sull'investimento, come i minori costi di utilità, di esercizio e manutenzione o di sostituzione.

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

Componente di resilienza. I rischi a breve e lungo termine devono essere ridotti. In ENVISION i team di progetto sono guidati a implementare misure e infrastrutture che impediscano di impegnare la comunità in costi fissi elevati o di creare una forte dipendenza da risorse che potrebbero diventare scarse e/o molto costose. Al contrario, i progetti che creano o aumentano la vulnerabilità a eventi meteorologici estremi, disastri naturali e/o condizioni economiche sono considerati concettualmente carenti.

In ENVISION il progetto viene analizzato in tutte le sue componenti per l'intero ciclo di vita, dando maggiore credito ai progetti che analizzano le varie componenti delle opere progettate. I progetti che offrono una maggiore durata e flessibilità per prolungare la vita utile delle opere costruite ricevono un ulteriore riconoscimento. Il prolungamento della vita utile delle opere costruite significa che le strutture sostitutive sono meno necessarie. Viene, inoltre, dato più credito a quei progetti che incorporano i principi di decostruzione e che consentono il riutilizzo e il riciclo di materiali e attrezzature.

3.2.3 | I crediti di ENVISION

ENVISION consta di 64 indicatori di sostenibilità e resilienza, chiamati "crediti", organizzati intorno a cinque pilastri fondamentali: qualità della vita, leadership, allocazione delle risorse, natura, clima e resilienza. A loro volta, questi comprendono aspetti quali il benessere umano, la mobilità, lo sviluppo della comunità, la collaborazione, la pianificazione, l'economia, i materiali, l'energia, l'acqua, l'ubicazione, la conservazione, l'ecologia, le emissioni e la resilienza. Nella Fig. 7 sono illustrati i 64 crediti individuati dal protocollo ENVISION.

A ciascuno di questi crediti è assegnato un punteggio che rispecchia la prestazione dell'azione attuata. La somma di tutti i punteggi fornisce la valutazione finale, espressa in percentuale rispetto al punteggio totale ammissibile.

Il punteggio fa riferimento al raggiungimento delle seguenti prestazioni in termini di sostenibilità:

- Improved: miglioramento rispetto ai requisiti normativi/convenzionali;
- Enhanced: prestazioni superiori rispetto ai requisiti normativi;
- Superior: prestazioni di alto livello;
- Conserving: prestazioni a zero impatto;
- Restorative: prestazioni che ripristinano sistemi naturali o sociali. A tale performance è assegnato il punteggio più alto. Il livello Restorative non è applicabile a tutti gli obiettivi di performance.

Non tutti i crediti hanno cinque livelli di realizzazione. I livelli sono determinati dalla natura del credito e dalla capacità di operare distinzioni significative tra i livelli.

I criteri di valutazione sono indicati con delle lettere che vanno da A ad E e comprendono sia requisiti qualitativi che quantitativi. Tutti i criteri di valutazione sono inquadrati come domande, le cui risposte devono attenersi alle descrizioni fornite sui diversi crediti dal protocollo stesso per poter essere categorizzate opportunamente.

Per la valutazione delle prestazioni è necessario che sia fissata una baseline rispetto alla quale determinare i miglioramenti che conseguono all'applicazione di una soluzione o di più soluzioni alternative.

ENVISION riconosce che non tutti i crediti sono applicabili ai vari tipi di progetto. In questo caso, tali crediti possono essere omessi nel processo di valutazione. La non applicazione deve essere opportunamente giustificata.

4 | Applicazione dei metodi analizzati a due casi studio

Nei successivi paragrafi sono illustrati due casi studio riferiti a differenti applicazioni operative.

Nel primo caso studio sono state confrontate le prestazioni di diverse tipologie di barriera antirumore per valutarne la relativa sostenibilità attraverso il modello QUIESTT.

Nel secondo caso studio è stato, invece, utilizzato il protocollo ENVISION per valutare la sostenibilità di due alternative progettuali applicate ad un'area suburbana per mitigare gli impatti sonori prodotti da una infrastruttura stradale.

4.1 | Primo caso studio: applicazione del modello QUIESTT

Il modello QUIESTT è stato applicato a 11 diverse tipologie di barriere per valutarne la sostenibilità intrinseca, indipendente dall'applicazione delle stesse in un determinato contesto operativo.

Allo scopo è stata utilizzata una procedura semplificata, basata sulle indicazioni rese disponibili dal progetto QUIESST, nell'ambito della quale i principali tipologici di barriera sono stati analizzati dal punto di vista dell'impatto sociale, ambientale, economico e tecnico [28].

L'analisi di sostenibilità è stata condotta utilizzando un metodo semplice e intuitivo, noto come SAW (Simple Additive Weighting). Questo approccio prevede:

1. la selezione dei criteri di valutazione;
2. l'individuazione dei benchmark per i criteri selezionati;
3. la pesatura e normalizzazione dei valori assegnati a ciascun criterio su una scala da 0 (bassa sostenibilità) a 1 (alta sostenibilità);
4. la somma dei valori normalizzati;
5. il calcolo dell'indice di sostenibilità.

