

Cambiamento climatico e vulnerabilità delle strade costiere: una valutazione applicata al caso di studio di Malta

**Lucia Rocchi¹, Anthony G. Rizzo², Luisa Paolotti¹, Antonio Boggia¹,
Maria Attard² ***

¹ *Department of Agricultural, Food and Environmental Sciences, University of Perugia, Italy*

² *Institute for Climate Change and Sustainable Development, University of Malta, Malta*

Introduzione

I trasporti svolgono un ruolo fondamentale nello sviluppo di ogni società moderna, poiché le infrastrutture di trasporto determinano la competitività dell'economia nazionale e migliorano la velocità e l'efficienza del progresso di un Paese (Skorobogatova e Kuzmina-Merlino, 2017). Una buona connettività fisica è essenziale per la crescita economica, ancora di più nel caso dei piccoli Stati insulari come Malta dove il sistema di trasporto è orientato alla modalità su gomma. Questo, unito alle piccole dimensioni delle isole, fa sì che il potenziale per lo sviluppo di altre modalità di trasporto sia scarso (Transport Malta, 2016).

Le infrastrutture stradali, in particolare quelle costiere, sono più vulnerabili agli impatti dei cambiamenti climatici, che devono essere affrontati dai pianificatori dei trasporti per garantire la resilienza. In questo studio le strade costiere sono state definite come strade di lunghezza pari o superiore a 100m, con un'altitudine inferiore o pari a 5m sul livello del mare e distanti 500m o meno dalla linea di costa. Usando questa definizione, le strade costiere coprono circa il 3% della rete maltese e l'8% di esse fa parte della rete di trasporto trans europea (TEN-T).

Gli impatti previsti dell'innalzamento del livello del mare e delle condizioni meteorologiche estreme, come inondazioni e mareggiate, interesseranno le strade costiere. Numerosi studi hanno dimostrato che i rischi derivanti dai cambiamenti climatici potrebbero interessare le aree costiere e quelle soggette a inondazioni, poiché si prevede un aumento della frequenza degli eventi meteorologici estremi. Attard (2015) ha evidenziato come oltre il 6% della rete principale di Malta sarà interessata dall'innalzamento del livello del mare come risultato di un aumento previsto di un metro del livello del mare, mentre il 10% delle arterie, il 6% dei distributori e il 7% delle strade rurali saranno soggette a inondazioni durante gli eventi di pioggia. Inoltre, con il continuo innalzamento del livello del mare, saranno necessari interventi più frequenti ed estesi di manutenzione delle strade costiere. In questo contesto, una

* Corresponding author: maria.attard@um.edu.mt

valutazione della vulnerabilità ai cambiamenti climatici delle strade costiere di Malta è necessaria sia come parte della politica di gestione e la resilienza ai cambiamenti climatici, sia come guida all'allocazione delle risorse per la preparazione di opzioni di adattamento.

Sulla base del quadro concettuale dell'IPCC per la vulnerabilità ai cambiamenti climatici, il presente lavoro propone una matrice di vulnerabilità con i corrispondenti indicatori di Esposizione, Sensibilità e Capacità di Adattamento basati sugli impatti dei cambiamenti climatici, ovvero l'innalzamento del livello del mare, le inondazioni e le ondate di calore, sulle strade costiere. Il modello della matrice di vulnerabilità viene poi utilizzato per classificare sei strade costiere in base alla loro vulnerabilità utilizzando COPRAS, un metodo multicriteriale.

