



Ecologia delle Infrastrutture Viarie a tutela dell'ambiente: concetti e criteri per una ricerca allargata alle discipline trasportistiche

Ecology of Transportation Infrastructure to protect the environment: concepts and criteria for a research extended to the transportation studies

Maria Vittoria CORAZZA

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.10.2022.ART.2.>)

Sommario - L'articolo prende spunto dalla letteratura scientifica in materia di *Road Ecology* e *Railway Ecology* per riunire i concetti fondativi e i criteri applicativi sotto un'unica definizione, quella della Ecologia delle Infrastrutture Viarie. Il comun denominatore è l'impatto negativo che le infrastrutture per i trasporti (sia su asfalto che su ferro) esercitano sugli ecosistemi naturali, generando perdita e/o frammentazione di habitat per le specie animali e vegetali. Sebbene ancora poco consolidati in ambito trasportistico, gli studi in materia di Ecologia delle Infrastrutture appaiono dirimenti quando si deve affrontare la norma sulla valutazione ambientale strategica di una infrastruttura per i trasporti alla scala paesaggistica. A tal fine si propongono criteri di valutazione per meglio ottemperare alla norma e si presentano le principali misure attuative con l'obiettivo di sensibilizzare i ricercatori e gli operatori di ambito trasportistico sulla necessità di introdurre l'Ecologia delle Infrastrutture Viarie nelle pratiche di studio, progettazione, costruzione, manutenzione e valutazione dei manufatti ferroviari quale garanzia di tutela ambientale. L'articolo, pertanto, riassume lo sviluppo dei concetti fondanti e della letteratura scientifica che ne discende (Sezione 1), e sottolinea la rilevanza della Ecologia delle Infrastrutture Viarie nella valutazione ambientale strategica alla scala paesaggistica e nelle norme ad essa associate evidenziandone gli elementi di complessità (Sezione 2); infine, vengono proposti criteri e soluzioni per l'applicazione della Ecologia delle Infrastrutture Viarie segnatamente alle infrastrutture ferroviarie (Sezione 3) e si propongono alcune linee guida per la valutazione dell'efficacia di tali soluzioni all'interno dei processi decisionali pianificatori (Sezione 4).

1. Road Ecology e Railway Ecology quali concetti fondanti della Ecologia delle Infrastrutture Viarie

1.1. Road Ecology: nascita e sviluppo di un concetto

Il termine *Road Ecology* sta ad indicare l'interazione di organismi e ambiente naturale con i veicoli e l'infrastrut-

Summary - The paper moves from the scientific literature on Road Ecology and Railway Ecology to merge related concepts and criteria under a single definition: Ecology of Transportation Infrastructure (ETI). Common traits are the negative impacts generated by road and rail infrastructure on natural ecosystems, resulting in habitat loss or fragmentation for flora and fauna. Although not much addressed within transportation studies, the ETI contribution is crucial when addressing the enforcement of regulations in the fields of strategic environmental evaluation for transportation projects and planning, with a focus on landscaping issues. To this end, evaluation criteria are proposed to meet the regulations requirements, along with the main measures to implement. The goal is to increase awareness among transportation researchers and operators of the need to introduce ETI in studies and practice on construction, maintenance and evaluation of railway infrastructures, as a criterion to meet the environmental requirements. Thus, the paper is structured as follows: the development of the fundamental concepts and the related literature review is reported (Section 1) and the relevance within the regulatory tools on environmental assessments at landscape scale is stressed along with some factors of complexity affecting the process (Section 2); eventually, ETI criteria and measures to implement ETI with a focus on railways lines and artifacts are described (Section 3), and guidelines to assess their effectiveness within planning decision-making processes are proposed (Section 4).

1. Road Ecology and Railway Ecology as fundamental concepts of the Ecology of Transportation Infrastructure

1.1 Road Ecology: birth and development of a concept

Road Ecology means the interactions of the natural environment and its components with vehicles and the road or rail infrastructure, buildings and facilities included [1]. Since an ecosystem includes all biotic and abiotic components whose interaction with the physical environment generates diversity and cyclicity [2], Road Ecology can be also

tura stradale o ferroviaria, manufatti e opere d'arte compresi [1]. Poiché un ecosistema include tutti gli organismi presenti in un'area, la cui interazione con l'ambiente fisico genera diversità e ciclicità [2], è possibile più ampiamente definire la *Road Ecology* come la relazione fra una infrastruttura e il traffico che essa genera e l'ecosistema su cui insiste. La relazione fra natura e via, tuttavia, è insita nel concetto stesso di infrastruttura legata alla mobilità, definendosi questa, generalmente, come intervento artificiale sul territorio (naturale o costruito) mirato a soddisfare esigenze di connessione di individui e beni fra più siti. In passato, la costruzione di strade è stata sovente interpretata come il dominio della capacità progettuale dell'uomo sulla natura, raggiunto con fatica (si pensi alle tagliate etrusche, i varchi aperti nelle rocce per raggiungere le necropoli della Tuscia) o con ingegno, fino ad assumere il ruolo di elemento significante che genera "il luogo" secondo HEIDDEGER [3].

Con l'affermarsi del pensiero ecologista, sin dai primi anni '70 del secolo scorso, questo predominio viene messo sempre più in discussione evidenziando gli impatti negativi delle infrastrutture stradali su natura e ambiente sociale [4][5][6], suggerendo la necessità di avviare e consolidare la ricerca su tali impatti [7], mettendo a punto le prime specifiche tecniche per la conservazione dell'ambiente a seguito della costruzione di questo tipo di infrastrutture [8], e originando numerosi studi, molti su specifici casi di studio. Questi, in particolare, vengono inizialmente generati da ricerche afferenti ai più diversi campi di indagine, ad esempio: la tutela dell'ecosistema nelle sue componenti [9][10][11] e acquifere [12], la quantificazione degli inquinanti da traffico [13][14], la manutenzione stradale [15][16], la salute pubblica [17][18], a testimoniare la natura multidisciplinare della futura *Road Ecology*, qui ancora nella sua affermazione di branca dell'ecologia. Eppure, in nuce le radici della *Road Ecology* sono ben più lontane nel tempo e risalgono alla soluzione di problemi quali la rimozione di fango dalla superficie stradale o dei fenomeni erosivi, già affrontati da J.L. MCADAM a cavallo tra XVIII e XIX secolo, nonché alla successiva attenzione al fenomeno del *Road-kill*, ovvero l'investimento di animali durante l'attraversamento della via, divenuto oggetto di attenzione in Nord America a seguito della costruzione di ferrovie prima e *parkways* e *scenic routes* poi (segnatamente durante il periodo del New Deal [19] e che ha condotto alla fine degli anni '70 alla costruzione del primo sovrappasso su un'arteria stradale in Utah per facilitare i fenomeni migratori dei cervi [1]. Inizialmente *Road-kill* e *Road Ecology* sono percepiti come sinonimi, finché nel 1981 viene coniato da Ellenberg il termine *Straßen-Ökologie* [20] che sancisce la affermazione della *Road Ecology* come disciplina che studia l'impatto delle infrastrutture viarie sul paesaggio. Lo studio Ellenberg è importante non solo perché, secondo il titolo dell'articolo, conia il termine e lega per la prima volta il concetto di tutela del paesaggio agli impatti positivi o negativi che una infrastruttura stradale può generare, ma perché introduce altre nozioni chiave: la gestione della natura (*Naturhaushalt*) o ecosiste-

defined as the relationship between an infrastructure and its generated traffic with the ecosystem. The relationship between nature and road is rooted in the concept of mobility infrastructure, this being generally a human-made intervention on the environment (built-up or natural), to meet the requirement of displacement of people and goods. In past times, road constructions were deemed as a sign of human skill over nature, either strenuously carried out (one case for all, the tagliate etrusche, roads cut in the rocks to connect the Etruscan necropolises in the Tuscia region) or as a work of ingenuity, until becoming a significant entity generating a place, according to HEIDDEGER [3].

With the development of the ecological thinking, since the 70s, the human domination over nature has been progressively questioned, with the negative impacts of roads on environment and communities being highlighted [4][5][6], by suggesting the need to progress and consolidate the research in these fields [7] and developing the first specific techniques to preserve the environments once roads are built [8], thanks to a large number of studies on specific cases. Such case studies have been originated within different disciplines: safeguard of ecosystems with a focus on fauna [9][10][11] and waters [12]; assessment of pollutants generated by traffic [13][14]; road maintenance [15][16]; and public health [17][18], all evidencing the multidisciplinary specificity of Road Ecology, here still a branch within the general ecological studies. Yet, in nuce, Road Ecology is strongly rooted in the past, with problems like mud removal from roads or erosive phenomena having been already tackled by J.L. MCADAM since the XVIII century. Likewise, Road-kill (animals killed on roads by cars or other vehicles) became an issue in North America after the opening of railways first, and parkways and scenic routes after (these during the New Deal era [19]), which led in the 1970s to the first overpass on an arterial in Utah to protect deer herds migration [1]. In fact, Road-kill and road ecology were initially perceived as synonyms, until in 1981 Ellenberg coined the term Straßen-Ökologie [20] and road ecology formally became the study field which investigates the impact of road infrastructure on the environment and the landscape. The study by Ellenberg is important not only because it coins the term and interrelates the concept of landscape safeguard with the positive or negative impacts generated by a given road infrastructure, but also because it introduces more key concepts: the management of the nature (Naturhaushalt) or ecosystem (in its vegetal and animal components) the infrastructure will be part of; the most impacting factors (climate, noise, air pollutant emissions, infiltration into soils and aquifers, de-icing salts); the development of regulations and design criteria to preserve ecosystems.¹ The study also includes a case study on the analysis of the vegetation along the Rhoenline, i.e. the highway leg between Würzburg and Bad Hersfeld, in Germany.

¹ The article is also important because it deals with the concept of re-naturalizing dismissed roads and railways.

ma (nelle sue componenti vegetali e animali) di cui l'infrastruttura deve divenire parte, i fattori che vi influiscono maggiormente (clima, rumore, emissioni di inquinanti nell'aria e infiltrazioni nelle falde acquifere e nei suoli, utilizzo del sale antighiaccio), lo sviluppo di normativa e specifiche progettuali a tutela dell'ecosistema¹. L'analisi, infine, include anche l'applicazione a un caso di studio che verte sull'esame del manto verde lungo la *Rhoenline*, ovvero il tratto autostradale fra Würzburg e Bad Hersfeld, in Germania.

La traduzione inglese del termine in *Road Ecology* si avrà solo più tardi [21], sebbene in questo lasso di tempo la letteratura scientifica sul tema si vada consolidando secondo più filoni di ricerca. Gli impatti negativi generati dalle infrastrutture stradali sono analizzati in funzione della mortalità fra la fauna, delle modifiche nei comportamenti, negli spostamenti lungo i corridoi e nelle migrazioni (con le aree lungo le strade che fungono da "trappola ecologica" per le specie che vi vengono attratte in cerca di cibo, secondo HARRIS e SCHECK [22]), mentre per quel che riguarda il paesaggio, si pone l'accento sulle conseguenze in termine di frammentazione e interazione nelle dinamiche di cambiamento [23]. Parimenti, vengono messi in luce gli effetti sulle singole componenti abiotiche del paesaggio, segnatamente le acque, il microclima, la luce, i rumori, la topologia, i meccanismi di sedimentazione delle terre [1][24].

Nel termine, e pertanto nella visione generale del concetto di *Road Ecology*, l'elemento perturbatore è la strada; sarebbe tuttavia erroneo ritenere che altre infrastrutture viarie siano esenti da tale questione. È intuitivo come l'introduzione di un collegamento ferroviario e il suo esercizio possano parimenti influire negativamente, così come ogni infrastruttura legata ad altri modi ed esercizi di trasporto. La caratteristica comune di infrastruttura terrestre lineare che accomuna strada e ferrovia ha fatto sì, pertanto, che nella prima decade degli anni 2000 si andasse definendo la nuova declinazione della *Road Ecology* in *Railway Ecology*. Lo studio degli impatti delle infrastrutture ferroviarie su flora e fauna è presente, tuttavia, sin dagli anni '80 del secolo scorso, in forma di specifici casi di studio, così come già osservato agli albori della *Road Ecology*. L'interesse è inizialmente focalizzato su specifici manufatti quali i tunnel e i canali sotterranei che permettono il passaggio di piccoli mammiferi [25][26], ma l'avvento della alta velocità aumenta l'interesse sottolineando i rischi legati alla frammentazione degli habitat interessati [27][28][29]. In tutti i casi si osserva come la predisposizione di vie di passaggio non sia senza rischi, soprattutto per i mammiferi più piccoli che divengono facili prede a causa delle dimensioni o della ubicazione di questi manufatti, e si introduce un tema centrale nella ecologia del-

The English translation, Road Ecology, will come later [21], while the scientific literature consolidates through several research fields. Infrastructure-generated negative impacts are analyzed in terms of Road-kill, behavioral changes of the fauna, migration phenomena along corridors (with the areas along the roads playing the role of "ecological traps" for the foraging wildlife, according to HARRIS and SCHECK [22]); at the same time, for what concerns the landscape, emphasis is placed on consequences like fragmentation and interaction with the fauna behavioral dynamics [23]. Likewise, light is shed on the specific abiotic components of the landscape, and more precisely on waters, microclimate, light, noise, topology, soil sediments [1][24].