I criteri di valutazione sono stati scelti tra quelli individuati nel progetto QUIESST, tenendo conto del loro impatto sulla specifica applicazione. Dal database QUIESST sono stati selezionati 44 criteri di valutazione che descrivono varie caratteristiche di prodotto, riconducibili ai quattro aspetti fondamentali della sostenibilità: ambientale, sociale, tecnico ed economico.

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

ENVISION POINTS TABLE

			Improved	Enhanced	Superior	Conserving	Restorative	Maximum Points
Quality of Life	Wellbeing	QL1.1 Improve Community Quality of Life	2	5	10	20	26	200
		QL1.2 Enhance Public Health & Safety	2	7	12	16	20	
		QL1.3 Improve Construction Safety	2	5	10	14	—	
		QL1.4 Minimize Noise & Vibration	1	3	6	10	12	
		QL1.5 Minimize Light Pollution	1	3	6	10	12	
		QL1.6 Minimize Construction Impacts	1	2	4	8	—	
	Mobility	QL2.1 Improve Community Mobility	1	3	7	11	14	
		QL2.2 Encourage Sustainable Transportation	—	5	8	12	16	
		QL2.3 Improve Access & Wayfinding	1	5	9	14	—	
	Community	QL3.1 Advance Equity & Social Justice	3	6	10	14	18	
		QL3.2 Preserve Historic & Cultural Resources	—	2	7	12	18	
		QL3.3 Enhance Views & Local Character	1	3	7	11	14	
		QL3.4 Enhance Public Space & Amenities	1	3	7	11	14	
Leadership	Collaboration	LD1.1 Provide Effective Leadership & Commitment	2	5	12	18	—	182
		LD1.2 Foster Collaboration & Teamwork	2	5	12	18	—	
		LD1.3 Provide for Stakeholder Involvement	3	6	9	14	18	
		LD1.4 Pursue Byproduct Synergies	3	6	12	14	18	
	Planning	LD2.1 Establish a Sustainability Management Plan	4	7	12	18	—	
		LD2.2 Plan for Sustainable Communities	4	6	9	12	16	
		LD2.3 Plan for Long-Term Monitoring & Maintenance	2	5	8	12	—	
		LD2.4 Plan for End-of-Life	2	5	8	14	—	
	Economy	LD3.1 Stimulate Economic Prosperity & Development	3	6	12	20	—	
		LD3.2 Develop Local Skills & Capabilities	2	4	8	12	16	
		LD3.3 Conduct a Life-Cycle Economic Evaluation	5	7	10	12	14	
Resource Allocation	Materials	RA1.1 Support Sustainable Procurement Practices	3	6	9	12	—	196
		RA1.2 Use Recycled Materials	4	6	9	16	—	
		RA1.3 Reduce Operational Waste	4	7	10	14	—	
		RA1.4 Reduce Construction Waste	4	7	10	16	—	
		RA1.5 Balance Earthwork On Site	2	4	6	8	—	
	Energy	RA2.1 Reduce Operational Energy Consumption	6	12	18	26	—	
		RA2.2 Reduce Construction Energy Consumption	1	4	8	12	—	
		RA2.3 Use Renewable Energy	5	10	15	20	24	
		RA2.4 Commission & Monitor Energy Systems	3	6	12	14	—	
	Water	RA3.1 Preserve Water Resources	3	5	7	9	12	
		RA3.2 Reduce Operational Water Consumption	4	9	13	17	22	
		RA3.3 Reduce Construction Water Consumption	1	3	5	8	—	
		RA3.4 Monitor Water Systems	1	3	6	12	—	
Natural World	Siting	NW1.1 Preserve Sites of High Ecological Value	2	6	12	16	22	232
		NW1.2 Provide Wetland & Surface Water Buffers	2	5	10	16	20	
		NW1.3 Preserve Prime Farmland	—	2	8	12	16	
		NW1.4 Preserve Undeveloped Land	3	8	12	18	24	
	Conservation	NW2.1 Reclaim Brownfields	11	13	16	19	22	
		NW2.2 Manage Stormwater	2	4	9	17	24	
		NW2.3 Reduce Pesticide & Fertilizer Impacts	1	2	5	9	12	
		NW2.4 Protect Surface & Groundwater Quality	2	5	9	14	20	
	Ecology	NW3.1 Enhance Functional Habitats	2	5	9	15	18	
		NW3.2 Enhance Wetland & Surface Water Functions	3	7	12	18	20	
		NW3.3 Maintain Floodplain Functions	1	3	7	11	14	
		NW3.4 Control Invasive Species	1	2	6	9	12	
		NW3.5 Protect Soil Health	—	3	4	6	8	
Climate and Resilience	Emissions	CR1.1 Reduce Net Embodied Carbon	5	10	15	20	—	190
		CR1.2 Reduce Greenhouse Gas Emissions	8	13	18	22	26	
		CR1.3 Reduce Air Pollutant Emissions	2	4	9	14	18	
	Resilience	CR2.1 Avoid Unsuitable Development	3	6	8	12	16	
		CR2.2 Assess Climate Change Vulnerability	8	14	18	20	—	
		CR2.3 Evaluate Risk and Resilience	11	18	24	26	—	
		CR2.4 Establish Resilience Goals and Strategies	—	8	14	20	—	
		CR2.5 Maximize Resilience	11	15	20	26	—	
		CR2.6 Improve Infrastructure Integration	2	5	9	13	18	
							Maximum TOTAL Points	1,000

