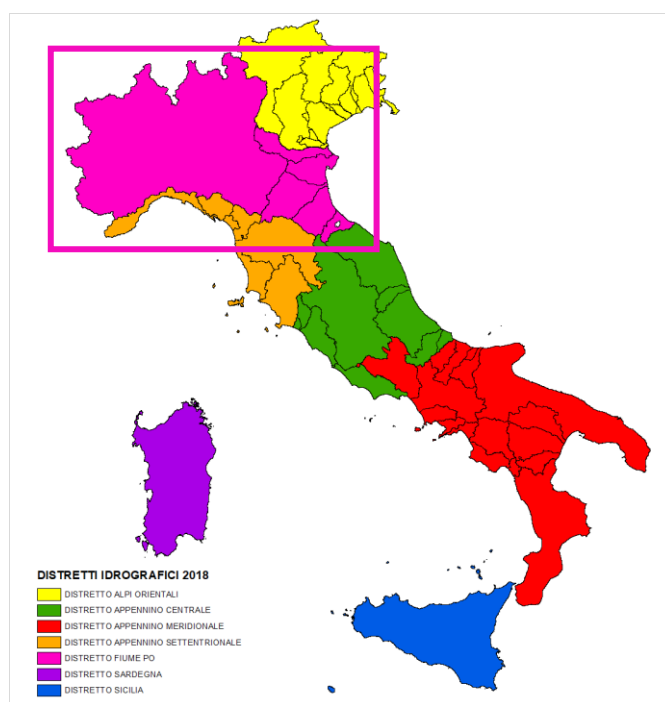


Aggiornamento e revisione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvione redatto ai sensi dell'art. 7 del D.Lgs. 49/2010 attuativo della Dir. 2007/60/CE – Il ciclo di gestione

Allegato 4.1

Relazione metodologica: MOdello per la Valutazione Integrata del Danno Alluvionale (MOVIDA)

Distretto del fiume Po



dicembre 2021

Sommario

1	Obiettivi e struttura del documento.....	2
2	La metodologia MOVIDA.....	2
2.1	Approccio metodologico.....	2
2.2	Fasi della valutazione del danno	4
2.2.1	Popolazione	5
2.2.2	Infrastrutture e strutture strategiche.....	6
2.2.3	Beni culturali e ambientali	14
2.2.4	Attività economiche.....	18
2.2.5	Impianti a rischio di inquinamento accidentale	32
3	Riferimenti bibliografici.....	33

1 Obiettivi e struttura del documento

Il presente documento illustra nel dettaglio la metodologia MOVIDA (Modello per la Valutazione Integrata del Danno Alluvionale), implementata nel PGR ai fini della valutazione del danno alluvionale a livello di singola APSFR. È importante sottolineare come la metodologia sia stata sviluppata proprio con l'obiettivo di soddisfare le esigenze di valutazione e pianificazione legate alla Direttiva Alluvioni, benché i risultati della sua applicazione possano essere di supporto all'analisi di altre tipologie di hazard rispetto a quello alluvionale, ovvero per i più diversi ambiti di mitigazione (es. per scopi di protezione civile). Nella prima parte del documento viene descritto l'approccio metodologico alla base di MOVIDA e vengono identificate le fasi necessarie alla valutazione del danno. Successivamente le metodologie sviluppate per le diverse categorie di elementi esposti vengono descritte in maniera distinta, fornendo un quadro teorico completo, mentre le linee guida dettagliate per la loro implementazione sono riportate all'interno del report descrittivo il sistema informativo ISYDE.

2 La metodologia MOVIDA

2.1 Approccio metodologico

Ai fini di supportare le necessità di valutazione e pianificazione legate alla Direttiva Alluvioni, la metodologia MOVIDA si basa su due punti fondamentali:

Valutazione per categoria di elementi esposti

La valutazione viene condotta in maniera distinta per categorie e sotto-categorie di elementi esposti, così come individuati nell'ambito della Direttiva Alluvioni quali:

- popolazione
- infrastrutture e strutture strategiche; a loro volta distinguibili in edifici strategici, strade e ferrovie
- beni culturali e ambientali
- attività economiche; inclusi gli edifici residenziali, le attività commerciali e industriali e le attività agricole
- impianti a rischio di inquinamento accidentale in caso di alluvione.

Questa scelta permette inoltre di includere nella metodologia le migliori conoscenze disponibili nell'ambito della modellazione del danno, non limitando l'intera analisi al livello conoscitivo minimo, comune alle varie categorie di elementi considerati. Coerentemente con lo stato dell'arte in merito alla modellazione del danno, il livello di analisi raggiunto varia quindi in ragione della categoria di elemento esposto. In particolare, il danno atteso viene valutato solo per alcune categorie di elementi, mentre per le altre la stima si limita al valore esposto ovvero al danno potenziale (i.e. massimo danno possibile in caso di perdita dell'intero bene). Inoltre, si possono identificare i seguenti livelli di analisi:

livello 1: i danni vengono valutati in termini **quantitativi**. A questo livello le valutazioni di danno permettono il confronto di scenari nell'ambito di analisi costi-benefici e/o multicriterio.

livello 2: i danni vengono valutati in termini di classi **qualitative** (es. basso, medio, alto). A questo livello le valutazioni di danno non permettono il confronto di scenari nell’ambito di analisi costi-benefici, ma possono rientrare in analisi multicriterio.

Un’ulteriore distinzione è infine necessaria tra le categorie di beni/danni per le quali è possibile una quantificazione in termini economici ed i beni intangibili, non associabili a valutazioni di tipo monetario.

La Tabella 1 mostra le diverse categorie di elementi esposti considerate nell’analisi e i livelli conoscitivi raggiungibili per ogni categoria attraverso la procedura MOVIDA.

LIVELLO DI ANALISI	danno potenziale (esposto)	danno atteso
qualitativo		strade e ferrovie beni culturali
quantitativo	popolazione ed. strategici attività ind./com. (€) sorgenti inq. beni ambientali	ed. residenziali (€) attività agr. (€)

Tabella 1: livello di analisi raggiungibile tramite la procedura MOVIDA in funzione della tipologia di elemento esposto. Il simbolo “€” indica le categorie per cui è possibile giungere ad una valutazione di tipo monetario

La scelta di lavorare per categoria di elementi esposti e quindi per diversi livelli di analisi garantisce infine un’ampia flessibilità di implementazione della metodologia, che può essere applicata, anche:

- in assenza di dati in merito ad una o più categorie
- in presenza di informazioni parziali sulla pericolosità, ovvero limitando l’analisi al solo valore esposto in assenza di informazioni sulla distribuzione spaziale dei tiranti all’interno dell’area allagabile

Valutazione per scenario di pericolosità

La valutazione del danno viene condotta in maniera distinta per ogni scenario di pericolosità significativo per l’area di indagine. In base alle prescrizioni della Direttiva Alluvioni, devono essere considerati almeno tre scenari, relativi rispettivamente a:

- scarsa probabilità di accadimento
- media probabilità di accadimento
- elevata probabilità di accadimento

La definizione di ogni scenario, in termini di tempo di ritorno, varia all'interno del Distretto Idrografico del fiume Po, in funzione del bacino idrografico considerato. Per maggiori informazioni è possibile consultare la documentazione relativa al PGRA e le schede monografiche delle singole APSFR.

2.2 Fasi della valutazione del danno

Le fasi necessarie alla valutazione del danno, per ogni categoria di elemento esposto, sono:

1) Identificazione dei dati alla base del processo di valutazione

È necessario identificare i set di dati disponibili per la definizione dello scenario di pericolosità, dello scenario di esposizione, nonché della distribuzione spaziale dei parametri di vulnerabilità utili all'implementazione del/i modello/i di danno. Per quanto riguarda la pericolosità, la fonte di dati principale è rappresentata dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. Nei paragrafi successivi sono indicati invece, per ogni categoria di elemento esposto, i dati di esposizione e vulnerabilità necessari all'implementazione della metodologia. Tali dati sono disponibili a livello di distretto, permettendo il confronto tra diverse aree e, laddove possibile, sono di natura "istituzionale".

2) Definizione della scala di analisi e della scala di restituzione dei risultati

La scala di analisi dovrebbe coincidere, teoricamente, con la scala di maggior dettaglio dei dati, al fine di utilizzare al meglio la conoscenza disponibile. Un ulteriore elemento di valutazione è tuttavia rappresentato dalla scala di applicazione dei modelli di danno disponibili per la categoria oggetto di valutazione. La scala di rappresentazione dipende invece dagli obiettivi dell'analisi. Ai fini dello sviluppo del PGRA, si ritiene appropriata una scala di rappresentazione dell'ordine di qualche km² per gli elementi areali (N.B. nell'implementazione di MOVIDA alle APSFR distrettuali i risultati sono forniti alla scala della sezione di censimento ISTAT) e una rappresentazione individuale per gli elementi lineari e puntuali.

3) Valutazione dell'esposto

Prima di procedere alla valutazione del danno, è necessario identificare lo scenario di esposizione (ovvero di danno potenziale) in termini fisici e laddove possibili monetari, incrociando lo scenario di pericolosità con i dati relativi a distribuzione spaziale, quantità e valore degli elementi esposti.

4) Valutazione del danno

La valutazione del danno deve basarsi su modelli calibrati e laddove possibile validati in contesti simili a quello di indagine. Il presente documento riporta, per ogni categoria di elemento esposto, i modelli inclusi in MOVIDA, identificati quali benchmark per il contesto del distretto. Come anticipato, in base alla tipologia di elementi esposti, tali modelli permettono una stima quantitativa (e laddove possibile monetaria) o qualitativa del danno atteso (o potenziale).

I paragrafi 2.2.1-2.2.5 spiegano dettagliatamente la metodologia sviluppata per ogni singola categoria di elemento esposto, con particolare riferimento alle prime quattro fasi sopra descritte. Ogni paragrafo termina

con una breve analisi critica della metodologia per evidenziare eventuali criticità e limiti dei metodi implementati.

2.2.1 Popolazione

Il danno viene valutato in termini di popolazione residente all'interno delle aree allagate (danno potenziale), andando a identificare anche le fasce più vulnerabili della popolazione quali bambini (under 10), anziani (over 65) e senzatetto.

1) Identificazione dei dati alla base del processo di valutazione

La valutazione della pericolosità, ovvero la definizione dell'area allagata per i diversi scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni, avviene a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. La caratterizzazione della popolazione residente esposta avviene a partire dai dati forniti dal censimento della popolazione e delle abitazioni condotto dall'ISTAT nel 2011, nell'ipotesi di distribuzione uniforme della popolazione all'interno della sezione di censimento. Tali dati forniscono, tra gli altri, il numero di residenti complessivo e suddivisi per classi di età, alla scala della sezione censuaria, e il numero dei senzatetto a livello comunale, concentrati spazialmente in una sezione censuaria fittizia all'interno del rispettivo territorio comunale.

2) Definizione della scala di analisi e della scala di restituzione dei risultati

Sia la valutazione del danno che la restituzione dei risultati avvengono alla scala della sezione di censimento ISTAT (meso-scala).

3) Valutazione dell'esposto

La quantificazione della popolazione residente esposta deriva dalla semplice intersezione spaziale tra il perimetro dell'area allagata e lo strato informativo relativo alle sezioni di censimento ISTAT, contenente i dati relativi alla popolazione. Una volta identificate le sezioni o le porzioni di sezione ricadenti nell'area allagata, si procede al calcolo della popolazione residente totale, dei bambini (residenti con età inferiore a 10 anni) e degli anziani (residenti con età superiore a 65 anni), alla scala della singola sezione di censimento. Nell'ipotesi di distribuzione uniforme della popolazione all'interno della sezione, il numero di residenti fornito da ISTAT viene ridotto proporzionalmente alla superficie allagata della sezione stessa:

$$\text{Popolazione residente totale} = \alpha \cdot P1$$

$$\text{Bambini residenti} = \alpha \cdot (P14 + P15)$$

$$\text{Anziani residenti} = \alpha \cdot (P27 + P28 + P29)$$

Dove α è il coefficiente di riduzione dato dal rapporto tra l'area allagata e l'area totale della sezione censuaria, mentre $P1$, $P14$, $P15$, $P27$, $P28$ e $P29$ sono i dati forniti dal censimento ISTAT relativamente alla popolazione residente totale ($P1$) e suddivisa per classi di età ($P14 = < 5$ anni; $P15 = 5 - 9$ anni; $P27 = 65 - 69$ anni; $P28 = 70 - 74$ anni; $P29 = > 74$ anni).