In the general vision of Road Ecology, the road is the disrupting element; however, other transportation infrastructure might play the same role. Intuitively, an operational railway line may negatively affect the ecosystem in a similar way, like any other transportation infrastructure and operations. Such common trait was behind the development, in the first decade of the 2000s, of a new branch of Road Ecology, i.e. Railway Ecology. Yet, the impacts generated by railway infrastructure on flora and fauna have been largely analyzed since the 1980s in specific case studies. Initially, the focus is on tunnels and culverts as passageways for small mammals [25][26], but the development of high-speed connections raises more concerns on risks associated with the fragmentation of the affected habitats [27][28][29]. In any case, it is highlighted how even passageways, because of their location or size, imply risks for small mammals, and more central concepts are thus introduced under the Ecology of Transportation Infrastructure umbrella, i.e. those of mitigation and safeguard, later elaborated. Although continuously studied, currently Railway Ecology is relatively little tackled in literature, with the majority of sources coming from Europe [30] and dealing mostly with train-animal fatalities. If compared to Road Ecology, impacts on the habitat (loss and fragmentation), pollution (noise, air and light) and potential generated by the rehabilitation of areas after the introduction of rail lines appear to be less studied [31]

Yet, the Road Ecology - Railway Ecology comparison sheds a light on several issues. Both deals with the effects on ecosystems due to the introduction of surface infrastructure; this suggests to consider similarly and jointly rail and rubber-tired modes, since the associated infrastructure are built in the same way (soil excavations, construction, site "sealing") and affect areas and landscapes alike (fragmentation and disruption). Both are multidisciplinary, yet in transportation studies they are still marginal and addressed just to meet regulatory requirements in the field of environmental impacts assessments. At the same time, rail modes are generally considered less polluting than rubber-tired ones, although issues like installment of catenaries and high speed might introduce additional risks for wildlife [32]; it is also to be stressed that Road-kill is a much more well-

¹ L'articolo riveste particolare importanza perché è anche uno dei primi ad introdurre il concetto di rinaturalizzazione delle strade e ferrovie dismesse.

le infrastrutture viarie, quello della predisposizione di misure di mitigazione o tutela, più tardi affrontato. Nonostante il continuo interesse nel tempo, all'attualità la *Railway Ecology* è ancora relativamente poco trattata in letteratura, con fonti prevalentemente europee [30] e incentrate sull'incidentalità treno-animale, mentre sono ancora scarsamente studiati (in confronto a quanto avviene nella *Road Ecology*) gli impatti sull'habitat (perdita e frammentazione), la rilevanza dell'inquinamento (chimico, sonoro, luminoso) e soprattutto le potenzialità di ricreare ambienti appropriati in aree degradate dall'introduzione della infrastruttura ferroviaria [31].

La comparazione fra *Road Ecology* e *Railway Ecology* introduce numerosi spunti di riflessione. Si tratta, in entrambi i casi, dello studio di effetti sull'ecosistema naturale derivanti dall'introduzione di infrastrutture lineari terrestri, elemento che spinge la successiva trattazione di questo capitolo ad affrontare congiuntamente i modi su gomma e su ferro in quanto le modalità di introduzione all'interno di una data area (movimentazione delle terre, costruzione, "sigillamento" dell'area di sedime e delle fasce limitrofe) sono simili, così come sono simili gli effetti di cesura e frammentazione della continuità di territorio e paesaggio che ne conseguono. Ancora, in entrambi i casi, il problema è affrontato in maniera multidisciplinare, ma all'attualità l'interesse all'interno delle discipline trasportistiche rimane pressoché marginale e alimentato dalla necessità di rispondere alle istanze regolatorie, meramente in termini di valutazione di impatto ambientale. Altresì, la ferrovia è considerata un modo meno inquinante rispetto alla gomma, ma non dal punto di vista degli impatti sulla fauna, ove la presenza di catenarie e la maggiore velocità di percorrenza possono introdurre ulteriori elementi di pericolosità [32]; a ciò si aggiunge il fatto che l'incidentalità stradale è materia ben più divulgata di quella ferroviaria presso il grande pubblico, contribuendo così a mantenere nell'ombra il fenomeno in ambito ferroviario.

1.2. Impatti sulla flora e sulla fauna

Sia la *Road Ecology* che la *Railway Ecology*, che nel prosieguo della trattazione verranno unite sotto il termine omnicomprensivo di Ecologia delle Infrastrutture Viarie², sono comunque due concetti che integrano requisiti ambientali, ecologia e trasporti [33], in un'ottica di salvaguardia territoriale e sviluppo sostenibile. In questo senso, la rilevanza della Ecologia delle Infrastrutture Viarie nello sviluppo delle infrastrutture di mobilità risiede, non solo, nella possibilità di quantificare gli impatti di strade e ferrovie (secondo indicazioni specifiche da parte di etologi,

known phenomenon among the general public than that generated by rail operations, on which a large shadow is cast.

1.2. Impacts on flora and fauna

Both Road Ecology and Railway Ecology, henceforth defined as Ecology of Transportation Infrastructure - EIT,² are concepts which integrate environmental, ecological and transportation requirements [33] to meet goals in the fields of environmental safeguard and sustainable development. Therefore, EIT can be paramount in the development of transportation infrastructure not only because it enables to quantify impacts due to roads and railways (according to specific directions from ethology, biology, botany, landscaping and more experts from other disciplines), but also because it can identify the sustainability requirements of a given area when such infrastructure are introduced, and avoid the related consequences in terms of habitat loss or fragmentation. This means that it is to evaluate not only the impacts due to the construction of the infrastructure, per se, but also those coming from the prospective operations [19], in the awareness that damaging habitats means the degradation of flora and fauna [30].

This issue is partly addressed, as further elaborated, at regulatory level; yet, the research in transportation studies does not fully consider the EIT potential when dealing with these types of impact assessments. This is due to the lack of a univocal definition of "what effects are to be assessed", which in turn is generated by the specificity of the available studies. Many are focused on specific animal species and case studies, which leads to select "what" (negative effects), "where" (affected areas), and "how" to assess impacts (survey, measurements, evaluation) on a local basis.

The negative effects to consider hinge on the well-known concept of "negative externalities" [34]. But each externality, in turn, includes more specifications to consider, i.e. the so-called primary and secondary ecological effects as defined by IUELL et al. [35] and synthesized in Tab. 1.

The negative effects on biodiversity synthesized in Tab. 1 are originated by the habitat fragmentation as a consequence of the introduction of transportation infrastructure and operations. This is not just a break or a "caesura effect" within a given area, but its actual fragmentation in smaller subareas where the infrastructure plays the role of a barrier to the pristine continuity. Fragmentation brings about issues of magnitude and mobility. Smaller subareas are not able to accommodate the same amount of wildlife, which is forced to move elsewhere; but if the "caesura effect" hinders any displacement, wildlife will become more vulnerable, and within a restricted area. Moreover, an area resulting from smaller and poorly permeable subareas, generates in

² Nella letteratura scientifica italiana sono presenti varie dizioni tutte valide, fra cui la traduzione letteraria "Ecologia della Strada", più comunemente usata. La dizione "Ecologia delle Infrastrutture Viarie" viene qui preferita perché consente di comprendere le infrastrutture per gomma e ferro.

² There is no official Italian translation of both *Road Ecology* and *Railway Ecology*, for which this term is here proposed.

biologi, botanici, paesaggisti ed esperti di molte altre discipline), ma soprattutto nella definizione dei livelli di sostenibilità di un territorio nell'accogliere queste infrastrutture, senza che queste generino perdite o frammentazione. Ciò significa che non solo si debba valutare l'impatto della costruzione ma anche dell'esercizio (stradale o ferroviario) da questa generato [19], nella consapevolezza che i danni prodotti sull'habitat costituiscono le maggiori cause del degrado della fauna e della flora [30].

Il problema è in parte affrontato, come accennato e più avanti dettagliato, a livello normativo; tuttavia dal punto della ricerca in ambito trasportistico l'Ecologia delle Infrastrutture Viarie rimane ancora largamente inesplorata nei processi di valutazione di impatto. Ciò è dovuto, in parte, alla mancanza di una definizione univoca di "quali effetti valutare". Infatti, molti studi sono su singole specie e su casi isolati, ciò che comporta una certa selezione su cosa (effetti negativi da considerare), dove (porzione di territorio affette), e in che modo valutare gli impatti di una data infrastruttura (metodiche di rilevamento, misurazione, valutazione) in una data area in termini di biodiversità.

Gli effetti negativi da considerare muovono dal concetto usuale di "esternalità negative" [34]. Tuttavia ognuna di tali esternalità comprende ulteriori specifiche da considerare, ovvero gli effetti ecologici primari e secondari già definiti da IUELL *et al.* [35] e sintetizzati in Tab.1.

All'origine di tutti gli effetti negativi sulle biodiversità sintetizzati in Tab. 1 vi è, dunque, la frammentazione di habitat che l'inserimento e l'esercizio di infrastrutture viarie comportano. Non si tratta, infatti, della mera introduzione di un elemento di cesura all'interno di un territorio, ma soprattutto della risultante parcellizzazione di questo in aree più piccole, ove l'infrastruttura diviene barriera nella continuità areale. La frammentazione introduce problemi di dimensione e di mobilità. Infatti, se la parcellizzazione crea aree più piccole, non in grado di accogliere la stessa quantità di popolazioni di fauna, questa tenderà a spostarsi verso nuovi territori; tuttavia, se l'effetto cesura è invalicabile, tale mobilità non sarà possibile, rendendo quella popolazione più vulnerabile, su un territorio più esiguo. Inoltre, un territorio somma di aree abitabili più ristrette e poco permeabili genera, a sua volta, una diversa e disomogenea distribuzione delle specie, acuita dalla eventuale presenza di altre destinazioni d'uso del suolo (e segnatamente le aree antropizzate) che possono generare ulteriori rischi e confliggere con la ricerca di spazi vitali consoni da parte delle popolazioni animali migranti.

Non bisogna dimenticare che la possibilità di muoversi in un territorio (in cerca di cibo o riparo) e di disperdersi rappresenta un fattore chiave nella sopravvivenza di una specie, cosa che introduce il concetto di permeabilità della via, legato sia al tipo di barriera e al traffico generato, sia al comportamento animale. Infatti, come evidenziato in letteratura, animali di grandi dimensioni possono comunque usufruire di aree prossime all'infrastruttura sottoutilizzandole, mentre piccoli mammiferi o la fauna

turn an inhomogeneous wildlife distribution, exacerbated by newly-developed land use (mostly human-inhabited areas) which can develop additional risks and conflicts due to the wildlife's search for new habitats.

Displacements (in search of food or shelter) and dispersion are wildlife survival's key factors, which introduces the concept of "infrastructure perviousness", associated with both the types of generated barriers and traffic and wildlife behaviors. As stressed in literature, large-size animals can inhabit areas close to the infrastructure, by underexploiting it; on the contrary, small mammals or birds tend to migrate (the bigger the infrastructure, the farther), whereas for the invertebrates the infrastructure itself and the shoulder areas become totally impervious areas.

The most conspicuous phenomenon is that of fatalities not only due to large volumes of traffic but as induced by the infrastructure as a barrier. When crossing the infrastructure, wildlife are exposed to collision risks, but a higher rate of fatalities might simply imply larger populations (e.g. rodents). More affecting factors can be time and weather, as evidenced by the accident rates, as well as any involvement with human activities (livestock migrations, hunting seasons, agricultural activities). It is also possible to associate the accidents with a kind of infrastructure "scale factor" and catchment area, as observed during a survey in the Czech Republic. Accordingly, a "landscape scale" can be identified (a 1000m-radius catchment area) with highest fatality rates for foxes, weasels and polecats, close to farmlands and settlements, along with a series of intermediate scales down to the "local scale" (a 50m-radius catchment area), where besides the mammals of the landscape scale, also otters, badgers, stoats are involved along the woodlands close to the infrastructure [36]. Human presence brings more problems associated with disturbance and specifically pollution. Although railway infrastructure is less impacting than roads for what concerns air pollution, noise disturbance can be similar especially for winged wildlife, e.g. bats, still disturbed 20 meters far from the noise sources [37]; or raptors very sensitive to noise over 40 dB(A) in Leq24h, when mating and nesting [38]. Same noise levels are considered harmful to some mammals, as well [39][40]. Independently from its intensity, chronic and frequent noise affects wildlife capability to detect relevant sounds, whereas intermittent or sudden noise can be perceived as a threat [41]. Likewise, the impacts of artificial lighting is evident in the wildlife nocturnal behaviors, especially during predatory activities [42].

Eventually, the conversion of vegetated surfaces into "sealed", impervious ones (road or rail with shoulders and any other facility) not only generates soil consumption, but also behavioral adaptation both in flora and fauna. In literature it is frequently reported how vegetated patches along the infrastructure turn into hunting grounds for raptors or areas where non-native and/or plant species grow; other studies report similar cases where gutters and culverts develop the same phenomenon, when generating micro-wetlands.