Fig. 7 – Punteggi riferiti ai diversi crediti in funzione delle prestazioni (ENVISION)

Performance scores for different credits (ENVISION)

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

I criteri tecnici scelti hanno riguardato principalmente le caratteristiche geometriche e funzionali del prodotto, la durabilità, l'edificabilità e rimovibilità della barriera, la frequenza di manutenzione, il controllo della riflessione luminosa e la resistenza al vandalismo.

I criteri ambientali sono stati riferiti alle potenzialità di riciclabilità ed eco-compatibilità del prodotto, mentre quelli economici ai costi di fornitura, posa in opera, trasporto, manutenzione ordinaria e straordinaria.

A questi criteri ne sono stati aggiunti due di tipo qualitativo: estetico (integrazione della barriera con il paesaggio e design) e di opportunità (adattabilità ai diversi scenari ambientali e territoriali).

In assenza di informazioni affidabili, non è stato possibile valutare l'impatto sociale dei prodotti analizzati.

La valutazione dei prodotti in base ai diversi criteri e agli indicatori richiede l'assegnazione di coefficienti peso per modulare l'importanza di ciascun criterio in funzione degli obiettivi della valutazione e dei valori ottimali a cui i prodotti dovrebbero tendere. La figura 8 mostra un esempio di matrice per l'assegnazione dei benchmark e dei pesi ai diversi criteri, in base al tipo di barriera analizzato.

Criterio di sostenibilità	Vulnerabilità al vandalismo
Sociale	X
Economico	
Ambientale	
Tecnico	
Peso	1
Tipo di indicatore	Quantitativo
Metodo di valutazione	Valutazione vulnerabilità al vandalismo: 1 elevata -10 bassa
Barriera Metallica	2
Barriera in cls	2
Valore finale	10

Fig. 8 – Assegnazione dei valori ottimali e dei pesi ai criteri di valutazione selezionati

Assignment of optimal values and weights to selected evaluation criteria

In verde sono evidenziati i pesi assegnati ai diversi criteri in funzione della loro rilevanza (alta=1, media=0,5 o bassa=0,1) per il raggiungimento degli obiettivi di progetto. In azzurro sono riportati i valori ottimali attribuiti ai diversi criteri basati su dati di letteratura, norme di riferimento o potenzialità dei prodotti esistenti in commercio. In rosso sono indicati i valori assunti dal particolare criterio per il tipo di barriera analizzato.

Le informazioni necessarie per valutare i diversi criteri sono state raccolte direttamente dai produttori delle barriere acustiche. A tal fine, è stato predisposto un questionario, distribuito ai principali produttori presenti sul mercato e organizzato in 5 diversi fogli Excel, ciascuno dedicato a uno specifico tipo di barriera: calcestruzzo, plastica, trasparente, legno e metallo. Il questionario è stato somministrato a 18 produttori. Al questionario hanno risposto soltanto 11 delle aziende contattate.

4.1.1 | Calcolo dell'indice di sostenibilità per tipologia di barriera

Per calcolare l'indice di sostenibilità attraverso il metodo SAW, i dati relativi a ciascun criterio forniti dai produttori sono stati normalizzati rispetto ai valori ottimali individuati. Successivamente, i valori normalizzati sono stati ponderati in base al punteggio di rilevanza assegnato a ciascun criterio. La somma di questi valori, ulteriormente normalizzata tra 0 e 1, ha permesso di ottenere l'indice di sostenibilità complessivo del prodotto.

La valutazione della sostenibilità dei prodotti è stata effettuata seguendo una procedura che prevede prima il calcolo dell'indice di sostenibilità per ogni tipologia di barriera e poi l'estrazione della classifica complessiva. Dall'analisi è emersa la seguente graduatoria, in ordine decrescente di sostenibilità:

1. barriere trasparenti: punteggio 0,66;
2. barriere in legno: punteggio 0,35;
3. barriere in calcestruzzo: punteggio 0,30;
4. barriere metalliche: punteggio 0,28.

Le barriere trasparenti si sono distinte per la loro elevata sostenibilità, principalmente grazie alle eccellenti caratteristiche estetiche e alla versatilità d'uso. Al contrario, le barriere metalliche hanno ottenuto i punteggi più bassi, dovuti principalmente alla frequente necessità di manutenzione e alla mancanza di accorgimenti supplementari per migliorarne le prestazioni. Non sono state reperite informazioni sufficienti sulle barriere in plastica e, pertanto, quest'ultime sono state escluse dalla valutazione.

