

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E**  
**AMBIENTALE**

*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



**TESI DI LAUREA**

**LE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO  
STRATEGICHE E I CAMBIAMENTI CLIMATICI:  
ANALISI DEI METODI PER LA VALUTAZIONE  
DEI RISCHI DOVUTI A EVENTI STRAORDINARI**

**Relatore: GIOVANNI GIACOMELLO**

**Laureando: ANDREA BETTINI**

**ANNO ACCADEMICO 2022-2023**



# INDICE

<b>CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
---------------------------------------	----------

## **CAPITOLO 2 - VALUTAZIONE DEI RISCHI NELLE INFRASTRUTTURE STRATEGICHE**

2.1 – AEROPORTI.....	5
2.2 – FERROVIE.....	14
2.3 – STRADE.....	20

## **CAPITOLO 3 - CASO STUDIO FERROVIARIO**

2.1 - IDENTIFICAZIONE DEI GUASTI LEGATI ALLE CONDIZIONI METEOROLOGICHE.....	28
2.2 - ANALISI DELLA PROBABILITÀ DI GUASTO DELL'INFRASTRUTTURA FERROVIARIA A CAUSA DI EVENTI ATMOSFERICI.....	30
2.3 - DETERMINAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DELL'INFRASTRUTTURA FERROVIARIA AI CAMBIAMENTI CLIMATICI.....	36

<b>CAPITOLO 4 – CONCLUSIONI.....</b>	<b>39</b>
--------------------------------------	-----------

<b>CAPITOLO 5 – BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....</b>	<b>42</b>
----------------------------------------------------	-----------

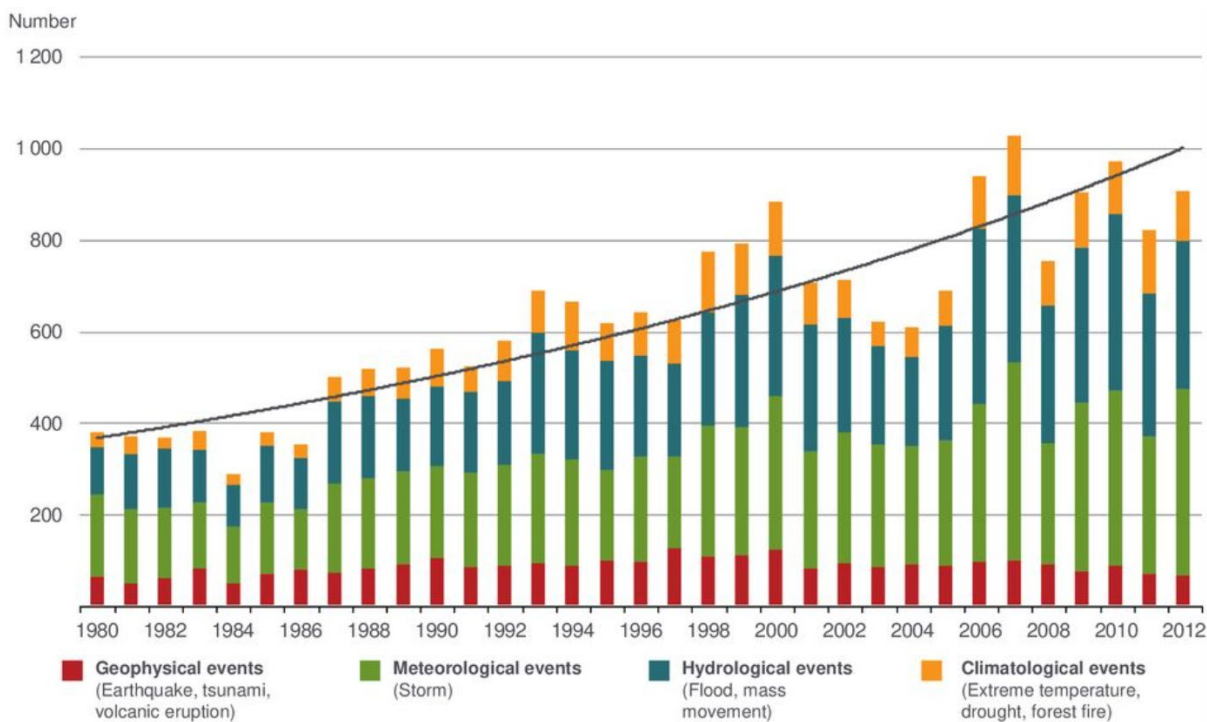


# Capitolo 1

## Introduzione

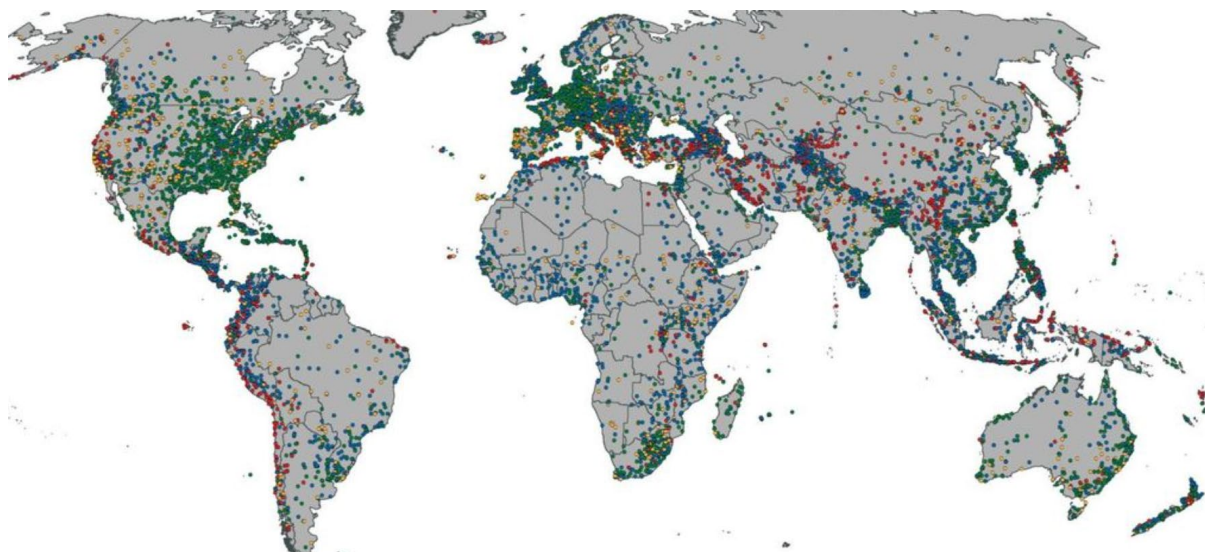
Le infrastrutture di trasporto strategiche sono componenti essenziali per il mantenimento delle funzioni vitali della società, della salute, della sicurezza e del benessere economico e sociale dei cittadini. Le principali minacce causate dal clima a queste infrastrutture includono danni o distruzione da eventi estremi che il cambiamento climatico tenderà probabilmente a esacerbare. Evidenze di tali effetti emergono in maniera incontrovertibile dal crescente numero di eventi climatici estremi a scala globale e dei conseguenti impatti osservati negli ultimi decenni (Figura 1).

L'accumulo di gas serra nell'atmosfera ha già prodotto un innalzamento delle temperature medie di 1°C rispetto al periodo pre-industriale e le più recenti stime prevedono innalzamenti di ulteriori 0,5°C tra il 2030 e il 2050. Questo si traduce in una crescente instabilità del sistema climatico che porterà ad amplificare frequenza e severità degli eventi meteo estremi.



*figura 1 - eventi climatici estremi nel mondo, periodo 1980-2012*

Nella figura 2 sono indicate le zone colpite da eventi climatici estremi nel periodo temporale che va dal 1980 al 2012.



*figura 2 - zone colpite da eventi climatici estremi; periodo 1980 - 2012.*

Comprendere e quantificare i rischi associati a questi eventi risulta necessario per poter pianificare adeguate misure di prevenzione, mitigazione e adattamento, a salvaguardia e garanzia del funzionamento delle infrastrutture e, quindi, della società che esse supportano.

L'impatto di un evento climatico estremo su una infrastruttura si manifesta in termini di danno fisico ai componenti che costituiscono l'infrastruttura stessa e, di conseguenza, in termini di costi necessari per la messa in sicurezza e/o per gli interventi di ripristino/sostituzione/ricostruzione (impatti diretti). Inoltre, la distruzione parziale o completa dell'infrastruttura può causare perdite economiche associate alle eventuali riduzioni di fornitura del servizio dovute alla ridotta funzionalità dell'infrastruttura o di altre ad essa interconnesse (impatti indiretti).

Si cerca in seguito di fornire dei possibili metodi di valutazione dei rischi legati al clima e al cambiamento climatico delle infrastrutture strategiche di trasporto. Lo scopo è quello di determinare la vulnerabilità di tali strutture rispetto agli eventi climatici estremi e adottare quindi misure di adattamento per diminuire i rischi.

Lo studio si basa su un'attenta revisione della letteratura scientifica relativa all'argomento.

Viene inoltre proposto un caso studio di valutazione del rischio climatico riguardante due tratte ferroviarie nell'area di Randstad in Olanda.

Sempre riguardo il presente studio va tenuto in considerazione che alcune informazioni necessarie per valutare la vulnerabilità e l'esposizione non sono pubbliche, con molte organizzazioni di infrastrutture che considerano tali informazioni riservate, in genere per motivi commerciali o di sicurezza. In relazione a ciò, anche se tali informazioni non sono attivamente mantenute riservate, possono essere nascoste all'interno di organizzazioni o settori, limitando la condivisione di informazioni su possibili azioni di riduzione del rischio.





## Capitolo 2

# Valutazione dei rischi nelle infrastrutture strategiche

## AEROPORTI

A causa del cambiamento climatico i fenomeni naturali estremi stanno via via aumentando in numero e intensità. Infrastrutture strategiche come gli aeroporti non sono esenti dai loro effetti. Le principali problematiche sono da attribuirsi all'aumento della temperatura, alle precipitazioni estreme, ai cambiamenti delle tempeste e modelli di vento, all'innalzamento del livello del mare e alle mareggiate.

Vengono quindi resi necessari nuovi metodi di valutazione dei rischi e nuovi interventi in modo da poter adeguare tali infrastrutture alle future condizioni climatiche.

### **Valutazione del rischio:**

Essendo questo uno studio sul rischio derivante dai cambiamenti climatici viene comodo utilizzare la definizione di rischio fornita dal gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (IPCC) che stima il rischio climatico come una combinazione di pericolo, esposizione, sensibilità e capacità di adattamento classificando i risultati in 5 classi di rischio: molto basso, basso, intermedio, alto, molto alto.