Tabella 1 – Table 1

Effetti negativi sulle biodiversità generati dalle infrastrutture viarie
 Negative effects on biodiversity generated by transportation infrastructure

Primari Primary		Effetti sulla fauna Effects on fauna	Effetti sulla flora Effects on flora
Perdita dell'habitat per la fauna selvatica Wildlife habitat loss	Cambiamento fisico della superficie del suolo Physical modification of land surface	Modifiche nella distribuzione delle specie Modification on wildlife displacements and availability on a given area	Distruzione di superfici vegetate e conversione in aree asfaltate o ricoperte da massicciate Destruction of vegetated surfaces and their conversion in impervious surfaces
Effetto barriera Barrier effect	Effetto di cesura fra porzioni di territorio Break (caesura effect) in the affected areas	Isolamento, fino a minaccia della sopravvivenza Isolation up to survival threats	Modificazione nella continuità delle superfici vegetate Disruption in the continuity of vegetated surfaces
Mortalità dovuta a incidentalità Roadkill	Rischio di eventi fatali Risks of fatalities	Riduzione della popolazione Population decrease	
Disturbo e inquinamento Disturbance and pollution	Modifiche nell'assetto idrologico Modification in the hydrogeological structure	Modifiche nei comportamenti per la ricerca di approvvigionamento idrico Modification in water supply search	Modificazione nella continuità delle superfici vegetate; variazione della risorsa idrica e dei regimi delle acque Disruption in the continuity of vegetated surfaces; variation of the water supply and groundwater regime
			Modificazione degli habitat delle zone umide e riparie Wetland and riparian environments modification
		Danni alle funzioni vitali e comportamentali Harm to vital functions and behaviors	
	Inquinamento sonoro Noise pollution	Riduzione della popolazione Population decrease	
	Vibrazioni Vibrations	Modifiche nei comportamenti Behavioral changes	
	Inquinamento luminoso Light pollution		Modificazione della crescita Developmental changes
Funzioni delle fasce di protezione Shoulder performance	Alterazioni delle funzioni lungo le fasce di protezione Modification of functions along the shoulders	Generazione di corridoi Opening of corridors	
		Generazione di nuovi habitat Generation of new habitats	
Secondari Secondary		Effetti sulla fauna Effects on fauna	Effetti sulla flora Effects on flora
Modifiche nell'uso del suolo Land use modification	Cambiamento fisico della superficie del suolo con aumento delle superfici sigillate (cementate, asfaltate, ecc.) Physical modification of surfaces with increase of the impervious ones	Aumento del rischio generato dalla presenza antropica Increased risk due to human settlements	
Insediamenti antropici generati a seguito della apertura della via Human settlements generated after the infrastructure opening			

aviaria tendono ad allontanarsene in proporzione all'estensione della superficie infrastrutturata; per gli invertebrati è la superficie stradale stessa o il substrato inospitale delle banchine a costituire una barriera.

Il fenomeno più vistoso, quello della mortalità, non è solo legato all'intensità di traffico ma anche ai comportamenti indotti nella fauna dall'infrastruttura come barriera. Le specie, infatti, nell'attraversamento della via sono soggette al rischio di collisione con il veicolo sia esso auto o treno, ma un alto numero di eventi fatali può semplicemente significare cospicuità di popolazione per una data specie (ad esempio, per le specie più comuni di roditori). Ovviamente fattori temporali e climatici influenzano i comportamenti, cosa che si riflette anche nelle osservazioni dei livelli di incidentalità, così come anche è evidente il contributo dell'interazione con la componente antropica (migrazioni stagionali di bestiame da allevamento, la caccia, attività agricole stagionali). Si osserva anche un "fattore di scala" che associa l'evento incidentoso alla specie e ad una sorta di *catchment area* della via e del suo intorno, così come osservato da un rilievo effettuato nella Repubblica Ceca. In base a tale analisi è possibile definire la scala di "paesaggio" (una *catchment area* di 1000 m di raggio, che nel caso di studio vede la maggiore mortalità di volpi, faine e puzzole) in prossimità di terreni agricoli e insediamenti, ulteriori scale intermedie fino alla scala "locale" (una *catchment area* di 50 m di raggio, ove alla mortalità delle specie della scala di paesaggio si aggiunge quella di lontre, tassi, ermellini e donnole) lungo le fasce forestate a bordo infrastruttura [36]. La componente antropica porta con sé ulteriori problemi legati all'insorgenza di fattori di disturbo, e segnatamente l'inquinamento. Se l'infrastruttura ferroviaria non comporta lo stesso effetto sull'ambiente di quella stradale in termini di emissioni nocive nell'aria, gli esiti dell'inquinamento acustico sono analoghi e numerosi soprattutto in relazione alla fauna volante come ad esempio i pipistrelli, che possono essere notevolmente disturbati ancora a 20 m di distanza dalla fonte di rumore [37], i rapaci sensibili durante la riproduzione e la nidificazione all'esposizione di suoni superiori a 40 dB(A) in livelli Leq24h [38]. Stesso valore è ritenuto nocivo anche per alcuni mammiferi terrestri [39][40]. Indipendentemente dall'intensità, il rumore cronico e frequente interferisce con la capacità degli animali di rilevare i suoni importanti, mentre quello intermittente e imprevedibile è spesso percepito come una minaccia [41]. L'impatto della luce artificiale soprattutto nei comportamenti notturni della fauna è altrettanto tangibile, soprattutto nelle attività predatorie [42].

Infine la conversione della superficie vegetata in superficie "sigillata" da asfalto o ferro con le sue pertinenze genera non solo consumo di suolo, ma anche ulteriori cambiamenti comportamentali nella fauna e variazioni di adattamento nella flora. Non è raro in letteratura trovare studi relativi ad aree verdi a bordo via che diventano nuove aree di caccia per predatori o nuove superfici di propagazione per specie vegetali non autoctone e/o invasive, co-

2. Relevance of the Ecology of Transportation Infrastructure within the Strategic Environmental Assessment at the landscape scale

2.1. Regulations concerning the Strategic Environmental Assessment for transportation infrastructure

All of the above evidence how ETI-based analyses improve the impact assessment's quality; consequently, they also help meeting the regulatory requirements in the field of the environmental safeguard.

Italian regulations enforce both the assessment of the effects of plans and programs on natural environments according to the European Commission - EC Directive on SEA,³ and the environmental impacts evaluation for specific projects according to the EC Directive on EIA.⁴ Both SEA and EIA procedures are fostered in the safeguard of flora and fauna by the EC "Habitats"⁵ Directive, enforcing the conservation of natural and semi-natural habitats, wild flora and fauna; within the EC "Habitats" Directive the establishment of the Natura 2000 network is a central step. This is a European network including specific sites, i.e. the so-called Special Areas of Conservation (SACs) and Special Protection Areas (SPAs),⁶ the latter specifically conceived for the conservation of wild birds. The EC "Habitats" Directive clearly states the conservation scope and domains,⁷ and namely:

- *the natural habitat types of Community interest, the preservation of which requires the designation of SACs, i.e. the list of priorities for any given habitat in a given area requiring a specific conservation program, i.e. the Site of Community Interest (SIC) program;*
- *criteria to identify SICs or SACs;*
- *"animal and plant species of Community interest whose conservation requires the designation of SACs", according to a priority list. Within this, are itemized: a) "Animal and plant species of community interest in need of strict protection" and b) "Animal and plant species of Community interest whose taking in the wild and exploitation may be subject to management measures".*

³ SEA – Strategic Environmental Assessment, in Directive 2001/42/EC of the European Parliament and of the Council of 27 June 2001 on the assessment of the effects of certain plans and programs on the environment.

⁴ EIA – Environmental Impact Assessment, in Council Directive 85/337/EEC of 27 June 1985 on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment.

⁵ Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora, incorporated into Italian decrees D.P.R. 8.9.1997 n. 357, and D.P.R. 12.32003, n. 120, "Regolamento recante attuazione della Direttiva 92/43/CEE relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali, nonché della flora e della fauna selvatiche".

⁶ Directives 79/409/CEE and 2009/147/CE.

⁷ Annexes I – V in Directive 79/409/CEE.

si come sono riportati anche casi in cui la creazione di canalizzazioni di scolo genera micro-zone umide dallo stesso potere attrattivo.

2. La rilevanza della Ecologia delle Infrastrutture Viarie nella valutazione ambientale strategica alla scala paesaggistica

2.1. La norma sulla valutazione strategica per le infrastrutture di trasporto

Da quanto sopra esposto è evidente come le analisi connesse alla Ecologia delle Infrastrutture Viarie contribuiscano a valutare in maniera più esaustiva gli impatti derivanti dall'introduzione nel territorio di nuove vie, recependo così appieno le indicazioni normative in materia di tutela ambientale. La normativa italiana sancisce, infatti, sia la valutazione degli effetti di piani e programmi sull'ambiente naturale ai sensi della Direttiva Comunitaria VAS³, sia la valutazione di impatto ambientale per specifici progetti, secondo la Direttiva Comunitaria VIA⁴.

Le procedure VAS e VIA si rafforzano nell'esercizio della tutela di specie animali e vegetali alla luce della Direttiva Comunitaria Habitat⁵ che sancisce la conservazione degli habitat naturali e semi-naturali, della flora e della fauna selvatiche; a questa si aggiunge la Direttiva 2009/147/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 novembre 2009, concernente la conservazione degli uccelli selvatici. Centrale, nella Direttiva Habitat è la costituzione della rete Natura 2000, ovvero una rete europea che unisce le Zone Speciali di Conservazione (ZSC) e le Zone di Protezione Speciale (ZPS)⁶, quest'ultime specificamente dedicate alla tutela della fauna aviaria selvatica. La Direttiva Comunitaria Habitat indica chiaramente gli oggetti di tutela⁷, segnatamente:

- “Tipi di habitat naturali di interesse comunitario la cui conservazione richiede la designazione di aree speciali di conservazione”, ovvero l'elenco, per priorità, di quegli habitat che impongono l'istituzione di un regime di

The role of ETI within the SEA procedures is of the utmost importance, with these involving all planning phases related to the introduction of whatever human process in an area, thus according to a complex evaluation of impacts on the Natura 2000 sites. Such evaluation is carried out via a specific evaluation tool, the so-called “Environmental Implications Assessment” (Italian acronym: VInCA), i.e. a specific study focused on the evaluation of the relevance of a given plan or project over the affected SACs or SPAs.⁸ VInCA's⁹ specific guidelines are available”, these being issued when enforcing the Italian Strategy for Biodiversity 2011-2020 in order to clarify the extent of Habitats’ Directive’s article 6. Accordingly, the following is defined:

- *necessary conservation measures, i.e. “positive and proactive interventions to maintain or satisfactorily restore natural habitats and wild fauna and flora”; these interventions range from management plans, to regulations (on admitted, restricted or forbidden activities), to administrative procedures (how to implement any given conservation measure or authorize specific activities), to contract activities (agreements among the different involved bodies, landowners, site managers, etc.). All of the above is specifically “bespoke” to the ecological requirements of the considered natural habitat or species living in it.*
- *preventive measures to avoid perturbations associated with a given event, activity or predictable process, applicable for any considered species and habitats in a given site and, if need be, also in the surrounding areas.*
- *ecological requirements, i.e. “any ecological requirements, including biotic and abiotic factors necessary to ensure the conservation of the habitats and species, as well as the interrelations of these with the physical environments (air, waters, soils, vegetation, etc.).”*

All of the above raises two specific issues on: 1) the contents of the planning tools; 2) the definition of the area's physical boundaries when evaluating impacts.

According to the Italian grey literature,¹⁰ planning or programming regulatory tools for transportation infrastructure at large scale (urban mobility plans, regional transit plans and the likes) might contemplate different interventions of different types, time horizons and magnitude. Typically, these plans include directions for infrastructures ahead of their deployment plans or for which technical spec-

³ VAS – Valutazione Ambientale Strategica, ai sensi della Direttiva 2001/42/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 27 giugno 2001, concernente la valutazione degli effetti di determinati piani e programmi sull'ambiente.

⁴ VIA – Valutazione di Impatto Ambientale, ai sensi della Direttiva 85/337/CEE del Consiglio Europeo del 27 giugno 1985, concernente la valutazione dell'impatto ambientale di determinati progetti pubblici e privati.

⁵ Direttiva 92/43/CEE del Consiglio Europeo, del 21 maggio 1992. Questa viene recepita dalla normativa nazionale nel D. P.R. 8 settembre 1997 n. 357, modificato dal D.P.R. 12 marzo 2003, n. 120, costituente il “Regolamento recante attuazione della Direttiva 92/43/CEE relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali, nonché della flora e della fauna selvatiche”.

⁶ Direttiva 79/409/CEE del Consiglio Europeo del 2 aprile 1979.

⁷ Cfr. Allegati I – V della Direttiva 79/409/CEE.

⁸ Screening is one of the three study phases included in the technical document “La gestione dei siti della rete Natura 2000 - Guida all'interpretazione dell'art. 6 della direttiva Habitat”.

⁹ See Italian GU 28.12.2019, Serie Generale n. 303 and Commission notice “Managing Natura 2000 sites The provisions of Article 6 of the ‘Habitats’ Directive 92/43/EEC” for the full text.

¹⁰ MIT, “Valutazione Ambientale Strategica, Rapporto Ambientale, All. 3”. October 2016, p. 6.

tutela costituito dai Siti d'Interesse Comunitario (SIC) in un dato territorio;

- i criteri di selezione ai fini della determinazione di un sito in Siti di Importanza Comunitaria SIC o ZSC;
- “Specie animali e vegetali d'interesse comunitario la cui conservazione richiede la designazione di zone speciali di conservazione”, anche queste elencate per priorità. All'interno di questo elenco si definiscono due ulteriori classi inerenti: a) “Specie animali e vegetali di interesse comunitario che richiedono una protezione rigorosa” e b) “Specie animali e vegetali di interesse comunitario il cui prelievo nella natura e il cui sfruttamento potrebbero formare oggetto di misure di gestione”.