4.2 | Secondo caso studio: applicazione del protocollo ENVISION [1,2]

Il secondo caso studio si riferisce a un'area suburbana situata nella città di Roma, attraversata dall'autostrada A90. Nonostante il carattere prevalentemente industriale dell'area, sono presenti diversi edifici residenziali e due recettori sensibili: un asilo nido e una scuola primaria. Data la vicinanza di molti recettori alla sorgente stradale, lungo l'autostrada A90 sono state a suo tempo installate barriere antirumore. Recenti indagini fonometriche hanno, tuttavia, rilevato livelli di pressione sonora ancora al di sopra dei limiti di legge. Pertanto, per ridurre ulteriormente l'impatto ai ricettori, sono state progettate due soluzioni correttive ed è stato applicato il protocollo ENVISION per identificare la soluzione più sostenibile.

4.3 | Individuazione e progettazione delle misure di mitigazione sonora

Le ipotesi progettuali sono state delineate considerando il livello medio di rumore dell'area e la presenza di singoli hotspot con alti impatti acustici. La valutazione di impatto acustico è stata effettuata tra gennaio e maggio 2021 utilizzando un modello di calcolo calibrato con dati raccolti in loco presso una serie di recettori opportunamente selezionati e rappresentativi del clima acustico dell'area. I risultati, mostra-

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

ti in Tabella 1, indicano che i livelli di rumore superano i limiti di legge di 1-4 dB(A) in media, con punte di 11-16 dB(A) presso gli edifici residenziali che costeggiano l'autostrada.

Tab. 1 – Risultati delle misure
Results of the measurement campaign

Ricettore	*Indirizzo*	*Altezza (m)*	*LAeq (dB)*
PR1	Via Orazio Raimondo	4	52,0
PR2	Scuola elementare "Federico Fellini"	4	54,0
PR3	Asilo nido "Uno, Due Tre... Stella"	4	55,0
PR4	Via Ubaldo Comandini	4	67,0
PR5	Via Emilio Brusa	4	73,5
PR6	Via Salvatore Barzilai	4	75,0
PR7	Via Giacomo Delitala	4	73,0

I dati acquisiti hanno suggerito l'implementazione di un approccio olistico, basato sull'implementazione ed integrazione di diverse misure di mitigazione sonora per risanare la totalità dell'area. Per consentire il confronto, in termini di sostenibilità, dei potenziali interventi di risanamento, sono stati valutati due scenari mitigativi, denominati A e B.

4.3.1 | Scenario A

Questo scenario (Figura 9) include due soluzioni:

- una pavimentazione antirumore, per ridurre i livelli di rumore in corrispondenza dei ricettori con superamenti inferiori a 3 dB(A);
- barriere antirumore da apporre lungo le carreggiate e lo spartitraffico in corrispondenza dei ricettori critici con superamenti maggiori di 3 dB(A).

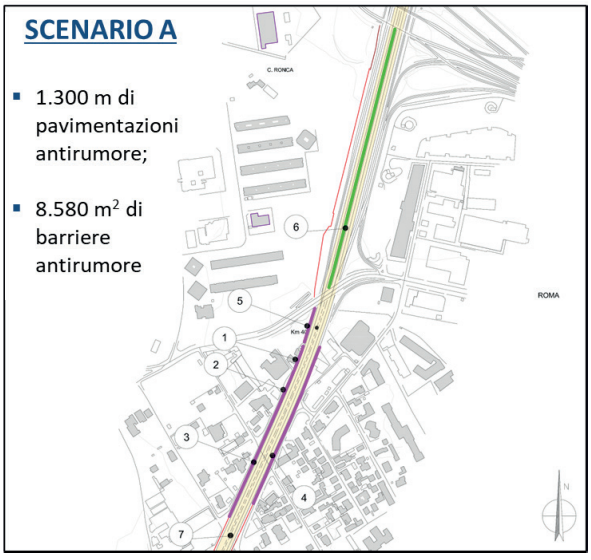


Fig. 9 – Scenario mitigativo A
Noise mitigation measures related to Scenario A

L'accoppiamento della pavimentazione antirumore con le barriere acustiche consente di mitigare anche i ricettori più arretrati rispetto alla sorgente, agendo uniformemente su tutta l'area e contribuendo a contenere l'altezza delle barriere necessarie per ridurre l'impatto sui ricettori più critici. La Tabella 2 mostra il tipo e la dimensione delle misure progettate.

Tab. 2 – Tipo e dimensioni delle misure mitigative progettate (Scenario A)
Type and size of noise mitigation measures (Scenario A)

Tipo	*L (m)*	*H (m)*	*Aggetto*		*Superficie (m²)*
			Estensione (m)	*Tilt (°)*	
Barriere carreggiata interna	470	5	3	45	3.760
Barriere carreggiata esterna	340	5	3	45	2.720
Barriera spartitraffico	525	4	–	–	2.100
Pavimentazione antirumore	1.300		–	–	36.400

4.3.2 | Scenario B

Come nello scenario A, lo scenario B (Fig. 10) include una pavimentazione antirumore e l'installazione di barriere acustiche, ma solo sui lati esterni delle carreggiate dell'autostrada A90. Laddove l'uso delle barriere antirumore richiederebbe investimenti significativi per garantire il raggiungimento degli obiettivi di riduzione del rumore, la soluzione prevede l'implementazione di misure dirette ai recettori (finestre insonorizzate).

