

## APPROCCIO MULTI-RISCHIO ALLA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI EVENTI NATECH

Gasparini, P.<sup>1</sup>, Di Ruocco, A.<sup>1</sup>, Garcia-Aristizabal, A.<sup>1</sup>, Basco, A.<sup>1</sup>, Teofilo, G.<sup>1</sup>, Antoncecchi, I.<sup>2,3</sup>

1 AMRA – Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale, Via Nuova Agnano, 11 - Napoli,  
[info@amrcenter.com](mailto:info@amrcenter.com)

2 MISE-DGS-UNMIG - Ministero dello Sviluppo Economico - Direzione Generale per la Sicurezza  
anche ambientale delle attività minerarie ed energetiche. Ufficio Nazionale Minerario per gli  
Idrocarburi e le Georisorse, [ilaria.antoncecchi.ext@mise.gov.it](mailto:ilaria.antoncecchi.ext@mise.gov.it)

3 BICOCCA - Università di Milano, Dipartimento di Scienze Economico-Aziendali e Diritto per  
l'Economia- CRIET, Milano

### SOMMARIO

AMRA, centro di Competenza nel settore dell'Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale, è una struttura permanente di ricerca per lo sviluppo di metodologie innovative applicate alle problematiche ambientali. Tra i filoni di ricerca di AMRA vi è lo sviluppo di metodologie quantitative probabilistiche per le valutazioni multi-rischio a supporto dell'identificazione di strategie efficaci, economicamente sostenibili, per la mitigazione degli impatti dovuti ad una vasta gamma di sorgenti di rischio ed alle loro possibili interazioni, considerando anche scenari di effetti a cascata. AMRA ha partecipato e guidato diverse iniziative rivolte da un lato ad ulteriori sviluppi teorici dell'approccio multi-rischio messo a punto e, dall'altro, all'applicazione di questo approccio ai casi di incidenti industriali innescati da eventi naturali (NaTech). In particolare, diverse attività di ricerca sono state svolte nell'ambito di progetti finanziati dalla Commissione Europea (FP6-Na.Ra.S, FP7-CRISMA). Tra le esperienze recenti di AMRA nell'applicazione di un approccio multi-rischio a supporto delle valutazioni NaTech vi è anche la collaborazione con la DGS-UNMIG del Ministero dello Sviluppo Economico. Lo scopo di tale attività è lo sviluppo di metodologie multi-rischio applicabili alla valutazione della sicurezza degli impianti off-shore di estrazione idrocarburi. Il presente lavoro illustra i principi della metodologia multi-rischio di AMRA e alcune sue applicazioni a siti industriali.

### 1. INTRODUZIONE

Gli incidenti NaTech (Natural Events Triggering Technological Disaster) sono tipici eventi a cascata (o domino) nei quali la causa scatenante, di origine naturale, innesca in un complesso industriale una serie di incidenti che amplificano gli effetti dell'evento naturale. Per avere un modello adatto alla loro prevenzione, o a diminuirne gli effetti, è necessario utilizzare algoritmi che consentano, una volta determinata la distribuzione di probabilità di intensità attesa dell'evento naturale innescante, di ricavare le probabilità delle sequenze di eventi possibili che costituiscono la cascata. A volte è possibile che gli eventi naturali siano più di uno e in questo caso è necessario considerare tutti gli eventi che possono colpire una determinata struttura. E' evidente quindi la necessità di utilizzare metodi multi-rischio.

Negli ultimi decenni la percentuale di superficie terrestre occupata da opera umane è aumentata in modo tale che ogni evento naturale catastrofico ha un'elevata probabilità di colpire qualche impianto più o meno complesso. Tra gli eventi più recenti che hanno avuto molta risonanza si ricordano:

- L'amplificazione degli effetti dell'Uragano Katrina che ha colpito gli Stati Uniti Sud Orientali nel 2005, prodotta dal crollo del sistema di dighe e argini del Lago Portchartrain e dal conseguente black-out elettrico;
- L'amplificazione degli effetti del terremoto di Tohoku, Giappone, avvenuta nel marzo 2011, dovuta all'altezza eccezionale delle onde di tsunami prodotte, da un black-out elettrico e dai danni subiti dalla centrale nucleare di Fukushima;
- Gli effetti dell'Uragano Sandy che ha colpito gli Stati Uniti nel 2013, amplificati dal conseguente blow-out di una grande centrale elettrica.

La struttura geo-politica dell'Europa e la connessione transfrontaliera di molte life-line rendono l'intero continente molto sensibile ad eventi a cascata innescati da grandi eventi naturali in qualsiasi punto del continente si verifichino. Tipici esempi sono:

- Il terremoto di Smirne del 1999 che ha prodotto più di 21 incidenti NaTech nella zona industriale vicina all'epicentro con gravi conseguenze [1];

- Il lungo black-out elettrico verificatosi in tutta Italia e parte della Svizzera nel 2003 innescato da una forte tempesta di vento in Svizzera e da un analogo evento in Austria;
- Le precipitazioni insolitamente intense nell'Europa Centrale che, nel 2010, hanno causato una gigantesca alluvione che ha provocato interruzioni delle linee di servizi e della rete di trasporti in Polonia, Germania e Repubblica Ceca;
- L'eruzione esplosiva di moderata intensità del vulcano islandese Eyiafjallajokul che nel 2010 ha provocato considerevoli problemi al traffico aereo che attraversava l'Atlantico del Nord e nell'Europa settentrionale.

Il metodo più importante per mitigare l'effetto di questi eventi complessi è una programmazione appropriata e una collaborazione multi-settoriale, basata su una modellistica multi-rischio, che preveda una identificazione delle probabilità di accadimento dei diversi eventi naturali innescanti la crisi, e sull'identificazione e quantificazione delle probabilità di accadimento dei vari step attraverso i quali la cascata di eventi si sviluppa.

Gli eventi NaTech sono eventi estremamente complessi e bisogna ricordare che “tutti i modelli di eventi complessi sono sbagliati; bisogna solo chiedersi quanto devono essere sbagliati per non essere utili”. “Questa affermazione concorda con una linea di pensiero contemporanea della filosofia della scienza secondo la quale, piuttosto che tentare di validare e verificare i modelli, si dovrebbe cercare di confermare se i modelli siano adeguati non in generale, ma per rispondere a scopi specifici. Gli stress test possono essere considerati un metodo per valutare l'inadeguatezza di un modello a raggiungere gli scopi per i quali era stato programmato. Questo approccio pragmatico è comune a tutta la scienza delle catastrofi, in accordo con la massima dell'economista Maynard Keynes secondo la quale è meglio un risultato approssimativamente corretto che uno sicuramente sbagliato” [2].