Ai fini dello studio del ruolo della Ecologia delle Infrastrutture Viarie, il campo della VAS, è senz'altro quello più sensibile, attenendo questa fase alla pianificazione, dunque all'introduzione di una o più opere antropiche in un territorio, secondo una complessità che richiede una specifica valutazione degli impatti sui siti della rete Natura 2000. Questa viene effettuata tramite la procedura di Valutazione di Incidenza Ambientale (VInCA), uno studio mirato a valutare la significatività dell'incidenza di un dato piano o progetto su un SIC o una ZPS, qualora da una fase preliminare di analisi detta di *screening*⁸ già emergano indicazioni in questo senso. La VInCA è svolta secondo un iter definito dalle recenti “Linee guida nazionali per la Valutazione di incidenza (VInCA)”⁹, emanate in occasione della attuazione della Strategia Nazionale per la Biodiversità 2011-2020 (SNB), al fine di chiarire la corretta attuazione dell'art. 6 della Direttiva Habitat. In base a tale aggiornamento si chiariscono quali debbano essere:

- le “misure di conservazione necessarie” ovvero “interventi positivi e proattivi, volti a mantenere o a riportare in uno stato soddisfacente gli habitat naturali e le popolazioni di specie di fauna e flora selvatiche”. Tali misure devono consistere in piani di gestione, e misure regolamentari (attività consentite, soggette a restrizioni o vietate), amministrative (disposizioni per l'attuazione delle misure di conservazione o l'autorizzazione a svolgere altre attività nel sito) o contrattuali (per la conclusione di contratti o accordi, tra autorità di gestione e proprietari di terreni o utilizzatori del sito), tutti adeguati alle esigenze ecologiche dei tipi di habitat naturali e delle specie presenti nel sito considerato;
- le “misure preventive per evitare il degrado e le perturbazioni legati ad un evento, un'attività o un processo

*ifications are yet to come (e.g. layout location to be defined), although already funded; they might also include governance directions, which although purely regulatory) can help improving the local sustainability patterns, in the same way. In this case the enforcement of VInCA tools so and simply might be difficult and a more flexible approach is needed; coherently: “the Ministry of Environment is aware of such difficulty, and to this end some proposals to integrate SEA and VinCa have been issued in order to facilitate the assessment of uncertain and not yet fully defined perturbation factors (in terms of localization, type, and magnitude of impacts)”.*¹¹

Such uncertainty also originates difficulties in delimiting the physical boundaries of the influence or catchment areas in which impacts are to be assessed, typically when specific layouts are still to be designed. Case studies in the scientific literature clearly show that along a given transportation infrastructure different animal species with different behavioral and displacement patterns can live together within areas ranging from few square feet up to several acres. Same differences in magnitude can be found among the human-generated perturbation factors associated with any type of transportation infrastructure. Moreover, it is to consider that the Natura 2000 sites are very different (national parks, marine areas, regional and national natural reservation areas, natural monuments). For example, just in the Latium region, the Natura 2000 networks include around one hundred sites¹² accounting for more than 200 SPAs, SICs and SACs, with 90 different habitats,¹³ 18 out of which are priority sites [43].

All of the above evidences how the boundaries of the catchment areas where impacts are to be assessed within regulatory tools on transportation infrastructure can be plotted only as a result of multidisciplinary skills, merging technical know-how (interventions planning and design) and suitable scientific knowledge to describe fauna behavioral modification and flora adaptive patterns, by learning from similar cases.

2.2. Why is Ecology of Transportation Infrastructure necessary to meet regulatory requirements

These considerations lead to conclude that it is necessary to integrate scientific knowledge and skills in the field of ETI within high-complexity tools like the VInCAs. In this way, transportation planners and designer would be supported coherently with the requirements to preserve flora

⁸ Lo *screening* è una delle tre fasi di valutazione previste dalla Direzione Generale Ambiente della Commissione Europea nel documento tecnico “La gestione dei siti della rete Natura 2000 - Guida all'interpretazione dell'art. 6 della direttiva Habitat”.

⁹ Si veda la GU del 28.12.2019, Serie Generale n. 303 per il testo completo e la Comunicazione della Commissione Europea C(2018) 7621 final del 21.11.2018 “Gestione dei siti Natura 2000 Guida all'interpretazione dell'articolo 6 della direttiva 92/43/CEE (direttiva Habitat)”.

¹¹ MATTM, ISPRA, “VAS – Valutazione di incidenza, Proposta per l'integrazione dei contenuti”. September 2011; cited also in the Regional Energy Plan-enforced by the Latium Region, 2017.

¹² https://www.regione.lazio.it/prl_ambiente/?vw=contenutidettaglio&id=117, February 2021.

¹³ <https://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/sistema-carta-della-natura/carta-della-natura-alla-scala-1-50.000/latio>.

prevedibile” valide per tutte le specie e gli habitat nei siti considerati e, se necessario, anche al loro esterno;

- le “esigenze ecologiche”, ovvero: “tutte le necessità ecologiche, tra cui i fattori abiotici e biotici che sono ritenuti indispensabili per garantire la conservazione dei tipi di habitat e delle specie, incluse le loro relazioni con l’ambiente fisico (aria, acqua, suolo, vegetazione e così via)”.

L’applicazione dei criteri della norma ora elencati porge due quesiti specifici riguardanti: 1) i contenuti di piano e 2) la delimitazione delle aree di influenza per la valutazione degli impatti.

Facendo riferimento alla letteratura tecnica¹⁰, nel caso di pianificazione e programmazione di infrastrutture viarie o di trasporto, strumenti regolatori all’area vasta, quali ad esempio i piani per la mobilità e i trasporti regionali o di bacino, possono contenere interventi di varia natura e diverso orizzonte temporale. In un piano di questo tipo possono coesistere indicazioni su interventi “fisici”, ad esempio la costruzione di infrastrutture viarie che, però, possono ancora mancare di indicazioni specifiche di tracciato, anche se già finanziate o in fase progettuale avviata; nel contempo, possono essere presenti indicazioni di governance, che pur non avendo natura fisica, possono comunque contribuire a migliorare la sostenibilità ambientale del territorio su cui insistono. Appare difficile, pertanto, in questo tipo di strumenti regolatori applicare la norma *sic et simpliciter* e la necessità di procedere secondo un approccio più flessibile è stata già osservata altrove, rilevando che: “di questa difficoltà ne è conscio anche il Ministero dell’Ambiente che ha emesso delle proposte finalizzate a supportare l’integrazione fra procedure di VAS e di Valutazione di Incidenza che affrontano la difficoltà di rapportare alla scala dell’analisi ecologica fattori di perturbazione molto incerti e indefiniti (nella localizzazione, nella tipologia e nell’entità dei fattori causali dell’impatto)”¹¹.

Da tale incertezza discende anche la difficoltà di delimitare le aree di influenza per la valutazione degli impatti in assenza di tracciati definiti. Dalla letteratura sui casi di studio finora riportata si evince come lungo una data infrastruttura viaria possano convivere specie animali con abitudini e spostamenti che spaziano da pochi metri a svariati km di superficie; parimenti si può dire per gli effetti perturbatori delle attività antropiche associate all’infrastruttura. A questo si somma la consapevolezza che i siti della rete Natura 2000 sono di varia entità (parchi nazionali, aree naturali marine protette, riserve naturali statali, parchi e riserve naturali regionali, monumenti naturali) e numerosi. Ad esempio, solo nel Lazio la rete Natura

and fauna, also because the Habitats Directive acknowledges the need to preserve human activities when respectful of natural habitats.¹⁴ This approach would also avoid continuous revisions and adaptations in case of detection of elements of perturbation acting on habitats or a given species, occurring during the SEA procedure. Moreover, the consolidation of ETI knowledge might create a set of resources useful in the decision making and planning process. Creation of dataset to support practice could become one more additional resources for ex-post impacts control and monitoring.

Integrating ETI in the infrastructure design practice might also call for the implementation of mitigation measures along the railway lines or on specific components like bridges or tunnels. One example for all are the transparent noise walls with the bird guards, usually ex-post installed, although the phenomenon of birds impacting on these walls is well-known in literature [44]. This could also give rise to new forms of landscaping and streetscaping, thus advancing the research on the effects of infrastructural networks on the landscape, still in its early stages [35], due to the lack of large scale data.

Eventually, it is to stress the recent introduction of the Do No Significant Harm principle within the EC strategy Sustainable Finance Package and namely the specific goal on the biodiversity and ecosystems safeguard,¹⁵ which will make ETI more and more relevant in the future, when assessing the compliance of whatever type of economic activity with the conservation requirements of species and habitats.

3. Implementing Ecology of Transportation Infrastructure

The ETI approach and criteria to mitigate habitats fragmentation and human-generated threats rely on three key actions: mitigate, avoid, compensate (Fig. 1), if no prevention is possible.

Accordingly, avoid fragmentation is the priority and if not applicable, mitigating actions come next (although these are not able to avoid some permanent negative impacts). Mitigation measures are the most common and can be either ex-ante implemented, i.e. they can be included in the infrastructure planning and design schemes (once it has been acknowledged that “avoid” is not an option), or ex-post implemented [45]. Avoiding the infrastructure, however, should always be an option to contemplate, as suggested by FORMAN et al. [1] for whom, drastically, avoid means:

- no new infrastructure (no construction, at all);

¹⁰ MIT, “Valutazione Ambientale Strategica, Rapporto Ambientale, All. 3”, ottobre 2016, p. 6.

¹¹ MATTM, ISPRA, “VAS – Valutazione di incidenza, Proposta per l’integrazione dei contenuti”, settembre 2011; citato anche nel Piano Energetico Regionale (PER) della Regione Lazio, 2017.

¹⁴ Directive 92/43/CEE states at art. 2 the safeguard of natural components taking “account of economic, social and cultural requirements and regional and local characteristics”.

¹⁵ Regulation (UE) 2020/852, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852>.

2000 conta un centinaio di tali siti¹² che includono più di 200 tra SIC-ZSC e ZPS, con circa 90 habitat diversi¹³ di cui 18 prioritari [43]. Da ciò si evince come la determinazione dell'area di influenza ai fini della determinazione degli impatti derivanti da strumenti regolatori che prevedono infrastrutture viarie sia risolvibile sono in maniera multidisciplinare, abbinando all'ambito tecnico (la pianificazione e/o progettazione degli interventi di piano) conoscenze scientifiche appropriate in grado descrivere le variabili comportamentali della fauna o le modificazioni della flora secondo quanto già avviene sul territorio in caso di interventi sul pre-esistente o mutuandoli da casi simili.

2.2. Perché l'Ecologia delle Infrastrutture Viarie è necessaria per ottemperare alla norma

Alla luce di quanto sopra, la necessità di introdurre le conoscenze scientifiche in materia di Ecologia delle Infrastrutture Viarie diviene, pertanto, essenziale per poter ottemperare a norme che danno luogo a valutazione complesse come la VInCA. L'integrazione di tale disciplina consentirebbe, infatti, di creare conoscenze di base utili al "trasportista" pianificatore o progettista in grado di indirizzare le scelte regolatorie in coerenza con le esigenze di tutela di fauna e flora, nella consapevolezza che la Direttiva Habitat recepisce la necessità di conservare quelle attività antropiche da sempre in equilibrio con la natura¹⁴. Questo approccio eviterebbe gravose revisioni dei contenuti di piano qualora in fase di VAS si riscontrassero elementi di perturbazione di habitat e/o specie. Inoltre, il consolidamento di tali conoscenze nella pratica professionale potrebbe costituirsi come una risorsa a cui attingere nel processo decisionale e progettuale di questo tipo di piani. La conseguente creazione di database potrebbe anch'essa divenire risorsa nelle successive attività di controllo e monitoraggio degli impatti, ad implementazione avvenuta.

L'integrazione della l'Ecologia delle Infrastrutture Viarie risulterebbe anche utile in fase di progettazione puntuale delle infrastrutture stesse, favorendo l'inserimento di misure di mitigazione degli impatti antropici nel disegno della via, sia come tracciato sia nelle opere d'arte e nei manufatti di complemento. Un tipico esempio è l'introduzione delle barriere trasparenti all'incrocio lungo le arterie ove sono disegnate le sagome di uccelli per evitare che i volatili vi impattino, abitualmente attuato *ex post*. Eppure la mortalità dei volatili da impatto con superfici trasparenti è ben documentata in letteratura e la quantificazione

- adapt the rail (or road) layout;
- turn the surface line into an underground one.

Compensation measures should be the last to resort to, and their domain of application should be that of infrastructure already operational, the planning and design of new infrastructure being based on prevention, with minimum need to compensate.

ETI actions are therefore subdivided into "prevention" to apply for new infrastructure and "limit" the damages due to habitat fragmentation for already operational infrastructure.

3.1. Design criteria for new infrastructure

Provided that any human-made intervention modifies the natural environment, for a new infrastructure, integrating measures to prevent habitat fragmentation involves three lines of action: line layout, earthworks, and artifacts (bridges, stops, etc.) landscaping [35].