Per quanto riguarda le persone senzatetto, non essendo possibile definire una loro localizzazione sul territorio, viene semplicemente valutato il numero di senzatetto ricadenti nei comuni interessati dall'allagamento.

4) Valutazione del danno

Il danno viene valutato in termini potenziali e fisici come numero dei residenti esposti. Non è stato possibile, infatti, giungere ad una valutazione del danno atteso in caso di alluvione sulla base degli strumenti di modellazione e dei dati attualmente disponibili.

Analisi critica

La metodologia utilizza l'ultimo dato censuario disponibile a livello nazionale, relativo all'anno 2011. I risultati ottenuti dalla sua applicazione riflettono un quadro relativo all'anno del censimento. Conseguentemente, il risultato sulle categorie più vulnerabili è anche il meno affidabile; basti pensare che la fascia under dieci odierna non è evidentemente rappresentata nel censimento del 2011. Un altro limite della metodologia è costituito dall'ipotesi di popolazione distribuita uniformemente all'interno della sezione censuaria; tale ipotesi risulta essere problematica per sezioni di censimento molto estese che comprendono porzioni di territorio solo parzialmente abitate o allagate. Ad esempio, si pensi al caso di un allagamento che riguardi la porzione di sezione di censimento non abitata: in questo caso la procedura fornirà una popolazione esposta fittizia proporzionale alla porzione di sezione di censimento allagata. Infine, il risultato relativo alla popolazione senzatetto è solamente indicativo ed è in realtà riferito all'intero territorio comunale, nonostante nei risultati sia assegnato ad una specifica sezione di censimento.

2.2.2 Infrastrutture e strutture strategiche

2.2.2.1 STRADE E FERROVIE

Partendo dall'ipotesi (ragionevolmente sostenibile date le esperienze maturate in passato) che, in caso di alluvione, il danno fisico a strade e ferrovie si possa ritenere di minor rilevanza (oltre che di difficile valutazione, data la scarsità e la natura dei dati a disposizione) rispetto al danno funzionale legato alla percorribilità o meno delle tratte, è stata sviluppata una metodologia ad hoc per la valutazione in termini qualitativi (i.e., impatto nullo, modesto, medio, elevato) del danno funzionale alla rete. Seppur trattando separatamente le strade e le ferrovie, l'approccio individuato è analogo per le due infrastrutture e consiste nell'utilizzo di una matrice di danno ottenuta dalla combinazione di due ulteriori matrici che valutano: (i) la transitabilità della tratta (i.e., rallentamento o interruzione del transito a seconda del carico idraulico totale, o del tirante, e impatto sul traffico a seconda della tipologia di tratta) e (ii) la sua ridondanza, ovvero rilevanza dell'infrastruttura (i.e., presenza di alternative convenienti per raggiungere la destinazione). Una volta caratterizzate le singole tratte in termini di danno funzionale, viene quindi valutato l'impatto complessivo atteso sulle tratte all'interno dell'area allagata di una sezione di censimento, mediante una pesatura esperta delle tratte a diverso impatto.

1) Identificazione dei dati alla base del processo di valutazione

La valutazione della pericolosità, ovvero la definizione dell'area allagata e la distribuzione spaziale dei tiranti per i diversi scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni, avviene a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. La localizzazione e caratterizzazione delle tratte stradali e ferroviarie (in termini di tipologia delle tratte quali strade secondarie, strade primarie, autostrada, alta velocità, ecc.), avviene a partire dagli strati informativi di Open Street Map (OSM), poiché i database di carattere istituzionale disponibili sia a livello regionale che nazionale hanno una limitata copertura o non sono completi dal punto di vista degli attributi di interesse. La localizzazione delle sole stazioni ferroviarie avviene intersecando lo strato informativo di OSM con quello dell'edificato del Database Topografico Regionale, laddove sia specificata come categoria d'uso la presenza di strutture di servizio ferroviario per passeggeri (es. DBTR della Lombardia e del Piemonte).

2) Definizione della scala di analisi e della scala di restituzione dei risultati

La valutazione del danno avviene alla scala della singola tratta o stazione esposta (micro-scala). In seguito, viene valutato l'impatto complessivo atteso sulle tratte all'interno della porzione allagata di una sezione di censimento (meso-scala), mediante una pesatura esperta delle tratte a diverso impatto (vedi punto 4).

3) Valutazione dell'esposto

L'identificazione delle tratte e delle stazioni esposte deriva dalla semplice intersezione spaziale tra il perimetro dell'area allagata e gli strati informativi relativi a strade, ferrovie e stazioni ferroviarie. Dopodiché, ad ogni singola tratta ricadente in area allagata viene attribuito il tirante idrico medio a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA.

4) Valutazione del danno

L'approccio individuato per la valutazione qualitativa del danno funzionale alla rete (stradale e ferroviaria) impattata, consiste nell'utilizzo di una matrice di danno, data a sua volta dalla combinazione di due matrici che valutano: (i) l'impatto in termini di rallentamento o interruzione del transito veicolare e (ii) la capacità della rete di assicurare il raggiungimento della destinazione, a seconda della tipologia della tratta allagata (unicità dei servizi prestazionali offerti dalla tratta allagata). La matrice di danno è stata valutata in maniera distinta per strade e ferrovie sulla base della letteratura esistente e dell'esperienza sul tema maturata dal gruppo di lavoro che ha sviluppato MOVIDA. Per quanto riguarda le stazioni ferroviarie, si è scelto di assegnare il valore massimo di impatto a tutte le stazioni interessate dall'allagamento.

A. Valutazione del danno alla rete stradale

Lo schema sottostante (Figura 1) sintetizza la metodologia sviluppata per la valutazione qualitativa del danno funzionale alla rete stradale. Si assegna impatto nullo ai tratti stradali con tirante medio e velocità media pari a zero e ai tratti in quota (ponti/viadotti/cavalcavia), impatto massimo ai tratti più critici

(gallerie), mentre l’impatto sulle restanti tratte varia a seconda della pericolosità (carico totale o tirante) e della vulnerabilità (tipologia di strada) e viene valutato tramite la matrice di danno.

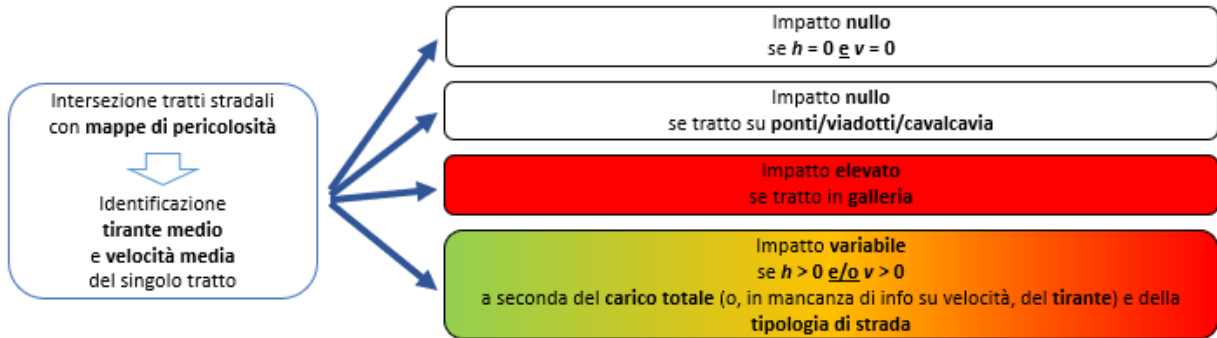


Figura 1: schematizzazione della metodologia per la valutazione del danno alla rete stradale

Come anticipato, la matrice di danno è definita dalla combinazione delle due seguenti matrici che valutano:

- i. Transitabilità della tratta stradale in seguito al rallentamento dei veicoli e/o all’interruzione del transito, a seconda della pericolosità idraulica e della tipologia di strada. La pericolosità idraulica viene valutata in termini di carico totale $h_e = h + v^2/2g$ (con h = tirante medio e v = velocità media della corrente nel tratto di strada allagato) o di tirante h (in mancanza di informazioni su v). L’impatto sulla transitabilità viene valutato in classi di gravità crescente da 1 a 3. Di seguito (Tabella 2) sono riportate le matrici di transitabilità in funzione del carico totale (1a) e del tirante (1b). Si nota la distinzione in due classi di pericolosità sulla base di una soglia pari a 0.3 m e 0.15 m, rispettivamente: la prima soglia corrisponde al valore di carico totale raccomandato come criterio di sicurezza per la transitabilità delle auto su strade allagate (Kramer et al., 2016), mentre 0.15 m è il tirante in corrispondenza del quale s’interrompe il transito delle auto di dimensioni ridotte (Pregnoletto et al., 2017).

	Classi di pericolosità	Altro	Strade di servizio e/o sterrate	Strade secondarie	Strade principali	Autostrade
1a	$0 < h_e < 0.3 \text{ m}$	1	1	1	2	2
	$h_e \geq 0.3 \text{ m}$	3	3	3	3	3
1b	$0 < h < 0.15 \text{ m}$	1	1	1	2	2
	$h \geq 0.15 \text{ m}$	3	3	3	3	3

Tabella 2: Matrice di transitabilità delle tratte stradali in funzione di carico totale (1a) o tirante (1b). Le classi di impatto corrispondono rispettivamente a: 1 = rallentamento con impatto modesto sul traffico, 2 = rallentamento con impatto significativo sul traffico, 3= interruzione del transito

- ii. Ridondanza della strada: valutazione qualitativa in merito alla presenza di alternative convenienti per raggiungere la destinazione, basata non su un reale grafo stradale ma su ipotesi di tempi di percorribilità/unicità delle tratte, a seconda della tipologia di strada. La valutazione

sulla possibilità di raggiungere una potenziale destinazione con efficienza di percorrenza viene valutata in classi di gravità crescente, da 1 a 3 (Matrice 2 - Tabella 3).

2	Altro	Strade di servizio e/o sterrate	Strade secondarie	Strade principali	Autostrade
	1	1	1	2	3

Tabella 3: Matrice di ridondanza delle tratte stradali. Le classi di impatto sono rappresentative di come il rallentamento dei veicoli o l'interruzione della strada si ritiene possano influenzare il transito: 1= influenza in maniera minima il raggiungimento della destinazione, 2= influenza significativamente il raggiungimento della destinazione (dilatazione tempi, allungamento percorso, ecc.), 3= nessuna alternativa conveniente per raggiungere la destinazione

Nel dettaglio, la matrice finale di danno si ottiene dalla media pesata delle matrici 1 (a o b) e 2, permettendo quindi di assegnare la classe di impatto (nullo, modesto, medio, elevato) alla singola tratta stradale, in funzione del valore del carico totale (o del tirante) e della tipologia di strada (Tabella 4).

Classi di pericolosità	Ponti	Altro (es. pedonali, ciclabili)	Strade di servizio e/o sterrate	Strade secondarie	Strade principali	Autostrade	Gallerie
$h = 0 \text{ m e } v = 0 \text{ m/s}$	NULLO	NULLO	NULLO	NULLO	NULLO	NULLO	NULLO
$0 < h_e \text{ (o } h) < \text{ soglia}$	NULLO	MODESTO	MODESTO	MODESTO	MEDIO	ELEVATO	ELEVATO
$h_e \text{ (o } h) \geq \text{ soglia}$	NULLO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ELEVATO	ELEVATO	ELEVATO

Tabella 4: Matrice di impatto per le tratte stradali

Dopo aver assegnato un impatto potenziale ad ogni tratta stradale esposta, viene quindi valutato l'impatto complessivo atteso nella porzione allagata delle singole sezioni di censimento, in termini di lunghezza equivalente delle strade a diverso impatto per unità di superficie (IUS = indicatore unico di impatto per le strade), secondo la formula:

$$IUS = \frac{L_{equivalente}}{A_{allagata}} = \frac{p_{elevato} \cdot L_{elevato} + p_{medio} \cdot L_{medio} + p_{modesto} \cdot L_{modesto}}{A_{allagata}}$$

Dove $A_{allagata}$ [km²] indica la superficie allagata della sezione di censimento considerata e $L_{equivalente}$ [km] la lunghezza equivalente delle strade impattate, derivante da una pesatura dei km di tratte ad impatto elevato ($L_{elevato}$), medio (L_{medio}) e modesto ($L_{modesto}$) presenti nella porzione allagata della sezione. I pesi assegnati alle diverse classi di impatto sono i seguenti: $p_{elevato} = 1$, $p_{medio} = 0.5$, $p_{modesto} = 0.25$.