Nel caso aeroportuale possiamo identificare:

- Il pericolo come il potenziale verificarsi di eventi climatici che possano danneggiare l'aeroporto e comprometterne l'operatività.
- Il campione di esposizione si riferisce alle componenti aeroportuali che possono essere interessate e danneggiate da eventi di grande pericolo.
- La sensibilità è intesa come il grado in cui il sistema è influenzato da una certa esposizione climatica.
- La capacità adattativa si riferisce alla capacità di adattarsi ai cambiamenti climatici o di far fronte alle conseguenze.

Il quadro di valutazione del rischio può essere costruito nel seguente modo:

-vengono suddivisi i rischi climatici che interessano le aree aeroportuali (temperature estreme, precipitazioni estreme e innalzamento del livello del mare)

-vengono selezionati indici specifici per tutti i pericoli atti ad analizzarne intensità e variazione.

-vengono identificati i campioni di esposizione (lato aria e lato terra)

-vengono scelti specifici indicatori di sensibilità e capacità di adattamento sulla base del campione di esposizione in analisi e vengono normalizzati in modo da ottenere valori adimensionali confrontabili tra di loro su una scala comune con criticità crescente al crescere del numero.

RISCHI: temperature estreme, precipitazioni estreme e innalzamento del livello del mare

I tre principali rischi a cui sono esposte le infrastrutture aeroportuali e rispetto ai quali ci si concentra sono i rischi legati a: temperature estreme, precipitazioni estreme e innalzamento del livello del mare. Per quanto riguarda gli indici utilizzati per descrivere intensità e frequenza degli eventi climatici estremi si considerano sia gli indici di soglia assoluti sia quelli basati sui percentili. Per il rischio di temperature estreme gli indici vengono definiti utilizzando specifiche soglie raccolte in letteratura. Queste soglie descrivono le condizioni climatiche in cui potrebbero verificarsi danni fisici alle infrastrutture e le operazioni aeroportuali potrebbero essere compromesse.

Per gli indici riguardanti le precipitazioni estreme si utilizzano indici di soglia basati su percentili e indicatori basati su periodi di ritorno. In relazione all'innalzamento del livello del mare, vengono selezionati due diversi indicatori che descrivono le inondazioni costiere: l'innalzamento del livello del mare (SLR) e il livello delle mareggiate (SSL). SLR è definito come il potenziale aumento del livello medio del mare che può causare inondazioni permanenti o occasionali di zone costiere basse.

SSL è definito come l'innalzamento temporaneo (in una particolare località) del livello del mare dovuto a condizioni meteorologiche estreme.

L'indicatore di mareggiata, quindi, corrisponde all'altezza raggiunta dal livello del mare durante un evento estremo di uno specifico periodo di ritorno (es. 5, 10, 20, 50 o 100 anni). Pertanto, attraverso la combinazione di questi indici, è possibile stimare l'aumento dell'area costiera potenzialmente allagata in relazione alle mareggiate con un tempo di ritorno specifico e l'innalzamento del livello del mare sulla base dello scenario climatico analizzato. I dati sugli scenari futuri di innalzamento del livello del mare e mareggiate dovrebbero essere integrati con i dati riguardanti la topografia del territorio, la distanza dalla costa e la presenza di scogliere artificiali.

Rischio	Indicatori	Descrizione
Aumento della frequenza delle temperature estreme	Tx ≥ 35 °C	Numero di giorni in cui vengono superate determinate soglie di temperatura (giorni)
	Tx ≥ 40 °C	
	Tx ≥ 45 °C	
Aumento dell'intensità delle temperature estreme	TX95PRCTILE TX99.9PRCTILE	95° percentile della temperatura massima (°C) 99,9° percentile della temperatura massima (°C)
Aumento della frequenza delle precipitazioni	Prec99PRCTILE	Numero di giorni in cui vengono superate specifiche soglie di precipitazioni (giorni)
	Prec99.5PRCTILE	
	Prec99.9PRCTILE	
Aumento dell'intensità delle precipitazioni	TR10PERC	Periodo di ritorno di 10, 20, 50, 100, 150 anni per l'intensità giornaliera delle precipitazioni (mm)
	TR20 PERC	
	TR50 PERC	
	TR100 PERC	
	TR150 PERC	
Innalzamento del livello del mare	SSL	Livello tempesta (RT: 100 anni)
	reflex	Innalzamento del livello del mare (mm/anno)

*tabella 1 - pericolosità climatica: indicatori e descrizione*

## ESPOSIZIONE: componenti lato aria e lato acqua

Nell'eseguire la valutazione dei rischi è necessario definire con precisione quali sono i beni minacciati. Nel caso aeroportuale viene comodo distinguere tali beni in due categorie: le componenti delle attività lato aria e le componenti delle attività lato terra.

Le prime comprendono le strutture utilizzate per la movimentazione degli aeromobili, quali piste, vie di rullaggio, torre e piazzali mentre le seconde si riferiscono alle aree di pubblico accesso quali uffici, terminal, sistemi di accesso aeroportuali e parcheggi.

I rischi climatici considerati determinano impatti diretti e indiretti sui campioni esposti dove, in questo caso, gli impatti diretti si riferiscono a danni agli elementi aeroportuali (piste, vie di rullaggio, edifici, ecc.), mentre gli impatti indiretti non si riferiscono direttamente ai campioni esposti, ma possono causare problemi indiretti all'interno di risorse interdipendenti (es. ritardi, cancellazioni o perdite economiche)

Campione esposto	Variabile	Descrizione	Rischio
Componenti lato volo: strutture aeroportuali	Runways	Numero di piste e dimensioni	Temperature estreme, precipitazioni estreme, innalzamento del livello del mare
	Vie di rullaggio	Numero di vie di rullaggio e dimensioni	Temperature estreme, precipitazioni estreme, innalzamento del livello del mare
	Torre	Sistema di controllo del traffico aereo	Temperature estreme, precipitazioni estreme
	Aprons	Numero di grembiule e dimensioni	Temperature estreme, precipitazioni estreme, innalzamento del livello del mare
Componenti lato terra: aree di accesso pubblico	Terminali	Numero di terminali e dimensioni	Temperature estreme, precipitazioni estreme, innalzamento del livello del mare
	Uffici e altri edifici	Numero di edifici e dimensioni	Temperature estreme
	Sistemi di accesso aeroportuale	Tipo di sistema di accesso aeroportuale (strada, binari ecc.)	Precipitazioni estreme, innalzamento del livello del mare
	Parcheggi	Numero di parcheggi e dimensioni	Temperature estreme, precipitazioni estreme

*tabella 2 - fattore di esposizione: componenti lato aria e lato terra*

## FATTORI DI SENSIBILITA' E CAPACITA' DI ADATTAMENTO

Vengono prima descritti gli indicatori di sensibilità.

Per “sensibilità” ci riferisce a quanto il sistema sia suscettibile quando esposto a un evento climatico estremo. Gli indicatori di sensibilità sono influenzati dalle caratteristiche naturali, fisiche, socio economiche e morfologiche del sistema e dipendono dal tipo di impatto da valutare. I fattori fisici influenzano attivamente la sensibilità del sistema mentre i fattori sociali possono influenzare indirettamente la vulnerabilità agli impatti climatici.

Tra gli indicatori fisici vengono selezionati quelli riguardanti le caratteristiche delle strutture (età, stato del bene, impermeabilizzazione del terreno ecc.).

Per quanto riguarda gli indicatori sociali si prendono in considerazione il traffico aereo, il numero di passeggeri transitanti in aeroporto e i rispettivi accessi ai parcheggi tenendo presente che la gestione di eventi climatici estremi risulta più complicata in ambienti molto trafficati.

Per ultimi vengono identificati gli indicatori geologici e socio economici come la morfologia e la copertura del suolo in un luogo specifico. Questi fattori influenzano la vulnerabilità dell'aeroporto agli eventi climatici estremi, in particolare per quanto riguarda l'innalzamento del livello del mare.

Parallelamente si selezionano gli indicatori di capacità adattativa che descrivono le caratteristiche delle componenti aeroportuali, che le rendono più o meno propense a rispondere ai danni attesi

Le strategie di adattamento messe in atto per far fronte ai cambiamenti climatici possono essere di tipo fisico, sociale, istituzionale, tecnologico ed economico.

La capacità adattativa di uno specifico sistema, così come tutti i fattori precedentemente considerati, è definita in relazione a ciascun impatto previsto in base ai pericoli considerati.

Spesso le opzioni di adattamento possono essere classificate in misure grigie, verdi e morbide. Le misure grigie includono la costruzione di sistemi di drenaggio migliorati per far fronte alle inondazioni dovute a piogge intense o la costruzione di barriere e l'elevazione delle piste per far fronte alle mareggiate e all'innalzamento del livello del mare. Le azioni verdi si riferiscono invece allo sviluppo e valorizzazione delle aree verdi intorno all'aeroporto (ad esempio parchi) o all'installazione di coperture e pareti con vegetazione sulle strutture aeroportuali esistenti per mitigare gli effetti legati alle temperature estreme.

Infine le azioni morbide includono misure gestionali, legali e politiche che modificano il comportamento umano e gli stili di governance.

Sensibilità	Rischio	Tipo di indicatori	Descrizione
Sigillatura del suolo	Temperature estreme; precipitazioni estreme	Fisico	Percentuale di impermeabilizzazione del suolo intorno all'aeroporto (% superficie impermeabile)
Traffico aereo	Temperature estreme; precipitazioni estreme; innalzamento del livello del mare	Sociale	Numero di voli
Accessi al parcheggio	Temperature estreme; precipitazioni estreme; innalzamento del livello del mare	Sociale	Numero accessi parcheggio
Il personale lavora fuori dall'aeroporto	Temperature estreme	Sociale	Numero di risorse umane impiegate al di fuori dell'aeroporto
Passeggeri	Temperature estreme; precipitazioni estreme; innalzamento del livello del mare	Sociale	Numero o percentuale di passeggeri
Edifici in pessime condizioni	Temperature estreme; precipitazioni estreme	Fisico	Numero di edifici in cattive condizioni (o percentuale)
Edifici vecchi	Temperature estreme; precipitazioni estreme	Fisico	Età degli edifici
Infrastrutture sotterranee	precipitazioni estreme; innalzamento del livello del mare	Fisico	Numero di infrastrutture sotterranee
Elevazione	Innalzamento del livello del mare	Geologico	Altitudine media di un'area sopra il livello medio del mare
Geomorfologia	Innalzamento del livello del mare	Geologico	Tipi di terreno
Pendio costiero	Innalzamento del livello del mare	Geologico	Pendenza o planarità di una regione costiera (% o grado)
Buffer entroterra	Innalzamento del livello del mare	Geologico	Diminuzione della suscettibilità dell'area costiera alle inondazioni e all'erosione, con l'aumento delle distanze dalla costa
Erosione/accrescimento del litorale	Innalzamento del livello del mare	Geologico	Rimozione fisica dei sedimenti per azione del moto ondoso e della corrente
Copertura del suolo	Innalzamento del livello del mare	Socio-economico	Distribuzione delle attività umane nella fascia costiera

*tabella 3 - componenti lato aria e lato terra: indicatori di sensibilità*

## STANDARDIZZAZIONE DEGLI INDICATORI E CALCOLO DELL'INDICE DI RISCHIO

Come prima cosa vengono standardizzati gli indicatori correlati a ciascuna componente di rischio. Questo viene fatto attraverso la normalizzazione degli indicatori numerici (ad es. temperatura, precipitazioni ecc.) in una scala da 0 a 1 e la suddivisione degli indicatori non numerici in 5 classi di crescente criticità. Questi ultimi successivamente vengono a loro volta normalizzati in una scala da 0 a 1 per renderli comparabili con gli indicatori numerici.