Framework di valutazione e descrizione del caso di studio

La valutazione della vulnerabilità ai cambiamenti climatici delle strade costiere è un argomento complesso che attinge a basi di conoscenza multidisciplinari che includono le scienze naturali, fisiche, sociali e politiche (Kiker et al., 2005). In questo studio abbiamo fatto riferimento al quadro concettuale adottato dall'IPCC (2014), secondo cui la vulnerabilità di un sistema a qualsiasi scala riflette l'esposizione e la sensibilità di quel sistema a condizioni pericolose e l'abilità, la capacità o la resilienza del sistema di far fronte, adattarsi o riprendersi dagli effetti di tali condizioni. Questi aspetti si riflettono in:

1. L'esposizione al clima (E), che si riferisce a una vasta gamma di stimoli legati al clima, come l'innalzamento del livello del mare, le variazioni di temperatura, le variazioni delle precipitazioni, le ondate di calore, i forti temporali e la siccità.

2. La sensibilità (S), che è il grado in cui un sistema viene influenzato dalle perturbazioni.

3. La capacità di adattamento (AC), che è la capacità di un sistema di evolversi per adattarsi ai pericoli ambientali o ai cambiamenti delle politiche e di espandere la gamma di variabilità a cui può far fronte (Adger, 2006). Matematicamente, la vulnerabilità (V) è definita come segue: $V = \alpha E + \beta S + \gamma AC$ dove α , β , γ sono i pesi per E, S e AC, rispettivamente.

Gli indicatori chiave per quantificare, misurare e comunicare le informazioni rilevanti sull'esposizione, la sensibilità e l'adattamento ai cambiamenti climatici (Tabelle 1-3) sono stati identificati grazie ad un'ampia revisione della letteratura scientifica, tecnica, progettuale e locale, e sono stati utilizzati nella valutazione (Kim e Chung, 2013).

Tabella 1. Indicatori di Esposizione

| Codice | Indicatore | Significato | Fonte dati | UM | Riferimento |
|--------|-------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| E1 | Elevazione | L'elevazione come protezione: maggiore l'elevazione, minore l'esposizione. | Dati GIS STREETS, (ICCS) e 3D (LiDAR) | Elevazione in m | Kumar et al., 2010 |
| E2 | Vicinanza alla linea di costa | Le strade più vicine alla costa sono più esposte a inondazioni. | Dati GIS STREETS, (ICCS) | Distanza in m dal centro della strada | Özyurt e Ergin, 2009 |
| E3 | Posizione di corsi d'acqua | Le strade situate nei corsi d'acqua hanno maggiori probabilità di inondazioni. | Rilevazione diretta | Area stradale in un corso d'acqua | U.S. DOT VAST |

Le isole di Malta si trovano al centro del Mar Mediterraneo, avendo una superficie di soli 316 km² e una popolazione di poco più di 500.000 abitanti. Sono visitate da quasi 3 milioni di turisti all'anno (livelli pre-pandemia) e il turismo contribuisce ad oltre il 20% del PIL. Le isole hanno continuato a crescere economicamente dopo l'ingresso nell'Unione Europea nel 2004. Questa alta concentrazione di popolazione e di attività economiche si basa su un'infrastruttura di trasporto che dipende fortemente dal trasporto su strada. Il tasso di motorizzazione di Malta è infatti uno dei più alti in Europa. Questo studio concentra l'analisi su sei strade costiere che fanno parte della rete di trasporto trans europea (TEN-T).

Tabella 2. Indicatori di Sensibilità

| Codice | Indicatore | Significato | Fonte dati | UM | Riferimento |
|--------|------------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| S1 | Esperienza passata di inondazioni. | Le strade che in passato hanno subito inondazioni subiranno maggior impatto. | Times of Malta Digital Archive | Numero di eventi | Dawson et al., 2016 |
| S2 | Protezione contro inondazioni. | Le strade protette hanno meno probabilità di essere colpite dagli effetti climatici. | Rilevazione diretta | Si=1 No=0 | Azevedo de Almeida e Mostafavi, 2016 |
| S3 | Numero di autobus | Le strade costiere con più veicoli pesanti e autobus sono più sensibili a danni. | MPT Bus Route Map, Google Earth | Numero di autobus per settimana | U.S. DOT VAST |
| S4 | Ombreggiatura degli alberi | Gli alberi controllano le acque meteoriche e le temperature di aree stradali. | Rilevazione diretta | % di strada alberata | Akbari et al., 1997 |