B. Valutazione del danno alla rete ferroviaria

Lo schema sottostante sintetizza la metodologia sviluppata per la valutazione qualitativa del danno funzionale alla rete ferroviaria impattata. Si nota che, a differenza delle strade, per le ferrovie si distinguono due possibili scenari: nel primo, la linea ferroviaria è lambita dal fronte dell'allagamento e ciò può determinare il rallentamento dei treni e, nel caso di carichi o tiranti significativi, l'attivazione del servizio di monitoraggio per pericolo di erosione; il secondo scenario corrisponde al sormonto della linea con possibili danni al sistema di alimentazione, stabilità della massicciata e del rilevato compromessa e conseguente interruzione del transito. I tratti ferroviari allagati/sormontati sono quelli che intersecano la mappa dei tiranti, mentre si considerano lambiti i tratti che si trovano ad una distanza massima di 10 m dall'area allagabile ma senza intersecarla. Analogamente a quanto fatto per la rete stradale, si assegna: impatto nullo ai tratti con tirante medio e velocità media pari a zero e ai tratti su ponti/viadotti/cavalcavia, impatto massimo ai tratti in galleria e impatto variabile alle restanti tratte tramite la matrice di danno, che combina la pericolosità (carico totale o tirante) e la vulnerabilità (TAV/tratte ordinarie).

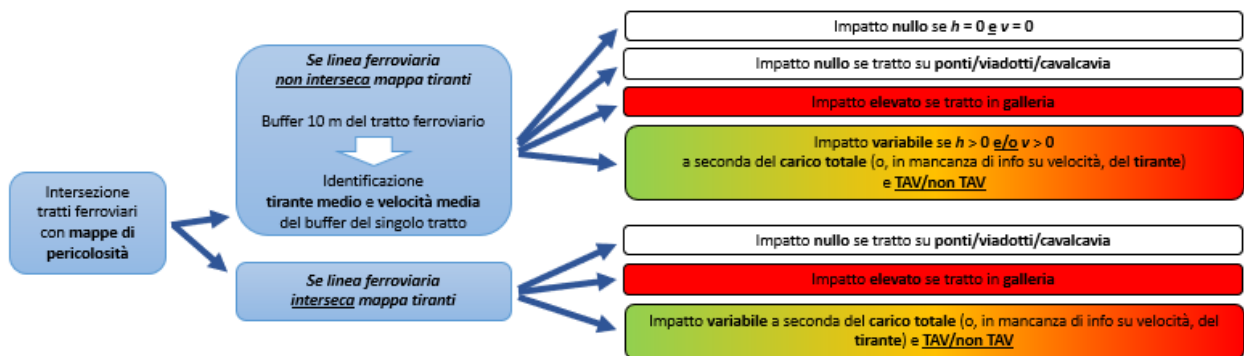


Figura 2: schematizzazione della metodologia per la valutazione del danno alla rete ferroviaria

La matrice di danno è data a sua volta dalla combinazione di due matrici che valutano:

- i. Transitabilità della linea ferroviaria, in seguito al rallentamento dei treni con o senza attivazione del servizio di monitoraggio (scenario 1) e/o interruzione del transito (scenario 2), a seconda della pericolosità idraulica e della tipologia di tratta (TAV/no TAV). La pericolosità idraulica viene valutata in termini di carico totale $h_e = h + v^2/2g$ (con h = tirante medio e v = velocità media della corrente nel buffer attorno al tratto ferroviario allagato -scenario 1- o sulla tratta -scenario 2-) o di tirante h (in mancanza di informazioni su v). L'impatto sulla transitabilità viene valutato in classi di gravità crescente da 1 a 5. Di seguito sono riportate le matrici di transitabilità (Tabella 6) in funzione del carico totale (1a) e del tirante (1b). Si nota che, per le tratte lambite dall'area allagata, vi è la distinzione in due classi di pericolosità a seconda di una soglia fissata di 0.2 m, valore derivante dalla letteratura con cui si indica il carico totale/tirante al piede della massicciata al di sopra del quale si possono avere danni alla struttura del rilevato e alla

massicciata stessa (Kellermann et al., 2015). Per le tratte ricadenti invece all'interno dell'area allagata viene utilizzata come discriminante una soglia di 0.1 m. Tale soglia tiene conto delle incertezze associate alle stime dei tiranti di allagamento e della situazione in cui, seppur la tratta intersechi le aree allagate, le rotaie si possano ragionevolmente considerare non sommerse (per queste ultime si è considerata infatti un'altezza variabile tra 140-170 mm).

1a	Classi di pericolosità	tratta ordinaria	TAV
	$0 < h_{e_buffer} < 0.2 \text{ m}$	1	2
	$h_{e_buffer} \geq 0.2 \text{ m}$	3	4
	$0 < h_{e_tratto} < 0.1 \text{ m}$	4	5
	$h_{e_tratto} > 0.1 \text{ m}$	5	5
1b	Classi di pericolosità	tratta ordinaria	TAV
	$0 < h_{buffer} < 0.2 \text{ m}$	1	2
	$h_{buffer} \geq 0.2 \text{ m}$	3	4
	$0 < h_{tratto} < 0.1 \text{ m}$	4	5
	$h_{tratto} > 0.1 \text{ m}$	5	5

Tabella 6: Matrice di transitabilità delle tratte stradali in funzione di carico totale (1a) o tirante (1b). Le classi di impatto corrispondono rispettivamente a: 1= linea non sormontata ma lambita dall'allagamento con tiranti modesti al piede della massicciata: rallentamento treni con impatto modesto sul traffico; 2= linea non sormontata ma lambita dall'allagamento con tiranti modesti al piede della massicciata: rallentamento treni con impatto significativo sul traffico; 3= linea non sormontata ma lambita dall'allagamento con tiranti significativi e rischio danneggiamento massicciata: rallentamento treni con attivazione del servizio di monitoraggio con impatto modesto sul traffico ; 4= linea sormontata con tiranti non significativi o linea non sormontata ma lambita dall'allagamento con tiranti significativi e conseguente rischio danneggiamento massicciata: rallentamento treni con attivazione del servizio di monitoraggio con impatto significativo sul traffico; 5= sormonto binari: interruzione del transito

- iii. Rilevanza della tratta: valutazione qualitativa, basata principalmente sulla classificazione della tipologia di linea ferroviaria (tratta ordinaria/TAV), del potenziale impatto sulla mobilità, disagio, allungamento dei tempi di percorrenza, nonché della complessità infrastrutturale della linea ferroviaria. La rilevanza viene valutata in classi di gravità crescente da 1 a 3 (Matrice 2 - Tabella 7).

2	tratta ordinaria	TAV
	1	3

Tabella 7: Matrice di rilevanza delle tratte ferroviarie. Le classi di impatto corrispondono rispettivamente a: 1=tratte meno significative, 3= tratte significative

Nel dettaglio, la matrice finale di danno risulta dalla media pesata delle matrici 1 (a o b) e 2, permettendo di assegnare la classe di impatto (nullo, modesto, medio, elevato) alla singola tratta ferroviaria in funzione del valore del carico totale (o del tirante) e della tipologia (Tabella 8).

Classi di pericolosità	Ponti	tratta ordinaria	TAV	Gallerie
$h = 0 \text{ m e } v = 0 \text{ m/s}$	NULLO	NULLO	NULLO	NULLO
$0 < h_{\text{buffer}} \text{ (o } h_{\text{buffer}}) < 0.2 \text{ m}$	NULLO	MODESTO	MEDIO	ELEVATO
$h_{\text{buffer}} \text{ (o } h_{\text{buffer}}) \geq 0.2 \text{ m}$	NULLO	MEDIO	ELEVATO	ELEVATO
$0 < h_{\text{tratta}} \text{ (o } h_{\text{tratta}}) < 0.1 \text{ m}$	NULLO	MEDIO	ELEVATO	ELEVATO
$h_{\text{tratta}} \text{ (o } h_{\text{tratta}}) \geq 0.1 \text{ m}$	NULLO	ELEVATO	ELEVATO	ELEVATO

Tabella 8: Matrice di impatto per le tratte ferroviarie

Dopo aver assegnato un impatto potenziale ad ogni tratta ferroviaria esposta, viene quindi valutato l'impatto complessivo atteso nella porzione allagata delle singole sezioni di censimento, in termini di lunghezza equivalente delle tratte a diverso impatto per unità di superficie (IUF = indicatore unico di impatto per le ferrovie), secondo la formula:

$$IUF = \frac{L_{\text{equivalente}}}{A_{\text{allagata}}} = \frac{p_{\text{elevato}} \cdot L_{\text{elevato}} + p_{\text{medio}} \cdot L_{\text{medio}} + p_{\text{modesto}} \cdot L_{\text{modesto}}}{A_{\text{allagata}}}$$

Dove A_{allagata} [km²] indica la superficie allagata della sezione di censimento considerata e $L_{\text{equivalente}}$ [km] la lunghezza equivalente delle ferrovie impattate, derivante da una pesatura dei km di tratte impatto elevato (L_{elevato}), medio (L_{medio}) e modesto (L_{modesto}) presenti nella porzione allagata della sezione. I pesi assegnati alle diverse classi di impatto sono i seguenti: $p_{\text{elevato}} = 1$, $p_{\text{medio}} = 0.5$, $p_{\text{modesto}} = 0.25$.

C. Valutazione del danno alle stazioni ferroviarie

Lo schema sottostante (Figura 3) sintetizza la metodologia sviluppata per la valutazione qualitativa del danno funzionale alle stazioni ferroviarie impattate. Si è scelto di assegnare la massima classe di impatto "ELEVATO" a tutte le stazioni ricadenti in area allagata.

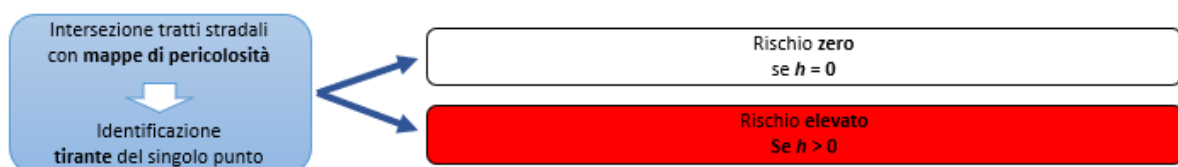


Figura 3: schematizzazione della metodologia per la valutazione del danno alle stazioni ferroviarie

Analisi critica

Per quanto riguarda la metodologia predisposta per la stima del danno funzionale alle infrastrutture stradali, le maggiori criticità si hanno con riferimento alle tratte in elevazione. Nei confronti di queste, infatti, non si tiene conto del rapporto tra il tirante idrico atteso e l'altezza dell'impalcato, dunque vengono escluse dal rischio, assegnando loro una categoria di impatto nullo, indipendentemente dalla stabilità dell'infrastruttura viaria interessata dall'allagamento. Tale semplificazione attiene anche al possibile impatto delle acque alluvionali sulla stabilità dell'infrastruttura stradale posta in quota. Lo stesso limite è presente anche nella metodologia implementata per le infrastrutture ferroviarie, la quale però risente anche di ulteriori limitazioni. A causa dello scarso contenuto informativo dei dati associati ad ogni linea ferroviaria, non è stato possibile fare valutazioni più approfondite sulla rilevanza della stessa, come ad esempio valutarne l'unicità nell'area di interesse (ogni tratta è considerata in maniera indipendente dalle eventuali linee parallele), o il suo sviluppo planimetrico (distinguendo ad esempio tratte di rilevanza regionale o interregionale, ecc.). Inoltre, come descritto nel paragrafo B, per le ferrovie vengono esaminate sia le tratte direttamente allagate che quelle lambite dall'area inondata. Ciò conduce ad una sottostima del risultato finale in quanto le tratte lambite (perché ricadenti vicino a zone allagate) che cadono su celle censuarie non allagate non concorrono alla stima complessiva delle lunghezze impattate.