## 1.1 Obiettivi

In questo lavoro, dopo una succinta panoramica dei principali fenomeni naturali che innescano eventi NaTech, viene esposto lo schema concettuale sul quale si basano le analisi multi-rischio applicate da AMRA alla valutazione probabilistica di eventi NaTech.

Sono riportati due esempi applicativi dell'approccio AMRA. Il primo è la valutazione probabilistica di un incidente NaTech in una tubazione per il trasporto di GPL colpita da un terremoto e dalla caduta di ceneri vulcaniche. Il secondo è relativo alla valutazione della probabilità di danni alla rete elettrica de L'Aquila colpita dal terremoto del 2009.

La sezione finale dell'articolo illustra l'attività che AMRA sta svolgendo per la valutazione dell'impatto di eventi estremi su alcune piattaforme di estrazione idrocarburi in Adriatico.

## 2. EVENTI NATECH

I fenomeni naturali che più frequentemente hanno prodotto eventi NaTech sono terremoti, tsunami, alluvioni e fenomeni meteo (fulminazioni, tempeste di vento). Gli eventi NaTech seguono percorsi evolutivi diversi, a seconda del fenomeno innescante e delle caratteristiche dell'opera umana colpita, ma sfociano in genere in una o più delle seguenti tre tipologie di hazard: alluvioni rapide, inquinamento di falde acquifere e/o dell'aria, incendi e/o esplosioni.

### 2.1 Incidenti NaTech innescati da terremoti

Nel caso specifico di incidenti NaTech innescati da terremoti, analisi post incidentali hanno evidenziato che i danni agli impianti industriali sono causati principalmente dalle oscillazioni del suolo dovute al passaggio di onde sismiche di diversa frequenza e dalle deformazioni permanenti del suolo tra le quali giocano un ruolo importante i fenomeni di liquefazione [1,3,4,5]. Le modalità di danno per i serbatoi di stoccaggio comprendono gli eventi “elephant-foot buckling” (Fig. 1), “buckling on the top” (con conseguente rilascio di materiali pericolosi dal tetto dovuto all'affondamento del tetto galleggiante), l'allungamento o distacco dei sistemi di ancoraggio. Questi ultimi possono causare sia uno spostamento laterale o un sollevamento del serbatoio stesso sia la deformazione o il cedimento delle colonne di supporto e degli altri tipi di strutture di fondazione [6,7,8]. I rilasci di contenimento possono essere lievi o gravi, quelli maggiori sono causati da ribaltamento del serbatoio o dal collasso dello stesso.

Durante le lunghe crisi sismiche nelle quali si ripetono più volte scosse di magnitudo medio-alta (ad esempio quella che ha colpito l'Emilia Romagna nel maggio-giugno 2012) le azioni ripetute degli eventi successivi

possono produrre danni notevoli (fino al collasso) su edifici industriali che apparentemente avevano resistito indenni alla prima scossa. È quindi sempre opportuno un immediato monitoraggio delle condizioni degli edifici dopo un terremoto di intensità medio-alta.



Figura 1. A sinistra, elephant-foot-buckling di un serbatoio durante il terremoto del 17 Gennaio 1994 a Northridge in California [9]; a destra, tubazioni danneggiate durante il terremoto del 17 Agosto 1999 a Tupras in Turchia [fonte: <http://www.enea.it/it/comunicare-la-ricerca/events/tohoku-1lug11/20110701ENEAServa.pdf>]

## 2.2 Incidenti Natech innescati da tsunami

Per quanto riguarda gli incidenti NaTech generati da tsunami pochi dati sono disponibili in letteratura soprattutto se confrontati con i dati puramente sismici, data la bassa incidenza relativa degli tsunami rispetto a terremoti. Nella letteratura corrente, la definizione delle funzioni di vulnerabilità dello tsunami è stata affrontata considerando le tre componenti principali di tsunami: velocità dell'onda, altezza d'onda e dimensione dei detriti trasportati. Per le prime due componenti, possono essere considerate in prima approssimazione le banche dati e le metodologie esistenti per l'analisi di incidenti NaTech causate da inondazioni. Quindi, per similitudine, i serbatoi verticali atmosferici e i serbatoi orizzontali pressurizzati possono essere identificati come i più vulnerabili in caso di tsunami analogamente al pericolo di inondazione [10], non solo a causa delle loro proprietà strutturali, ma anche per le gravi conseguenze relative ai possibili danni in termini di rilascio di sostanze pericolose. D'altra parte nel caso di tsunami bisogna considerare non solo le forze idrostatiche e idrodinamiche come nel caso delle alluvioni [11], ma anche altre forze, come le forze di impatto da detriti trasportati dall'onda, l'onda d'urto atmosferica indotta dal moto ondoso, l'incendio diffuso da detriti e combustibili liquidi galleggianti. I danni strutturali alle apparecchiature industriali attribuiti all'impatto dei detriti possono essere valutati mediante analisi di impatto [12], ma il problema principale è legato alle grandi incertezze che nascono dalla presenza di oggetti (che possono includere anche navi) trasportati dall'onda dello tsunami.



Figura 2. Serbatoio distrutto dallo tsunami/terremoto dell'11 Marzo 2011 Tōhoku, Giappone [fonte: <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/asia/japan/8377742/Japan-earthquake-and-tsunami-as-it-happened-March-11.html>]

### 2.3 Incidenti NaTech innescati da alluvioni

Anche le alluvioni sono fenomeni che in genere colpiscono intere aree industriali. L'allagamento dei bacini di contenimento dei serbatoi di stoccaggio di combustibili può causare il galleggiamento di questi ultimi con conseguente spostamento e distacco dei sistemi di connessione (tubazioni). Ciò determina il rilascio di sostanze pericolose [10]. Questo tipo di fenomeno è particolarmente critico per i serbatoi vuoti o parzialmente pieni se non adeguatamente ancorati in quanto il loro spostamento può causare collisione con altre installazioni presenti sul sito. Se la potenza del flusso d'acqua dovuto all'alluvione è sufficientemente elevata, può verificarsi il collasso dei serbatoi con conseguente sversamento delle sostanze pericolose in essi contenuti. Le alluvioni possono provocare danni a qualsiasi tipo di struttura industriale che contenga parti sensibili al di sotto del livello topografico (es. centrali nucleari o elettriche in genere) e minare la stabilità di componenti strutturali vulnerabili a questo tipo di evento, provocando danni ai sistemi elettrici e perdite di contenimento.