Line layout's locations can be several, all according to local morphology: following ridges and/or valley floors, crossing flat areas, valleys and waterbodies. The approach is to adapt the layout to the form of the area, following bends and slopes (coherently with the safety requirements of rail operations); routes on ridges shall be preferred over those on valley floors, since for the latter impacts on wetlands might be demanding (and in any case crossing wetlands is limited by environmental constraints). Likewise, on flat areas, trenches and ditches are to be followed. To preserve the area's physical continuity and permeability, in literature it is often suggested to raise rail tracks. This is an expensive solution but meets the requirements of having wildlife freely crossing the infrastructure by passing underneath it, thus avoiding additional works or complementing facilities to enable that; to this end, viaducts are to be preferred over embankments.

For what concerns earthworks, it is recommended to limit them as much as possible in order to balance excavations and earth fillings. Cutting embankments may solve the problem of visual impacts typical of elevated lines but not that of habitat fragmentation. This can be solved via wildlife passageways (further elaborated), thus adding one more constraint in the design process. Embankment slopes protection can rely on terraced or welded gabions retaining systems, or reinforced soil structures with green faces or vegetated (Fig. 2), or by designing rock surfaces exposed (also when creating of artificial terracing).

However, for slopes it is not the surface treatment the most sensitive design issue, but the gradient; a 1:2 ratio is considered to be optimal as it enables to minimize soil compaction works and revegetates fast. This gradient ratio also enables the majority of wildlife to easily cross the tracks areas. Whatever the type of slope solution, revegetation is a must and even if earth-filled, planting native species or similar must be ensured.

¹² https://www.regione.lazio.it/prl_ambiente/?vw=contenuti-dettaglio&id=117, al febbraio 2021.

¹³ <https://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/sistema-carta-della-natura/carta-della-natura-alla-scala-1-50.000/laio>.

¹⁴ La Direttiva 92/43/CEE infatti sancisce all'articolo 2 la tutela delle componenti naturali tenendo "conto delle esigenze economiche, sociali e culturali, nonché delle particolarità regionali e locali".

del fenomeno nota [44]. Inoltre, tale integrazione potrebbe dare luogo anche a nuove forme di *landscaping* e *street-scaping*, progredendo nella ricerca sull'effetto delle reti infrastrutturali alla scala paesaggistica o regionale, ritenuta ancora allo stato embrionale [35], soprattutto per la difficoltà di raccogliere dati alla scala vasta.

Infine, vi è da sottolineare come la recente introduzione del concetto di *Do No Significant Harm*, all'interno della strategia comunitaria *Sustainable Finance Package*, e segnatamente l'ottemperanza alla protezione e al ripristino di biodiversità e degli ecosistemi¹⁵, renderà il ricorso alla Ecologia delle Infrastrutture Viarie sempre più necessario al fine di verificare il reale rispetto di qualsiasi tipo di attività economica per lo stato di conservazione degli habitat e delle specie.

3. Applicare l'Ecologia delle Infrastrutture Viarie

L'approccio per l'introduzione di criteri di Ecologia delle Infrastrutture Viarie mirati al contenimento della frammentazione di un habitat e delle minacce antropiche si incentra su tre azioni chiave: mitigare, evitare, compensare (Fig. 1), una volta assodato che non è possibile attuare alcuna misura preventiva.

In quest'ottica, le azioni mirate ad evitare la frammentazione divengono prioritarie e, qualora queste non trovino attuazione, subentrano quelle di mitigazione che tuttavia non evitano il permanere di almeno una parte di impatti negativi. Le misure di mitigazione sono le più frequenti e possono essere applicate sia *ex ante*, ovvero già comprese nella pianificazione o nella progettazione dell'infrastruttura, una volta preso atto della impossibilità di eludere l'opera, oppure *ex post* [45]. La possibilità di non eseguire l'opera deve essere comunque considerata, così come suggerito da FORMAN *et al.* [1] che, drasticamente, interpreta l'azione di evitare in:

- non costruire affatto l'infrastruttura;
- adattare il tracciato;
- interrare l'infrastruttura.

Infine, le misure di compensazione dovrebbero essere considerate come una ultima risorsa da applicare soprattutto sull'esistente. La progettazione di nuove infrastrutture infatti dovrebbe essere basata su criteri preventivi che rendano minima la necessità di compensare.

La trattazione delle misure di Ecologia delle Infrastrutture Viarie, pertanto si divide fra quelle "preventive" da applicare nella fase di progettazione di nuove infrastrutture, e quelle di "contenimento" dei danni da frammentazione di habitat dovuta a tracciati esistenti.

Eventually, the design of artifacts is part of the general landscaping and not just a way to overcome physical barriers like mountain areas or large bodies of water; landscaping also includes the conservation of flora and fauna, as the appropriate landscaping of the transportation infrastructure minimizes fragmentation risks, as evidenced by elevated or tunneled infrastructure.

*Costs for tunneling might be extremely high, but the resulting benefits in terms of habitat preservation are invaluable, according to IUELL *et al.* [35], and in case of mechanized excavations, the area surface remains unchanged and unaffected. When there are no specific constraints on the area surface above the tunnel, but the habitat continuity must be preserved, "cut-and-cover" techniques can be easily implemented. In both cases the requirement of avoiding surface disruptions is met. Nevertheless, tunnels' complementing artifacts like entrances, ventilation shafts, management and maintenance facilities, and their location, are elements of perturbation and nuisance for the wildlife.*

3.2. Adjusting what is already operational

The design criteria for infrastructure already operational include a set of mitigating measures acting on both the human and wildlife components [1]. The location of these measures depends on the catchment area of the line as a source of threats and interactions with the local flora and fauna, i.e. the road effect zone [1][47]. The size of this area depends on several parameters, the most important ones being: vegetation, area morphology, directions of air and water flows, traffic flows (especially close to urban areas, where the frequency of rail operations can be high), and the line operational features (Fig. 4). The road effect zone will be the also the reference area used for monitoring the mitigation measures' effects and Road-kill rates (for which GIS applications are very useful [48]).

The above mentioned criteria are coherent with the three key actions: mitigate, avoid and compensate, where avoid means the reduction of traffic flows or a stop in the operations [1]. These are the last to resort to and hardly applicable, the mitigation measures acting on the human and the wildlife communities being often easier to implement.

For what concerns wildlife, there are two types of interventions:

- *structures and devices to decrease risks, by creating safe areas (or sanctuaries) or alerting the fauna (crossing and passageways, fences, ramps, lights, reflectors);*
- *habitat modifications (for example, unattractive vegetation along the tracks).*

There are several examples in literature describing all of the above (e.g. in [49] with many Italian case studies, and in [32] with a focus of the rehabilitation of railway lines and the adjustments needed on the permanent way), but all are consistent with some common impact-mitigation criteria, which can be grouped in:

¹⁵ Cfr. Regolamento (UE) 2020/852, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852>.

3.1. Criteri progettuali per realizzazioni *ex novo*

Fermo restando che qualsiasi intervento antropico *ex novo* impone modifiche nel contesto naturale in cui insiste, l'integrazione di misure atte a prevenire problemi di frammentazione di habitat nel progetto di una nuova infrastruttura è ascrivibile a tre ambiti: tracciato, movimenti di terra, disegno di manufatti come parte del *landscaping* [35].

Il tracciato può dover insistere su una casistica morfologica varia: seguire crinali e/o fondovalli, intersecare territori pianeggianti, vallate e corsi d'acqua. L'approccio è di adattare il tracciato alla naturale forma del territorio, assecondando curve e pendenze (ove e quando possibile in relazione all'esercizio ferroviario), preferendo percorsi di crinale a quelli di fondovalle ove l'impatto su habitat umidi può porre problemi (e in ogni caso, l'attraversamento di zone umide è tutelato da vincoli di salvaguardia). Analogamente, su aree pianeggianti è bene seguire l'andamento di fossati (naturali o artificiali), siepi e filari. Per preservare la continuità fisica e la permeabilità dell'infrastruttura in letteratura si suggerisce di "staccare" il tracciato dal suolo, proponendo strutture in elevato. Ovviamente questa è una soluzione assai onerosa, ma risponde al criterio di permettere alla fauna di "passare sotto" l'infrastruttura, senza l'obbligo di manufatti complementari che consentano l'attraversamento, ragione per la quale le strutture su viadotto sono da preferire a quelle in rilevato.

Per quello che riguarda i movimenti di terra, la raccomandazione è di limitarne l'entità il più possibile, con l'obiettivo di raggiungere un equilibrio tra sbancamenti e riempimenti. Tracciati in trincea possono risolvere il problema dell'impatto visivo che le soluzioni in rilevato possono comportare, riproponendo invece la frammentazione di habitat. Questa può essere in parte risolta con i dispositivi per il passaggio della fauna selvatica più avanti descritti, introducendo così un elemento aggiuntivo nella progettazione. Il trattamento dell'invaso nelle quinte laterali può essere, se necessario, terrazzato con gabbioni metallici o semplicemente utilizzando soluzioni con terre rinforzate rinverdate o scarpate vegetate (Fig. 2) o, ancora, lasciando eventuali superfici rocciose a vista (trattamenti che possono applicarsi anche in caso di creazione di pendenze artificiali).

Tuttavia il problema non è il trattamento superficiale dei piani inclinati, ma il gradiente; un rapporto 1:2 viene ritenuto ottimale in quanto minimizza le operazioni di compattamento del terreno e consente una rapida rivegetazione. Tale pendenza ri-

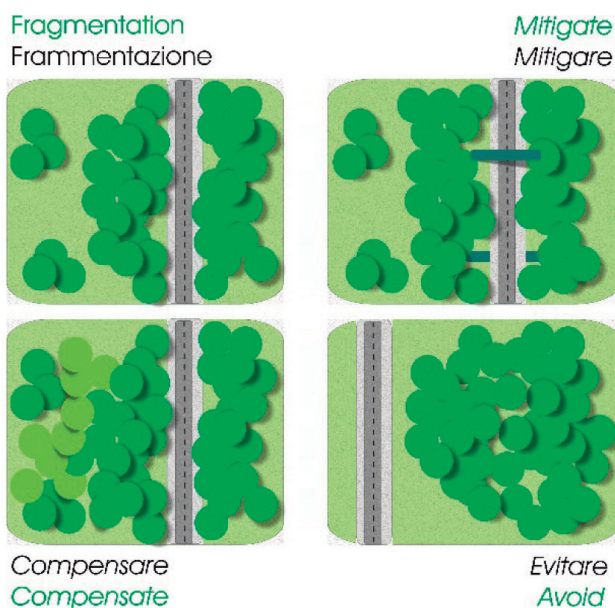


Figura 1 – Azioni chiave per ridurre la frammentazione di un habitat e le minacce antropiche.

Figure 1 – Key actions to reduce habitats' fragmentation and human-generated threats.

- tracks' "permeability" thanks to elevated or underground passageways and corridors;
- location of the track area above or below the ground level, to reduce traffic nuisance and especially noise;
- implementation of noise mitigation devices (both ground and on-board);
- less polluting traction systems [50].

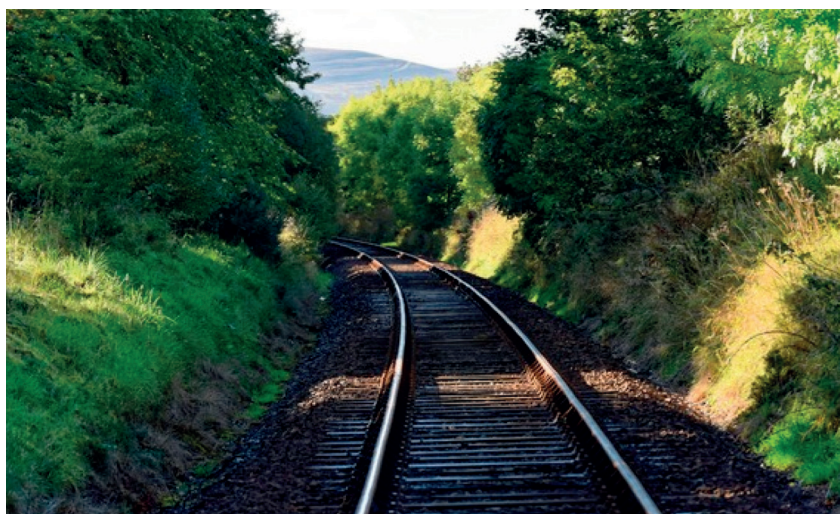


Figura 2 – Un vecchio tracciato in trincea appropriato alla mitigazione degli impatti [46].

Figure 2 – An old track layout cut in the countryside, suitable to mitigate impacts [46].

sulta anche accessibile a molta fauna selvatica consentendo l'attraversamento della via. Qualsiasi nuova configurazione viaria deve, inoltre, poter consentire il rinverdimento ed anche il riempimento con nuove terre deve consentire la piantumazione di specie autoctone o con proprietà simili.

Infine il disegno di manufatti è visto nella progettazione ex novo come elemento di *landscaping* e non come mero espediente tecnico per superare barriere fisiche quali, ad esempio, aree montuose o larghi specchi d'acqua; in questa funzione è compresa la tutela di specie animali e vegetali in quanto l'inserimento appropriato nel paesaggio minimizza il più possibile il rischio di frammentazione. Ne è un esempio la creazione di infrastrutture in rilevato o il loro interrimento in tunnel.