Infine, per entrambe le infrastrutture, è stato possibile effettuare soltanto una stima qualitativa del danno, e non quantitativa. Non è stato possibile, ad esempio, calcolare il danno fisico alle infrastrutture in termini di costi di ricostruzione/ripristino data la difficoltà nel reperire adeguate informazioni sulla tipologia strutturale e sulle dimensioni dell'infrastruttura. Allo stesso modo, non è stato possibile eseguire una stima dei danni indiretti dovuti al rallentamento/interruzione del servizio di trasporto in relazione ai flussi di traffico (stradali e ferroviari) e dunque valutare l'impatto sul numero di persone/passeggeri colpiti dall'evento alluvionale.

2.2.2.2 EDIFICI STRATEGICI

Il danno viene valutato in termini potenziali e non monetari (numero di edifici esposti), distinguendo tra gli edifici che hanno funzione strategica per le finalità di protezione civile (edifici strategici) e quelli ospitanti fasce di popolazione vulnerabile (edifici sensibili). La scelta di non valutare il valore di questi beni (e il danno) in termini monetari deriva dalla considerazione che l'interesse verso di essi non è tanto legato al danno fisico che possono subire in caso di alluvione, quanto piuttosto alle conseguenze sistemiche del loro danneggiamento (es. difficoltà nella gestione dell'emergenza, esposizione di persone particolarmente vulnerabili).

1) Identificazione dei dati alla base del processo di valutazione

La valutazione della pericolosità, ovvero la definizione dell'area allagata per i diversi scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni, avviene a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. La caratterizzazione degli edifici avviene a partire da uno strato informativo unico, con tassonomia condivisa,

del patrimonio del distretto del Po, creato ad hoc a partire dai database nazionali e regionali disponibili, ovvero da fonti non istituzionali (Open Street map) laddove il dato istituzionale abbia una limitata copertura o non sia completo dal punto di vista degli attributi di interesse (si veda l'Allegato 1). La forte frammentazione dell'informazione sugli edifici strategici e sensibili, all'interno di molteplici database di natura eterogena tra loro, non permette infatti di definire una procedura di classificazione univoca a partire dal dato originale.

2) Definizione della scala di analisi e della scala di restituzione dei risultati

Sia la valutazione/classificazione che la restituzione dei risultati avvengono alla scala del singolo edificio esposto (micro-scala).

3) Valutazione dell'esposto

La quantificazione degli edifici esposti deriva dalla semplice intersezione spaziale tra il perimetro dell'area allagata e lo strato informativo relativo agli edifici strategici.

4) Valutazione del danno

Il danno viene valutato in termini potenziali e non monetari come numero e tipologia di edifici esposti. Non sono infatti disponibili in letteratura strumenti di modellazione per la valutazione dei danni sistemici in caso di alluvione.

Analisi critica

Le principali criticità sono connesse con la qualità dei dati di base originari considerati nella definizione del layer di esposizione degli edifici strategici e sensibili (Allegato 1). Infatti, l'estrema eterogeneità caratterizzante i dati disponibili nelle varie Regioni del Distretto, in termini di completezza e accuratezza, va a ripercuotersi direttamente sulla qualità dello strato informativo prodotto. In particolare, sono stati osservati: (i) problemi di georeferenziazione degli edifici; (ii) duplicazioni, con possibile sovrastima del conteggio degli edifici; (iii) mancanza di attributi che consentano di classificare gli edifici. L'integrazione tra fonti di natura diversa (istituzionali e non (i.e. Open Street Map)) e il ricorso a controlli incrociati a campione, ha permesso di limitare, seppur parzialmente, tali possibili fonti di errore. Rimane infine da sottolineare come, in virtù della natura tipologica dei beni considerata, ci si sia limitati alla mera identificazione dell'esposto, senza procedere ad una classificazione di maggiore o minore importanza dell'edificio strategico o sensibile individuato, né tanto meno si sia proceduto alla valutazione del danno sistemico subito e indotto da essi in caso di alluvione.

2.2.3 Beni culturali e ambientali

2.2.3.1 BENI CULTURALI

Il danno viene valutato in termini qualitativi (basso, moderato, elevato, molto elevato) in funzione della numerosità e delle caratteristiche dei beni presenti all'interno della singola sezione di censimento (porzione

allagata). Si è infatti scelto di non fornire una valutazione monetaria del danno ai beni culturali, il cui valore si estende ben oltre il danno fisico e non può essere valutato semplicemente in termini di costo di ricostruzione.

1) Identificazione dei dati alla base del processo di valutazione

La valutazione della pericolosità, ovvero la definizione dell'area allagata per i diversi scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni, avviene a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. L'operazione di caratterizzazione dei beni avviene a partire da uno strato informativo unico, con tassonomia condivisa, del patrimonio culturale del distretto del Po, creato ad hoc a partire dai database regionali e nazionali disponibili (si veda l'Allegato 2). Si sono infatti osservate diverse criticità, quali, ad esempio, una diversa classificazione regionale dei beni culturali, disomogeneità nel tipo di metadato e di attributo associato al bene, che non permettono un utilizzo diretto di questa fonte di dati

2) Definizione della scala di analisi e della scala di restituzione dei risultati

La valutazione del danno avviene alla scala del singolo bene esposto. In seguito, viene valutato l'impatto complessivo atteso nella porzione allagata delle singole sezioni di censimento, sulla base dei beni esposti, in termini di numero equivalente di beni culturali (vedi punto 4).

3) Valutazione dell'esposto

La quantificazione dei beni esposti deriva dalla semplice intersezione spaziale tra il perimetro dell'area allagata e lo strato informativo relativo ai beni culturali. Ciò consente anche di classificare i beni esposti per tipologia di costruito (es. architettura religiosa, monumento, museo, ecc.) e per livello di tutela (es. bene UNESCO, bene di importanza nazionale, bene di importanza regionale) rappresentativo del valore intangibile esposto. Le diverse classi tipologiche di bene (si veda Tabella 9) sono state identificate sulla base della consistenza dei meccanismi di danneggiamento (ovvero della loro vulnerabilità) e derivano dall'analisi della letteratura esistente e dall'esperienza sul tema maturata dal gruppo di lavoro che ha sviluppato MOVIDA. Nel dettaglio, si è assunto che le categorie più vulnerabili siano i musei, le architetture residenziali e religiose e le architetture fortificate, per l'elevato pregio artistico degli ambienti interni, degli elementi decorativi esterni e dei beni che contengono, e in considerazione dell'antichità degli edifici. Alle architetture industriali e rurali e ai monumenti (beni costruiti con materiali resistenti che più difficilmente subiscono danni gravi dalle alluvioni) è stato attribuito un valore di vulnerabilità moderata, mentre una vulnerabilità più bassa è stata riconosciuta ad infrastrutture (opere anche importanti, di norma interagenti con l'acqua e regolarmente monitorate) e aree archeologiche. Per gli spazi aperti (per cui il danno è legato alla permanenza o al passaggio dell'acqua) si è optato per un valore di vulnerabilità minimo.

4) Valutazione del danno

Ad ogni classe di bene, data dalla combinazione tra classe tipologica e livello di tutela, viene assegnato un impatto potenziale (w), sulla base di una matrice di danno derivante da analisi esperta e riportata Tabella 9.

MATRICE DI IMPATTO w_i			Valore intangibile esposto (tipo di tutela)		
			Mondiale	Nazionale	Locale
			40	2	1
Vulnerabilità	Architettura Religiosa e Rituale Architettura per la Residenza, Terziario, Servizi, Museo Architettura Fortificata	1	40	2	1
	Architettura industriale e Produttiva Architettura Rurale Monumento	0.5	20	1	0.5
	Area Archeologica Infrastrutture e Impianti	0.25	10	0.5	0.25
	Spazi Aperti	0.125	5	0.25	0.125

Tabella 9: matrice di impatto per i beni culturali

Viene quindi valutato l'impatto complessivo atteso nella porzione allagata delle singole sezioni di censimento, in termini di numero equivalente di beni culturali per unità di superficie (IUBC = indicatore unico di impatto per i beni culturali), secondo la formula:

$$IUBC = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i \cdot BC_i)}{A_{allagata}}$$

Dove i indica la classe considerata, BC_i indica il numero di beni nella classe i , w_i l'impatto corrispondente alla classe i , e $A_{allagata}$ la superficie allagata della sezione di censimento considerata.

Analisi critica

Le principali criticità emerse riguardano la qualità del database dei beni culturali esposti (Allegato 2) che, mettendo insieme numerose fonti esistenti, conserva gli errori del dato originale. Sono stati osservati (i) problemi di georeferenziazione; (ii) sovrapposizioni e duplicazioni (all'interno del database originario); (iii) mancanza di attributi che consentano di classificare la tipologia di bene. Il primo punto in particolare può avere ripercussioni sul valore di IUBC soprattutto per il dato nazionale che ha numerosità significativa e impatto superiore o uguale a 1. Si sottolinea inoltre come la metodologia non tenga conto in maniera quantitativa delle possibili opere d'arte contenuti in alcuni beni (musei o architetture religiose). Infine, è importante evidenziare come la definizione finale dei pesi riportati nella Tabella 9 richieda ulteriori confronti con i portatori di interesse ed esperti del settore.

2.2.3.2 BENI AMBIENTALI

Il danno viene valutato in termini potenziali e non monetari (numero di beni esposti), classificando i beni ambientali in funzione del servizio ecosistemico fornito: approvvigionamento, regolazione e conservazione, valore culturale.

1) Identificazione dei dati alla base del processo di valutazione

La valutazione della pericolosità, ovvero la definizione dell'area allagata per i diversi scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni, avviene a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. Anche in questo caso, l'operazione di caratterizzazione dei beni avviene a partire da uno strato informativo unico, con tassonomia condivisa, del patrimonio ambientale del distretto del Po, creato ad hoc a partire dai database nazionali e regionali disponibili (si veda l'Allegato 3). La frammentazione del dato sul patrimonio ambientale nazionale, all'interno di innumerevoli database di natura eterogena tra loro, non permette infatti di definire una procedura di classificazione univoca a partire dal dato originale.

2) Definizione della scala di analisi e della scala di restituzione dei risultati

Sia la valutazione/classificazione che la restituzione dei risultati avvengono alla scala del singolo bene esposto (micro-scala).

3) Valutazione dell'esposto

La quantificazione dei beni esposti deriva dalla semplice intersezione spaziale tra il perimetro dell'area allagata e lo strato informativo relativo ai beni ambientali. La realizzazione del database ad hoc per le aree protette (poligonale) include la classificazione dei beni esposti per tipologia di servizio ecosistemico fornito: approvvigionamento, regolazione e conservazione, valore culturale.

4) Valutazione del danno

Il danno viene valutato in termini potenziali e non monetari come numero e tipologia di beni esposti. Si è riscontrata infatti la mancanza in letteratura di strumenti di modellazione per la valutazione economica dei beni ambientali nonché per la valutazione del danno atteso in caso di alluvione, che si estende oltre il dato economico.

Analisi critica

La procedura non consente di determinare neppure in modo qualitativo il danno ai beni ambientali, in quanto non esistono ad oggi metodologie riconosciute per questo tipo di analisi, che necessitano di ricerca specifica. Tuttavia, la classificazione delle aree ambientali sulla base del servizio ecosistemico fornito consente di individuare e mappare il valore che queste aree rivestono per l'uomo, in ordine decrescente l'approvvigionamento, la regolazione e conservazione, il valore culturale. Si sottolinea, come per le aree di interesse ambientale sono possibili sovrapposizioni di funzione ecosistemica, ad esempio una stessa area può rivestire il ruolo di approvvigionamento e di conservazione (es. Zona di Ricarica della falda in un parco naturale regionale).

2.2.4 Attività economiche

2.2.4.1 EDIFICI RESIDENZIALI

Il danno atteso viene valutato in termini monetari, con riferimento alla sola struttura dell'edificio (non ai contenuti). A tal fine sono stati selezionati tre modelli, calibrati e validati per il contesto italiano, che permettono la stima del danno a partire dalla conoscenza del tirante idrico, del valore economico degli edifici e di alcune caratteristiche di vulnerabilità degli stessi: Carisi et al. (2018), Simple-INSYDE (Galliani et al., 2020), Arrighi et al. (2018 a, b). L'indicatore finale di danno, a livello di sezione di censimento, è quindi dato dal danno medio stimato dai tre modelli per unità di superficie allagata.