Figura 3. a) Danno a tubazioni durante l'alluvione del 2014 in Pennsylvania, USA [fonte: <https://dcbureau.org/tag/earthjustice>]; b) rilascio di idrocarburi in una raffineria in seguito a un'alluvione in Coffeyville (USA) nel 2007 [fonte: <http://ksview.org/info/news.shtml>].

### 2.4 Incidenti NaTech innescati da fenomeni meteo (fulminazioni, tempeste di vento, ecc.)

Numerosi studi indicano che le fulminazioni costituiscono uno tra i più frequenti fenomeni iniziatori di incidenti di tipo NaTech nell'industria chimica di processo [13]. Le analisi degli incidenti NaTech causati da fulminazioni hanno mostrato che esistono diversi meccanismi di danno [14]. In particolare possono verificarsi danni strutturali diretti dovuti al riscaldamento delle zone colpite dai fulmini che possono dar luogo ad esempio a rotture o perforazioni dei serbatoi o delle tubazioni di raccordo. Un'altra causa d'incidente può essere l'innescò da parte della scarica del fulmine dei vapori che normalmente si trovano sui tetti galleggianti dei serbatoi atmosferici di combustibili liquidi. Ciò può dar luogo ad un vero e proprio incendio del serbatoio.

Forti tempeste di vento possono provocare corti circuiti e altri tipi di danno su tutte le componenti di un sistema di trasporto dell'energia o di combustibili che si sviluppano al di sopra del livello del suolo. Questi danni possono a loro volta innescare black-out o incendi su vaste aree.



Figura 4. Incendio di un serbatoio di grezzo per fulminazione, 28 Agosto 2006 Whifessville (USA) [15]

### **3. L'APPROCCIO MULTI-RISCHIO DI AMRA**

Un'analisi multi-rischio per una determinata area può includere diverse tipologie di eventi che minaccino gli stessi elementi a rischio (es. popolazione, edifici, infrastrutture). Tali eventi possono verificarsi contemporaneamente oppure secondo una sequenza temporale perché dipendenti gli uni dagli altri (eventi a cascata) o perché indotti da un comune evento innescante [16]. Nel primo caso si parla generalmente di "rischio multi-hazard"; nel secondo caso, invece, date le interazioni tra le sorgenti di rischio e/o gli effetti a cascata, si parla di "multi-rischio" [17, 18, 19].

L'obiettivo principale di un'analisi multi-rischio è l'armonizzazione sia delle metodologie impiegate sia dei risultati ottenuti per differenti sorgenti di rischio, tenendo in considerazione anche le loro possibili interazioni [17, 19, 20]. Nel caso specifico di un'analisi multi-rischio che includa anche eventi NaTech, il problema principale da affrontare è l'accadimento di effetti a cascata dovuti a un evento innescante (generalmente naturale) e i conseguenti danni in un dato complesso industriale.

#### **3.1 Interazioni, innesco ed effetti a cascata**

Il verificarsi di un dato evento può modificare la probabilità di occorrenza di un altro evento, inducendo potenzialmente degli "effetti a cascata" [19].

Le tipologie di interazioni che possono essere raggruppate sotto questo nome sono rappresentate da fenomeni nei quali un evento iniziale produce una perturbazione su un dato sistema determinando in esso uno stato di instabilità e forzandolo a raggiungere un nuovo stato di equilibrio che soddisfi la variazione nelle condizioni al contorno.

Per raggiungere questa nuova configurazione di equilibrio è possibile che si verifichi un evento innescato da quello iniziale [18]. La relazione tra l'intensità dell'evento innescante (es. lo scuotimento al suolo indotto da un terremoto) e l'intensità dell'evento innescato (es. una frana) dipende dal complesso di meccanismi fisici che sono intrinsecamente correlati alle specifiche interazioni tra i due eventi. Tale aspetto e gli effetti casuali che possono condizionare questi processi fanno sì che gli approcci probabilistici si configurino come lo strumento più promettente per una quantificazione di tali interazioni [18, 20].

Queste interazioni avvengono principalmente "a livello di sorgenti di rischio", ossia tra pericolosità. Tuttavia, quando l'interazione tra diversi pericoli condiziona la risposta di una struttura (es. un edificio, una componente industriale), allora si dice che l'interazione avviene a "livello di vulnerabilità" [18, 20].

Quest'ultimo tipo di interazione va considerato quando l'obiettivo dell'analisi è la valutazione degli effetti che due o più eventi contemporanei (non necessariamente correlati tra di loro) possono avere sulla valutazione del rischio. È questo il motivo per cui in questo caso l'azione delle differenti pericolosità è combinata nella fase di valutazione della vulnerabilità (o del danno) e l'interesse principale è la valutazione degli effetti che un dato evento (il primo a verificarsi cronologicamente) può indurre sulla risposta di un dato elemento esposto ad un successivo evento [17, 21, 22].

#### **3.2 Valutazioni multi-rischio applicate a problemi NaTech**

L'obiettivo principale di un'analisi multi-rischio applicata a problemi NaTech è la valutazione della probabilità di occorrenza degli incidenti e dei relativi impatti sull'ambiente circostante, considerando le differenti pericolosità coinvolte e le reciproche interazioni. Pertanto l'applicazione di un approccio multi-rischio ad incidenti NaTech deve tenere conto dei seguenti aspetti:

1. È necessario considerare la possibilità che molteplici pericolosità (di origine naturale o antropica) possono diventare eventi innescanti
2. È opportuno contemplare tutti i possibili scenari di effetti a cascata, identificando le relazioni logiche tra i differenti eventi che possono indurre una conseguenza inattesa;
3. L'analisi deve basarsi su una valutazione di tutti gli elementi esposti (naturali e/o antropici) che possono essere impattati.

Diversi fattori rendono quest'analisi piuttosto complessa. Tra questi la varietà di pericoli esterni che possono essere considerati come eventi innescanti. Questi possono essere sia eventi di origine naturale, che a loro volta possono verificarsi nel sottosuolo (es. terremoti naturali), nell'atmosfera (es. eventi meteorologici estremi), a livello dell'interfaccia aria/suolo (es. frane), sia eventi di origine antropica causati dalle stesse attività industriali (es. subsidenza, sismicità indotta). Un altro aspetto rilevante è quello legato alla propagazione dei danni attraverso le componenti industriali. Infine la complessità di tali analisi è

incrementata anche dalla varietà dei possibili elementi esposti, che vanno dai sistemi ambientali (es. aria, suolo, acque superficiali, falde) ai sistemi socio-economici.