Tabella 3. Indicatori di Capacità di adattamento

| Codice | Indicatore | Significato | Fonte dati | UM | Riferimento |
|--------|---|---|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| AC1 | Traffico giornaliero medio annuo (AADT) | Le strade con alto volume di traffico interessano più automobilisti e hanno più capacità di adattamento. | Transport Malta | Numero di veicoli al giorno | Jenelius e Mattsson, 2015 |
| AC2 | Numero di aziende interessate | Numero di aziende presenti sulla strada. Più alto è il numero, maggiore è l'impatto è la capacità di adattamento. | Rilevazione diretta | Numero di Attività | Lu e Peng, 2011 |
| AC3 | Costo di ricostruzione | Il costo di ricostruzione è direttamente proporzionale all'area della strada. | Rilevazione diretta | Area in m ² | U.S. DOT VAST |
| AC4 | Lunghezza della deviazione | La lunghezza indica la ridondanza della rete stradale. Più lunghe le strade con deviazioni maggiore è la capacità di adattamento. | Google Earth (Version 7.3.2, 2018) | Lunghezza in Km | Erath et al., 2008 |

Metodi multicriteriali e risultati COPRAS

Gli indicatori sopra descritti sono stati utilizzati al fine di classificare le strade identificate in termini di vulnerabilità attraverso il ricorso all'analisi multicriteriale (MCDA). Il metodo applicato è la Valutazione Proporzionale Complessa (Complex Proportional Assessment COPRAS) che presuppone una relazione diretta e proporzionale tra l'importanza delle varianti indagate su un sistema di criteri che descrivono adeguatamente le varianti decisionali e sui valori e pesi dei criteri (Zavadskas et al., 2008). Questo approccio classifica le alternative in base alla loro importanza relativa (peso): la classifica finale viene creata utilizzando le soluzioni ideali positive e negative.

Assumendo una matrice decisionale con m alternative e n criteri ($X = f_{ij}(A_i)_{m \times n}$), il metodo COPRAS si compone di cinque fasi:

Fase 1. Calcolo della matrice decisionale normalizzata: $r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$ dove $i = 1, 2, \dots, m$; and $j = 1, 2, \dots, n$;

Fase 2. Calcolare la matrice decisionale ponderata $W = (w_{ij})_{m \times n}$ dove $w_{ij} = w_j \cdot r_{ji}$ è il peso relativo del j -esimo indicatore e la somma dei valori normalizzati ponderati adimensionali di ciascun indicatore è sempre uguale al peso dell'indicatore.

Fase 3. Determinare le somme dei valori normalizzati ponderati, per i criteri di profitto e di costo, che nel nostro caso di studio sono i criteri che contribuiscono alla vulnerabilità e quelli che riducono o non contribuiscono alla vulnerabilità delle strade costiere, rispettivamente: $S_{+i} = \sum_{j=1}^k v_{ij}$ e $S_{-i} = \sum_{j=k+1}^n v_{ij}$. I valori di S_{+i} e di S_{-i} mostrano il livello di raggiungimento

dell'obiettivo per le alternative. Più alto è il valore di S_{+i} , più vulnerabile è la strada costiera e più basso è il valore di S_{-i} , meno vulnerabile è la strada costiera.