I costi di costruzione di un tunnel possono essere assai elevati, ma i benefici in termini di preservazione dell'ambiente naturale sono, secondo IUELL *et al.* [35] incalcolabili. Infatti, nel caso di tunnel realizzati con scavo meccanizzato, il manto superficiale del terreno rimane del tutto inalterato; in casi ove la conservazione della superficie sovrastante la struttura viaria non sia vincolante, ma lo sia il mantenimento della continuità di habitat, la tecnica *cut-and-cover* può trovare facile applicazione. In entrambi i casi la continuità superficiale è mantenuta (Fig. 3). Naturalmente le opere complementari delle gallerie artificiali come i pozzi di ventilazione, i manufatti per il controllo dell'esercizio, l'ubicazione dei portali di accesso possono comunque configurarsi come elementi di disturbo e inquinamento per la fauna selvatica locale.

3.2. Adeguare l'esistente

I criteri progettuali da adottare sull'esistente introducono misure di natura essenzialmente mitigatrice rivolte sia alla componente faunistica sia antropica [1]. Per conoscere l'ubicazione di tali misure si deve risalire all'area di influenza, o *road effect zone*, della via come fonte di rischio e interazione con la fauna e la flora circostante [1][47]. L'area di influenza nella sua estensione è funzione di numerosi parametri, i più importanti dei quali sono: la vegetazione, la morfologia del territorio, la direzione di flussi di acqua e aria, i flussi di traffico (soprattutto in aree periurbane ove la frequenza dell'esercizio ferroviario può essere alta) e le caratteristiche della via (Fig. 4). La determinazione della zona di influenza funge anche da area di riferimento nella successiva fase di controllo sugli effetti delle misure mitigatrici e dei fenomeni di incidentalità (ove le applicazioni GIS sono di grande aiuto [48]).

Track "permeability" can be carried out in different ways (as Fig. 5, where the scupper example is the only road-specific), all enabling wildlife, even the arboreal one [51], fish and amphibians to safely move.

The location of these devices must be carefully planned, especially in the case of overpasses, since it will be within the road effect zone boundaries and will be affected by the types of local fauna and habitat, as evidenced in Table 2. Implementation practice is also vast and depends on the local habitat, area and land features, the knowledge of wildlife typical displacements, building and maintenance costs, local regulations.

Compensation measures, i.e. a set of environmental improvements, are targeted to counterbalance all the unavoidable on non-mitigable effects due to human activities and their resulting habitat fragmentation (and as such can be part of the package of measures applicable to prospective infrastructure, as well). In case of habitat loss, degradation or isolation, the recommended approach is based on:

- *the creation of compensation areas (woodlands, wetlands, etc.) larger than the impacted ones; this is preferable over the mere improvement on areas with the same size of the impacted ones;*
- *locate the compensation areas as closer as possible to the impacted ones, outside the road effect zones;*
- *recreate the previous ecological conditions, rather than improve the area but under different conditions;*
- *improve the quality of the previous ecological conditions, rather than achieve the same quality level as before.*

More specifically, highly effective compensation measures are:

- *create larger areas inhabited by quality bird fauna, to compensate areas affected by traffic noise;*
- *expand more and more naturally-vegetated areas;*
- *recreate for bodies of water and wetlands their pristine conditions (i.e. as they were before the infrastructure);*



Figura 3 – Il tunnel del Loetschberg, Frutigen, Svizzera.
Figure 3 – The Loetschberg tunnel at Frutigen, Switzerland.

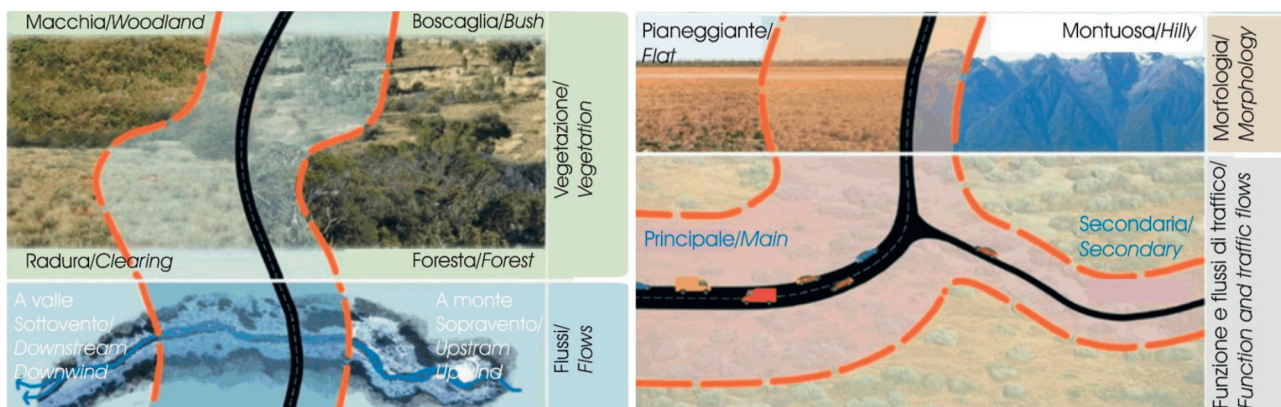


Figura 4 – La road effect zone (rielaborato da [1]).
Figure 4 – The road-effect zone (edited from [1]).

Anche in questo caso vale sempre l'approccio basato sulle tre azioni chiave: mitigare, evitare, compensare, dove per evitare si intendono interventi di riduzione del traffico ferroviario o la chiusura della via [1]. È intuitivo che si tratti di azioni drastiche, difficilmente realizzabili nella realtà ove, al contrario, appare più praticabile introdurre azioni mitigatrici che, come detto, agiscono sul comportamento animale o dell'uomo.

Per quel che riguarda la fauna, gli interventi possibili sono essenzialmente di due tipi:

- creazione di strutture che riducano il rischio e che generino zone di salvaguardia o allertino l'animale (strutture di attraversamento, delimitazioni, rampe, catarifrangenti, illuminazione);
- modifiche di habitat (ad esempio, la piantumazione di vegetazione sgradevole o poco attrattiva lungo la via).

In letteratura esistono numerose applicazioni che rispondono a questo tipo di soluzioni (ad esempio in [49] con ampia casistica italiana, e [32] specificatamente sulla riqualificazione dei tracciati ferroviari con dettagli sull'adeguamento dell'armamento) ma è importante sottolineare i criteri comuni di mitigazione degli impatti che sottendono a questa varietà di applicazioni, che si raggruppano in:

- permeabilità della via tramite predisposizione di passaggi in quota o sotterranei;
- depressione del piano rotabile rispetto al piano di campagna o suo innalzamento per ridurre il disturbo da traffico, e segnatamente il rumore;
- utilizzo di dispositivi di mitigazione del rumore, sia di bordo che sull'infrastruttura;
- utilizzo di sistemi di trazione meno inquinanti [50].

La permeabilità della via può essere realizzata in vari modi (Fig. 5, ove il solo caso degli ombrinali è specifico dell'infrastruttura stradale), consentendo anche il passaggio di animali che vivono sugli alberi [51], nonché di pesci e anfibi.

- *recreate corridors or passageways to facilitate wildlife displacements;*
- *improve the habitat conditions for rare species and in high biodiversity areas [1].*

In Tab. 3 all of the above is synthesized.

4. Guidelines to assess the effectiveness of the Ecology of Transportation Infrastructure measures

Procedures to assess the effectiveness of ETI measures are largely described in literature (e.g. in [35][45][52][53]); all are multi-step and originate from the need to advance knowledge on habitats' characteristics, wildlife behaviors, flora specific features, natural and human boundary conditions /for example weather, local climate, land use, etc.). At the same time, since evaluation is not just the mere ex ante vs ex post comparison, the development of the infrastructure must be central in any phase of the related decision-making process and coherent with the criteria previously elaborated (Tab. 4).

Consistently with all of the above, specific analysis fields are to be developed, i.e. the study of the effect zones and the compensation ones, the selection and location of the mitigation measures, as well as the monitoring and control plans procedures. Similarly to the typical evaluation processes adopted in transportation studies, also in this case specific goals are to be stated (in this case, coherently with the conservation regulatory requirements and namely those required by the VInCA and the Natura 2000 network, if need be¹⁶), the evaluation methodology to adopt (via multi-scope indicators, by building scenarios according to different time horizons to the effects evaluation, and eventually the set-up of monitoring networks and techniques associated with a

¹⁶ It is to be reminded that at EC level, are also to be enforced directions from the Strategic Environmental Assessment (SEA Directive 2001/42/EC) and the Environmental Impact Assessment (EIA Directive 2014/52/EU).

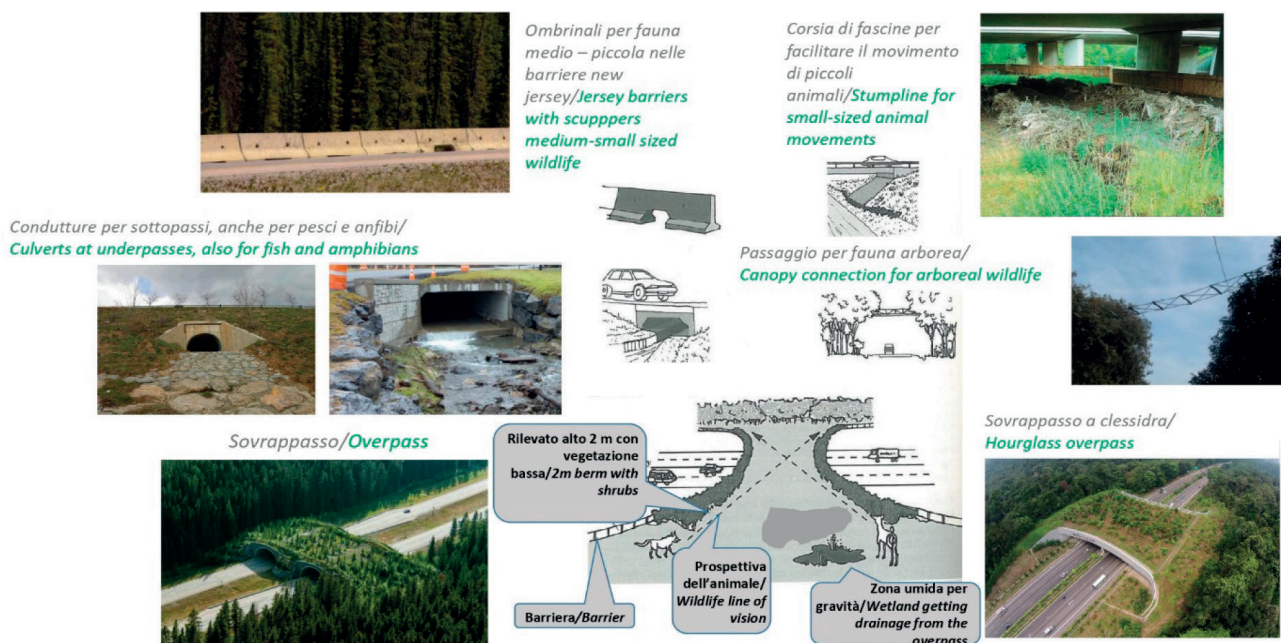


Figura 5 – Dispositivi di mitigazione che favoriscono la permeabilità della via (rielaborazione da fonti varie).
Figure 5 – Mitigation devices that favor lines permeability (reedited by the author from different sources).

L'ubicazione di questi dispositivi, e segnatamente dei sovrappassi, non è casuale e non solo ricade nelle aree di influenza oggetto di studio, ma dipende dal tipo di fauna e habitat [52], come è possibile evincere in Tab. 2. La casistica di realizzazione è anch'essa vasta e dipende da molti fattori legati all'habitat, al territorio e all'uso del suolo, alla conoscenza dei movimenti animali, ai costi di costruzione e manutenzione, agli strumenti regolatori locali.

Le misure di compensazione, infine, sono mirate a creare miglioramenti di natura ambientale che possano controbilanciare, a livello locale, tutti quegli impatti che non possono essere mitigati o evitati a causa delle attività antropiche legate all'infrastruttura viaria e alla frammentazione di habitat ad esso associata (e pertanto possono anche far parte del pacchetto di misure per le infrastrutture *ex novo*). In caso di perdita, degrado o isolamento di habitat si raccomanda un approccio in grado di:

- creare aree di compensazione (forestate, umide, ecc.) più vaste di quelle oggetto di impatto, piuttosto che apportare migliona-

Tabella 2 – Table 2

Distanza raccomandata fra sovrappassi [52]
Recommended distances between overpasses [52]

Tipo di fauna Wildlife	Distanza raccomandata Recommended distance (km)	Tipo di habitat Habitats
Mammiferi di grandezza fino a volpi e tassi Mammals with size up to foxes and badgers	1-2	Area agricola Agricultural land
		Aree a pascolo Pasture
		Foreste Forest
Invertebrati e piccoli mammiferi Invertebrates and small mammals	3-5	Area agricola Agricultural land
		Aree a pascolo Pasture
Mammiferi di grandezza media Mid-sized mammals	5-10	Area agricola Agricultural land
	3-8	Aree a pascolo Pasture
	2-5	Foreste Forest
Grandi mammiferi Large mammals	Solo lungo corridoi di migrazione o movimento Only along corridors	Area agricola Agricultural land
		Aree a pascolo Pasture
	3-5 o lungo corridoi di migrazione o movimento Only along corridors	Foreste Forest

menti su superfici di estensione esattamente pari a quest'ultime;

- ubicare tali zone il più vicino possibile alle aree impattate, al di fuori delle aree di influenza;
- ricreare le stesse condizioni ecologiche preesistenti, piuttosto che apportare migliorie ma con condizioni diverse;
- migliorare in qualità rispetto alle condizioni ecologiche preesistenti, piuttosto che ripristinare lo stesso livello di qualità.