In questo modo. Per ogni indicatore standardizzato la scala cresce concordemente con il peggioramento delle condizioni.

Gli indicatori una volta standardizzati e quindi resi comparabili tra di loro possono essere aggregati linearmente per calcolare gli indici di rischio. In fase di aggregazione è possibile assegnare a ogni indicatore un peso che ne identifica la maggiore o minore influenza all'interno della valutazione.

L'indice di rischio è dato dalla moltiplicazione degli indici di pericolosità, esposizione e vulnerabilità dove l'indice di vulnerabilità viene calcolato come una media semplice tra gli indici di sensibilità e capacità adattativa.



Capacità di adattamento	Rischio	Tipo di indicatori	Descrizione
Iniziative per l'adattamento ai cambiamenti climatici	Temperature estreme; precipitazioni estreme; innalzamento del livello del mare	Istituzionale	Adesione a iniziative di adattamento al cambiamento climatico
Pareti verdi	Temperature estreme	Fisico	Numero di pareti verdi
Tetti verdi	Temperature estreme	Fisico	Numero di tetti verdi
Bioinfiltrazioni e pavimentazioni permeabili	Precipitazioni estreme	Fisico	Numero di pavimentazioni permeabili
Rivestimenti resistenti al calore	Temperature estreme	Fisico	Numero di superfici con rivestimenti resistenti al calore
Runways più lunghe	Temperature estreme	Fisico	Numero di piste di maggiore lunghezza
Polizze assicurative eventi estremi	Temperature estreme; precipitazioni estreme; innalzamento del livello del mare	Istituzionale	Adesione dell'aeroporto alla polizza assicurativa eventi estremi
Partenze serali	Temperature estreme	Fisico	Numero di voli in partenza la sera
Aree verdi intorno all'aeroporto (es. parchi)	Temperature estreme; precipitazioni estreme	Fisico	Percentuale di aree verdi intorno all'aeroporto (es. parchi)
Ottimizzazione del consumo energetico	Temperature estreme	Fisico/sociale	Adesione dell'aeroporto a iniziative per l'ottimizzazione dei consumi energetici
Consapevolezza del rischio	precipitazioni estreme; innalzamento del livello del mare	Sociale	Adesione dello scalo a iniziative di sensibilizzazione al rischio
Sistemi di drenaggio efficienti	precipitazioni estreme; innalzamento del livello del mare	Fisico	Numero di sistemi di drenaggio
Sistemi di monitoraggio e allarme	precipitazioni estreme; innalzamento del livello del mare	Sociale	Numero di sistemi di monitoraggio e allarme
Elevazioni delle piste	Innalzamento del livello del mare	Fisico	Numero di piste con elevazione maggiore
Costruzione di barriere	Innalzamento del livello del mare	Fisico	Numero di barriere

*tabella 4 - componenti lato aria e lato terra: indicatori di capacità adattiva*

## FERROVIE

Facciamo alcune considerazioni sul concetto di rischio.

*rischio = probabilità x conseguenze*

Questa definizione "classica" di rischio può essere applicata in un clima stazionario ma è difficile da applicare nella pratica in un contesto di cambiamento climatico. In effetti, negli standard di valutazione del rischio dell'International Standards Organization (ISO), il linguaggio rimane piuttosto nel regno della "probabilità", pur facendo riferimento alla possibilità di definirlo matematicamente. Le probabilità di eventi meteorologici estremi possono essere stimate ma stabilire il collegamento diretto con le conseguenze è più difficile. Per affrontare questo problema, conviene collegare il rischio ai concetti di "vulnerabilità" e "esposizione" come è stato fatto nel paragrafo relativo al caso aeroportuale.

Prendiamo nuovamente come riferimento l'IPCC che utilizza questa cornice complementare del rischio climatico e fornisce utili definizioni di "rischio" e termini correlati. Il rischio "risulta dall'interazione di vulnerabilità, esposizione e pericolo". Questo inquadramento elimina la necessità di definire la probabilità di un pericolo, sebbene ciò possa ancora essere fatto se possibile. In questo quadro, il rischio può essere ridotto (a) riducendo il pericolo (che, per i pericoli climatici, è possibile solo attraverso la mitigazione del cambiamento climatico), o (b) riducendo l'esposizione e/o la vulnerabilità, mediante l'adattamento al cambiamento climatico.

Tale approccio consente di slegare i danni che un certo evento meteorologico infligge sulla struttura con la probabilità che esso si verifichi. Il risultato è una matrice dei rischi basata sull'analisi causa-effetto.

Resterà comunque necessario sviluppare dei modelli che descrivano come il clima varierà nel futuro in modo da progettare nuove infrastrutture e adattare quelle esistenti alle nuove condizioni meteo.

Per la valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici sull'infrastruttura ferroviaria è stata utilizzata una metodologia di valutazione del rischio basata sull'analisi causa-effetto. La metodologia di valutazione del rischio si compone delle seguenti fasi:

1. Identificazione dei guasti legati alle condizioni meteorologiche dell'infrastruttura ferroviaria
2. Analisi della probabilità di guasto dell'infrastruttura ferroviaria a causa di eventi atmosferici
3. Determinazione della vulnerabilità dell'infrastruttura ferroviaria ai cambiamenti climatici
4. Sviluppo di strategie di adattamento

I rischi legati al clima sono identificati sulla base di dati storici che includono ritardi e interruzioni del funzionamento dei treni (durata), guasti tecnici relativi a catenaria, sistemi di drenaggio, strutture, ecc. e dati meteorologici delle stazioni di misurazione.

I dati meteorologici includono la temperatura o le precipitazioni, che vengono poi utilizzate per costruire scenari climatici. Viene stabilita la correlazione tra i dati meteorologici e i guasti tecnici e sulla base di ciò vengono determinate le probabilità di accadimento di determinati guasti (ad es. guasto al deviatoio, guasto alla catenaria, binario allagato ecc.).

Vengono proposti valori soglia per un aumento del rischio di guasto dell'infrastruttura. Tenendo conto degli scenari climatici, viene determinata la vulnerabilità dell'infrastruttura ferroviaria ai cambiamenti climatici.

## **Identificazione dei guasti dovuti alle condizioni metereologiche**

In questo primo step vengono analizzati i guasti legati al meteo e la loro frequenza.

In base alla disponibilità di rilevazioni meteo e segnalazioni di guasti effettuate nel passato viene definito un intervallo temporale da analizzare; maggiore è l'ampiezza di questo intervallo e più significativi saranno i risultati che ne conseguiranno.

Si procede quindi, tramite un'analisi statistica, a individuare eventuali relazioni tra particolari condizioni meteo e guasti/malfunzionamenti della infrastruttura.

Ciò vale a dire cercare la correlazione tra le cause del guasto (eventi meteorologici) e i guasti del sistema aggiungendo anche le modalità con le quali avvengono tali guasti e gli effetti che essi provocano nella fruizione del servizio e, in scala più ampia, nel tessuto socio economico dell'area.

## **Analisi della probabilità di guasto dell'infrastruttura ferroviaria a causa di eventi atmosferici**

Come prima cosa risulta utile suddividere gli eventi meteorologici in categorie: alte temperature, basse temperature, neve, pioggia, fulmini ecc.

Fatto ciò, basandosi sui dati raccolti, si relazionano i guasti verificatisi con le condizioni meteo presenti nel momento in cui essi sono occorsi.

Viene calcolata quindi la probabilità di accadimento di un guasto in relazione con le condizioni meteo tramite la seguente formula:

$$P(x) = n^{\circ} \text{giorni con guasti in condizioni "x"} / n^{\circ} \text{giorni con condizioni "x"} \quad (1)$$

Vengono infine stabiliti dei valori di soglia correlati alla probabilità che il guasto si verifichi a determinate condizioni, dove le quattro categorie sono: "improbabile" se inferiore al 33%, "possibile" se compreso tra il 33% e il 66%, "probabile" se compreso tra il 66% e il 99% e "certo" se il valore fosse maggiore del 99% di probabilità. É quindi possibile riassumere i risultati in una matrice contenente valori di soglia per diversi eventi meteorologici e la probabilità dei relativi guasti alle infrastrutture.

## **Determinazione della vulnerabilità dell'infrastruttura ferroviaria ai cambiamenti climatici**

Per valutare l'impatto che il cambiamento climatico comporterà alle infrastrutture ferroviarie è necessario elaborare dei modelli capaci di prevedere gli scenari climatici futuri così da predire, almeno approssimativamente, le condizioni meteo alle quali le infrastrutture saranno soggette. Si dovrà tener conto della variazione delle temperature massime e minime, del mutamento della circolazione atmosferica, del cambiamento dei regimi di precipitazione e in generale di tutti quei fenomeni meteorologici che hanno un impatto sul funzionamento delle infrastrutture.

Una volta determinati i possibili scenari climatici futuri e supposto che la probabilità di accadimento di un guasto in relazione alle condizioni meteo non vari al variare del quadro climatico è possibile stabilire il numero totale di guasti in determinate condizioni meteo rapportando il numero di guasti in tali condizioni (ricavabile dalla matrice del sottoparagrafo precedente) con il numero di giorni in cui, nel nuovo scenario climatico, quelle condizioni si verificheranno:

$$n^{\circ} \text{ tot guasti in condizioni "x"} = n^{\circ} \text{ guasti in condizioni "x"} / n^{\circ} \text{ giorni con condizioni "x"} \\ (2)$$

Così facendo sarà quindi possibile effettuare un confronto tra il numero di guasti che si verificano nelle attuali condizioni climatiche e il numero di guasti in un quadro climatico futuro.

Tale comparazione viene quindi sfruttata per sviluppare strategie e misure di adattamento che permettano di abbassare il rischio derivante dal cambiamento climatico.

## **Sviluppo di strategie di adattamento**

Sulla base delle priorità di rischio, è possibile sviluppare strategie di adattamento, a supporto del processo decisionale sulla futura manutenzione, riabilitazione e pianificazione delle riparazioni. Uno dei mezzi per prendere decisioni è valutare l'efficacia economica delle misure di adattamento proposte.