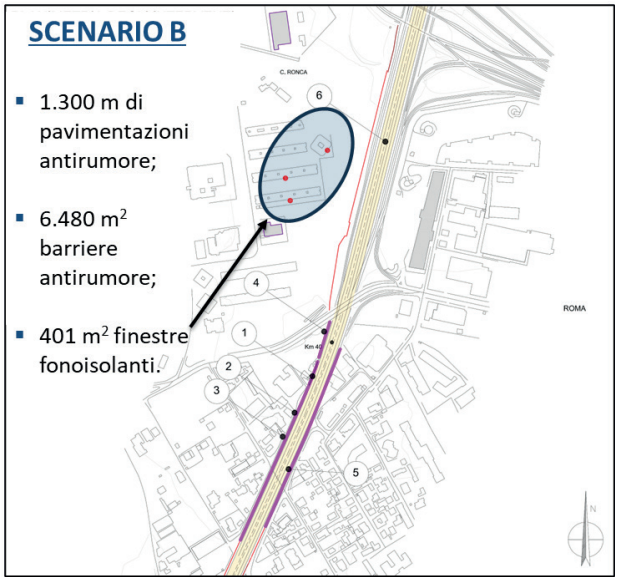


Fig. 10 – Scenario mitigativo B
Noise mitigation measures related to Scenario B

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

La Tabella 3 mostra il tipo e la dimensione delle misure progettate.

Tab. 3 – Tipo e dimensioni delle misure mitigative progettate (Scenario B)

Type and size of noise mitigation measures (Scenario B)

Tipo	*L (m)*	*H (m)*	*Aggetto*		*Superficie (m²)*
			Estensione (m)	*Tilt (°)*	
Barriere antirumore carreggiata interna	470	5	3	45	3.760
Barriere antirumore carreggiata esterna	340	5	3	45	2.720
Pavimentazione antirumore	1.300		–	–	36.400

4.4 | Analisi di sostenibilità delle soluzioni progettate

Considerando il contesto infrastrutturale delle soluzioni progettate, è stato deciso di applicare il protocollo ENVISION per valutarne la sostenibilità. Il protocollo ENVISION prevede la valutazione di 64 criteri, non tutti applicabili al contesto specifico. Di conseguenza, considerando l'oggetto degli interventi pianificati, sono stati selezionati esclusivamente quei criteri ad essi strettamente correlati o per i quali è possibile trovare le informazioni necessarie alla loro quantificazione, anche in relazione al livello di dettaglio raggiunto nella fase di progettazione. ENVISION definisce cinque categorie di criteri, all'interno delle quali sono identificate ulteriori sottocategorie:

1. Qualità della vita: Benessere, Mobilità, Comunità.
2. Leadership: Collaborazione, Pianificazione, Economia.
3. Allocazione delle Risorse: Materiali, Energia, Acqua.
4. Natura: Ubicazione, Conservazione, Ecologia.
5. Clima e Resilienza: Emissioni, Resilienza.

In relazione al caso studio proposto, i criteri che possono essere oggettivamente valutati in base al livello di dettaglio progettuale raggiunto sono illustrati nella Tabella 4.

I criteri che necessitano di maggiori informazioni, disponibili solo in fasi avanzate della progettazione o di gara, per quanto riguarda le modalità costruttive, potranno essere applicati successivamente. Il protocollo ENVISION implica, infatti, un approccio incrementale, che si estende progressivamente a tutti i criteri identificati, man mano che vengono acquisiti nuovi dettagli. In altre parole, il protocollo ENVISION fornisce gli strumenti per valutare il grado di sostenibilità di un progetto durante le varie fasi di sviluppo e per indirizzare il processo decisionale verso soluzioni che ottimizzino le prestazioni complessive.

Nella Tabella 5 sono riportati i risultati ottenuti, attraverso i quali è possibile evincere che lo scenario B è più sostenibile dello scenario A, anche se alcuni aspetti peculiari delle soluzioni progettate non sono in alcun modo quantificati, come la minore accettazione da parte della popolazione esposta di misure di mitigazione implementate direttamente sui recettori.

Tab. 4 – Criteri selezionati per la valutazione della sostenibilità degli scenari progettuali analizzati

Selected criteria for evaluating the sustainability of the designed scenarios

Categoria	*Sottocategoria*	*Criteri*
Qualità della vita	*Benessere*	QL1.1 Migliorare la qualità della vita
		QL1.2 Migliorare la salute pubblica e la sicurezza
		QL1.4 Minimizzare il rumore e le vibrazioni
	Comunità	QL3.1 Migliorare l'equità e la giustizia sociale
		QL3.3 Migliorare l'impatto visivo ed il carattere locale
Leadership	*Collaborazione*	LD1.2 promuovere la collaborazione ed il lavoro di squadra
	Pianificazione	LD2.1 Stabilire un piano di gestione della sostenibilità
		LD2.3 Pianificare il monitoraggio e la manutenzione a lungo termine
		LD2.4 Pianificare la fine del ciclo di vita
	Economia	LD3.3 Effettuare una valutazione dell'impatto economico sull'intero ciclo di vita
Allocazione delle risorse	*Materiali*	RA1.2 Utilizzo di materiali riciclati
	Energia	RA2.3 Utilizzo di energia da fonte rinnovabile
		RA2.4 Monitoraggio dei Sistemi energetici
Natura	*Ubicazione*	NW1.4 Preservare le aree non sviluppate
	Ecologia	NW3.1 Migliorare gli habitat funzionali
Clima e resilienza	*Emissioni*	CR1.1 Ridurre le concentrazioni di carbonio
		CR1.3 Ridurre le emissioni di inquinanti in atmosfera