Tenendo conto di tutti questi aspetti, un'analisi quantitativa multi-rischio per le attività industriali può articolarsi nei seguenti step [23]:

1. Identificazione e descrizione dei potenziali eventi accidentali nel sistema: un evento accidentale è definito generalmente come una variazione significativa rispetto alle condizioni normali di operatività che può comportare conseguenze inattese. Nell'industria dell'olio/gas, per esempio, una fuoriuscita di gas può essere definita come un evento accidentale.
2. Identificazione delle cause potenziali di ciascun evento accidentale attraverso un'analisi delle cause. Le cause sono solitamente identificate attraverso una struttura gerarchica che può essere descritta usando un *fault tree*. Nel caso si disponga di stime di probabilità (dell'evento di base), queste possono essere di input al fault tree ed è possibile procedere al calcolo della probabilità/frequenza dell'evento accidentale.
3. La maggior parte dei sistemi industriali dispongono di diverse funzioni di protezione al fine di arrestare la propagazione di eventi accidentali o per ridurne le conseguenze. L'analisi di quest'ultime è generalmente effettuata ricorrendo ad un'analisi dell'*albero degli eventi* (*event tree*).

L'approccio multi-rischio a questo tipo di problema si basa sulla considerazione di molteplici pericolosità (e le loro possibili interazioni) come possibili cause di perturbazione del sistema che possono comportare il verificarsi di un incidente. In pratica, gli step generali per la quantificazione del rischio elencati sopra sono rappresentati usando la cosiddetta struttura "bow-tie" (BT). Tale struttura è uno strumento grafico a supporto della rappresentazione degli scenari di incidente, partendo dalle cause dell'incidente stesso fino ad arrivare alle conseguenze. È uno strumento specifico per la valutazione delle cause e degli effetti di specifici eventi critici (chiamati "top events") e si compone di un fault tree (FT) a sinistra, che identifica le possibili cause dell'evento critico, e di un event tree (ET) a destra, che mostra le possibili conseguenze dell'evento critico (Fig. 5).

La combinazione di ET ed FT in uno schema BT è uno strumento ampiamente usato nelle analisi di attendibilità per la valutazione del rischio[23]. La definizione di una struttura BT richiede diverse attività, a partire dalla definizione dell'evento critico, detto anche "top event" (TE) che dovrebbe rappresentare un incidente ben definito (es. cosa accade e dove accade) ed è il punto finale di un numero di possibili percorsi rappresentati nel FT. Inoltre l'evento critico rappresenta anche il punto iniziale di un ET che a sua volta è usato per modellare le potenziali conseguenze indotte dal quello specifico incidente sugli elementi esposti di interesse.

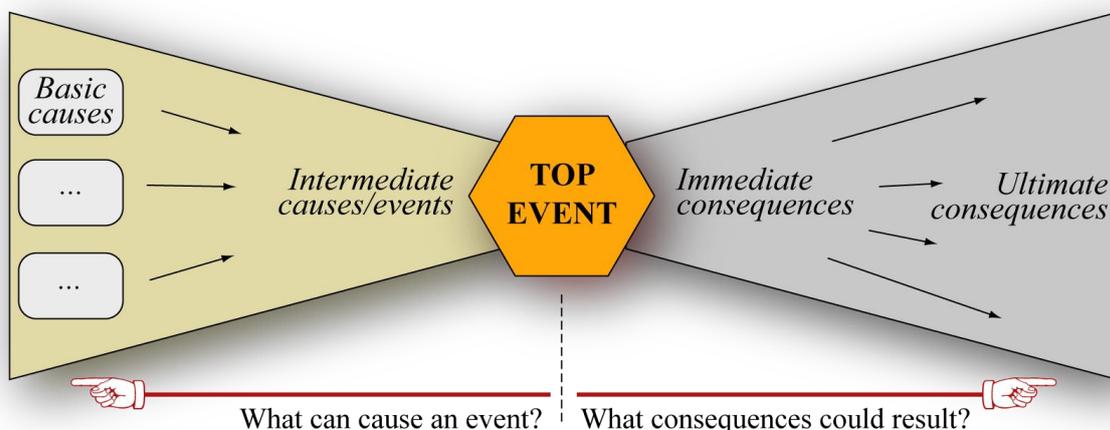


Figura 5. Generica struttura bow-tie

#### 4. ESEMPI DI APPLICAZIONI DELL'APPROCCIO MULTI-RISCHIO DI AMRA

AMRA ha partecipato e guidato diverse iniziative rivolte da un lato ad ulteriori sviluppi teorici dell'approccio multi-rischio messo a punto e, dall'altro, all'applicazione di questo approccio ai casi di incidenti industriali innescati da eventi naturali (NaTech). La prima di tali esperienze è stata effettuata nell'ambito del progetto Na.R.As. (Natural Risk Assessment), finanziato dalla Commissione Europea nel Sesto Programma Quadro. Uno dei principali obiettivi di Na.R.As. è stato lo sviluppo di una metodologia

multi-rischio, recepita poi dalla Commissione Europea attraverso le Linee Guida prodotte [24]. Tale metodologia è stata applicata ad un sito industriale per lo stoccaggio di GPL localizzato in un'area del comune di Casalnuovo (NA) potenzialmente esposta a eventi sismici, vulcanici e alluvionali [17, 24]. Casalnuovo è un comune della provincia di Napoli situato a circa 12-13 km a NE del Monte Vesuvio. Data la sua particolare collocazione geografica, il comune di Casalnuovo è esposto a diversi rischi naturali: caduta di ceneri vulcaniche dal Monte Vesuvio, terremoti originatisi dalla faglia dell'Irpinia e piccole alluvioni per la presenza sul territorio di un piccolo corso d'acqua che attraversa il centro abitato. Sul territorio comunale insistono anche sorgenti di rischio antropico rappresentate da piccole fabbriche e discariche illegali (Fig. 6).