Per eseguire ciò, i decisori devono accedere a cifre che rappresentano i costi netti del cambiamento climatico, che di solito sono molto difficili da raccogliere e separare da altri costi ed effetti. Inoltre, le lacune nella conoscenza e nella capacità di comprendere i potenziali effetti del cambiamento climatico possono fungere da ostacoli per implementare un adattamento efficace, ad esempio:

- incertezza nelle proiezioni del cambiamento climatico regionale, effetti combinati di diversi fenomeni meteorologici
- mancanza di direzione strategica dalla legislazione e dalla politica per guidare l'adattamento
- una mancanza di fonti di informazioni e metodologie specifiche del settore per valutare quanto potrebbero essere efficaci le risposte di adattamento.

Le risposte di adattamento per ridurre la vulnerabilità dell'infrastruttura ferroviaria ai cambiamenti climatici dovrebbero essere valutate sulla base delle seguenti considerazioni:

- l'entità e la velocità del cambiamento climatico: l'adattamento è più fattibile quando il cambiamento climatico è moderato e graduale rispetto a quando il cambiamento è brusco;
- chiara identificazione o definizione di dove possa risiedere la responsabilità per le opzioni di adattamento, oltre a qualsiasi influenza su tali opzioni;
- dove le risposte di gestione del rischio esistenti possono tenere conto delle considerazioni sui cambiamenti climatici;
- dove le azioni di adattamento possono essere efficaci nel raggiungere obiettivi specifici (e altri), riconoscendo che le risposte di adattamento possono avere conseguenze indesiderate.

In generale, la robustezza dei sistemi dovrebbe essere aumentata, al fine di cambiare l'attuale strategia di fare molto affidamento sulle restrizioni operative (che equivale a prestazioni meno affidabili) in una strategia con meno restrizioni operative e prestazioni più affidabili.

# STRADE

Un modo comune di definire il rischio è presentato come il prodotto  $R = H \times C$  dove si ha: H funzione di probabilità e C conseguenze.

Per rendere il rischio più comprensibile è conveniente guardare tutti i fattori che contribuiscono al rischio e dividerli in categorie. Ecco perché, nel seguente metodo, il rischio è definito come la combinazione di minaccia, vulnerabilità e conseguenze.

La minaccia comprende fattori di pericolo e ambientali, il pericolo è descritto da fattori climatici e l'ambiente (l'ambiente circostante) è descritto da fattori contestuali del sito, ad es. uso del suolo. Le vulnerabilità descrivono le proprietà dei sistemi o delle funzioni che potrebbero essere danneggiate. La vulnerabilità include fattori come i fattori intrinseci all'infrastruttura, il traffico e l'ambiente. Le conseguenze descrivono l'esito della minaccia realizzata e includono la vita umana e infortuni, perdite economiche, costi di ricostruzione ecc.

## **Analisi del rischio**

Gli obiettivi:

L'analisi del rischio comporta lo sviluppo di una comprensione dei rischi.

Essa fornisce input per la valutazione del rischio; funge da base decisionale per stabilire se i rischi debbano essere trattati e serve per selezionare le strategie e i metodi di trattamento del rischio più appropriati.

L'analisi del rischio viene divisa nelle seguenti fasi:

- 1) definizione di cronologia e tipologia degli scenari di rischio
- 2) determinazione l'impatto del rischio
- 3) valutazione le occorrenze
- 4) presentazione di una panoramica dei rischi



## Definizione di cronologia e tipologia degli scenari di rischio

L'obiettivo è quello di acquisire una buona comprensione del processo di rischio, dall'evento scatenante al recupero della condizione ex-ante al fine di sviluppare un sistema di difesa basato su misure di prevenzione (riduzione vulnerabilità) e misure di protezione (riduzione conseguenze).

Gli scenari di rischio vengono costruiti tramite la conoscenza di minacce, vulnerabilità e conseguenze.

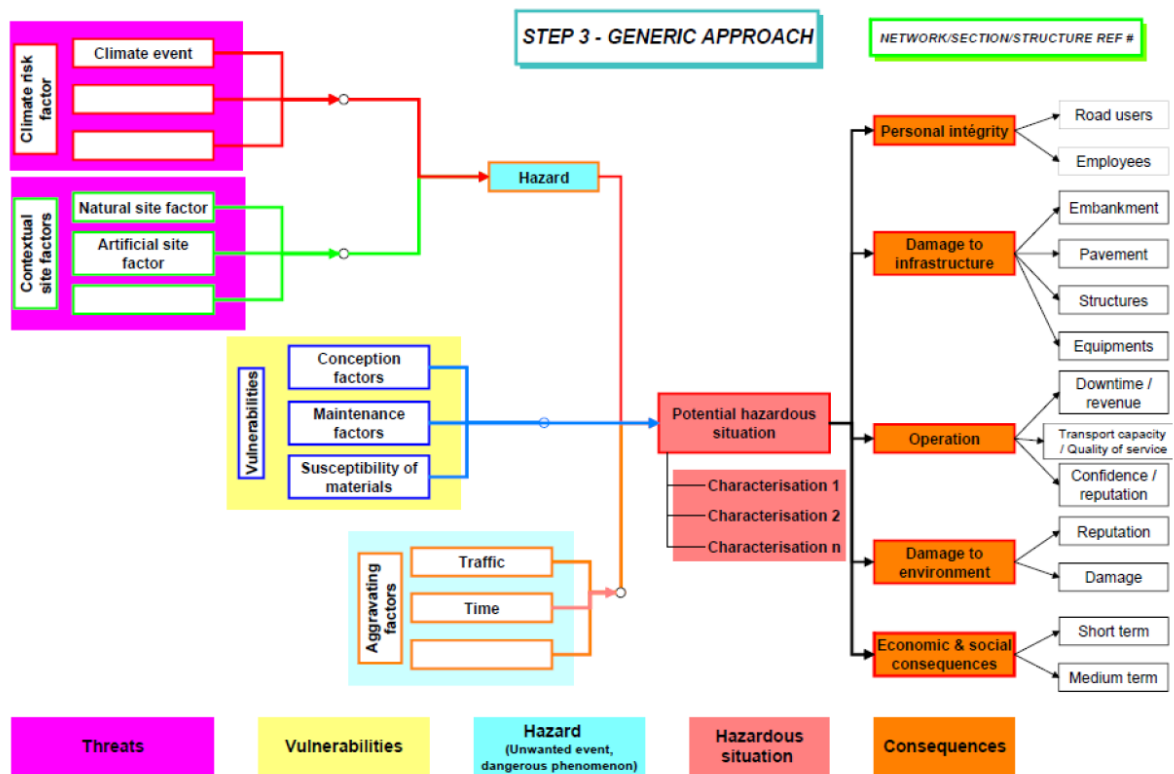


figura 3 - diagramma dell'analisi del rischio

Questi diagrammi consentono di scomporre tutti gli elementi dell'analisi dei rischi e di facilitare la comprensione e il dialogo con gli enti interessati.

Vari scenari, basati su diversi insiemi di fattori di rischio, possono essere testati utilizzando questo approccio strutturato.

Per ogni tipo di fattore di rischio può essere effettuata un'analisi per determinare i possibili scenari di rischio. Ogni scenario di rischio sarà costituito dalla descrizione di uno specifico evento climatico, dalla vulnerabilità dell'infrastruttura stradale a quell'evento climatico e dalle relative conseguenze.

Il livello di dettaglio degli scenari di rischio aumenterà da una scala di analisi territoriale a una scala di analisi della infrastruttura.

Sapendo quali fattori climatici emergeranno come più critici in futuro, un buon aiuto nella formulazione di scenari di rischio può essere ottenuto dallo studio di luoghi con corrispondenti condizioni climatiche presenti (omologhi climatici).

L'elaborazione di scenari di rischio richiede la caratterizzazione di tutti i fattori di rischio (fattori climatici e contestuali), vulnerabilità e possibili conseguenze.

Per ogni configurazione di rischio occorre identificare i possibili primi segnali di allerta, il tempo tra i primi segnali e l'allerta, il tempo di reazione, le prime conseguenze, il periodo di influenza, l'eventuale fine dell'allerta, il tempo al ripristino.

Il risultato è una tabella relativa ai vari rischi e alle varie componenti dell'infrastruttura stradale indicante la strutturazione e la durata di ogni fase dell'evento indesiderato.

## **Determinazione dell'impatto del rischio**

L'obiettivo è assegnare un punteggio agli indicatori di conseguenza per ogni scenario di rischio, o valutarli, in modo da rendere possibile la valutazione economica degli scenari di rischio e la scelta della strategia per la mitigazione. Lo scopo è quello di ottenere un'indicazione generale del livello di rischio e di evidenziare i rischi maggiori.

L'impatto del rischio viene determinato in relazione alle seguenti categorie:

- Integrità delle persone (utenti e dipendenti) in termini di persone uccise o ferite
- Danni all'infrastruttura in termini di costo di ripristino
- Perdite operative per gestori stradali (ricavi, qualità del servizio, immagine) e per utenti (perdita di tempo, costi aggiuntivi per l'utilizzo dei veicoli)
- Danni all'ambiente (immagine e degrado)
- Conseguenze economiche e sociali per la nazione/regione/area di influenza (impatto sulle scelte modali, impatto sull'accessibilità dei territori locali, ruolo dei trasporti nel sistema economico globale)

Dovrebbe essere determinato anche il costo delle soluzioni palliative.

Verrà quindi scelto l'approccio metodologico più appropriato per la valutazione economica dell'impatto del rischio. La valutazione dovrebbe basarsi almeno su un sistema di punteggio, utilizzando quattro classi di rischio (da basso a critico)

Possono essere utilizzate diverse fonti di informazioni:

- Ricerche e studi specifici, prodotti a livello nazionale, possono aiutare a stimare il costo dei decessi o dei feriti (rapporti di costo specifici in base alla categoria di sinistro),
- Competenza interna dell'autorità stradale per danni diretti e perdite operative,
- Studi socio economici specifici, sulla scala di analisi appropriata, per valutare le perdite degli utenti, i danni ambientali e l'impatto socioeconomico.

Poiché ogni caso è particolare, questi studi devono essere eseguiti caso per caso.

Il risultato è un elenco o una matrice dell'impatto stimato (conseguenze) di ciascun scenario di rischio, insieme ai relativi valori economici stimati o, se l'analisi è qualitativa, un punteggio per ciascun indicatore di conseguenza.

## Valutazione delle occorrenze

L'obiettivo è determinare le occorrenze di eventi climatici da incorporare nel calcolo del probabile costo delle conseguenze degli scenari di rischio nella valutazione del rischio.

La determinazione dell'occorrenza è fondamentale nella valutazione del rischio economico, ma nel campo del cambiamento climatico le probabilità non sono disponibili e l'incertezza è la regola.

Oggi c'è solo una piccola quantità di informazioni per determinare l'effettiva probabilità di eventi climatici estremi, insieme alla loro evoluzione futura.

È quindi necessario utilizzare approssimazioni.

I trend evolutivi che tengono conto del cambiamento climatico possono essere forniti dai risultati dell'IPCC, e più precisamente dai modelli di downscaling. È così possibile stimare la probabilità di ciascun fattore di rischio climatico nel medio o lungo periodo.