1) Identificazione dei dati alla base del processo di valutazione

La valutazione della pericolosità, ovvero la definizione dell'area allagata e la distribuzione spaziale dei tiranti per i diversi scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni, avviene a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. L'operazione di localizzazione e caratterizzazione dell'esposizione fisica degli edifici residenziali (destinazione d'uso, ingombro al suolo, numero di piani, ecc.) avviene a partire dai Database Topografici Regionali (DBTR) oppure, solo laddove non sia disponibile il DBTR, sulla base dei dati contenuti nel censimento della popolazione e delle abitazioni condotto dall'ISTAT nel 2011. Le caratteristiche di vulnerabilità degli edifici (tipologia strutturale, livello di manutenzione) sono derivate dai dati forniti dal censimento della popolazione e delle abitazioni dell'ISTAT del 2011, dal momento che tali informazioni non vengono specificate nei DBTR. L'esposizione degli edifici in termini monetari viene valutata sulla base dei costi di ricostruzione forniti dal CRESME (Centro di ricerche di mercato, servizi per chi opera nel mondo delle costruzioni e dell'edilizia).

2) Definizione della scala di analisi e della scala di restituzione dei risultati

La valutazione del danno avviene alla scala del singolo edificio esposto (micro-scala) oppure, solo laddove non sia disponibile il DBTR, alla scala della sezione di censimento ISTAT (meso-scala). In entrambi i casi, i risultati vengono restituiti e rappresentati alla scala della sezione di censimento.

3) Valutazione dell'esposto

L'identificazione degli edifici esposti deriva dalla semplice intersezione spaziale tra il perimetro dell'area allagata e lo strato informativo relativo agli edifici residenziali (layer vettoriale degli edifici del DBTR o layer delle sezioni censuarie ISTAT laddove non disponibile il dato alla micro-scala). Dopodiché, sulla base dei dati disponibili alla micro- o alla meso-scala, si procede alla caratterizzazione dell'esposizione fisica degli edifici residenziali andando a definire le seguenti caratteristiche: area in pianta, altezza e numero di piani dell'edificio. Ad ogni edificio residenziale del DBTR (o ad ogni sezione di censimento ISTAT, nel caso di analisi alla meso-scala), in area allagata, viene quindi attribuito il valore medio dei tiranti per poligono a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. In funzione del valore dell'altezza d'acqua, si calcola il numero di piani effettivamente allagati per ogni edificio (o per sezione censuaria), trascurando la

presenza di eventuali piani interrati o cantine per mancanza di informazioni a riguardo. Successivamente vengono valutate le caratteristiche che incidono maggiormente sulla vulnerabilità della struttura degli edifici, a partire dai dati ISTAT: tipologia strutturale (calcestruzzo armato, muratura, ecc.) e livello di manutenzione/stato di conservazione (ottimo, buono, mediocre, pessimo). Nello specifico, si considerano, per tutti gli edifici appartenenti a una sezione di censimento, la tipologia strutturale e il livello di manutenzione più frequenti all'interno della sezione stessa. L'esposizione degli edifici in termini monetari viene stimata sulla base dei costi di ricostruzione forniti dal CRESME relativi all'anno 2015 e aggiornati al 2020 tramite gli indici dei prezzi al consumo per le famiglie forniti dall'ISTAT, come riportato nella Tabella 10. I costi in tabella non tengono conto della tipologia di edificio (appartamento, villetta a schiera, ecc.), non essendo immediata ed unica la sua determinazione, ma vengono applicati costi di ricostruzione medi in base alla sola tipologia strutturale; nel caso la tipologia più frequente sia legno o altro materiale, in assenza di modelli specifici, si adottano, in via cautelativa, i valori relativi alla tipologia strutturale più vulnerabile considerata dai modelli di danno (muratura).

	Costo di ricostruzione medio - maggio 2015 [€/m ²]	Costo di ricostruzione medio - luglio 2020 [€/m ²]
c.a.	1513	1546
muratura	1226	1253

Tabella 10: Costi di ricostruzione medi per tipologia strutturale sulla base dei dati CRESME (2015), aggiornati al 2020 (costi calcolati come media dei costi di ricostruzione previsti per le diverse tipologie di edificio).

Viene quindi calcolato il valore economico E [€] del singolo edificio (o degli edifici all'interno della singola sezione di censimento) secondo la formula:

$$E = n \cdot A \cdot RV$$

Dove n indica il numero di piani allagati, A [m²] l'area in pianta dell'edificio (o degli edifici in caso di valutazione alla meso scala) e RV [€/m²] il costo di ricostruzione.

Nel caso di valutazione alla micro-scala, il valore economico dei singoli edifici viene poi aggregato a livello di sezione censuaria in modo da restituire i risultati ad una scala di rappresentazione appropriata ai fini dello sviluppo del PGRA.

4) Valutazione del danno

Il danno atteso viene valutato in termini monetari, con riferimento alla sola struttura dell'edificio (non ai contenuti), mediante un abaco di tre modelli che permettono la stima del danno a partire dalla conoscenza del tirante idrico, del valore economico degli edifici e di alcune caratteristiche di vulnerabilità degli stessi: Carisi et al. (2018), Simple-INSYDE (Galliani et al., 2020), Arrighi et al. (2018 a, b). I modelli sono stati scelti in quanto: (i) sono stati calibrati e validati per il contesto italiano, (ii) sono di facile implementazione poiché

non richiedono specifiche conoscenze informatiche o statistiche da parte dell'utilizzatore, (iii) richiedono variabili in ingresso disponibili a livello distrettuale/nazionale e reperibili in database accessibili e istituzionali. L'indicatore finale di danno per gli edifici residenziali è dato dal danno medio stimato dai tre modelli per unità di superficie allagata della sezione di censimento (€/km²).

A. Valutazione del danno tramite il modello Carisi et al.

Il modello di danno Carisi et al. (2018) è un modello alla micro-scala (ovvero alla scala del singolo edificio esposto), univariato, empirico che stima il danno alla parte strutturale degli edifici residenziali in termini relativi utilizzando come unica variabile il tirante in corrispondenza dell'edificio. Il modello è stato testato e calibrato insieme ad altri modelli univariati e bivariati (lineari, a radice quadrata, logaritmici) sui dati di danno post-evento di tre grandi eventi alluvionali italiani degli ultimi decenni: Secchia 2014, Bacchiglione 2010 e Adda 2002 (Carisi et al., 2018, Amadio et al., 2019). Nello specifico, il modello si basa sulla radice quadrata del tirante, considerando un'intercetta pari a 0 poiché la maggior parte degli edifici usati per la calibrazione non aveva piani interrati, secondo l'equazione:

$$d = 0.13h^{1/2}$$

Dove d [-] è il danno in termini relativi e h [m] il tirante idrico in corrispondenza dell'edificio.

Una volta applicato il modello, viene calcolato il danno assoluto D [€], moltiplicando il danno relativo d per il valore economico E del singolo edificio (o degli edifici all'interno della singola sezione di censimento):

$$D = E \cdot d$$

Analogamente a quanto fatto per l'esposto, nel caso di valutazione alla micro-scala, il danno economico sul singolo edificio viene aggregato a livello di sezione censuaria.

B. Valutazione del danno tramite il modello Simple-INSYDE

Il modello Simple-INSYDE (Galliani et al., 2020) è un modello multivariato sintetico che stima il danno alla parte strutturale degli edifici residenziali in termini relativi tenendo conto di molteplici variabili esplicative, legate sia alla pericolosità che alla vulnerabilità degli elementi esposti. Il modello è stato validato sui dati di danno post-evento di due eventi alluvionali: Bacchiglione 2010 e Adda 2002 (Dottori et al. 2016, Molinari et al. 2020). Il modello calcola il danno alla struttura dell'edificio come somma dei danni ai singoli piani esposti. Nello specifico, il danno complessivo alla struttura dell'edificio è dato dalla somma dei danni a quattro componenti distinte:

- Danno al seminterrato, $d_{basement}$: il seminterrato, se presente, è ipotizzato totalmente allagato in caso di alluvione; il danno ad esso riferito risulta quindi indipendente rispetto al tirante idrico.
- Danno al piano, d_{storey} : la funzione per il calcolo del danno al piano è valida per tutti i piani superiori al seminterrato; essa è l'unica componente di danno funzione del tirante idrico.

- Danno al pavimento, d_{floor} : componente costante di danno considerata in caso di altezza d'acqua superiore a zero e alto livello di finitura dell'edificio.
- Danno alla centrale termica, d_{boiler} : componente costante del danno presente in caso di seminterrato o di tiranti idrici superiore a 1.6 m, rispettivamente corrispondenti alla condizione di caldaia posizionata nel seminterrato o al piano.

Il modello Simple-INSYDE è composto infatti dalle seguenti funzioni di danno relativo d_x [-]:

$$d_{basement} = f(A_{basem})f(du) \rightarrow \begin{cases} f(A_{basem}) = 0.02 + \frac{0.35}{\sqrt{A_{basem}}} \\ f(du) = 1 + 0.3 \arctan(du - 36) \end{cases}$$

$$d_{storey} = f(h)f(A)f(LM, du)f(BS)f(FL)f(q) \rightarrow \begin{cases} f(h) = (0.17h - 0.02h^2) \\ f(A) = \left(0.2 + \frac{7}{\sqrt{A}}\right) \\ f(LM, du) = \begin{cases} 1 + 0.15 \cdot \arctan(du - 36) & \text{if LM low} \\ 0.8 + 0.2 \cdot \arctan(du - 36) & \text{if LM high} \end{cases} \\ f(BS) = \begin{cases} 1.35, & \text{if BS masonry} \\ 1, & \text{else} \end{cases} \\ f(FL) = \begin{cases} 1.5, & \text{if FL high} \\ 1, & \text{else} \end{cases} \\ f(q) = \begin{cases} 1.2, & \text{if } q = 1, \text{ presence of pollutants} \\ 1, & \text{else} \end{cases} \end{cases}$$

$$d_{floor} = f(h, FL) = \begin{cases} 0.04, & \text{if } h > 0 \text{ and FL high} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$d_{boiler} = f(A_{basem}, h) = \begin{cases} 0.015, & \text{if } A_{basem} \neq 0 \text{ or } A_{basem} = 0 \text{ and } h > 1.6 \text{ m} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

Dove h [m] è il tirante idrico in corrispondenza dell'edificio, du [ore] è la durata dell'allagamento, q è una variabile binaria che indica la presenza di inquinanti (1) o meno (0), A [m²] l'area del piano (area in pianta dell'edificio), A_{basem} [m²] l'area del piano seminterrato, LM il livello di manutenzione (alto o basso), BS la tipologia strutturale (muratura o calcestruzzo armato) e FL il livello di finitura (alto, medio o basso) dell'edificio.

Il danno assoluto totale D [€] viene quindi calcolato come prodotto del danno relativo alle singole componenti d_x [-] per il costo di ricostruzione RV [€/m²] e l'area in pianta A [m²] dell'edificio:

$$D = RV_{basem} \cdot A_{basem} \cdot d_{basement} + RV_{storey} \cdot A \cdot \left[\sum_{i=1}^n (d_{storey_i} + d_{floor_i}) + d_{boiler} \right]$$

Dove n è il numero di piani allagati dell'edificio.

Come sempre, nel caso di valutazione alla micro-scala, il danno economico sul singolo edificio viene aggregato a livello di sezione censuaria.

Nell'ambito della metodologia MOVIDA, il modello Simple-INSYDE è stato applicato come segue:

- La componente di danno $d_{basement}$ è stata posta pari a zero. Né il DBTR né i dati dell'ISTAT forniscono infatti informazioni riguardo la possibile presenza di seminterrati, piani interrati o cantine.
- L'unico parametro di pericolosità variabile risulta essere il tirante idrico, calcolato a partire dalle mappe di pericolosità. Per quanto riguarda gli altri parametri, ad ogni edificio (o sezione censuaria) sono stati attribuiti i valori di default del modello: $du = 24$ ore, $q = 1$.
- Ad ogni edificio (o sezione censuaria) è stato attribuito un livello di finitura FL medio come valore di default. Non è stato infatti possibile assegnare FL in funzione della tipologia di edificio, non essendo immediata ed unica la sua determinazione; i dati OMI, che forniscono la tipologia abitativa più frequente per ogni zona, sono infatti risultati incompleti in numerose aree test.
- Come anticipato al punto 3, ad ogni edificio (o sezione censuaria) è stato attribuito il livello di manutenzione LM più frequente all'interno della sezione di censimento, a partire dai dati ISTAT, secondo la seguente corrispondenza: $LM = alto$ per gli "Edifici ad uso residenziale con stato di conservazione ottimo/buono"; $LM = basso$ per gli "Edifici ad uso residenziale con stato di conservazione mediocre/pessimo".