Fase 4. Calcolo della significatività relativa delle alternative $Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-min} \cdot \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-min} \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{S_{-min}}{S_{-i}}\right)}$

Fase 5. L'ordinamento finale viene realizzato sulla base dei valori di $U_i = \frac{Q_i}{Q_i^{max}} \cdot 100\%$

La pesatura è una fase essenziale nell'applicazione dei metodi MCDA. In questo lavoro, è stata utilizzato non un unico metodo ma una combinazione di diversi metodi definiti oggettivi, più precisamente il metodo basato sull'entropia informativa (Borouhaki, 2017), il metodo del coefficiente di variazione (El-Santawy e Ahmed, 2012), il peso medio (Diakoulaki et al., 1995), il metodo basato sulla deviazione standard (Diakoulaki et al., 1995) e la procedura statistica della varianza (Mohanty e Mahapatra, 2014). L'utilizzo congiunto di diversi metodi si basa su Zardari et al. (2015), i quali auspicano un uso non esclusivo di una singola tecnica di ponderazione. I diversi output dei vari metodi sono stati combinati insieme utilizzando il metodo dei coefficienti di correlazione (Aldian e Taylor, 2005).

I pesi degli indicatori aggregati possono essere ricavati utilizzando le seguenti equazioni: $c_d = (\sum_{i=1}^t e^{r_{di}}) - e^{r_{di}}$ e $w_d = \frac{c_d}{\sum_{i=1}^t c_i}$. Dove w_d rappresenta il peso derivato dalla tecnica d , mentre t è il numero di indicatori e r_{di} è il Coefficiente di correlazione tra la tecnica d e i .

I pesi aggregati sono determinati da: $w_{jc} = \sum_{d=1}^t w_d w_{jd}$, che rappresenta il peso dell'indicatore j -simo ottenuto con il metodo d .

Dopo aver normalizzato la matrice di vulnerabilità, si è passati alla ponderata e successivamente il valore di ogni criterio è stato calcolato separatamente in base all'effetto che ha sulla vulnerabilità ai cambiamenti climatici di una strada costiera. Il grado di vulnerabilità è stato calcolato per ognuna delle strade considerate. Quindi, la classifica finale delle strade costiere è stata ricavata sulla base dei valori di U_i , ponendo le strade costiere con il valore più alto di U_i nelle prime posizioni (Tabella 4).

Tabella 4. Classificazione della vulnerabilità ai cambiamenti climatici delle strade costiere con il metodo COPRAS

| Strade selezionate | S_i | R_i | Q_i | U_i | Classifica |
|---|--------|--------|--------|-------|------------|
| R1 <i>Triq il-Bajja is-Sabiha, Birzebbuga</i> | 0.0411 | 0.1027 | 0.1179 | 50.6 | 5 |
| R2 <i>Triq ix- Xatt, Sliema</i> | 0.1373 | 0.1115 | 0.2080 | 89.2 | 2 |
| R3 <i>Triq Marina, Pieta'</i> | 0.0760 | 0.1060 | 0.1505 | 64.6 | 4 |
| R4 <i>Triq il-Marfa, Mellieha</i> | 0.0334 | 0.1074 | 0.1069 | 45.9 | 6 |
| R5 <i>Xatt il-Pwales, St Paul's Bay</i> | 0.0898 | 0.0843 | 0.1835 | 78.7 | 3 |
| R6 <i>Xatt ta' San Gorg, St Julian's</i> | 0.0639 | 0.0467 | 0.2331 | 100.0 | 1 |

Conclusioni

È urgente valutare come gli impatti dei cambiamenti climatici influenzeranno le diverse aree. Nel caso di Malta la vulnerabilità è potenzialmente più elevata, soprattutto per le importanti infrastrutture stradali. Sono necessari strumenti per aumentare la conoscenza della loro vulnerabilità. Questo studio conferma l'utilità dei sistemi di supporto alle decisioni per indirizzare le politiche di prevenzione, protezione e recupero a livello territoriale. I sistemi di supporto alle decisioni possono essere utili per i decisori e l'MCDA si è rivelato un approccio adatto. Questo studio ha sviluppato un quadro di valutazione basato sul concetto di vulnerabilità dell'IPCC che ha permesso di classificare la vulnerabilità con MCDA e COPRAS di alcune strade costiere di Malta. Lo studio ha identificato tre strade più vulnerabili. La necessità di prevenire, mitigare e adattarsi sta diventando sempre più importante e molto probabilmente aumenterà più rapidamente con l'evolversi della crisi climatica. Le decisioni politiche, normative e operative devono essere attuate in modo più efficace e gli investimenti dovranno essere prioritari per concentrarsi sui punti critici.