Quest'ultimo aspetto pone un problema di giustizia sociale e di apprezzamento da parte della popolazione residente, che dovrebbe essere debitamente considerato. Inoltre, sebbene analisi economiche come la LCCA e l'analisi costi/benefici siano menzionate nel criterio LD3.3, non emergono evidenze quantitative in grado di indirizzare la valutazione, a differenza di quanto riscontrato per altri criteri, come quelli relativi all'uso di materiali riciclati (RA1.2) o alle emissioni di CO2 (CR.1.1). L'applicazione del protocollo ENVISION ha mostrato una serie di carenze dovute essenzialmente alla natura generale del metodo di valutazione proposto, per il quale si ritiene sia necessaria l'introduzione di ulteriori indicatori, all'interno dei criteri proposti, in grado di fornire valutazioni quantitative su alcuni aspetti correlati con l'oggetto della valutazione.

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

Tab. 5 – Risultati ottenuti con l'applicazione del protocollo ENVISION al caso studio

Results achieved by applying the ENVISION protocol to the case study

Criteri	*Scenario A*	*Scenario B*
QL1.1 Migliorare la qualità della vita della comunità	5	5
QL1.2 Migliorare la salute e la sicurezza pubblica	16	16
QL1.4 Minimizzare il rumore e le vibrazioni	12	10
QL3.1 Promuovere l'equità e la giustizia sociale	13	13
QL3.3 Migliorare l'impatto visivo e il carattere locale	14	14
LD1.2 Promuovere la collaborazione e il lavoro di squadra	15	15
LD2.1 Stabilire un piano di gestione della sostenibilità	1	1
LD2.3 Pianificare il monitoraggio e la manutenzione a lungo termine	2	2
LD2.4 Pianificare la fine del ciclo di vita	13	13
LD3.3 Condurre una valutazione economica del ciclo di vita	14	14
RA1.2 Utilizzare materiali riciclati	2	2
RA2.3 Utilizzare energia da fonti rinnovabili	0	0
RA2.4 Monitorare i sistemi energetici	0	0
NW1.4 Preservare le aree non sviluppate	18	18
CR1.1 Ridurre le concentrazioni di carbonio	5	10
CR1.3 Ridurre le emissioni di inquinanti in atmosfera	4	4
Total score	134	137

5 | Confronto tra i metodi analizzati

Il presente studio ha esaminato e confrontato due importanti strumenti di valutazione della sostenibilità: il protocollo ENVISION e la Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). Entrambi gli strumenti mirano a indirizzare e quantificare gli aspetti della sostenibilità, sebbene attraverso approcci metodologici distinti e con applicazioni in ambiti diversi. Il protocollo ENVISION si distingue per la sua specifica applicabilità ai progetti infrastrutturali, offrendo un framework strutturato per incorporare pratiche sostenibili fin dalle fasi iniziali di progettazione e costruzione. Questa focalizzazione permette agli stakeholder coinvolti nei progetti infrastrutturali di adottare decisioni consapevoli per migliorare la performance ambientale, sociale ed economica. Tuttavia, la sua applicazione resta limitata a questo specifico settore, potendo trascurare altre fasi cruciali del ciclo di vita di un progetto.

D'altra parte, la LCSA si presenta come un metodo più universale, applicabile a un'ampia varietà di prodotti e servizi. Basandosi sui consolidati principi della valutazione del ciclo di vita (LCA), estende l'analisi agli impatti sociali ed economici lungo tutto il ciclo di vita di un prodotto o servizio, dalla culla alla tomba. Questo approccio olistico fornisce una visione comprensiva della sostenibilità, ma richiede l'impiego di risorse significative e di specifiche competenze tecniche, che possono rappresentare una barriera.

Il confronto tra il protocollo ENVISION e la LCSA evidenzia quindi la complementarità degli strumenti di valutazione della sostenibilità, ciascuno con i propri punti di forza e limitazioni. L'ENVISION, con il suo focus su progetti infrastrutturali e sull'integrazione della sostenibilità nelle fasi di progettazione e realizzazione, si adatta particolarmente bene agli ambienti in cui è necessario guidare decisioni rapide e basate su criteri di sostenibilità. Tuttavia, il carattere generale di questa modalità di valutazione spesso non consente di discernere le differenze tra soluzioni alternative, quando quest'ultime prevedono un iter progettuale e realizzativo simile, mettendo in luce la necessità di personalizzare alcuni dei criteri proposti in relazione all'oggetto della valutazione [2]. Sebbene, quindi, il protocollo ENVISION si proponga come una soluzione alternativa e di più facile gestione nella valutazione della sostenibilità, presenta allo stato attuale ancora delle criticità che possono essere risolte attraverso l'affinamento di alcuni criteri che consentano in maniera più efficace di discernere le peculiarità delle soluzioni proposte. Ciò non toglie, tuttavia, al protocollo ENVISION, il merito di aver proposto un approccio strutturato di facile comprensione ed attuazione, in contrapposizione a modelli di minore facile gestione ed interpretazione, come l'LCSA [3].