Gli eventi climatici estremi che possono avere un impatto sulla viabilità sono, per definizione, eccezionali. Di conseguenza, gli eventi climatici da considerare nella presente analisi sono quelli che eccedono gli standard di progettazione del sistema stradale. Nel caso di problemi di drenaggio e idraulici, ad esempio, i principali eventi da prendere in considerazione saranno 10 o 20 anni per il sistema di drenaggio e 100 anni per canali sotterranei e ponti.

Se non è possibile utilizzare criteri oggettivi di verosimiglianza (ovvero se non ci sono informazioni sull'evento climatico che minaccia di impattare sulla viabilità), si raccomanda che la valutazione sia basata sulle tendenze del cambiamento climatico. Poiché il cambiamento climatico può indurre effetti benefici (ad esempio un calo delle precipitazioni stagionali e delle nevicate), la probabilità può essere valutata con + o -. Tuttavia, per semplificare il punteggio, si consiglia di assegnare un valore "0" ai fattori climatici che mostrano miglioramenti nella situazione futura.

La scala di valutazione potrebbe essere la seguente:

- Evoluzione che mostra un miglioramento per il fattore climatico (+ o ++): 0
- Evoluzione di peggioramento per il fattore climatico (- o --): da 1 (basso) a 4 (critico).

Va sottolineato che l'andamento e l'intensità del cambiamento climatico dipende fortemente dagli scenari di emissione e dall'orizzonte temporale (2030, 2050, 2080, ecc.) considerato. Inoltre, la probabilità di un danno stradale potrebbe essere condizionata, a seconda del verificarsi di una serie di eventi; infatti possiamo supporre di avere una probabilità nota per un evento climatico, che da solo non può danneggiare la viabilità. Per rappresentare una minaccia, l'evento climatico deve essere associato a un fattore contestuale del sito.

Questo fattore sito contestuale non è sempre presente. Possiamo descriverlo usando una probabilità condizionata: a condizione che l'evento climatico si sia verificato, quanto è probabile che si verifichi il fattore del sito contestuale? Moltiplicando la probabilità dell'evento climatico e il fattore sito contestuale, si ottiene la probabilità dello scenario di rischio, che è l'output di questo passaggio.

Le proiezioni sui cambiamenti climatici saranno fornite dalle autorità meteorologiche nazionali, sulla base dei risultati dell'IPCC o, preferibilmente, del downscaling locale.

Oltre alle proiezioni sui cambiamenti climatici, per affinare l'analisi è possibile utilizzare dati dettagliati sulla situazione attuale relativa agli eventi climatici estremi. La mappatura dei fattori climatici consente di analizzare la situazione dell'intera area sotto l'influenza dell'evento climatico e quindi di correlare possibili impatti sulla viabilità e possibili

I risultati sono la probabilità futura (se quantificata) o la verosimiglianza (stima) degli scenari di rischio

## **Presentazione di una panoramica dei rischi**

L'obiettivo è fornire una valutazione quantificata (valutazione o punteggio) dei rischi e dei relativi elementi vulnerabili del sistema stradale.

Si attua un approccio semi-quantitativo che consente di predisporre una “tabella di rischio” per ogni elemento del sistema viario.

Tale tabella di rischio descrive l'intensità, la probabilità (probabilità), l'esposizione, le vulnerabilità e le relative conseguenze corrispondenti per ciascun fattore di rischio climatico.

Lo scopo qui è quello di raccogliere le informazioni, consentendo agli elementi stradali di essere confrontati tra loro e aggregando i punteggi per tutti i criteri di rischio in un'unica cifra. Dopo aver compilato tutte le tabelle di rischio, gli elementi stradali possono essere classificati in base al loro punteggio complessivo, dal livello di rischio più basso a quello più alto per quanto riguarda i fattori climatici.

Le informazioni richieste per questo passaggio sono l'output dei passaggi precedenti.

Per ogni elemento infrastrutturale o patrimoniale e per ogni fattore climatico è necessario:

- Descrivere i fattori di rischio (climatici, intrinseci e di sito)
- Esaminare le condizioni per la comparsa del rischio (fattori di rischio combinati)
- Descrivere il rischio e la sua espressione (esempio per precipitazioni estreme: intensità, probabilità nella situazione attuale, probabilità futura con il cambiamento climatico)
- Indicare la vulnerabilità dello specifico elemento o bene al rischio specifico
- Esaminare le possibili conseguenze e le condizioni di aggravamento di tali conseguenze (traffico, tempo, ecc.)

La descrizione, la probabilità e l'esposizione del rischio sono fornite da esperti del clima.

Gli elementi vulnerabili sono forniti dagli operatori stradali.

Le possibili conseguenze sono determinate attraverso eventi simili già vissuti all'interno del sistema viario (colloquio esperto + banca dati incidenti).

Il risultato di questa fase è una tabella dei rischi, che fornisce l'entità di tutti i rischi identificati in termini di probabilità (probabilità) e conseguenze.

## Capitolo 3

### Caso studio ferroviario

In questo capitolo vediamo un'applicazione pratica della metodologia di valutazione dei rischi legati al clima e al cambiamento climatico per il caso ferroviario.

Il caso studio in esame riguarda due importanti tratte ferroviarie in Olanda nell'area di Randstad, l'agglomerato delle città di Amsterdam, Rotterdam, L'Aia e Utrecht.

La zona può essere considerata per molti versi come un'unica area metropolitana che, con circa 7 milioni di abitanti, è di fatto uno dei più grandi agglomerati urbani d'Europa.

La rete ferroviaria svolge un ruolo importante per l'accessibilità e lo sviluppo socio economico dell'area di Randstad.

I due tracciati sono stati selezionati per analizzare i guasti legati alle condizioni meteorologiche e la vulnerabilità ai cambiamenti climatici.

La selezione si è basata su uno o più dei seguenti criteri:

- il tracciato è critico per le prestazioni della rete;
- il tracciato in passato ha avuto problemi di prestazioni a causa delle condizioni meteorologiche estreme;
- il tracciato in passato ha richiesto un elevato livello di manutenzione;
- i guasti legati alle condizioni meteorologiche vengono sistematicamente raccolti per il tracciato.

I tracciati selezionati includono il tracciato tra Utrecht e Amsterdam (45 km) e il tracciato tra Utrecht e Rotterdam (55 km).

## Identificazione dei guasti legati alle condizioni meteorologiche

Per i tracciati selezionati, sono stati analizzati i guasti legati al meteo e la loro frequenza. Nei paragrafi seguenti il numero di guasti è fissato in relazione a anni, stagioni e luoghi. Inoltre, erano correlati a cause di guasto (eventi meteorologici), modalità di guasto e risorse che fallivano (Figura 2). Gli effetti del guasto non sono stati inclusi a causa di incoerenza dei dati.

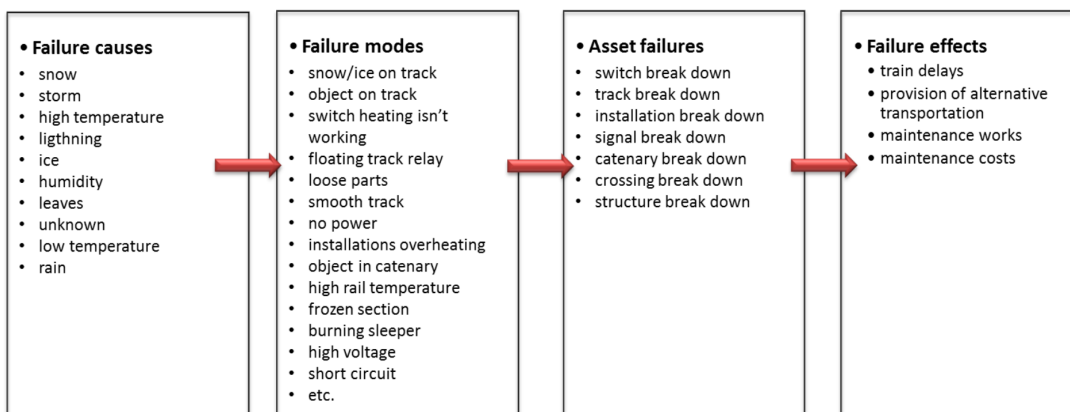
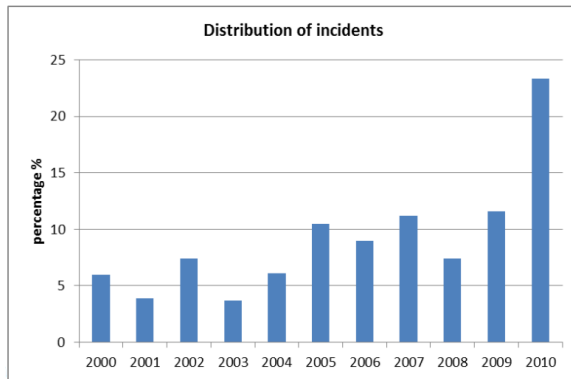


figura 2 - correlazioni tra cause e modalità di guasto, risorse fallite ed effetti del guasto

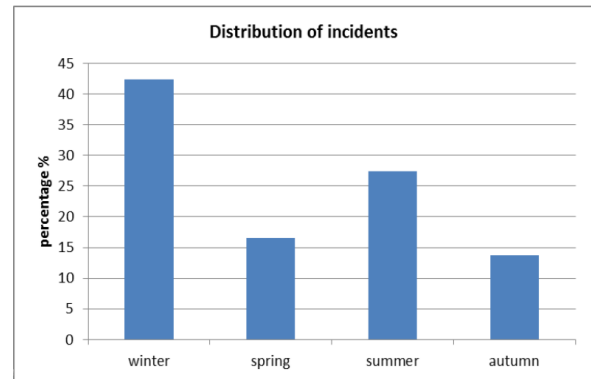
Nel periodo 2000-2010, sono stati registrati 868 guasti relativi alle intemperie per i due tracciati, il che fornisce in media gli 0,7 guasti per km all'anno.

Nella Figura 3a) e 3b) la distribuzione degli 868 guasti è correlata all'anno e alla stagione entro il periodo osservato. È evidente dalla Figura 3a) che il numero di guasti è aumentato negli ultimi anni. Ciò può indicare componenti dell'infrastruttura più vulnerabili e/o un aumento degli eventi meteorologici gravi. Un'altra spiegazione potrebbe essere una migliore raccolta dati di guasti e manutenzione legati alle intemperie della base di dati associata. La Figura 3b) suggerisce anche che l'inverno rappresenta la stagione più critica in termini di guasti legati al tempo.