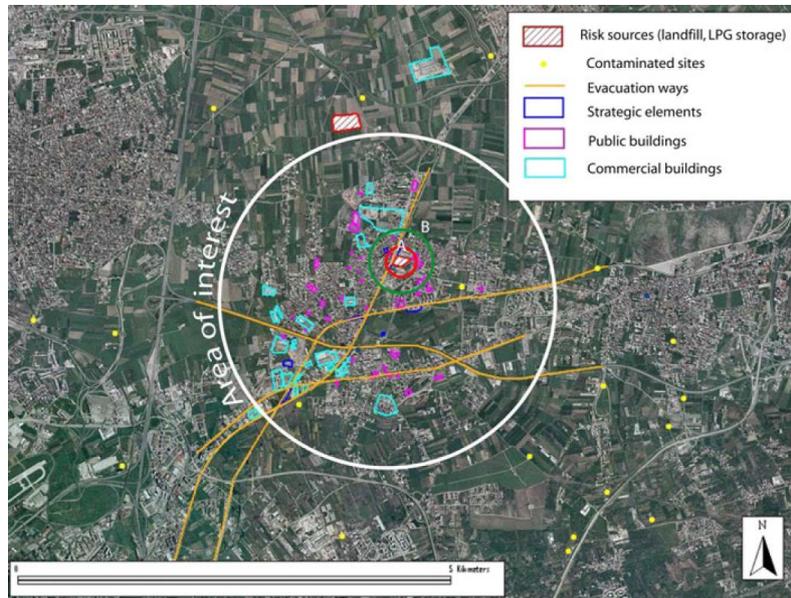


Figura 6. Comune di Casalnuovo: principali sorgenti di rischio antropico e distribuzione spaziale degli edifici e delle infrastrutture [16, 17]

L'esempio del comune di Casalnuovo costituisce la prima applicazione ad un caso reale dell'approccio multi-rischio messo a punto da AMRA. In questo caso l'enfasi è posta non tanto sull'analisi multi-rischio per l'intero territorio comunale esaustiva di tutte le sorgenti di rischio presenti sul territorio, bensì sulla metodologia da adottare per rendere confrontabili i rischi che insistono su una data area e valutare i possibili effetti a cascata. Il caso preso in esame prevede diverse sorgenti naturali di rischio (sismico, vulcanico, idraulico e da frane), un rischio di origine antropica (rischio di esplosione di una condotta per il trasporto di GPL) e di quello correlato al verificarsi di un particolare scenario di interazione tra sorgenti di rischio (collasso di una condotta per il trasporto di GPL per effetto del carico di ceneri vulcaniche). Al fine di procedere ad un confronto tra i vari rischi e, conseguentemente, ad una loro gerarchizzazione, l'analisi di ciascun rischio è stata svolta con riferimento alla stessa finestra temporale (1 anno) ed a uno stesso danno atteso (perdita di almeno una vita umana). L'analisi multi-rischio ha mostrato che il rischio vulcanico è senz'altro maggiore rispetto agli altri rischi presi in considerazione e che il rischio industriale (esplosione di una condotta per il trasporto di GPL) è nettamente sottostimato nel caso in cui siano trascurate le interazioni tra il rischio vulcanico stesso e quello industriale. Le stime di rischio ottenute (tutte riferite alla stessa finestra temporale di un anno) sono riportate di seguito:

$$\text{Rischio vulcanico: } R_{\text{Volc}} = 1.37 \times 10^0$$

$$\text{Rischio sismico: } R_{\text{Seis}} = 5.00 \times 10^{-3}$$

$$\text{Rischio alluvioni: } R_{\text{Flood}} = 4.20 \times 10^{-5}$$

$$\text{Rischio industriale indotto dall'attività vulcanica } R_{\text{I\&V}} = 3.20 \times 10^{-6}$$

$$\text{Rischio frane: } R_{\text{Land}} = 6.00 \times 10^{-7}$$

$$\text{Rischio industriale: } R_{\text{Ind}} = 1.83 \times 10^{-7}$$

Un esempio più recente di applicazione dell'approccio multi-rischio di AMRA alla valutazione degli effetti di eventi NaTech è quello relativo al progetto CRISMA (Modelling crisis management for improved action and preparedness), finanziato dalla Commissione Europea nel Settimo Programma Quadro. Nel caso studio preso in esame sono stati individuati diversi scenari di effetti a cascata indotti da una potenziale sequenza sismica in una data area individuata nella provincia de L'Aquila [25, 26]. L'applicazione ha avuto come

obiettivo non solo la valutazione dei danni diretti indotti dalla sequenza sismica sull'edificio, ma anche la quantificazione dei danni indotti da uno scenario a cascata in cui una linea della rete elettrica, danneggiata dal sisma, innesca a sua volta un incendio. Nella Figura 7a è riportato un sottoinsieme degli scenari di effetti a cascata individuati per il caso studio. Le Figura 7b e 7c illustrano rispettivamente una mappa dei danni strutturali attesi per effetto del mainshock e della successiva sequenza sismica innescata. Infine la Figura 7d riporta una mappa della probabilità di innesco di incendi, per effetto di un danno potenziale arrecato in diversi segmenti della rete elettrica dal sisma, e del combustibile disponibile nelle aree prospicienti.