D'altro canto, la LCSA, con il suo approccio olistico e la sua applicabilità trasversale, offre una valutazione omnicomprensiva che può guidare scelte sostenibili in una varietà di contesti, nonostante le sue esigenze metodologiche e di risorse possano limitarne l'accessibilità.

In conclusione, la scelta tra il protocollo ENVISION e la LCSA dipende dagli obiettivi specifici del progetto, dal contesto applicativo e dalle risorse disponibili. La loro applicazione e integrazione possono giocare un ruolo fondamentale nell'orientare il mondo verso pratiche più sostenibili, sottolineando l'importanza di un approccio multimodale alla valutazione e all'integrazione della sostenibilità nei progetti e nei prodotti di domani.

6 | Conclusioni

In questo studio sono stati confrontati i due strumenti maggiormente utilizzati per la valutazione della sostenibilità: il protocollo ENVISION e la Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). Questi strumenti offrono approcci distinti ma complementari per misurare e guidare le pratiche sostenibili.

Il protocollo ENVISION è particolarmente adatto per progetti infrastrutturali, offrendo un quadro strutturato che consente di integrare i criteri di sostenibilità nelle diverse fasi del ciclo di vita dei progetti.

D'altra parte, la LCSA si presenta come un metodo più universale, applicabile a una vasta gamma di prodotti e servizi. Questo approccio olistico, che combina valutazioni ambientali, sociali ed economiche lungo l'intero ciclo di vita,

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

fornisce una visione omnicomprensiva della sostenibilità. Tuttavia, richiede risorse significative e competenze specifiche, il che può rappresentare una barriera alla sua implementazione.

Il confronto tra i due approcci ha evidenziato che, sebbene il protocollo ENVISION sia più semplice da gestire, presenta ancora alcune criticità che potrebbero essere migliorate affinando i criteri proposti. Al contrario, la LCSA, nonostante la sua complessità, offre un'analisi dettagliata e integrata, utile per una valutazione globale della sostenibilità.

In conclusione, la scelta tra il protocollo ENVISION e la LCSA dipende dagli obiettivi specifici del progetto, dal contesto applicativo e dalle risorse disponibili. L'applicazione e l'integrazione di entrambi gli strumenti possono giocare un ruolo fondamentale nel promuovere pratiche sostenibili, sottolineando l'importanza di un approccio multimodale alla valutazione della sostenibilità nei progetti e nei prodotti del futuro.

Implementare una combinazione di entrambi i metodi potrebbe fornire una maggiore flessibilità e una valutazione più robusta, con maggiori garanzie di successo nel processo di selezione delle soluzioni da attuare.

Conclusions

In this study, two of the most widely used tools for sustainability assessment have been compared: the ENVISION protocol and the Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). These tools offer distinct but complementary approaches to measuring and guiding sustainable practices.

The ENVISION protocol is particularly suitable for infrastructure projects, providing a structured framework that enables the integration of sustainability criteria across various stages of project lifecycles.

On the other hand, LCSA presents a more universal method, applicable to a wide range of products and services. This holistic approach, which combines environmental, social, and economic evaluations throughout the entire lifecycle, provides a comprehensive view of sustainability. However, it requires significant resources and specific expertise, which can be a barrier to its implementation.

The comparison between the two approaches revealed that, while the ENVISION protocol is easier to manage, it still has some critical aspects that could be improved by refining the proposed criteria. Conversely, despite its complexity, LCSA offers a detailed and integrated analysis, useful for a comprehensive evaluation of sustainability.

In conclusion, the choice between the ENVISION protocol and LCSA depends on the specific objectives of the project, the application context, and the available resources. The application and integration of both tools can play a fundamental role in promoting sustainable practices, highlighting the importance of a multimodal approach to sustainability assessment in future projects and products.

Implementing a combination of both methods could provide greater flexibility and a more robust evaluation, ensuring higher success rates in the selection process of the solutions to be implemented.

Bibliografia

[1] M. Garai et al. 2023, Efficacia e sostenibilità delle misure di mitigazione del Rumore da traffico stradale, PIARC ITALIA, TC 3.4.

[2] P. Bellucci, F. Ciarallo, M. Garai, L. Peruzzi, F. Praticò: 2023, On the sustainability of noise mitigation measures, Forum Acusticum 2023, Turin, Italy 11-15 September 2023. DOI: 10.61782/fa.2023.0026

[3] M. Garai, P. Bellucci, G. Magarò, M. Masullo, F. Particò, G. Zambon: 2023, Italian PIARC TC 3.4.2: effectiveness and sustainability of noise mitigation measures, XXVIIth World Road Congress, Prague, 2-6 October 2023.