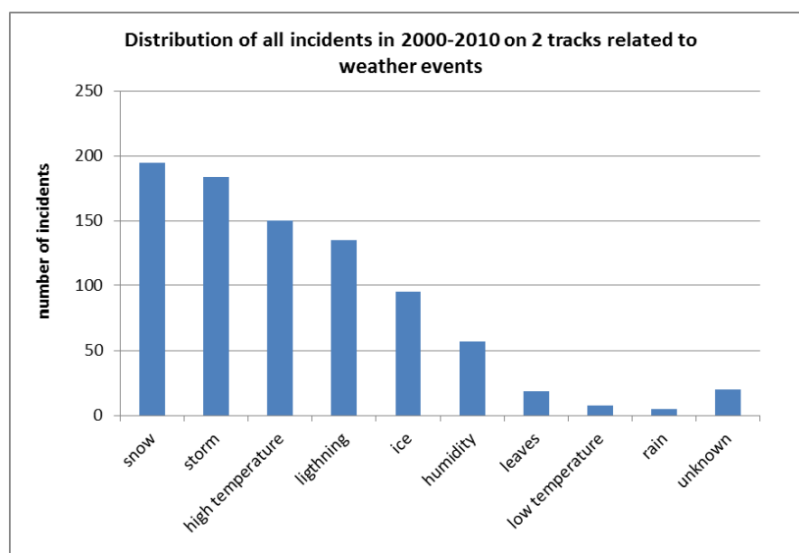
*figura 3a - distribuzione guasti per anno*



*figura 3a - distribuzione guasti per stagione*

Dopo aver analizzato le descrizioni dei guasti nel database, è stato deciso di dividere gli eventi meteorologici causati nelle 10 categorie seguenti: neve; ghiaccio; basse temperature; tempeste; alte temperature; fulmini; pioggia; foglie; umidità; ed evento ignoto.

La Figura 4 presenta la distribuzione di guasti relativi al tipo di evento meteorologico. I problemi in inverno sono causati principalmente dalla neve. È anche interessante notare che i temporali provocano un gran numero di guasti, ma si verificano in ogni stagione. L'alta temperatura è, come previsto, un problema durante l'estate, mentre i fulmini sono presenti dalla primavera all'autunno.



*figura 4 - numero di guasti causati dal meteo nel periodo 2000-2012*

## **Analisi della probabilità di guasto dell'infrastruttura ferroviaria a causa di eventi atmosferici**

### Analisi delle temperature

Prima di prevedere gli impatti dei cambiamenti climatici sulle prestazioni ferroviarie, l'impatto del meteo presente sui due tracciati deve essere rivisto e analizzato. Questa sezione delinea l'analisi di tutti i guasti in relazione alla temperatura al momento di un guasto.

Al fine di stabilire la correlazione tra la temperatura e il verificarsi di un guasto, la frequenza dei guasti è stata confrontata con la temperatura al momento del verificarsi di un guasto. Innanzitutto, il numero di guasti era correlato all'intervallo di temperatura di 1° C. L'analisi è stata eseguita separatamente per le temperature giornaliere massime e per le temperature minime giornaliere durante i giorni in cui si sono verificati guasti.

Nella Figura 5 viene presentata la frequenza dei guasti relativi alle alte temperature dell'aria. Poiché il numero di giorni con una certa temperatura differisce nel periodo di osservazione, è stata calcolata la probabilità di un guasto correlato alla temperatura dell'aria. La probabilità di un guasto viene calcolata come un rapporto tra i giorni con un guasto in un determinato intervallo di temperatura e il numero totale di giorni in quell'intervallo di temperatura:

$$P(x) = n^{\circ} \text{giorni con guasti in condizioni "x"} / n^{\circ} \text{giorni con condizioni "x"} \quad (1)$$

entrambi contati per il periodo osservato, in questo caso il periodo di 11 anni, dal 2000 al 2010.

Nella Figura 5 è presentata la probabilità calcolata che si verifichi un guasto a una determinata temperatura dell'aria.

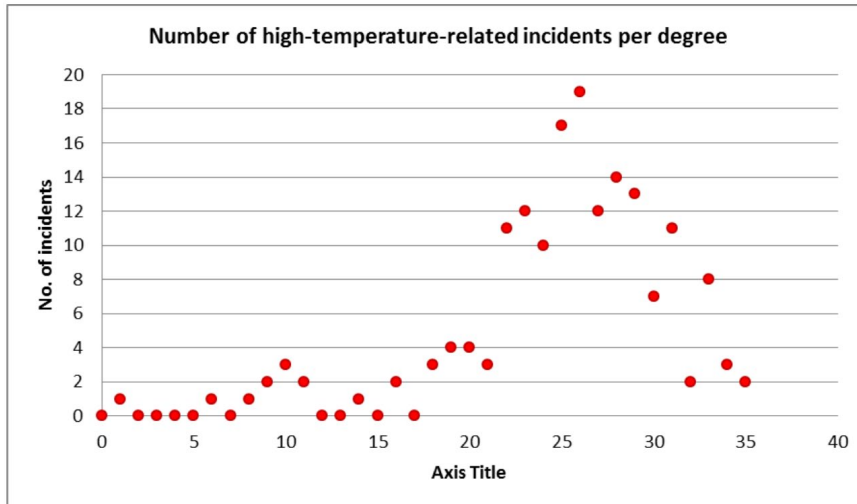


figura 5 - frequenza dei guasti legati alle alte temperature

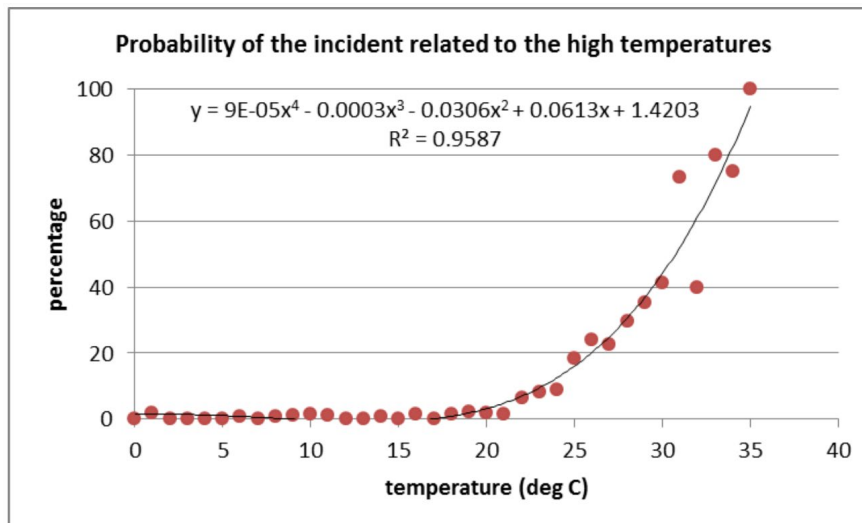


figura 6 - probabilità di guasto in funzione delle alte temperature

La figura 6 mostra che con l'aumento della temperatura la probabilità di un guasto aumenta esponenzialmente. Ad una temperatura di 35°C la possibilità che si verifichi un guasto è del 100%. Le probabilità di guasto del 33% e del 66% vengono raggiunte rispettivamente a 28°C ea 33°C. Lo stesso tipo di analisi è stata eseguita per le basse temperature.

Nella Figura 7 è presentata la frequenza dei guasti legati alla bassa temperatura. Anche in questo caso, la probabilità che si verifichi un guasto ad una certa temperatura dell'aria è stata calcolata applicando la relazione (1). I risultati sono presentati nella Figura 8.

La probabilità che si verifichi un guasto aumenta in modo esponenziale con una diminuzione della temperatura. Ad una temperatura di -12°C si ottiene una probabilità del 100%. La probabilità di guasto del 33% viene raggiunta intorno a -5°C e la probabilità del 66% al di sotto di -9°C.

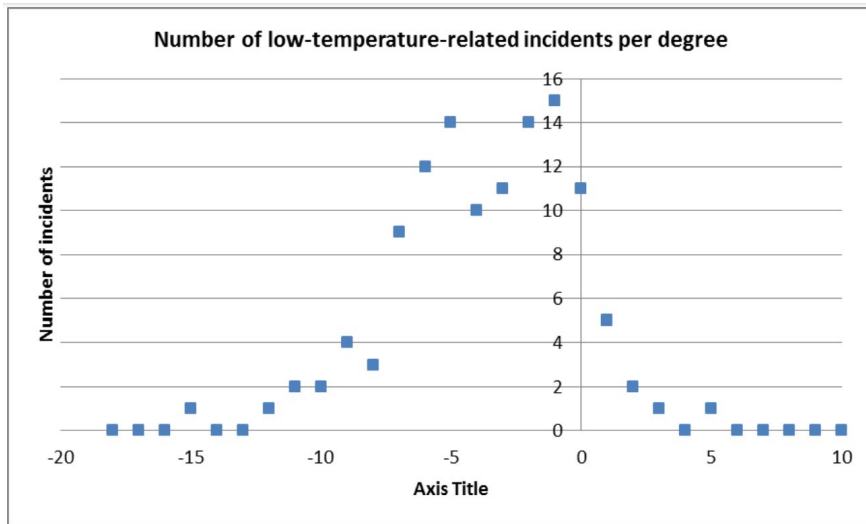


figura 7 - frequenza dei guasti legati alle basse temperature

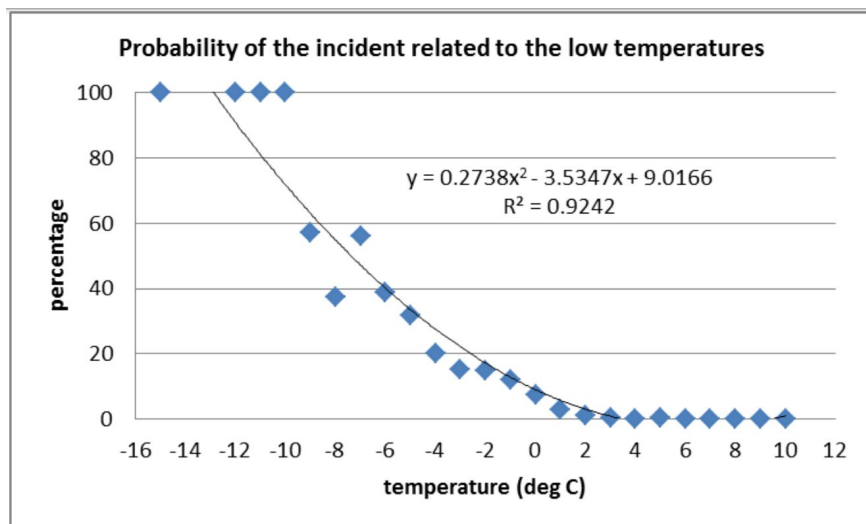
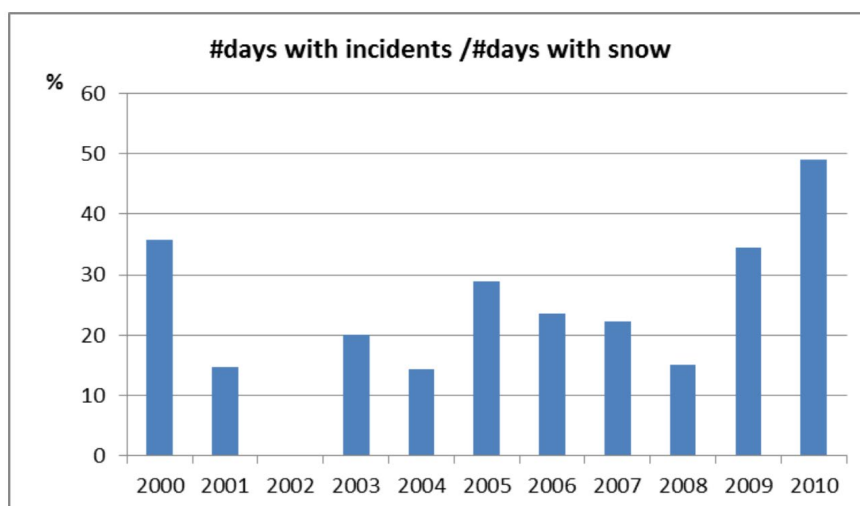


figura 8 - probabilità di guasto in funzione delle basse temperature

### Analisi delle precipitazioni nevose

Ulteriori analisi sono state effettuate in relazione alle condizioni meteorologiche delle precipitazioni nevose. In Figura 9 è presentata la probabilità di guasto relativa alla nevicata, calcolata come rapporto tra il numero di giorni in cui si sono verificati i guasti e il numero totale di giorni con nevicata registrati presso la stazione meteorologica di Schiphol, osservati per anno. Nella Figura 10 sono presentati i risultati dell'analisi del numero di guasti in relazione alla quantità di nevicata giornaliera. Si può vedere che la probabilità che si verifichi un guasto aumenta in modo esponenziale con l'aumento delle precipitazioni nevose.