Nello specifico azioni compensative di sicuro effetto sono quelle di:

- introdurre aree più ampie con presenza aviaria di alta qualità per riequilibrare le zone gravate da rumore da traffico;
- espandere ancor più le aree vaste con vegetazione naturale;
- riportare corsi d'acqua o zone umide che sono stati alterati alle condizioni pre-infrastruttura;
- ricreare corridoi o percorsi per consentire il movimento della fauna selvatica;
- migliorare le condizioni di habitat per le specie rare e nei siti ad alta biodiversità [1].

In Tab. 3 si riassume, per comodità di lettura e sintesi, quanto sopra descritto.

4. Linee guida per la valutazione dell'efficacia delle misure di Ecologia delle Infrastrutture Viarie

In letteratura sono proposti vari procedimenti di valutazione della efficacia delle misure di Ecologia delle Infrastrutture Viarie adottabili (ad esempio in [35][45][52][53]); secondo metodiche *multi-step* analoghe. L'approccio comune si origina nella necessità di conoscenze dettagliate delle caratteristiche di habitat, del comportamento della fauna che lo abita, delle caratteristiche della flora, delle condizioni naturali e antropiche al contorno (ad esempio: meteorologia e condizioni climatiche locali, dinamiche di uso del suolo, ecc.). Nel contempo, nella consapevolezza che le fasi di valutazione

monitoring plan, all consistent with the goals and scenarios). A roadmap is suggested in Fig. 6.

As said, the indicators shall be multi-scope and associated with several evaluation categories, to describe different impacts. Most suitable evaluation categories are those to

Tabella 3 – Table 3

Sintesi dei principali criteri e misure della Ecologia delle Infrastrutture Viarie
Synthesis of ETI criteria and measures

Criteri Criteria	Tipo di infrastruttura Type of infrastructure	
	Nuova New	Esistente Already operational
Evitare Avoid	Non costruire Do not build at all	Ridurre traffico Reduce traffic flows
		Optare per sistemi di trazione meno inquinanti Operate less polluting vehicles
Mitigare Mitigate	Adattare il tracciato alla morfologia del territorio Adapt the layout to local morphology	Definire Define road effect zones
		Introdurre strutture e dispositivi per ridurre il rischio per la fauna Introduce stuctures and devices to reduce the risk for wildlife
	Progettare strutture staccate dal suolo o interrate Design elevated or underground layouts	Modificare l'habitat Modify the habitat (anche/also*)
		Rendere la via permeabile Design permeable infrastructure (anche/also**)
	Ridurre i movimenti di terra Reduce earthworks	
	Creare passaggi per la fauna Create passageways for wildlife**	
	Trattare le quinte dell'invaso infrastrutturale Landscape the infrastructure area*	
Compensare Compensate	Creare aree di compensazione più vaste di quelle oggetto di impatto Create compensation areas larger than the impacted ones	
	Ubicare le zone di compensazione il più vicino possibile alle aree impattate Locate the compensation areas as closer as possible to the impacted ones	
	Ricreare le stesse condizioni ecologiche preesistenti Recreate the previous ecological conditions	
	Migliorare la qualità rispetto alle condizioni ecologiche preesistenti Improve the quality of the previous ecological conditions	

Tabella 4 – Table 4

Fasi di valutazione (adattato da [52])
Evaluation phases (edited and adapted from [52])

Fasi Phases	Ambito di Intervento Intervention field	Questioni da considerare Issues	Processi regolatori Regulations	Strumenti Tools
Scoping	Politiche dei Trasporti <i>Transport policies</i>	Modi ed esercizio della mobilità (specie in aree ove vi è offerta multimodale); analisi dei conflitti di natura con le aree da tutelare <i>Transportation modes and operations (especially where multimodal supply is missing; conflicts analysis with the areas to safeguard)</i>	Valutazione di impatto ambientale strategica SEA	Piani di bacino dei trasporti e territoriali paesistici, norme connesse alla rete Natura 2000 e di tutela ambientale in generale <i>Transit plans, landscape plans, any safeguard plan, also including Natura 2000 network requirements</i>
Pianificazione Planning	Individuazione dei corridoi di mobilità <i>Identification of corridors</i>	Rilievo dei flussi di mobilità antropica ed evidenziazione di conflitti specifici con la fauna e loro quantificazione <i>Traffic countings and quantification of conflicts with the local fauna</i>		
	Selezione dei tracciati <i>Route identification</i>	Valutazione delle varianti, studio preliminare della ubicazione delle misure di mitigazione (ad es. corridoi) e rilievo delle principali caratteristiche di habitat <i>Evaluation of planning variants, preliminary study of the mitigation measures (e.g. corridors and survey of the habitat's main features)</i>	Valutazione di impatto ambientale EIA	Rilievi sulla flora e sulla fauna Studio preliminare sugli effetti mitigatori <i>Surveys and countings on fauna; preliminary study on migration effects</i>
Progetto Design	Progetto del tracciato <i>Route Design</i>	Ubicazione definitiva delle misure di mitigazione e loro progettazione <i>Location and design of mitigation measures</i>	Concessioni edificatorie <i>Building permits</i>	Programma di monitoraggio Studio di dettaglio sugli effetti mitigatori Inclusione delle misure di mitigazione all'interno di piani esistenti Monitoraggio ex ante Piani per tutelare gli habitat durante le fasi di costruzioni <i>Monitoring plan; Focus on mitigation effects; plans updated versions including mitigation measures; ex ante monitoring/Specific habitat safeguard plans associated with the building phases</i>
Costruzione Construction	Prevenzione dell'intrusione di animali nei cantieri, fasi, tempi e orari a misura di habitat locale <i>Prevention of wildlife in the building sites; operations meeting the habitat requirements</i>	Supervisione ecologica <i>Ecological supervision</i>	Pianificazione delle infrastrutture <i>Infrastructure plans</i>	Monitoraggio durante la fase di costruzione <i>Monitoring during the building phases</i>
Esercizio Operations	Valutazione degli impatti dell'infrastruttura e delle attività di manutenzione sulla fauna, efficacia delle misure di mitigazione proposte (inclusa analisi della mortalità) <i>Infrastructure-generated impacts assessment and evaluation of maintenance impacts on fauna; mitigation measures effectiveness (including roadkill)</i>		Piani di esercizio Business Plan Management Plan	Monitoraggio durante le fasi di esercizio e manutenzione Valutazione post Progetto <i>Operation and maintenance monitoring; Ex post evaluation</i>

devono procedere ben oltre la comparazione *ex ante/ex post*, la realizzazione dell'infrastruttura deve informare la configurazione di tutte le fasi del processo decisionale a suo supporto ed essere coerente con i criteri precedentemente descritti (Tab. 4).

Ciò porta a definire gli ambiti specifici di analisi, ovvero le zone di influenza e quelle eventuali di compensazione, la scelta e l'ubicazione di massima dei dispositivi di mitigazione, le modalità di monitoraggio e controllo. In analogia con quanto avviene nei meccanismi di valutazione in ambito trasportistico, seguono la definizione degli obiettivi specifici (che devono essere, in questo caso, coerenti con quelli di salvaguardia della norma, e segnatamente con la procedura VInCA e quanto riportato nella descrizione dei vari siti della rete Natura 2000 eventualmente interessati¹⁶), la metodica di valutazione, tramite la scelta di indicatori multiscopo, con la creazione di scenari a orizzonti temporali diversi per la valutazione degli effetti, e infine la predisposizione della rete di monitoraggio e delle tecniche più appropriate, secondo un piano di monitoraggio coerente con obiettivi e scenari. Una possibile *roadmap* è suggerita in Fig. 6.

Come accennato, gli indicatori devono essere di natura multidisciplinare, associati a più categorie di valutazione e in grado di descrivere più impatti. Categorie di valutazione più opportune appaiono quelle mirate a quantificare i fenomeni non solo dal punto di vista ambientale ma anche economico, intendendo con questo la variazione dell'insieme delle dinamiche antropiche connesse all'introduzione di misure mitigatrici o di compensazione. Ciò introduce anche la

¹⁶ Va qui ricordato che a livello comunitario vanno sempre ottemperate le indicazioni in materia di valutazione dettate dalle direttive sulla valutazione strategica e ambientale, rispettivamente la *Strategic Environmental Assessment (SEA Directive 2001/42/EC)* e la *Environmental Impact Assessment (EIA Directive 2014/52/EU)*.

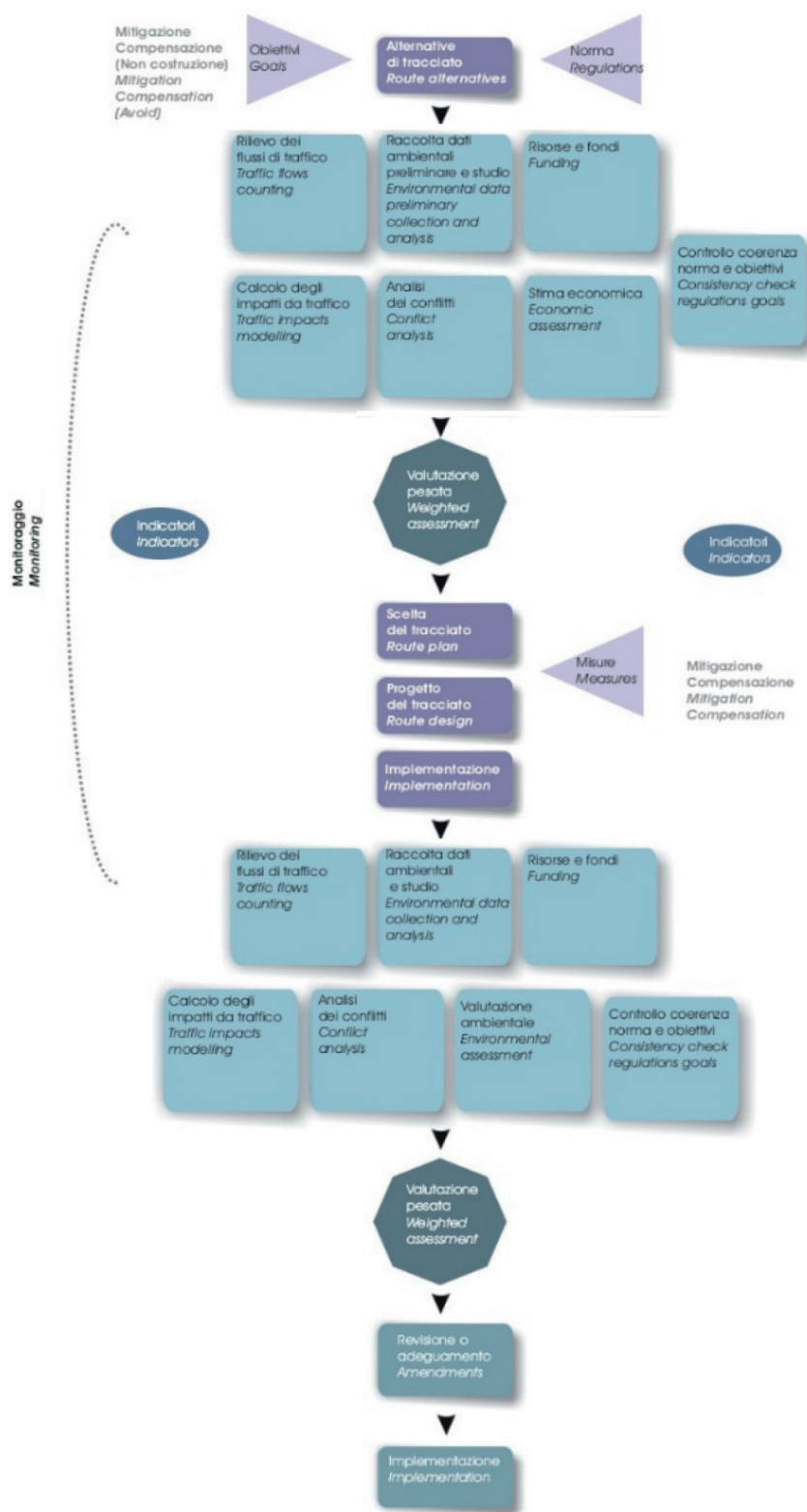


Figura 6 – Roadmap per la valutazione di procedimenti connessi all'Ecologia delle Infrastrutture Viarie.

Figure 6 – A Roadmap for the evaluation of ETI processes.

questione degli oneri. Tali misure possono non essere necessariamente costose (riferimenti possono essere trovati in FORMAN *et al.* [1] e per l'Italia in CIABÒ *et al.* [49]), ma l'insieme della loro implementazione e dei sistemi di monitoraggio e analisi dei dati deve potersi avvalere di fondi regolari e duraturi nel tempo, secondo i tempi dettati dalle modificazioni naturali degli habitat considerati.