C. Valutazione del danno tramite il modello Arrighi et al.

Il modello di danno Arrighi et al. (2018 a, b) è un modello univariato sintetico, calibrato e testato per la città di Firenze, che stima il danno alla parte strutturale degli edifici residenziali in termini relativi, utilizzando come unica variabile il tirante in corrispondenza degli edifici. Nello specifico, il modello comprende due curve di danno distinte a seconda che gli edifici residenziali siano dotati o meno della cantina (piano interrato). La curva sviluppata per gli edifici senza cantina fornisce il danno fisico percentuale d [%] in funzione del tirante idrico medio in corrispondenza dell'edificio h [m] considerando un piano (il piano terra). Tale curva è descritta dalle equazioni seguenti:

$$d = 0 \quad \text{se } h < 0.25 \text{ m (*)}$$

$$d = 52 \cdot h - 13 \quad \text{se } 0.25 \text{ m} \leq h \leq 1.5 \text{ m}$$

$$d = 17.5 \cdot h + 38.75 \quad \text{se } 1.5 \text{ m} < h \leq 3.5 \text{ m}$$

La curva sviluppata per gli edifici residenziali con cantina fornisce il danno percentuale in funzione del tirante idrico considerando il piano terra e quello interrato, ed è definita dalle equazioni seguenti:

$$d = 6 \quad \text{se } h < 0.25 \text{ m (*)}$$

$$d = 52 \cdot h - 7 \quad \text{se } 0.25 \text{ m} \leq h \leq 1.5 \text{ m}$$

$$d = 14.5 \cdot h + 49.25 \quad \text{se } 1.5 \text{ m} < h \leq 3.5 \text{ m}$$

La soglia di 0.25 m (*), in corrispondenza della quale si assume danno nullo (senza cantina) o pari al 6% (con cantina), tiene conto della quota del piano terra sul marciapiede stradale, nel primo caso, e dei possibili effetti di ristagno d'acqua nel seminterrato, nel secondo caso (Arrighi et al., 2013).

È importante sottolineare come le curve di danno arrivino al 100% in corrispondenza dell'altezza del piano terra (assunta pari a 3.5 m), quindi il valore dell'esposto a cui si applicano è quello del piano terra e, se presente, della cantina, non il valore dell'intero edificio.

Nel dettaglio, il danno assoluto D [€] per ogni piano viene calcolato moltiplicando il danno relativo d per il costo di ripristino C e l'area in pianta A del singolo edificio:

$$D = d \cdot A \cdot C$$

Il costo di ripristino C [€/m²] è assunto pari al costo sostenuto per ristrutturare un appartamento in pessime condizioni, pari a circa il 15-20% del valore di mercato, secondo il giudizio di esperti del mercato immobiliare di Firenze:

$$C = 0.15 \cdot (VAL_{ap} + VAL_b) \quad (\text{il } 20\% \text{ è applicato per le città d'arte come Firenze})$$

Il valore esposto di ogni appartamento (VAL_{ap}) è calcolato come il prodotto dell'area del piano (m²) per il valore di mercato (€/m²) fornito dall'OMI, considerando un livello di manutenzione medio. Il valore economico della cantina è assunto pari allo 0.25 % del valore del piano: $VAL_b = 0.25 \cdot VAL_{ap}$.

Nella metodologia MOVIDA, il costo di ripristino è stato invece calcolato a partire dal costo di ricostruzione RV [€/m²] dell'edificio, secondo la formula:

$$C = 0.65 \cdot RV$$

Questa scelta è motivata dal fatto che per il Distretto del Po il modello Arrighi et al. tende a sottostimare i danni a causa dei bassi valori di mercato (in media), rispetto al valore di mercato medio a Firenze (4100 €/m²), considerato per lo sviluppo del modello. Si è deciso quindi di calcolare il costo di ripristino rispetto al costo di ricostruzione perché ritenuto più veritiero e più stabile, piuttosto che rispetto ai valori di mercato OMI, che per di più sono risultati essere incompleti su molte aree. Il coefficiente 0.65 è stato calcolato facendo il rapporto tra il costo di ripristino a Firenze (820 €/m² = 0.20 * 4100 €/m²) e il costo di ricostruzione medio RV per la tipologia multi-appartamento (1247 €/m²).

Nel caso di valutazione alla micro-scala, il danno economico sul singolo edificio viene aggregato a livello di sezione censuaria.

Analisi critica

Considerando che la restituzione dei risultati avviene alla scala della sezione di censimento ISTAT (meso-scala), in alcuni casi si possono osservare valori di esposto elevati sebbene nell'area allagata, in particolare in aree di golena, non ci sia valore esposto oppure sia molto basso. Queste anomalie sono dovute al fatto che le sezioni censuarie nelle APSFR sono molto più estese dell'area allagata in prossimità dei corsi d'acqua.

Un'ulteriore criticità è legata alla qualità dei dati di input, ed in particolare allo strato informativo relativo all'uso degli edifici contenuto nei DBTR. Tale informazione è spesso carente o di scarsa qualità, con il risultato di attribuire erroneamente alla categoria residenziale anche edifici destinati ad altre attività. Da un controllo a campione effettuato mediante l'uso di mappe satellitari è risultato infatti che alcuni edifici molto piccoli o molto grandi, classificati come residenziali o generici nei DBTR, fossero in realtà edifici destinati ad altro uso quali garage o accessori nel primo caso, e attività industriali o sportive/ricreative nel secondo. Mentre è stato possibile filtrare gli edifici di piccole dimensioni ponendo una soglia di 30 m² al di sopra della quale un edificio possa essere considerato residenziale, ciò non è stato possibile nel caso di edifici di grandi dimensioni. In questo caso, i controlli a campione hanno infatti evidenziato come a parità di superficie un edificio possa essere adibito ad abitazione (condomini) o altre attività.

2.2.4.2 ATTIVITÀ COMMERCIALI E INDUSTRIALI

Il danno viene valutato in termini potenziali (i.e. massimo valore esposto) con riferimento sia alle strutture che ai contenuti (quali macchinari, attrezzi, ecc.) delle attività, secondo la procedura Flood-IMPAT (Molinari et al.,2016). Nel dettaglio, il valore economico delle attività si ottiene moltiplicando il numero di addetti in ogni sezione di censimento ISTAT per il capitale netto unitario (per addetto), derivato dai dati nazionali ISTAT. Questa operazione viene eseguita distintamente per le diverse sezioni ATECO che compongono il patrimonio industriale e commerciale (in particolare da B a N). L'indicatore finale di danno è quindi dato dal danno potenziale (valore esposto) per unità di superficie allagata nella singola sezione di censimento.

1) Identificazione dei dati alla base del processo di valutazione

La valutazione della pericolosità, ovvero la definizione dell'area allagata per i diversi scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni, avviene a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. L'operazione di localizzazione e caratterizzazione dell'esposizione fisica delle attività commerciali e industriali avviene sulla base dei dati contenuti nel censimento dell'industria e dei servizi condotto dall'ISTAT nel 2011, nell'ipotesi di distribuzione uniforme delle attività all'interno della sezione di censimento. Tali dati forniscono il numero di unità locali e di addetti delle attività, suddivise per sezioni ATECO, alla scala della sezione censuaria. Il capitale netto unitario, su cui si basa la stima del valore economico delle attività, è ricavato a partire dai seguenti database ISTAT: "Conti nazionali" (dati nazionali annuali sul capitale netto per tipologia di attività Ateco) e il Registro statistico delle imprese attive "ASIA" (dati nazionali annuali sul numero di unità locali e di addetti per tipologia di attività Ateco); in particolare, nella metodologia MOVIDA, si è fatto riferimento ai dati nazionali relativi al 2018.

2) Definizione della scala di analisi e della scala di restituzione dei risultati

Sia la valutazione del danno che la restituzione dei risultati avvengono alla scala della sezione di censimento ISTAT (meso-scala).

3) Valutazione dell'esposto

L'identificazione delle attività commerciali e industriali esposte deriva dalla semplice intersezione spaziale tra il perimetro dell'area allagata e lo strato informativo relativo alle sezioni di censimento ISTAT, contenente i dati relativi all'industria e ai servizi del 2011. Una volta identificate le sezioni o le porzioni di sezione ricadenti nell'area allagata, si procede al calcolo delle unità locali e degli addetti delle attività economiche, suddivise per gruppi ATECO, alla scala della singola sezione di censimento. Si sottolinea che in tale analisi vengono analizzate solamente le imprese, trascurando le istituzioni non profit e le istituzioni pubbliche (dai dati ISTAT - Censimento industria 2011, filtrare record con campo TIPO_SOGGETTO = 'IM'). Inoltre, le imprese sono state raggruppate per macro-settore di attività economica, ovvero sono state riclassificate in funzione della sezione ATECO (codifica: 1 lettera), invece che rispetto al gruppo ATECO riportato nei dati ISTAT (codifica: numero a 3 cifre), utilizzando la Tabella 11. Nello specifico, sono stati considerati solo i macro-settori da B a N, evidenziati in tabella.

Nell'ipotesi di distribuzione uniforme della attività all'interno della sezione, il numero di unità e addetti fornito da ISTAT viene ridotto proporzionalmente alla superficie allagata della sezione stessa:

$$Unità_i = \alpha \cdot NUM_UNITA_i$$

$$Addetti_i = \alpha \cdot ADDETTI_i$$

Dove α è il coefficiente di riduzione dato dal rapporto tra l'area allagata e l'area totale della sezione censuaria, i indica la sezione ATECO considerata (da B a N), mentre NUM_UNITA_i e $ADDETTI_i$ sono i dati forniti dal censimento ISTAT sul numero di unità locali e di lavoratori dipendenti delle imprese appartenenti alla sezione ATECO i , alla scala della sezione censuaria.

Le imprese in area allagata vengono quindi caratterizzate in termini monetari, distinguendo tra le strutture/gli edifici e i contenuti, sulla base dei dati nazionali ISTAT. Nello specifico, il valore economico delle imprese delle diverse sezioni ATECO viene valutato in termini di capitale netto, sempre alla scala della sezione di censimento. Tale valore è ottenuto come prodotto del numero di addetti presenti nella porzione allagata di ogni sezione di censimento per il capitale netto unitario (per addetto) derivato dai dati nazionali ISTAT, distinguendo il valore delle strutture da quello dei contenuti:

$$Capitale\ netto_strutture_i = Addetti_i \cdot Cu_{strutture,i}$$

$$Capitale\ netto_contenuti_i = Addetti_i \cdot Cu_{contenuti,i} \quad (i = B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N)$$

Dove $Addetti_i$, calcolato allo step precedente, è il numero di lavoratori dipendenti delle imprese appartenenti alla sezione ATECO i nella porzione allagata della sezione censuaria, mentre $Cu_{strutture,i}$ e $Cu_{contenuti,i}$ indicano il capitale netto unitario, rispettivamente, delle strutture e dei contenuti, per le imprese appartenenti alla sezione ATECO i . Il capitale netto è stato calcolato rispetto al numero di addetti perché ritenuta una proxy più significativa delle dimensioni economiche di un'attività rispetto al numero di unità locali.

Descrizione attività	Sezione ATECO	Gruppi ATECO inclusi (ISTAT - Censimento industria 2011)
agricoltura, silvicoltura e pesca	A	11-32
estrazione di minerali da cave e miniere	B	51-99
attività manifatturiere	C	101-332
fornitura di energia elettrica, gas, vapore e aria condizionata	D	351-353
fornitura di acqua reti fognarie, attività di gestione dei rifiuti e risanamento	E	360-390
costruzioni	F	411-439
commercio all'ingrosso e al dettaglio, riparazione di autoveicoli e motocicli	G	451-479
trasporto e magazzinaggio	H	491-532
attività dei servizi di alloggio e di ristorazione	I	551-563
servizi di informazione e comunicazione	J	581-639
attività finanziarie e assicurative	K	641-663
attività immobiliari	L	681-683
attività professionali, scientifiche e tecniche	M	691-750
noleggio, agenzie di viaggio, servizi di supporto alle imprese	N	771-829
amministrazione pubblica e difesa, assicurazione sociale obbligatoria	O	841-843
istruzione	P	851-856
sanità e assistenza sociale	Q	861-889
attività artistiche, sportive, di intrattenimento e divertimento	R	900-932
altre attività di servizi	S	941-960
attività di famiglie e convivenze come datori di lavoro per personale domestico, produzione di beni e servizi indifferenziati per uso proprio da parte di famiglie e convivenze	T	970-982
organizzazioni ed organismi extraterritoriali	U	990

Tabella 11: Classificazione delle attività economiche ATECO 2007 – aggiornamento 2021 (Fonte: ISTAT). Nella metodologia MOVIDA vengono considerate solamente le imprese delle sezioni ATECO evidenziate.