Parole Chiave: cambiamento climatico, vulnerabilità, infrastruttura stradale, Malta, MCDA

Riferimenti bibliografici

- Adger, W. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16, 268-281.
- Akbari, H., Kurn, D., Bretz, S., Hanford, J. (1997). Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and Buildings*, 25, 139-148.
- Aldian, A., Taylor, M. (2005). A consistent method to determine flexible criteria weights for multicriteria transport project evaluation in developing countries. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 3948-3963.
- Attard, M. (2015). The impact of global environmental change on transport in Malta. *Xjenza Online*, 3, 141-152.
- Azevedo de Almeida, B., Mostafavi, A. (2016). Resilience of Infrastructure Systems to Sea-Level Rise in Coastal Areas: Impacts, Adaptation Measures and Implementation Challenges. *Sustainability*, 8, 1115.
- Borouhaki, S. (2017). Entropy-Based Weights for MultiCriteria Spatial Decision-Making. *Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers*, 79, 168-187.
- Dawson, D., Shaw, J., Roland Gehrels, W. (2016). Sea-level rise impacts on transport infrastructure: The notorious case of the coastal railway line at Dawlish, England. *Journal of Transport Geography*, 51, 97-109.
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., Papayannakis, L. (1995) Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. *Computers & Operations Research*, 22, 763- 770.
- El-Santawy, M., Ahmed, A. (2012). CV-VIKOR: A New Approach for Allocating Weights in Multi Criteria Decision Making Problems. *Life Science Journal*, 9, 5875-5877.
- Erath, A., Birdsall, J., Axhausen, K., Hajdin, R. (2008). Vulnerability Assessment of the Swiss Road Network.
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jenelius, E., Mattsson, L.G., (2015). Road network vulnerability analysis: Conceptualization, implementation and application. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, 136-147.
- Kiker, G., Bridges, T., Varghese, A., Seager, T., Linkov, I. (2005). Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 1, 95-108.
- Kim, Y., Chung, E. (2013). Assessing climate change vulnerability with group multi-criteria decision making approaches. *Climatic Change*, 121, 301-315.
- Kumar, T., Mahendra, R., Nayak, S., Radhakrishnan, K., Sahu, K. (2010). Coastal vulnerability assessment for Orissa State, east coast of India. *Journal of Coastal Research*, 26, 523-534.
- Lu, J.R., Peng, Q. Z. (2018). A station-based rail transit network vulnerability measure considering land use dependency. *Journal of Transport Geography*, 66, 10-18.
- Özyurt, G., Ergin, A. (2009). Application of sea level rise vulnerability assessment model to selected coastal areas of Turkey. *Journal of Coastal Research*, 56, 248-251.
- Skorobogatova, O., Kuzmina-Merlino, I. (2017). Transport infrastructure development performance. *Procedia Engineering*, 178.
- Transport Malta (2016). National Transport Strategy 2050. <https://www.transport.gov.mt/strategies/strategies-policies-actions/national-transport-strategy-and-transport-master-plan-1343>
- U.S. DOT VAST (Vulnerability Assessment Scoring Tool) <https://toolkit.climate.gov/tool/vulnerability-assessment-scoring-tool-vast>.
- Zardari N., Ahmed K., Shirazi S., Yusop Z. (2015). Literature Review. In: Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision-Making Model Outcomes in Water Resources Management. Springer.
- Zavadskas, E., Kaklauskas, A., Turskis, Z., Tamošaitiene, J. (2008). Selection of the effective dwelling house walls by applying attributes values determined at intervals. *Journal of Civil Engineering & Management*, 14, 85-93.