Una probabilità del 100% secondo la curva di correlazione si ottiene con 58 mm di neve al giorno, mentre il 33% e il 66% di probabilità di guasto si raggiungono rispettivamente con 9 mm e 22 mm di neve al giorno.



*figura 9 - probabilità di guasti in giornate con nevicata*

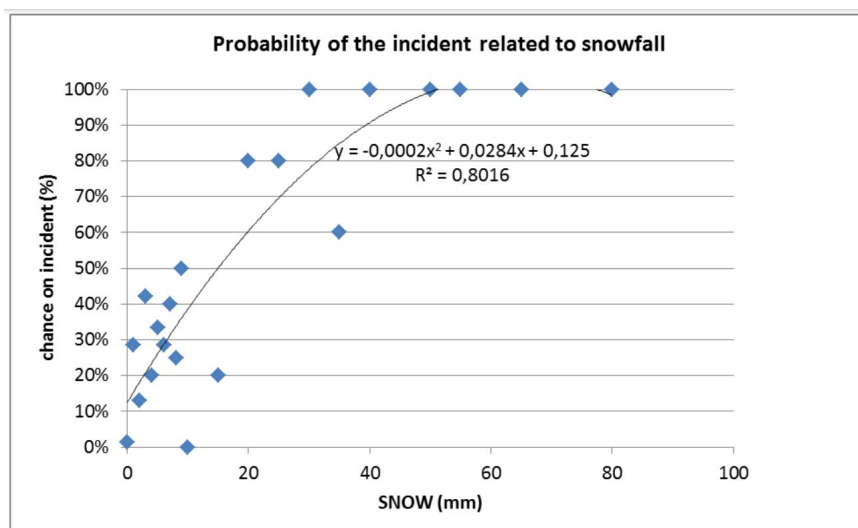


figura 10 - probabilità di guasto in funzione della quantità di neve caduta per giorno

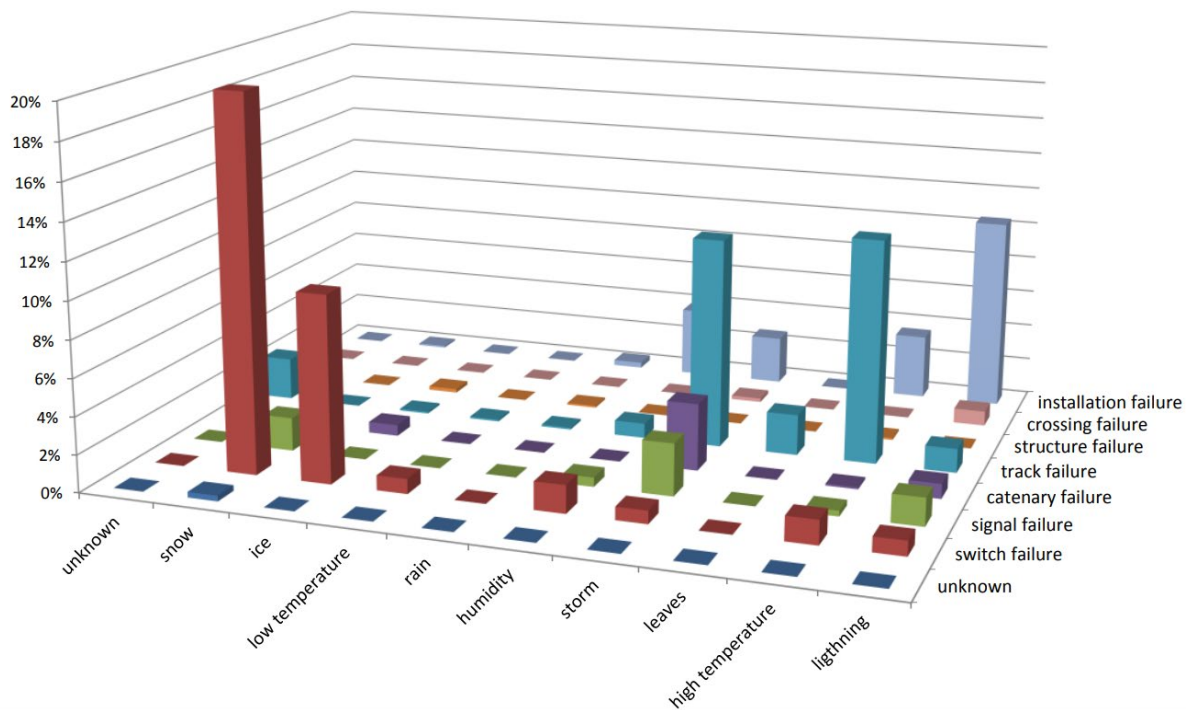
Analizzando le condizioni meteorologiche attuali ei guasti dell'infrastruttura ferroviaria, sono state stabilite relazioni di base, da cui vengono suggeriti valori soglia per una certa probabilità dei potenziali impatti sulle infrastrutture ferroviarie. I valori di soglia sono correlati alla probabilità che il guasto si verifichi a determinate condizioni, dove le tre categorie sono: improbabile inferiore al 33%, possibile tra il 33% e il 66%, probabile tra il 66% e il 99% e certo superiore al 99% di probabilità. Nella Tabella 1 sono presentate le soglie suggerite.

Weather event	Failure occurrence				Component most endangered
	Unlikely, < 33 %	Threshold 1 Possible, 33 – 66 %	Threshold 2 Likely, 66 – 99 %	Threshold 3 Certain, > 99%	
High temperature	T < 28°C	28°C < T ≤ 33°C	33°C < T ≤ 35°C	T > 35°C	track failure
Low temperature	T > -4.5°C	-9°C ≤ T < -4.5°C	-12°C ≤ T < -9°C	T < -12°C	switches
Snowfall	< 10 mm/d	10 mm/d < s ≤ 22 mm/d	22 mm/d < s ≤ 50 mm/d	> 50 mm/d	switches

tabella 1 - valori di soglia per diversi eventi meteorologici e probabilità di guasti

Per sviluppare strategie di adattamento è necessario analizzare i componenti del sistema che si stanno guastando in determinate condizioni meteorologiche. Nella Figura 11 i tipi di guasti dei componenti del sistema sono correlati ai fenomeni meteorologici. Si può vedere che la maggior parte dei guasti ai deviatori sono causati da neve e ghiaccio sui binari.

I successivi guasti più frequenti sono i guasti ai binari causati da alte temperature, temporali o foglie bagnate che causano binari scivolosi. La tempesta causa guasti alla catenaria e al deviatoio. I guasti agli impianti sono principalmente causati da fulmini, condizioni di temperatura elevata e umidità elevata.



*figura 11 - probabilità di guasto dei sistemi in relazioni agli eventi meteorologici*

## Determinazione della vulnerabilità dell'infrastruttura ferroviaria ai cambiamenti climatici

Le previsioni sui cambiamenti climatici nei Paesi Bassi richiedono approfondimenti sulle previsioni climatiche regionali e sulle tendenze globali.

Nel 2006 il KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute) ha pubblicato quattro diversi scenari climatici in cui potrebbe svilupparsi il clima olandese.

Essi sono poi stati confermati da un aggiornamento di KNMI del 2009.

Questi quattro scenari differiscono nel grado di aumento della temperatura globale e nel grado di cambiamento dei modelli di circolazione atmosferica (vedi tabella 2).

Tramite questi scenari, è possibile valutare qualitativamente l'influenza del clima futuro sulla ferrovia per le condizioni invernali e il caldo estivo.

Scenario		G	G+	W	W+
Global temperature increase in 2050		+1°C	+1°C	+2°C	+2°C
Change of atmospheric circulation		No	Yes	No	Yes
<b>Winter</b>	Average temperature	+0.9°C	+1.1°C	+1.8°C	+2.3°C
	Coldest winter day per year	+1.0°C	+1.5°C	+2.1°C	+2.9°C
	Average precipitation amount	+4%	+7%	+7%	+14%
	Number of wet days ( $\geq 0.1$ mm)	0%	+1%	0%	+2%
	10-day precipitation sum exceeded once in 10 years	+4%	+6%	+8%	+12%
<b>Summer</b>	Average temperature	+0.9°C	+1.4°C	+1.7°C	+2.8°C
	Warmest summer day per year	+1.0°C	+1.9°C	+2.1°C	+3.8°C
	Average precipitation amount	+3%	-10%	+6%	-19%
	Number of wet days ( $\geq 0.1$ mm)	-2%	-10%	-3%	-19%
	daily precipitation sum exceeded once in 10 years	+13%	+5%	+27%	+10%

*tabella 2 - Valori dei parametri di guida utilizzati per identificare i quattro scenari climatici KNMI'06 per il 2050*



## Guasti legati al cambio di temperatura invernale

Sulla base dei dati storici sulle prestazioni dei due tracciati durante gli 11 anni di osservazioni, sono state selezionate le sezioni più critiche. I dati meteorologici sono stati raccolti dalla stazione meteorologica di Schiphol, la più vicina al tratto di binario selezionato. Le serie temporali di temperatura vengono generate trasformando una serie temporale di temperatura utilizzando un programma fornito da KNMI sul loro sito Web. Questa trasformazione può essere eseguita per la temperatura media giornaliera, minima giornaliera e massima giornaliera. Per indagare su come il numero futuro di guasti cambierà nei quattro scenari climatici KNMI, è stata utilizzata una semplice relazione teorica tra il clima a Schiphol e i guasti di base:

$$n^{\circ} \text{ tot guasti in condizioni "x"} = n^{\circ} \text{ guasti in condizioni "x"} / n^{\circ} \text{ giorni con condizioni "x"} \quad (2)$$

In futuro, il numero di guasti diminuirà durante l'inverno (Figura 13). Questo è un risultato diretto dell'aumento della temperatura durante l'inverno, come si può vedere dalla Figura 12. Si noti che questa analisi si basa solo sulla temperatura e non in caso di nevicata. Tuttavia, la quantità di nevicata diminuirà nel 21° secolo a causa del cambiamento climatico con condizioni atmosferiche più adatte alle precipitazioni piovose.