I valori unitari del capitale netto per le diverse sezioni ATECO, riportati nella Tabella 12, sono stati calcolati dividendo il valore del capitale netto delle strutture e dei contenuti, a livello nazionale (ISTAT - Conti nazionali, 2018), per il numero di addetti presenti in Italia (ISTAT – ASIA, 2018). Per strutture si intendono sia i fabbricati non residenziali che le abitazioni (voce prevalente per le attività immobiliari), mentre i contenuti includono: apparecchiature ICT, macchinari e altri impianti, mezzi di trasporto.

I risultati ottenuti per le diverse sezioni ATECO vengono infine sommati al fine di avere una valutazione complessiva del patrimonio industriale e commerciale esposto per sezione di censimento. L'indicatore finale di danno è quindi dato dal danno potenziale (valore esposto) totale per unità di superficie allagata della sezione di censimento considerata, distinguendo sempre tra strutture e contenuti (milioni €/km²):

$$\text{Indicatore_strutture} = \frac{(\sum_{i=B,\dots,N} \text{Capitale_netto_strutture}_i)}{A_{\text{allagata}}}$$

$$\text{Indicatore_contenuti} = \frac{(\sum_{i=B,\dots,N} \text{Capitale_netto_contenuti}_i)}{A_{\text{allagata}}}$$

Sezione ATECO	Capitale netto strutture [M€]	Capitale netto contenuti [M€]	Numero addetti	Cu_strutture [M€/addetti]	Cu_contenuti [M€/addetti]
B	26820.8	5511.8	21862	1.23	0.25
C	136039.3	285432.8	3722500	0.04	0.08
D	181523.3	26613.4	82041	2.21	0.32
E	26022.1	19571.8	202086	0.13	0.10
F	33839.0	23327.5	1303871	0.03	0.02
G	118164.2	60394.1	3435206	0.03	0.02
H	240568.1	80099.3	1125831	0.21	0.07
I	82948.4	14933.8	1564594	0.05	0.01
J	48176.4	24200.5	573258	0.08	0.04
K	93570.6	5153.4	542065	0.17	0.01
L	3134335.7	3833.9	297403	10.54	0.01
M	41192.4	12995.4	1321120	0.03	0.01
N	26471.5	38324.0	1383865	0.02	0.03

Tabella 12: Valori unitari del capitale netto (per addetto), diviso tra strutture e contenuti, per le attività appartenenti alle diverse sezioni ATECO considerate (B-N), calcolati sulla base dei dati nazionali ISTAT relativi al 2018.

4) Valutazione del danno

Il danno viene valutato in termini potenziali e monetari. Non è stato possibile, infatti, giungere ad una valutazione del danno atteso in caso di alluvione sulla base degli strumenti di modellazione e dei dati attualmente disponibili.

Analisi critica

La metodologia per il calcolo del valore esposto delle attività commerciali e industriali è soggetta ad alcune criticità legate a: (i) l'utilizzo di dati aggregati a livello nazionale e per macro-settori ATECO, (ii) il calcolo del numero di unità e addetti ricadenti nell'area allagata, (iii) la mancanza del calcolo del valore delle scorte all'interno del valore esposto. La prima criticità è legata all'utilizzo dello stock di capitale netto fornito dall'ISTAT per il calcolo del valore esposto. Tale dato viene fornito a livello nazionale e non è disponibile per unità territoriali minori quali le sezioni di censimento o le regioni, non risulta quindi specifico di un determinato territorio. In secondo luogo, il valore del capitale netto viene aggregato per macro-settori di imprese, rappresentati dalla prima lettera del codice ATECO, ma all'interno di uno stesso macro-settore ricadono imprese molto diverse tra loro. Per esempio, tale procedura non fa alcuna distinzione tra le attività di vendita al dettaglio e all'ingrosso ed assegna ad esse il medesimo valore di esposto, poiché tutte appartenenti alla classe ATECO G. La seconda criticità è legata al calcolo del numero di unità e di addetti in area allagata, per cui viene considerato che le imprese siano uniformemente distribuite all'interno di una stessa sezione di censimento. Tale ipotesi non è sempre rappresentativa della realtà. Le imprese potrebbero concentrarsi solo in determinate aree non ricadenti all'interno dell'area allagata. La terza criticità è legata alla mancanza di una metodologia per il calcolo del valore delle scorte. La procedura implementata assimila il valore esposto al valore del capitale netto, che non include materie prime, prodotti in corso di lavorazione, prodotti finiti e beni per la rivendita. Tuttavia, non sono disponibili in letteratura strumenti in grado di giungere ad una stima più accurata

2.2.4.3 COLTURE

Il danno atteso viene valutato in termini di diminuzione dei ricavi per l'azienda agricola tramite il modello AGRIDE-c (Molinari et al., 2019) per le colture mais, frumento, orzo, foraggio e riso. Il modello è stato scelto in quanto unico esempio di modellazione del danno alluvionale alle colture agricole nel contesto italiano. Per le altre colture si valuta invece il solo danno potenziale (massimo valore esposto), in termini di produzione lorda vendibile (PLV) data dal prodotto tra superficie agricola utilizzata, resa e prezzo unitari. Il modello è stato opportunamente adattato per un'applicazione alla scala di distretto. Nel dettaglio, si è proceduto, in primo luogo, ad una riclassificazione degli utilizzi agricoli comune per l'intero distretto, per superare la forte eterogeneità delle specie rappresentate per le diverse colture nelle banche dati regionali; quindi, alla definizione delle variabili di input del modello, a livello regionale, considerando i valori medi degli ultimi cinque anni (2015-2019) per le rese, i prezzi e i costi di produzione. Data la forte dipendenza del danno alle colture dalla stagione in cui l'evento si verifica, il danno alle colture viene valutato per i diversi mesi in cui storicamente si sono verificati con maggior frequenza eventi alluvionali. L'indice di danno è quindi dato dal massimo danno atteso per unità di superficie allagata ovvero dalla produzione lorda vendibile per unità di superficie allagata.

1) *Identificazione dei dati alla base del processo di valutazione*

La valutazione della pericolosità, ovvero la definizione dell'area allagata e la distribuzione spaziale dei tiranti per i diversi scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni, avviene a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. Le altre variabili di pericolosità da cui dipende fortemente il danno alle colture agricole, ovvero la stagione in cui si verifica l'alluvione e la durata dell'allagamento, sono derivate da un'analisi storica degli eventi alluvionali passati, a scala locale (ovvero per ogni APSFR). La valutazione dell'esposizione e della vulnerabilità delle colture, dal punto di vista fisico (tipologie colturali, superficie agricola utilizzata, ecc.), avviene a partire dai dati del catasto agricolo (informazione vettoriale sulle particelle catastali) e dalle dichiarazioni rese dagli agricoltori ai fini delle premialità PAC, disponibili a livello regionale. Il valore economico delle colture esposte viene valutato sulla base delle rese benchmark del SIAN (Sistema Informativo Agricolo Nazionale) e dei prezzi all'origine dell'ISMEA (Istituto di Servizi per il Mercato Agricolo Alimentare). La stima del danno atteso per le colture mais, frumento, orzo, foraggio e riso si basa su ulteriori dati economici: i contributi europei regionali fissati dai Programmi di Sviluppo Rurale (PSR) 2014-2020 delle Regioni e i costi medi delle lavorazioni colturali ricavati a partire dai tariffari dei contoterzisti disponibili per ogni regione.

2) *Definizione della scala di analisi e della scala di restituzione dei risultati*

La valutazione del danno avviene alla scala della particella catastale, ipotizzando che la sua superficie sia occupata interamente dalla coltura prevalente (meso-scala). Per uniformità con gli altri settori, i risultati vengono poi restituiti e rappresentati alla scala della sezione di censimento ISTAT.

3) Valutazione dell'esposto

L'identificazione delle colture esposte deriva dalla semplice intersezione spaziale tra il perimetro dell'area allagata e lo strato informativo relativo alle particelle catastali agricole. Si procede quindi alla valutazione dell'esposizione fisica sulla base delle dichiarazioni rese dagli agricoltori per le particelle ricadenti, completamente o parzialmente, nell'area allagata. Per ciascuna particella, si considera soltanto la coltura prevalente, ossia il dato d'uso presente nelle dichiarazioni con la maggiore superficie rispetto all'area catastale complessiva; in caso di parità in termini di superficie dichiarata (più utilizzi prevalenti per particella a causa della rotazione colturale), si è deciso di considerare la coltura di maggior pregio, ossia con PLV maggiore. Viene quindi calcolata la superficie della coltura prevalente all'interno di ogni particella catastale secondo la formula:

$$A = \alpha \cdot SAU$$

Dove α è il coefficiente di riduzione dato dal rapporto tra l'area allagata e l'area totale della particella, mentre SAU [ha] indica la Superficie Agricola Utilizzata complessiva nella particella.

Ad ogni particella catastale in area allagata viene quindi attribuito il valore medio dei tiranti per poligono a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA.

Per caratterizzare l'esposizione in termini monetari si è proceduto, in primo luogo, ad una riclassificazione degli utilizzi agricoli comune per l'intero distretto, per superare la forte eterogeneità dei dati d'uso presenti nelle dichiarazioni delle diverse regioni; quindi, alla definizione delle rese [q/ha] e dei prezzi [€/q] delle nuove classi colturali, a livello regionale, considerando i valori medi sul quinquennio 2015-2019 (si veda l'Allegato V). Viene quindi calcolato il valore economico delle colture in termini di produzione lorda vendibile, per particella catastale:

$$E = PLV = A \cdot resa \cdot prezzo$$

I risultati ottenuti per ogni particella catastale vengono infine aggregati alla scala della sezione di censimento ISTAT, calcolando la media pesata tra i danni potenziali (valori esposti) delle particelle ricadenti nella porzione allagata di una sezione censuaria; dove il peso non è altro che la superficie occupata da ciascuna particella all'interno dell'area allagata della sezione censuaria.

4) Valutazione del danno

Il danno atteso viene valutato in termini di diminuzione dei ricavi per l'azienda agricola tramite il modello AGRIDE-c (Molinari et al., 2019) per le colture mais, frumento, orzo, foraggio e riso. Per le altre colture si valuta invece il solo danno potenziale (massimo valore esposto), in termini di PLV.

Il modello di danno è stato opportunamente adattato per un'applicazione alla scala di distretto. Come le rese e i prezzi delle colture, anche le restanti variabili economiche di input del modello sono state definite a livello regionale; nel dettaglio, i costi di produzione [€/ha], considerando i valori medi sul quinquennio 2015-2019,

e i contributi europei stabiliti dai PSR 2014-2020 delle Regioni. Sulla base dei dati medi regionali (rese, prezzi, costi, contributi) sono stati quindi derivati i modelli di danno per mais, frumento, orzo, foraggio e riso, specifici per ognuna delle principali regioni del Distretto (Lombardia, Emilia-Romagna, Piemonte, Veneto, Valle d'Aosta). La Figura 4 mostra, a titolo esemplificativo, il modello AGRIDE-c sviluppato per valutare il danno al mais in Lombardia, in caso di lavorazione tradizionale del suolo. Per tutti gli altri modelli si veda l'Allegato V. I modelli sviluppati permettono di stimare il danno economico per unità di superficie (€/ha) alla coltura considerata sulla base di: tirante idrico (cm), durata dell'allagamento (giorni), periodo di occorrenza dell'evento (mese/stadio vegetativo coltura), tipologia di lavorazione del suolo (tradizionale o minima) e strategia di mitigazione del danno adottata dall'agricoltore a seguito dell'alluvione (proseguimento, risemina, abbandono della produzione). Il danno stimato per l'agricoltore che adotta la minima lavorazione risulta essere decisamente inferiore sia per i costi di produzione inferiori sia per l'elevato contributo europeo fissato per le tecniche di lavorazione ridotta (minima lavorazione, semina diretta), tuttavia la maggior parte degli agricoltori segue ancora la preparazione tradizionale del terreno; nella metodologia MOVIDA, si è deciso di considerare la tecnica adottata più frequentemente a livello regionale, per ogni coltura. La scelta della strategia di proseguimento dell'itinerario colturale incide invece sulla produzione finale e sui costi sostenuti dall'azienda in caso alluvione (es. costi aggiuntivi in caso di risemina, costi risparmiati in caso di abbandono ma nessun ricavo); a questo proposito, in MOVIDA, per ogni scenario alluvionale, viene considerata la strategia di mitigazione più conveniente per l'agricoltore. Per quanto riguarda le variabili di pericolosità, si sottolinea che, data la forte dipendenza del danno alle colture dalla stagione in cui l'evento si verifica (perché cambiano gli stadi vegetativi della pianta e i costi sostenuti dall'azienda fino a quel momento), in MOVIDA il danno viene valutato per i diversi mesi in cui storicamente si sono verificati con maggior frequenza eventi alluvionali.