[4] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) – Towards a Life Cycle Sustainability Assessment – United Nations Environment Programme – 211. Available on: www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20Towards%20LCSA.pdf (last access 07/02/2024).

[5] UNI EN ISO 14040:2021. DOI: 10.31030/3179655

[6] UNI EN ISO 14044:2021. DOI: 10.31030/3179656

[7] PAVENCO – Life Cycle Assessment (LCA) delle pavimentazioni stradali- Studio e prospettive, Convegno Asphaltica (2017).

[8] QUIESST – Deliverable No.6.4 Data Collection and Information Generation for the Measurement (where possible) of the Sustainability Generic Relevant Criteria and Indicators for Existing NRDs.

[9] ENVISION: Sustainable Infrastructure Framework Guidance Manual, Institute for Sustainable Infrastructures, Washington, DC, 2018. Available on: https://sustainableinfrastructure.org/wp-content/uploads/ENVISIONV3.9.7.2018.pdf (last access 07/02/2024).

[10] 'Multi-criteria decision analysis for use in transport decision making', DTU Transport Compendium Series part 2, 2014. Available on: https://findit.dtu.dk/en/catalog/54abc0442c0cd7d02b000228 (last access 07/02/2024).

[11] M. Patel, M. Vashi, B. Bhatt: SMART – Multi-criteria decision-making technique for use in planning activities, Sarvajanik College of Engineering and Technology, 2017.

[12] D. Ozturk, F. Batuk – Technique for order preference by similarity to ideal solution (topsis) for spatial decision problems, www.isprs.org/proceedings/2011/gi4dm/pdf/pp12.pdf

[13] Thomas L. Saaty, Multicriteria decision making – the analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation, RWS Publishing, Pittsburgh, 1988.

[14] R. Bernard: Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE), La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationelle (RIRO) (8): 57-75 (1968). DOI: 10.1051/ro/196802V100571

[15] P.P. Kalbar, D. Das: Life Cycle Sustainability Assessment for Decision Making, (205-222), (2020), DOI: 10.1016/B978-0-12-818355-7.00014-3

[16] J.L. Burati, R.M. Weed, C.S. Hughes, H.S. Hill, Optimal Acceptance Standards for Statistical Construction Specifications, 2003. Praticò F.G., LCCA for silent surfaces (2017) Pavement Life-Cycle Assessment – Proceedings of the Pavement Life-cycle Assessment Symposium, 2017, pp. 221-230, DOI: 10.1201/9781315159324-23

[17] www.QUIESST.eu

[18] R. Likert (1932) Technique for the measure of attitudes Arch. Psycho., Vol. 22 N. 140. DOI: 10.1037/t05591-000

[19] J. Salazar, Life Cycle assessment (LCA) of windows and window materials, in Pacheco-Torgal, Fernando, et al. Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labelling and Case Studies, Elsevier Science & Technology, 2013, pp. 502-527. DOI: 10.1533/9780857097729.502

[20] S. Saadatian et al. Integrated environmental, energy and cost life-cycle analysis of windows: Optimal selection of components.

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.

Building and Environment 188 (2021) 107516. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107516

[21] S. Saadatian et al. Environmental and cost life-cycle approach to support selection of windows in early stages of building design. Journal of Cleaner Production 363 (2022) 132624. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132624

[22] S. Saadatian et al. Key drivers of life-cycle environmental and cost assessment of windows for different European climate zones. Journal of Building Engineering 50 (2022) 104206. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104206

[23] Q. Tushar et al. Energy simulation and modeling for window system: A comparative study of life cycle assessment and life cycle costing. Journal of Cleaner Production 330 (2022) 129936. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129936

[24] E. Fregonara, C. Coscia: Analisi Multi Criteria, approcci Life Cycle e Delphi Method: una proposta metodologica per valutare scenari di Progetto. Rivista Valori e valutazioni, n. 23 – 2019 pp. 107-117. DOI: 10.13128/valori-7834

[25] C. Carbonaro, G. Roccasalva: Valutazione multicriteriale dello spazio pubblico: un metodo per le pubbliche Amministrazioni. ISSN online: 2239-0243 | © 2020 Firenze University Press; www.fupress.com/techne; DOI: 10.13128/techne-7834

[26] G. Massei, L. Rocchi, L. Paolotti, A. Boggia: Sviluppo di moduli multicriteri per la valutazione ambientale in GRASS GIS. AESTIMUM 63, Dicembre 2013: 129-143

[27] https://bim.acca.it/bim-for-landscape/ – "Sustainability assessment through the coupling between BIM and MIVES methodologies applied in viaduct projects"; http://hdl.handle.net/2117/192869. DOI: hdl:2117/192869

[28] P. Bellucci, L. Peruzzi, Il progetto ANAS e la valutazione della sostenibilità delle barriere antirumore, 45° Convegno AIA, Aosta, 20-22 Giugno 2018.

Copyright © FrancoAngeli.
This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see:
http://creativecommons.org.