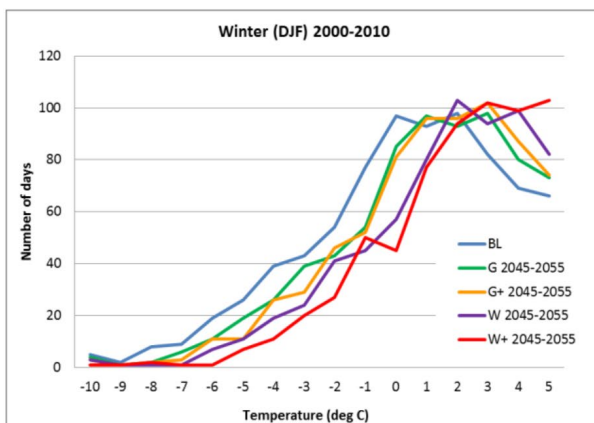


figura 12 - distribuzione di frequenza delle temperature per i 4 scenari

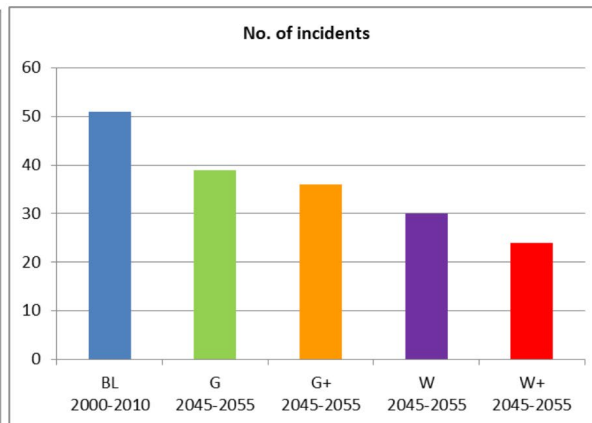


figura 13 - proiezione dei guasti nei 4 scenari rispetto ai guasti attuali

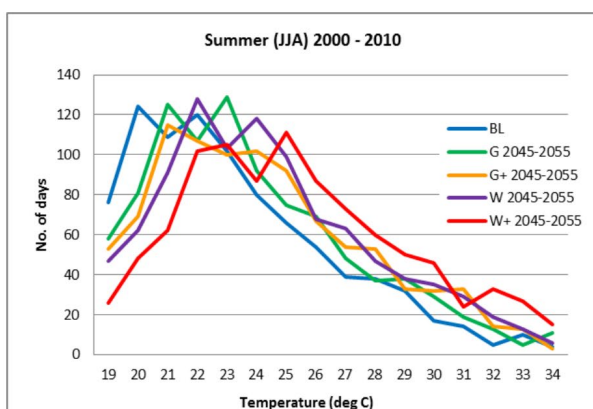
## Guasti legati al cambio di temperatura estiva

La stessa analisi di cui sopra è stata eseguita per le condizioni in cui la ferrovia ha avuto più problemi a causa del caldo.

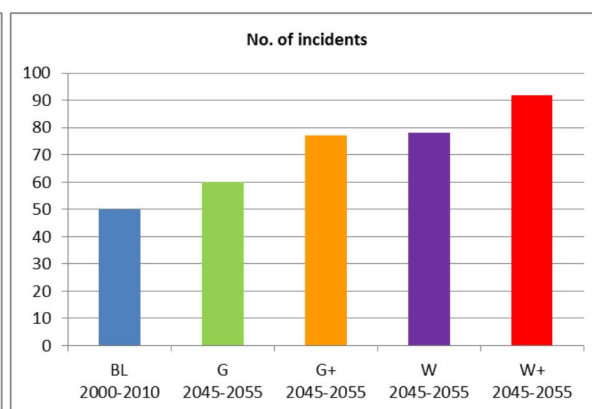
In questo caso la stazione meteorologica di Cabauw è stata scelta come la più vicina per il confronto dei dati storici sulle condizioni meteorologiche e sulle prestazioni ferroviarie. La Figura 14 mostra le funzioni di densità di probabilità per la temperatura massima per la situazione di riferimento (BL) e i quattro scenari climatici in un periodo di 11 anni dal 2045 al 2055.

È chiaro da questo grafico che la temperatura aumenterà in tutti e quattro gli scenari.

Ciò avrà un effetto significativo anche sul numero di guasti che, nel peggiore dei casi, potranno aumentare da 50 a poco più di 90 per un periodo di 11 anni, come si può vedere nella Figura 15.



*figura 12 - distribuzione di frequenza delle temperature per i 4 scenari*



*figura 13 - proiezione dei guasti nei 4 scenari rispetto ai guasti attuali*

## Capitolo 4

### Conclusioni

Questo documento presenta i quadri teorici per la valutazione del rischio correlato agli eventi climatici estremi per le infrastrutture di trasporto strategiche mirando a supportare i gestori di tali infrastrutture nella conduzione di analisi di rischio al fine di individuare adeguate strategie di adattamento. Strategie del genere sono indispensabili per prevenire o almeno mitigare danni e malfunzionamenti legati al meteo viste le prospettate condizioni meteorologiche eccezionali future dovute al cambiamento climatico.

Seppur simili nella struttura, le tre metodologie di valutazione del rischio restituiscono risultati profondamente diversi tra di loro. Questo è dovuto alla differente natura delle infrastrutture che le porta ad avere diverse componenti di esposizione e vulnerabilità e quindi in definitiva diverse componenti di rischio.

Partiamo considerando l'esposizione delle tre infrastrutture.

Le infrastrutture stradali e ferroviarie, a differenza di quelle aeroportuali, si sviluppano per aree considerevolmente estese. Questo, oltre che a complicare la valutazione degli eventi meteorologici, determina una maggiore esposizione a rischi legati a frane, smottamenti, caduta di massi e a problematiche legate a opere come ponti, gallerie, linee elettriche etc.

La più estesa interazione con gli elementi naturali genera quindi un aumento della esposizione con un conseguente aumento dei rischi.

Passando ad analizzare la vulnerabilità delle tre infrastrutture è interessante notare che, a differenza del caso stradale e ferroviario, gli aeroporti sono molto sensibili alla variazione di venti e correnti d'aria.

In un potenziale quadro climatico futuro con modelli di vento diversi e con forti correnti convettive estive le infrastrutture aeroportuali potrebbero dover ridurre notevolmente la loro capacità di accoglienza del traffico aereo con pesanti ripercussioni a livello economico. Le piste costruite lungo la direzione del vento prevalente a livello locale potrebbero subire più venti trasversali a causa delle deviazioni da tale direzione prevalente, oppure un aeroporto potrebbe iniziare a subire venti trasversali ma non avere una pista per il vento laterale. Ciò comporterebbe la necessità di modificare le procedure e riprogettare lo spazio aereo che, a sua volta, implicherebbe un ulteriore rischio ambientale dovuto alla redistribuzione dell'impatto acustico attorno agli aeroporti.

In ultima, è importante sottolineare che, a differenza di ferrovie e aeroporti dove il traffico è determinato, nel caso stradale è solo possibile prevedere statisticamente i flussi veicolari lungo l'infrastruttura. Questo aggiunge un altro elemento di incertezza riguardo la valutazione dei rischi soprattutto rispetto a potenziali conseguenze e danni che gli eventi meteorologici estremi potrebbero causare. Se infatti nel caso aeroportuale e ferroviario risulta possibile attuare delle restrizioni operative in caso di previsioni meteorologiche avverse non si può dire altrettanto riguardo il caso stradale dove il più delle volte la circolazione dei veicoli dipende dalla scelta dei singoli utenti (potenzialmente ignari dei pericoli). Questo, come altri aspetti legati all'aleatorietà dei flussi veicolari, devono essere considerati durante il processo di valutazione dei rischi.

Sebbene appaia chiaro quanto possano essere diversi i risultati delle varie analisi del rischio, rimane comunque possibile tracciare delle linee guida generali a supporto dei processi decisionali riguardanti la progettazione di nuove infrastrutture di trasporto e l'adeguamento di quelle già esistenti rispetto alle future condizioni climatiche:

- 1) migliorare l'integrazione delle considerazioni sui cambiamenti climatici negli attuali piani di gestione del patrimonio
- 2) migliorare il lavoro di raccolta dei dati sui guasti e sugli effetti che tali guasti provocano (anche in larga scala)

- 3) conformare la banca dati all'obiettivo finale ossia lo sviluppo di misure di manutenzione e/o adattamento
- 4) migliorare la comprensione dell'interrelazione tra i sistemi di trasporto e il clima, sviluppando relazioni di base e un quadro su come il clima e le condizioni meteorologiche influenzano attualmente le operazioni di trasporto, le infrastrutture e la pianificazione.
- 5) sviluppare modelli probabilistici che descrivano i quadri meteorologici futuri.
- 6) analizzare i potenziali impatti dei cambiamenti climatici sul sistema ferroviario.
- 7) identificare le implicazioni del cambiamento climatico in termini di sicurezza, economia, mobilità e accessibilità.
- 8) identificare gli elementi dell'infrastruttura di trasporto e le operazioni di trasporto più a rischio in scenari di cambiamento climatico diffuso o su larga scala.
- 9) valutare l'efficacia delle strategie per affrontare gli impatti dei cambiamenti climatici sul settore dei trasporti.

Il cambiamento climatico è un processo continuo. Di conseguenza, il problema non è come adattarsi a un “nuovo” clima, ma come e a quale prezzo adattare la nostra società a un clima in continua evoluzione.

L'adattamento deve quindi essere inteso come una politica di transizione permanente a lunghissimo termine.



## Capitolo 5

### Bibliografia e sitografia

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-021-05066-0>

<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fa2d5b6f-e701-11e8-b690-01aa75ed71a1/language-en>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516300369?via%3Dihub>

<https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wcc.728>

[https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/rossetti\\_CC\\_Impact\\_Railroads.pdf](https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/rossetti_CC_Impact_Railroads.pdf)

<https://core.ac.uk/download/pdf/29215286.pdf>

<https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2016/07/UK-CCRA-2017-Chapter-4-Infrastructure.pdf>

[https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2022-02/Rapporto\\_Carraro\\_Mims.pdf](https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2022-02/Rapporto_Carraro_Mims.pdf)

RIMAROCC framework