Water depth < 130 cm		Strategy	Flood duration [days]										
			<5	5	6	7	8	9	10	11	>11		
Bare field	Jan	c	500										
		r	-										
		a	-										
	Feb	c	500										
		r	-										
		a	-										
	Mar	c	500										
		r	-										
		a	-										
Initial phase	Apr	c	-										
		r	1076										
		a	1703										
May	c	-											
	r	1076											
	a	1703											
Growing	Jun	c	500	811	1121	1432	1742	2053	2363	2674	-		
		r	1076										
		a	2091										
	Jul	c	500	1121	1742	2363							-
		r	-										
		a	2146										
	Aug	c	500	1121	1742	2363							-
		r	-										
		a	2146										
Maturation	Sep	c	500										
		r	-										
		a	-										
	Oct	c	500										
		r	-										
		a	-										
	Nov	c	500										
		r	-										
		a	-										
Dec	c	500											
	r	-											
	a	-											

Water depth ≥ 130 cm		Strategy	Flood duration [days]										
			<5	5	6	7	8	9	10	11	>11		
Bare field	Jan	c	500										
		r	-										
		a	-										
	Feb	c	500										
		r	-										
		a	-										
	Mar	c	500										
		r	-										
		a	-										
Initial phase	Apr	c	-										
		r	1076										
		a	1703										
May	c	-											
	r	1076											
	a	1703											
Growing	Jun	c	500	811	1121	1432	1742	2053	2363	2674	-		
		r	1076										
		a	2091										
	Jul	c	500	1121	1742	2363							-
		r	-										
		a	2146										
	Aug	c	500	1121	1742	2363							-
		r	-										
		a	2146										
Maturation	Sep	c	500										
		r	-										
		a	-										
	Oct	c	500										
		r	-										
		a	-										
	Nov	c	500										
		r	-										
		a	-										
Dec	c	500											
	r	-											
	a	-											

Figura 4: Modello di danno AGRIDE-c sviluppato per la Lombardia per stimare il danno economico unitario (€/ha) al mais, in caso di lavorazione tradizionale del suolo.

Per applicare il modello AGRIDE-c, bisogna quindi attribuire ad ogni particella catastale le variabili di pericolosità mancanti per la stima del danno (durata e mese/i di occorrenza dell'evento) e stabilire la tipologia di lavorazione del suolo più frequente per le diverse colture nella regione analizzata. Dopodiché, ad ogni particella viene attribuito il danno economico unitario d [€/ha] tramite il modello regionale di danno specifico per ogni coltura (Allegato V). Il danno economico atteso alle colture D [€], per particella catastale, è calcolato quindi come prodotto del danno unitario per la superficie della coltura prevalente:

$$D = d \cdot A$$

Come per il valore esposto, i risultati ottenuti per ogni particella catastale vengono infine aggregati alla scala della sezione di censimento ISTAT, calcolando la media pesata tra i danni attesi sulle particelle ricadenti nella porzione allagata di una sezione censuaria; dove il peso non è altro che la superficie occupata da ciascuna particella all'interno dell'area allagata della sezione censuaria.

L'indice di danno è quindi dato dal massimo danno atteso per unità di superficie allagata (per le colture mais, frumento, orzo, foraggio, riso) ovvero dalla produzione lorda vendibile per unità di superficie allagata (per tutte le altre colture).

Analisi critica

Una prima criticità è legata alla qualità dei dati di input alla metodologia. Nel dettaglio, si osserva come nelle dichiarazioni rese dagli agricoltori, in alcuni casi, non venga dettagliato l'uso della particella (uso di classi generiche quali, ad esempio, "seminativi" o "altre colture"), per cui risulta impossibile calcolare il corrispondente valore di PLV; si ritiene comunque che il dato implementato all'interno di MOVIDA sia il migliore a disposizione. Una seconda criticità è legata alla regionalizzazione del modello. I valori assunti, regione per regione, in merito a rese, prezzi e costi di lavorazione delle diverse colture derivano da una media dei dati regionali, ciò impedisce di cogliere significative specificità locali; l'uso di valori medi risulta in ogni caso una scelta inevitabile quando si voglia lavorare alla scala di distretto. Infine, si vuole sottolineare come la disponibilità di un modello di danno solo per alcune tipologie di seminativi, riso e foraggio, non consenta di valutare l'impatto di eventuali eventi alluvionali su tipologie culturali meno presenti in termini di estensione ma con un significativo impatto in termini di PLV quali le orticole.

2.2.4.4 ALLEVAMENTI

Il danno potenziale viene valutato in termini di consistenza degli allevamenti (esposizione fisica), distinti per tipologia: avicoli, bovini-bufalini, suini, ovicaprini.

1) Identificazione dei dati alla base del processo di valutazione

La valutazione della pericolosità, ovvero la definizione dell'area allagata per i diversi scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni, avviene a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. La

caratterizzazione degli allevamenti avviene a partire dalla Banca Dati Nazionale dell'Anagrafe Zootecnica, dati tabellari alla scala della singola azienda agricola.

2) Definizione della scala di analisi e della scala di restituzione dei risultati

Sia la valutazione del danno che la restituzione dei risultati avvengono alla scala del singolo allevamento esposto (micro-scala).

3) Valutazione dell'esposto

L'identificazione degli allevamenti esposti deriva dalla semplice intersezione spaziale tra il perimetro dell'area allagata e lo strato informativo relativo all'anagrafe zootecnica (layer vettoriale puntuale creato sulla base delle coordinate geografiche riportate nei file tabellari della Banca Dati Nazionale dell'Anagrafe Zootecnica). L'esposizione fisica viene valutata in termini di consistenza (numero di capi) degli allevamenti in area allagata, distinti per tipologia: avicoli, bovini-bufalini, suini, ovicaprini.

4) Valutazione del danno

Il danno viene valutato in termini potenziali e non monetari come numero e tipologia di allevamenti esposti. Non sono infatti disponibili in letteratura strumenti di modellazione per la valutazione economica del bestiame, nonché del danno atteso in caso di alluvione.

Analisi critica

La procedura non consente di giungere ad una stima del danno data la scarsa disponibilità di dati e studi in letteratura.

2.2.5 Impianti a rischio di inquinamento accidentale

Il danno viene valutato in termini potenziali e non monetari (numero di impianti esposti). Il danno dovuto all'allagamento di sorgenti di inquinamento accidentale è infatti soprattutto legato alle dinamiche di potenziale contaminazione delle aree limitrofe, non ancora analizzabili a scala di bacino idrografico, ma alla sola scala locale (di singolo impianto). Pertanto, non è stato possibile definire un indicatore di danno robusto.

1) Identificazione dei dati alla base del processo di valutazione

La valutazione della pericolosità, ovvero la definizione dell'area allagata per i diversi scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni, avviene a partire dalle mappe di pericolosità prodotte nell'ambito del PGRA. La caratterizzazione delle sorgenti inquinanti presenti all'interno dell'area allagata avviene a partire da uno strato informativo unico, con tassonomia condivisa, del patrimonio del distretto del Po, creato ad hoc a partire dai database nazionali e regionali disponibili (si veda l'Allegato 4). Si è infatti osservata una forte frammentazione del dato all'interno di molteplici database di natura eterogenea tra loro.

2) Definizione della scala di analisi e della scala di restituzione dei risultati

Sia la valutazione/classificazione che la restituzione dei risultati avvengono alla scala del singolo impianto (micro-scala).

3) Valutazione dell'esposto

La quantificazione degli impianti esposti deriva dalla semplice intersezione spaziale tra il perimetro dell'area allagata e lo strato informativo relativo alle potenziali sorgenti inquinanti. Ciò consente anche di classificare le sorgenti in funzione delle sostanze trattate al loro interno e/o in base ai riferimenti normativi che individuano quell'impianto come pericoloso.

4) Valutazione del danno

Il danno viene valutato in termini potenziali e non monetari come numero e tipologia di beni esposti. Non sono stati riscontrati infatti, in letterature, strumenti per la valutazione delle dinamiche di potenziale contaminazione delle aree limitrofe, applicabili a scala di distretto.

Analisi critica

La procedura non consente di giungere ad una stima del danno, fortemente dipendente dalla tipologia di impianto, dalla probabilità di rilascio di sostanze indesiderate nelle matrici ambientali e dalle condizioni idrodinamiche e di permeabilità dei suoli in prossimità degli impianti. La localizzazione degli impianti del database è comunque considerata buona.

3 Riferimenti bibliografici

Amadio, M., Scorzini, A. R., Carisi, F., Essenfelder, A. H., Domeneghetti, A., Mysiak, J., and Castellarin, A.: Testing empirical and synthetic flood damage models: the case of Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 661–678, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-661-2019>, 2019.

Arrighi, C., Brugioni, M., Castelli, F., Franceschini, S., and Mazzanti, B.: Flood risk assessment in art cities: the exemplary case of Florence (Italy), *J. Flood Risk Manage.*, 11, 616–631, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12226>, 2018a.

Arrighi, C., Rossi, L., Trasforini, E., Rudari, R., Ferraris, L., Brugioni, M., Franceschini, S., and Castelli, F.: Quantification of flood risk mitigation benefits: A building-scale damage assessment through the RASOR platform, *J. Environ. Manage.*, 207, 92–104, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.017>, 2018b

Carisi, F., Schröter, K., Domeneghetti, A., Kreibich, H., and Castellarin, A.: Development and assessment of uni- and multivariable flood loss models for Emilia-Romagna (Italy), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 2057–2079, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2057-2018>, 2018.

Dottori, F., Figueiredo, R., Martina, M. L. V., Molinari, D., and Scorzini, A. R.: INSYDE: a synthetic, probabilistic flood damage model based on explicit cost analysis, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 2577–2591, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2577-2016>, 2016.

Galliani M., Molinari D., Ballio F., Brief communication: simple-INSYDE, development of a new tool for flood damage evaluation from an existing synthetic model, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 2937–2941, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2937-2020>, 2020

Kellermann P., Schöbel A., Kundela G., Thieken A.H., Estimating flood damage to railway infrastructure – the case study of the March River flood in 2006 at the Austrian Northern Railway, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 2485–2496, 2015

Kramer M., Terheiden K., Wieprecht S., Safety criteria for the trafficability of inundated roads in urban floodings, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 17, 77-84, 2016

Molinari, D., Minucci, G., Mendoza, M. T., Simonelli, T.: Implementing the European “Floods Directive”: the Case of the Po River Basin, *Water Resources Management*, vol. 30(5), pages 1739-1756, doi: 10.1007/s11269-016-1248-3, 2016.

Molinari D., Scorzini A. R., Gallazzi, A., Ballio, F., AGRIDE-c, a conceptual model for the estimation of flood damage to crops: development and implementation, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 2565–2582, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2565-2019>, 2019

Molinari D., Scorzini A. R., Arrighi C., Carisi F., Castelli F., Domeneghetti A., Gallazzi A., Galliani M., Grelot F., Kellermann P., Kreibich H., Mohor G. S., Mosimann M., Natho S., Richert C., Schroeter K., Thieken A. H., Zischg A. P., Ballio F., Are flood damage models converging to reality? Lessons learnt from a blind test, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 2997–3017, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2997-2020>, 2020

Pregolato M., Ford A., Wilkinson S.M., Dawson R.J., The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function, *Transportation Research Part D* 55, 67–81, 2017