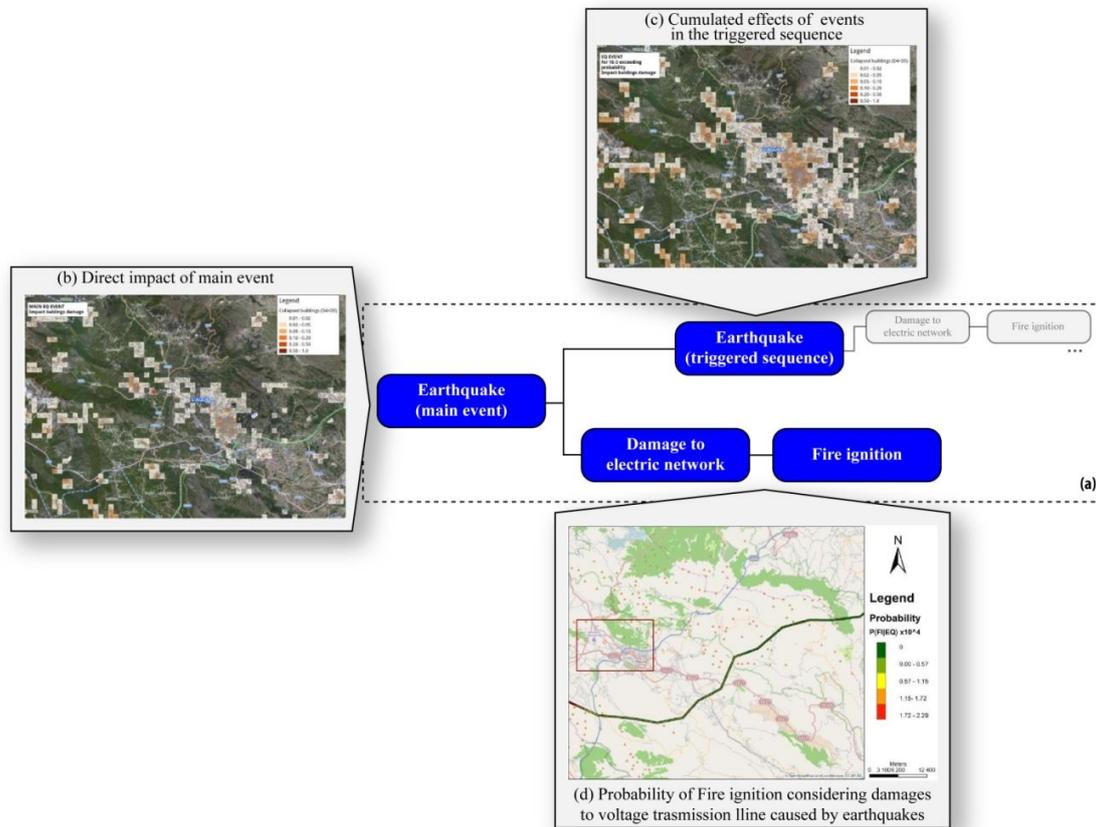


Figura 7. Scenari di effetti a cascata innescati da terremoti (modificata da: [25])

## 5. APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO MULTI-RISCHIO ALLE PIATTAFORME OFFSHORE

Tra le esperienze recenti di AMRA nell'applicazione di un approccio multi-rischio a supporto delle valutazioni NaTech vi è il progetto ARGO (Analisi dei Rischi naturali e antropogenici delle piattaforme petrolifere Off-shore) che AMRA coordina nell'ambito di una collaborazione con la DGS-UNMIG del Ministero dello Sviluppo Economico.

Il progetto ARGO si prefigge un duplice obiettivo:

- sviluppare metodologie per l'analisi dei rischi naturali e antropici nel settore della sicurezza e protezione degli impianti petroliferi off-shore;
- fornire supporto tecnico per l'elaborazione di raccomandazioni derivanti dalle analisi svolte.

L'obiettivo finale del progetto è l'implementazione di un modello multi-hazard e multi-rischio per la valutazione integrale di rischi NaTech sulle piattaforme off-shore.

Il modello multi-rischio che AMRA sta mettendo a punto in ARGO è orientato verso valutazioni quantitative con riferimento all'accadimento di eventi estremi.

I principali obiettivi della prima fase di sviluppo del modello multi-rischio sono:

- Identificazione delle tipologie di "grandi rischi" (sversamenti o spills, incendi, ecc.) che possano avere un impatto nell'ambiente circostante;
- Individuazione degli scenari di cascate di eventi che possono causare i grandi rischi identificati (Fig. 8);
- Implementazione di un approccio probabilistico per la quantificazione degli scenari di eventi a cascata identificati.

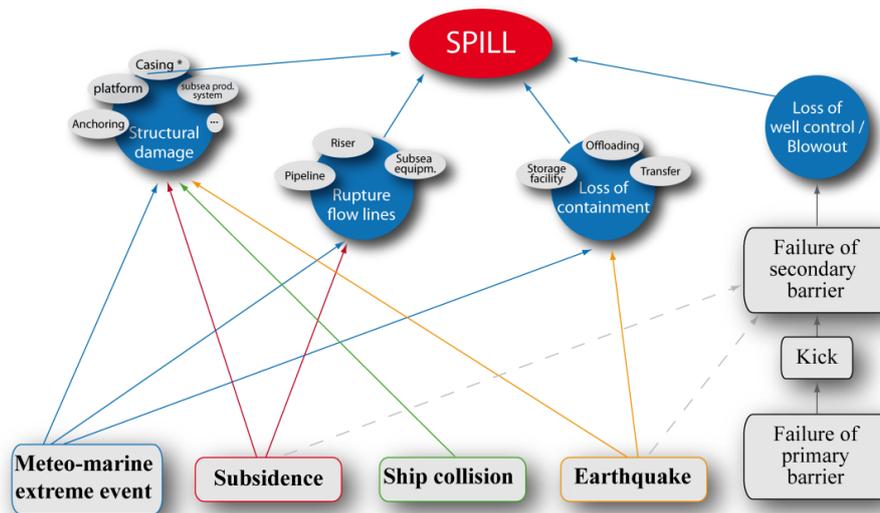


Figura 8. Esempio di scenari di evento che possono causare la fuoriuscita (spill) di idrocarburi (in diverse fasi).

Tenendo conto dell'ambiente nel quale le piattaforme operano, la definizione degli scenari di eventi a cascata tiene conto delle possibili sorgenti di innesco (triggering events) che possono originarsi nell'atmosfera (es. tempeste di vento, fulminazioni, ecc.), all'interfaccia atmosfera-mare (trombe marine, onde anomale, ecc.), all'interfaccia del fondale marino (es. frane sottomarine o liquefazione del suolo), oppure nella terra solida sottostante (es. terremoti) (Fig. 9).

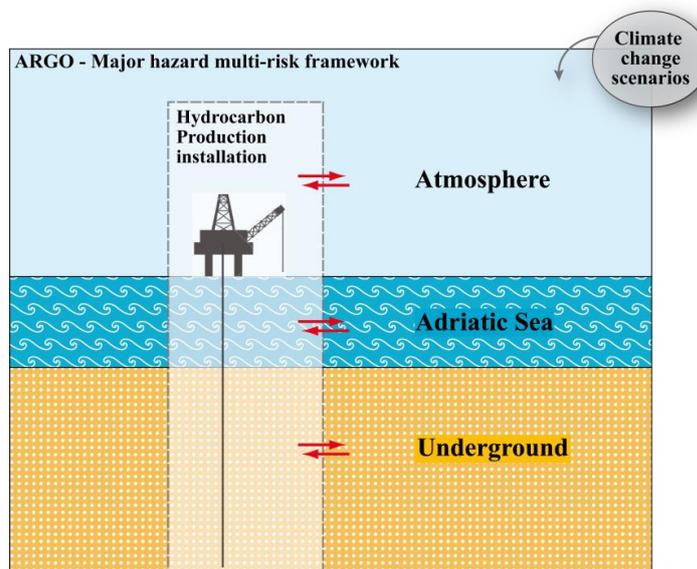


Figura 9. Ambienti in cui possono originarsi sorgenti di innesco di cascate di eventi che possono causare incidenti nelle piattaforme offshore.