L'Ecologia delle Infrastrutture Viarie è ancora una scienza giovane che si arricchirà nel tempo di nuovi apporti da altre discipline (si pensi, ad esempio, agli orizzonti di applicazione in materia di restituzione di dati su cartografia informatizzata, sulle possibilità di *collaborative mapping* delle comunità coinvolte e sui processi partecipativi che ne possono conseguire a tutela del territorio) e diverrà sempre più necessaria per la valutazione di nuove infrastrutture di trasporto. I saperi e le competenze si consolideranno nel tempo e ne conseguirà una diversa maturità nell'affrontare i processi decisionali. In letteratura sono individuati ulteriori margini di lavoro concettuale in questo senso che si indirizzano verso la creazione di un più ampio e inclusivo dibattito dove le decisioni siano affrontate anche dal punto di vista etico: "quanto negativo deve essere l'impatto sull'ambiente, le comunità e le economie locali prima di stabilire la non eticità della costruzione di una nuova via?" [54]. Ciò conduce anche a interrogarsi sulla necessità di introdurre la responsabilità ecologica nelle pratiche di costruzione e manutenzione delle vie quale garanzia di tutela ambientale.

quantify phenomena both under the environmental and economic points of view, with the latter meaning the consequent variations of the human dynamics once the mitigation or compensation measures are in place. This also introduces the cost issue. The measures previously described are not necessarily all expensive (to this end, specific references can be found in Forman et al. [1], and for the Italian cases in Ciabò et al. [49]); but adequate and constant funding programs must be available to enable their implementation, study and monitoring according to time horizons dictated by the habitats' natural modifications.

ETI is still in its infancy and will thrive on new contributions from more and more study fields (for example, the GIS potential is still unexplored, and so is that of collaborative mapping among the involved communities which may give rise to new participation processes and improve the quality of safeguard dynamics); at the same time ETI will become more and more central on the evaluation of new transportation infrastructure. Knowledge and skills will consolidate fostering the maturity of decision-making processes. In literature new questions have risen [54] as to whether decisions must be taken also under the ethic point of view, with a larger and more inclusive involvement of actors, the central question being: "for a given infrastructure, how much negative must be the generated impact on the environment, the communities and their local economies prior to state that it is unethical to build it?" [54]. This also prompts the issue to introduce the ecological liability in the current railway building and maintenance practice as guarantee of environmental safeguard.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] FORMAN T.T. *et al.* (2003), "Road Ecology – Science and Solutions". Island Press, Washington.
- [2] ODUM E.P. (1971), "Fundamentals of ecology". W.B. Saunders, Philadelphia.
- [3] VON HERRMANN F.W. (a cura di/ed.) (2000), "Martin Heidegger. Vorträge und Aufsätze (1936-1953)". Vol. 8, Klostermann, Frankfurt am Main.
- [4] TAKEDA F. (1971), "An approach to make regional developmental effect of road construction compatible with environmental conservation". Studies in Regional Science, 2, pp. 37-45.
- [5] SCHEERER H. (1974), "Die Auswirkungen des Fernstrassenbaus und des Fernverkehrs auf die natuerliche Umwelt", report n. 23, Deutscher Rat für Landespflege, Bonn.
- [6] MATHE P. (1977), "Ökologische Gesichtspunkte beim Ausbau und bei der Asphaltierung von Wegen und Strassen mit Verdichtung der Verkehrsnetze auch im landlichen Raum", Forum Stadte-Hygiene, 28 (7), pp. 189-193.
- [7] FIELENBACH R. (1975), "Strasse und Ökologie", Strasse Autobahn, 26 (2), pp. 52-54.
- [8] BELLPORT B.P. (1971), "US Bureau of Reclamation -USBR specifications focus on environment", Civil Engineering, 41 (7), pp. 50-52.
- [9] MUSKETT C.J., JONES M.P. (1980), "The dispersal of lead, cadmium and nickel from motor vehicles and effects on roadside invertebrate macrofauna", Environmental Pollution Series A: Ecological and Biological, 23 (3), pp. 231-242.
- [10] OFOMATA G.E.K. (1981), "Impact of road building, urbanisation and general infrastructural development on the Nigerian rainforest ecosystem", Landscape Planning, 8 (1), pp. 21-29.
- [11] DAVIS J.B., GEORGE J.J. (1987), "Invertebrates as indicators of urban and motorway discharges", Science of the Total Environment, 59 (C), pp. 291-302.
- [12] DYMENT R. (1974), "Pure waters project includes restoration", Water Sewage Works, 121 (3), pp. 52-53.
- [13] BACSÓ J., KIS-VARGA M., KOVÁCS P., KALINKA G. (1984), "Investigation on the accumulation of lead and other metals

- in plants caused by motor-traffic and smelting*", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles, 81 (1), pp. 59-65.
- [14] TAM N.F.Y., LIU W.K., WONG M.H., WONG Y.S (1987), "*Heavy metal pollution in roadside urban parks and gardens in Hong Kong*", Science of the Total Environment, 59 (C), pp. 325-328.
 - [15] BISCHOFBERGER W. (1985), "*Ueber den Einfluss der Tausalze auf Grund- und Oberflaechenwasser*", Strassen- und Tiefbau, 39 (6), pp. 6-10.
 - [16] SCOTT N.E., DAVISON A.W. (1985), "*The distribution and ecology of coastal species on roadsides*", Vegetation, 62 (1-3), pp. 433-440.
 - [17] MORIKAWA T. (1985), "*The influence of road dust on asthmatic children*", Japanese Journal of Allergology, 34 (5), pp. 297-304.
 - [18] HEALY M.A., ASLAM M. (1980), "*The distribution of lead in a roadside environment and its consequences for health*", Public Health, 94 (2), pp. 78-88.
 - [19] VAN DER REE R., JAEGER J.A.G., VAN DER GRIFT E. A., CLEVINGER A.P. (2011), "*Effects of roads and traffic on wildlife populations and landscape function: road ecology is moving towards larger scales*", Ecology and Society, 16 (1), p. 48.
 - [20] ELLENBERG H., MÜLLER K., STOTTELE T., WALPER K.H. (1981), "*Straßen-Ökologie: Auswirkungen von Autobahnen und Straßen auf Ökosysteme deutscher Landschaften*", Ökologie und Straße, 3, pp. 19-122.
 - [21] FORMAN R.T.T. (1998), "*Road ecology: a solution for the giant embracing us*", Landscape Ecology, 13, pp. III-V.
 - [22] HARRIS L.D., SCHECK J. (1991), "*From implications to applications: the dispersal corridor principle applied to the conservation of biological diversity*". In D.A. Saunders, Hobbs R.J. (a cura di/eds.), "*Nature conservation 2: the role of corridors*", Surrey Beatty and Sons, Chipping Norton, pp. 189-220.
 - [23] COFFIN A.W. (2007), "*From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads*", Journal of Transport Geography, 15 (5), pp. 396-406.
 - [24] FORMAN R.T.T., ALEXANDER L.E. (1998), "*Roads and their major ecological effects*", Annual Review of Ecology and Systematics, 29, pp. 207-232.
 - [25] HUNT A., DICKENS H.J., WHELAN R.J. (1987), "*Movement of mammals through tunnels under railway lines*", Australian Zoologist, 24 (2), pp. 89-93.
 - [26] YANES M., VELASCO J.M., SUÁREZ F. (1995), "*Permeability of roads and railways to vertebrates: The importance of culverts*" Biological Conservation, 71 (3), pp. 217-222.
 - [27] DE SANTO R.S., SMITH D.G. (1993), "*An introduction to issues of habitat fragmentation relative to transportation corridors with special reference to high-speed rail (HSR)*", Environmental Management, 17 (1), pp. 111-114.
 - [28] RODRIGUEZ A., CREMA G., DELIBES M. (1996), "*Use of non-wildlife passages across a high speed railway by terrestrial vertebrates*", Journal of Applied Ecology, 33 (6), pp. 1527-1540.
 - [29] KACZENSKY P., KNAUER F., KRZE B., JONOVIC M., ADAMIC M., GOSSOW H. (2003), "*The impact of high speed, high volume traffic axes on brown bears in Slovenia*", Biological Conservation, 111 (2), pp. 191-204.
 - [30] POPP J.N., BOYLE S.P. (2017), "*Railway ecology: Underrepresented in science?*", Basic and Applied Geology, 19, pp. 84-9.
 - [31] BARRIENTOS R., ASCENSÃO F., BEJA P., PEREIRA H.M., BORDA-DE-ÁGUA L. (2019), "*Railway ecology vs. road ecology: similarities and differences*", European Journal of Wildlife Research, 65 (1), 12.
 - [32] BORDA-DE-ÁGUA L., BARRIENTOS R., BEJA P., PEREIRA H.M. (a cura di/ed.). *Railway Ecology*. Springer, Cham, 2017.
 - [33] KARLSON M., MORTBERG U., BALFORS B. (2014), "*Road ecology in environmental impact assessment*", European Journal of Wildlife Research, 48, pp. 10-19.
 - [34] SANTOS G., BEHRENDT H., MACONI L., SHIRVANI T., TEYTELBOYM A. (2010), "*Part I: Externalities and economic policies in road transport*", Research in Transportation Economics, 28 (1), pp. 2-45.
 - [35] IUELL B., BEKKER G.J., CUPERUS R., DUFEEK J., FRY G., HICKS C., HLAVÁČ V., KELLER V., ROSELL B., SANGWINE C., TØRSLØV T., WANDALL N., LE MAIRE, B. (a cura di/ed) (2003), "*Wildlife and Traffic: A European Handbook for Identifying Conflicts and Designing Solutions*", KNNV Publishers, BM Zeist.
 - [36] ERVINKA J., RIEGERT J., GRILL S., ŠÁLEK M. (2015), "*Large-scale evaluation of carnivore road mortality: the effect of landscape and local scale characteristics*", Mammal Research, 60 (3), pp. 233-243.
 - [37] FINCH D., SCHOFIELD H., MATHEWS F. (2020), "*Traffic noise playback reduces the activity and feeding behaviour of free-living bats*", Environmental Pollution, 263, 114405.

- [38] ORTIZ-URBINA E., DIAZ-BALTEIRO L., IGLESIAS-MERCHAN C. (2020), "Influence of anthropogenic noise for predicting cinereous vulture nest distribution", *Sustainability*, 12 (2), 503.
- [39] MADADI H., MORADI H., SOFFIANIAN A., SALMANMAHINY A., SENN J., GENELETTI D. (2017), "Degradation of natural habitats by roads: Comparing land-take and noise effect zone", *Environmental Impact Assessment Review*, 65, pp. 147-155.
- [40] GHADIRIAN O., MORADI H., MADADI H., LOTFI A., SENN J. (2019), "Identifying noise disturbance by roads on wildlife: a case study in central Iran", *SN Applied Sciences*, 1 (8), 808.
- [41] FRANCIS C.D., BARBER J.R. (2013), "A framework for understanding noise impacts on wildlife: An urgent conservation priority" *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11 (6), pp. 305-313.
- [42] BLACKWELL B.F., DEVAULT T.L., SEAMANS T.W. (2015), "Understanding and Mitigating the Negative Effects of Road Lighting on Ecosystems". In VAN DER REE R., SMITH D.J., GRILO C. (a cura di/ed). "Handbook of Road Ecology", Wiley, Chichester, pp. 143-150.
- [43] CALVARIO E., SEBASTI S., COPIZ R., SALOMONE F., BRUNELLI M., TALLONE G., BLASI C. (2009), "Habitat e specie di interesse comunitario nel Lazio", Regione Lazio – ARP, Roma.
- [44] LOSS S.R., WILL T., LOSS S.S., MARRA P.P. (2014), "Bird-building collisions in the United States: Estimates of annual mortality and species vulnerability", *The Condor: Ornithological Applications*, 116, pp. 8-23.
- [45] ROEDENBECK I.A.L. et al. (2007), "The Rauischholzhausen agenda for road ecology", *Ecology and Society*, 12 (1), 11.
- [46] <https://www.businessgreen.com/news/3079441/network-rail-tasked-with-boosting-biodiversity-around-uk-train-tracks>.
- [47] FORMAN R.T.T., DEBLINGER R.D. (2000), "The ecological road effect zone of a Massachusetts (USA) suburban highway", *Conservation Biology*, 14, pp. 36-46.
- [48] SHILLING F.M., WAETJEN D.P. (2012), "The Road Effect Zone GIS Model", University of California, Davis.
- [49] CIABÒ S., FABRIZIO M., RICCI S., MERTEN A. (2015), "Strade – Life", Regione Umbria, Perugia.
- [50] SELVA N., KREFT S., KATI V., SCHLUCK M., JONSSON B.G., MIHOK B., OKARMA H., IBISCH P.L. (2011), "Roadless and Low-Traffic Areas as Conservation Targets in Europe", *Environmental Management*, 48 (5), pp. 865-877.
- [51] ZIMMERMAN TEXEIRA F. et al. (2013), "Canopy bridges as road overpasses for wildlife in urban fragmented landscapes", *Biota Neotropica* 13 (1), pp. 117-123.
- [52] HLAVÁ V. et al. (2019), "Wildlife and Traffic in the Carpathians. Guidelines how to minimize impact of transport infrastructure development on nature in the Carpathian countries". Danube Transnational Programme TRANSGREEN Project, The State Nature Conservancy of the Slovak Republic, Banská Bystrica.
- [53] VAN DER GRIFT E.A. et al. (2013), "Evaluating the effectiveness of road mitigation measures", *Biodiversity and Conservation*, 22, 425-448.
- [54] MOORE L.J., ARIETTA A.Z.A., SPENCER D.T., HUIJSER M.P., WALDER B.L., ABRA F.D. (2021), "On the road without a map: why we need an "Ethic of Road Ecology", *Frontiers of Ecological Evolution*, 9, 774286.