La Direttiva 2013/30/UE e il suo recente recepimento nazionale con D.Lgs 145/2015, prevede che per ogni piattaforma venga redatta una relazione sui “Grandi rischi”, dove per grandi rischi si intendono sia gli “incidenti gravi”, ovvero un evento severo che provoca diversi infortuni (>5) e fatalità, sia i “quasi incidenti” (near misses) definiti come accadimenti che non determinano né fatalità né danni ma che, al variare delle condizioni al contorno, hanno la potenzialità di evolvere in un incidente grave [27].

### 5.1 Descrizione concettuale del modello

Per lo sviluppo di scenari, l'approccio considera tre diverse fasi di sviluppo di un progetto: (1) la fase di perforazione dei pozzi; (2) la fase di operazione (produzione), e (3) la fase di abbandono del sito (Fig. 10). Ognuna di queste fasi ha delle caratteristiche particolari e pertanto i possibili scenari possono essere di natura

diversa. Sulla base delle precedenti definizioni gli scenari sono sviluppati in funzione della tipologia dei grandi rischi considerati, i quali a loro volta possono essere valutati come il risultato di una o più possibili sequenze di eventi. Ad esempio, la Figura 11 mostra diverse tipologie di effetti indesiderati che possono costituire grandi rischi in una piattaforma offshore.



Figura 10. Definizione degli scenari considerando le diverse fasi del progetto.

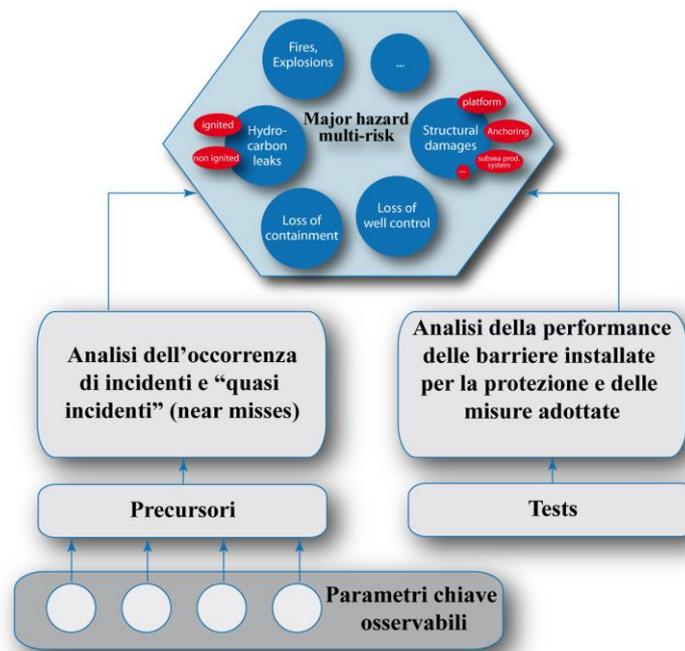


Figura 11. Esempio di possibili effetti indesiderati che possono risultare come conseguenza di eventi a cascata in una piattaforma offshore.

L'approccio multi-rischio in questo caso è implementato per l'identificazione delle sequenze di eventi (scenari) che possano dare origine a tali effetti indesiderati, e per la loro quantificazione. Nella Figura 9 è schematizzata una tipica evoluzione di scenari che portano ad una particolare tipologia di evento indesiderato (in questo caso versamenti -spills-). La quantificazione nell'approccio del progetto ARGO si basa su analisi statistiche di dati. Pertanto, quando i dati per la valutazione degli scenari risultano insufficienti, è necessario definire strategie per superare questa limitazione. A questo proposito, il vantaggio, ai fini della prevenzione e dell'analisi dei rischi, di considerare i "quasi incidenti" (near misses) e i relativi precursori per la definizione dei Grandi Rischi è in sostanza la possibilità di disporre di una maggiore quantità di informazioni [27] (Fig. 11).

In questo contesto, se esistono dati sufficienti, le probabilità possono essere calcolate usando metodi statistici convenzionali. Generalmente però gli incidenti associati a grandi rischi sono eventi rari ed i dati a disposizione sono molto limitati, per cui l'uso di metodi convenzionali potrebbe produrre stime inconsistenti con enormi bias (addirittura valori di probabilità pari a zero quando non esistono dati). Quindi in molti casi per questo tipo di analisi multi-rischio si ritiene un'alternativa valida e promettente utilizzare metodi probabilistici che includano anche i dati relativi ai mancati incidenti e i possibili eventi precursori [28].

Nelle analisi probabilistiche multi-rischio un evento di grande rischio è scomposto in una serie di eventi che possono contribuire al verificarsi di un incidente grave e per i quali esiste sufficiente informazione (in termini di dati storici oppure di modelli). Le probabilità dei singoli eventi della serie (che possono essere stimate impiegando metodi convenzionali oppure statistica Bayesiana), sono poi integrate usando tecniche convenzionali quali event trees oppure fault trees. Risulta particolarmente utile un approccio misto che integri gli eventi e i parametri precursori (tipo "bow-tie"). Un esempio dell'implementazione di questa tipologia di struttura è presentato nella Figura 12 per uno specifico scenario corrispondente a una fase di perforazione.

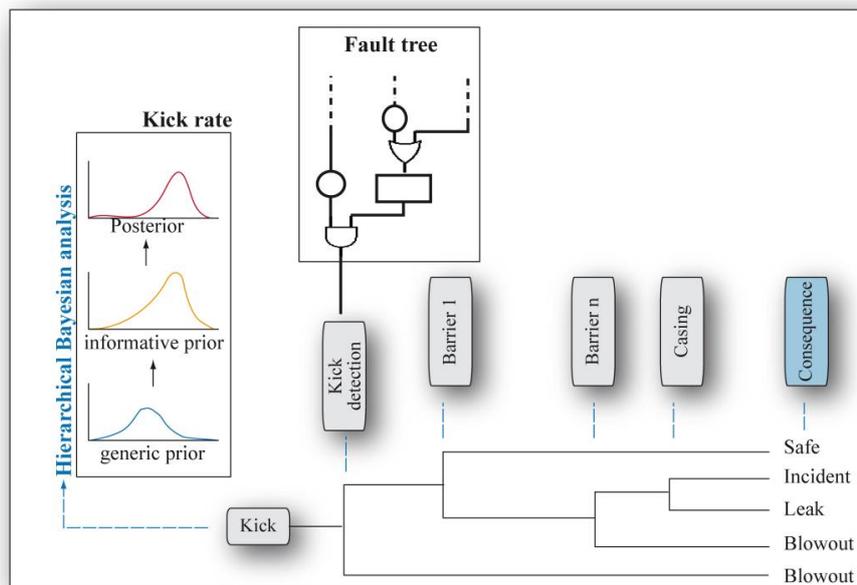


Figura 12. Esempio dell'implementazione di un meccanismo "bow-tie" per la valutazione degli scenari

## RIFERIMENTI

- [1] Steinberg, L. J. and Cruz, A. M., When Natural and Technological Disasters Collide: Lessons from the Turkey Earthquake of August 1999, *Natural Hazards Review*, 5, No. 3, 2004, pp. 121-130.
- [2] Woo, Gordon, *Calculating catastrophe*, World Scientific, 2011.
- [3] Krausmann, E., Renni, E., Cozzani, V. and Campedel, M., Major industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: Results of a database analysis, *Natural Hazards*, 59/1, 2011, pp. 285-300.
- [4] Lanzano, G., Salzano, E., Santucci De Magistris, F., Fabbrocino, G., Seismic vulnerability of natural gas pipelines, *Reliability Engineering & System Safety*, 117, 2013, pp. 73-80.
- [5] Lanzano, G., Salzano, E., Santucci De Magistris, F., Fabbrocino, G., Seismic vulnerability of gas and liquid buried pipelines, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 28, 2014, pp. 72-78.
- [6] Fabbrocino, G., Iervolino, I., Orlando, F., Salzano, E., Quantitative Risk Analysis of oil storage facilities in seismic areas, *Journal of Hazardous Materials*, 123, 2005, pp. 61-69.
- [7] Lanzano, G., Santucci De Magistris, F., Fabbrocino, G., Salzano, E., Seismic damage to pipelines in the framework of Na-Tech risk assessment, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 33, 2015, pp. 159-172.

- [8] Salzano, E., Garcia Agreda, A., Di Carluccio, A., Fabbrocino, G., Risk assessment and early warning systems for industrial facilities in seismic zones, *Reliability Engineering & Systems Safety*, 94, 2009, pp. 1577-1584.
- [9] Hall, J. F., Northridge Earthquake of January 17, 1994, reconnaissance report. Vol. 1. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, 1995.
- [10] Cozzani, V., Campedel, M., Renni, E. and Krausmann E., Industrial accidents triggered by flood events: analysis of past accidents, *Journal of Hazardous Materials*, 175, 2010, pp. 501.
- [11] FEMA, Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis - Report P-646, 2008, Redwood City, CA: Federal Emergency Management Agency.
- [12] Salzano, E. and Basco, A., Simplified model for the evaluation of the effects of explosions on industrial target. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 37, 2015, pp. 119–123.
- [13] Krausmann, E. and Baranzini, D., Natech risk reduction in the European Union, *Journal of Risk Research*, 15/8, 2012, pp. 1027.
- [14] Renni, E., Krausmann, E. and Cozzani, V., Industrial accidents triggered by lightning, *Journal of Hazardous Materials*, 184, 2010, pp. 42.
- [15] Rossini, V., Carli, P., Analisi Natech per gli impianti chimici industriali, Sicurezza sismica degli impianti chimici a rischio di incidente rilevante ENEA Roma - 7 febbraio 2013
- [16] European Commission, Commission staff working paper: risk assessment and mapping guidelines for disaster management, Technical report, European Commission, Brussels, 2010.
- [17] Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal A., Gasparini P., Mastellone M. L., and Di Ruocco A., Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy, *Nat. Hazards*, 62, No. 2, 2012, pp. 551-573.
- [18] Gasparini, P. and Garcia-Aristizabal, A., Seismic risk assessment, cascading effects in *Encyclopedia of earthquake engineering* (Beer, M., Patelli, E., Kougoumtzoglou, I. and Au, I. Eds.), Springer Reference, Springer, Berlin/Heidelberg, 2014, pp 1–20.
- [19] Liu, Z., Nadim, F., Garcia-Aristizabal, A., Mignan, A., Fleming, K. & Luna B., A three-level framework for multi-risk assessment, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 9, 2015.
- [20] Garcia-Aristizabal, A., Gasparini, P. & UHINGA, G., Multi-risk assessment as a tool for decision-making in Climate change and urban vulnerability in Africa (Pauleit et al., Eds.), *Future Cities*, 4, Springer, 2015, pp 229-258.
- [21] Lee, K.H. and Rosowsky, D.V., Fragility analysis of woodframe buildings considering combined snow and earthquake loading, *Struct Saf* 28(3), 2006, pp 289–303.
- [22] Zuccaro, G., Cacace, F., Spence, R., Baxter, P., Impact of explosive eruption scenarios at Vesuvius, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 178(3), 2008, pp 416–453.
- [23] Rausand, M. and Høyland, A., *System reliability theory: models, statistical methods, and applications*, John Wiley & Sons, 2004.
- [24] Marzocchi, W., Mastellone, M.L., Di Ruocco, A., Novelli, P., Romeo, E., Gasparini, P., Principles of multirisk assessment: interaction amongst natural and man-induced risks (Project report), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2009.
- [25] Garcia-Aristizabal, A., Polese, M., Zuccaro, G., Almeida, M. and Aubrecht, C., Improving emergency preparedness with simulation of cascading events scenarios, *Proceedings of the 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management* (Palen, Buscher, Comes and Hughes, eds.), Kristiansand, Norway, 2005.
- [26] Garcia-Aristizabal, A., Almeida, M., Aubrecht, C., Polese, M., Ribeiro, L.M., Viegas, D. and Zuccaro, G., Assessment and management of cascading effects triggering forest fires in *Advances in Forest Fire Research* (D. Viegas, Ed.), 2014, pp 1073-1085.
- [27] Kirchsteiger, C., Impact of accident precursors on risk estimates from accident databases, *Loss Prev. Process. Ind* 10, 1997, 159–167.
- [28] Quigley, J., & Revie, M., Estimating the Probability of Rare Events: Addressing Zero Failure Data. *Risk Analysis*, 31(7), 2011, pp 1120–1132.